

von

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger  
Hassan Youssef  
Dr.-Ing. Raik Hartmann  
Dr.-Ing. Tammam Bakeer  
Martin Kollna  
Dr.-Ing. Maik Erler

BBSR-  
Online-Publikation  
19/2022

# Rezyklierbarer, demontierbarer, energiehocheffizienter, massiver Musterbau (ReDeMaM)



# Rezyklierbarer, demontierbarer, energiehocheffizienter, massiver Musterbau (ReDeMaM)

Praktische Umsetzung eines Musterhauses in Trockenbauweise

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-17.55

Projektlaufzeit: 09.2017 bis 12.20

## IMPRESSUM

### Herausgeber

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

### Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure  
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“  
zb@bbr.bund.de

### Autoren

Planungs- und Ingenieurbüro für Bauwesen, Radebeul  
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger (Projektleitung)  
w.jaeger@jaeger-ingenieure.de

(bis 03/2020:  
TU Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung,  
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger)

Dipl.-Ing. Hassan Youssef  
Dr.-Ing. Raik Hartmann  
Dr.-Ing. habil. Tammam Bakeer  
Dipl.-Ing. Architekt Martin Kollna (bis 06/2018)  
Dr.-Ing. Maik Erler

### Stand

Dezember 2020

### Bildnachweis

Titelbild: Timm Ziegenthaler

Die Abbildungen stammen von den Autoren, soweit am Bild nicht anders ausgewiesen. Bilder Dritter sind im Kapitel 12 mit aufgelistet.

### 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

Jäger, Wolfram; Youssef, Hassan; Hartmann, Raik; Bakeer, Tammam; Kollna, Martin; Erler, Maik: Rezyklierbarer, demontierbarer, energiehocheffizienter, massiver Musterbau (ReDeMaM): Praktische Umsetzung eines Musterhauses in Trockenbauweise. BBSR-Online-Publikation 19/2022, Bonn, Juni 2022.

Mitfinanziert durch:

**DW Systembau GmbH Brespa**

Stockholmer Straße 1, 29640 Schneverdingen

**Schüco International KG**

Karolinenstraße 1-15, 33609 Bielefeld

**VARIOTEC GmbH & Co. KG**

Weißmarterstraße 3-5, 92318 Neumarkt/OPf.

**Eternit GmbH Deutschland**

Dyckerhoffstr. 95-105, 59269 Beckum

**URSA Deutschland GmbH**

Fuggerstr. 1d, 04158 Leipzig

**Paul Bauder GmbH & Co. KG**

Korntaler Landstraße 63, 70499 Stuttgart

**Steico SE**

Otto-Lilienthal-Ring 30, 85622 Feldkirchen

**OWA Odenwald Faserplattenwerk GmbH**

Dr.-F.-A.-Freundt-Str. 3, 63916 Amorbach

**Baustoffwerke Dresden GmbH & Co. KG (HplusH)**

Radeburger Str. 30, 01129 Dresden

**Adolf Würth GmbH & Co. KG**

Reinhold-Würth-Straße 12-17, 74653 Künzelsau

**EGGER Holzwerkstoffe Wismar GmbH & Co. KG**

Am Haffeld 1, 23970 Wismar

**RHEINZINK GmbH & Co. KG**

Veltener Str. 33, 16761 Hennigsdorf

**Deutsche FOAMGLAS GmbH**

Schockenriedstr. 4, 70565 Stuttgart

**Sita Bauelemente GmbH**

Ferdinand-Braun-Str. 1, 33378 Rheda-Wiedenbrück

**Wilhelm Modersohn GmbH & Co KG**

Eggeweg 2a, 32139 Spenge

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1	Zum Projekt	9
1.2	Problemstellung	9
1.3	Projektziele	10
1.4	Lösungsansatz, Methode	12
1.5	Zum Bericht	14
<b>2</b>	<b>Grundlagen/Teilergebnisse aus REMOMAB, 0-EneMau und RC-WE-Mod</b>	<b>15</b>
2.1	Grundlagen und Teilergebnisse aus REMOMAB	15
2.1.1	Wand	15
2.1.2	Decke	17
2.1.3	Fundament	18
2.1.4	Wandöffnungen	19
2.1.5	Bewertung der Nachhaltigkeit	19
2.2	Grundlagen und Ergebnisse aus 0-EneMau	20
2.3	Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „RC-WE-Modul“	22
<b>3</b>	<b>Rohbauplanung des Experimentalbaus</b>	<b>25</b>
3.1	Einleitung und Vorgehensweise	25
3.2	Rahmenbedingungen zum Entwurf des Experimentalbaus	25
3.3	Grundprinzip der Bauweise und deren Umsetzung	28
3.3.1	Fundamente und Unterkellerung	29
3.3.2	KS-Wände in trockener Bauweise - entwickelter Kalksandstein	31
3.3.3	Kreuzverbinder	32
3.3.4	Ringanker	33
3.3.5	Deckenplatten-System	35
3.3.6	Zusammenfassung	37
<b>4</b>	<b>Entwicklung des Ausbaus</b>	<b>38</b>
4.1	Theoretische Grundlagen und Zielsetzung	38
4.1.1	Einleitung und Zielsetzung	38
4.1.2	Demontierbarkeit	39
4.1.3	Rezyklierbarkeit	40
4.1.4	Einfluss der Verbindungstechnik	46
4.1.5	Stand der Wissens und Referenzobjekte	48
4.2	Rahmenbedingungen für das entwickelte Ausbau-System	55
4.2.1	Fassendaufbau	55
4.2.2	Mehrschichtige einschalige Wand	55
4.2.3	Zweischaliges Mauerwerk	55
4.2.4	Vorgehängte Fassade	56
4.3	Komponente des entwickelten Ausbau-Systems	57
4.3.1	Fassadenkomponente aus dem Rohbau	57
4.3.2	Vorgeschlagenes Dämmsystem - Vakuumdämmpaneele	58
4.3.3	Befestigung der Paneele	60
4.4	Vorgeschlagene Fassadensysteme für ein Musterhaus	62
4.4.1	Anwendung des Click-Brick-Fassadensystems	62
4.4.2	Entwickeltes Fassadensystem aus Textilbetonplatten	65
4.4.3	Fassadensystem aus Holz-Stegträgern und Eternitplatten	68

4.5	Detailplanung des Ausbaues	71
	4.5.1 Sockel	72
	4.5.2 Fensteranschluss	75
	4.5.3 Türanschluss	77
	4.5.4 Loggia	78
	4.5.5 Balkon	80
	4.5.6 Flachdach, Dachaufbau und Attikaausbildung	80
4.6	Wärmebrückensimulation	83
	4.6.1 Sockel	83
	4.6.2 Fenster	84
	4.6.3 Loggia	84
	4.6.4 Balkon	85
	4.6.5 Attika	86
4.7	Ökobilanz	86
4.8	Auswertung der entwickelten Fassadenlösungen	88
4.9	Rahmenbedingungen zum entwickelten Innenausbau-System	89
	4.9.1 Grundlagen und Ziele	89
	4.9.2 Stand der Forschung	89
	4.9.3 Vorgehensweise/Auswahlkriterien	90
	4.9.4 Konstruktive Lösungen/ Rahmenbedingungen	91
	4.9.5 Besondere Anforderungen	91
	4.9.6 Fußbodenaufbau	91
	4.9.7 Fußbodenaufbau für die Variante ohne Unterkellerung	97
	4.9.8 Wandausbau	98
	4.9.9 Wandverkleidungssystem-Ausführung	101
	4.9.10 Deckenausbau	106
	4.9.11 Beleuchtung	111
	4.9.12 Allgemeine Kostenschätzung für den Innenausbau	113
	4.9.13 Prüfung der Wohnqualität	114
	4.9.14 Auswertung des entwickelten Innenausbausystems	117
<b>5</b>	<b>Errichtung des Versuchsbaues</b>	<b>118</b>
5.1	Einleitung	118
5.2	Herstellung der Rohbauteile	118
	5.2.1 Herstellung der Fundamentsteine und Ringankersteine	118
	5.2.2 Vorfertigung der Kalksandsteine und Kreuzverbinder	119
	5.2.3 Herstellung der Deckenplatten	121
5.3	Errichtung der Streifenfundamente	121
5.4	Ausführung der reduzierten Unterkellerung	123
5.5	Errichtung des Erdgeschosses	126
	5.5.1 Ausgleichschichten	126
	5.5.2 Aufmauern der EG-Wände unter Anwendung der Kreuzverbinder	127
	5.5.3 Montage des Ringankers im EG	129
	5.5.4 Montage der Deckenplatten über EG	131
	5.5.5 In Situ Untersuchung- Belastungstestes	134
5.6	Auswertung der ersten Montage	137
<b>6</b>	<b>Erster Rückbau</b>	<b>138</b>

<b>7</b>	<b>Fertigstellung des Rohbaus</b>	<b>139</b>
7.1	Obergeschoss	139
7.2	Attika	140
<b>8</b>	<b>Montage des Ausbaues</b>	<b>142</b>
8.1	Allgemeines	142
8.2	Dachaufbau/Attikaaufbau	142
	8.2.1 Vorbereitung/Verfüllung/Ausgleich/Dampfsperre	142
	8.2.2 Ausführung der Dampfsperre	143
	8.2.3 Ausführung der Dämmebenen	144
	8.2.4 Ausführung der Dachabdichtung	146
	8.2.5 Ausführung-Einbauten	151
	8.2.6 Ausführung des Gründachaufbaus	153
	8.2.7 Ausführung des Attikaaufbaus	154
	8.2.8 Auswertung der Dach-Attika-Abdichtung	157
8.3	Fußbodenaufbau	157
8.4	Fassadenausbau	159
	8.4.1 VIP-Dämmung mit exemplarischem Click-Brick-System	159
	8.4.2 Fassadensystem aus Stegträgern und Eternitplatten	161
8.5	Treppe	165
8.6	Weitere Ausbaugewerke	166
<b>9</b>	<b>Rückbau des Experimentalbaus</b>	<b>167</b>
9.1	Allgemeines	167
9.2	Rückbau des Ausbaues	167
	9.2.1 Rückbau der Fassade und der Fenster/Fenstertüren	167
	9.2.2 Rückbau des Fußbodenaufbaus und der Treppe	170
	9.2.3 Rückbau des Dachaufbaus und der Attikaabdeckung	172
9.3	Rückbau des Rohbaus	176
	9.3.1 Ziel	176
	9.3.2 Rückbau des Attikageschosses	176
	9.3.3 Rückbau des Obergeschosses	178
	9.3.4 Rückbau des Erdgeschosses	180
	9.3.5 Fundamente	181
9.4	Logistik und Transport nach dem Rückbau	183
9.5	Auswertung des Rückbaus	183
	9.5.1 Auswertung der Demontage (Ablauf und Qualität):	183
	9.5.2 Arbeitskräfte und Arbeitsmittel	184
<b>10</b>	<b>Umsetzung des Experimentalbaus an einen neuen Standort / Prüfung der Baumobilität und Änderung der Bauform</b>	<b>185</b>
10.1	Allgemeines/Rahmenbedingungen	185
10.2	Rahmenbedingungen/ Neue Bauform	185
10.3	Errichtung des Forschungsgebäudes in Meißen	188
	10.3.1 Allgemeines	188
	10.3.2 Umsetzung des Erdgeschosses	188
	10.3.3 Umsetzung des Obergeschosses und Attikageschosses	195
	10.3.4 Remontage des Ausbaues	200
10.4	Auswertung der Errichtung des Forschungsgebäudes	205
	10.4.1 Auswertung der Rückführbarkeit (Ablauf und Bauqualität):	205
	10.4.2 Arbeitskräfte und Arbeitsmittel	206

<b>11</b>	<b>Allgemeine Auswertung und Ausblick</b>	<b>207</b>
11.1	Auswertung der entwickelten Trockenbauweise - Rohbau und Ausbau	207
11.2	Schlussfolgerungen und Ausblick	212
<b>12</b>	<b>Quellen</b>	<b>213</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Zum Projekt

Entwicklung und Tendenzen im Mauerwerksbau stehen, wie im gesamten Bauwesen, im Zusammenhang mit Forderungen an die Ressourcenschonung, die Reduktion von Müll und die Rezyklierung der Baumaterialien. Vor diesem Hintergrund ist mit dem Forschungsprojekt „ReDeMaM“ ein Musterhaus konzipiert, aufgebaut, abgebaut und an anderer Stelle wiederaufgebaut worden. Es konnten damit die Grundprinzipien für ein umweltgerechtes und modernes Bauen gezeigt werden.

Der Projektname „ReDeMaM“ ist aus dem ausführlichen Projekttitel „Rezyklierbarer, Demontierbarer, Energiehocheffizienter und Massiver Musterbau“ durch Verkürzung entstanden.

Das Projekt wurde durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Rahmen des Innovationsprogramms Zukunft Bau gefördert. Mitfinanziert sowie fachlich unterstützt und durch Materialspenden ermöglicht wurde das Projekt durch die genannten Firmen auf Seite 4.

## 1.2 Problemstellung

Neben der Energieeffizienz bei der Nutzung von Gebäuden treten der Energieverbrauch bei der Herstellung und dem Bau sowie bei der Beseitigung von Gebäuden zukünftig eine immer größere Rolle. Dabei steht auch die Frage nach der Beseitigung der Restmaterialien. Gegenstand des Forschungsvorhabens ist deshalb eine energieeffiziente, rezyklierbare Trockenbauweise unter Ausschluss des Downcyclings von Restmaterialien.

Dem Bau des Musterhauses sind verschiedene Forschungsvorhaben voran gegangen:

- REMOMAB - Entwicklung von Grundprinzipien für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis [1]
- OENEMAU - Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards [2]
- RCWE - Entwicklung und Anwendung von komplett demontablen Wohneinheiten aus ressourcenschonendem Beton [3]

Die Ansätze und Lösungen wurden dabei i.W. Konstruktionsausschnitten in der Realisierung erprobt. Dazu gehörte auch der Rückbau. Lediglich bei dem Forschungsvorhaben RCWE wurde ein Gebäudemodul im Rohbau aufgebaut, zurückgebaut und an anderer Stelle wieder aufgebaut. Die Thematik wurde dabei aber nicht in Ihrer Komplexität überprüft. Weiter kam es bei dem vorliegenden Forschungsvorhaben darauf an, von auf dem Markt befindlichen Produkten auszugehen und diese im Sinne des Grundanliegens zu modifizieren, um die Marktakzeptanz der entwickelten Bauweise zu erhöhen. Auch stand die Frage, inwieweit „gebrauchte“ Bauteile 1:1 wiederverwendbar sind.

Die Mauerwerksbauweise ist eher als die Stahlbetonbauweise für den Ansatz, rückgebaute Bauelemente für einen erneuten Neubau wieder zu verwenden, geeignet. Mauerwerk ist selbst bis hin zur heute gängigen Elementgröße flexibler als der Stahlbeton. Die Ansätze der Wiederverwendung von Stahlbetonfertigteilen in Raumgröße [4] hat sich nicht durchgesetzt.

Mauerwerk kommt einschalig und zweischalig zum Einsatz [5]. Bei der einschaligen Ausführung haben entweder die Steine einen ausreichenden Transmissionswiderstand oder

bestehen aus zwei Schichten, die innig miteinander verbunden sind, was wieder für das Recycling ungünstig ist. Zweischaliges Mauerwerk hat, insbesondere in Gegenden mit hoher Schlagregenbeanspruchung, eine weite Verbreitung. Gestiegene Anforderungen an die Reduzierung der Transmissionswärmeverluste konnten bisher durch Vergrößerung der Dämmschichtdicken und der Schalenabstände erreicht werden. Diesen Tendenzen sind jedoch hinsichtlich der Effizienz der Gesamtkonstruktion hinsichtlich der Grundstücksausnutzung sowie der Gebäudenutzung Grenzen gesetzt. Die Zunahme der Dämmschichtdicke und die damit erreichbare Verringerung der Transmissionswärmeverluste verhalten sich nicht linear. Außerdem vergrößert sich mit zunehmenden Schalenabständen der Konstruktionsanteil am Gebäude.

Die Vakuumdämmtechnik hat in den letzten 15 Jahren eine rasante Entwicklung im Hochbau vollzogen. Bemühungen diese hocheffiziente Dämmtechnik in der Breite im Bauwesen einzusetzen sind wiederholt in den verschiedensten Einsatzgebieten zu finden. Eine systemische Einführung der Vakuumdämmtechnik (VIP-Dämmung) bei Mauerwerkskonstruktionen, insbesondere bei zweischaligem Mauerwerk, stellt in diesem Zusammenhang wegen der Effizienzsteigerung, einen Innovationsschub für den Mauerwerksbau dar. Den Verfassern ist der bestehende Gegensatz zwischen der gewöhnlichen Lebensdauer zweischaliger Mauerwerkswände und der momentan erreichbaren, vollen Funktionsdauer bei VIP-Dämmungen bewusst. Diesen Aspekt gilt es einerseits auf der Seite der Vakuumdämmung zu lösen und andererseits bietet der Ansatz des Verzichts auf das Verbundprinzip – wie bei den üblichen WDV-Systemen [6] - die Möglichkeit des einfachen Austausches. Natürlich werden mit dem Forschungsvorhaben auch weitere Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte offengelegt, die es noch zu bearbeiten gilt, um das Mauerwerk zukunftsfähig zu gestalten.

Gegenwärtig werden VIPs bei Neubauten vorrangig zur Lösung besonderer Details oder bei Bestandsbauten eingesetzt. Versuche, die Vakuumdämmtechnik im Mauerwerksbau einzuführen, sind bisher nicht über das Stadium von Pilotanwendungen hinweggekommen. Dies begründet sich zum einen dadurch, dass die Verbindungs- und Durchstoßproblematik nur unzureichend gelöst wurde, weil man dabei auf die Techniken, wie sie beim Einsatz von Mineralwoll- bzw. Schaumplatten bei zweischaligem Mauerwerk üblich sind, abgehoben hat. Zum anderen ist der hohe Preis wegen der geringen Produktionsmengen nicht marktfähig. Ein auf die konstruktiven Besonderheiten des Mauerwerksbaus abgestimmtes VIP-Dämmsystem, das auch den rauen Anforderungen einer gleichzeitigen Verarbeitung im Zuge der Errichtung der Vorsatzschale gerecht wird, wurde in [2] entwickelt und erfolgreich getestet.

Stahlbeton- und Mauerwerksbauten sind derzeit die Bauweisen mit dem höchsten Schuttaufkommen am Ende des Lebenszyklus. Beide Bauweisen leben von dem Verbund zweier Materialien, die schwer zu trennen sind. Werden sie gar nicht erst miteinander verbunden, lassen sie sich sortenrein trennen und einfacher auf gleicher Prozessstufe wieder verwenden. Die Reduzierung des Abfallaufkommens aus dem Gebäudebereich ist ein wichtiger Aspekt dieses Forschungsvorhabens.

### 1.3 Projektziele

Bei diesem Forschungsvorhaben werden die aus drei früheren Forschungsprojekten vorliegenden Ergebnisse im Entwurf Bau eines Musterhauses umgesetzt. Diese Forschungen ([1], [2] und [3]) wurden am Lehrstuhl für Tragwerksplanung der TU Dresden durchgeführt und ebenfalls im Rahmen des Innovationsprogramms Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung finanziert.

Das Musterhaus ist voll demontierbar und erfüllt alle Anforderung einer ansprechenden Architektur. Die Anwendung der Ergebnisse der vorangegangenen Forschungsprojekte in einem Gebäude schließt einerseits die Lücke zwischen Theorie und Praxis, andererseits werden sehr nützliche Details und Entwicklungskonzepte für die verwendeten, i.V. auf dem Markt

befindlichen Bauelemente während der Bau-, Rückbau- und Wiederverwendungsphasen unter Berücksichtigung der Anforderung der jeweiligen Phase erprobt.

Ein erster Entwurf für ein zweigeschossiges Musterhaus auf einer Grundfläche von etwa 50 m<sup>2</sup> wurde bereitgestellt (Bild 1). Dieser Entwurf basiert auf den schon erreichten Ergebnissen des Forschungsprojektes REMOMAB [1], 0EneMau [2] und RC-WE-Mod [3]. Das Musterhaus soll unterschiedliche Konstruktionsdetails, die in Wohnhäusern vorkommen (z.B. Fenster, Tür, Balkon, Treppe, Terrasse, Bad, Küche .... usw.), berücksichtigen. Dabei steht die modulare Abstimmung im Vordergrund. Die Bauphasen werden mit folgender Vorgehensweise bearbeitet: Nach dem Aufbauen des Musterhauses werden alle Aspekte der Energieeinsparung geprüft bzw. bewertet. Danach erfolgt der nächste Schritt, indem das schon aufgebaute Musterhaus demontiert wird und dessen Bauelemente zum erneuten Aufbau an anderem Standort wiederverwendet werden. Dabei ist eine grundsätzliche Modifikation der Grundrisse vorgenommen worden.

Es sollte eine vollständige Dokumentation der verschiedenen Projektphasen unter Berücksichtigung des Feedbacks von Fachexperten aller beteiligten Projektpartner, Fachingenieure und Forschungsmitarbeiter erarbeitet werden, um mögliche Verbesserungen an den Produkten vorzunehmen und letztendlich der Praxis ein umsetzbares Bauprodukt anzubieten. Dabei werden die notwendigen, bisher nicht vorhandenen Abstimmungen zwischen Roh- und Ausbau aufgezeigt.



Bild 1 Erster Entwurf eines Musterhauses als Arbeitsgrundlage [2]

Die Forschung in diesem Projekt zielt auf die Möglichkeiten und Notwendigkeiten umweltgerechten Bauens mit der notwendigen Energieeinsparung bei Herstellung, Nutzung und Rückführung am Ende des Lebenszyklus ab. Sie ist damit richtungsweisend für die beteiligten Industrien mit ihren Produkten, die zum Umdenken und Anpassen bereit sind. Das Projekt soll dazu eine Kampagne anregen und auslösen, die den hier demonstrierten Zielen und Lösungen zum Durchbruch verhilft. Allerdings sind auch von staatlicher Seite Maßnahmen notwendig, um dem kurzfristigen Denken vieler Baustoffhersteller ein Ende zu setzen, z.B. in dem zu jedem Bauprojekt ein Rückbau und Verwertungskonzept zu erarbeiten und bei genehmigungsbedürftigen Vorhaben auch zu prüfen ist. Weitere Forschungsarbeiten sind notwendig, um die vorgeschlagenen Lösungen zu komplettieren oder gängiger zu machen.

Folgende Teilziele wurden zu Beginn des Forschungsvorhabens definiert

- Praktische Überprüfung der theoretischen bzw. experimentellen Ergebnisse der vorangegangenen Forschungsprojekte
  - Umsetzung in ein Musterhaus bei Reduzierung der Anforderungen und gleichzeitiger Nutzung bereits am Markt eingeführter Produkte
  - Analyse von Problemstellen
  - Optimierung des Bausystems
- Ausarbeitung eines demontablen und wiederverwendbaren Komplettsystems vom Rohbau bis zum Ausbau
  - Entwicklung der Schnittstellen zwischen Roh- und Ausbau
  - Überprüfung und Bewertung der Realisierung eines demontablen Ausbaus
  - Aufzeigen der noch zu entwickelnden Bauelemente
- Nachweis über eine umweltverträgliche Bauweise bezogen auf den Ressourcenverbrauch
  - Überprüfung der Dauerhaftigkeit
  - Nachweis der Möglichkeit für Auf-, Ab- und Wiederaufbau mit
  - der Möglichkeit einer maximalen Flexibilität

#### 1.4 Lösungsansatz, Methode

Der Lösungsansatz liegt in der Umsetzung der in dem Forschungsprojekt „REMOMAB“ entwickelten Grundprinzipien für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis in einem Experimentalbau. Dazu musste eine Beschränkung erfolgen, um das Zusammenspiel aller Komponenten und Einflüsse erproben und erfassen zu können. Diese Beschränkung wurde dadurch erreicht, dass möglichst bereits am Markt befindliche Produkte und Systeme zum Einsatz kommen und die Anpassung an das Bausystem möglichst überschaubar sein sollten.

Dabei war prinzipiell auf das Verbundprinzip zu verzichten, um einen energiesparenden und effizienten Rückbau zu ermöglichen. Roh- und Ausbau waren dabei modular aufeinander abzustimmen, um die notwendigen Montagearbeiten effizient gestalten und Anpassarbeiten ausschließen zu können. Damit sollte auch auf der Grundlage einer stringenten Planung eine Produktivitätssteigerung erreicht werden.

Das zweite grundlegende Forschungsprojekt „0EneMau“ stellt ein speziell entwickeltes, modulares demontierbares Dämmsystem mit dem Einsatz von der modernen Vakuum-Isolations-Technologie und einem dazu passenden, thermisch optimierten Befestigungssystem aus speziellen glasfaserverstärkten Kunststoffteilen zum Erreichen des 0-Energie-Standardes in der Gebäudehülle zur Verfügung. Dieses System galt es mit dem Experimentalbau einer praktischen

Anwendung zu unterziehen und die Praxistauglichkeit zu prüfen sowie alternative Fassadensysteme zu untersuchen.

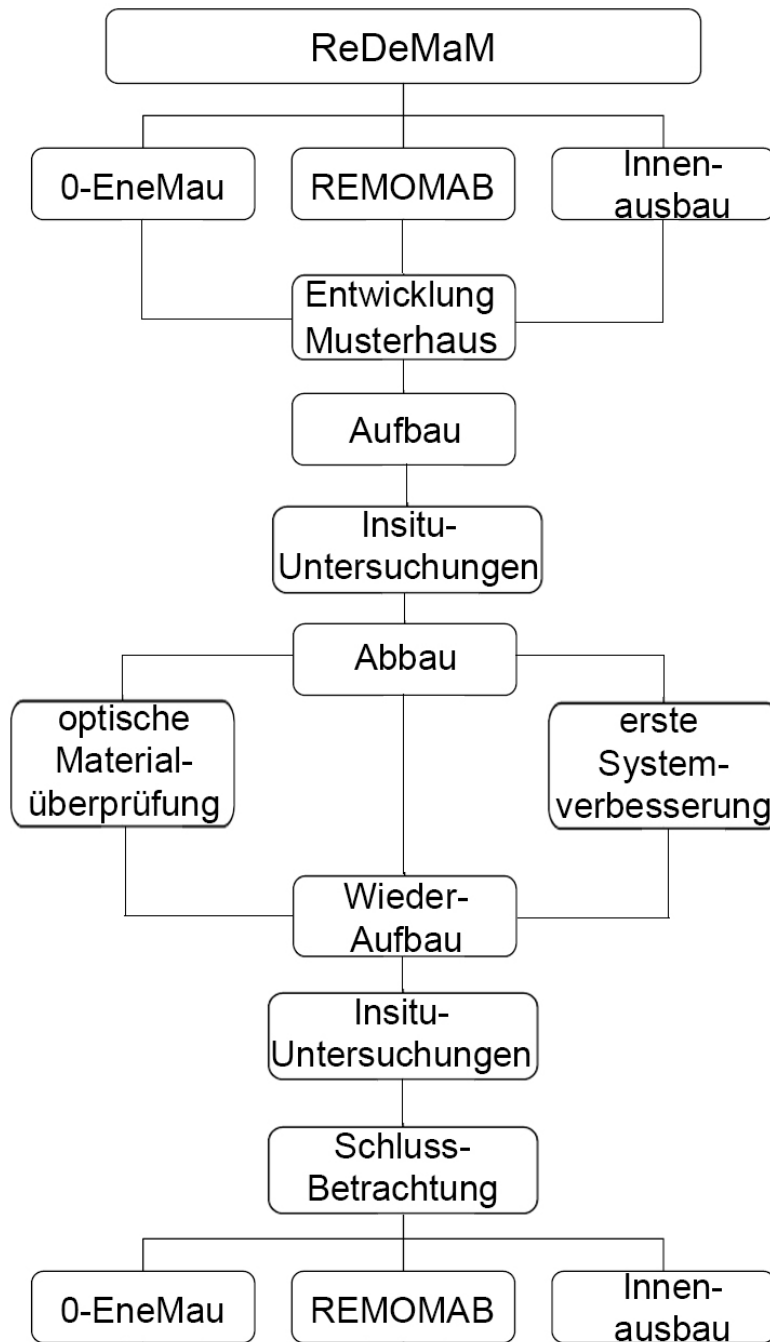


Bild 2 *Blockschema Methode*

Bild 2 fasst die gewählte Methode in Form eines Blockdiagramms zusammen. Die beiden Forschungsprojekte REMOMAB und 0-EneMau bildeten die Kernthemen. Der Ausbau war auf der Grundlage der Erkenntnisse aus REMOMAB praxistauglich weiter zu entwickeln.

- Kritische Auswahl von Lösungen aus dem Forschungsvorhaben REMOMAB und weitergehende Untersuchungen zur Fassade dem Vorhaben 0-EneMau folgend sowie Auswahl demontable Ausbaumöglichkeiten mit Sichtung geeigneter am Markt befindlicher Systeme
- Analyse der zu ändernden Parameter der beiden Vorgängerforschungen und am Markt befindlicher Systeme und Modifikationen zu diesen
- Entwicklung der Gebäudekonstruktion
  - Rohbau
  - Ausbau
- Aufbau des Experimentalbaus
- Insitu-Untersuchungen am stehenden Musterhaus
- Abbau und logistisch sinnvolle Zwischenlagerung
- Optische Überprüfung der wiederzuverwendenden Materialien und erste mögliche Systemverbesserungen
- Wiederaufbau an anderem Standort
- Erneute Insitu-Untersuchung
- Bewertung

## 1.5 Zum Bericht

In diesem Bericht wird eine Zusammenfassung aller gewonnenen Endergebnisse im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwicklung einer anwendbaren Trockenbauweise zum Einsatz beim Aufbau von demontierbaren, energiehocheffizienten Musterhäusern“ gegeben. Hierbei handelt es sich um die Darstellung verschiedener Phasen zur Entwicklung der angestrebten Trockenbauweise. Diesbezüglich werden in diesem Bericht die Planungs- und Bauzustände der errichteten Experimentalhäuser zusammengefasst. Dies betrifft sowohl den Rohbau als auch den Ausbau. Gewählte Konstruktionen und Systeme beschränken sich auf die im Rahmen dieser Arbeit sowie in REMOMAB, 0-EneMau und RC-WE-Modul entwickelten Systeme. Dazu kamen die angepassten und modifizierten Produkte der Projektpartner zum Einsatz.

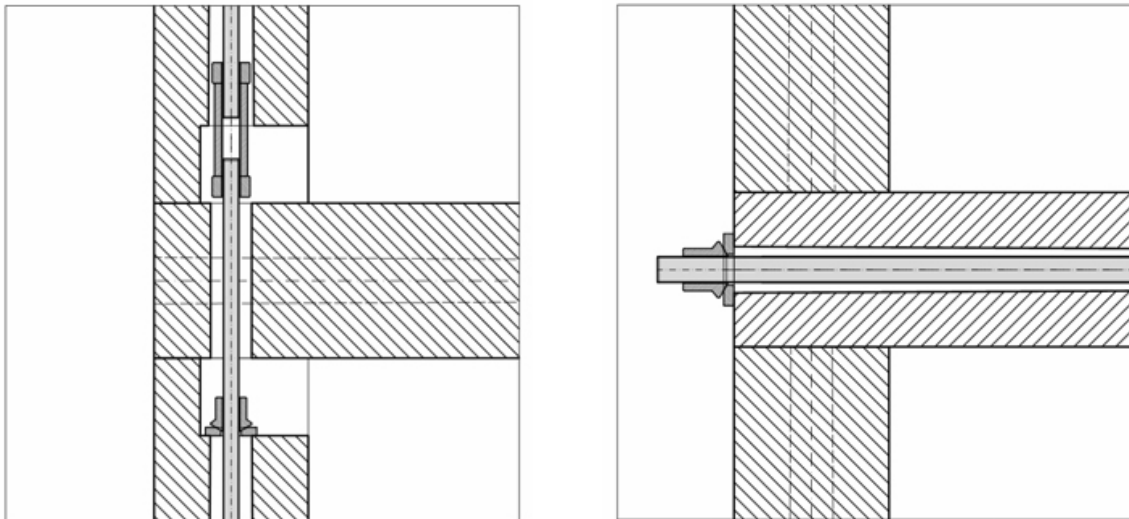
Die Umsetzung an einen neuen Standort mit stark modifiziertem Grundriss und anderer Nutzung ist abgeschlossen.

## 2 Grundlagen/Teilergebnisse aus REMOMAB, 0-EneMau und RC-WE-Mod

### 2.1 Grundlagen und Teilergebnisse aus REMOMAB

Das Ziel in REMOMAB war die Demontierbarkeit und sortenreine Trennbarkeit von Bauteilen und Bauelementen eines massiven Gebäudes bis zur sortenreinen Trennbarkeit der Einzelmaterialien im Falle eines Rückbaus. Wesentliche Erkenntnis dieses Vorhabens war, dass das Ziel am besten durch Verzicht auf jeglichen Verbund erreicht werden kann. Für den Mauerwerksbau hieß das, Verzicht auf die Fuge. Um im Rohbau bei Verwendung von Mauersteinen oder -elementen eine ausreichende Aussteifung erreichen zu können, muss lokal eine Verspannung erfolgen.

Die dabei vorgeschlagenen Lösungen für die systematische Verspannung sind aufwendig und schränken die Realisierbarkeit auf dem Markt ein. Dazu zählt auch die demontierbare und zerlegbare Decke, die noch nicht den Reifegrad erreicht hat, dass sie sich in der Praxis durchsetzen lässt.



vertikale Verspannung in Wand

b) horizontale Verspannung in der Decke

Bild 3 *Prinzip Wand-Decken-Knoten nach [1]*

#### 2.1.1 Wand

Für den Wandaufbau in REMOMAB wurden vor allem zwei verschiedene Verbindungssysteme ausgearbeitet und verglichen. Ein kleinteiliges System über Einzelsteine mit Kreuzverbindern und ein flächig wirkendes System mit einer linienhaften Verbindung. Folgend werden beide Varianten kurz vorgestellt.

##### Variante „Kreuzverbinder“

Die Grundidee liegt bei den Kreuzverbindern darin, dass die Kreuze sowohl die Verbindung zwischen den Steinen als auch die Fugenabdichtung übernehmen und wirken als Anschlusspunkte Innen und Außen (Bild 4). In den Steinen muss sich oben und unten eine Prägung befinden, in welche die Kreuzverbinder eingelegt werden können. Um dies ordnungsgemäß zu modularisieren, wurde sich an das oktametrische System angelehnt.

Dadurch entsteht ein Achsabstand von 125 mm. In Bild 4 werden zwei mögliche Systeme mit vorgefertigten Gussstücken bzw. modularen Steckverbindungen aufgezeigt. Um ein reines oktametrisches Raster zu erhalten, wird eine Steintiefe von 125 mm benötigt.

Durch das kleinteilige oktametrische Raster besteht eine große Vielfalt an horizontalen Anschlussmöglichkeiten für die Fassade, aber auch den Innenausbau. Dadurch kann eine große architektonische Freiheit gewährleistet werden. Das Standardsteinformat soll 498x125x498 entsprechen und ohne entsprechende Fugen auskommen. Die Kreuzverbinder liegen nur in horizontaler Ebene und entsprechen im Höhenabstand der Steinhöhe. Um auch hier eine größere Flexibilität zu erreichen, kann mit unterschiedlichen Steinhöhen in oktametrischen Rastersprüngen gearbeitet werden. Ausführlich s. [1].

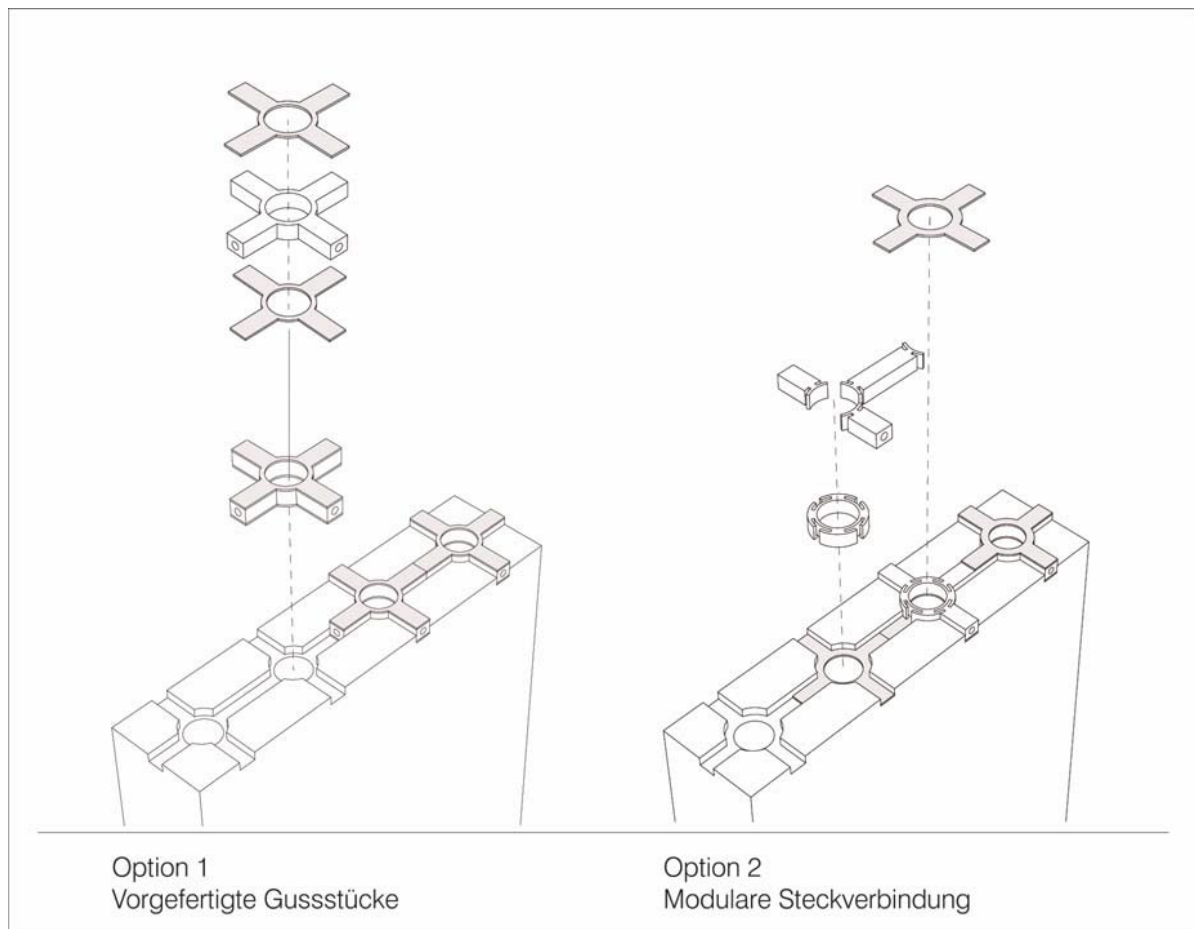


Bild 4 Varianten Kreuzverbinder – Gussstücke links und Stecklösung rechts [1]



## 2.1.2 Decke

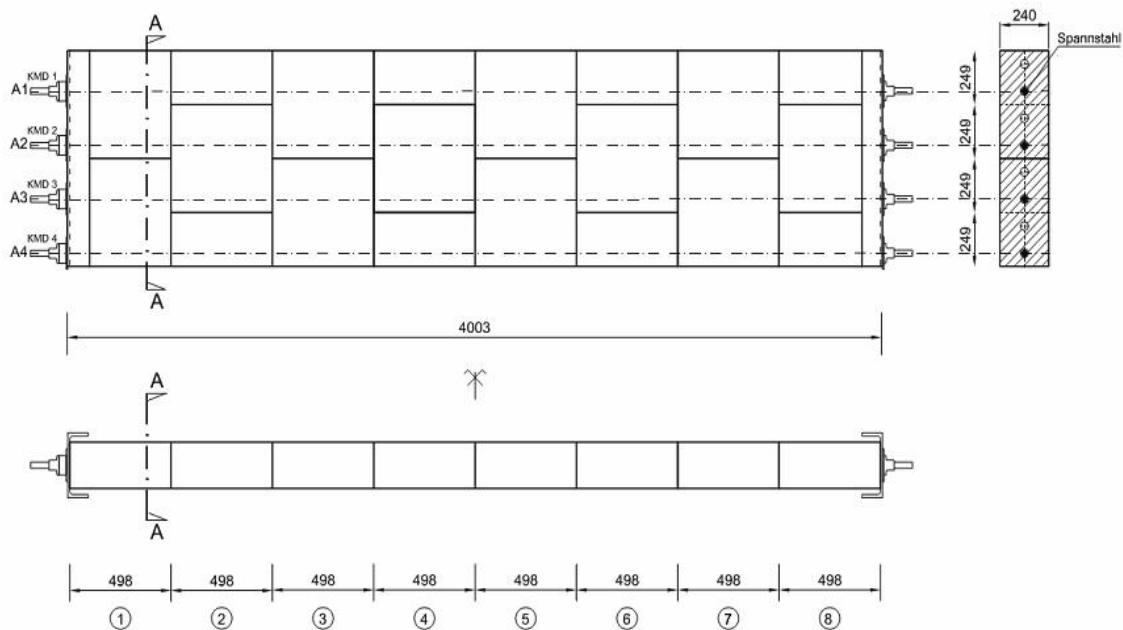


Bild 5 *Aufbau und Geometrie der in REMOMAB getesteten zentrisch vorgespannten Decken*

Im Rahmen des Forschungsvorhabens REMOMAB wurde eine verbundlos vorgespannte Decke aus KS-Elementen untersucht [1]. Diese hat noch gewisse Nachteile aufgrund der seinerzeitigen Randbedingungen. Als Spannkanäle wurden die vertikalen Kanäle der KS-Steine (z.B. KS-Quadro E) verwendet, die allerdings mittig liegen und damit die Effektivität der Vorspannung nicht optimal sein kann. Ein weiterer Nachteil ist, dass entweder korrosions-geschützte Spannglieder oder solche aus Edelstahl verwendet werden müssten.

### 2.1.3 Fundament

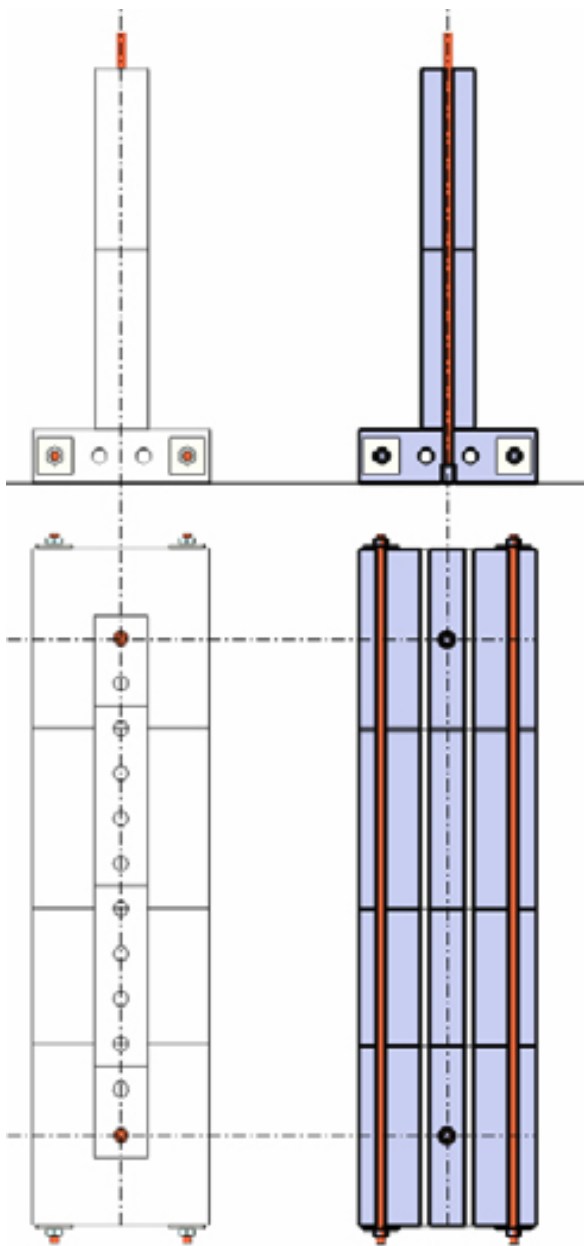


Bild 6 *Ansatz für eine demontable Gründungen als Streifenfundament mit zentraler Vorspannung*

Fundamente werden i.d.R. in Ortbeton gegossen oder als Fertigteile realisiert. Letzteres ist besonders bei Stützen üblich, wo es sich um Einzelfundamente handelt. Streifenfundamente als Fertigteile haben i.d.R. Längen entsprechend dem Achsabstand. Die Zerlegbarkeit ist damit nicht gegeben.

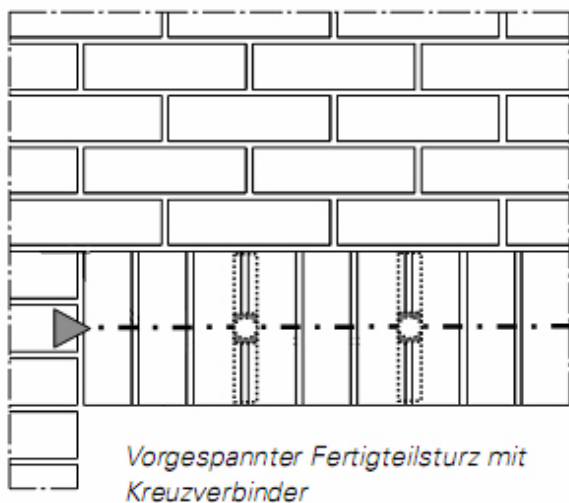
Zum einen soll das Fundament einfach rückbaubar und wiederverwendbar sein, gleichzeitig muss es die Lasten gut auf den Untergrund verteilen und dabei gewisse Unterschiede in der Reaktion des Baugrundes ausgleichen. Diese Anforderungen lassen sich bei einem Plattenfundament nur mit wesentlich höherem Aufwand als bei einem Streifenfundament erfüllen.

Sieht man die Streifenfundamente in Einzelblöcken entsprechend der Modulgröße unseres Bausystems vor, müssen diese untereinander verspannt werden, damit sie Normalkräfte in Achsrichtung und Biegekräfte aus der Bodenbeanspruchung aufnehmen und weiterleiten können. Senkrecht zur Längsachse des Streifenfundamentes müssen dann auch noch die Verspannungen der Wände aufgenommen werden können.

Bei der Verspannung muss der Korrosionsschutz gewährleistet werden.

Aus den in REMOMAB untersuchten Möglichkeiten wird hier die zentrische Verspannung weiterverfolgt. Auf Grund dessen, dass das Fundament auf dem Erdboden steht, kann für die vertikale Verspannung von unten keine Gegenkraft aufgebracht werden. Daher muss das Fundament bereits vorgespannt sein, wenn die vertikale Verspannung der Wände aktiviert werden soll. Bei der zentrischen Vorspannung kommt dasselbe System wie in der Wand und der Decke zur Anwendung.

### 2.1.4 Wandöffnungen



Zur Entwicklung eines für Öffnungen in der Primärstruktur angepassten Vorspannsystems (Ersatzsystem für Tür- und Fensterstürze) können modulimmanente Lösungen gefunden werden. So sieht REMOMAB drei mögliche Varianten für Stürze vor. In Bild 7 wird eine Möglichkeit gezeigt, welche in Zusammenhang mit den Kreuzverbindern eingebaut werden kann.

Bild 7 Mögliche Realisierbarkeit von Öffnungen im Bauteil beim Kreuzverbinder [1]

### 2.1.5 Bewertung der Nachhaltigkeit

In REMOMAB wurden die Variante Kreuzverbinder und die Variante linienhafte Verbindung mit drei Standardsystemen (WDVS mit Stahlbeton, zweischaliges Mauerwerk, monolithische Außenwand aus Porenbeton) in Bezug auf ihre Umweltwirkung bei der Ersterstellung, der gesamten Umweltwirkungen über 50 Jahre inklusive Instandhaltung und End-of-Life nach DGNB und nach dem End-of-Life Szenario Produktrecycling für Materialien mit Nutzungsdauern von mehr als 50 Jahren verglichen.

Die entwickelten Konstruktionsvarianten weisen unter gesamtökologischen Gesichtspunkten einen deutlichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Bauweisen auf. Jedoch ist für deren Erstellung zunächst ein nicht unerheblicher ökologischer „Rucksack“ bzw. Aufwand an Grauer Energie notwendig, der erst im Laufe der Zeit ausgeglichen wird (vgl. Bild 8 und Bild 9). In diesem Zusammenhang ist sicherzustellen, dass die angestrebten, hochwertigen Wiederverwendungs- und Verwertungswege später auch tatsächlich umgesetzt werden.

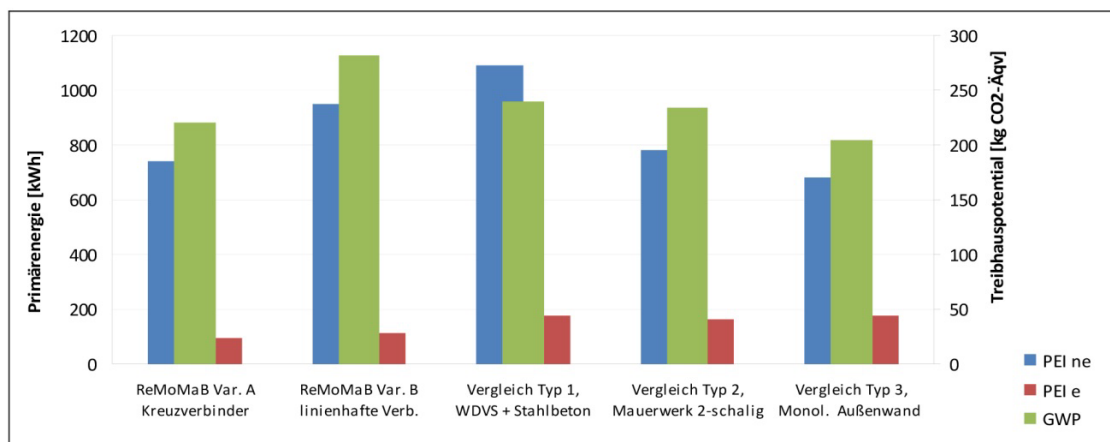


Bild 8 Treibhauspotenzial und Primärenergie gesamt nach 50 Jahren pro Bezugseinheit

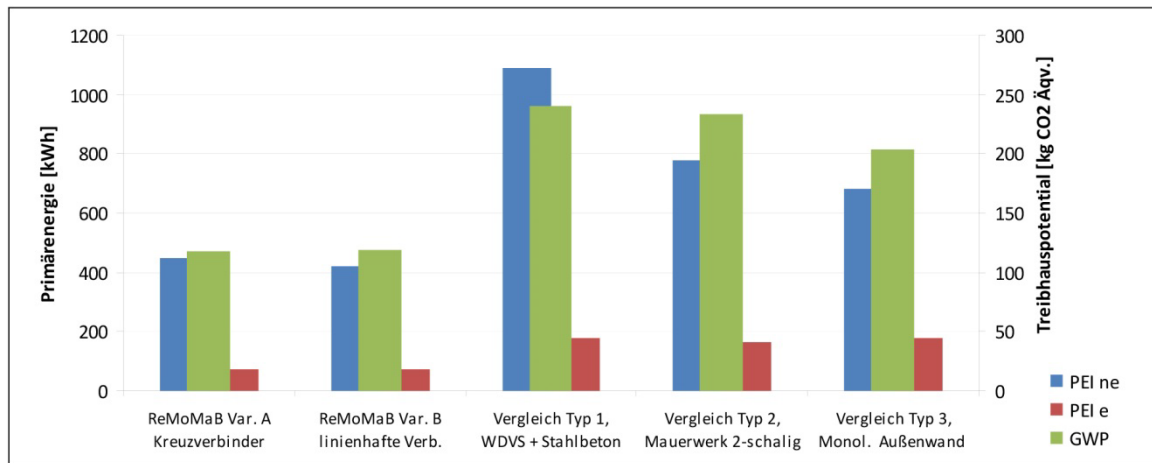


Bild 9 Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial mit End-of-Life Szenario Produktrecycling

## 2.2 Grundlagen und Ergebnisse aus 0-EneMau

Ziel des Forschungsvorhabens 0-EneMau war es, die Vakuum-Dämmtechnik mit den Vorteilen des zweischaligen Mauerwerksbaus zu verbinden und so einer Breitenanwendung zu prüfen. Darüber hinaus sollten gegenwärtige Tendenzen bei der Gebäudedämmung mit neuen Fügetechniken (Linienhafte bzw. zeilenhafte Verankerungen) auf den Mauerwerksbau übertragen werden.

Dieses Forschungsprojekt hob hauptsächlich auf die Verwendung von Vakuum-Paneelen als Dämmschicht bei zweischaligen Mauerwerkswänden ab. Mit der Vakuumdämmtechnik kann die Dämmschichtdicke erheblich reduziert werden, was die Brutto-Konstruktionsfläche entscheidend reduziert. Außerdem können damit die Tageslichtausbeute und der Lichteinfall optimaler gestaltet werden. Die Verwendung des vorgeschlagenen Vakuum-Dämmsystems erhöht bei dem in den nutzbaren Raum des Musterhauses um 13,9 % im Vergleich zur Benutzung von Rockwool, um 11,6 % im Vergleich zu Swisspor XPS 300 GE und um 5,9 % im Vergleich zu den PUR/PIR Dämmplatten welche mit Aluminiumschutz an beiden Seiten angeboten werden.



Bild 10 Entwurf eines zweigeschossigen Musterhauses [2]

Dem Nachteil der Verletzbarkeit der Vakuumdämmung wurde dadurch begegnet, dass diese durch zwei dünne Platten innen und außen geschützt wird. Bei Einhaltung eines modularen Grundprinzips in Entwurfs- und Ausführungsplanung kann die Anzahl der zu fertigenden Dämmelemente stark reduziert werden. Die Fertigung erfolgt auf Anforderung objektkonkret. Etwaige Toleranzen lassen sich über die Randstreifen in PU ausgleichen, was auch die Befestigungspunkte betrifft.

Einer Breitenanwendung steht momentan noch der hohe Herstellungspreis aufgrund der geringen Mengenanforderungen entgegen. Die Fertigung läuft rationell halbautomatisch ab. Weiter wird von den Bauherren die Frage der Dauerhaftigkeit des Vakuums kritisch hinterfragt. Das Problem stellt eine Herausforderung für die Hersteller dar. Konstruktiv kann dem entgegengewirkt werden, indem die Vormauerung oder die Vorhangfasse demontierbar gestaltet wird, sodass eine Auswechslung nach ca. 30 Jahren durchaus machbar ist. Selbst wenn man die Dämmung nach dem Wärmedurchgangswert bei vollständigem Verlust des Vakuums bemisst, sind Vorteile zu erzielen.

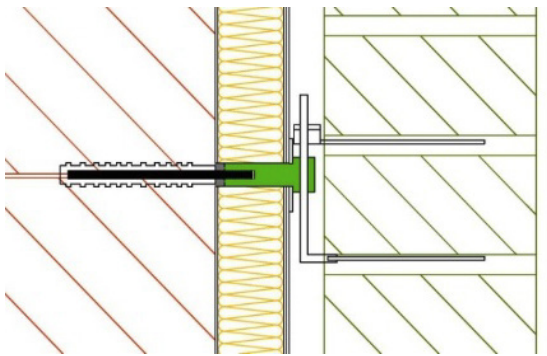


Bild 11 *Schnitt durch den Anker im eingebauten Zustand*

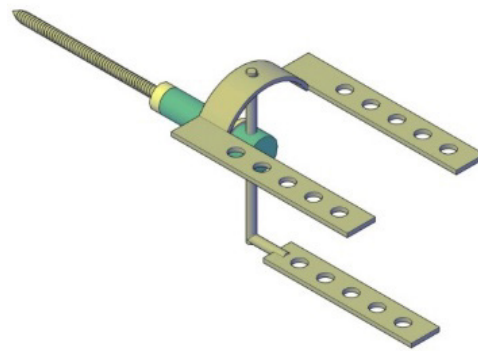


Bild 12 *3D-Darstellung des Ankers*

Die Verwendung des in 0-EneMau vorgeschlagenen Systems reduziert sich der benötigte Abstand zwischen den Schalen auf 65 mm.

Die Lösung ist für das System Click-Brick [41] modifizierbar, bei dem die Vormauerschale trocken versetzt wird. Es sind lediglich geringfügige Änderungen an den Ankerköpfen und an den Metallprofilen der Konsolen notwendig, um beide Systeme passfähig zu machen. Die notwendigen Anpassungen sind in Bild 13 dargestellt.

Die Vakuumdämmung ist auch mit Fassadenplatten oder -paneelen anwendbar. Leichte demontierbare Fassaden-Paneele werden heute in der modernen Architektur eingesetzt. Diese Fassadenplatten werden aus unterschiedlichen Materialien hergestellt, wie Glas, Metall, Polymeren und Keramik. Das vorgeschlagene Dämmsystem im Forschungsvorhaben 0-EneMau kann ebenfalls mit einem leichten flachen Fassadensystem angewendet werden. Dies bietet die Möglichkeit, Platz zu sparen im Zusammenhang mit der Reduzierung der Wandstärke.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens 0-EneMau wurde die Lösung, bestehend aus Dämm- und Verankerungssystem detailliert dargestellt und alle notwendigen experimentellen, numerischen und bauphysikalischen Tests durchgeführt, um die bauphysikalischen Anforderungen sowie das Tragverhalten der Gesamtkonstruktion nachweisen zu können. Das vorgeschlagene Dämmsystem stellt die Anwendung einer neuen Form der modularen Vakuumpaneele mit einer speziellen Montagetechnik dar und ist an die unterschiedlichsten Wetterschutzschalen anpassbar.

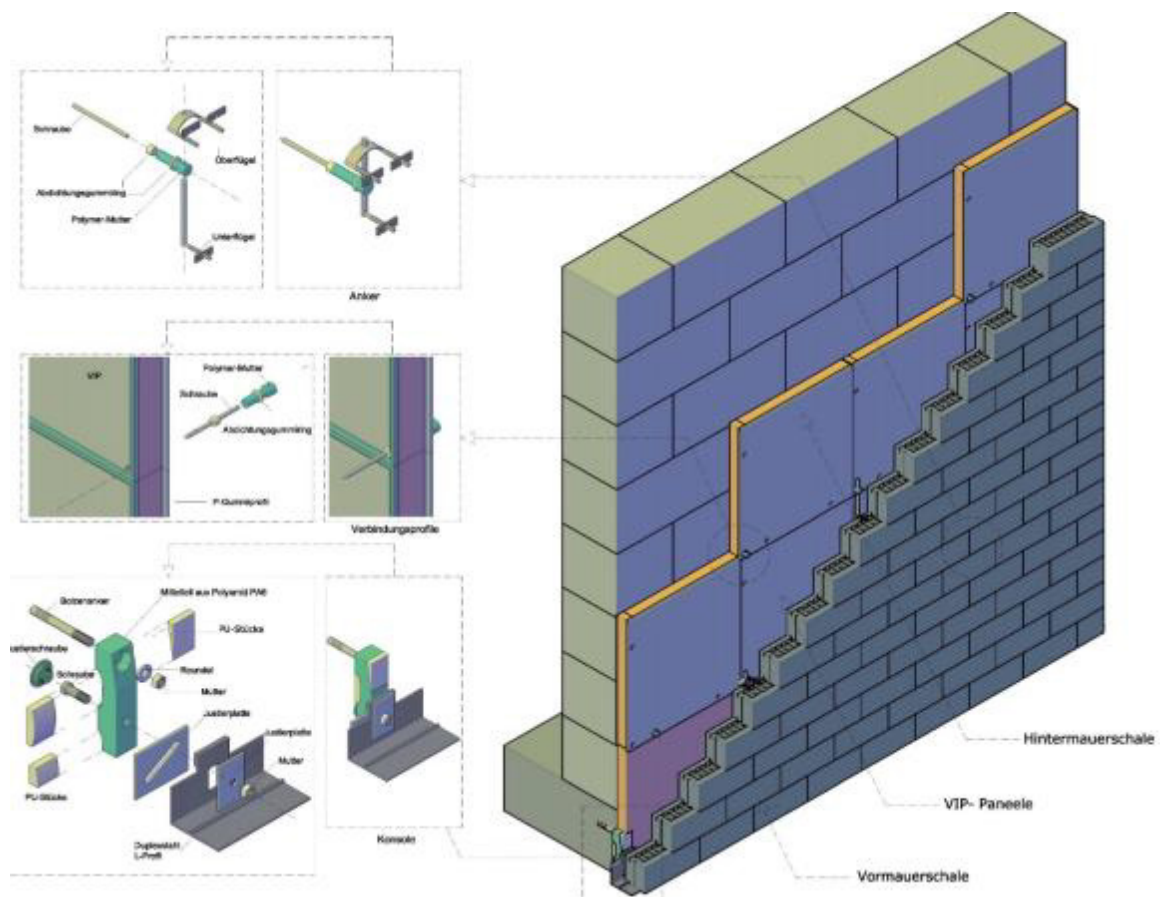


Bild 13 3D-Detaildarstellung eines Ankersystems für Vakuum-Paneele bei Verwendung des Click-Brick-Systems

### 2.3 Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „RC-WE-Modul“

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung und Demonstration einer massiven, modularen, transportablen und voll demontablen/recyclinggerechten Wohneinheit für die schnelle Bereitstellung von Wohnraum und ggf. temporären Unterkünften, die am Ende ihrer Nutzungszeit umsetzbar sind [3].

Dabei waren die Anforderungen des Next-Generation-Buildings<sup>1</sup> zu erfüllen und Stoffkreisläufe nach dem Prinzip Cradle to Cradle (kreislaufgerechtes Bauen auf Bauteilebene) zu schließen. D.h. flexibel (schnell, demontierbar, anpassungsfähig etc.), schadstofffrei und ressourcenschonend mit System (modulare Bauweise) zu bauen. Dazu gehören die sortenreine Trennbarkeit und der Wiederverwendbarkeit ganzer Bauteile des Rohbaus auch deren nachhaltige Herstellung durch die Nutzung von Recyclingmaterial. Einmal hergestellt, befinden sich ganze Module im Nutzungskreislauf, ohne eine Shreddering am Nutzungsende. Daher wird

<sup>1</sup> „Sustainable buildings aren't just energy efficient. They're made from natural and recyclable materials, which means that they consume fewer resources and lead to employees feeling better about their workplace. On top of that, there's a chance of achieving lower construction costs through leasing models or deposit-refund schemes. With the office facing increasing competition from the home office, we shouldn't underestimate the significance of sustainability.“ [www.dreso.com](http://www.dreso.com)

mit der Wiederverwendungsoption ein Beitrag zur Werterhaltung geleistet (Upcycling). Bei dem Projekt standen die Erprobung der erarbeiteten Grundlagen und die Optimierung von wiederholbaren, adaptiven Konstruktionslösungen sämtlicher Gebäudeteile im Mittelpunkt.

Demontable Strukturen benötigen einen hohen Grad an lösbaren Verbindungen. Auf das Verbundprinzip muss gänzlich verzichtet werden. Die punktuellen Verbindungen sind in den einzelnen Elementen bzw. Bauteilen vorzusehen.

Des Weiteren setzen variable Strukturen eine hohe Modularität voraus. Um dem Prinzip der Ökoeffektivität gerecht zu werden bzw. um einen hohen Grad an Nachhaltigkeit zu erlangen, sind die einzelnen Module - bestehend aus Fundament-, Wand- und Deckenbauteilen aus ressourcenschonendem Beton bzw. Recyclingbeton (RC-Beton) – hergestellt worden.

Je nach vorhandener Produktionstechnik waren dazu Wand- und Deckenelemente zu untersuchen als auch kleinformatigere Betonsteine.- Der Lösungsansatz bestand darin, demontable modulare Wohneinheiten (WE) aus RC-Beton unter Berücksichtigung von trennbaren Materialverbänden und Funktionstrennungen (Tragkonstruktion getrennt von Ausbaukonstruktion) konstruktiv durchzubilden und hinsichtlich der Machbarkeit und Gebrauchstauglichkeit zu testen (Bild 14).

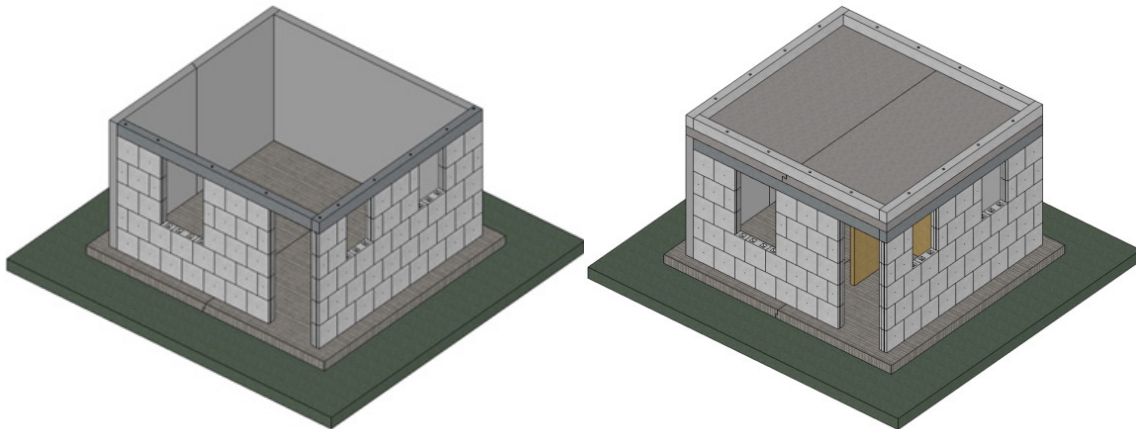


Bild 14 *Realisierte Einheit aus Bodenplatten, Wandplatten und Wandbausteinen*

Dazu war zu untersuchen, welche Betonrezeptur für das jeweilige Bauelement mit welchem Grad des Einsatzes von Recyclingmaterial zur Anwendung kommen kann.

Auf den Erfahrungen vorangegangener Forschungsprojekte wurde aufgebaut. Die zu entwickelnden RC-Bauteile sollten entsprechend der herausgearbeiteten Abmessungen im Projekt REMOMAB für flexible Systeme der Recycling-Wohneinheit (RC-WE) konstruktiv ausgebildet werden. Bei der Wandausbildung sind Noppen auf der Oberseite und Taschen/Vertiefungen auf der Unterseite angeordnet worden, um die RC-Bauteile gut untereinander ohne Betonverguss zu verzahnen. Damit sollte neben der Stabilitätssicherung der Wandkonstruktion die Demontierbarkeit der Bauteile sichergestellt werden.

Zur individuellen Anpassung der WE wurde die Entwicklung und Dimensionierung geeigneter Module (Blöcke) für Fundamente und Wände sowie geeigneter Platten für Decken und Wände (alternativ) vorgenommen.

Die optimierte Lösung des entwickelten Moduls (Prototyp) ist dann im Betonwerk Mattig & Lindner in Forst produziert und anschließend auf deren Gelände montiert worden.

Dabei sind die Ergebnisse der Forschungsarbeit unter praktischen Bedingungen getestet und somit der Nachweis der Machbarkeit und Gebrauchsfähigkeit erbracht worden.

Die Wandsteine werden mit üblicher Hebe- oder Versetztechnik über die vertikalen Ankerstäbe eingeführt. Die vertikale Verspannung erfolgte in der Deckenebene und im Bereich der Fenster in der Brüstung.

In einem weiteren letzten Projektschritt ist dann die Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit erprobt worden. Das Gebäude wurde in Forst abgebaut, zwischengelagert und anschließend an einen neuen Standort transportiert worden, wo der Wiederaufbau realisiert wurde. Das erfolgte bei ungünstigen Witterungsbedingungen. Es zeigte sich, dass auch unter diesen Bedingungen die neue Bauweise äußerst vorteilhaft ist (Bild 15).

Bei der Konzeption und Realisierung des Gebäudes ist vollkommen auf das Verbundprinzip verzichtet worden. Nur so kann eine saubere Zerlegung und Wiederverwendung garantiert werden. Die infolge von geringfügigen Toleranzen entstehenden Spannungsspitzen konnten ohne weiteres von Betonbauteilen aus RC-Beton aufgenommen werden.

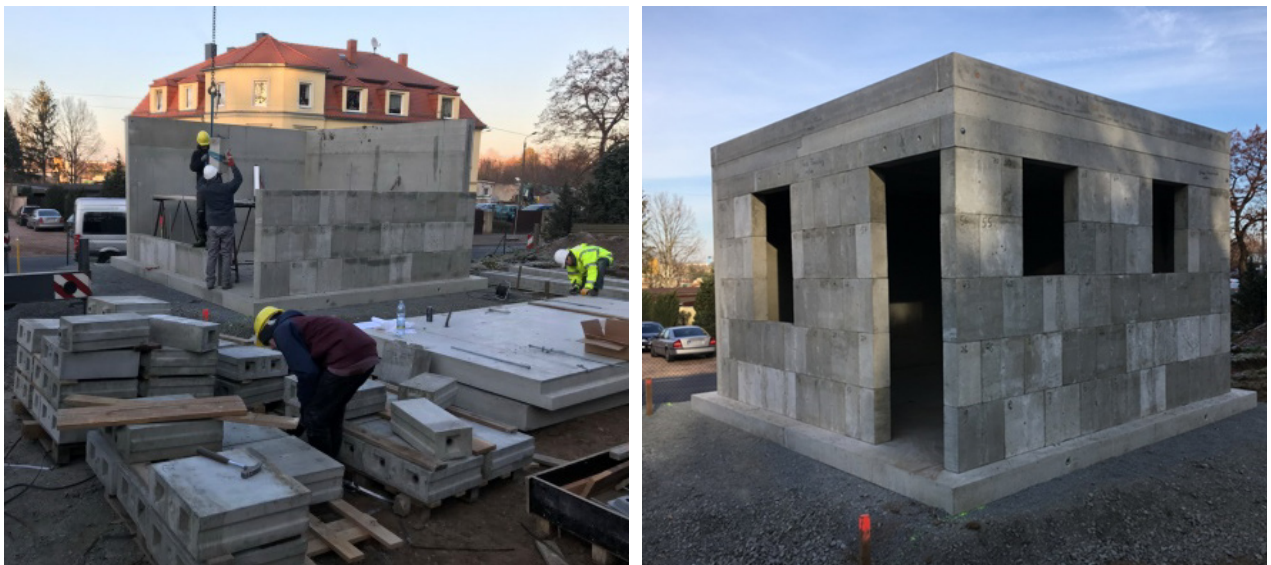


Bild 15 Erneute Montage am neuen Standort links und fertiges Modul rechts

Mit dem Forschungsvorhaben konnte unter Beweis gestellt werden, dass Recycling-Beton geeignet ist, für tragende Konstruktionen im Wohnungsbau unter Verzicht auf das Verbundprinzip eingesetzt werden kann. Die bisher zulässigen Grenzen an RC-Körnungen können weit nach oben verschoben werden, was erheblich zur Ressourcenschonung und Verbesserung der Nachhaltigkeit beiträgt.

Bei modularer Gestaltung des Entwurfes eines Wohngebäudes können Montierbarkeit als auch Demontierbarkeit eines massiven Gebäudes gewährleistet werden. Damit kann ein entscheidender Beitrag zur Reduzierung von Schutt- und Baurestmassen geleistet werden. Der Energieaufwand für den Rückbau kann im Vergleich zu heute üblichen Margen auf ein absolutes Minimum reduziert werden. Andererseits wird das Versetzen eines Gebäudes in seinem Lebenszyklus entsprechend des veränderten Bedarfs möglich.

Ausgehend von den erreichten Ergebnissen im Forschungsprojekt RC-WE-Modul könnte der Recycling-Beton zur Produktion aller vorzuplanenden Betonteile für den Experimentalbau im Projekt ReDeMaM verwendet werden.



## 3 Rohbauplanung des Experimentalbaus

### 3.1 Einleitung und Vorgehensweise

Bei den hier vorzustellenden Forschungsergebnissen im Rahmen des Forschungsvorhaben „Rezyklierbarer, Demontierbarer, Energiehocheffizienter und Massiver Musterbau (ReDeMaM)“ werden die aus den drei vorgenannten früheren Forschungsprojekten, ReMoMaB [1] 0EneMau [2] und RC-WE-Modul [3] vorliegenden Ergebnisse im Entwurf eines Musterhauses umgesetzt und im Hinblick auf marktgängige Produkte modifiziert. Aspekte der Wirtschaftlichkeit sind dabei ebenfalls mit eingeflossen. Weiter ging es darum, Erfahrungen aus der Bauausführung insbesondere hinsichtlich Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit zu sammeln. Außerdem bietet der Experimentalbau die Möglichkeit theoretische Ansätze und Berechnungsergebnisse zu überprüfen. Der Experimentalbau soll auch zeigen, dass mit dem Bauprinzip der vollständigen Demontierbarkeit eine ansprechende, moderne Architektur möglich ist.

Der Entwurf für ein zweigeschossiges Musterhaus als Experimentalbau auf einer Grundfläche von rund 50 m<sup>2</sup> sollte unterschiedliche baukonstruktive Details, die regelmäßig in Wohnhäusern vorkommen (Fenster, Türen, Balkon, Treppe, Terrasse, Bad, Küche, etc.) einer exemplarischen, weiterentwickelten Lösung zuführen.

Am Anfang der Bearbeitung des Projektes stand die Aufgabe, alle Ergebnisse der bereits durchgeführten Forschungen zu analysieren und die wesentlichen Schlussfolgerungen daraus zu ziehen, die beim Entwurf und der Konstruktion des Experimentalbaus einfließen sollten. Die erste Phase schloss mit einer Vorplanung der Ausführung ab.

Daran schloss sich die bauteilweise Ausführung des Baus an, in deren Vorbereitung die Vorplanung der Ausführung mit den jeweiligen Industriepartnern abgestimmt und in ein endgültiges Stadium überführt worden ist. Dabei waren Ausführungsdetails und technologische Abläufe zu verfeinern.

Der Experimentalbau sollte auf dem Forschungsgelände des Lehrstuhls Tragwerksplanung in Dresden errichtet werden und ist dort auch errichtet worden ist. Nach Fertigstellung des Rohbaus schloss sich Ausbau an, wobei einzelne Elemente nur exemplarisch realisiert werden sollte. Nach Abschluss des Rohbaus und des Ausbaus schlossen sich In-Situ-Untersuchungen am Gesamtbauwerk an.

Darauf folgte der geordnete Rückbau des Experimentalbaus, wobei eine genaue Analyse der verbauten Materialien und der Praktikabilität der konstruktiven Details durchgeführt worden sind. Erste Schlussfolgerungen für die Wiedererrichtung konnten dabei gezogen werden.

Nach vollständigem Rückbau war das Gebäude an anderer Stelle, ggf. auch unter anderer Grundrissgestaltung, nochmals zu errichten, um die Wiederverwendbarkeit von Materialien und Bauelementen zu prüfen. Mit einer anderen Grundrissgestaltung sollte die Flexibilität der modularen Bauweise unter Beweis gestellt werden.

### 3.2 Rahmenbedingungen zum Entwurf des Experimentalbaus

Der Entwurf des Experimentalbaus sah einen kleinen, zweigeschossigen Kubus vor (siehe Bild 16), der mit einer zeitgemäßen Architektur in Erscheinung tritt. Die Gebäudeabmessungen sind 7,50 m und 6,75 m im Grundriss und 7,30 m über Oberkante Gelände in der Höhe. Den oberen Abschluss bildet ein Flachdach mit umlaufender Attika.

Das Gebäude sollte einen Keller haben, um auch hier die Anwendbarkeit der Grundsätze der Trockenbauweise zeigen zu können. Aus Kosten- und Standortgründen musste auf ein Absenken des Kellers in das Erdreich verzichtet werden. Das Kellergeschoß wurde deshalb nur

mit einer Rohbauhöhe von 1,0 m exemplarisch angedeutet, dabei wurden hauptsächlich die wichtigsten Maßnahmen zur Errichtung und zur Abdichtung des Kellers gezeigt.

Die grundsätzlich relativ einfache Gestaltung des Versuchsbaus vereinfachte die Modularisierung des Gebäudes und verringerte damit die Anzahl unterschiedlicher Konstruktionselemente. Wandöffnungen (Türen, Fenster, etc.) sind an lediglich zwei Gebäudeseiten geplant worden. Die Grundidee war hier, vier Einzelkuben jeweils mit den Rückseiten zueinander zu einem Würfelhaus zusammen fügen zu können.

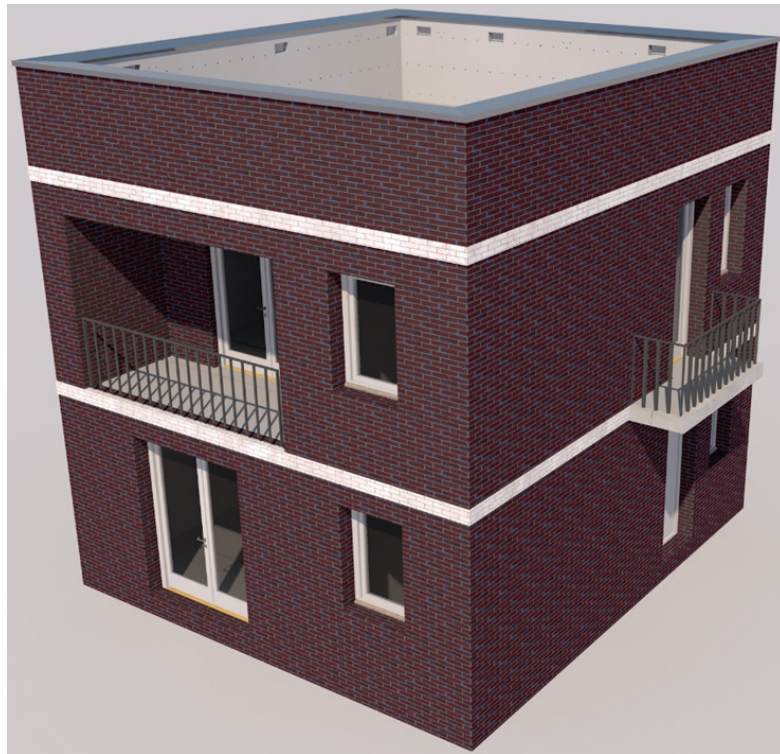


Bild 16 *Musterhausentwurf Forschungsprojekt ReDeMaM - Perspektive*

Ohne Berücksichtigung der Unterkellerung ergibt sich für das Gebäude eine Wohnfläche von rund 70 m<sup>2</sup> und ist damit hinreichend dimensioniert für einen Zweipersonenhaushalt. Unter Berücksichtigung eines Kellergeschosses lassen sich ca. 105 m<sup>2</sup> in Ansatz bringen.

Die wesentlichen Wohnräume finden sich innerhalb des Versuchsbaus im Erd- sowie Obergeschoss (siehe Bild 17). Im Erdgeschoss liegen der eigentliche Wohnbereich sowie die Küche, beginnend vom kleinen Flur erreicht man über einen Treppenaufgang das Obergeschoss. Prinzipiell wäre im Erdgeschoss auch ein kleines Bad möglich, worauf aber zunächst verzichtet wurde. Im Obergeschoss befinden sich der Schlafbereich, das Badezimmer sowie ein kleiner Ankleideraum. Außerdem erreicht man über das Obergeschoss den kleinen auskragenden Balkon und die überdachte Loggia (Bild 17).

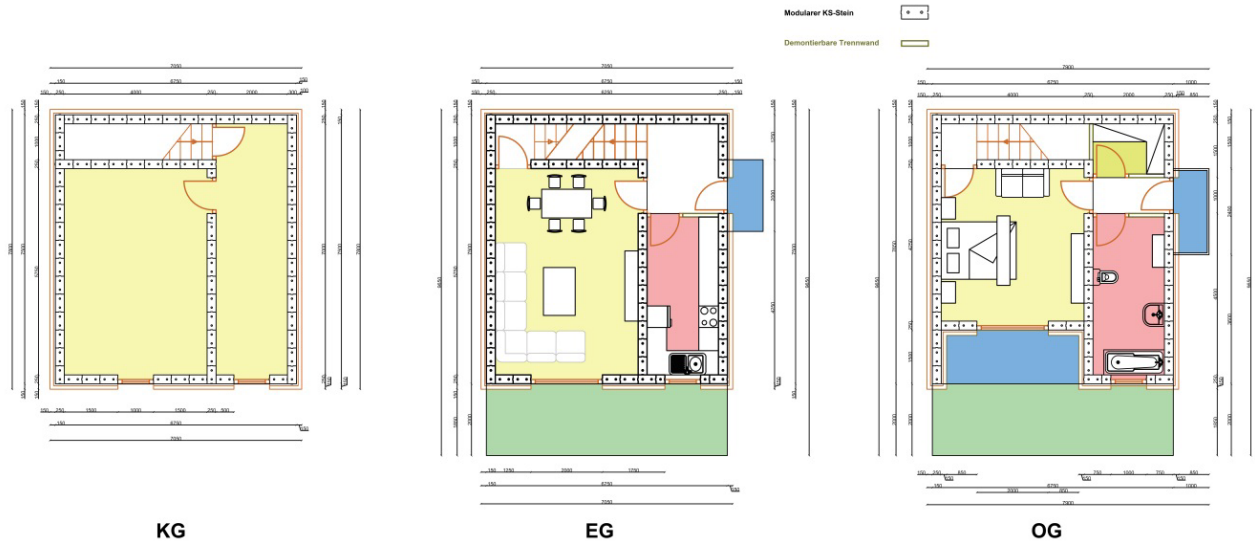


Bild 17 Grundrissgestaltung Experimentalbau - ReDeMaM

Für den Experimentalbau wurde bewusst dieser etwas kleinere Aufbau gewählt, um die grundsätzlichen Problemstellungen eruieren und Lösungen in ihrer Gesamtheit darstellen zu können. Das grundsätzliche System lässt sich allerdings beliebig erweitern und so auch auf größere Gebäudegrundrisse anwenden (Bild 18).

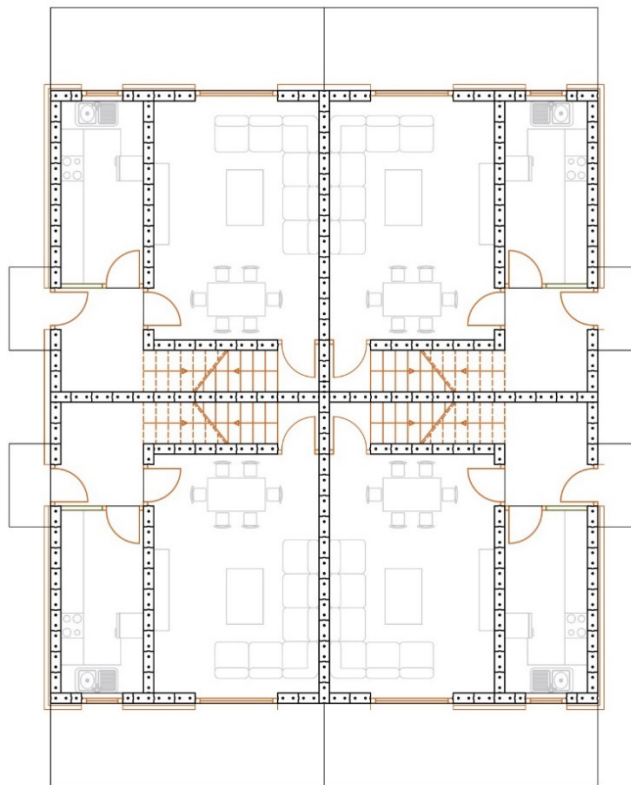


Bild 18 Mögliche Anordnung von 4 Einzelhäusern zu einem Wohnhaus.

### 3.3 Grundprinzip der Bauweise und deren Umsetzung

Der gesamte Gebäudeentwurf ist durch Modularität und Rückbaubarkeit geprägt. Bild 19 zeigt die isometrische Darstellung des Gebäudes mit seinen Hauptabmessungen. Im Rohbau gibt es vier Konstruktionselemente: Fundamentsteine aus Stahlbeton, Wandsteine aus Kalksandstein, Ringankersteine aus Stahlbeton sowie Fertigteildeckenplatten aus Spannbeton. Die Entscheidung für Spannbetondeckenplatten fiel wegen der einfachen Montage und Demontagemöglichkeit der Platte. Die verbundlos vorgespannte Decke nach Abschn. 2.1.2 hat noch nicht das Stadium der Praxisreife erreicht, wäre aber der Spannbetonplatte gegenüber überlegen.

Es wird vollkommen auf das Verbundprinzip verzichtet und alles wird trocken verlegt, d.h. ohne Mörtel. Grundprinzip dabei ist die regelmäßige Anordnung von Spannelementen, um die einzelnen Elemente in ihrer Lage zu sichern und Schubkräfte über Reibung in den Fugen übertragen zu können. Als Spannstäbe kommen Rundstahl verzinkt bzw. Gewindestahl ebenfalls verzinkt zum Einsatz.

Derartige Spannelemente finden sich innerhalb der Fundamentebene, den Ringankerebenen sowie regelmäßig in vertikaler Richtung an Wandecken, Wandkreuzungen, Wandenden und als Zwischenverspannung bei langen Wandseiten. Aufgrund der vorhandenen Wand- und Deckenanordnung ist das Gebäude offensichtlich hinreichend ausgesteift.

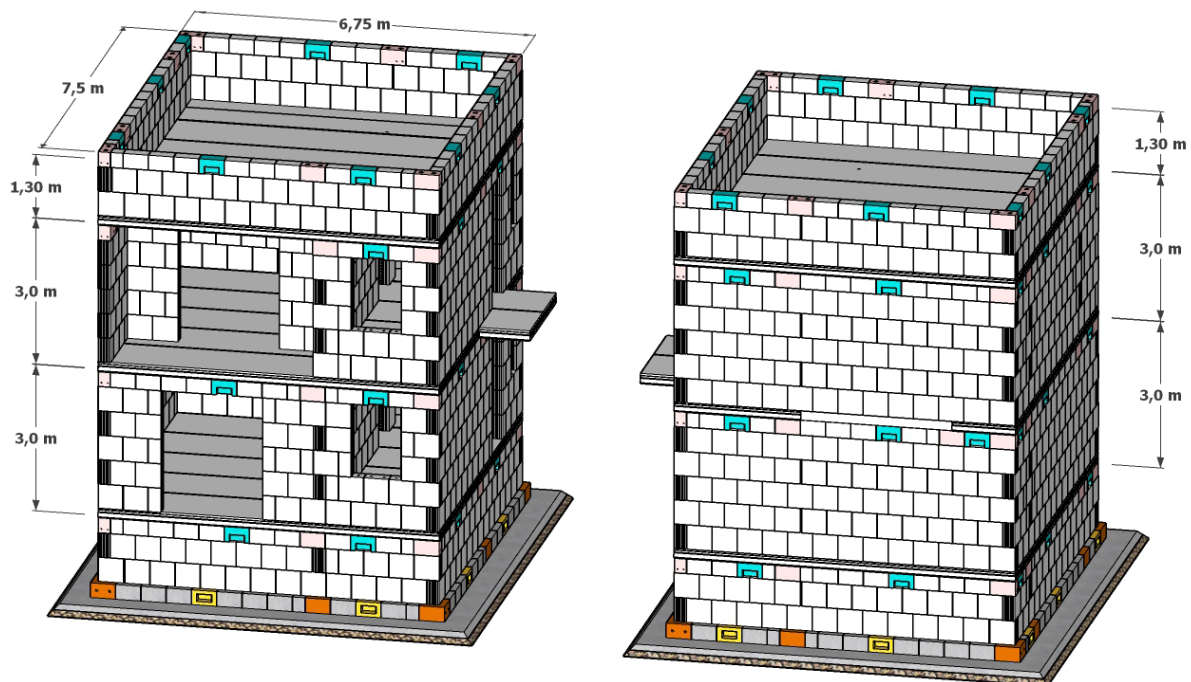


Bild 19 *Isometrie des Versuchsbau ReDeMaM (Straßenseite, Rückseite)*

Das Bild 20 zeigt eine Schnittdarstellung zur Erläuterung der Bauelemente im Musterhaus.

Die Tragstruktur des Versuchsbau wird aus vertikal und horizontal verspannten Wandscheiben in Trockenbauweise gebildet. Jede Wandscheibe wird horizontal über einen Ringbalken mit

vertikal verlaufenden Spannelementen in signifikanten Eckpunkten des Gebäudes verschraubt. Somit besteht jede kraftschlüssige Einheit aus Zusammenwirkung folgender Bauteile:

- Fundamentstreifen aus Betonsteinen als tragende Basis für das Musterhaus
- Wände aus Kalksandsteinen bzw. -elementen,
- Ringanker aus speziell sondergefertigten Betonsteinen,
- Spannstähle und
- einem angepassten Deckenplatten-System.

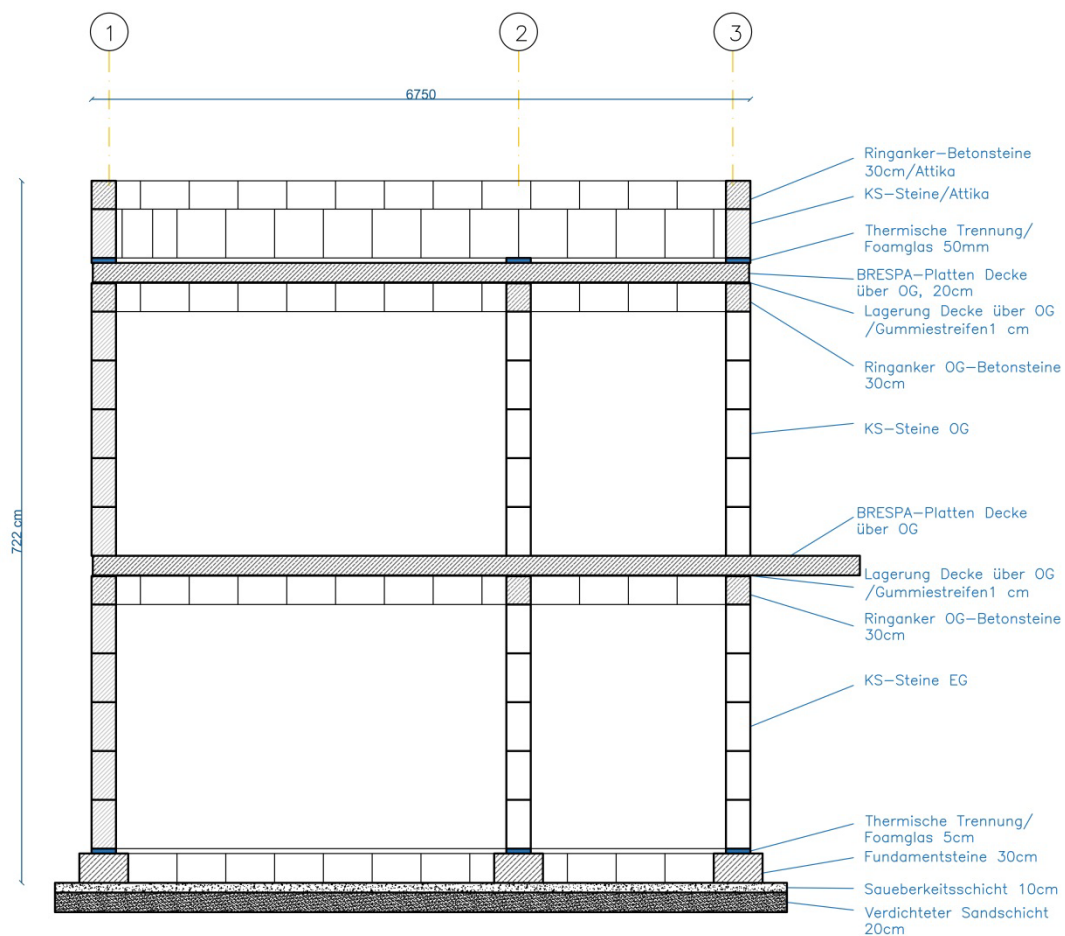


Bild 20 *Schnittdarstellung der Bauteile des Musterhauses*

### 3.3.1 Fundamente und Unterkellerung

Die Streifenfundamente werden aus vorgefertigten Stahlbetonsteinen gefügt, welche konstruktiv durch Spannelemente (2 Stäbe Durchmesser 20 mm) miteinander verbunden sind. Somit wird einem Auseinandertreiben der Fundamentsteine entgegengewirkt. Es gibt vier unterschiedliche Fundamentsteinmodule, die in Bild 21 dargestellt sind. Die Steinabmessungen betragen je 0,5 m x 0,5 m im Grundriss und 0,3 m in der Steinhöhe, abweichend dazu gibt es

halbe Passsteine mit einer Länge von 0,25 m. Kernstück ist ein Hülsenankerstein mit je zwei 20 mm Hülsenankern an drei Seitenflächen und einem 20 mm Hülsenanker auf der Stirnseite. Hieran können die Spannstäbe sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung angeschlossen werden. Weiterhin gibt es zwei Arten von Standardsteinen mit 40 mm Rohrdurchführungen als Voll- und Halbsteinausführung. Durch diese Steine werden die horizontalen Spannstäbe bis zu einem Spannstein hindurchgeführt. Der Spannstein selbst zeichnet sich durch ebenfalls 40 mm Rohrdurchführungen sowie zusätzlichen seitlichen Aussparungen aus. Hier können von zwei Seiten zugeleitete Spannstäbe mittels Spannschlössern miteinander verbunden und verspannt werden. Die Vorspannung wird dabei allein mittels Drehmomentschlüssel realisiert und bedarf keiner maschinellen Unterstützung.

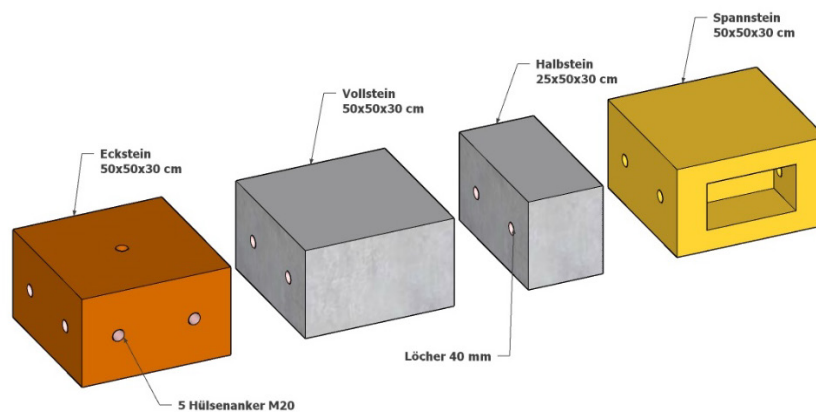


Bild 21 *Fundamentbetonsteine für den Versuchsbau*

Auf diese Weise lässt sich ein Streifenfundamentverlauf (s. Bild 22) herstellen, der dem gewünschten Wandverlauf entspricht und vollständig zusammengezogen wird. Auf diesem Streifenfundament werden im folgenden Schritt die Kalksandsteinmauersteine verlegt.

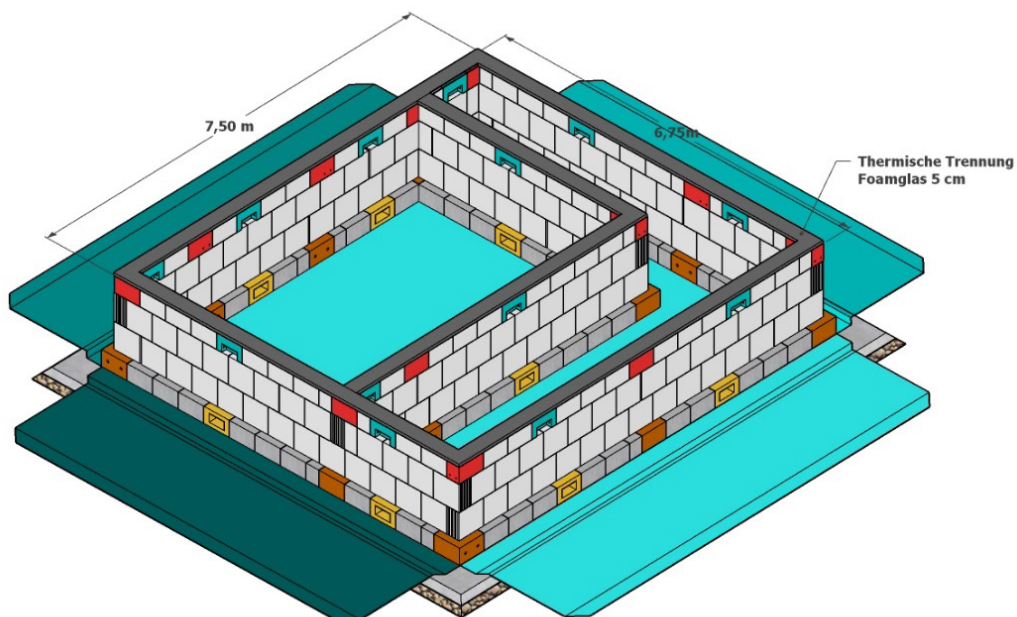


Bild 22 *Streifenfundamente, reduzierter Keller und thermische Entkopplung im Keller mit Foamglas*

Die thermische Entkopplung erfolgt angepasst, je nachdem ob eine Unterkellerung geplant ist bzw. ob ein Warm- oder Kaltkeller ausgeführt werden soll, mittels druckfester Schaumglasstreifen, welche unter den Deckenplatten über dem Kellergeschoss verlegt werden. Gäbe es keine Unterkellerung, sind die Schaumglasstreifen direkt unter der ersten Reihe der KS-Wände zu verlegen.

Da die Einzelteile bei Rückbau einfach und vollständig voneinander getrennt werden sollen, scheidet eine Schwarzabdichtung der erdberührten Bauteile grundsätzlich aus. Daher ist bei der Ausführung eine robuste Abdichtung aus verschweißten Kunststoffbahnen vorgesehen worden. Die Fundamente und das Kellergeschoss werden vollständig in eine vorgefertigte Kunststoffhülle eingepackt, um die Feuchtigkeit außerhalb des Gebäudes zu halten. Dafür muss die Abdichtungsfolie noch vor Verlegung der Betonfundamentsteine auf der Sauberkeitsschicht, bestehend aus Magerbeton, ausgelegt werden (Bild 22). Mit Baufortschritt wird dann auch die Abdichtung nach oben verlegt und an den Kanten miteinander verschweißt (s. Bild 25). Etwaige Mediendurchführungen können mit Schraubflanschen realisiert werden. Dieses System lässt sich grundsätzlich beliebig erweitern und lässt auch die Möglichkeit offen Aussparungen, z.B. für Kellerfenster, vorzusehen. Auch lässt sich so gegen die verschiedenen Arten anliegenden Wassers abdichten.

Die trockene Bauweise der Fundamentstreifen ermöglicht eine sortenreine Demontage und lässt, entsprechend den Recyclingprinzipien, eine Wiederverwendung zu. Die Herstellung der Steine mit Recyclingbeton in Anlehnung an [3] würde wiederum positive Auswirkungen auf die Verwertungsqualität der Steine haben.

Die erste Phase der Bauausführung der Fundamentebene ist im Abschnitt 5.3 dargestellt.

### 3.3.2 KS-Wände in trockener Bauweise - entwickelter Kalksandstein

Das Prinzip der Trockenbauweise wird auch bei den tragenden KS-Wänden angewendet. Das bedeutet, dass die Steine ohne die herkömmliche Verwendung von Mörtel in der Lager- oder Stoßfuge im Verband aufeinandergestapelt werden. Zusätzlich zur sortenreinen Trennung der Bauelemente hat dies zur Folge, dass die Montage in wesentlich kürzerer Zeit durchgeführt werden kann und die Demontage dem umgekehrten Montageprinzip entspricht.

Alle tragenden Wände werden aus speziell gefertigten Kalksandsteinen hergestellt, wofür zwei Steinmodule vorgesehen sind (Bild 23). Das Ausbauraster orientiert sich am oktametrischen System mit einem Vielfachen von 25 cm. Daraus resultiert eine Standardsteinabmessung von 50x50x25 cm. Diesbezüglich weist der Standardstein eine Größe von 0,5 m x 0,5 m bei einer Wanddicke von 0,25 m auf. Auf Grund von unterschiedlichen Grundrisslängen und Rohbauöffnungen ist auch ein Halbstein mit einer Länge von 0,25 m vorgesehen. Die Kalksandsteinmauersteine verfügen im Stoßbereich für eine bessere Luftdichtheit über ein Nut-/ Federsystem (Tiefe 5 mm) und auf den Stein Ober-/ Unterseiten befinden sich Aussparungen/Prägungen mit einer Tiefe von 10 mm zur Aufnahme der Kreuzverbinder (Kapitel 3.3.3).

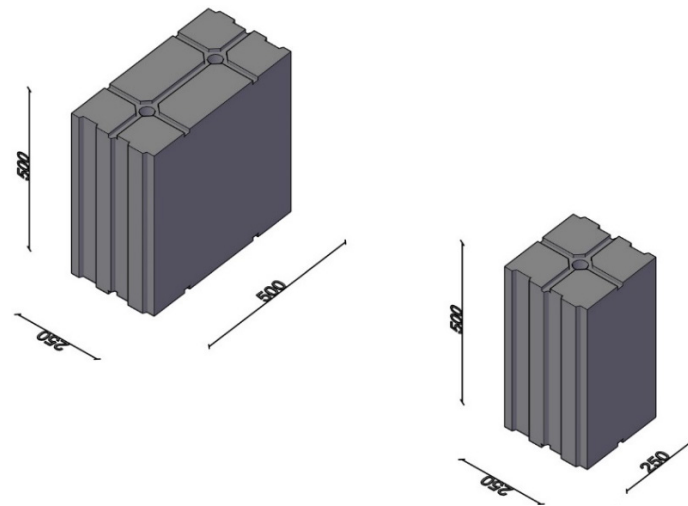


Bild 23 *Entwickelter Wandmodulstein (voller & halber) für den Versuchsba*

Die angegebenen Maße sind Baurichtmaße. Für die Sollmaße der Steine sind die Toleranzen der Fertigung der Steine zu beachten. Diese setzen sich aus den Maßabweichungen, den Ebenheitsabweichungen und den Abweichungen der Planparallelität der Flächen zusammen. Bisher gängig bei Dünnbettfugen ist die Abmaßklasse T3 nach DIN EN 771-2:2005-11 [83], die bekanntermaßen stets eingehalten wird.

Ein weiteres wesentliches Merkmal der Wandmodulsteine sind die vertikalen Aussparungen (50 mm), um bei Bedarf Spannelemente hindurchführen zu können. Die Spannelemente werden an den Ecken und an bestimmten Anschlusspunkten entsprechend der Statik angeordnet und zwischen Fundamentecksteinen (Kapitel 3.3.1) und Ringankersteinen (Kapitel 3.3.4) verspannt.

Mittels dieser entwickelten Standardsteine lassen sich alle gewünschten Grundrisse mit einem minimal möglichen Raster von 25 cm realisieren. Für die Anschlusspunkte der Kreuzverbinder in den Lagerfugen ergibt sich in horizontaler Richtung so ebenfalls ein Rasterabstand von 25 cm und in der vertikalen Richtung ein Rasterabstand von 50 cm.

Die Trockenbauweise mittels Standardsteinen und Kreuzverbindern ist im Bild 24 dargestellt.

### 3.3.3 Kreuzverbinder

Die Verbindung der KS-Steine in der Lagerfuge erfolgt über Kreuzverbinder, welche in die vorgefertigte Prägung der KS-Steine eingelegt werden. Dadurch verzahnt jeder Kreuzverbinder zwei KS-Steine in der Höhe.

Die Kreuzverbinder werden aus Kunststoff (Polyamid) hergestellt und trocken innerhalb der Fuge verlegt. Somit wird eine Verbindung der Steine hergestellt und eine mechanische Übertragung von Schubkräften in der Fuge ermöglicht. Die Kreuzverbinder begünstigen durch die Verzahnung eine verbesserte Kippstabilität der Wand.

Mittels Gewindebohrungen innerhalb der seitlich austretenden Kreuzverbindererelemente können sowohl im Innen-/ als auch Außenbereich Systembefestigungen erfolgen. Durch das oktametrische System kann eine Anschlussmöglichkeit alle 25 cm für den Innen- und Ausbaubau an den Kreuzverbindern gewährleistet werden (siehe auch Bild 24).

Zum Verlegen der Kreuzverbinder, wenn der Kalksandstein auf ein anderes Bauteil stößt, werden zwei Lösungen vorgeschlagen. Die Prägung wird im letzten Steinreihe in jedem Geschoss entweder auf 2 cm vergrößert. In diesem Sinne wird ein zusätzlicher Stein mit tieferen Prägungen entwickelt oder es wird bei den Ringankersteinen die gleiche Prägung wie im Modulstein auf der unteren Seite vorgesehen.



Die erste Bauausführung der KS-Wände mit Kreuzverbinder ist im Abschnitt 5 dargestellt.

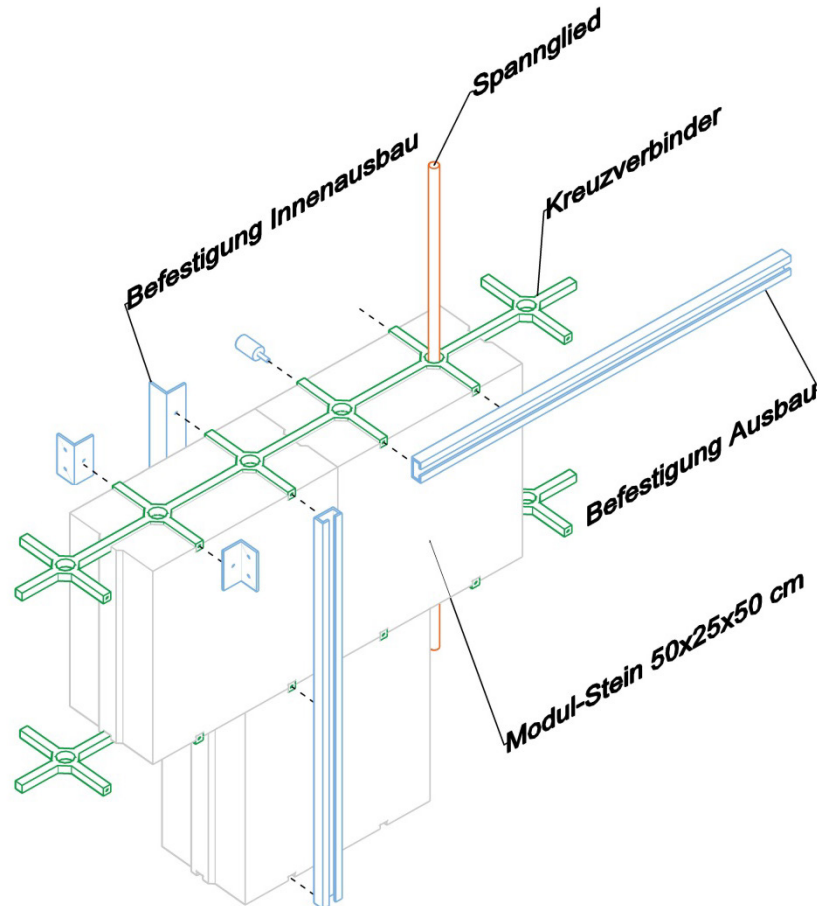


Bild 24 Entwickelte Trockenbauweise /Bauprinzip-ReDeMaM

### 3.3.4 Ringanker

Der obere Wandabschluss wird immer durch einen trocken verlegten Ringanker gebildet, welcher in seiner Ausführungsart grundsätzlich dem der Streifenfundamente (Bild 25).

Die Ringanker werden ebenfalls aus vorgefertigten Stahlbetonsteinen hergestellt, welche konstruktiv durch Spannelemente (2 Stäbe Durchmesser 16 mm) miteinander verbunden sind. Somit werden die Wände am Kopf zusammengehalten. Da die Ringanker bereichsweise auch die Sturzfunktion übernehmen und daher über Biegetragfähigkeit verfügen müssen, ist die Spannelementführung hier im unteren Bereich der Geometrie angeordnet

Es gibt vier unterschiedliche Ringankersteinmodule, wie auf dem Bild 26 dargestellt wird. Die Steinabmessungen betragen je 0,5 m x 0,25 m, mit 0,3 m Steinhöhe, abweichend dazu gibt es halbe Passsteine mit einer Länge von 0,25 m. Kernstück ist ein Hülsenankerstein mit je zwei 16 mm Hülsenankern an drei Seitenflächen, hieran können die Spannstäbe in horizontaler Richtung angeschlossen werden. Abweichend zu den Fundamentsteinen sind keine Hülsenanker für einen vertikalen Anschluss vorgesehen. Stattdessen gibt es vertikale 40 mm Rohrdurchführungen, um vertikale Spannstäbe durchleiten zu können. Weiterhin gibt es zwei

Arten von Standardsteinen mit 40 mm Rohrdurchführungen als Voll- und Halbsteinausführung. Durch diese Steine werden die horizontalen Spannstäbe bis zu einem Spannstein hindurchgeführt. Der Spannstein selbst zeichnet sich durch ebenfalls 40 mm Rohrdurchführungen sowie zusätzlichen seitlichen Aussparungen aus. Hier können von zwei Seiten zugeleitete Spannstäbe mittels Spannschlössern miteinander verbunden und verspannt werden. Die Vorspannung wird dabei allein mittels Drehmomentschlüssel realisiert und bedarf keiner maschinellen Unterstützung. An den Steinunterseiten sind zu den Kalksandsteinmodulen passende Negativformen für die Aufnahme der Kreuzverbinder vorgesehen.

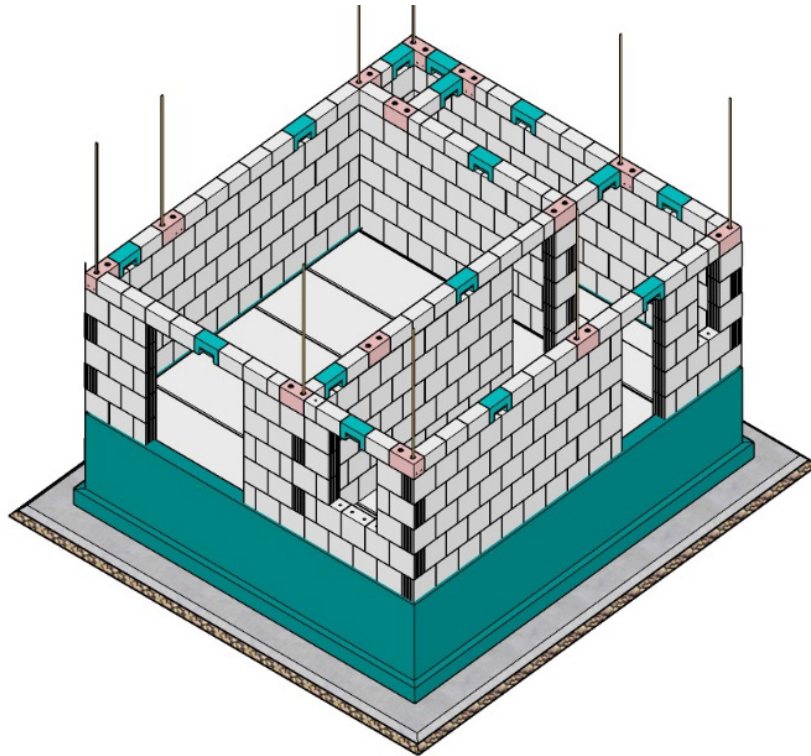


Bild 25 Ringankerausführung und Spannelementführung im Versuchsbau

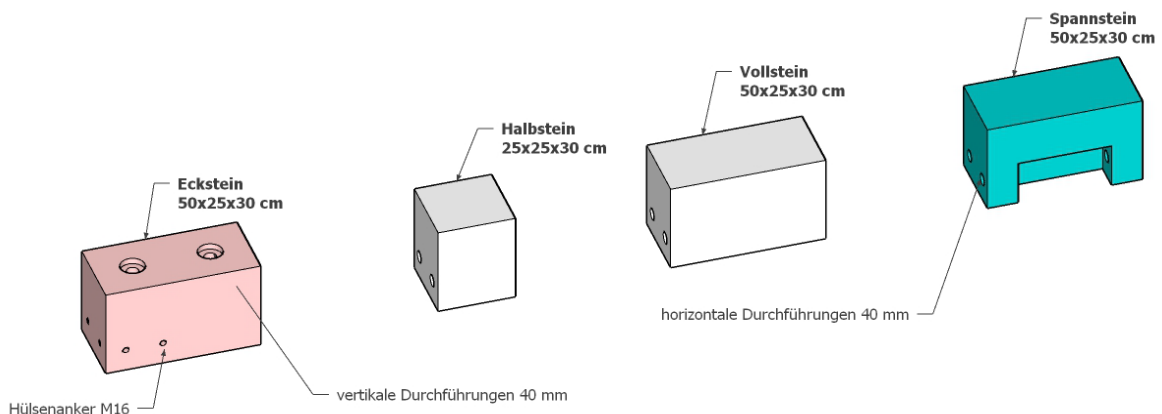


Bild 26 Ringankerbetonsteine für Versuchsbau

Die trockene Bauweise der Ringankersteine ermöglicht eine sortenreine Demontage und lässt eine Wiederverwendung zu. Die erste Bauausführung der Ringanker ist im Abschnitt 5 dargestellt.

### 3.3.5 Deckenplatten-System

Die Verwendung des in [3] entwickelten Deckensystems mit verspannten Kalksandsteinen konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht eingesetzt werden, da die Praxistauglichkeit noch nicht vorliegt.

Für die Anwendung im Versuchsgebäude wurde deshalb auf Spannbeton-Hohldeckenplatten zurückgegriffen.

Durch Anwendung dieser Deckenplatten können mit einer vergleichsweise geringen Deckenhöhe große Spannweiten überbrückt werden. Durch die Hohlräume im Deckenelement sinkt im Vergleich zu einer massiven Betondecke nicht nur das Eigengewicht, sondern auch die Verwendung von bis zu 50% weniger Beton und 72% weniger Stahl und somit auch der Bedarf an Primärressourcen (Bild 27) [19].

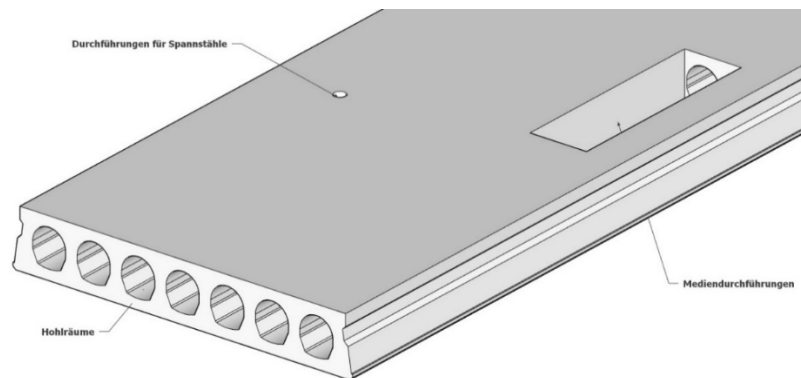


Bild 27 *Spannbeton-Fertigdeckenplatte*

Deshalb wurden alle Geschossdecken sowie die Dachdecke aus Spannbetonfertigteilen vorgesehen. Die Entscheidung fiel hier zugunsten von BRESPA-Decken, Typ A20B (Plattenstärke 20 cm) von DW-Systembau (siehe Bild 28). Die Platten werden trocken (ohne Fugenverguss) verlegt und nach unten verspannt, die erforderlichen Durchführungen für Spannelemente werden bereits werkseitig berücksichtigt und nur in Ausnahmefällen nachträglich gebohrt. Mittels Zulagebewehrung auf der Plattenoberseite lässt sich der kleine auskragende Balkon realisieren, die thermische Entkopplung erfolgt durch Integration in die Außendämmung. Eventuell erforderliche Höhenausgleiche zur Toleranzüberbrückung können mit Hartgummistreifen bzw. leicht trennbaren Mörtelschichten realisiert werden (siehe erste Bauausführung im Abschnitt 5).

Die trockene Bauweise dieser Deckenplatten ermöglicht eine sortenreine Demontage und lässt eine Wiederverwendung zu.

Die Verspannung nach unten kann abschnittsweise, bedarfsgerecht dem Bauablauf folgend realisiert werden. Nach Herstellung der Verspannung an einem Höhenabschnitt werden die Spannstäbe mittels Verbindungshülsen für die nächste erforderliche Abschnittshöhe verlängert. Das finale Verspannen erfolgt an der das Gebäude abschließenden Attika (Bild 29). Die vertikalen Hauptverspannungen befinden sich dabei nur an neuralgischen Punkten wie Wandecken, Wandenden oder Wandkreuzungen. Allerdings ist es zusätzlich möglich lokale Verspannungen innerhalb einer Wand zu realisieren, z.B. im Bereich von Fenster- oder

Türöffnungen. Während des gesamten Herstellungsvorgangs muss die Vorspannung an den einzelnen Bauteilen geprüft und bei Bedarf nachgespannt werden. Nach Fertigstellung des Gebäudes ist ein abschließendes Nachspannen aller wesentlichen Spannelemente vorzusehen.

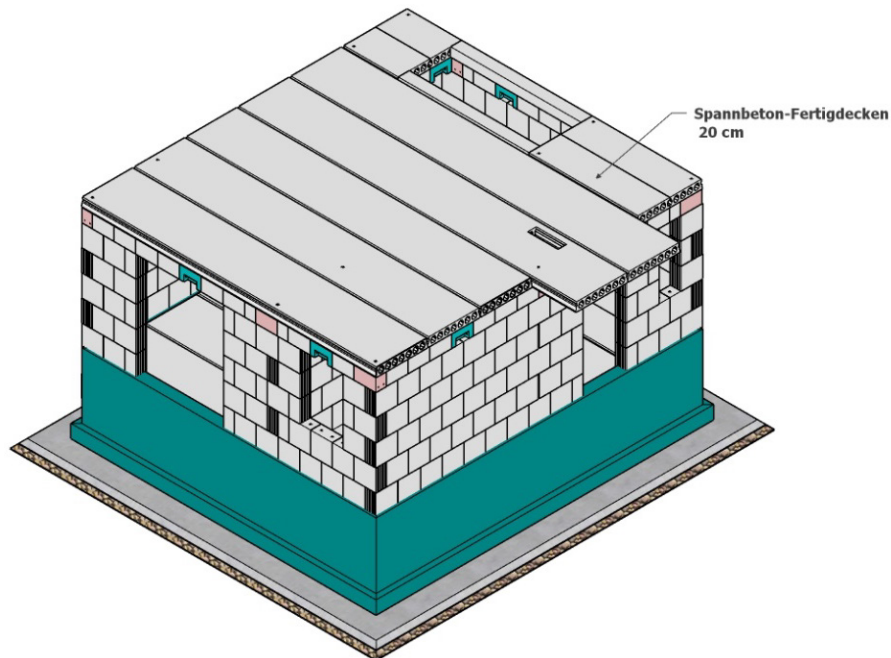


Bild 28 *Verlegung der Deckenplatten über dem Erdgeschoß*

Inwieweit die Notwendigkeit zum Nachspannen vorgesehen werden muss, konnte im Rahmen des Forschungsprojektes nicht weiter untersucht werden. Da es über die Nutzung zu Spannkraftverlusten und Kraftumlagerungen kommen kann, müssen ggf. Revisionszugänge zu den Spannelementen erhalten bleiben, um bei Bedarf Nachspannen zu können.

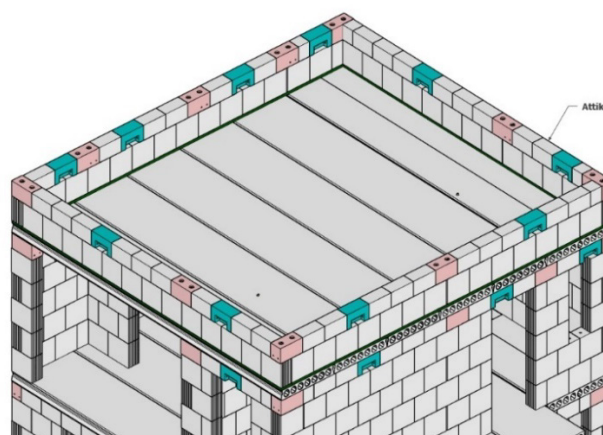


Bild 29 *Attika-Ebene*

Die erste Bauausführung der Deckenplatten ist im Abschnitt 5 dargestellt.

Auf die dargestellte Art lässt sich das gesamte Gebäude (Rohbau) ohne den Einsatz von Mörtel oder Kleber herstellen. Eine besonders wesentliche Thematik stellt dabei allerdings die Forderung von möglichst hoher Maßgenauigkeit der verwendeten Konstruktionselemente dar. Es dürfen nur sehr geringe Fertigungstoleranzen zugelassen werden, damit eine praktikable Trockenbauweise überhaupt realisiert werden kann. Bereits geringe Abweichungen in den Elementmaßen können zu einem systematischen Fehlerrücklauf führen, der sich mit Baufortschritt zunehmend negativ auswirken würden. Die KS-Quadro-Elemente haben Toleranzen im Rahmen der Toleranzklasse 3 nach DIN EN 771-2:2015-11 ([83] Tabelle 1). Entsprechende Möglichkeiten zum Ausgleich der Toleranzen müssen vorgesehen werden.

### 3.3.6 Zusammenfassung

Mit dem hier vorgestellten Entwurf soll eine modulare, trockene und vollständig rückbaubare Bauweise unter realen Bedingungen untersucht, geprüft und weiterentwickelt werden. Schwerpunkt dabei ist die vollständige Errichtung eines Versuchsbaus mit allen erforderlichen Ausbauelementen (siehe Abschnitt 4), am fertigen Objekt sollen in situ Untersuchungen durchgeführt werden. Einen weiteren wesentlichen Punkt stellt der vollständige Rückbau des Experimentalbaus, dessen Verbringung an einen anderen Ort sowie die Widererrichtung dar (siehe Abschnitte 9 und 10).

## 4 Entwicklung des Ausbaus

### 4.1 Theoretische Grundlagen und Zielsetzung

#### 4.1.1 Einleitung und Zielsetzung

Ein wichtiger Teil dieser Arbeit ist die Entwicklung eines passenden demontierbaren und rückführbaren Ausbausystems, welches die angesetzten Kriterien insbesondere die Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit sowie die sortenreine Trennbarkeit erfüllt.

Diesbezüglich war der vollständige Außenaufbau mit allen dafür erforderlichen Elementen wie Dämmung, Fassade, Fenster, Türen, Loggia, Balkon, Dachdeckung und Attika zu planen und zu entwickeln. Im Rahmen des Außenaufbaus sind vorhandenen Anschlussmöglichkeiten zu erproben bzw. neue Möglichkeiten zu entwickeln gewesen. Für die Außenfassade wurde ein Aufbau angelehnt an das Forschungsprojekt „0EneMau“ geplant [2]. Dafür kommt das dort entwickelte Konsol- und Ankersystem zum Einsatz. Die Halteelemente werden an die regelmäßig im Raster von 0,25 m x 0,5 m vorhandenen Kreuzverbinder angeschlossen. Die erforderliche Wärmedämmung wird dabei mittels hochwärmedämmender Vakuumdämmpaneele erreicht. Die Außenfassade selbst wird als rückbaubares Click-Brick-System oder in Form von Kunststoffverkleidungselementen bzw. einer Faserzementverkleidung ausgeführt. Das Flachdach wurde als Grün-Dach konzipiert und mit einer trittfesten Vakuumdämmung versehen, die Abdichtung erfolgt analog zu den Fundamenten mit verschweißten Kunststoffbahnen. Für Loggia und Balkon ist der gleiche Aufbau vorgesehen.

Dem Innenausbau fällt beim Projekt ebenfalls eine entscheidende Bedeutung zu, auch dieser soll maximal modularisiert und rückbaubar erfolgen. Dafür gibt es am Markt bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme, die es gilt im Projekt miteinander zu kombinieren und Anschlussmöglichkeiten zu entwickeln. Ferner müssen alle Versorgungs- und Entsorgungsleitungen wie Strom, Belüftung, Entlüftung, Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Heizung und Kommunikation in den Ausbau integriert bzw. dahinter versteckt werden. Auch dafür gibt es bereits in der Praxis erprobte Systeme, so z. B. im Bereich des Messebaus, welcher konzeptionsgemäß ohnehin nur für einen relativ kurzen Zeitraum errichtet und anschließend rückgebaut wird. Ein wesentlicher Bestandteil dabei sind normierte Steckverbindungen und Anschlussmöglichkeiten, die es im Projekt zu integrieren und weiterzuentwickeln gilt.

Neben den massiven Trockenmauerwerkswänden sind Leichtbauwände in Trockenausführung vorgesehen. Dafür finden sich am Markt fertige Schienensysteme, bei welchen die Verkleidungsplatten lediglich noch eingeklickt werden und keine Verschraubung erfolgen muss. Damit sind solche Systeme ideal für das vorliegende Projekt geeignet. Ähnlich verhält es sich mit der Verkleidung der massiven Trockenmauerwerkswände an den Innenseiten. An den vorhandenen Kreuzverbindern kann die Unterkonstruktion befestigt und daran die Verkleidungselemente eingeklickt werden. Bereichsweise vorstellbar ist außerdem ein System aus punktuellen Klettanschlüssen, welches direkt durch die Kreuzverbinder getragen wird. Der Fußbodenaufbau soll nach dem aktuellen Stand der Technik schwimmend in Trockenausführung verlegt werden, auch dieser soll vollständig rückbaubar ausgeführt werden. Eine bereichsweise Aufständigung des Fußbodens, zwecks Aufnahme von Versorgungs- und Entsorgungsleitungen, hier insbesondere Wasser und Abwasser, kann bedarfsgerecht eingeplant werden. Eine wesentliche Rolle beim Innenausbau fällt der abgehängten Decke zu. Auch dafür gibt es eine Reihe von rückbaubaren Systemabhängungen am Markt. Unter der abgehängten Decke muss ein Großteil der erforderlichen Versorgungs- und Entsorgungsleitungen untergebracht werden.

#### 4.1.2 Demontierbarkeit

Die Demontierbarkeit bildet ein entscheidendes Kriterium bei der Planung des gesamten Ausbaues für den Experimentalbau. Am Ende der Nutzungsphase ist eine effektive und effiziente Zerlegung des Gebäudes im Sinne einer ressourcenschonenden Bauweise anzustreben. Dieser Prozess kann auch als verwertungsorientierter Rückbau bezeichnet werden und bedeutet, dass anfallende Materialien weitgehend einer Verwertung oder Wiederverwendungsabfolge zugeführt werden können [20].

Grundlage für eine erfolgreiche End-of-life-Strategie ist die Trennung der Baumasse in möglichst sortenreine Fraktionen. Beim konventionellen Abbruch hingegen werden die Bauabfälle nicht vor Ort getrennt, sondern gesammelt und als Mischabfall abtransportiert. Ein anschließender Verwertungsprozess ist durch die Menge an verschiedenen Materialien aufwendig und weniger effektiv.

Aus diesem Grund hat die Konzipierung von demontierbaren Bauteilen einen hohen Einfluss auf die zirkuläre Wertschöpfungskette. Ein vorausschauendes Entwurfskonzept, bereits vor der Herstellung die Strategien der Demontage zu beachten, zeigt das Design for Disassembly (DfD). Der Begriff „Design for Disassembly“ steht für Maßnahmen, die bereits im Entwurfsprozess die Demontagefreundlichkeit von Produkten und Gebäuden zur Wiederherstellung von System, Komponenten und Materialien im Fokus haben. Die Rückgewinnung von Materialien maximiert den wirtschaftlichen Wert einer Konstruktion und verringert die Umweltauswirkung durch anschließende Wiederverwendung, Reparatur, Wiederaufbereitung und Recycling. DfD ermöglicht Flexibilität, Konvertierbarkeit, Addition und Subtraktion von ganzen Gebäuden und Produkten [21]. In diesem Leitfaden sind Regeln und Hinweise formuliert, die eine demontagegerechte Gestaltung der Baustruktur zur Folge haben. Zu den wichtigsten Prinzipien des DfD gehören:

- Minimierung verschiedener Materialien in einem System,
- Vermeidung toxischer und giftiger Materialien,
- Vermeidung von Verbundwerkstoffen,
- Vermeidung von sekundären Beschichtungen,
- Permanente Identifizierung und Dokumentation von Materialien,
- Verwendung mechanischer Verbindungen,
- Systematische Trennung unterschiedlicher Baugruppen,
- Gewährleistung von zugänglichen Bauteilanschlüssen,
- Verwendung handlicher Materialgrößen,
- Planung realistischer Toleranzen.

Der DfD-Leitfaden versucht Herstellern und Konsumenten auf den intelligenten Einsatz einzelner Materialien und deren Kombination aufmerksam zu machen, um durch eine erfolgreiche Demontage den Ressourcenverbrauch zu verringern (Bild 30).

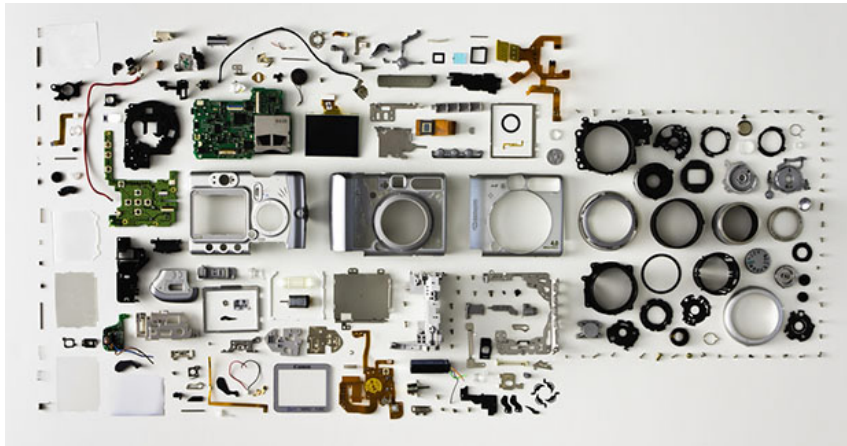


Bild 30 *Demontagekonzept einer Kamera [22]*

#### 4.1.3 Rezyklierbarkeit

Der Vorgang, gebrauchte Materialien am Ende der Nutzungsphase und erfolgreicher Demontage einer Kreislaufform zu zuzuführen, wird als „Recycling“ beschrieben. Durch eine zirkuläre Verwertungskette, bei der versucht wird, die gebundene Primärenergie und Rohstoffe wieder zu verwenden, kann der Bedarf an Ressourcen bei der Herstellung sinken und in einer theoretisch idealen Kreislaufbetrachtung ganz entfallen. Im Gegensatz dazu wird der Abfall in einer linearen Betrachtung nicht als Rohstoffquelle gesehen, sondern auf Deponien entsorgt und die gebundene Energie und Materialien sind verloren.

Ein effektives Recycling ist maßgeblich von den Material- und Verbindungseigenschaften abhängig, da sortenrein vorliegende Materialien effektiver getrennt und verwertet werden können. Durch die Vielzahl und Komplexität an Produkten im Bauwesen werden diese in unterschiedliche Konzepte der Verwertungsmöglichkeit in der Bauwirtschaft unterteilt [1].

Den qualitativ höchsten Mehrwert bietet die Wiederverwendung ganzer Produkte (Produktrecycling), bei der gebrauchte Bauteile zu demselben Zweck wiederverwendet werden. Der Wert- und Nutzungserhalt steht hierbei im Vordergrund und ist vor der erneuten Verwendung zu überprüfen. Ein Beispiel dafür ist die Demontage von Fenstern, die bei fachgerechtem Einbau ohne Qualitätsverlust demontiert und in neuen Projekten verwendet werden können.

Das Recyceln der Rohstoffe, auch Materialrecycling genannt, zeigt eine weitere Möglichkeit, Produkte zirkulär zu verwerten. Im Verwertungsprozess werden die Rezyklate als Ressource zur Herstellung derselben Produkte bei gleichbleibender oder höherer Qualität in einem geschlossenen Kreislauf (closed-loop-Verfahren) verwendet. Grundlage dafür ist die sortenreine Trennung der Bauteile in ihre Primärrohstoffe. Ein Beispiel dafür ist der PET-Kreislauf aus der Verpackungsindustrie, bei dem gebrauchte Plastikflaschen als Rezyklat zur Herstellung neuer Kunststoffflaschen benutzt werden. Bedingt durch die sortenreine Trennung und die günstigen Eigenschaften von PET, erreicht dieser Verwertungsprozess eine Wirkungsbilanz von 98 Prozent.

Der gleiche Ansatz wird beim Downcycling angewendet, jedoch wird hierbei das Rezyklat mit Qualitätsverlust zur Herstellung neuer, abweichender Produkte in einem offenen Kreislauf (open-loop-Verfahren) benutzt. Auch dafür lassen sich Beispiele in der Verpackungsindustrie finden, bei denen Rezyklate der Verpackungsindustrie zur Herstellung von Bekleidungsartikeln verwendet werden. Im Bauwesen ist das Downcycling mit erheblichem Qualitätsverlust, weil der dem Bauwerk entnommene Stoff in der Regel eine Qualitätsstufe tiefer wieder verwendet wird, so Beton geschreddert als Unterbau. Bei dem Forschungsvorhaben



RCWE [3] ist Betonrecyclat für die Herstellung neuer Wandbauelemente verwendet worden, also in gleicher Qualitätsstufe.

Die thermische Verwertung von Materialien, die sich durch gute Brenneigenschaften auszeichnen, wird der Energetischen Verwertung zugeordnet. Der Abfall wird als Ersatzbrennstoff eingesetzt und die gebundene Primärenergie zur Herstellung neuer Produkte eingesetzt.

Diese vier Verwertungsprozesse stellen Möglichkeiten einer zirkulären Nutzung von Abfall dar. Im Gegensatz dazu werden bei der linearen Betrachtung die enthaltene Primärenergie und Rohstoffe durch Deponierung oder thermische Beseitigung nicht wieder genutzt [1].

Die Entscheidung, welcher Verwertungsprozess angewendet wird, hängt nicht nur von technischen Parametern ab, sondern auch maßgeblich von den Eigenschaften und der Qualität der verwendeten Materialien. Durch eine mangelnde Trennung der Materialien wird die Effektivität der Prozesse gemindert und der Recyclingwirkungsgrad sinkt. Aus diesem Grund sind die Verfahren Demontage und Recycling zusammenhängend in der Planung einer Verwertungsstrategie zu betrachten (Bild 31).

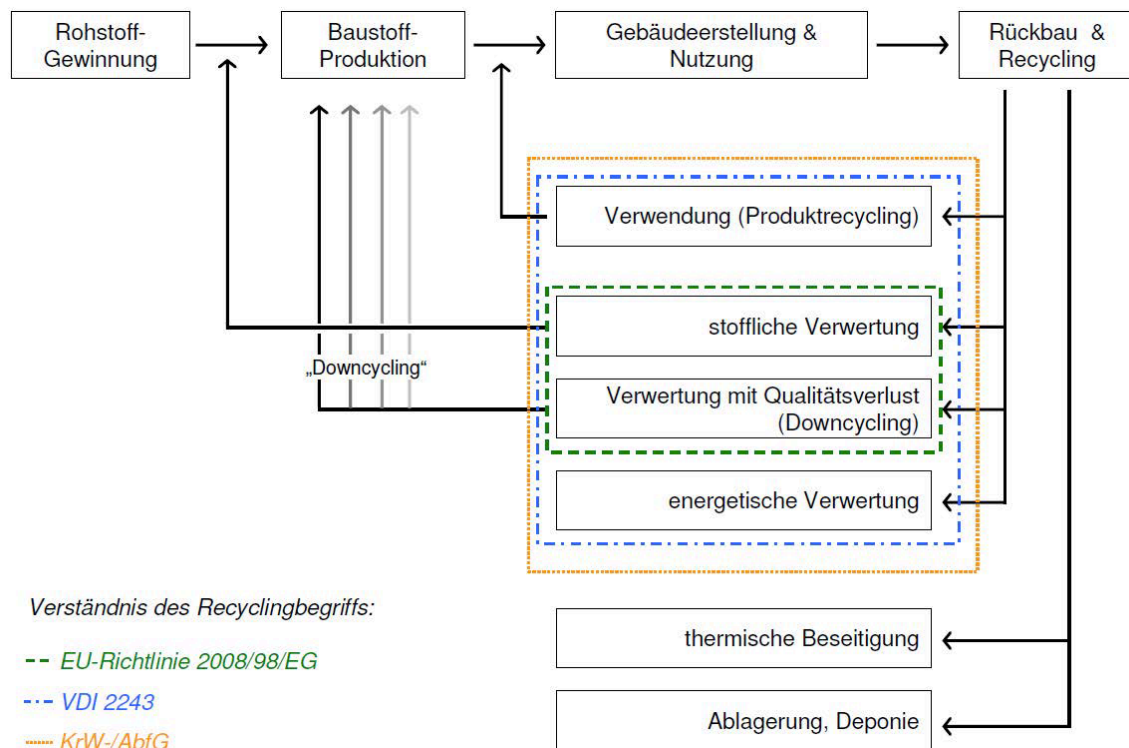


Bild 31 Verwertungswege [1]

Im Folgenden werden zwei Zertifizierungssysteme vorgestellt, die eine ressourceneffiziente Wiederverwendung und Verwertung von Bauteilen in einem Bewertungsrahmen begünstigen. Es handelt sich dabei um zwei unterschiedliche Zertifizierungssysteme mit unterschiedlichen Schwerpunkten.

## Cradle-to-Cradle-Zertifizierung

Das von Michael Braungart und William McDonough entwickelte Cradle-to-Cradle Prinzip basiert auf der Idee, in kompletten Produktkreisläufen zu denken. Das hat zur Folge, dass Abfall kein Endprodukt mehr ist, sondern als „Nährstoff“ betrachtet werden kann, um den nächsten Zyklus der Produktherstellung zu ermöglichen [23]. Der Begriff Recycling kann in diesem Zusammenhang dem Materialrecycling zugeordnet werden und zeichnet sich durch einen qualitativen Erhalt der „Nährstoffe“ aus. Außerdem ist es durch anwendungsbezogene Prozesse erreichbar, die Qualität der Verwertungskette zu erhöhen; auch Upcycling genannt [23].

In diesem ideal geschlossenen Kreislauf gehen keine Ressourcen verloren. Unterschieden wird auf Produktebene zwischen Verbrauchs- und Gebrauchsgegenständen. Verbrauchsgegenstände sind nach der Benutzung biologisch abbaubar und so konzipiert, dass sie im biologischen Kreislauf wiederverwertet werden können. Im Recyclingprozess werden sie zu biologischen Nährstoffen zersetzt und fördern somit biologische Systeme als Basis für neue Produkte [24].

Im Gegensatz dazu gehören die Gebrauchsgegenstände zu dem technischen Kreislauf, der ebenfalls in sich geschlossen ist. Die Produkte werden von den Herstellern so geplant, dass die verbauten hochwertigen Materialien am Ende der Gebrauchskette durch Demontage separiert werden können und als technische Nährstoffe die Produktion neuer Gebrauchsgüter ermöglichen [25] (Bild 32).



Bild 32 *Cradle-to-Cradle, Grundlagen einer Kreislaufwirtschaft [1]*

Unter diesen Umständen wird Abfall nicht reglementiert, sondern als Nährstoffbasis zur Schließung der Kreislaufsysteme gesehen. In dieser idealen zirkulären Betrachtung wird keine Einsparung von Rohstoffen vorausgesetzt und dadurch eine geringere Belastung von Ökosystemen proklamiert, sondern eine uneingeschränkte Nutzung von Ressourcen durch den ständigen Erhalt der Nährstoffe ermöglicht [26]. Braungart spricht in diesem Zusammenhang von intelligenter Verschwendung [27].

Zusätzlich zu dem publizierten C2C-Leitfaden versucht die von Braungart gegründete EPEA GmbH, mit Hilfe eines internationalen Netzes an Partnergesellschaften, das C2C-Konzept zu verbreiten. Ergänzend stellt das C2C-Products-Innovations-Institut (C2CPII), als separates Labor, Zertifizierungsstandards für Produkte aus [26]. Der Rahmen für die Zertifizierung wird in dem Kriterienkatalog C2C-Certified in der aktuellen Version 4.0 festgelegt [28]. Dieser C2C Punktstandard sieht vor, dass Produkte in fünf Kategorien bewertet werden:

- Material,
- Wiederverwertung,
- Erneuerbare Energien,
- Verantwortungsvoller Umgang mit Wasser,
- Soziale Gerechtigkeit.

Neben den verwendeten Rohstoffen werden zugleich auch Produktionsbedingungen, der Einsatz von erneuerbaren Energien, soziale Bedingungen und die Wasserwirtschaft zur Herstellung betrachtet. Das Produkt wird anhand dieser Parameter geprüft und kann so in eine Abstufung von Basic bis Platinum, unabhängig von der Verwendung, kategorisiert werden. Die Zertifizierung ist zudem alle zwei Jahre zu erneuern, um die Einhaltung der Produktionsregularien und eine effektive Bewertung zu gewährleisten. Dabei kann eine erneute Überprüfung auch zu einem Upgrade oder zur Herabstufung des Produktes führen [26].

Der Verbraucher erhält dadurch einen transparenten Beleg über die Produktqualität und ökologische Verantwortung. Die Zertifizierung von ganzen Gebäuden kann nicht durchgeführt werden, jedoch hat eine C2C-Zertifizierung (Bild 33) positiven Einfluss auf die amerikanische LEED- und die niederländische BREEAM-Gebäudezertifizierung [24]. Dort können im Bereich „Building Product Disclosure and Optimization-Material Ingredients“ bis zu vier Punkte erhalten werden [27].

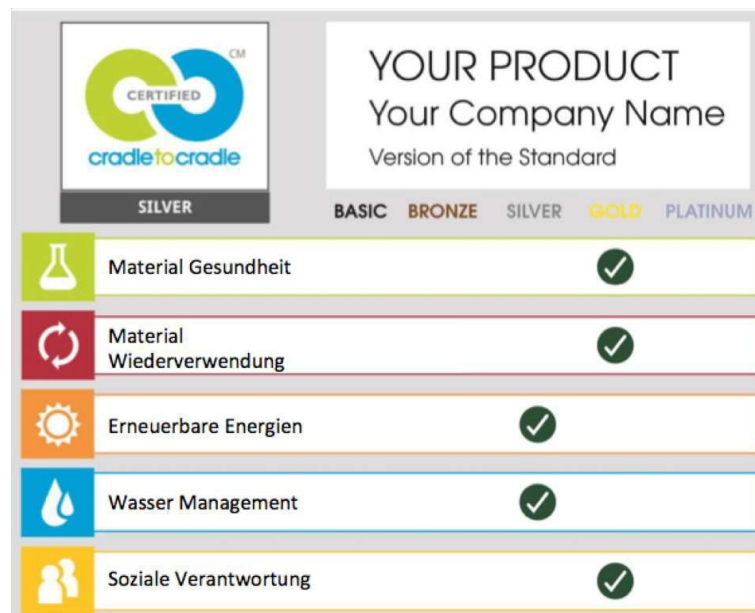


Bild 33 C2C Zertifizierung [1]

## DGNB Zertifizierung

Die Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, kurz DGNB, sieht sich mit ihrem Zertifizierungsverfahren als unabhängiges und neutrales Instrument zur Qualitätskontrolle. Die Zertifizierung von ganzen Gebäuden erfolgt über einen Kriterienkatalog, der die folgenden Themenfelder umfasst: ökologische, ökonomische, soziokulturelle und funktionale, technische Qualität, sowie die Prozess- und Standortqualität [29] (Bild 34).



Bild 34 Kriterien DGNB [1]

Die Bewertung der einzelnen Parameter erfolgt über die Betrachtung des ganzheitlichen Lebenszyklus des Gebäudes. Je nachdem, wieviel Prozent der Anforderungen erfüllt werden, wird das Bronze-, Silber-, Gold- oder Platin-Zertifikat verliehen [29] (Bild 35).

### VON PLATIN BIS BRONZE: DIE AUSZEICHNUNGSLOGIK DER DGNB

	PLATIN	GOLD	SILBER	BRONZE*
Gesamterfüllungsgrad	ab 80%	ab 65%	ab 50%	ab 35%
Mindesterfüllungsgrad	65%	50%	35%	— %

\* Diese Auszeichnung gilt nur für das Bestandszertifikat bzw. für das Zertifikat „Gebäude im Betrieb“.

Bild 35 Auszeichnungslogik der DGNB [1]

Im Kriterienkatalog verwendet die DGNB den Begriff „circular economy“ als Beispiel für Kreislaufbetrachtungen der Bauwirtschaft. Die Ellen MacArthur Foundation [84] definiert den Begriff wie folgt:

- Endliche Ressourcen wertschätzen und deren Bestände und Stoffströme kontrollieren. Nutzung erneuerbarer Energien, Vermeidung endlicher Ressourcen und genutzte Rohstoffe gewinnen.

- Rohstofferrträge erhöhen, indem Kreisläufe geschlossen werden, wobei die höchstmögliche Wertigkeit der Rohstoffe erhalten bleibt.

Die Kernthese dieser Definition ähnelt der bereits beschriebenen C2C-Leitidee und beschreibt den gleichen Grundgedanken der zirkulären Verwertungskette. Der Begriff „circular economy“ bezieht sich nicht auf die Produktebene, sondern ermöglicht eine Kreislaufanalyse unabhängig vom Wirtschaftssektor oder der Art des Produktes; so können auch Dienstleistungen die zirkuläre Qualität erhöhen.

Zur Beurteilung einer erfolgreichen Demontage und Verwertung wird im Kriterienkatalog des DGNB der Punkt „TEC 1.6 Rückbau und Recyclingfreundlichkeit“ verwendet. Definiert wird das Kriterium durch eine weitgehende Reduktion und einer effizienten Nutzung der eingesetzten, natürlichen Ressourcen. Die Erweiterung des Kataloges im Jahr 2018 führte die „Circular-Economy-Boni“ ein, welche eine Bewertung und Zertifizierung von fortschrittlichen Lösungen im Sinne einer zirkulären Ausrichtung zulassen. Durch die Vergabe von Bonuspunkten, die sich positiv auf das Gesamtgebäudeergebnis auswirken, werden Anreize geschaffen, die Leitfäden anzuwenden (Bild 36).

<b>Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit</b>	Wiederverwendung oder werkstoffliche Verwertung: Im Gebäude werden Bauteile wieder-verwendet oder Bauteile eingesetzt, die heute bereits nachweislich einer werk-stofflichen Verwertung zu einem vergleich-baren Produkt zugeführt werden.	Maximaler CE Bonus: +20 Punkte (1 Punkt je Bauteil)
<b>Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit</b>	Vermeidung von Bauteilen: Im Gebäude wird auf den Einsatz von üblicherweise für diese Nutzung eingebaute Bauteile komplett verzichtet. Die Lösung vermeidet plausibel und nachweislich den Einsatz von Roh- oder Sekundärstoffen in wesentlichem Umfang.	Maximaler CE Bonus: +10 Punkte (1 Punkt je Bauteil)

Bild 36 Handlungsfelder Demontage und Recycling [1]

Zusätzlich entwickelte die DGNB eine Toolbox mit Handlungsfeldern und Lösungen für Designer und Planer. Diese dient als Planungswerkzeug, wie sich Circular-Economy-Konzepte im Bauwesen integrieren und umsetzen lassen.

Die Struktur der Toolbox unterscheidet zwischen strategischen Handlungsfeldern und anwendungsorientierten Impulsen für die Planung [31]. Strategische Handlungsfelder beschreiben dabei Wege der Verwertung und Verwendung für die am Bauprozess beteiligten Akteure. Dazu werden neben ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Punkten auch Hinweise zur Verwertung vermittelt. So nimmt der Supply-Chain-Service einen wichtigen Punkt in einer effizienten Rücklaufkette ein und ermöglicht neue Wirtschaftskonzepte [30].

Als Beispiel hierfür kann die Firma Ytong aufgeführt werden, die bei der Lieferung der Porenbetonsteine, „Big Bags“ zur Aufbewahrung von Schnittmaterialresten bereitstellen (Bild 37). Ohne größere Kontamination der Porenbetonreste kann das Material sortiert und gelagert werden. Sobald die Kapazitäten der Big Bags erschöpft sind, werden sie vom Umweltdienstleister Interseroh eingesammelt und können einem sortenreinen Recyclingprozess zur Herstellung neuer Steine zugeführt werden [32]. Die Kette zeigt auch die Möglichkeit der sortenreinen Rückführung von gebrauchten Steinen auf, sofern diese nicht durch Mörtelreste oder Putze verunreinigt sind. Der Trockenbau schafft hier Abhilfe.



Bild 37 *Big Bags zur sortenreinen Trennung [1]*

#### 4.1.4 Einfluss der Verbindungstechnik

Die Qualität der Demontage- und Recyclingprozesse hängt stark mit dem Trennungsaufwand der einzelnen Bauteile zusammen. So lässt sich wie folgt verallgemeinern:

Je geringer der manuelle oder maschinelle Trennvorgang ist, desto effizienter sind Demontage und Recycling.

Bei der Auswahl der Verbindung ist in der Planung zu beachten, welche Bauteile zu demontieren sind und welche Recyclingform angewendet werden soll. Sie ermöglichen eine wertvolle Wiederverwendung der Bauteile, ohne diese zu zerstören. Außerdem kann bei der Demontage der aufwendige Maschineneinsatz und dadurch zusätzliche Lärm- und Staubbelastung im städtischen Raum minimiert werden [1]. Das zu rezyklierende und somit wiederverwertbare Material/Bauteil kann auf diese Weise noch vor Ort und unter saubereren Bedingungen getrennt und die Verbindungsarten nach ihrem physikalischen Wirkprinzip unterteilt werden. Das Bild 38 zeigt eine Übersicht von gängigen Verbindungsmitteln im Bauwesen. Im Sinne eines erfolgreichen Demontierens und Recyclings ist die Wahl von zerstörungsfreien Verbindungen zu präferieren, bei denen die Funktion und Qualität des Materials erhalten bleibt.

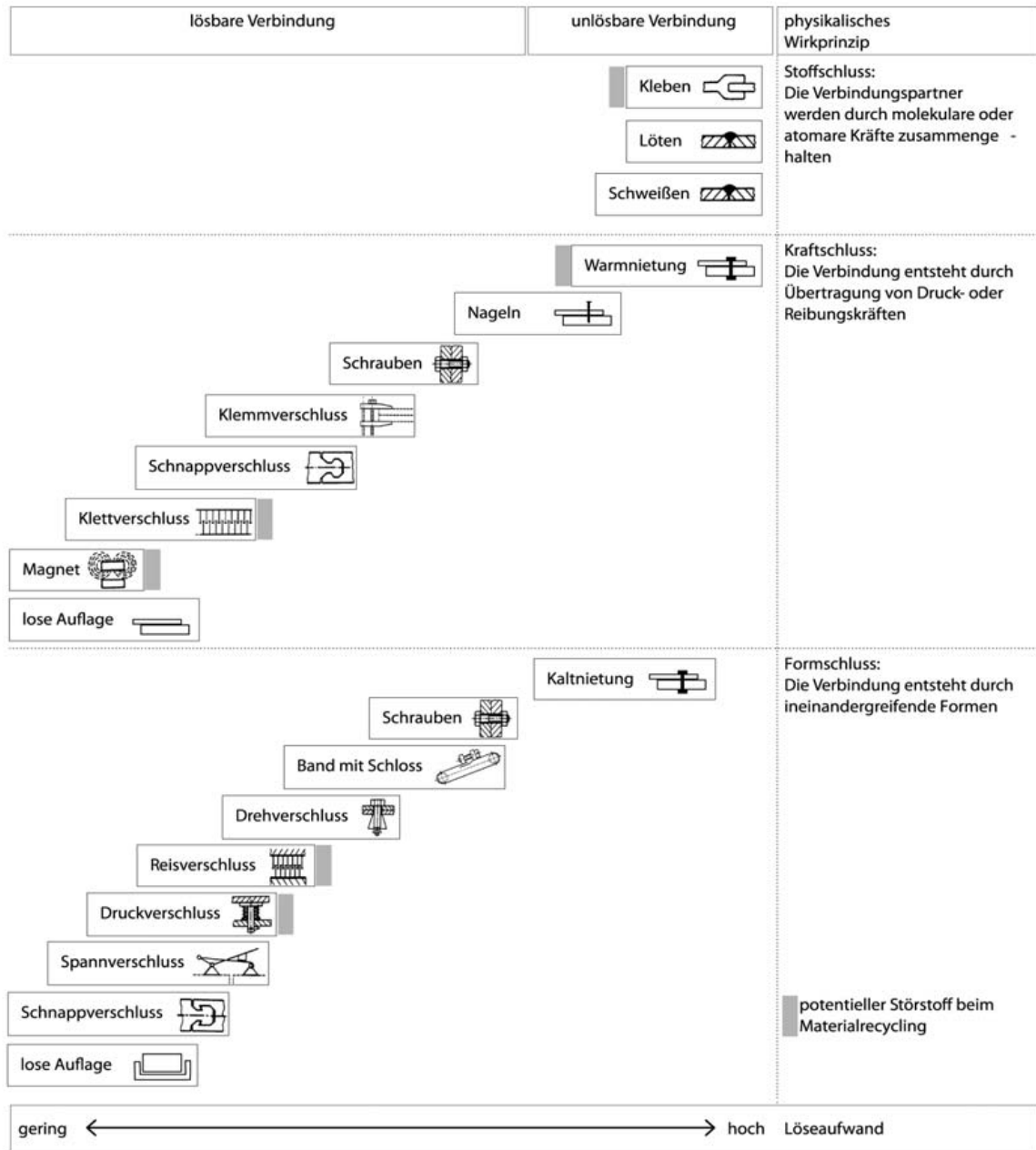


Bild 38 Verbindungstechniken

#### 4.1.5 Stand der Wissens und Referenzobjekte

Die folgenden Beispiele zeigen praktische Ansätze und Testobjekte, wie sich die Leitfäden mit erfolgreichen Demontage- und Recyclingkonzepten in der Bauindustrie integrieren lassen:

##### Circle House

Architekt: 3XN/GXN, Vandkunsten, Lendager Arkitekter

Realisierung: 2020

Das Projekt wird von einer Gemeinschaft „Collaboration Studios“ mehrerer dänischer Unternehmen geplant. Diese Gemeinschaft verfolgt das Ziel, Wissen über zirkuläre Konstruktionen zu entwickeln und zu verbreiten. Der Komplex besteht aus 60 allgemeinen Wohneinheiten in Lisbjerg bei Aarhus (Dänemark), die 2020 fertiggestellt worden sind. Das Circle House besteht aus einer Reihe von Gebäudesystemen, die unter Beibehaltung ihrer wirtschaftlichen und ästhetischen Werte in anderen Gebäuden montiert, demontiert und wiederaufgebaut werden können (Bild 39). Das Ziel ist die Wiederverwendung von 90% der gebrauchten Materialien, ohne dabei an Wert zu verlieren. Im Projekt können eine Vielzahl von Materialien durch lösbare Verbindungen wiederverwendet werden [33] (Bild 40).

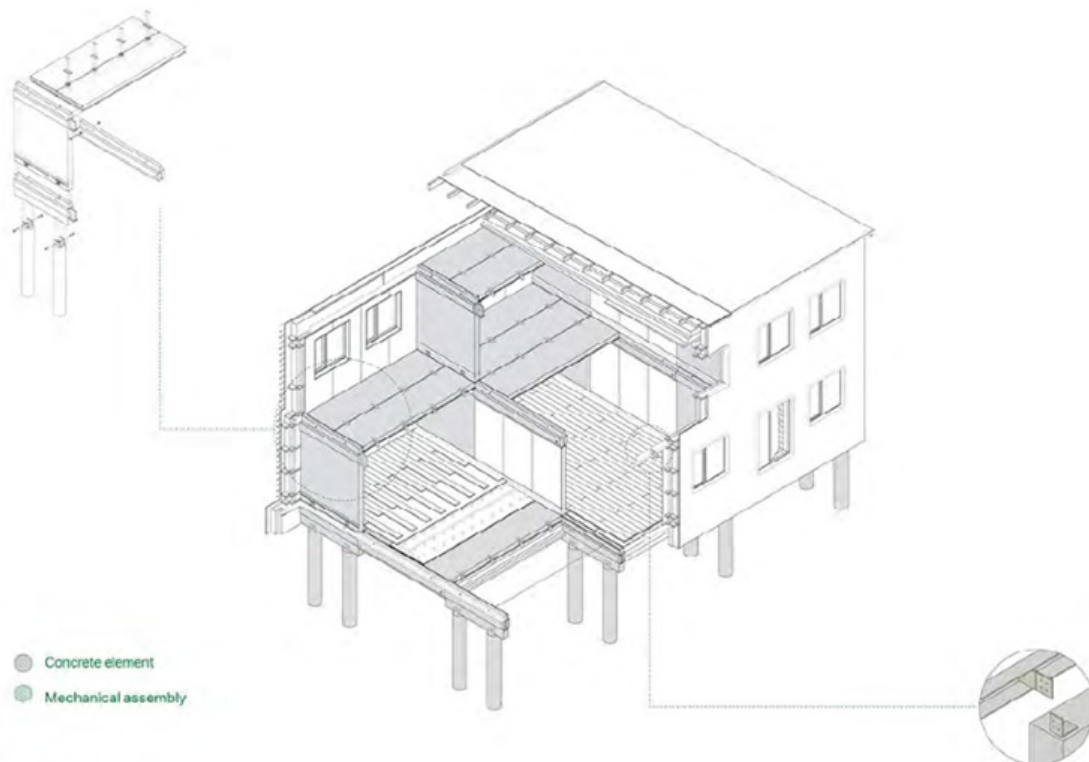


Bild 39 *Circle House Dänemark-Bauprinzip*





Bild 40 *Circle House Dänemark-Baudetails*

## Circular Economy House

Architekt: Arup

Realisierung: 2016

Das Ziel des Projektes war es, ein funktionierendes Gebäude zu schaffen, in dem alle Komponenten optimal und über den gesamten Lebenszyklus eingesetzt und genutzt werden und gleichzeitig ein komfortables und ästhetisches Umfeld für Nutzer geschaffen wird.

Um das zu ermöglichen, haben Arup und seine Partnerfirmen die Anwendung bestehender Fertigbauteiltechniken weiterentwickelt (Bild 41). Sie integrierten Open-Source-Details mit Materialien, die zirkulär sind. Anstatt überwiegend mechanische Befestigungen zu verwenden, produzierte und prüfte das Team Details, die Elemente durch bauteilintegrierte Führungen und Stecksysteme ohne externe Befestigung miteinander verbinden [34](Bild 42).

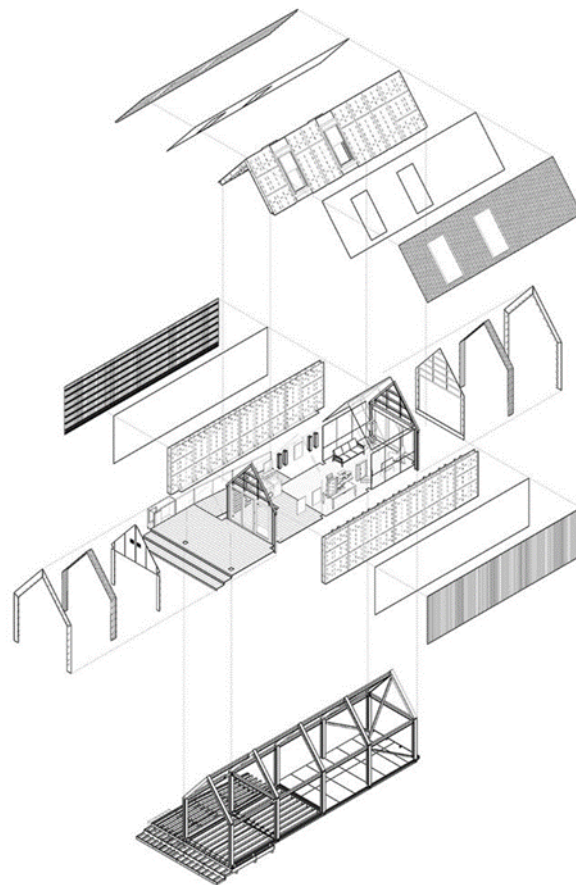


Bild 41 *Circle House Dänemark-Bauskizze*

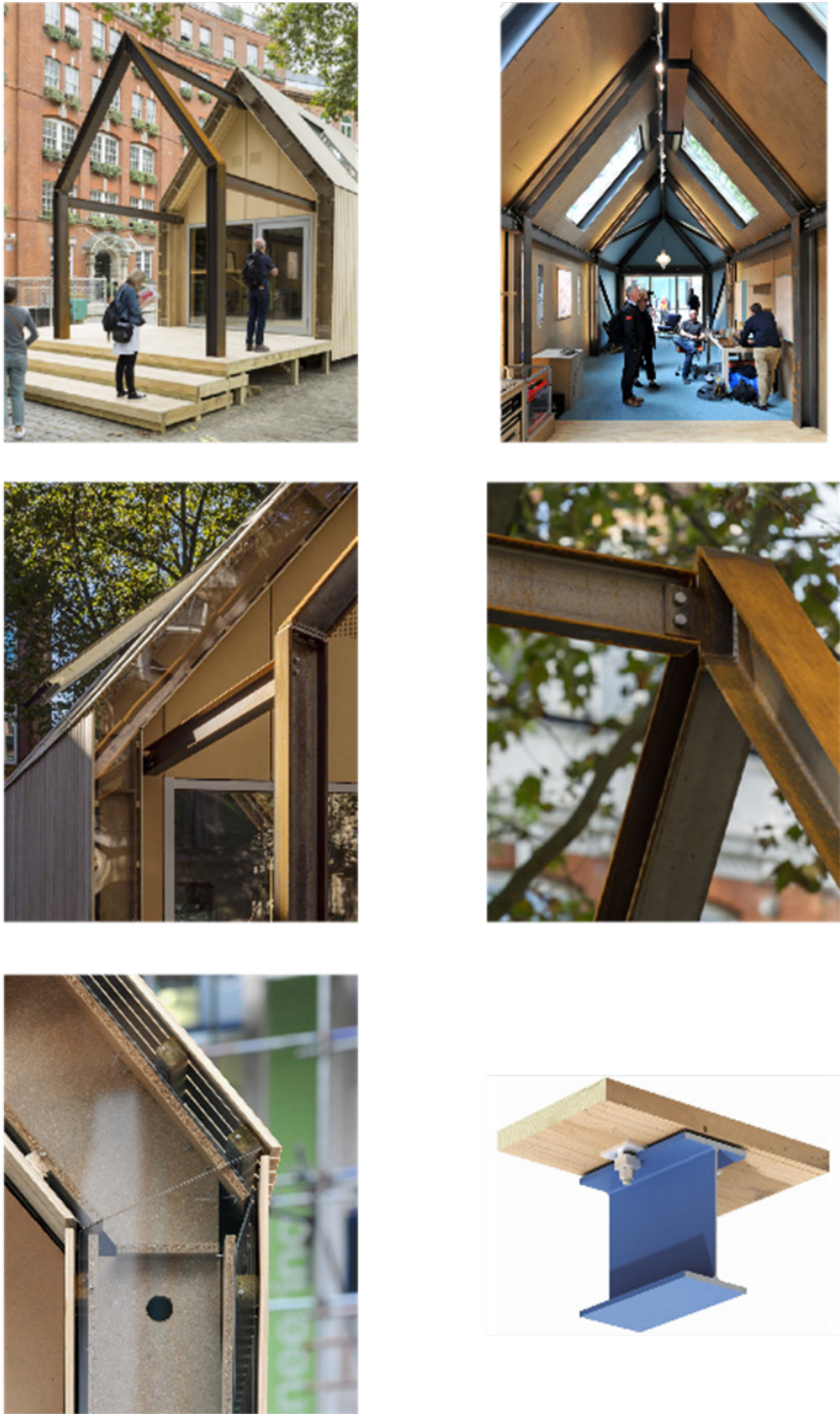


Bild 42 *Circular Economy House, London, Baudetails*

## R128

Architekt: Werner Sobek

Realisierung: 2000

Das in Stuttgart realisierte Wohnhaus R128 [85] dient als Pionierprojekt nach der von Werner Sobek aufgestellten Leitidee der „triple zero“, bestehend aus den Teilaspekten Null Energieverbrauch, Null Emissionen und Null Rückstände beim Umbau, Abbau und Recycling.

R128 ist ein viergeschossiges Gebäude, das sich auf einem steilen Grundstück am Rande des Stuttgarter Talkessels befindet. Es wurde als vollkommen recycelbares, im Betrieb emissionsfreies Nullheizenergie-Gebäude entworfen (Bild 43). Das Gebäude hinterlässt bei einem Umbau oder Abbau keinen Abfall. Alle Bauteile können am Ende des Lebenszyklus durch Steck- und Schraubverbindungen demontiert und recycelt werden [21] (Bild 44).

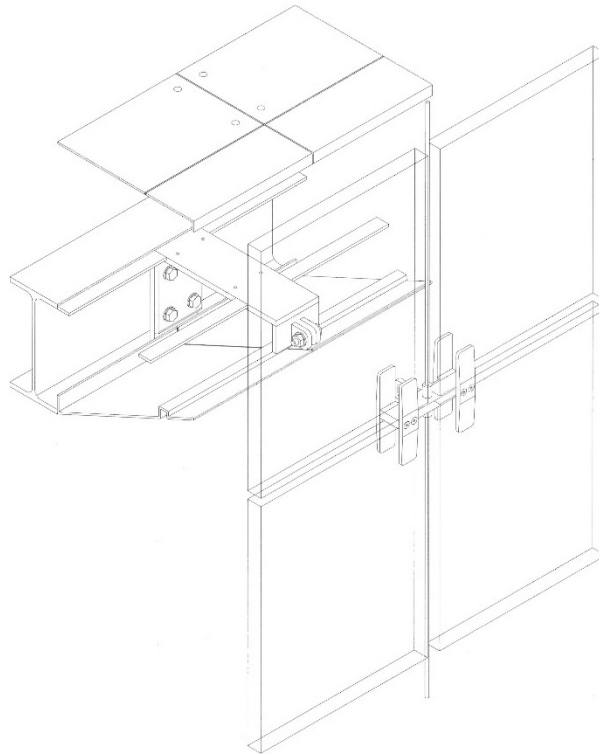


Bild 43 *R128-Bauprinzip [85]*

Das Haus war wesentlicher Impulsgeber für die Forschungen am Lehrstuhl Tragwerksplanung der TU Dresden auf dem Gebiet der vollständig rezyklierbaren Wohngebäude in Breitenanwendung.

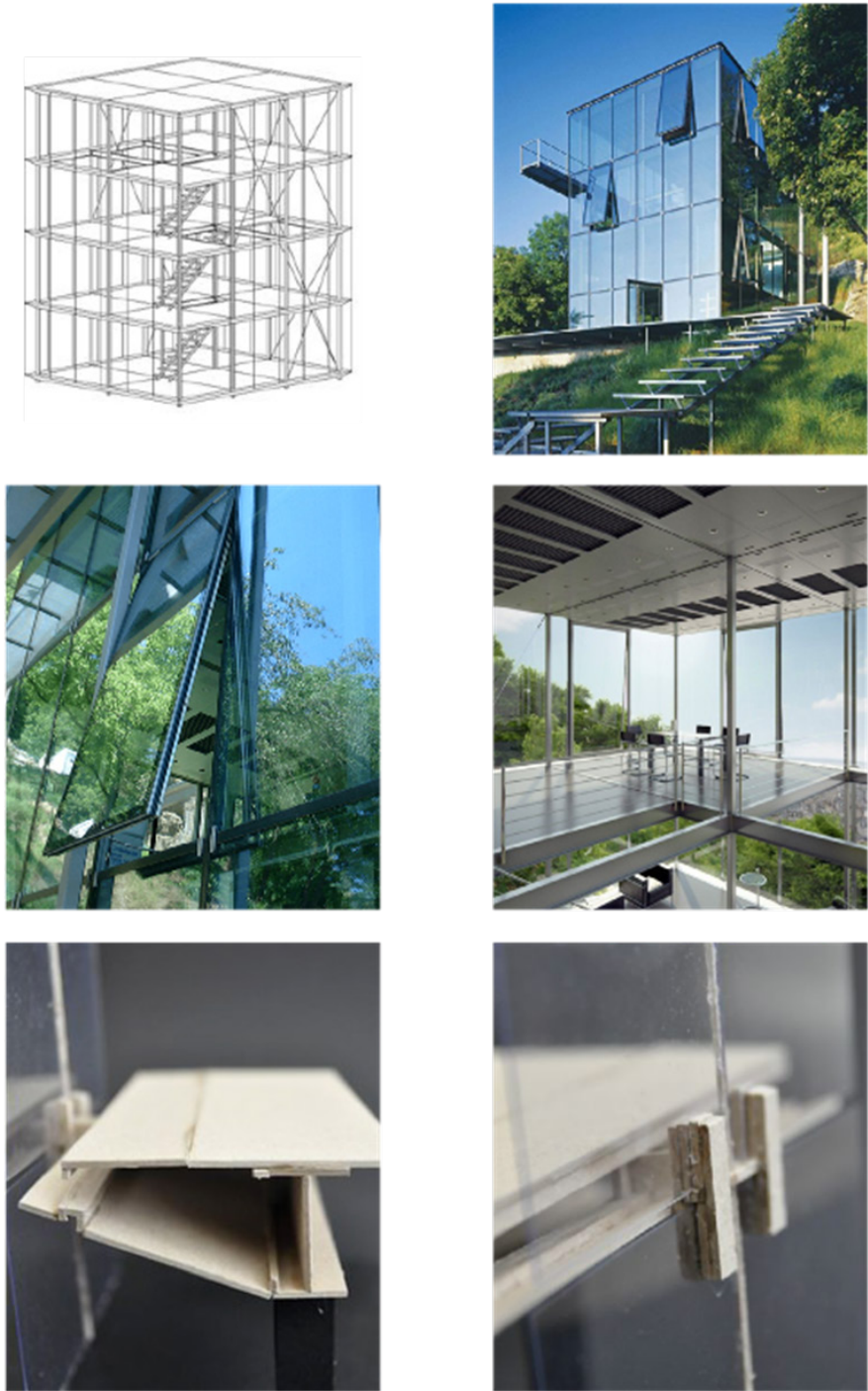


Bild 44 R128, Baudetails

## Effizienzhaus +

Architekt: Werner Sobek

Realisierung: 2011

Das Modellhaus entstand im Ergebnis eines Architektur-Realisierungswettbewerbes im Rahmen des Innovationsprogramms Zukunft Bau (BMWSB). Schwerpunkt dabei lag darauf, dass das Haus mehr Nutzenergie bereitstellen soll als für den Betrieb des Hauses durch eine vierköpfige Familie und die Nutzung von zwei Elektrofahrzeugen innerhalb eines Jahres benötigt wird.

Das Architekturkonzept des Effizienzhauses Plus mit Elektromobilität folgt einer möglichst kompakten Architektur. Der Entwurf zielte darauf ab, möglichst geringe Wärmeverluste durch die Gebäudeaußenhülle zuzulassen, sowie die Leitungswege möglichst kurz zu halten.

Das Haus ist modular aufgebaut und kann bei Bedarf für völlig andere Belange und Anforderungen umgenutzt werden. Der Entwurf und die Realisierung folgt dem Grundsatz von Werner Sobek, dem Triple Zero®-Prinzip: Null Energie, Null Emission, Null Abfall.



Bild 45 *Das Effizienzhaus + in Berlin auf der Fasanenstr. 87*  
([https://de.wikipedia.org/wiki/Effizienzhaus\\_Plus](https://de.wikipedia.org/wiki/Effizienzhaus_Plus))

## 4.2 Rahmenbedingungen für das entwickelte Ausbau-System

### 4.2.1 Fassendaufbau

Die Fassade, als äußerste Hülle eines Gebäudes, ist nicht nur entscheidend für das optische Erscheinungsbild, sondern auch für die Gebrauchstauglichkeit, die Dauerhaftigkeit, die Kosten und den Energieverbrauch des gesamten Gebäudes [35]. Unter Beachtung dieser Rahmenbedingungen existieren vielfältige Fassadenaufbauten, die den Nutzungen entsprechend angepasst werden. Konstruktiv muss die Gebäudehülle folgende Kriterien erfüllen:

- Wärmeschutz,
- Feuchteschutz,
- Schallschutz,
- Brandschutz.

Die Fassade kann zwischen ein- und mehrschaligen Konstruktionen unterschieden werden.

Monolithische Wände sind einschalige Konstruktionen und vereinen die tragende Funktion, den Wärme- und den Witterungsschutz. Einschalige Konstruktionen können aber auch mehrschichtig sein.

Zweischalige Konstruktionen trennen hingegen die Trag- und raumabschließende Funktion von den genannten Funktionen der Gebäudehülle. Beide Schalen sind voneinander getrennt. Bei dieser Bauweise übernimmt die Gebäudehülle den Schutz gegen Witterungseinflüsse und kann unabhängig vom Tragwerk gestaltet werden.

Bereits mit der Entscheidung der Fassadenkonstruktion werden Auswirkungen über die Demontagefreundlichkeit einer Gebäudehülle beeinflusst.

### 4.2.2 Mehrschichtige einschalige Wand

Mehrschichtige einschalige Wände sind derzeit noch sehr verbreitet und bekannt als Wände mit Wärmedämmverbundsystem. Da die Schichten i.d.R. verklebt werden, sind sie schwer trennbar. Da auf das Verbundprinzip verzichtet werden soll, ist eine auf der Tragschale verklebte Dämmschicht hier nicht einsetzbar. Bei Anwendung des Schraub- oder Klickprinzips ist eine Anwendung denkbar.

### 4.2.3 Zweischaliges Mauerwerk

Die äußere Schale übernimmt bei zweischaligem Mauerwerk die Funktionen Brand-, Wärme-, Feuchte- und Schallschutz und die innere Schale die Funktionen Raumabschluss und Lastabtrag, sodass eine konsequente funktionale Trennung entsteht.

Die äußere Schale wird auch Vormauerschale genannt und wird in einem bestimmten Abstand (Schalenzwischenraum) vor der inneren Schale angeordnet. Die sich selbst tragende Außenschale wird über Konsolen und Befestigungsanker gehalten. Der Schalenzwischenraum kann ohne Wärmedämmstoff, teilweise mit Wärmedämmstoff (und Hinterlüftung) oder ganz mit Wärmedämmstoff (Kerndämmung) ausgefüllt werden [36].

Die beiden unabhängig voneinander stehenden Wandschalen können verschiedene Formate aufweisen, wodurch eine weitgehende Gestaltungsfreiheit in der Außenschale besteht. Jedoch ist hier der tragende Mauerstein das maßgebende Element, welches über das Steinformat und den Verband ein geometrisches Ordnungsprinzip für Tragsystem, Gebäudehülle, Befestigung und Wärmedämmung vorgibt [35] (Bild 46).





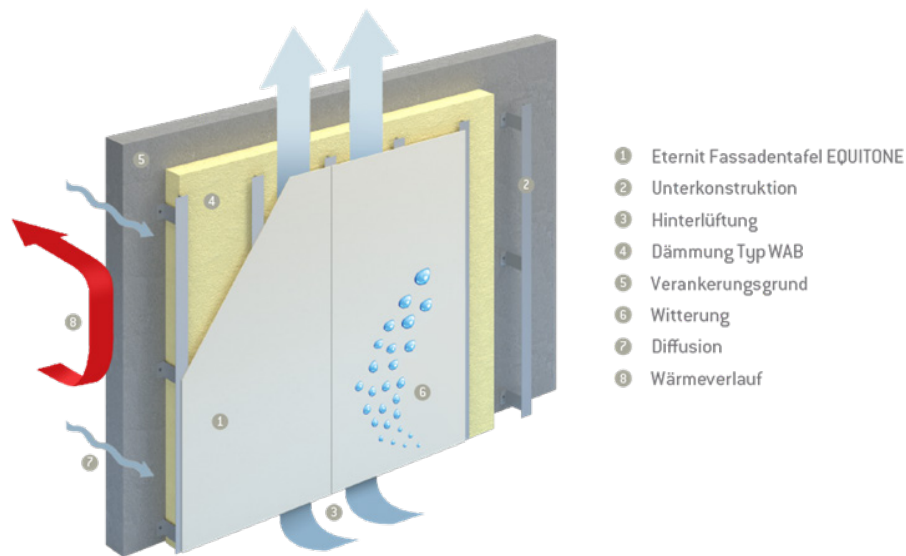


Bild 47 Vorgehängte Fassade VHF, Bauprinzip [86]

Die Befestigung der Fassadenbekleidung hängt von der Größe, dem Gewicht und der Anordnung der Hüllmaterialien ab. Neben konstruktiven Parametern entscheiden auch gestalterische Kriterien über die Befestigungen, die sowohl sichtbar als auch unsichtbar an der Unterkonstruktion montiert werden können.

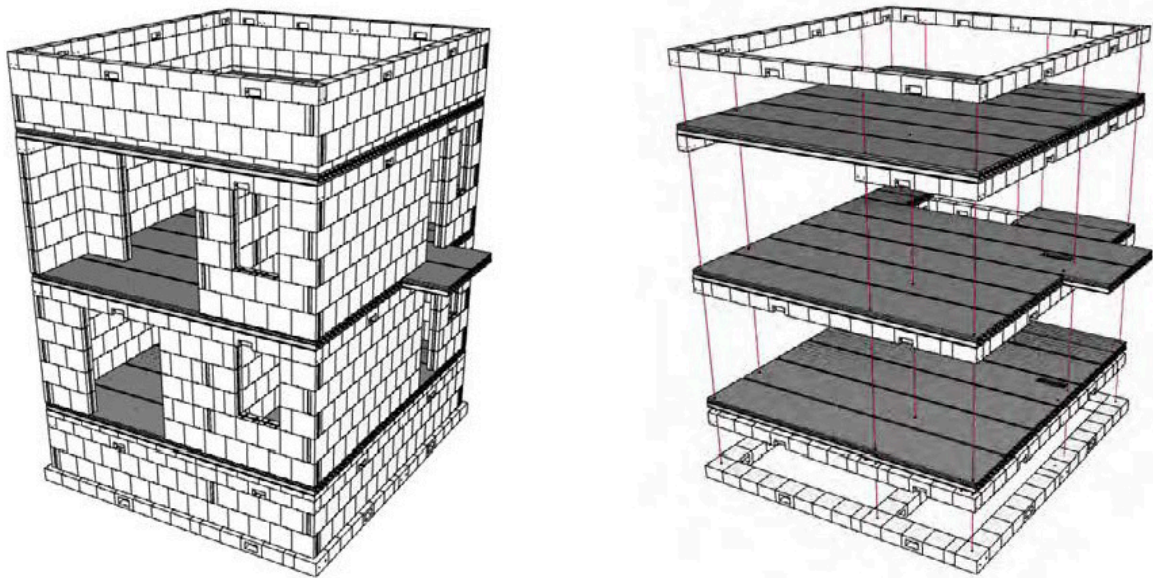
Der Fassadenaufbau ist durch die Verwendung von lösbaren, mechanischen Verbindungen einfach zu demontieren. Die separierten Materialien können somit effizient recycelt werden [37].

### 4.3 Komponente des entwickelten Ausbau-Systems

#### 4.3.1 Fassadenkomponente aus dem Rohbau

Die Fassade muss modular mit dem Rohbau abgestimmt sein, wenn man die dort vorgesehenen Befestigungspunkte ohne Anpassung nutzen will. Die Rastersprünge der Kreuzverbinder müssen deshalb mit den Rastersprüngen der Ausbaukonstruktion passfähig sein. In der Höhe wird die Regelmäßigkeit der Rasterlinien durch die Decke unterbrochen Bild 48.

Diese relevanten Bauteile des Rohbaus sind in den Abschnitten 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4 und 3.3.5 behandelt worden.

Bild 48 *Tragsystem des Versuchsbaus*

#### 4.3.2 Vorgesprochenes Dämmsystem - Vakuumdämmpaneele

Als Wärmedämmung wird im Rahmen des Experimentalbaus die in 0-EneMau [2] entwickelte Vakuumdämmtechnologie modifiziert und verwendet. Die VIP-Paneelen bestehen aus einem Stützkern aus pyrogener Kieselsäure und Zuschlagstoffen. Das synthetisch hergestellte Pulver ist kein gefährlicher Abfall und trägt bei sachgerechtem Umgang keine gesundheitlichen Risiken in sich [40]. Zur Festigkeit wird der Stützkern mittels Bewehrungsfasern mechanisch stabilisiert. Die hohen Wärmedämmeigenschaften werden durch das Vakuum und die Zugabe von Trübungsmitteln erreicht. Der Stützkern wird mit einem Schutzvlies umhüllt und in einer gasdichten Hochbarrierefolie eingeschweißt. Dieser Aufbau entspricht einem handelsüblichen Vakuumisulationspaneel mit einer Dicke von 4 cm und ergibt einen Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf der Basis eines  $\lambda$ -Wertes von  $0,007 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Das erreicht man nur mit einer Mineralwolle von 235 mm Dicke bei einer WLK von  $0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

Zusätzlich wird der Stützkern der in dieser Arbeit verwendeten VIP-Paneele von einem umlaufenden PU-Schaumrand ummantelt. Das hat Vorteile für die Befestigung der Paneele, da der Vakuumkern nicht durchdrungen werden kann, und schützt gleichzeitig das Paneel bei Transport und Montage. Als Nachteile sind hierbei der erhöhte Kostenaufwand und die thermische Schwächung, bedingt durch einen schlechteren Wärmedurchlasswiderstand, zu benennen. Der umlaufende Rand ist variabel dimensioniert, das bedeutet, der obere Streifen hat eine Breite von 5 cm, da in diesem Streifen die Befestigung durch die Polyamidanker realisiert wird.

Jedes Paneel besitzt in dieser Schicht zwei durchgehende Befestigungslöcher, die mit einem Randabstand von 12,5 cm (oktametrisches System) vom Plattenrand angeordnet sind. Je nach Plattengröße variiert der Abstand der Löcher, entspricht in allen Fällen aber einem Vielfachen von 12,5 cm. Außerdem wird durch den durchgehenden PU-Rand eine höhere Flexibilität erreicht. In Abhängigkeit von der Fassadenbefestigung kann eine Bohrung entsprechend dem oktametrischen System auf der Baustelle vorgenommen werden und somit eine modulare Befestigung in der PU-Randschicht ermöglichen.

Die seitlichen Ränder besitzen eine Dicke von 2 cm und im unteren Bereich wird das Paneel von einem 0,5 cm breiten Randbereich abgeschlossen.

Um das Paneel zusätzlich zu schützen, wird es auf der Innen- und Außenseite von einer 0,15 cm dicken GFK-Platte umhüllt. Diese Platten werden an den Stützkern geklebt und erlauben, durch die erhöhte Robustheit, die Verwendung der Paneele als trittfeste Dämmung im Loggia- und Balkonbereich.

Zusätzlich zu den innen angebrachten 0,15 cm GFK-Platten besitzt jedes Paneel auf der Außenseite eine zweilagige Beplankung (2x0,15 cm GFK-Platten). Diese ist um 5 cm jeweils nach rechts-unten verschoben. Daraus ergibt sich im Verband eine Überlappung der Paneele. Durch vorgesehene Löcher, die das gesamte Paneel (PU-Rand und GFK-Platten) durchdringen, ist eine verzahnende Befestigung möglich (Bild 49).

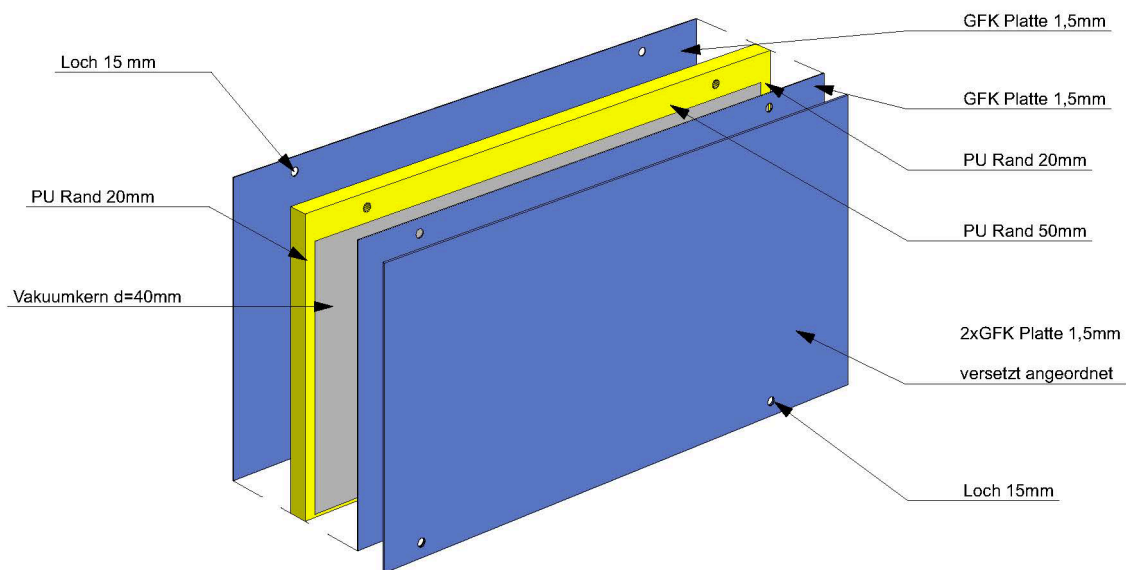


Bild 49 *Aufbau der VIP-Paneele*

Die Dimensionierung der Paneele orientiert sich ebenfalls am oktametrischen Ausbauraster und deren Befestigungspunkte. Weiteren Einfluss auf die Abmaße haben die variierenden Wandlängen. Bedingt durch die Grundrissgeometrie und Rohbauöffnungen werden verschiedene Plattenformate verwendet:

- Position 1 – 100x50 cm,
- Position 2 – 50x50 cm,
- Position 3 – 75x50 cm,
- Position 4 – 50x25 cm,
- Position 5 – 55x50 cm.

Die konstruktive Ausbildung des Eckbereiches ist oft ein Problem im Bauwesen; aus diesem Grund weicht das Paneel-Position 5 (55x50 cm) von dem oktametrischen System ab und wird ausschließlich als Eckpaneel an einer Kante der Außenfassade befestigt (Bild 50). Die Verwendung dieser Paneele ist nur bei Flächen mit Rohbauöffnungen einzusetzen. Im Gegensatz dazu kann bei Außenwandflächen ohne Öffnungen, wie den seitlichen Loggiaflächen, der ganze Dämmverband verschoben werden, um den nötigen seitlichen Versatz der Dämmebene zu ermöglichen [2].

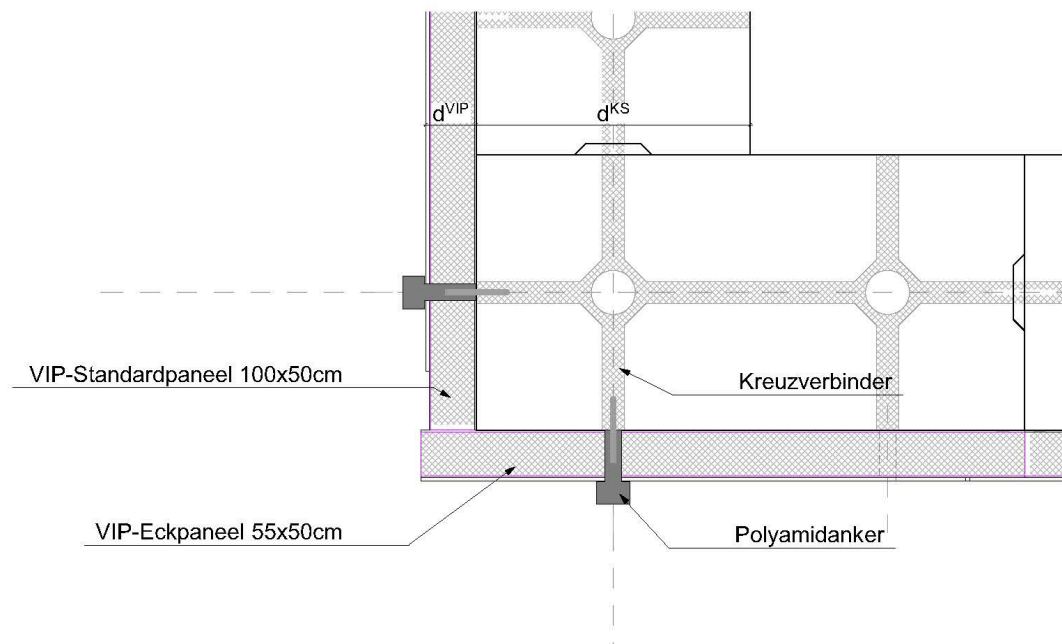


Bild 50 *Ecksituation VIP-Dämmung*

Durch die Überlappung und die starke Beplankung der VIP-Paneele ist es möglich, diese zu demontieren und wiederzuverwenden (Produktrecycling) oder im Versagensfall zu ersetzen. Bei einem Wiedereinbau sind die Paneele vorher auf ihre Funktionstüchtigkeit zu prüfen.

Das Paneel als Verbundwerkstoff ist aufwendiger zu recyceln und erfordert mehrere Anwendungsschritte wie im Kapitel 4.1.3 beschrieben. Die einzelnen Komponenten können recycelt werden, jedoch ist die geklebte Verbindung zwischen VIP-Paneel und GFK-Platten als kritisch zu sehen, da sich dabei der Aufwand deutlich erhöht, die Materialien sortenrein zu trennen. In der weiteren Entwicklung sollte über eine Verschraubung der GFK-Platten nachgedacht werden.

#### 4.3.3 Befestigung der Paneele

Die Befestigung der VIP-Paneele und auch der Vorsatzschale wird über einen, ebenfalls im Projekt 0-EneMau [2] entwickelten, Polyamidanker (Bild 51) realisiert. Dieser Anker beruht auf drei konzeptionellen Punkten. Zum einen wird durch die Verwendung von Polyamid die Entstehung von Wärmebrücken verhindert, zum anderen dient der entwickelte Anker als Befestigungsmöglichkeit der Fassade. Zusätzlich wird durch die Verwendung von Gummidichtungsringen eine Luftdichtheit erreicht. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist die modulare Anordnung der Kreuzverbinder. Die im KS-Stein vorgefertigte Prägung ermöglicht die Befestigung der Polyamidanker aller 25 cm in den Kreuzverbindern, das gewährleistet eine relativ flexible Befestigungsmöglichkeit für die Fassadenkonstruktion.



Bild 51 *Entwickelter Polyamidanker*

Während der Montage wird zuerst eine Stockschraube über den Inbuskopf in den Kreuzverbinder verschraubt. Daraufhin wird der Polyamidanker auf das Gewinde geschraubt. Der Anker ist als Formstück hergestellt und lässt sich geometrisch als Zusammensetzung aus einem länglichen Zylinder (Durchmesser 0,75 cm) und einem breiten Zylinderkopf (Durchmesser 1,5 cm) beschreiben. Der längliche Abschnitt besitzt das Innengewinde für das außenliegende Gewinde der Stockschraube und entspricht der Stärke der VIP-Paneele mit einer Länge von 4,6 cm. Der breitere Kopf des Ankers hat eine Länge von 2 cm und befindet sich nach der Montage auf der kalten Seite der Fassade. Durch ein vorgefertigtes Loch im Polyamidkopf kann der Anker mit einem passenden Stahlstift fixiert werden. Außerdem funktioniert das Endstück als Halterung der Fassadenkonstruktionen (Bild 52).

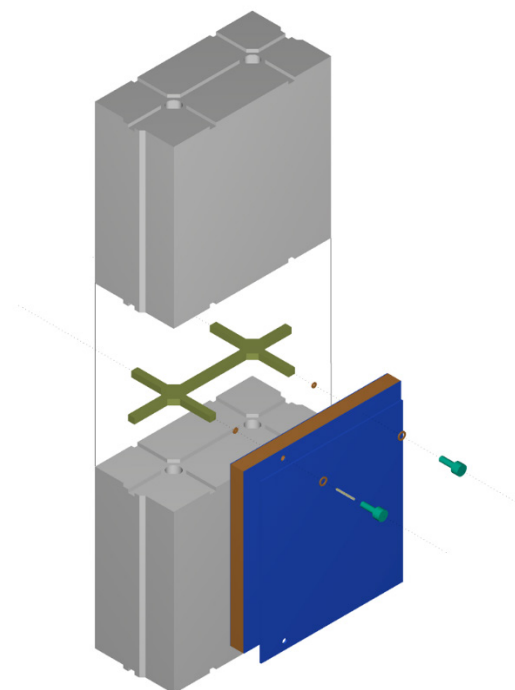


Bild 52 *Prinzipielle Befestigung mittels Polyamidankern*

Diese Einheit aus Polyamidankern und VIP-Paneelen garantiert die thermische Isolierung des Gebäudes. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist eine detaillierte und vertiefende Wärmebrückenanalyse der modifizierten Querschnitte der Polyamidanker durchgeführt worden. Im Zuge des Forschungsprojektes 0-EneMau [2] wurden thermische 2D/3D-Simulation erstellt und weitere mechanische bzw. brandschutztechnische Untersuchungen durchgeführt. Eine spezifische Bewertung der entwickelten Details im Gesamtaufbau ohne Polyamidanker erfolgt im Abschnitt 5.

#### 4.4 Vorgeschlagene Fassadensysteme für ein Musterhaus

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei Fassadenbekleidungen einer zweischaligen Konstruktion entwickelt und geplant:

- Vormauerschale als Ausführung mit dem Click-Brick -Fassadensystem
- Fassadensystem aus Textilbetonplatten als vorgehängte hinterlüftete Fassade mit unsichtbarer Befestigung.
- Fassadensystem aus HPL-(High Pressure Laminate)-Platten als vorgehängte hinterlüftete Fassade mit sichtbarer Befestigung (hier nicht weiter dargestellt).
- Fassadensystem aus Holz-Stegträgern und Eternitplatten

##### 4.4.1 Anwendung des Click-Brick-Fassadensystems

Mit dem System Click-Brick kann eine Ziegelfassade realisiert werden, die durch die trockene Fügung und Verwendung eines besonderen Befestigungssystems die Möglichkeit einer demontablen und somit sortenreinen sowie trennbaren Vormauerschale bietet. Die Vormauerschale wird aus speziell geformten Ziegeln im Halbsteinverband als Trockenmauerwerk ausgeführt. Neben der großen Funktionsfähigkeit werden die Steine in vielen Farben angeboten und ermöglichen damit eine breite Gestaltungsvarianz. Das Produkt besitzt die C2C-Zertifizierung Silber [41](Bild 53).

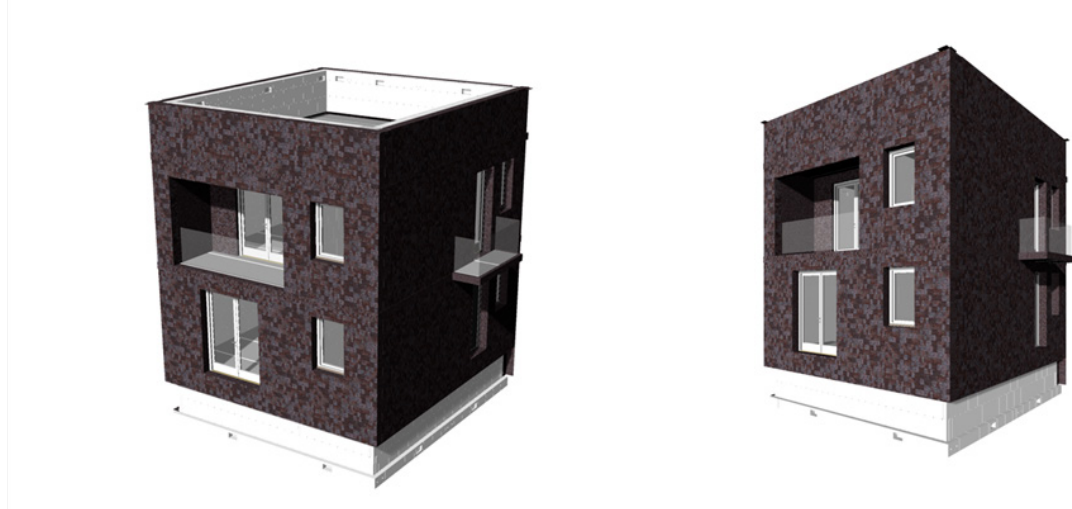


Bild 53 3D Darstellung des Musterhauses mit Click-Brick-Fassadensystem

Die Verblender haben die Abmaße 24x12x9 cm und besitzen auf der Ober- und Unterseite eine einseitig angeordnete Nut mit einer Breite von 0,27 cm und einer Tiefe von 0,95 cm. Die

Stirnseiten sind planparallel geschliffen und untereinander werden die Steine durch Metallclips in den Stoßfugen verbunden. Eine keilförmige Aussparung in den Verblendern dient zur Verbindung mit den Anker. Bei der Montage sitzt der Anker oberhalb der Oberkante des unteren Steines. Durch die seitlichen Aussparungen im Click-Brick-Stein können die Verblender in der nächsten Reihe ohne zusätzlichen Aufwand auf die Clips gesetzt werden und ermöglichen eine schnellere Montage als bei herkömmlichen Ziegelfassaden. Durch die Verlängerung der horizontal verlaufenden Nut im angrenzenden Stein können auch Ecksituationen modular gelöst werden (Bild 54). Bei Abweichungen des Click-Brick Rasters besteht weiterhin die Möglichkeit, den Stein vorab im Werk zuzuschneiden [41].

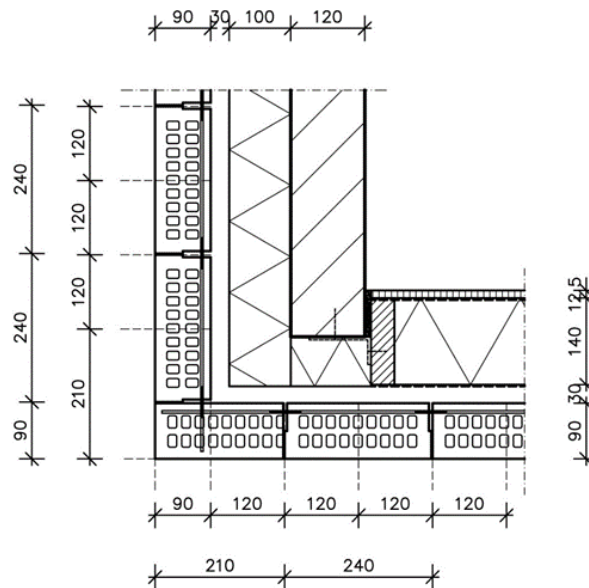


Bild 54 *Eckdetail Click-Brick-Fassadensystem*

Das System Click-Brick sieht Metallanker (Nenndurchmesser 0,4 cm) als Verbindung mit der tragenden Struktur vor. Die Befestigung nimmt in diesen Punkten horizontal auftretende Einwirkungen auf. Das Eigengewicht der Vormauersteine wird über eine im Fußpunkt angebrachte Konsole aufgenommen und bildet somit den Anfangspunkt der trockenen Montage (Bild 55). Die Metallanker werden, wie herkömmliche Mauerwerksanker, in das Tragwerk und durch die Dämmung gebohrt. Die vom Hersteller entwickelte Befestigung kann in dieser Arbeit jedoch nicht verwendet werden, da eine Bohrung durch das VIP-Panel den dämmenden Kern schädigen würde. Aus diesem Grund wurden zwei Sonderlösungen entwickelt. Diese beiden Varianten werden im Folgenden vorgestellt:



Bild 55 *Herkömmliche Befestigung mit Mauerwerksankern*

Die entwickelten Polyamidanker dienen als Anschlusspunkt (Raster 25 cm) der zu modifizierenden Befestigung. Die Verbindung der Click-Brick Steine durch den Metallclip wird beibehalten, außerdem werden die Abmessungen des Clips nicht verändert. Der Verblender besitzt die Abmessungen 24x10x9 cm. Dadurch könnte eine modulare Befestigung des Click-Brick Systems an den Polyamidankern in 2 Varianten realisiert werden:

Ein speziell modifizierter Metallanker verbindet die Vormauerschale mit den Polyamidankern, die in diesem Fall alle 25 cm in horizontaler und 50 cm in vertikaler Richtung vorzusehen sind. Dazu werden die Metallelemente horizontal in die vorgefertigten Löcher im Polyamidkopf gesteckt. Ein Gewinde am Ende des Ankers ermöglicht die Befestigung mit Polyamidmuttern. Der Click-Brick Vormauerstein hat eine Länge von 24 cm und wird fugenlos verlegt. Das Verlegeprinzip passt somit nicht mit dem oktametrischen Ausbauraster zusammen (Versatz 10 cm je Stein). Es entsteht ein maximaler Versatz von einer halben Steinlänge (12 cm). Demzufolge weist der Steg des Ankers eine Länge von 14 cm auf, um den maximalen Steinversatz überbrücken zu können (Bild 56).

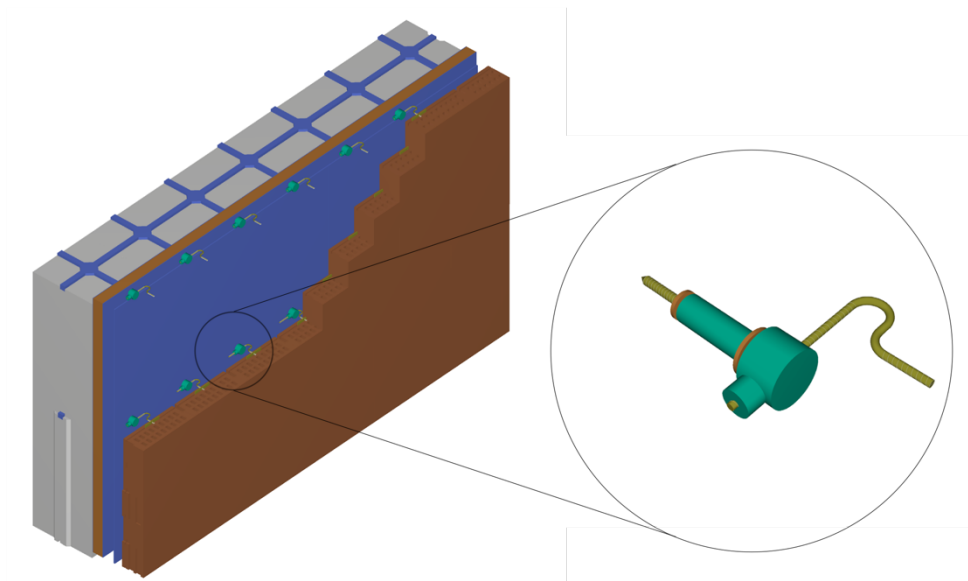


Bild 56 *Punktuelle Befestigung der trocken versetzten Vormauerschale mit Metallankern*

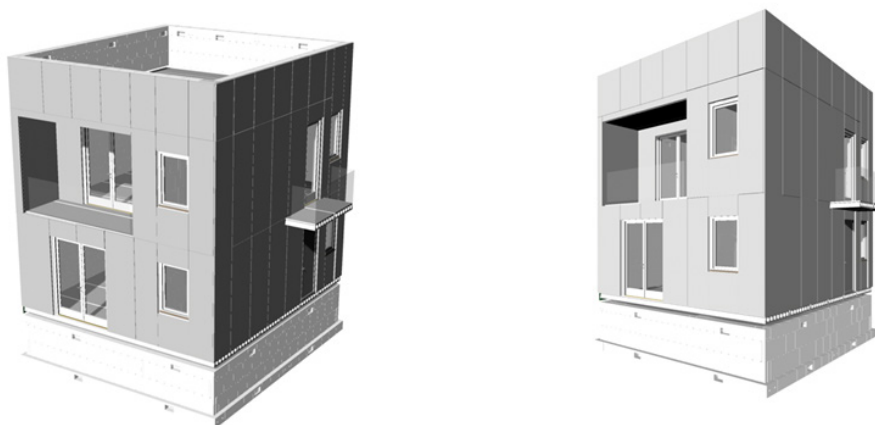


Produkt	Material	Hersteller	Preis €/m <sup>2</sup>
Kalksandstein	KS	Silka	50 €
Kreuzverbind er	Plastik	TU-DD Kunststofftechnik	2 €
VIP	Vakuumisolationspaneel	Variotec	150 €
Befestigung	Metall	kalkuliert	10 €
Click-Brick	Ziegel	KDB	120 €
<b>Gesamt</b>			<b>332 €</b>

*Tabelle 1 Geschätzte Kosten des Click-Brick-Fassadenaufbaus*

#### 4.4.2 Entwickeltes Fassadensystem aus Textilbetonplatten

Vorgehängte Textilbetonplatten finden hauptsächlich Anwendung im gewerblichen Sektor, aber auch im Wohnungsbau werden vermehrt vorgefertigte Platten verbaut. Die Glasfaser- bzw. Carbon-armierten Faserbetonplatten sind um ein Vielfaches leichter als Stahlbetonplatten (Bild 57). Durch eine breite Varianz in Gestaltung, Form und Oberflächenstruktur ergibt sich eine breite Produktpalette für Planer und Bauherren [42].



*Bild 57 3D Darstellung des Musterhauses mit Textilbetonplatten*

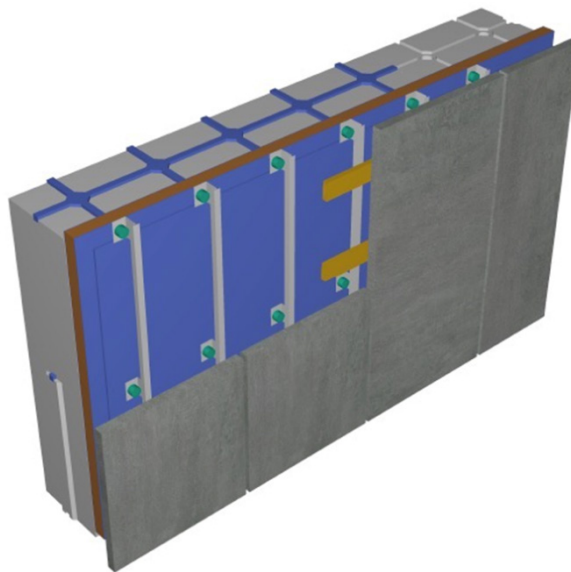
Die Textilbetonplatten können im Gegensatz zu stahlbewehrten Betonplatten mit einer Stärke von 10 cm wesentlich schlanker ausgebildet werden. Gängige Produktstärken betragen 2-4 cm. Abhängig von den Bewehrungslagen werden Gewichte von 48 kg/m<sup>2</sup> (2 cm mit Glasfaser-Gelege) bis 96 kg/m<sup>2</sup> (Carbonfaser-Gelege) angesetzt [42]. Bedingt durch den hohen

Fertigungsaufwand, sind Textilbetonplatten eine relativ kostenintensive Beplankungsmethode (350 €/m<sup>2</sup>) (Tabelle 2).

Produkt	Material	Hersteller	Preis €/m <sup>2</sup>
Kalksandstein	KS	Silka	50 €
Kreuzverbinder	Plastik	TU-DD Kunststofftechnik	2 €
VIP	Vakuumisulationspaneel	Variotec	150 €
Befestigung	Metall	kalkuliert	3 €
Unterkonstruktion	Metall	GIP-Fassade	20 €
Textilbetonplatten	Textilbeton	BetoShell	350 €
<b>Gesamt</b>			<b>575 €</b>

*Tabelle 2 Geschätzte Kosten des Textilbetonplatten-Fassadenaufbaus*

Die Unterkonstruktion wird auf Grund der Textilbetonplatten als vorgehängte Fassade mit Agraffenbefestigung (in eine U-Schiene eingehängte Klammer, die mit dieser zur Arretierung verschraubt wird) geplant. Die Befestigung erfolgt über entwickelte L-Konsolen mit einer Schenkellänge von 5 cm an den Polyamidankern. Diese werden zwischen den VIP-Paneelen und dem Polyamidankerkopf eingespannt. Die Befestigung der Unterkonstruktion erfolgt an der entwickelten Konsole und wird, wie bei einer herkömmlichen VH-Fassade, festgeschraubt (Bild 58). Dabei ist zu beachten, dass die Unterkonstruktion zwängungsfrei zu montieren [43] ist. Aus diesem Grund sind Langlöcher in der Konsole vorgesehen, die eine Montage in den Fix- und Gleitpunkten ermöglichen.



*Bild 58 Isometrische Darstellung des Wandaufbaus mit Textilbetonplatten*

Die Unterkonstruktion entspricht den gängigen Produkten einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade, wird mit vertikal stehenden Aluminium-L-Profilen ausgeführt und ist von der ausführenden Fassadenfirma statisch zu berechnen. Die Gestaltungsfrage der unsichtbaren Befestigung führte neben dem Gewicht der Textilbetonplatten zur Verwendung der Agraffenbefestigung. Bei diesem System wird eine Tragschiene an die L-Aluminium-Unterkonstruktion geschraubt. Zur Montage der Textilbetonelemente, werden auf der Rückseite Hinterschnittdübel verschraubt und mit einem Agraffenprofil verbunden. Dieses zusammengesetzte Element kann anschließend auf die horizontalen Tragschienen montiert und mit Schrauben verbunden werden. Das System zeigt eine vielfach angewandte Methode bei hinterlüfteten Fassaden von Betonplatten (Bild 59).

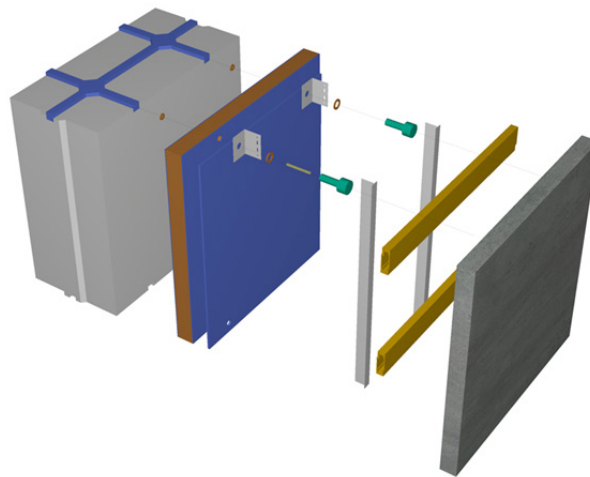


Bild 59 *Explosionszeichnung Wandaufbau mit Textilbetonplatten*

Im Eckbereich weichen die Abmessungen der Platten vom Standardformat ab und müssen als Sonderformat bestellt werden. Die Plattenanschlüsse werden an Außen- und Innenecken mit einer geschlossenen Fuge ausgeführt. Hierfür wird an der Rückseite der Textilbetonplatten ein Winkelprofil fixiert. Durch Schraubverbindungen ist das Fassadensystem demontierbar und kann sortenrein den Recyclingkreisläufen zugeführt werden (Bild 60).

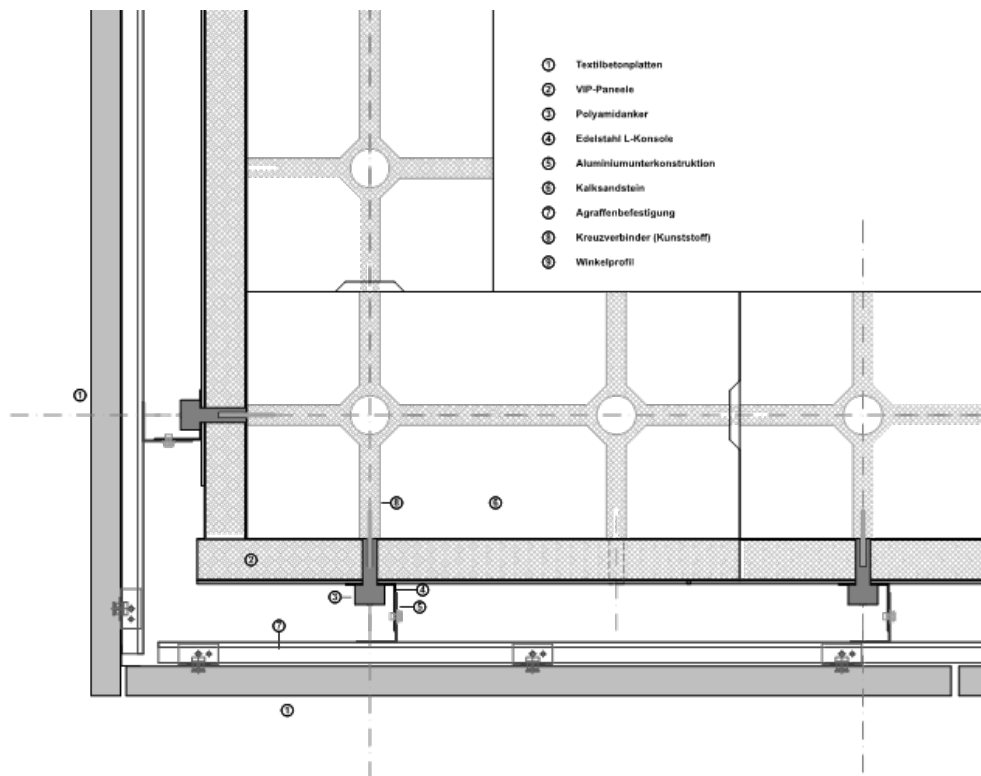


Bild 60 *Wandaufbau mit Textilbetonplatten*

#### 4.4.3 Fasadensystem aus Holz-Stegträgern und Eternitplatten

Der Einsatz von Vakuumpaneelen bietet ein modulares, demontierbares und dünnwandiges Dämmsystem. Das VIP-Dämmung bleibt im Vergleich zu den herkömmlichen Dämmungsmethoden aus Herstellungsaspekten deutlich teurer. Diesbezüglich wurde diese Variante zum Einsatz von herkömmlichen Dämmmaterialien als Ersatzvariante fürs entwickelte Dämmsystem aus Vakuumpaneelen vorgeschlagen.

Das vorgeschlagene Dämmsystem ist als vorgehängte Fasadensystem geplant und besteht hauptsächlich aus Holz-Stegträgern unter Anwendung von Mineralwolle als Dämmmaterial und Eternitplatten (von Cedral [80]) zur Gestaltung des Fasadensystems.

Die Abstände der Stegträger sowie die Dämmstärke werden in Anlehnung an DIN 18516-1 [79] DIN 4108 [78] bzw. EnEV ausgewählt.

Als stabile Unterkonstruktion werden Stegträger aus Holz vom Steico [81] in Abstand von 62,5 cm angewendet. Zur demontierbaren Befestigung der Träger am Rohbau kommen Stahlwinkel in Einsatz. Zwischen den Trägern werden die Dämmstreifen aus Mineralwolle verlegt. An die Oberseite der Stegträger werden die Eternitplatten (System von Cedral [80]) angebracht (Bild 61). Alle Elemente dieses Fasadensystems sind demontierbar und erfüllen die Demontierbarkeit sowie die Wiederverwendbarkeit im Rahmen des entwickelten Trockenbauweise.

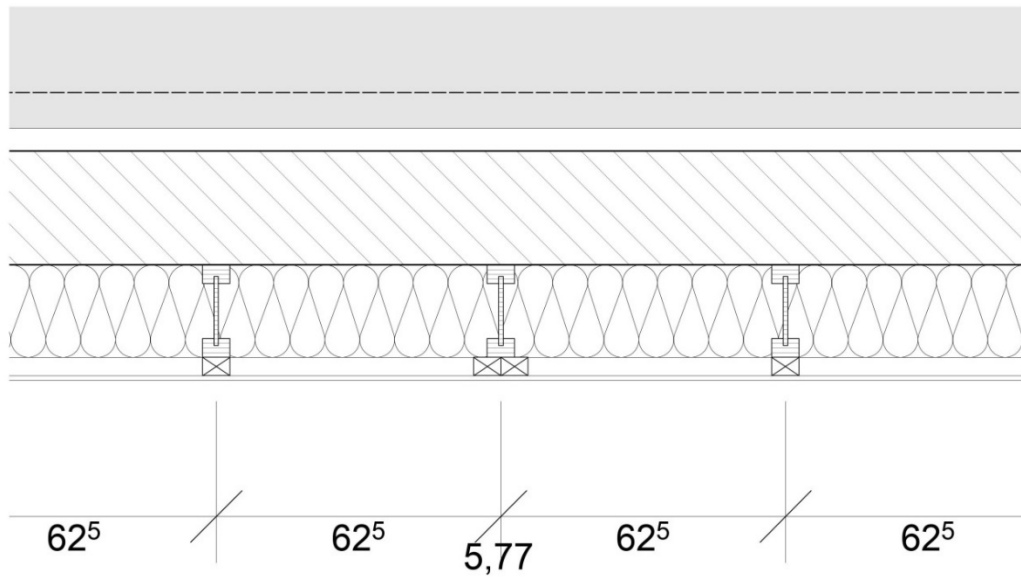


Bild 61 *Fassadensystem aus Stegträgern, Mineralwolle und Eternit- Regeldetail entlang der Fassade- System VH-F Cedral Click [80]*

Dieses Fassadensystem lässt sich bei den Sonderbereichen im Rohbau insbesondere bei den Laibungen und Außenecken problemlos anpassen (Bild 62).

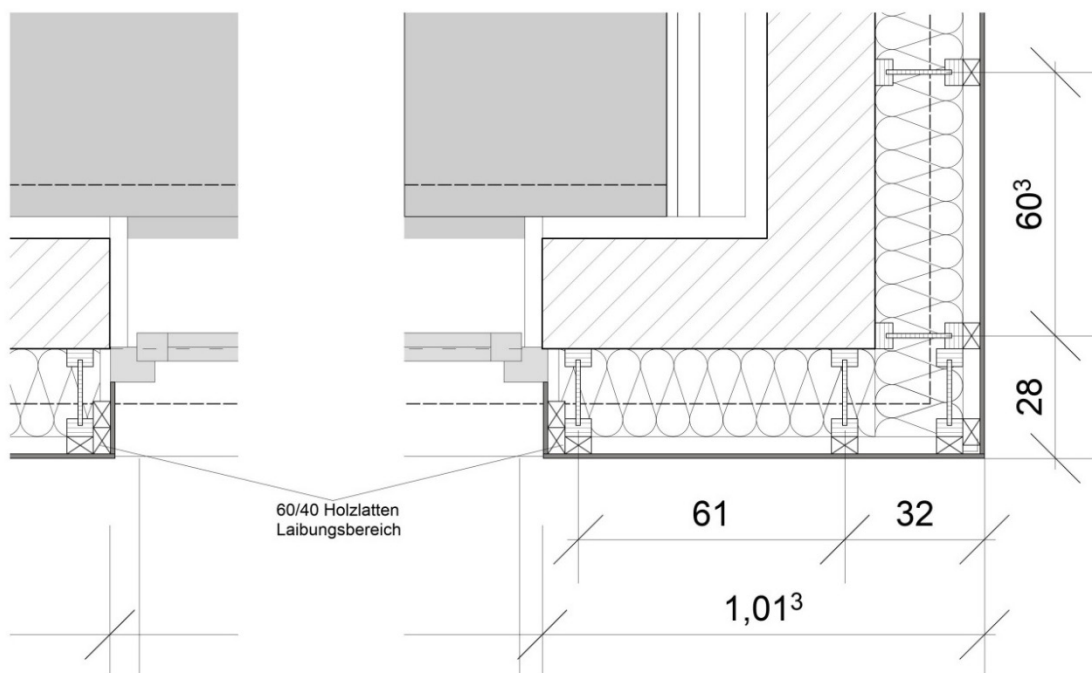


Bild 62 *Fassadensystem aus Stegträgern, Mineralwolle und Eternit- Regeldetail Laibung und Außenecke*

Die Anordnung der Stegträger sowie Mineraldämmung ist für das Erd- und Obergeschoss gezeigt (Bild 63).

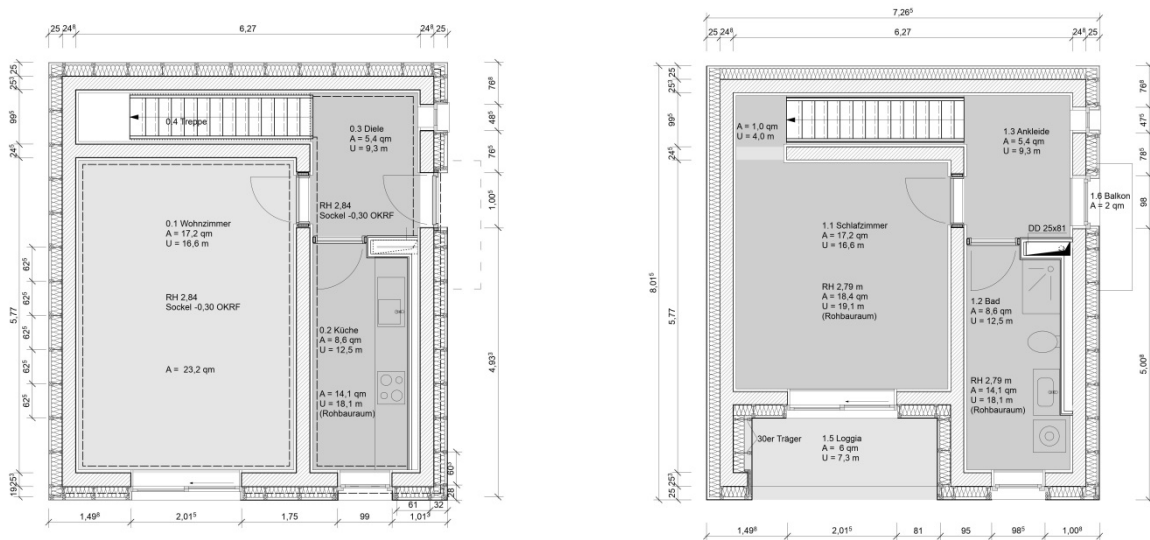


Bild 63 Variante 4: Fassadensystem aus Stegträgern, Mineralwolle und Eternit- Grundriss im EG (links) und OG (rechts)

Das Verlegen der Eternit Fassadenelemente (System von Cedral [80]) ist für zwei Gebäudeseiten in Bild 64 dargestellt.

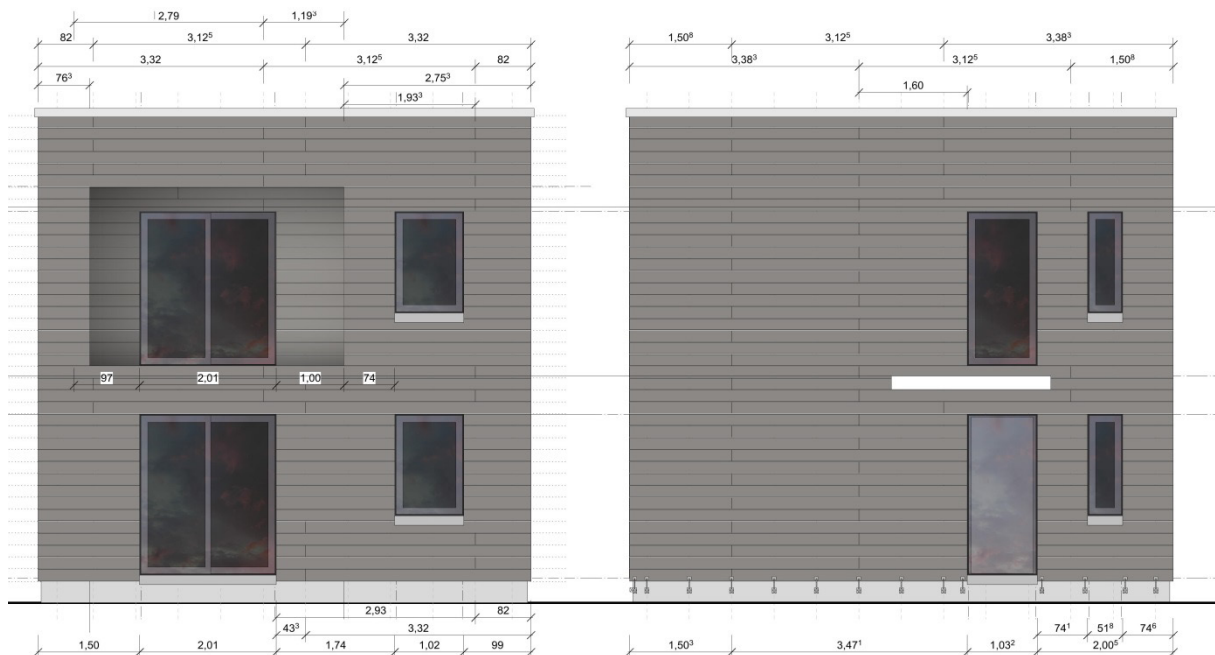
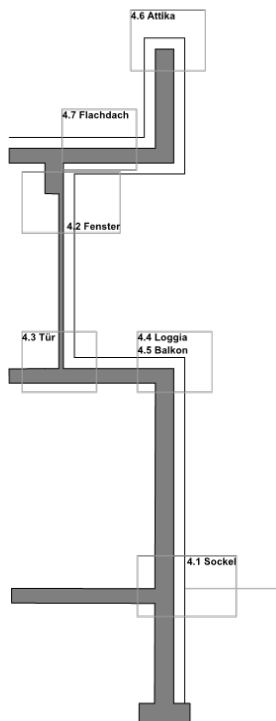


Bild 64 Variante 4: Fassadensystem aus Stegträgern, Mineralwolle und Eternit- Ansichten (Links: Ostseite. Rechts Nordseite)

Produkt	Material	Hersteller	Preis €/m <sup>2</sup>
Kalksandstein	KS	Silka	50 €
Winkel und Schrauben/Dübel	Stahl	Versch.	12 €
Steico-Träger 20 cm + Latte	LVL, Pressplatte	STEICO	31 €
Dämmung 20 cm	MIWO	URSA	44 €
Cedral Lap	Faserzement	Cedral / Eternit	141,50 €
<b>Gesamt</b>			<b>278,50 €</b>

Tabelle 3 Geschätzte Kosten des Click-Brick-Fassadenaufbaus

#### 4.5 Detailplanung des Ausbaus



In diesem Abschnitt werden wichtigen, zutreffenden Detailplanungen dargestellt. Diese Darstellung ist eine Planungshilfe für die drei vorgestellten Fassadensysteme bei folgenden, üblicherweise relevanten Gebäudedetails (Bild 65):

- Sockel
- Fensteranschluss
- Türanschluss
- Loggia
- Balkon
- Attika
- Flachdach

Bild 65 Zutreffende Gebäudedetails im Versuchsbau

#### 4.5.1 Sockel

Die konstruktive Ausbildung des Sockels ist maßgeblich vom Rohbau abhängig und wird im Folgenden beschrieben.

Das Versuchshaus ist nicht unterkellert, sondern wird als aufgeständerter Baukörper geplant. Die Erdgeschossbodenplatte stellt demnach den Gebäudeabschluss zum Erdreich dar und ist mit VIP-Paneelen auf der Unterseite zu dämmen. Damit im Übergangsbereich der Kriechkellerwand und der Erdgeschossbodenplatte keine Wärmebrücke entsteht, wurde zwischen Ringankerstein und Deckenplatte eine umlaufende Schicht aus Schaumglassteinen mit einem U-Wert von  $0,058 \text{ W/m}^2\text{K}$  eingefügt (siehe erste Bauausführung im Abschnitt 5).

Die Abdichtung ist nach DIN 18533 [47], Abdichtung von erdberührten Bauteilen gegen eindringende Feuchtigkeit, auszuführen. Bei der Aufstellung des Musterhauses wird zur Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit eine passende Folienabdichtung vorgeschlagen, um diese Norm einzuhalten. Die vertikale Abdichtung der Kriechkellerwand wird bis zur Oberkante der Deckenplatte geführt und erfüllt somit auch bei gewisser Anschüttung den geforderten Abstand von 30 cm zur OK Erdboden.

Die aufgeständerte Konstruktion erleichtert die Detaillierung der Sockelplanung, da die Wände nicht erdberührt sind. Bezugnehmend auf die Untersuchung der Fassadenkonstruktion zum Einsatz bei Musterhäusern wird für die drei Fassadenvarianten auch eine Detailausbildung mit angeschüttetem Erdreich vorgestellt:

##### **Bei Click-Brick-Fassadensystem:**

Maßgebend für die Detailausbildung der Click-Brick Fassade ist die Befestigung der Vorsatzschale. Wie im Kapitel 4.4.1 erwähnt, werden die Eigenlasten im Fußpunkt über eine Konsolenbefestigung aufgenommen. Bei der aufgeständerten Variante kann die Konsole ohne Abdichtungsprobleme über mehrere im Ringankerstein seitlich angeordnete Gewindehülsen verschraubt werden. Die Konsolen besitzen als Auflagerfläche eine Edelstahlplatte mit aufgeschweißtem Stahlstift, auf die die Click-Brick Steine mit der vorgefertigten Nut auf der Unterseite gestapelt werden.

Durch Verwendung eines VIP-Paneels mit einer Höhe von 25 cm (VIP-Position 5) wird eine effektive thermische Ummantelung bis zu den Schaumglassteinen realisiert (Bild 66).

Zusätzlich zu der Abdichtung nach DIN 18533 [47] ist bei Erdberührung die Vormauerschale nach DIN 18195-4 [48] waagrecht, oberhalb der Geländekante gegen aufsteigende Feuchtigkeit zu schützen. Die Norm schreibt außerdem eine wasserundurchlässige Verfugung der bodenberührten Schichten vor. Die Abdichtung des Schalenzwischenraumes gegen rückstauende Sickerfeuchtigkeit ist in Höhe der Aufstandsflächen anzuordnen und an der Außenseite der Innenschale hochzuführen (Bild 67). Durch die trockene Stapelung der Click-Brick Steine wird die waagrechte Abdichtung der Vormauerschale bis zur Unterkante der Konsole geführt und mit der Sockelabdichtung verschweißt. Eine seitlich angeordnete kapillarbrechende Kiesschicht minimiert die Feuchtebelastung.



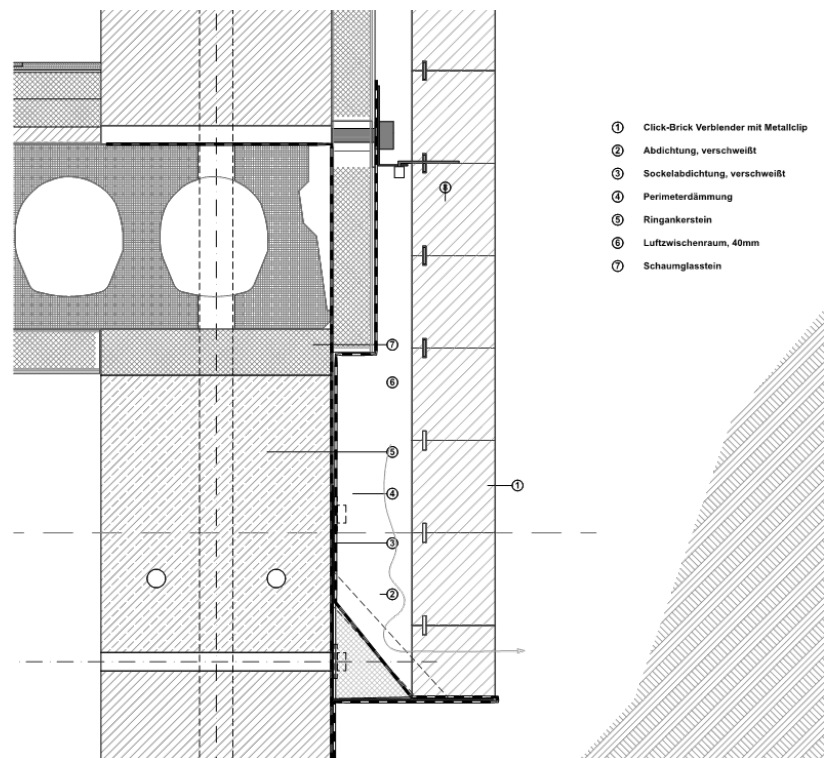


Bild 66 Sockeldetail bei Click-Brick-Fassadensystem ohne Anschüttung

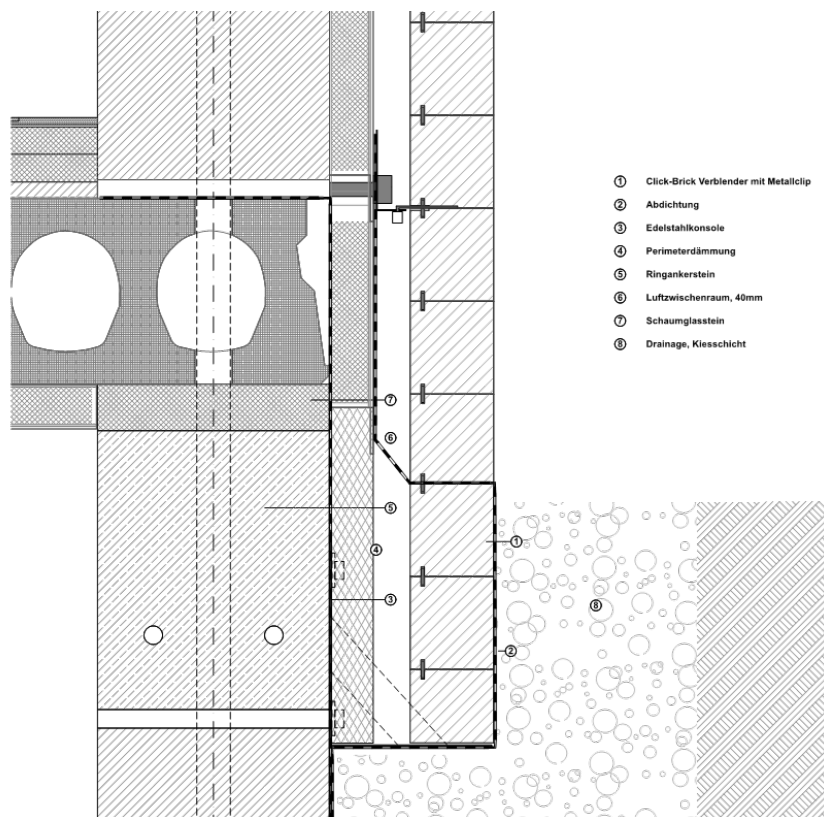


Bild 67 Sockeldetail bei Click-Brick-Fassadensystem mit Anschüttung

## VH-Fassadensystem:

Die beiden vorgehängten hinterlüfteten Fassaden werden zusammen betrachtet, da sich die Anschlüsse auf Grund der Metallunterkonstruktion nicht unterscheiden. Ein Sonderfall ist hierbei die Verwendung von Holzunterkonstruktionen. Hier gilt es, erhöhte Anforderungen an den Feuchtigkeitsschutz zu berücksichtigen.

Die Verwendung einer Metallunterkonstruktion erfordert hingegen keinen Mindestabstand zur Erdoberkante. Durch die Planung einer kapillarbrechenden Kiesschicht wird das Risiko von Stauwasser minimiert und anfallendes Regenwasser kann effektiv versickern. Maßgebend für den Abstand zum Erdreich der Konstruktion sind die Herstellerangaben der Hüllmaterialien sowie notwendige Be- und Entlüftungsöffnungen mit einem Bodenabstand größer 2cm. Der hinterlüftete Fassadenraum ist mit Lüftungsgittern vor dem Eindringen von Kleinstlebewesen zu sichern (Bild 68).

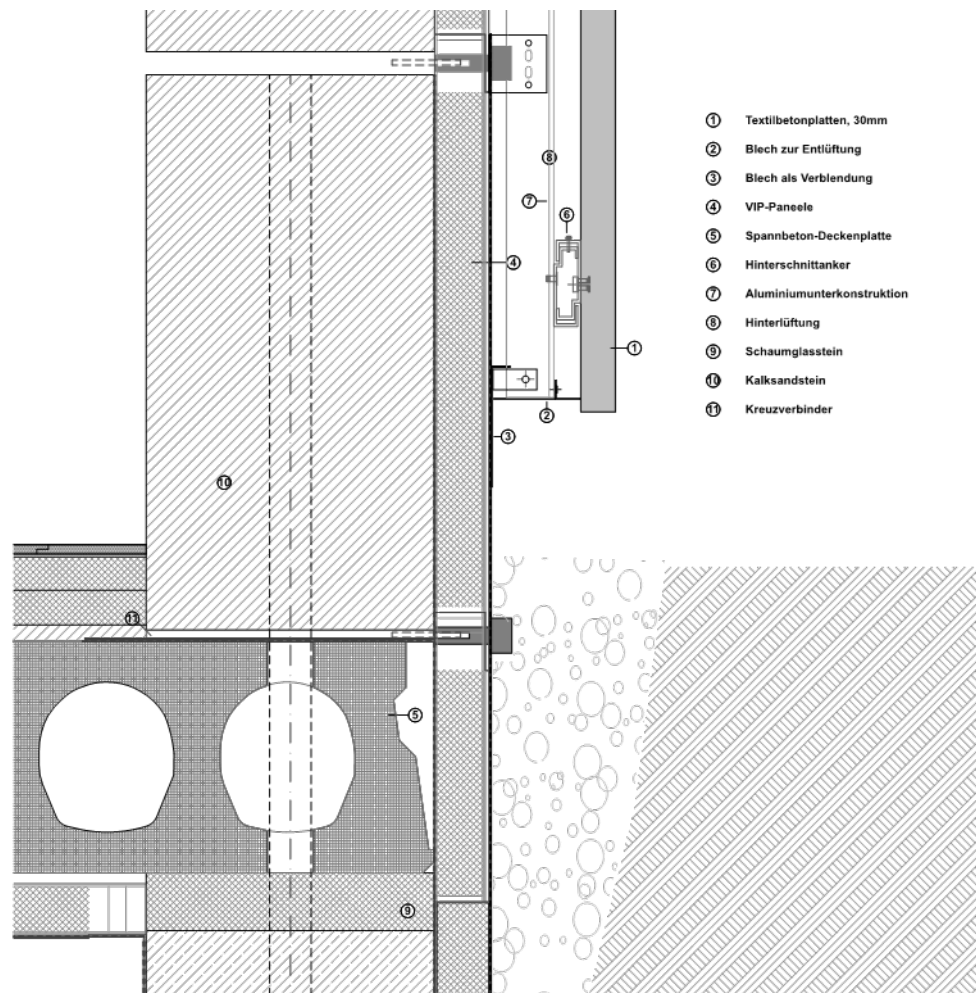


Bild 68 Sockeldetail bei VH-Fassadensystem (OKG = OKFFb)

#### 4.5.2 Fensteranschluss

Zur Ausführung wurden Holz-Aluminium-Fenster mit einem U-Wert von  $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$  geplant. Die Befestigung der Fenster erfolgt über Montageschienen in den seitlichen Rohbauöffnungen. Eine dauerhaft luftundurchlässige und umlaufende Fensterabdichtung nach DIN 4108-7 [49] wird über Dichtungsbänder gewährleistet. Der Einsatz von Montageschienen ermöglicht die Positionierung der Fenster in der Dämmebene. Die VIP-Paneele schließen bündig mit den Rohbaufenstern ab, jedoch ist im oberen Abschluss ein Dämmstreifen (2,5 cm) vorzusehen. Dieser Versatz resultiert aus der Befestigung der Dämmpaneele in der Kreuzverbinderebene und hat zur Folge, dass die Paneele an der unteren Kante nicht bündig mit den Rohbauöffnungen enden, sondern einen Versatz von 2,5 cm aufweisen (Bild 69):

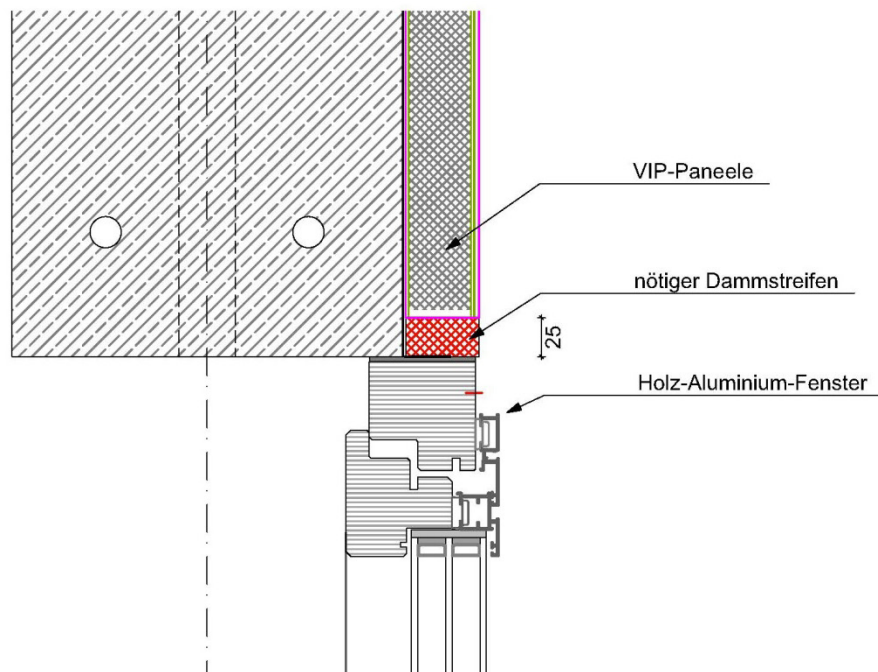


Bild 69 Fenster Dämmstreifen (Prinzipdarstellung)

Bei dem Einbau der Fenster sind die Richtlinien nach dem Leitfaden des ift Rosenheim zu beachten [87].

#### Bei Click-Brick Verkleidung:

Ähnlich dem Sockeldetail ist bei dem Fenstersturzanschluss der Click-Brick Fassade eine Konsole nötig, um den Verblender darauf aufzulegen. Die Befestigung der Konsolen erfolgt im Ringankerstein und durchdringt dabei die PU-Randdämmstreifen. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von durchgehenden Winkelkonsolen im Sturzbereich, die in die seitlich angeordneten Transporthülsen der Ringankersteine verschraubt werden. Durch die Schwächung des Wärmeverbundes, kombiniert mit einer punktuellen bzw. linearen Befestigung, ist eine Wärmebrückenbildung zu prüfen (Kapitel 4.6). Zusätzlich ist auf eine Be- und Entlüftung im Sturzbereich zu achten.

Im Brüstungsbereich der Fensterebene kann auf eine Durchdringung der Dämmebene verzichtet werden. Die Click-Brick Schale wird über ein Klemmprofil, das in die vorgesehene Nut auf der Oberseite gesteckt wird, mit dem Fensterrahmen verschraubt. Als Witterungsschutz wird ein Traufblech mit Falz in den Fensterrahmen eingeklemmt. Zur seitlichen Kaschierung der Hinterlüftung wird ein Blech an den Fensterrahmen verschraubt (Bild 70).

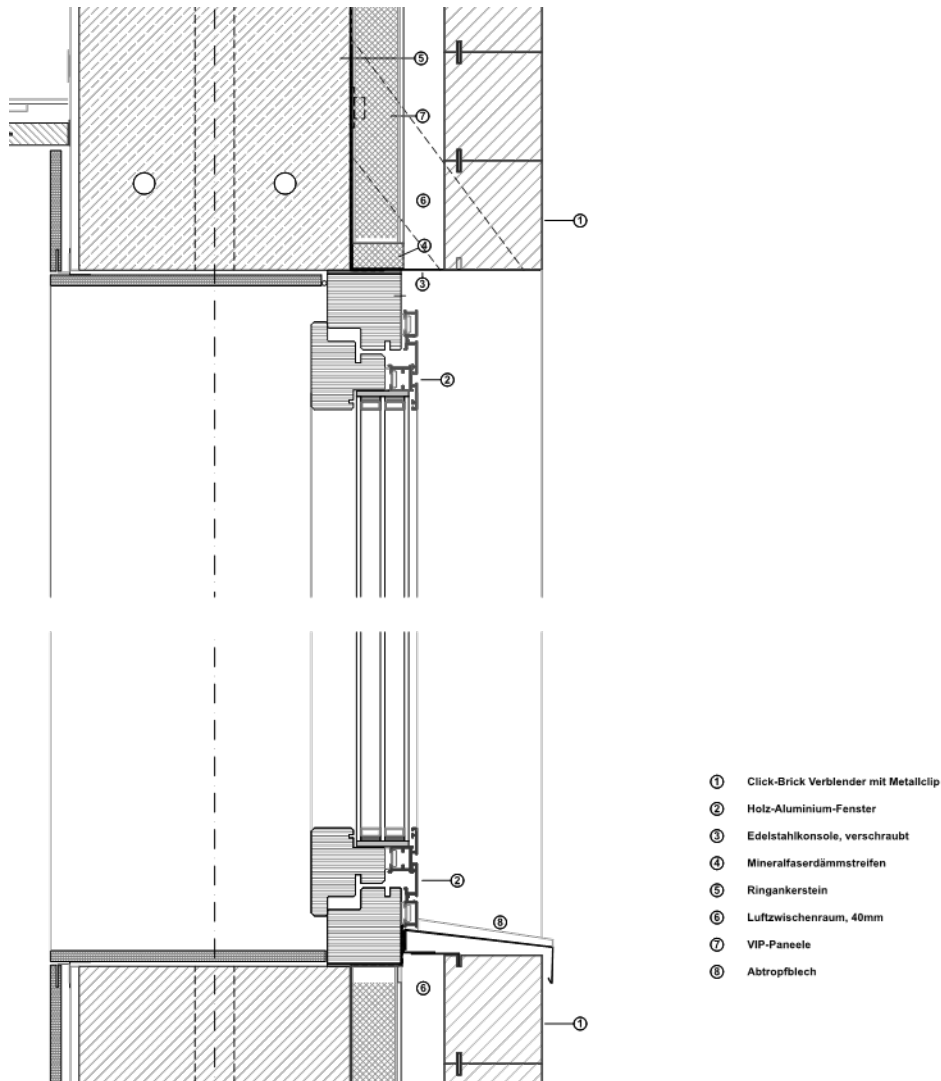


Bild 70 Fensteranschlussdetail bei Click Brick-Fassadensystem (Prinzipdarstellung)

Bei dem Einbau der Fenster sind die Richtlinien nach dem Leitfaden des ift Rosenheim zu beachten [87].

### Bei VHF-Fassadensystem:

Der Fensteranschluss wird auch in diesem Detailpunkt für die Verwendung von Textilbeton- und HPL-Platten zusammen betrachtet.

Ähnlich dem Sockeldetail kann beim Fensteranschluss die Fassadenkonstruktion bis zur Fensterrohbauöffnung geführt werden. Ein an der Unterkonstruktion befestigtes Lüftungsgitter verhindert das Eindringen von Kleinstlebewesen und ermöglicht gleichzeitig die notwendige Be- und Entlüftung der Fassade.

Das Prinzip wird umgekehrt im Brüstungsbereich verwendet, jedoch wird dabei ein Traufblech als Witterungsschutz eingesetzt. Dieses ist am Fenster und der Metallunterkonstruktion durch Laschen befestigt. Zu beachten ist hierbei, dass der geforderte Überstand von 3 cm der Fensterbank zur Fassadenbekleidung eingehalten wird. Zusätzlich muss das Traufblech einen Belüftungsspalt von mindestens 1 cm zur Fassadenbekleidung aufweisen (Bild 71).

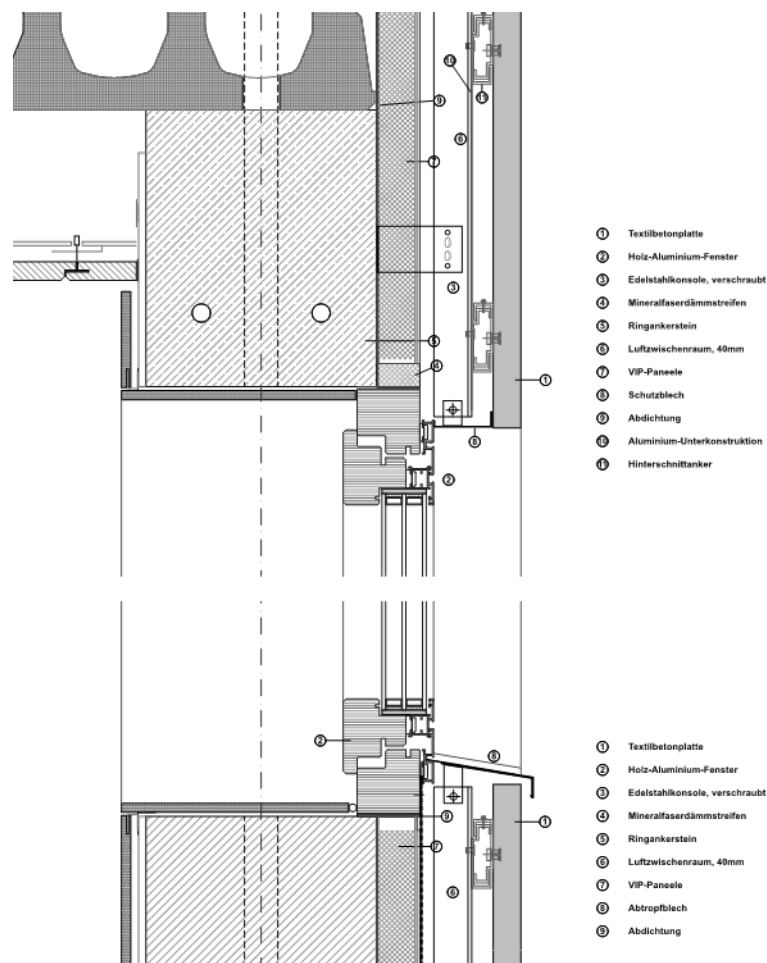


Bild 71 Fensteranschlussdetail bei VHF-Fassadensystem (Prinzipdarstellung)

Bei dem Einbau der Fenster sind wiederum die Richtlinien nach dem Leitfaden des IfT zu beachten [87].

Der sommerliche Wärmeschutz kann bei allen Fassadenvarianten nicht über einem außenliegenden Rollladenkasten realisiert werden. Aus diesem Grund wird eine Verwendung von Aluminiumfenstern mit integriertem Sonnenschutz vorgeschlagen, um den Anforderungen gerecht zu werden.

#### 4.5.3 Türanschluss

Das Türanschlussdetail gilt für alle entwickelten Fassadenvarianten. Die geplante Holz-Aluminium-Tür wird auf einem Porenbetonstein befestigt und auf der Außenseite entsprechend der Norm 18533 [47] abgedichtet. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der seitlichen, luftundurchlässigen Verbindung der hochgeführten Sockelabdichtung.

Eine vor der Konstruktion im Kiesbett angeordnete Gitterrinne gewährleistet den erforderlichen Feuchteschutz in diesem Bereich und ermöglicht gleichzeitig eine barrierefreie Planung mit einer Schwellenhöhe kleiner 2 cm (Bild 72).

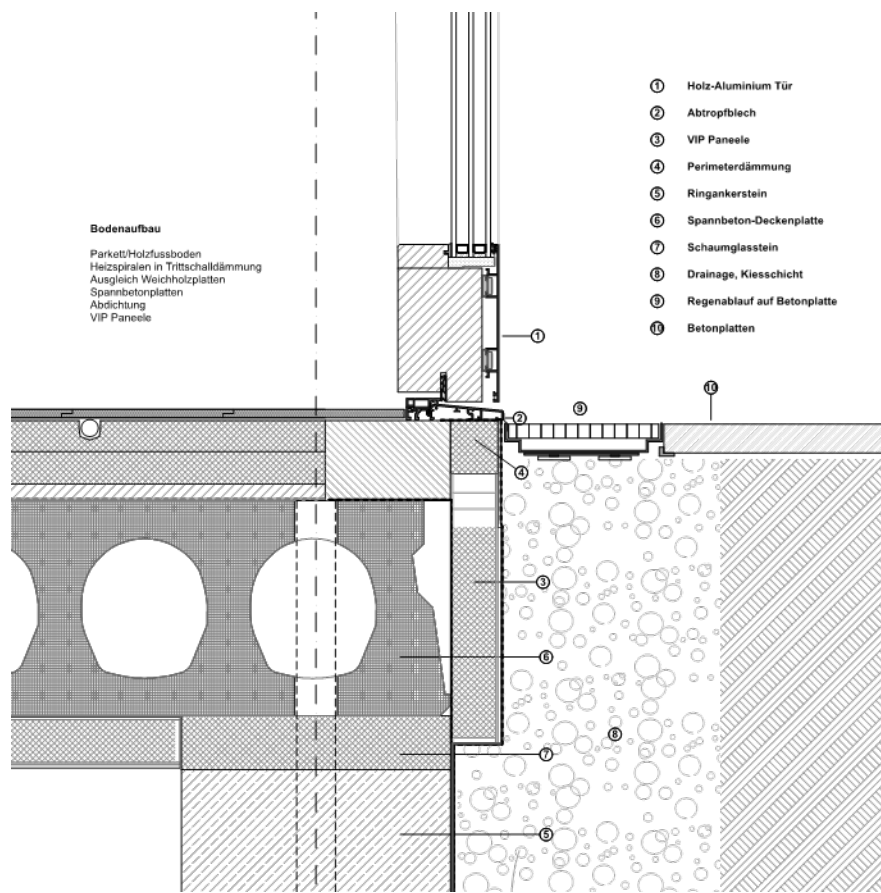


Bild 72 Türanschlussdetail (Prinzipdarstellung)

Bei dem Einbau der Fenster sind wiederum die Richtlinien nach dem Leitfaden des ift zu beachten [87].

#### 4.5.4 Loggia

Ein häufig verwendetes Element im Wohnungsbau ist die Loggia. Durch das Einrücken der Außenwand ist die komplette Außenfläche der Loggia zu dämmen. Dazu werden die entwickelten VIP-Paneele sowohl als trittfeste Dämmelemente für die Erdgeschoss- als auch für die Obergeschossdecke verwendet. Die Abdichtung ist durch die DIN 18531[50] geregelt und schreibt ein Gefälle von 2% vor. Durch eine aufgeständerte Holzkonstruktion und den darauf verlegten VIP-Paneele kann das durchsickernde Regenwasser in einer Drainagematte zur Außenkante der Loggia geführt werden. Oberhalb der entwässernden Schicht wird eine kapillarbrechende Kiesschicht geplant, auf der Betonplatten verlegt sind. Im Türbereich erhöht eine Regenrinne den konstruktiven Feuchteschutz und minimiert den Abstand der Türschwelle zur Oberkante des Loggiabelags auf 2 cm (Bild 73).

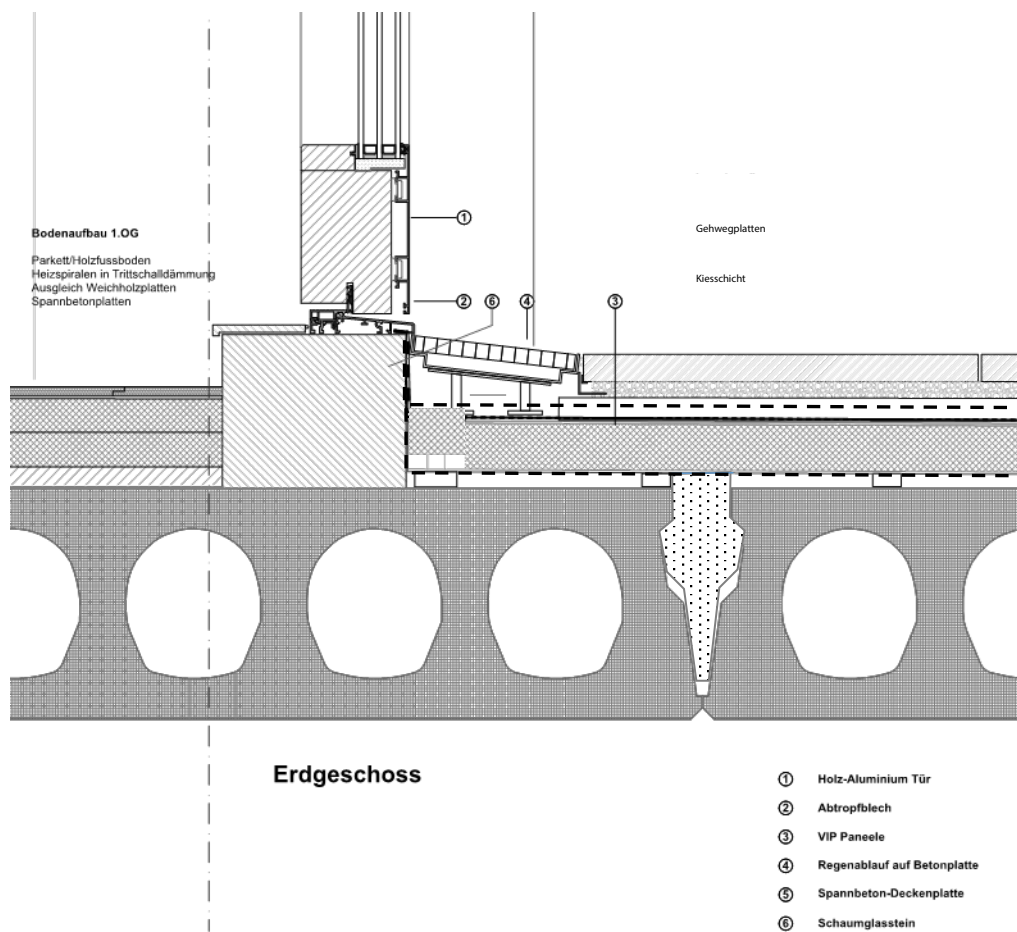


Bild 73 Türanschlusdetail-Loggia (Prinzipdarstellung)

Die Außenkante der Loggia ist mit einer Geländerhöhe von 90 cm über OKFFB zu sichern. Die Befestigung der Geländerprofile wird über eine Edelstahlkonsole, die auf der Oberseite der Deckenplatte montiert ist, ermöglicht. An diese Winkel kann das Geländerprofil verschraubt werden. Der konstruktive Feuchteschutz wird auf der Fassadenseite über ein montiertes Abdeckprofil gewährleistet, welches die jeweilige Fassadenbekleidung überdeckt. Die Abdichtung ist hier sachgerecht einzukleben. Auf der Loggiaseite wird ein Rinnenprofil angebracht, um anstauendes Regenwasser zu einem seitlichen Regenrohr abzuführen (Bild 74). Über die Fläche anfallendes Wasser wird ebenfalls dort abgeleitet.

Die punktuelle Schwächung des Dämmverbunds, bedingt durch die Edelstahlwinkel, wird in dieser Arbeit im Kapitel 4.6 weiterführend betrachtet.

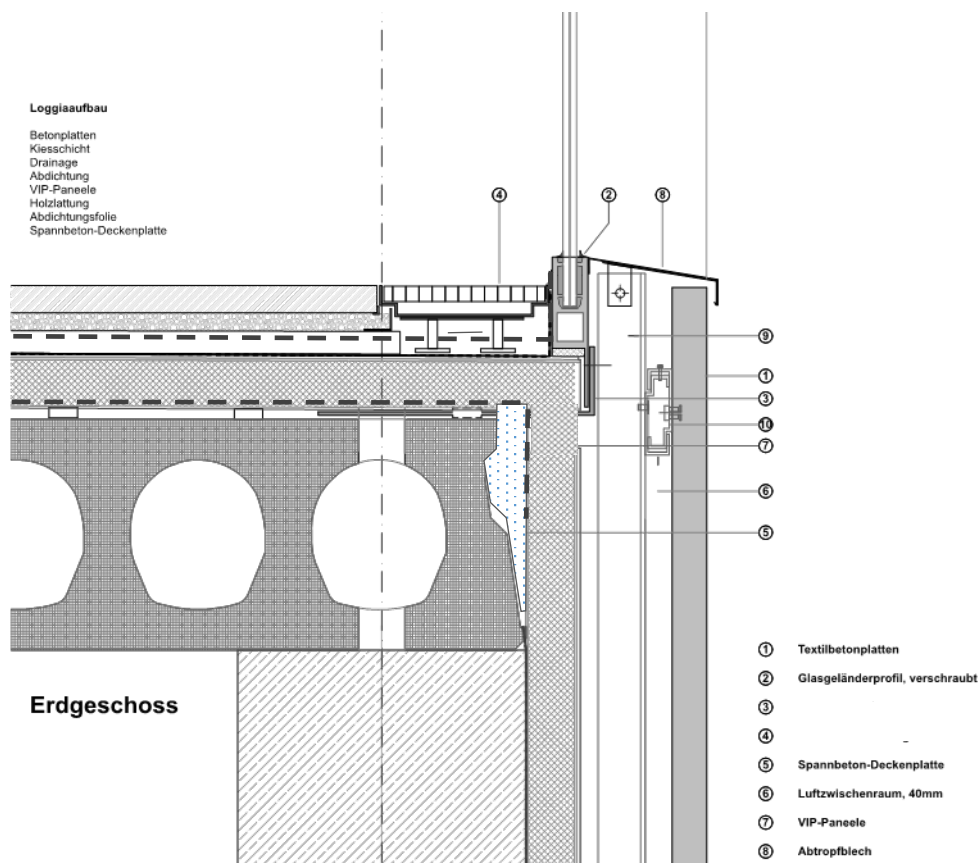


Bild 74 Loggiadetail Befestigung Glasgeländer

#### 4.5.5 Balkon

Der Balkon als ein ebenfalls häufig verwendetes Element im Wohnungsbau, wird im Projekt mit zwei auskragenden Spann beton-Deckenplatten ausgebildet. Das bedeutet, dass dies durchlaufende Platten sind und thermisch geschützt werden müssen. Aus diesem Grund wird der komplette Balkon auf der Ober- und Unterseite einschließlich der Seitenflächen mit VIP-Paneelen gedämmt. Die Paneele auf der Oberseite sind im Gefälle auf einer Holzunterkonstruktion verlegt und über eine Drainage wird zur Außenkante des Balkons entwässert und dort seitlich abgeführt.

Die Anschlussdetails für die Tür- und Geländerbefestigung entsprechen den bereits gezeigten Detailbeschreibungen im Kapitel 4.5.4

#### 4.5.6 Flachdach, Dachaufbau und Attikaausbildung

Der Dach-Attika-Aufbau spielte die größte Rolle bei der Abdichtung (Feuchte-, Luftdichtigkeit sowie Wärmedämmung) des Musterhauses. Zum anderen soll die Planung des Dachaufbaus alle Anforderung der entwickelten Trockenbauweise (Demontierbarkeit, Rückführbarkeit etc.) erfüllen. Diesbezüglich soll der Flachdachaufbau für alle vorgeschlagenen Fassadenvarianten gelten und unabhängig bzw. unter Berücksichtigung des Dach-Fassade-Anchlusses von der Fassadenkonstruktion geplant werden. Ähnlich dem Sockeldetail wird die thermische Isolierung im Attikabereich gelöst. Ein Schaumgaselement entkoppelt die Obergeschoss-Deckenplatte von den



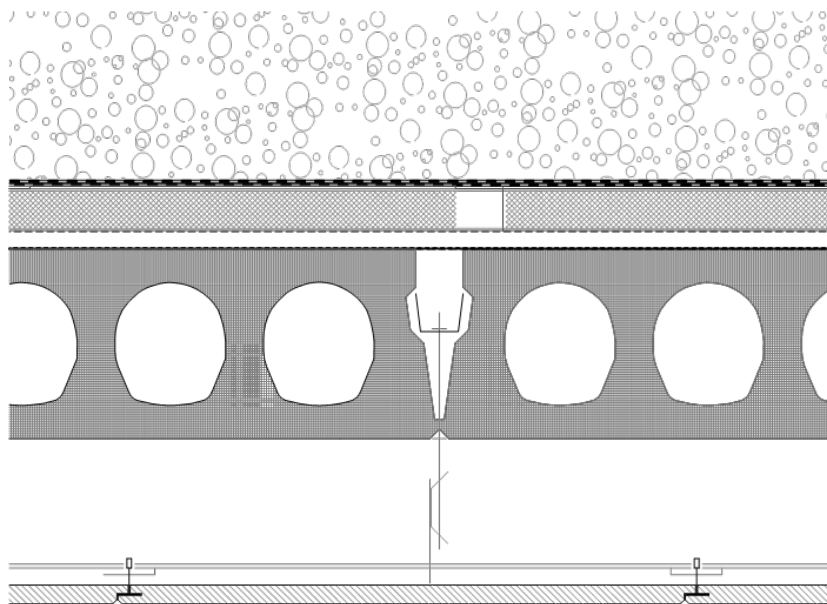
darüberstehenden KS-Steinen. Diese Maßnahme hat zur Folge, dass eine komplette Dämmung der Attika nicht notwendig ist und Material eingespart werden kann. Für den Aufbau der Dachfläche werden zwei Lösungsvarianten vorgeschlagen. Bei der Auswahl der auszuführenden Variante spielen Auswahlkriterien, wie Ausführbarkeit, Bauphysik und Wirtschaftlichkeit sowie Beschaffung/Verfügbarkeit eine bedeutende Rolle.

Bei der Planung des Dach-Attika-Aufbaus sind folgende Anforderungen aus der Bauweise zu beachten:

- Die Dampfsperre darf nicht bituminös sein. Diesbezüglich muss sie durch eine luftdicht verlegte PE-Folie realisiert werden.
- Alle Komponente des Dachaufbaus müssen lose verlegt werden können, wobei reversible mechanische Befestigungen/Sicherungen (z.B. an der Attika) zulässig sind.

### Einsatz von VIP Paneelen

Die Dachfläche wird bei der ersten Lösungsvariante mit VIP-Paneelen, die auf einer Holzkonstruktion im Gefälle verlegt sind, gedämmt. Entsprechend der DIN 18531 [50] ist die Entwässerung mit einem Gefälle von 3° auszuführen und abzudichten. Oberhalb der Abdichtung wird die Dachfläche mit einer Kiesschicht befüllt und auf diese sind Betonplatten lose verlegt (Bild 75).



#### Flachdachaufbau

Kiesschicht  
 Schutzlage Vlies aus synthetischen Fasern min. 300g/m<sup>2</sup>  
 Dachabdichtung verschweißte, lose verlegt  
 VIP Paneel  
 Holzlattung im Gefälle  
 Dampfsperre  
 Spannbetondeckenplatte  
 Unterhangdecke

Bild 75 Flachdachdetail mit Anwendung von VIP-Dämmelementen

## Gründach

Die zweite Variante stellt eine wirtschaftlichere, handhabbare, für die entwickelte Trockenbauweise angepasste Lösung des Dach- und Attikaaufbaus dar.

Ausgehend von den o.g. Anforderungen wird ein angepasstes System aus verschiedenen Komponenten des Bauder-Gründachs [76] geplant (Bild 76):

- Begrünung / Samenmischung
- Bauder Pflanzerde Extensiv (Schichtdicke nach Vorgabe Bauder)
- Bauder Filtervlies FV 125
- Bauder Drän- und Speicherelement DSE 20/1
- Bauder Schutzvlies SV 300
- Bauder Trennfolie PE 02
- Bauder Thermoplan T 15 (mit Kehlenbefestigung)
- Bauder PIR FA Gefälle 2,0%
- Trockenschüttung als Höhenausgleich
- FPO Kunststoffbahn als Dampfbremse bis unter Attika verlegt (Schnittstelle Gewerk beachten)

Für den Attika-Aufbau werden folgende Komponenten vorgeschlagen:

- Verschraubbare UK OSB-Platten auf Lattung in Gewindehülsen
- Bleche von Rheinzink [77]– mit UDS Verbindern, welche verbundlos verlegbar sind. Die Bleche werden bei der Ausführung „eingeklickt“.
- siehe (Bild 76)

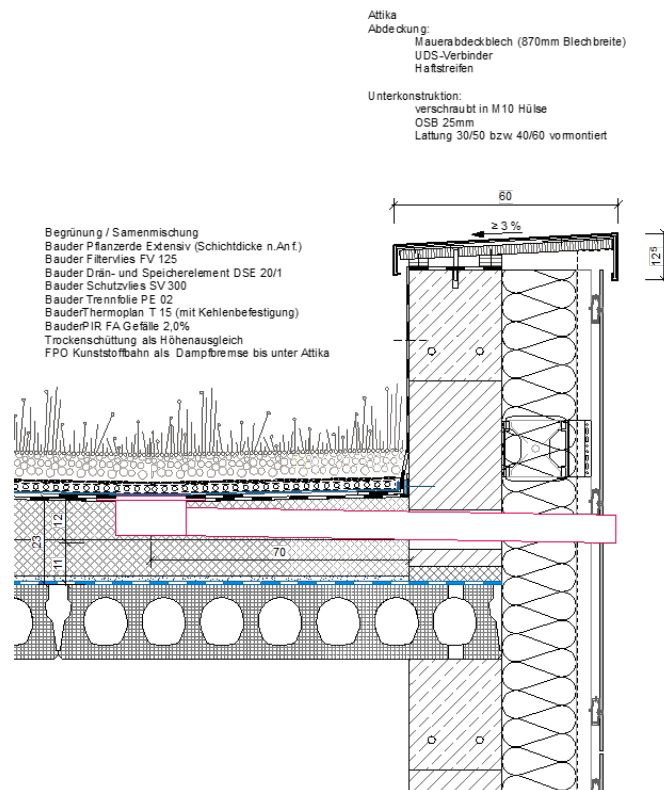


Bild 76 Geplanter Dachaufbau / Attika

Die Ausführung des Dach-Attika-Aufbaus ist im Kapitel 8 dargestellt und dokumentiert.

## 4.6 Wärmebrückensimulation

Ziel der Simulation ist die Bewertung ausgewählter, konstruktiv relevanter Details der entwickelten Fassadenaufbauten hinsichtlich der Wärmebrückenverluste und Oberflächentemperaturen. So werden sowohl geometrische als auch konstruktive/werkstoffliche Wärmebrückenproblematiken eines Wohnungsbaus betrachtet. Folgende Fassadendetails werden auf Wärmebrückeneffekte untersucht:

- Sockel,
- Fenster,
- Loggia-Übergang,
- Balkon,
- Attika.

Die Wärmebrücken wurden mit der Software Psi-Therm zur Analyse 2-dimensionaler Wärmebrücken berechnet. Das Programm ist nach DIN EN ISO 10211 [51] validiert. Zur Sicherstellung des 1-dimensionalen Wärmestroms an den Schnittändern ist ein Randabstand zur Wärmebrücke von 1 m eingehalten worden. Um das Risiko der Schimmelbildung durch konstruktive Maßnahmen zu verringern, ist nach DIN 4108 [52], Beiblatt 2 ein Temperaturfaktor  $f_{Rsi} \geq 0,7$  einzuhalten. Dieser ist ein Kriterium für das Schimmelpilzrisiko bei einem Wandanschluss.

### 4.6.1 Sockel

Die Verwendung von VIP-Paneelen auf der Unterseite der Deckenplatte und Schaumglassteinen in der Kriechkellerwand ergeben einen zulässigen  $f_{Rsi}$ -Wert von 0,82 der Sockelkonstruktion. Die innere Oberflächentemperatur liegt über der Schimmelbildungsgrenze. Eine zusätzliche Dämmpaneelreihe an der Wandaußenseite würde positive Effekte auf die Wärmeströme der KS-Kriechkellerwand haben und den Psi-Wert dieses Details verbessern (Bild 77).

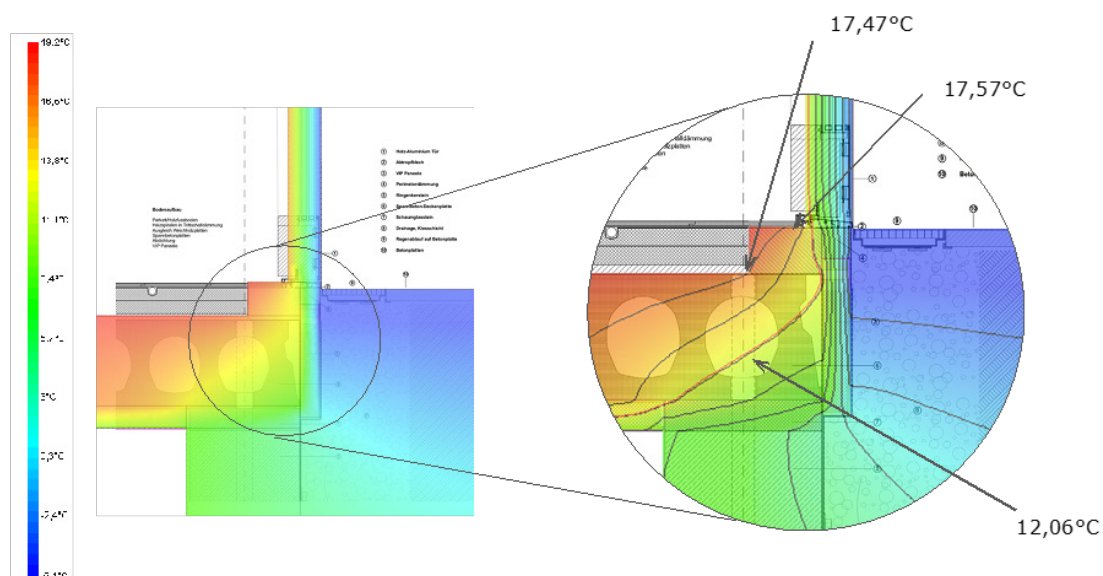


Bild 77 *Wärmebrückensimulation Sockel*

#### 4.6.2 Fenster

Das Holz-Aluminiumfenster sitzt bündig mit der Dämmebene und zeichnet sich durch einen im Modell verwendeten U-Wert von  $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$  aus. Wärmebrücken werden somit maßgeblich konstruktiv reduziert. Eine Besonderheit spielt hierbei die Montage des Edelstahlwinkels für die Click-Brick-Variante dar, der die Dämmebene durchdringt. Zu erkennen ist, dass die Wärmebrücke durch die guten Wärmeleitfähigkeiten von Stahl, auf der Außenseite eine simulierte Temperatur von annähernd  $9^\circ\text{C}$  aufweist (Bild 78). Jedoch werden auch in diesem Detail die vorgeschriebenen Mindestwerte eingehalten.

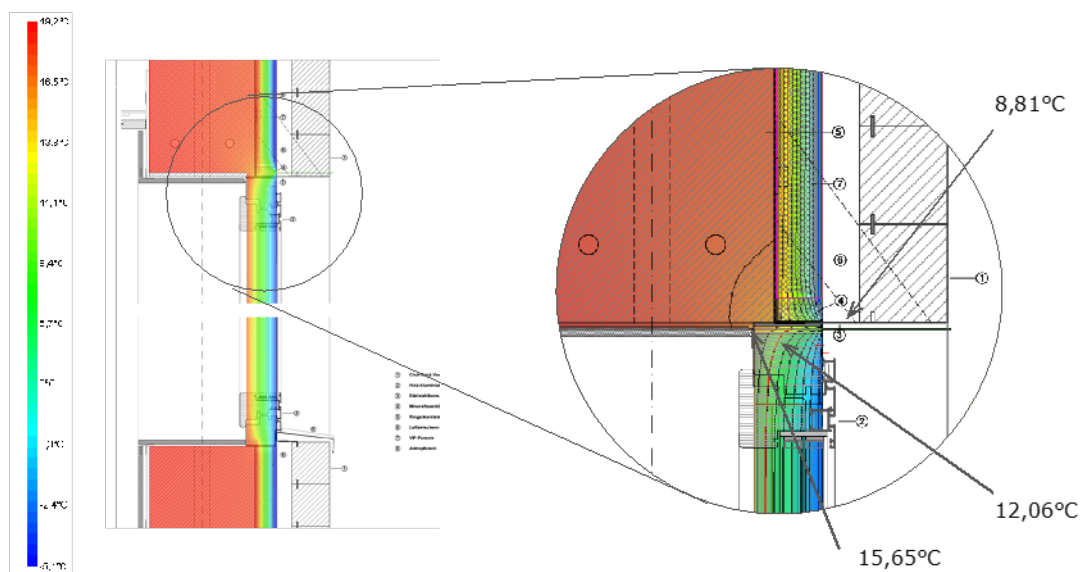


Bild 78 *Wärmebrückensimulation Fenster*

#### 4.6.3 Loggia

Bei der Simulation der Loggiaübergänge zeigen sich sowohl eine geometrische als auch eine konstruktive Wärmebrücke.

Besonders die Befestigung eines Stahlwinkels auf der warmen Deckenplatte ergibt eine hohe thermische Schwächung. Durch den aufgeständerten Loggiafußbodenaufbau und den dadurch vorhandenen Luftraum wird diese Problematik verstärkt. Jedoch ist auch dieses Detail nach DIN 4108 [52] zulässig. Optimierungen können durch Verwendung schlecht leitender Materialien oder einer thermischen Entkopplung des Winkels erreicht werden (Bild 79).

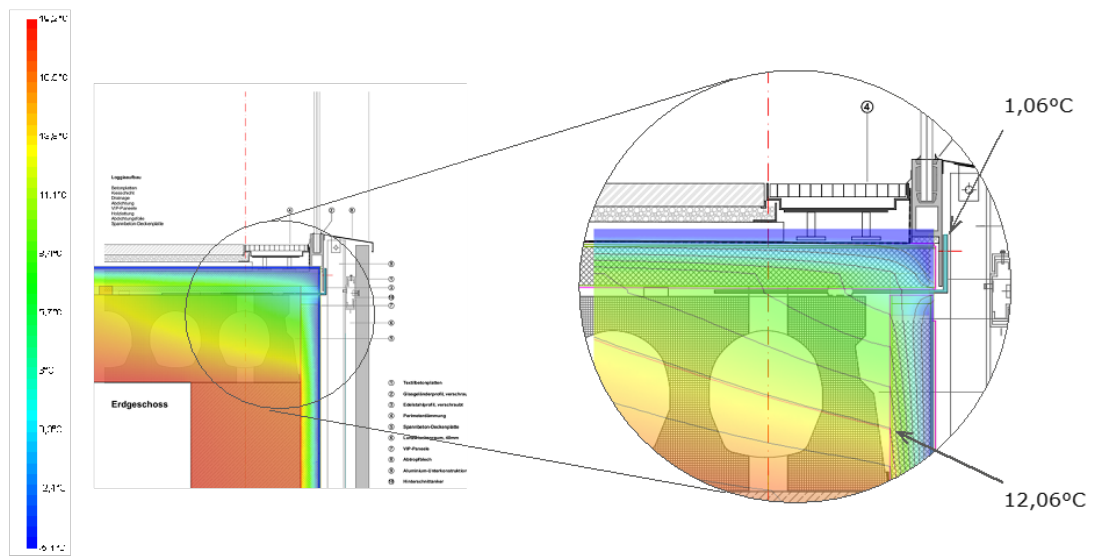


Bild 79 Wärmebrückensimulation Loggia

#### 4.6.4 Balkon

Der Balkon wird komplett mit VIP-Paneelen gedämmt (Bild 80). Obwohl die Paneele mit einem U-Wert von 0,07 W/m<sup>2</sup>K eine effektive Wärmeisolierung ermöglichen, entsteht in diesem Detail ein unzulässiger  $f_{Rsi}$  Wert von 0,69. Die Visualisierung zeigt die kritische Oberflächentemperatur von 12,19 °C am Fenster/Türübergang.

Als Lösung der Wärmebrückenbildung kann ein Fenster mit einem besseren U-Wert verwendet werden, und somit die innere Bauteiloberflächentemperatur erhöhen.

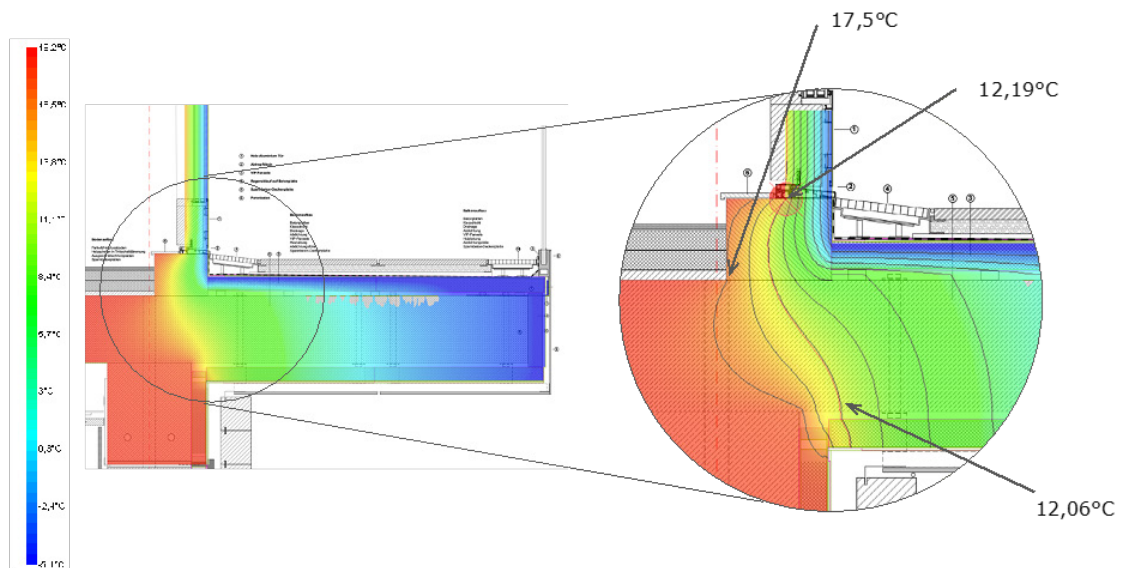


Bild 80 Wärmebrückensimulation Balkon

Eine weitere Alternative für die Umsetzung in einem Musterhaus wäre die Verwendung von Iso-Körben bei der Herstellung der Betonplatte mit der Balkonauskragung. Das war aber wegen des Einsatzes von im Spannbettverfahren hergestellten Platten nicht möglich.

#### 4.6.5 Attika

Das Detail des Attikäüberganges ist konstruktiv betrachtet die gespiegelte Ausführung des Sockeldetails und weist dementsprechend eine ähnliche Wärmestromverteilung in der Simulation auf. Die Verwendung des Perinsul-Dämmsteins optimiert die thermische Isolierung im Übergangsbereich zur Deckenplatte. Dadurch wird eine Temperatur auf der Innenseite von 17,58°C erreicht (Bild 81).

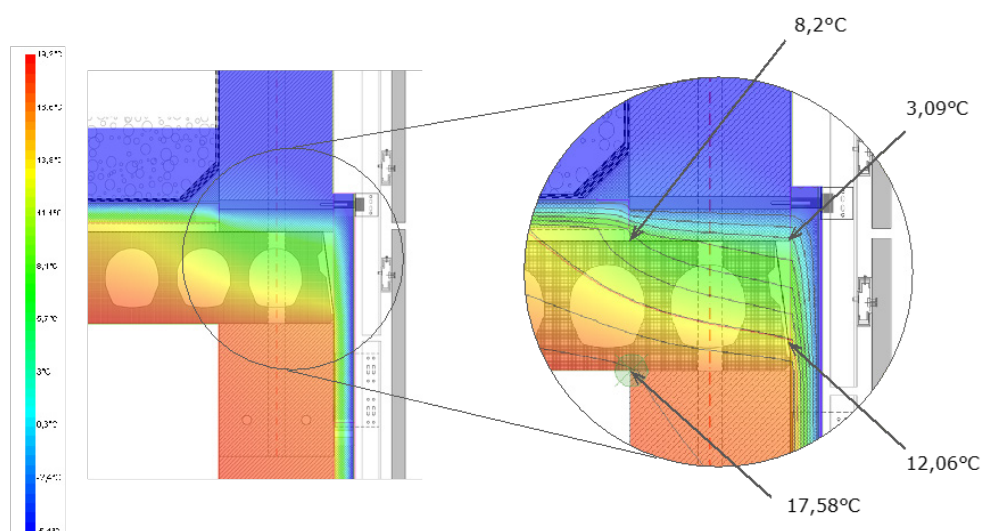


Bild 81 *Wärmebrückensimulation Attika*

Die vorgeschlagenen Konstruktionsdetails erfüllen damit alle bauphysikalischen Anforderungen hinsichtlich Wärme- und Feuchteschutz.

#### 4.7 Ökobilanz

Die Ökobilanz als planerisches Instrument ermöglicht Planern, Herstellern und Bauherren auf Grundlage der Life-Cycle-Assessment-Methode (LCA) eine systematische Analyse der Umwelteinwirkungen von Produkten und ganzen Gebäuden vorzunehmen (s. [89]). Dazu gehören sämtliche Umwelteinwirkungen während der Produktion, Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung, die durch die verwendeten Materialien erzeugt werden und somit die Analyse auch auf dieser Ebene ermöglichen.

Grundsätze und Regeln zur Durchführung von Ökobilanzen sind in der DIN EN ISO 14040 und 14044 festgelegt. Danach umfasst die Ökobilanz vier Elemente:

1. Zieldefinition und Untersuchungsrahmen,
2. Sachbilanz,
3. Wirkungsabschätzung,
4. Auswertung.

Im Folgenden werden alle relevanten Punkte einer Ökobilanz für die entwickelten Fassadenvarianten angeführt:

In der **Zieldefinition** wird der **Untersuchungsrahmen** festgelegt, in dem die Ökobilanz angewendet werden soll. Hier werden gegenübergestellt:

- Click-Brick-Fassade mit Vacopur-Dämmung (Abschn. 4.4.1)
- Click-Brick-Fassade mit Mineralwolle-Dämmung ([41])
- HPL-Fassade mit Vacopur-Dämmung ([22])
- Textilbetonfassade mit Vacopur-Dämmung (Abschn. 4.4.2)
- Zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung aus Mineralwolle (Abschn. 4.2.3)

Das zweischalige Mauerwerk dient als Vergleich zu einer bisher konventionellen Lösung. Die bisher nicht weiter beschriebene Click-Brick-Fassade mit Mineralwollendämmung ist die Standardausführung der Trockenmauerwerkfassade aus Klinkern. Der Untersuchungsrahmen der durchgeführten Berechnung wird mit 1 m<sup>2</sup> Fassadenkonstruktion und einer zeitlichen Betrachtung von 50 Jahren definiert. Nicht berücksichtigt werden hingegen der Transport zur Baustelle und der Abtransport am Ende der Nutzungsphase, was kritikwürdig ist. Die erstellte Ökobilanz ist auf Grundlage der Datenmenge des Bilanzierungstools Ökobau.dat sowie auf teilweise vereinfachten Ansätzen zum Fassadenaufbau entstanden. Im Falle, dass verwendete Materialien in der Datenbank nicht zu finden sind, werden diese mit Materialien mit ähnlichen Eigenschaften ersetzt.

In der **Sachbilanz** wurden die Stoff- und Energieströme über den gesamten Lebensweg erfasst und aufgelistet. Zur Erstellung der Bilanzen wird das Onlinetool eLCA des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung [89] verwendet. Mit Hilfe dieser Plattform können die Fassadenkonstruktionen über den darin integrierten Bauteilkatalog Ökobau.dat zusammengetragen werden. Die Datenbank hinterlegt in Kooperation mit Herstellerfirmen die geforderten Materialkennwerte und ermöglicht eine genaue Analyse. Die Betrachtung der Primärenergie erlaubt einen genauen Vergleich der Fassadenkonstruktionen und ist dem Bild 82 zu entnehmen. Die Abkürzung PENRE gibt hierbei den Wert der erneuerbaren Energie und PENRT der nicht erneuerbaren Energie wieder. PE-Re zeigt hingegen die gewonnene Energie aus möglichen Recyclingprozessen an.

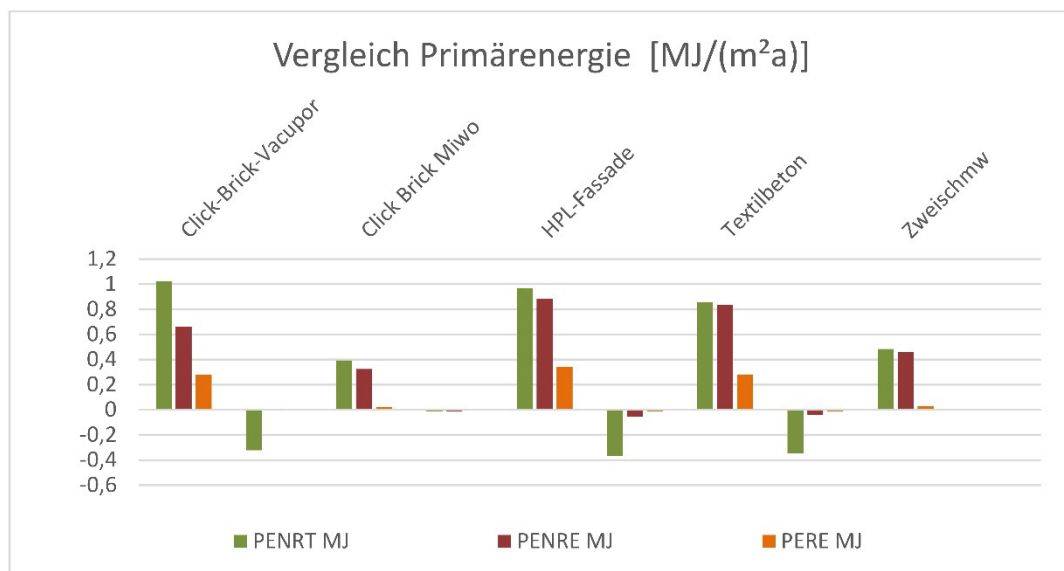


Bild 82 *Vergleich Primärenergie der Fassadenkonstruktionen*

Aufgabe der **Wirkungsbilanz** ist es, die in der Sachbilanz erhobenen Stoff- und Energieflüsse unter folgenden Umwelteinwirkungen auszuwerten:

- Treibhauspotenzial (GWP),
- Ozonabbaupotenzial (ODP),
- Versauerungspotenzial (AP),
- Eutrophierungspotenzial (EP),
- Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP).

Die aufgestellten Parameter dienen dem Erkennen, der Zusammenfassung und Analyse der potenziellen Umwelteinwirkungen und liefern wesentliche Informationen für die nachfolgende Auswertung hinsichtlich der vorgeschlagenen Konstruktionen.

**Auswertung:** Der Primärenergiebedarf der entwickelten Fassadenkonstruktionen mit Vakuumdämmung unterscheidet sich nicht eindeutig voneinander, wobei die HPL-Platten-Konstruktion den höchsten Gesamtprimärenergieverbrauch zeigt, während der Bedarf beim traditionellen zweischaligen Mauerwerk deutlich geringer ist. Aus diesem Grund wurde der Primärenergiebedarf basierend auf den verwendeten Materialien der Konstruktionen erstellt, um eine genauere Analyse zu ermöglichen. Zu erkennen ist der sehr hohe Primärenergiebedarf der VIP-Paneele, der mehr als 60% der Gesamtkonstruktion ausmacht. Vor allem der hohe Herstellungsbedarf der Vakuumpaneele wird deutlich, während der Anteil der Vormauerziegel rund 25 % beträgt, ähnlich der Konstruktion mit HPL-Platten. Ergänzend ist dabei festzustellen, dass in der Datenbank keine Produktkategorie für Textilbeton hinterlegt ist und dafür alternativ Beton verwendet wurde.

Beim Vergleich des Primärenergiebedarfs ist die Einsparung von Energie durch Recycling am Ende der Lebenszyklusanalyse der entwickelten Fassaden zu benennen, wohingegen beim traditionellen zweischaligen Mauerwerk keine Primärenergie durch Verwertungsprozesse gewonnen werden kann. Die Vormauerschale wird dabei in Mörtel gemauert und muss am Ende abgebrochen werden.

Die Auswirkungen auf die Umwelteinwirkungen verdeutlichen die wesentlich höheren Umwelteinwirkungen der entwickelten Fassadenkonstruktionen im Vergleich zum traditionellen zweischaligen Aufbau. Konkurrenzfähig und zugleich die beste Lösung ist jedoch die standardmäßig angebotene Click-Brick-Fassade mit Mineralwollendämmung [41]. Sie passt voll in das hier vorgeschlagene Konzept des verbundlosen Bauens.

Zu beachten ist die hohe Gesamteinwirkung der Textilbetonfassade auf das Ozonabbaupotenzial (ODP) gegenüber den anderen betrachteten Systemen. Dieser hohe Wert resultiert aus dem sehr hohen ODP-Einfluss der Betonschicht.

Die wesentlich höheren Umwelteinwirkungen der entwickelten Fassaden mit Vakuumdämmung können mit einem komplexeren Aufbau und somit höherem Materialbedarf begründet werden. Die Referenzfassade aus zweischaligem Mauerwerk besteht hingegen in dieser Bilanzierung aus vier Elementen, die die Umwelteinwirkungen beeinflussen. Schlussfolgernd ist festzustellen, dass alle verwendeten Materialien unabhängig von ihrer Masse oder Größe die Ökobilanzierung beeinflussen. Folglich ist im Sinne einer nachhaltigen Planung die Anzahl der zu verwendenden Materialien zu reduzieren.

#### 4.8 Auswertung der entwickelten Fassadenlösungen

Für den Ausbau des Versuchsbaues wurden in dieser Arbeit drei funktionierende Fassadenvarianten erarbeitet, bewertet und abschließend dargestellt, die den Prinzipien einer demontierbaren Fassade entsprechen. Bedingt durch die geometrischen Abweichungen der verwendeten Produkte, die in Bezug zum vorgegebenen Ausbauraster auftreten, werden konstruktive Lösungsansätze vorgeschlagen, berechnet und analysiert. Wünschenswert wäre hier jedoch in der Zukunft eine bessere Abstimmung.



Durch die Verwendung von lösbaren Verbindungen wird die Demontage des Musterhauses ermöglicht. Eine allgemeingültige Wiederverwendung der verwendeten Produkte wird bei der Umsetzung des Versuchsbaues im Kapitel 8 gezeigt und nachgewiesen.

Im Zuge der Ausführung des Experimentalbaus im Ergebnis der Verhandlungen mit potentiellen Herstellern wurde dann die Lösung mit Vakuumdämmung und eine mit Faserzementplatten auf Holzunterkonstruktion exemplarisch umgesetzt (s. Abschnitte 8 und 10). Dabei stand die erfolgreiche Montage und anschließende Demontage des Musterhauses im Mittelpunkt.

Diese vorgeschlagenen und exemplarisch ausgeführten Fassadensysteme zeigen zukünftige Tendenzen auf, bei denen die Fassade als Einheit von Rohbau und Ausbau zu sehen und die Austauschbarkeit der Fassade zu gewährleisten ist. Es lassen sich dabei auch innovative Wirtschaftskonzepte für Architekten, Hersteller und Bauherren ableiten. In diesem Zusammenhang ist ein Forschungsthema der Universität Delft zu nennen, das unter dem Titel „leasing facade“ [55] ein Konzept verfolgt, bei dem die Fassade als Produkt-Dienstleistungssystem vermietet wird. Dieser Ansatz hat nicht nur zum Ziel, die effektivere Verwertung und Wiederverwendung zu ermöglichen, sondern dabei auch aktuelle Geschäftsmodelle der Bauwirtschaft zielorientiert zu verändern.

## 4.9 Rahmenbedingungen zum entwickelten Innenausbau-System

### 4.9.1 Grundlagen und Ziele

Dieser Arbeitsteil beschäftigt sich mit der Entwicklung von Möglichkeiten eines demontierbaren Innenausbaus zur Anwendung im geplanten Musterhaus. Basierend auf [1] sollen festgelegte Ziele und Anforderungen an den Rohbau auch auf den Innenausbau übertragen und mit diesem abgestimmt werden. Diesbezüglich stehen die Demontierbarkeit, Modularität, sortenreine Trennbarkeit und Wiederverwendung als Grundlagen im Vordergrund.

In diesem Sinn ist hier ein Detailkatalog zu den modifizierten Innenausbausystemen entwickelt worden, die mit dem Rohbau kompatibel sind. Alle vorgestellten Innenausbausysteme müssen im Wesentlichen demontierbar und rezyklierbar sein. Mögliche Problemstellen werden kritisch analysiert. Hierbei wurden Lösungen zu möglichst vielen konstruktiv sowie technisch relevanten Anschlüssen dargelegt. Des Weiteren wird eine überschlägige Kostenschätzung des Ausbaus durchgeführt. Zum Schluss folgt eine Analyse der Wohnqualität des Musterhauses mit Berücksichtigung der Fertigmasse des Ausbaus.

### 4.9.2 Stand der Forschung

Die Untersuchung der Marktangebote zum Innenausbau hat gezeigt, dass zu jetzigem Zeitpunkt bereits eine gewisse Bandbreite an demontierbaren Ausbausystemen angeboten wird.

Besonders verbreitet und weit entwickelt ist der demontierbare Ausbau im Bereich des Messebaus. Der Messebau setzt die temporäre Nutzung voraus, wodurch die Eigenschaften wie Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit bei dem Ausbau zu einem großen Vorteil werden. Die Messebodensysteme werden mit großen Lufträumen (zur Unterbringung der Medien und Installationen) ausgeführt. Die Lösungen zum Wandbau und -ausbau sind meist individuell und bei unterschiedlichen Anbietern spezifisch. Im Allgemeinen sind die Messesysteme sehr kostspielig und für den Wohnungsbau überdimensioniert.

Im Bereich vom Bürobau kommen die demontierbaren oder zum Teil demontierbaren Systeme ebenfalls zum Einsatz. Das beste Beispiel dafür ist die abgehangene Decke. Eine große Anzahl der Abhangdecken-Systeme sind modular aufgebaut und bieten, bis zur Befestigung der Abhängung am Rohbau, eine vollständige Demontierbarkeit an. Das Problem solcher Systeme

ist eine stark definierte, für Büroräume typische Rasterung in der Ansicht. Mit einer speziellen Form der Verkleidungspaneele können Haarfugen ausgebildet werden, was das Erscheinungsbild des Ausbaus homogener macht.

Bei dem Wandausbau ist das Thema der Demontierbarkeit noch nicht so stark auf dem Markt vertreten. Während die Unterkonstruktion (wie zum Beispiel Ständerwerk) nach den Anforderungen der Nachhaltigkeit und Wiederverwendung problemlos ausgeführt werden kann, wird die Verkleidung doch oft mit den unlösbaren oder schwer lösbaren Verbindungen montiert, sodass keine zerstörungsfreie Demontage möglich ist. Nichtsdestotrotz haben einige Hersteller spezielle Klick- und Einhängesysteme entwickelt, welche einen modularen und demontierbaren Ausbau ermöglicht. Die Verkleidung solcher Systeme erfolgt ebenfalls modular mit Paneelen.

Die Vorteile des trockenen und modularen Bauprinzips wurden auch bei der Entwicklung der Fußbodenheizung entdeckt. Die Montage der modularen Systeme erfolgt mit geringem Zeit- und Arbeitsaufwand. Die Grundplatten aus dämmenden Materialien, wie Styropor oder Holzfaser, wirken sich außerdem positiv auf die Aufheizzeit des Raumes und die Homogenität der Wärmeverteilung aus.

#### 4.9.3 Vorgehensweise/Auswahlkriterien

Basierend auf den übergeordneten Zielen in [1] und den angestellten Untersuchungen zum Innenausbau wurden bestimmte Auswahlkriterien als Rahmenbedingungen für den entwickelten Innenausbau in dieser Arbeit festgelegt:

- **Montage | Demontage**

Hierbei soll der genaue Aufbau eines Systems in Bezug auf die Komplexität der Montage analysiert werden. Die Verbindungen des Systems sollen lösbar sein, eine rückstandslose Demontage, sortenreine Trennung und eine vollständige Wiederverwendung beziehungsweise vollständiges Recycling ermöglichen. Verbindungen mit Klick-, Steck- oder Einhängesystemen sind dabei zu bevorzugen.

- **Raster**

Bei diesem Punkt soll die Kompatibilität des ausgewählten Systems mit den vorhandenen Anschlusspunkten im Rohbausystem des Versuchshauses überprüft werden. Die Befestigung am Rohbau darf nur im Raster der Kreuzverbinder 50x25 erfolgen.

- **Technische Aspekte**

Hier werden die wichtigen Eigenschaften des Innenausbau-Systems aufgelistet. Die Angemessenheit zur Benutzung im Wohnungsbau ist dabei zu prüfen.

- **Kosten**

Hierbei sind die ungefähren Kosten des Systems pro m<sup>2</sup> zu schätzen.

- **Materialität**

In diesem Punkt werden die Materialien der einzelnen Bauteile untersucht. Materialien wie Holz, Holzwerkstoffe (für Bekleidung) und Aluminium oder Stahl (für Unterkonstruktion) werden bevorzugt.

- **Nutzerfreundlichkeit**

Die Gestaltungsmöglichkeiten des Systems sollen hier untersucht werden. Vielfalt an optischen Charakteristika und an der Modulgröße (Rasterung) der Verkleidung ist dabei anzustreben. Pflege- bzw. Wartungsaufwand sollen auch berücksichtigt werden.

Aufgrund des umfangreichen Marktangebotes wurde in dieser Arbeit eine Vorauswahl aus jeweils zwei Systemen für Boden-, Wand- und Deckenausbau getroffen. Die Auswahlkriterien werden von allen Systemen erfüllt, allerdings im unterschiedlichen Maße. Die Systeme werden verglichen im Bezug darauf, wie gut das jeweilige Kriterium erfüllt wird. Die Wichtigkeit der bestimmten Kriterien kann von Bauteil zu Bauteil variieren und wird am Anfang der jeweiligen Kapitel betrachtet.

#### 4.9.4 Konstruktive Lösungen/ Rahmenbedingungen

Zu den ausgewählten Systemen werden Montage-Pläne zur Unterkonstruktion sowie zur Verkleidung entwickelt. Zur Anschaulichkeit wird ein Beispielraum beziehungsweise Geschoss mit der geplanten Ausführung dargestellt. Des Weiteren werden die wichtigsten Anschlüsse der Ausbausysteme geplant.

#### 4.9.5 Besondere Anforderungen

Bei den Bauteilen Wand und Decke wird die Problematik der TGA zum weiteren Thema. Dazu wird die Möglichkeit zur Integration der technischen Medien wie Steckdosen/Schalter und künstliche Belichtung in das jeweilige Ausbausystem untersucht. Die Problempunkte der Standardlösungen werden kurz erläutert. Basierend darauf werden alternative Lösungen für die gewählten Ausbausysteme vorgeschlagen.

#### 4.9.6 Fußbodenaufbau

Der Fußboden soll als günstige bauklimatische Lösung die wichtige Funktion der Heizung mit übernehmen. Aus diesem Grund werden in erster Linie Fußbodenheizungssysteme nach den Auswahlkriterien untersucht und verglichen. Aufgrund der Untersuchung wird ein System ausgewählt und detailliert beschrieben. Weiterhin wird der Bodenbelag, mit Berücksichtigung der Projektkriterien, vorgeschlagen und dessen Ausführung beschrieben. An einem Beispielraum wird der Fußbodenaufbau erläutert und die Verlegung der Unterkonstruktion und der Bekleidung demonstriert.

### Vorgeschlagene Fußbodenheizungssysteme

Bezugnehmend auf [2] ist das Erreichen des Nullenergiestandards ein weiterer wichtiger Punkt im Rahmen dieser Arbeit. Dies erfolgt unter anderem durch die Optimierung der Gebäudetechnik. Da das Heizsystem als Unterkonstruktion des Fußbodens für die Gestaltung nicht relevant ist, wird der Aspekt der Nutzerfreundlichkeit erst bei dem Gesamtaufbau im folgenden Kapitel erläutert.

Bei den Fußbodenheizungssystemen wurden zwei Varianten vorgeschlagen. Das erste System ist das sogenannte Noppensystem (Bild 83) [56] und das zweite ist ein modifiziertes System von Quick Therm (Bild 84) [57].

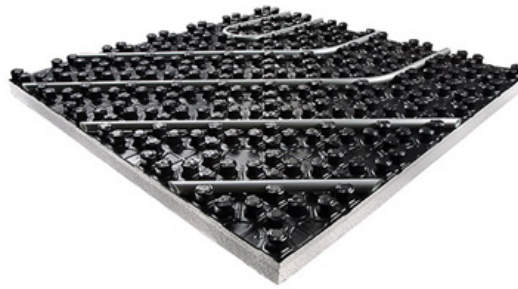


Bild 83 Fußbodenheizung Noppensystem [56]



Bild 84 Fußbodenheizung GreenLine [57]

Ein Vergleich nach den vorgenannten Auswahlkriterien in 4.9.3 ist in der Tabelle 4 dargestellt.

Auswahlkriterien	Noppensystem	Fußbodenheizung Quick Therm (GreenLine)
Montage   Demontage	Heizungssystem trocken verlegt (auf Ausgleichsschüttung oder Trockenestrich); Direktes Verlegen des Bodenbelags; nur mit zusätzlichen Bauteilen bzw. Trockenestrich möglich	Heizungssystem trocken verlegt (direkt oder auf Ausgleichsschüttung/Trockenestrich) Bodenbelag wird direkt auf das System verlegt
Raster	Grundplatten lassen sich beliebig zuschneiden	Mögliche Randbereiche werden ausgefüllt mit Füllplatten
Technische Aspekte	Gute Schallschutz- und Dämmeigenschaften; Homogene Wärmeverteilung	Gute Schallschutz- und Dämmeigenschaften; Homogene Wärmeverteilung
<b>Kosten</b>	<b>36,60 €/m<sup>2</sup></b>	<b>75,00 €/m<sup>2</sup></b>
Materialität	Kunststoff	Holzfaser

Tabelle 4 Vergleich vorgeschlagener Fußbodenheizungssysteme

Anhand des durchgeführten Vergleiches ist das Noppensystem kostengünstiger. Die Fußbodenheizung Quick Therm ermöglicht (ohne zusätzliche Mittel) aber das direkte Verlegen des Bodenbelags und ist dank dem Einsatz von Holzfaser ökologischer und nachhaltiger.

Dementsprechend wird das **Fußbodenheizung Quick Therm (GreenLine)** zum Einsatz im Musterhaus vorgeschlagen.

### Fußbodenheizung Quick Therm (GreenLine)

Das System wurde für ökologisch orientierte Projekte entwickelt. Durch die Nutzung von Holzfaserplatten ist das System optimal im Sinne der Nachhaltigkeit. Die Systemplatten können direkt auf den ebenen Untergrund verlegt werden. Bei Toleranzen größer als 3mm ist der Ansatz von Trockenestrich oder Ausgleichschüttung sinnvoll. Da der Bodenbelag direkt auf das Heizsystem verlegt wird, kann die Aufbauhöhe besonders niedrig gehalten werden. (Am besten geeignet für Laminat- oder Parkettböden) [57].

Die GreenLine Systemplatten (Bild 85- 1) mit vorgefertigten Rohrkanälen im Abstand von 166 mm. Die Aluminium-Wärmeleitbleche begünstigen die Wärmeabgabe in den Raum. Die Platten bestehen aus Holzfaser und sind 30mm dick. Sie lassen sich durch Schneiden an die Raumgrößen anpassen. Das System beinhaltet Holzfaserelemente zur Bogenführung der Heizrohre. Es gibt außerdem Füllplatten um die Abstände zum Rand ausgleichen zu können. Es können bei Bedarf auch Rohrkanäle eingeschnitten werden.

Das Heizrohr (Bild 85- 2) ist ein Aluminium-Mehrschichtverbundrohr mit Durchmesser 16mm (Wandstärke 2mm). Die Randdämmstreifen bestehen aus doppellagiger Wellpappe aus 70% Altpapier hergestellt wird. Auf die Platten mit den Rohren wird eine (Bild 85- 3) – trittschaldämmende Wärmeleitschicht mit einer Dicke von 1,5 verlegt. Sie ermöglicht das direkte trockene Verlegen des Fußbodenbelags. Zum System gehören sogenannte Stabilisierungsleisten für Türbereiche und Auflageflächen von schweren Möbeln.

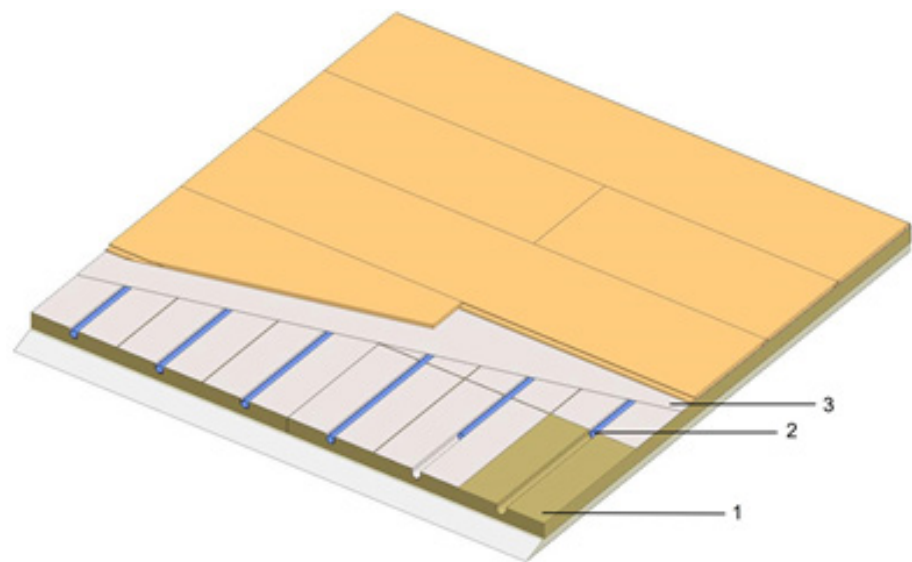


Bild 85 *Isometrie System-Boden GreenLine*

## Bodenbelag bei GreenLine-System

Für den Bodenaufbau mit dem GreenLine-System sind Laminat (Bild 86) und Parkett besonders gut geeignet. Diese Bodenbeläge werden mit Hilfe des Klicksystems ohne Verschrauben oder Verkleben verlegt und sind dadurch rückstandslos demontierbar und wiederverwendbar. Beide Varianten bieten eine gestalterische Vielfalt durch unterschiedliche Holzarten und Farben. Massivholzdielen mit einer Stärke von 15 – 22 mm sind ebenfalls möglich. Laminat-Böden sind ab 3,99 €/m<sup>2</sup> im Baumarkt zu erhalten.



Bild 86 *Bodenbelag-Laminat*

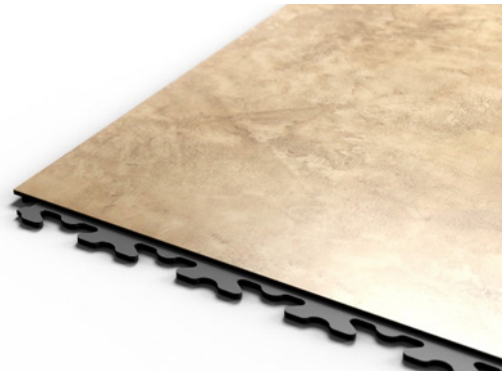


Bild 87 *Bodenbelag-PVC-Dekor-Fliesen*

Für die Nasszelle sind PVC-Fliesen (Bild 87) vorzuschlagen. Die PVC-Fliesen werden durch ein Verbindungsstecksystem verbunden. Sowohl unsichtbare als auch sichtbare Verbindungen sind möglich. Die PVC-Fliesen bieten guten Feuchteschutz und einfache Pflege an. Die Fliesen sind in unterschiedlichsten Farben zu erhalten. Bei den Dekor-Fliesen sind auch verschiedene optische Oberflächen (zum Beispiel Stein oder Echtholz) möglich. Wohnraumgeeignete PVC-Fliesen sind ab 40,80 €/m<sup>2</sup> zu erhalten, Dekor-Fliesen ab 52,50 €/m<sup>2</sup>.

## Fußbodenaufbau-Ausführung

Der Fußbodenaufbau soll als erstes montiert werden. Daher ist die Konstruktion von den weiteren Ausbausystemen unabhängig. Das System wird von Rohbauwand bis zu Rohbauwand in der folgenden Reihenfolge ausgeführt:

- **Unterkonstruktion/Systemplatten:**

Hierbei wird ein Plan zur Verlegung der Systemplatten der Fußbodenheizung dargestellt. Da die Installationsebene für Wasserleitung vertikal durchläuft (an der Außenwand der Nasszelle), soll der Verteiler für die Fußbodenheizung im Bereich dieser Ebene angebracht werden (für ein Geschoss wird ein Verteiler benutzt). Unter Berücksichtigung dieser Platzierung wurde die Anordnung der Systemplatten entwickelt, die die optimale Wärmeverteilung innerhalb des gegebenen Grundrisses ermöglicht. Die Randbereiche sind mit Füllplatten auszufüllen. Um ein an einem Verteiler angeschlossenes System zu schaffen, sollten in bestimmten Bereichen der Füllplatten zusätzliche Rohrkanäle eingeschnitten werden. Diese sind mit punktierten Linien im Plan markiert. Das Bild 88 stellt einen Vorschlag der möglichen Ausführung des Systems dar. Individuelle Beratung zur Anpassung des Systems an Grundrissgeometrie wird von dem Anbieter QuickTherm angeboten [57].

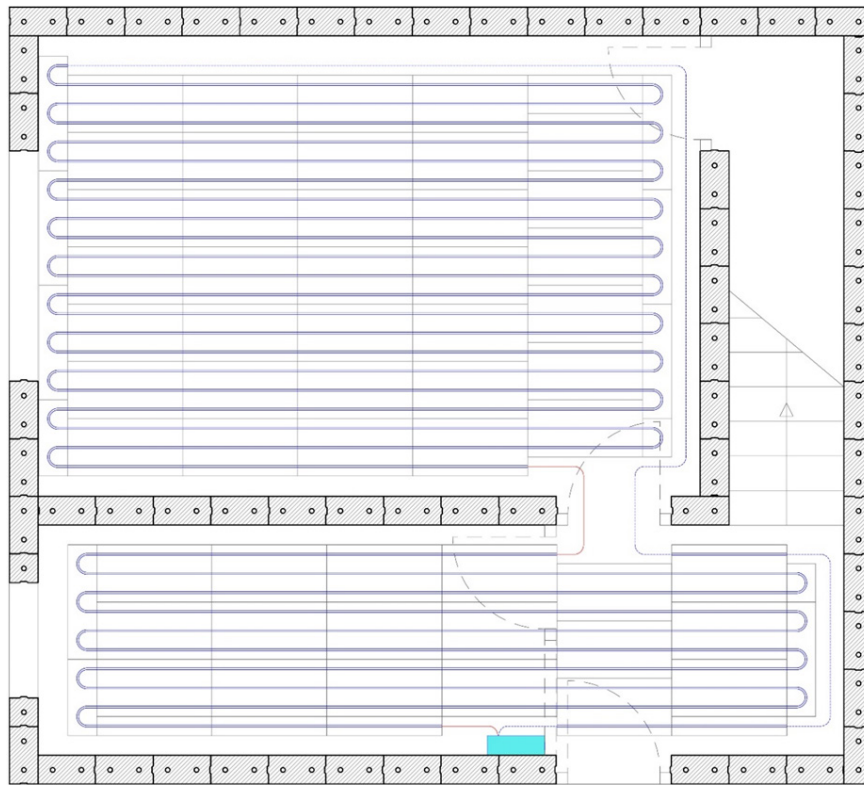


Bild 88 Fußbodenaufbau-Unterkonstruktion/EG

- **Verlegung des Bodenbelags:**

Das Bild 89 Punkt zeigt eine Ansicht des vorgeschlagenen Bodenbelags. Als Belag für Beispielgeschoss wurde Laminat mit den Maßen 12,5cm x 21 cm gewählt. Der Versatz der Schichten sollte etwa gleich gehalten werden. Der durch die Geometrie des Raumes entstehende Verschnitt sollte weitgehend in den nachfolgenden Schichten benutzt werden.

Für die Nasszelle wurden PVC-Fliesen 45,6 cm x 45,6 cm als Grundmodul genommen. Die Türbereiche sollen mit Türleisten verdeckt werden. Dieser Vorschlag soll nur als Beispiel der Ausbau dienen. Die Wahl der spezifischen Charakteristika (wie Farbe, Länge, Oberfläche etc.) des Laminatbodens sowie PVC-Fliesen soll bei der Umsetzung des Projektes dem Nutzer überlassen werden.

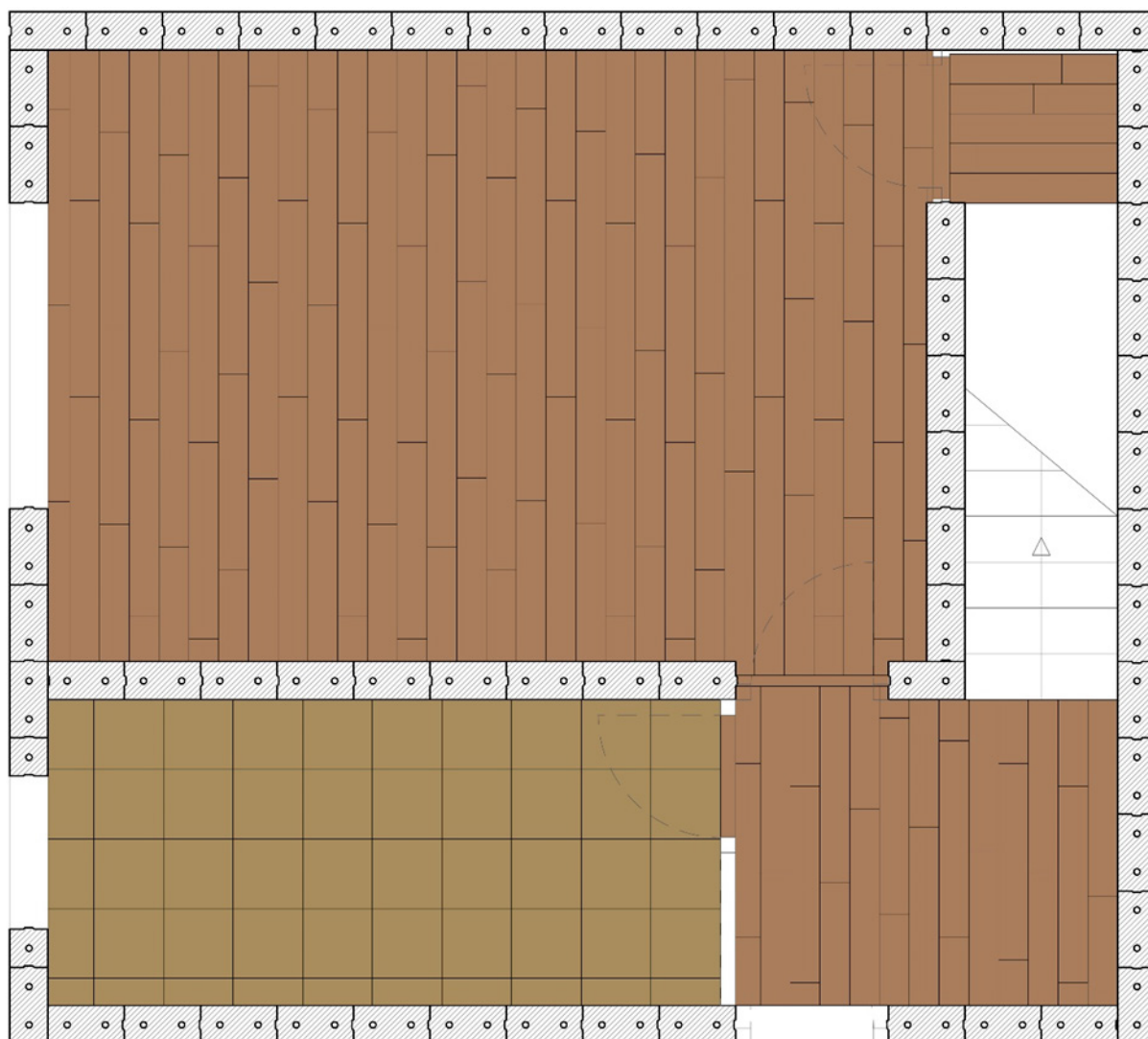


Bild 89 Fußbodenaufbau-Bodenbelag/EG

### Fußbodenaufbau-Detailplanung

Die Rohbaudecke wird aus Betonplatten ausgebildet (siehe 3.3.5). Da bei dem Material Beton relativ große Toleranzen anzunehmen sind, sollte die Fußbodenheizung auf einen ausgleichenden Untergrund verlegt werden. Passend im Sinne der Demontierbarkeit wären dafür Trockenestrichplatten (ab ca. 15 €/m<sup>2</sup>) oder Trockenschüttung (ab ca. 1,3 €/m<sup>2</sup>). Um den Punkt der Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen, wurde Trockenschüttung gewählt. Die Schüttung wird auf eine Abdeckschicht (wie zum Beispiel Rieselschutz von Fermacell) verlegt. Darauf werden die Systemplatten mit den Heizrohren verlegt. Optional kann eine Zusatzdämmung (aus Füllplatten) unter die Systemplatten eingelegt werden. Für bessere Wärmeverteilung und zusätzlichen Trittschallschutz wird auf die Platten eine Wärmeleitschicht ausgerollt. Der Laminatboden kann darauf schwimmend (trocken) verlegt werden. In der Nasszelle fungiert die Wärmeleitschicht außerdem als Wasserabdichtung (Bild 90).



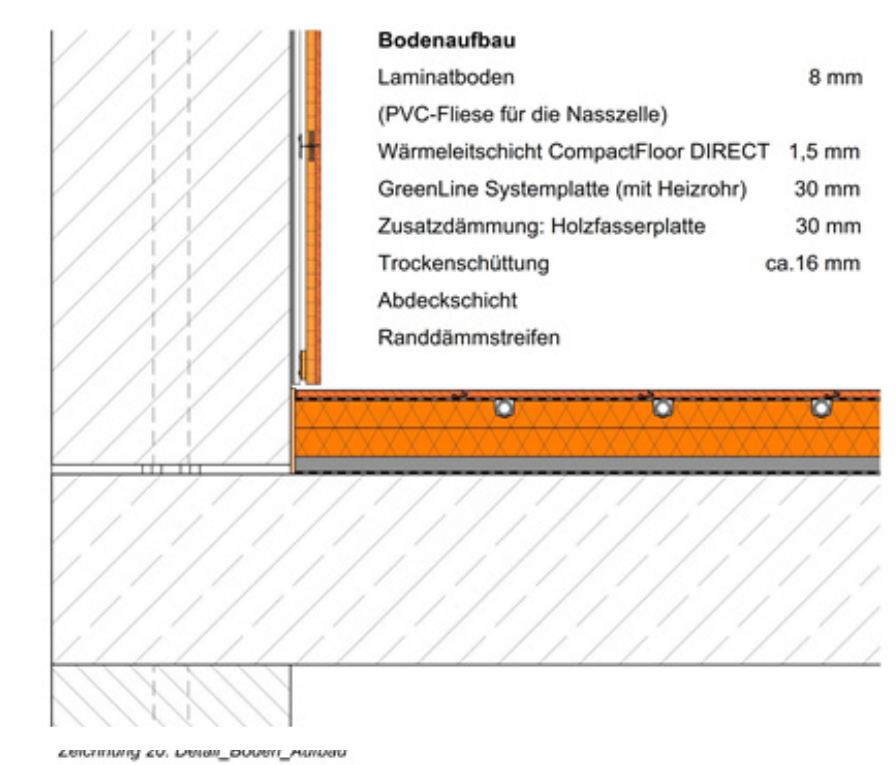


Bild 90 Fußbodenaufbau-Detail

#### 4.9.7 Fußbodenaufbau für die Variante ohne Unterkellerung

In diesem Kapitel wird ein entwickeltes System für den Fußbodenaufbau für die Variante ohne Unterkellerung vorgeschlagen. Die Herausforderungen liegen in diesem Fall dabei, bausichere Lösungen für den demontierbaren, gedämmten Fußboden unter Berücksichtigung der Fundamentstreifen und des Höhenunterschieds (30cm) zwischen der Oberkante der Fundamentstreifen und der Oberkante der Bodenplatte/Sauberkeitsschicht mit Abdichtung. Zur tragfähigen Überbrückung des Zwischenraums werden Stegträger vorgeschlagen.

Für diese Problematik wurde folgender Fußbodenaufbau gewählt (Bild 91):

- 1- Für eine tragfähige Konstruktion kommen Stegträger von Steico sowie OSB-Platten zum Einsatz. Als eine Zwischendämmung zwischen den Stegträgern werden Dämmelemente aus Holzwolle bzw. Dämmplatten aus Mineralwolle angewendet.
- 2- Für eine effektive Dämmwirkung auf der Unterkonstruktion werden trittsichere Holzfaserdämmplatten (inkl. Trittschall) vorgeschlagen.
- 3- Für den weiteren Aufbau wird das System aus Fermacell-Estrich-Verlegeplatten verwendet (trocken verlegt und nur verschraubt, nicht verklebt).
- 4- Zum Abschluss werden Infrarot E-Heizmatten IP67 (Ecofilm Set [88]) und eine PE-Folie als Trennschicht sowie Fußbodenbelag als Click-System montiert.

Der Fußbodenaufbau erfüllt die Demontierbarkeit als wesentlicher Aspekt im Rahmen der Trockenbauweise. Die Ausführung des Fußbodenaufbau ist im Kapitel 8.3 zu finden.

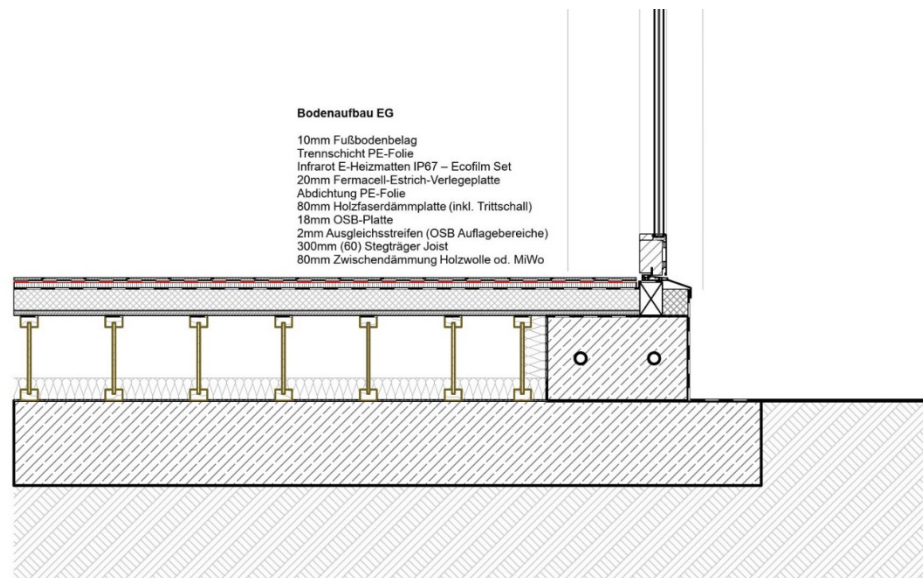


Bild 91 *Entwickeltes System für Fußbodenaufbau -Variante ohne Unterkellerung*

#### 4.9.8 Wandausbau

Die Wände werden wegen des Verzichts auf das Verbundprinzip nicht nass geputzt, sondern verkleidet. Zwei Vorsatzsysteme zum Wandausbau werden nach den Auswahlkriterien untersucht. Die konstruktive Ausführung und Details des gewählten Systems werden im Abschnitt 4.9.9 vorgestellt. Dabei wird auch auf das Thema der Elektroleitungen sowie der Steckdosen und Schalter eingegangen.

##### Vorgeschlagene Wandverkleidungssysteme

Da die wichtigsten Funktionen der TGA in die Decke und den Boden integriert werden, kann der Wandaufbau mit einer geringen Wandstärke ausgeführt werden. Um die Installationsebene für Kabel und Leitungen zu schaffen, werden für den Wandausbau Vorsatzsysteme mit einer Schienenunterkonstruktion untersucht. Im Sinne der Demontierbarkeit wurden nur Systeme mit Klick- bzw. Stecksystem (für Bekleidung) ausgewählt. Da die Wand ein Hauptelement der Innengestaltung bildet, wird daher bei der folgenden Auswahl auf die Gestaltungsvielfalt besonders geachtet. Hierfür wurden zwei Wandverkleidungssysteme vorgeschlagen. Das erste System ist von der Firma Duplex [58] (Bild 92) und das Zweite von der Firma MEISTER [59] (Bild 93).



Bild 92 Wandverkleidung Duplex



Bild 93 Wandpaneele MEISTER

Der Vergleich zwischen beiden Wandverkleidungssystemen ist nach den vorgenannten Auswahlkriterien in 4.9.3 in der Tabelle 5 dargestellt.

Auswahlkriterien	Duplex-System	MEISTER-System
Montage   Demontage	Verkleidungsplatten mit Einhängesystem; Befestigung der Unterkonstruktion durch Schraubverbindung	Wandpaneele mit Einhängesystem; Unterkonstruktion durch Schraubverbindung und Klicksystem
Raster	Individuales Raster	Lattungsprofile im Abstand $\leq 40\text{cm}$
Technische Aspekte	Feuerfest, feuchte- und schimmelresistent; widerstandsfähig	Feuerwiderstand und Feuchteresistenz abhängig von der Oberfläche; widerstandsfähig
Kosten	<i>keine genauen Angaben</i>	Kosten: ab 29,79 €/m <sup>2</sup>
Materialität	Platten aus Gipsfaser oder Faserzement; Unterkonstruktion aus Metall	Paneele aus Holz; Unterkonstruktion aus Metall
Nutzerfreundlichkeit	Vielfalt an Oberflächenmaterialien und Farben; Einfache Reinigung und Pflege	Großer Auswahl an Dekor-Oberflächen und Farben; 3D Relief möglich

Tabelle 5 Vergleich vorgeschlagener Wandverkleidungssysteme

Der ausgeführte Vergleich zeigt, dass beide Systeme die Auswahlkriterien sehr gut erfüllen. Das System von Duplex kann vom Hersteller individuell angepasst werden, was eine gewisse Flexibilität beim Entwurf ermöglicht aber dem Prinzip der Modularität des Rohbaus widerspricht. Die Kosten dieses Systems können deswegen vom Projekt zum Projekt variieren und werden höher ausfallen als beim System von MEISTER.

Dementsprechend wird das Wandverkleidungssystem vom MEISTER zum Einsatz im Musterhaus vorgeschlagen.

## Wandverkleidungssystem vom MEISTER

Mit dem speziellen Einhängesystem der Paneele ist die einfache Montage und Wiederverwendung dieses Systems gegeben. Die Toleranzen des Rohbaus können beim Verschrauben der Unterkonstruktion mit Futterplatten korrigiert werden. Die Vielfalt an den Oberflächen und Beschichtungen der Paneele ermöglicht die Nutzung in unterschiedlichen Bereichen des Baus sowie mehrere Gestaltungsmöglichkeiten, je nach Wünschen des Nutzers [59].

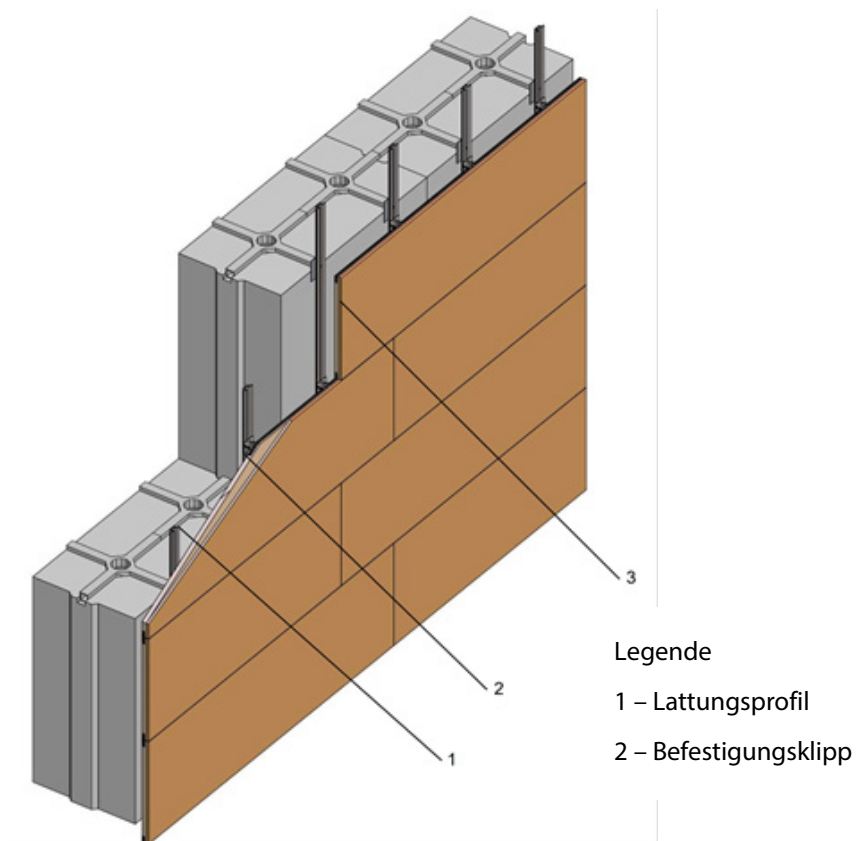


Bild 94 *Isometrie System-Wand MEISTER*

Die Bestandteile des Systems sind aus [59] [60] [61] zu entnehmen und sind im Bild 94 in einer Übersicht dargestellt:

1. MEISTER Lattungsprofil Typ 8 – Metallprofil als Unterkonstruktion zur Befestigung am Rohbau
2. MEISTER Top Befestigungsklipp – Metallklammer zur Befestigung der Wandpaneele durch Einhängen. Typ abhängig von der Paneel-Art
3. MEISTER Top Anfangs- und Endclip – Metallklammer zum Abschluss der Wandbekleidung. Typ ist von der Paneel-Art abhängig.
4. MEISTER Wandpaneele – Dekor- und Systempaneele werden mit unterschiedlichen Oberflächen und hochwertiger Optik auf einem MDF-Träger angeboten. Beide Paneel-Typen sind pflegeleicht. Die Systempaneele sind außerdem feuchtraumgeeignet und ermöglichen eine 3-D Optik durch das Doppelnutsystem.

#### 4.9.9 Wandverkleidungssystem-Ausführung

Der Wandausbau wird über dem Fußbodensystem montiert. Die Unterkonstruktion der Wandverkleidung dient außerdem als Befestigung für die Deckenunterkonstruktion (siehe Kapitel 4.9.10). Das Wandverkleidungssystem wird in der folgenden Reihenfolge ausgeführt:

- **Unterkonstruktion: Lattungsprofile**

Hierbei wird ein Plan zur Montage der Lattungsprofile am Rohbau zugrunde gelegt.

Die Lattungsprofile sollen im Folgenden für die Befestigung der Deckenunterkonstruktion benutzt werden. Die Lattungsprofile vom Hersteller MEISTER haben die Länge 2,5 m. Die Konstruktion wird 1 cm über dem Bodenaufbau montiert um eventuelle Toleranzen auszugleichen und ausreichende Hinterlüftung des Systems zu gewährleisten.

Das Bild 95 stellt die Montage der Wandunterkonstruktion optimal für Paneele mit 25 cm Breite dar.

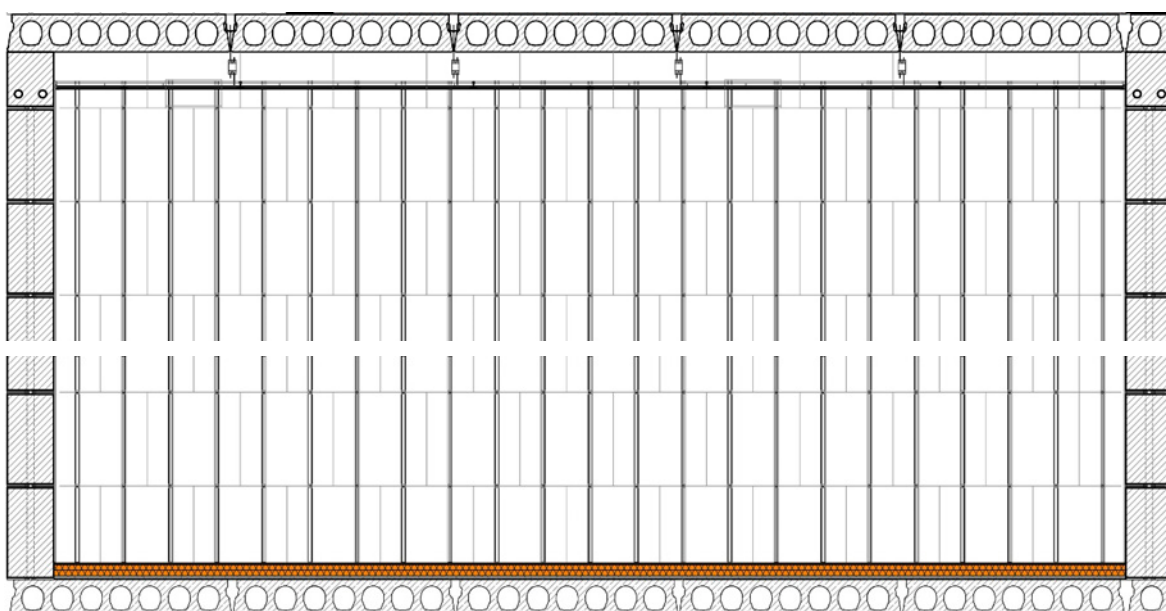


Bild 95 *Längsschnitt-Längs- Unterkonstruktion für Wandausbau mit System MEISTER*

- **Montage: Wandpaneele:**

Das Bild 96 zeigt eine Ansicht der Wandverkleidung. Für den Beispielraum Wohnzimmer wurden Echtholzpaneele in Abmessungen 128 cm x 25 cm gewählt, sodass die Fertighaushöhe mit den Paneelen ohne horizontalen Verschnitt ausgefüllt werden kann. Der Verschnitt, der durch Anpassung an die Raummaße entsteht, soll, wenn möglich, in den nächsten Schichten verbaut werden. Optisch gleichmäßiges Fugenbild ist hierbei anzustreben.

Die Entscheidung für gestalterische Eigenschaften der Paneele (wie Farbe, Länge, Breite etc.) soll dem Nutzer überlassen werden. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei dem zusätzlich entstehenden Verschnitt und/oder Modifikationen der Oberflächen die Kosten pro m<sup>2</sup> Wandfläche ansteigen können.

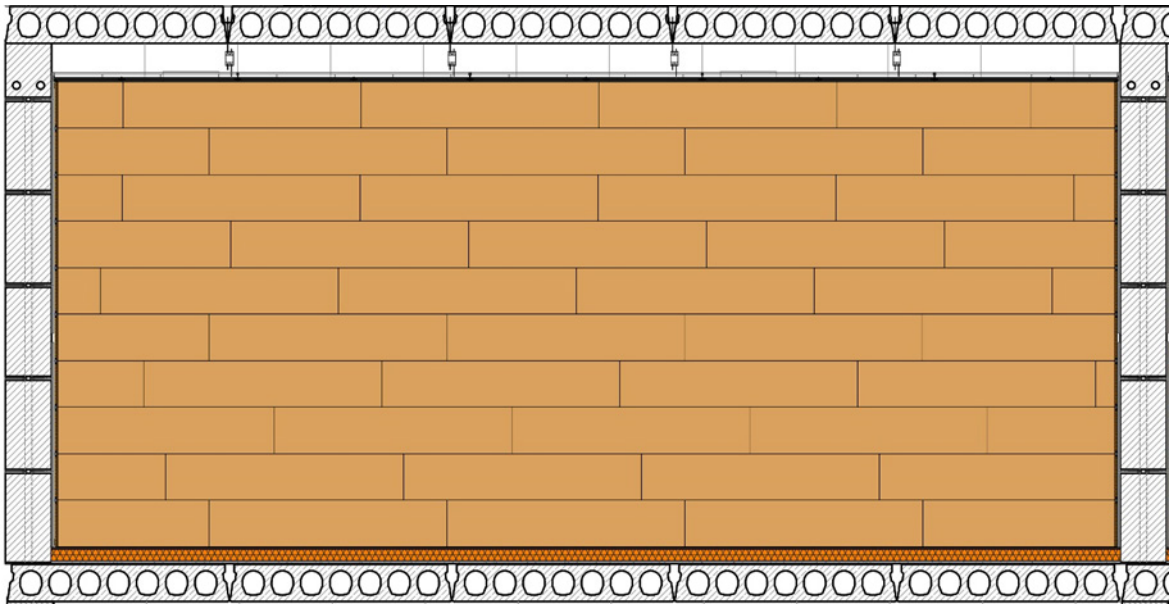


Bild 96 *Längsschnitt mit Ansicht Wandpaneele System MEISTER*

- **Montage: Nasszelle**

Die Wasserleitungen und –anschlüsse beanspruchen einen großen Teil der Installations-ebene. Da beim Experimentalbau die Küche und das Bad (Räume, die Wasseranschluss benötigen) übereinanderliegen, können die Wasserleitung konzentriert in einem bestimmten Bereich geführt werden. Die hierfür benötigte Tiefe ist bei dem gewählten Verkleidungssystem allerdings nicht gegeben. Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Konstruktion benötigt, die einen Installationsraum hinter dem eigentlichen Wandausbau schafft. Diese Konstruktion soll als einfaches Ständerwerk im Trockenbau mit den UW-Profilen ausgeführt werden. Entlang der Außenwände der Nasszelle entsteht eine Installationsebene mit der Tiefe von ca. 16 cm. Zusätzlich wird ein 25 cm tiefer Schacht geplant, wo die größeren Leitungen, vor allem WC-Entwässerung – Durchmesser 100 mm, geführt (auch gebogen) werden können. Die Länge des Schachtes kann in der Küche reduziert werden, da für die Küchenanschlüsse ein Rohr mit dem Durchmesser 50 mm ausreicht. An der Innenwand wird der Ausbau standardmäßig am Rohbau befestigt. Als Verkleidung sind die feuchtraumgeeigneten Systempaneele geplant (Bild 97).

- **Detail: Fensteröffnung**

Die Fenster sollen in der Dämmebene eingebaut werden. Für die Laibung, die im Innenraum entsteht, ist eine Verkleidung zu entwickeln. Am Fenstersturz sind keine bestehenden Befestigungsmöglichkeiten gegeben. Um irreversible Eingriffe in den Rohbau zu vermeiden, soll eine zusammenhaltende verschraubte Unterkonstruktion aus Bauholz benutzt werden. Diese wird seitlich an die Kreuzverbinder befestigt. Die Toleranzen sind mit Futterplatten zu justieren. Die Verkleidung erfolgt durch die handelsüblichen Holzpaneele oder –bretter. Die Holzelemente werden an die Unterkonstruktion sichtbar verschraubt. Der Eckstoß mit der Wandverkleidung wird mit den Winkelleisten (an die Holzelemente der Laibung verklebt) verdeckt.

Eine Verkleidung mit den Wandpaneelen des oben gewählten Systems ist möglich, bedarf allerdings einer Anpassung an die horizontalen Oberflächen. Es würde außerdem ein zusätzlicher Verschnitt entstehen.

Das folgende konstruktive Detail (Bild 98) gilt sowohl für die Ausführung eines Fensters als auch einer Balkon- oder Terrassentür.

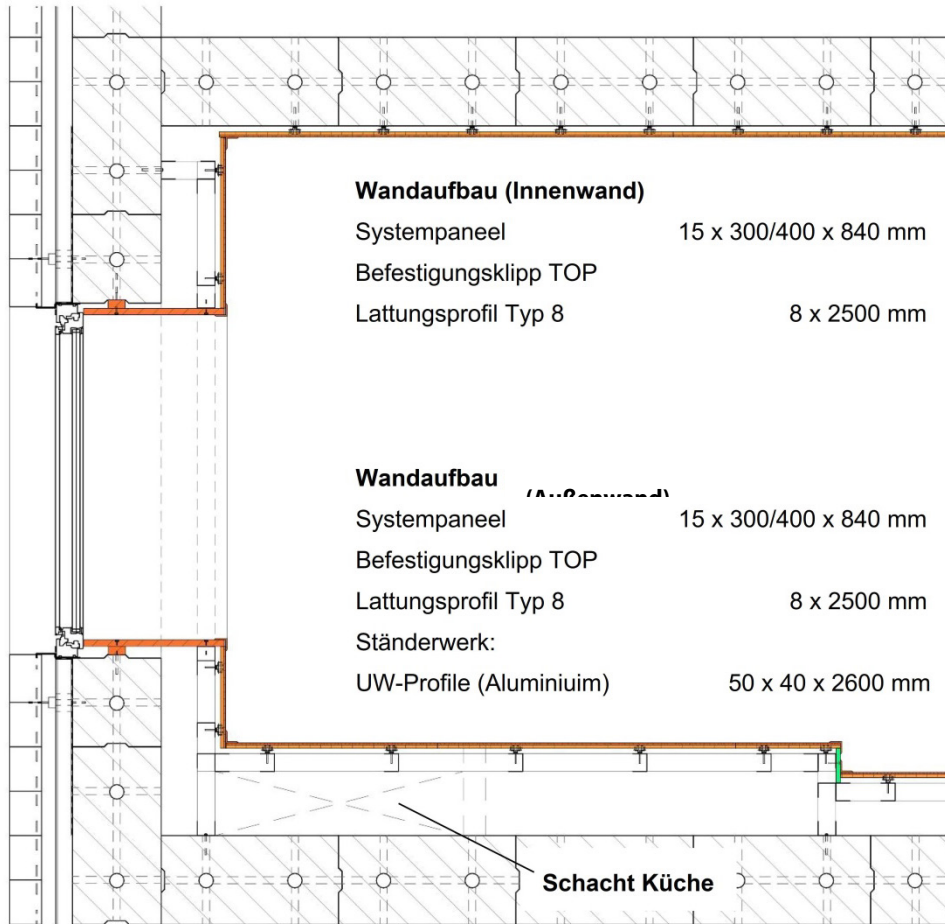


Bild 97 *Detail- Wand/Vorwand, Nasszelle*

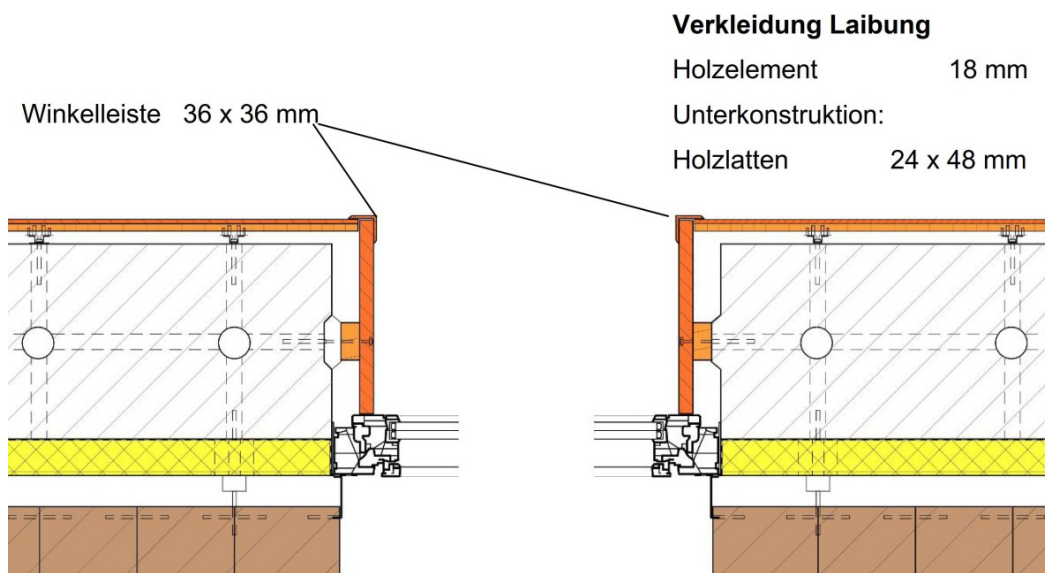


Bild 98 *Detail- Wand/Fenster*

- **Detail: Türöffnung Innen**

Für die Ausführung der Innentür wurde eine Stahlzarge gewählt. Diese Lösung bietet folgende Vorteile: rückstandslose Demontierbarkeit, leichte Pflege, Nachhaltigkeit, Montage ohne Bauschaum. Die Zarge wird mit Hilfe von Metallhalterungen in zwei Richtungen am Kreuzverbinder befestigt. Die Befestigung wird von der Wandverkleidung verdeckt. Mit Hilfe einer Winkelleiste (verklebt) bilden die Wandpaneele ein Ekelement aus. Dieses kann dann an zwei Lattungsprofilen über Eck befestigt werden. Offene Stirnseiten der Wandpaneele können mit einer Winkelleiste verdeckt werden.

Eine Verkleidung der Öffnung mit handelsüblichen Holzpaneelen oder -brettern ist ebenfalls möglich (analog zur Fensteröffnung).

Für zusätzlichen Brandschutz und/oder Stabilität ist die Ausfüllung der Zarge mit Mineralwolle möglich.

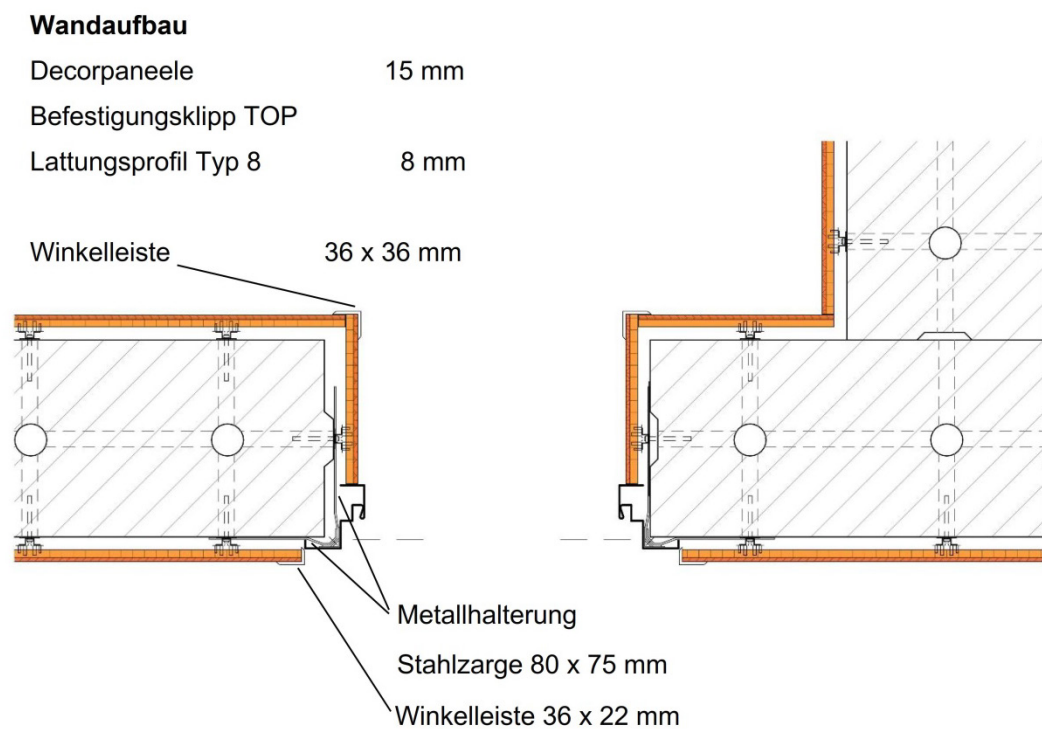


Bild 99 *Detail- Wand/Tür-Innen*

### Lösungen für Elektroleitungen

Der elektrotechnische Ausbau ist für die Wandgestaltung prägend. Steckdosen, Lichtschalter und Kabelanschlüsse haben mit deren Gestaltung sowie Einbauart große Auswirkung auf die Ansicht des fertigen Wandausbaus. Da der Rohbau nicht geschlitzt werden soll, sind die Elektroleitungen in den Wandausbau zu integrieren. Wegen der geringen Tiefe (ca. 1,5 cm) der Unterkonstruktion der Wandverkleidung ist der Einbau von einer Unterputzdose nicht möglich [62], [63].

Diesbezüglich werden zwei Möglichkeiten untersucht: Aufputzdosen und Steckdosensäulen (Bild 100 und Bild 101).



Bild 100 *Aufputzkonstruktion*Bild 101 *Steckdosensäule*

- **Aufputzdosen**

Sie stellen eine einfache Standardlösung dar. Sie werden in der Regel nachträglich auf die bestehende Wandkonstruktion angebracht. Aufputzdosen (Bild 102) sind preiswert und können an jeder Stelle des Wandausbaus angebracht werden. Allerdings wirkt der Aufbau (mindestens 3,1 cm) störend in der optischen Wahrnehmung der Wand.

Bei dieser Lösung sollte ein Wandpaneel mit den Bohrungen für die elektrischen Leitungen modifiziert werden. Das Paneel erhält hiermit eine festgelegte Nutzung und soll bei der Wiederverwendung ebenfalls zur Anbringung der elektrischen Leitungen genutzt werden (Bild 102).

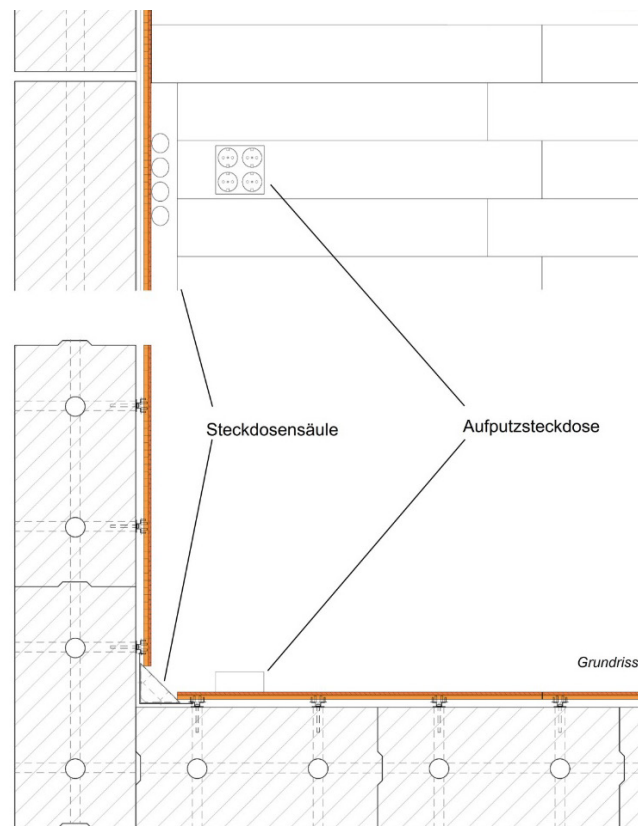
- **Steckdosensäule**

Diese Lösung bietet eine Möglichkeit die elektrischen Medien in den Wandaufbau zu integrieren. Eine Ecksäule (Abb. 10) wird in der Raumecke montiert und passt sich damit der Konstruktion an. Diese Ausführung fällt in der Gesamtgestaltung nicht auf, wirkt schlicht und optisch angenehm. Allerdings wird dabei die Platzierung der Konstruktion festgelegt. Das System ist außerdem kostenaufwendig im Vergleich zur Aufputzkonstruktion [62].

Es wird der trapezförmige Kasten an ein L-Profil befestigt. Das Profil kann entweder an die Wandunterkonstruktion oder direkt an die Kreuzverbinder verschraubt werden.

Für die optimale Verteilung und Platzierung der elektrischen Anschlüsse und Bedienelemente wäre die Ausführung mit Verwendung der beiden Systeme zu überlegen.

Mögliche Ausführung der oben genannten Systeme wird in der folgenden Zeichnung dargestellt (Bild 102).

Bild 102 *Detail- Wand/Steckdosen*

#### 4.9.10 Deckenausbau

In diesem Kapitel wird die Auswahl des Deckenverkleidungssystems erläutert. Die meisten Medien für den Versuchsbau sollten in den Deckenausbau integriert werden. Daher werden im ersten Punkt die Systeme untersucht, die einen ausreichenden Installationsraum ausbilden können. Weiterhin wird das konstruktive Raster für die Unterkonstruktion sowie Verkleidung dargestellt. Der Anschluss des gewählten Systems an die Wand wird in einem konstruktiven Detail erklärt. Im Anschluss werden die Möglichkeiten zur Beleuchtung vorgeschlagen.

#### Vorgeschlagene Deckenverkleidungssysteme

Die abgehängten Deckensysteme eignen sich am besten für die Unterbringung der TGA. Eine Alternative zur abgehängten Decke ist eine freitragende Decke, die an den Wänden befestigt wird, die aber nur bei kleinen Stützweiten Vorteile bringt.

Die Unterkonstruktion der Deckensysteme können sichtbar oder versteckt ausgeführt werden. Da dies eine direkte Auswirkung auf das optische Erscheinungsbild der Decke hat, spielt die Art der Ausführung eine wichtige Rolle für die folgende Auswahl.

Hierfür wurden zwei Systeme vorgeschlagen, die freitragende Decke von Knauf [64] (Bild 103) und das System 9b von OWA [65] (Bild 104).



Bild 103 *Freitragende Decke, Knauf* [64]

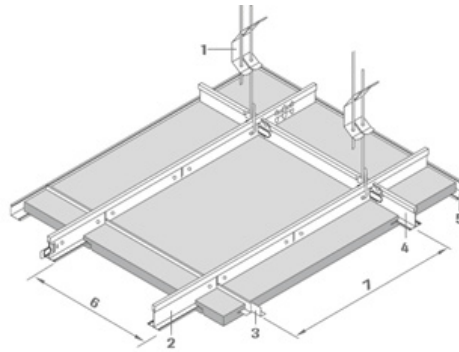


Bild 104 *System 9b von OWA* [65]

Ein Vergleich zwischen beiden Deckenverkleidungssystemen ist nach den vorgenannten Auswahlkriterien in Abschnitt 4.9.3 in der Tabelle 6 dargestellt.

Kriterien	freitragende Decke von Knauf [64]	System 9b vom OWA [65]
Montage   Demontage	Unterkonstruktion mit Schraubverbindungen; Verkleidung angeschraubt (alternativ: eingelegt) demontierbar	Abhängung über Halfen-Schienen; Unterkonstruktion mit Einhänge- und Stecksystem; Deckenplatten mit Nutsystem demontierbar
Raster	Von Raster der Rohdecke unabhängig; Im Abstand von ca. 30cm von der Decke an der Wand über angeschraubte U-Profile befestigt	Abhängung in Abstand $\leq 150\text{cm}$
Technische Aspekte	Vorteile im Hinblick auf Brand- und Schallschutz	Vorteile im Hinblick auf Brand- und Schallschutz
Kosten	ab 10 €/m <sup>2</sup>	ca. 16 €/m <sup>2</sup>
Materialität	Gipskarton- oder Akustikplatten; Unterkonstruktion aus Metall	Mineralplatten; Unterkonstruktion aus Metall
Nutzerfreundlichkeit	Standardlösung ohne Putz für Wohnräume nicht geeignet; Bei eingelegten Platten Unterkonstruktion sichtbar, wartungsfrei	Oberflächenfertig, verschiedene Oberflächenbeschichtungen und Farben möglich; Schallabsorption wartungsfrei

Tabelle 6 *Vergleich vorgeschlagener Deckenverkleidungssysteme*

Der ausgeführte Vergleich zeigt, dass das Verschrauben und Verputzen der Verkleidung bei der freitragenden Decke von Knauf nicht rückstandlos demontierbar ist. Beim Einlegen der Verkleidung bei dem System von Knauf wird die Rasterung des Ausbaus verstärkt, was sich

negativ auf der Gestaltung auswirken kann. Bei dem System 9b, OWA sind die Punkte der Demontierbarkeit und Nutzerfreundlichkeit besser erfüllt.

Diesbezüglich wurde das System 9b von OWA bevorzugt.

### Ausgewähltes Deckenverkleidungssystem 9b vom OWA

Das ausgewählte System 9b vom OWA ist nachhaltig und gut geeignet zur Wiederverwendung. Die Konstruktion funktioniert durch Steck- und Einhängerverbindungen, nur die Befestigung an den Halfen-Schienen erfolgt durch Schrauben. Die spezielle Profilierung der Plattenränder verdeckt die Unterkonstruktion und kaschiert optisch die Fugen des Deckenrasters. Die Verkleidung kann jederzeit herausgenommen werden, was die Pflege und Wartung der in der Deckenebene befindlichen Installationen vereinfacht [66].

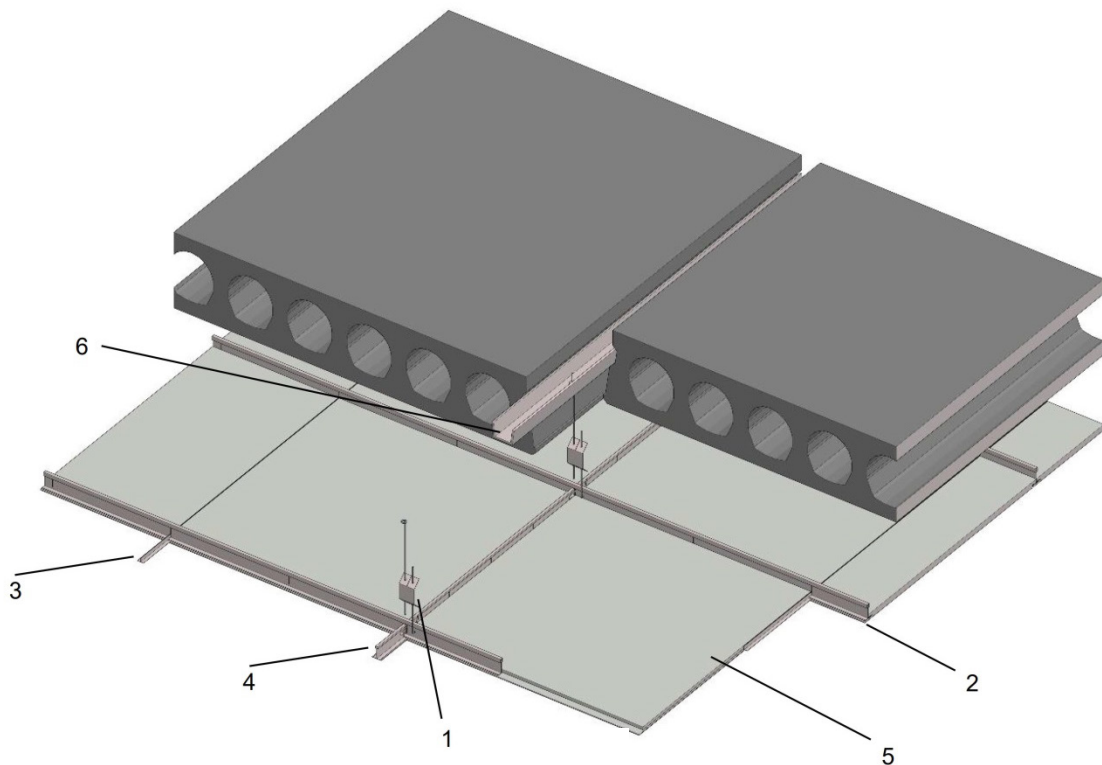


Bild 105 *Isometrie- Modifiziertes System für die abgehängte Decke*

Die Bestandteile des modifizierten Systems der abgehängten Decke sind in Bild 105 dargestellt:

1. Abhänger Nr.12/.../2 – Schnellabhängiger mit Haken zur Abhängung der Tragprofile
2. OWAconstruct Tragprofil Nr.45 – Hauptprofil der Unterkonstruktion, durchlaufend
3. OWAconstruct L-Profil Nr. 24
4. OWAconstruct Verbindungsprofil Nr.46 – in Rasterabmessung (62,5 cm), zur Verbindung der Tragprofile, mindestens je 250 cm
5. OWA Deckenplatte – Verkleidungselement – Mineraldecke.
6. Halfenschienen aus Aluminium oder verzinktem Stahl dienen zur Befestigung der Gesamtkonstruktion. Die Schienen sind zwischen den Hohldeckenbetonplatten eingelegt.
7. OWAconstruct Wandwinkel Nr. 50 G – zur Befestigung der Konstruktion an der Wand (nicht dargestellt)

## Ausführung des Deckenverkleidungssystems

Der Deckenausbau soll als letztes montiert werden. Die Befestigung erfolgt zum einen über die Halfen-Schienen in der Rohdecke und zu anderem über die Unterkonstruktion des Wandausbaus.

- **Unterkonstruktion: Trag- und Verbindungsprofile:**

Die Profile der Unterkonstruktion werden im Raster 62,5 cm x 62,5 cm montiert. Die Tragprofile werden quer zu den Betonplatten (im Plan grau gestrichelt) montiert, um die gleichmäßige Abhängung je 119,5 cm (Betonplattenbreite) zu gewährleisten. L-Profile und Verbindungsprofile werden abwechselnd parallel zu den Betonplatten im Raster montiert. Der Abstand der Verbindungsprofile ergibt somit 125 cm und erfüllt die Herstellerangaben (maximal 250 cm).

Der folgende Plan (Bild 106) ist ein Beispiel der möglichen Ausführung. Rechteckige Raster sowie quadratische Raster anderer Abmessungen sind laut Hersteller möglich.

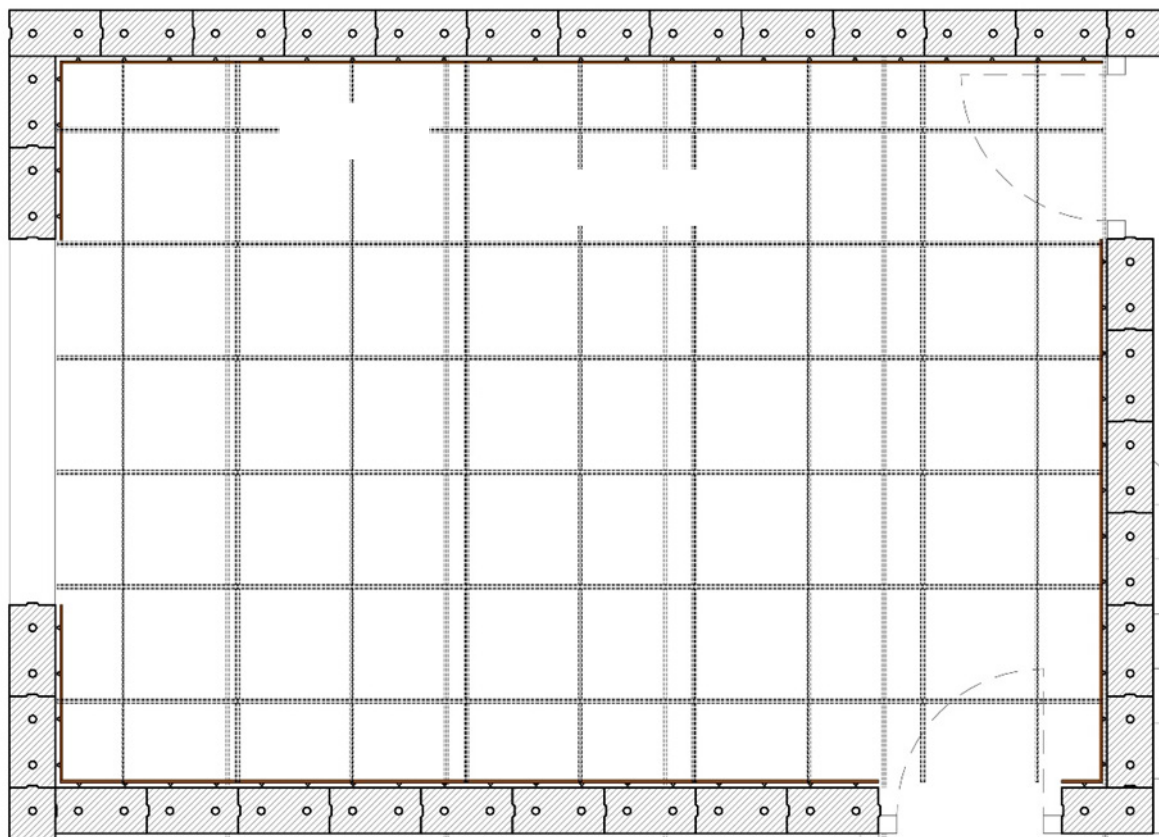


Bild 106 Grundriss im EG /Ausbau Decken-Unterkonstruktion

Eine Abstimmung zwischen Roh- und Ausbau wäre hier sinnvoll.

- **Montage der Paneele laut Paneelraster**

Die Mineralpaneele 62,5 cm x 62,5 cm werden in das Konstruktionsraster aus Trag-, Verbindungs- und L-Profilen eingehängt. Bei dem Raster wurde die Symmetrie des Fugenbildes angestrebt. Die Konstruktionskante wird hinter die Wandverkleidung geführt.

Der folgende Plan (Bild 107) stellt eine Möglichkeit der Ausführung dar. Für die verschiedenen Rasterungen der Unterkonstruktion werden entsprechende Paneele angeboten.

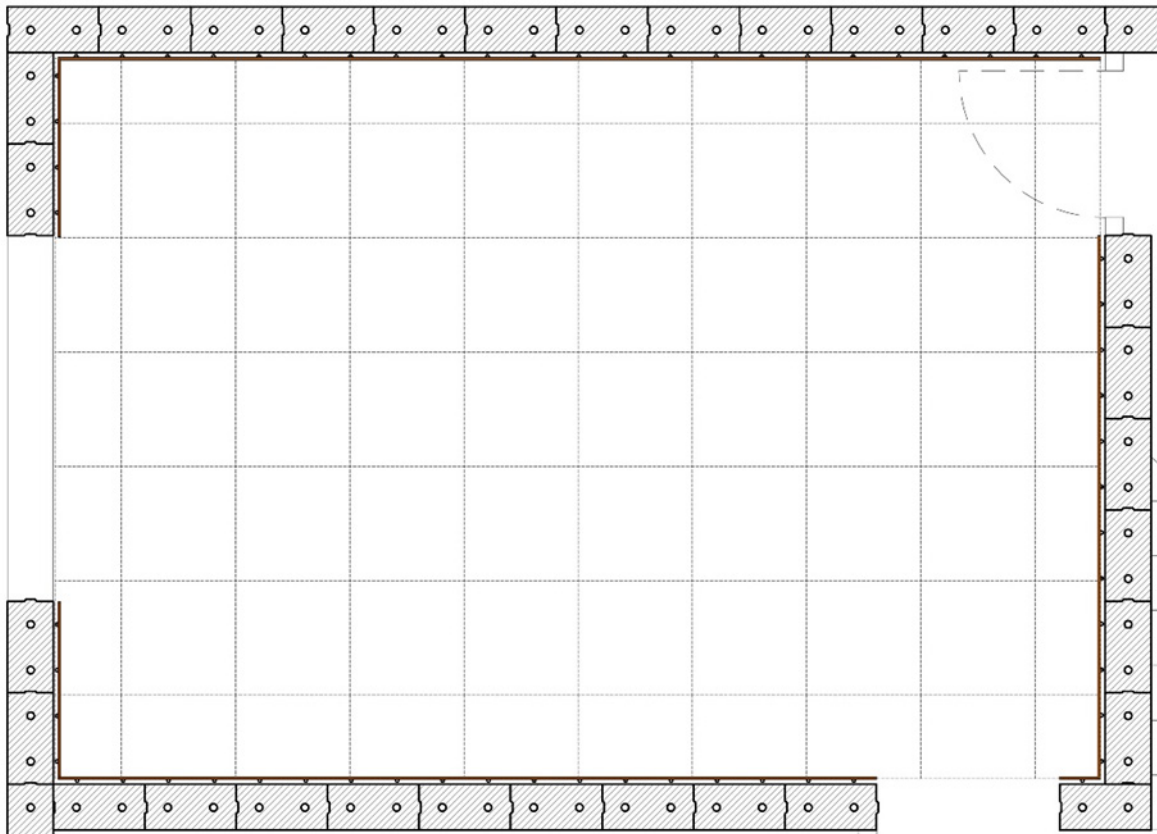
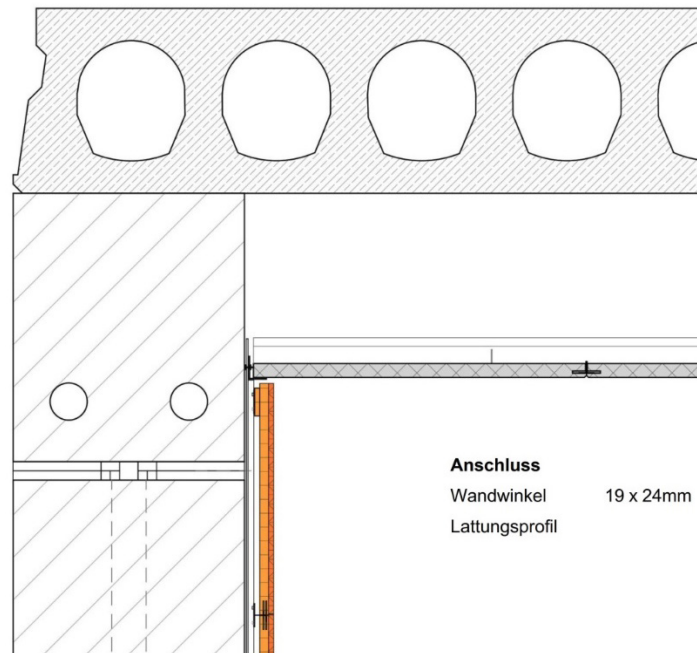


Bild 107 Grundriss im EG / Ausbau Anordnung der Decken-Paneele

- **Montage der Paneele am Wandanschluss**

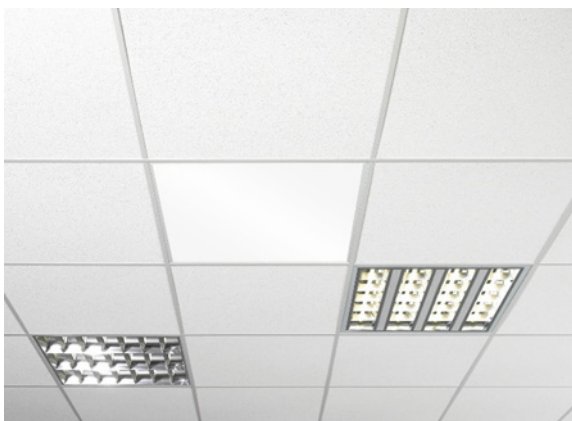
An den Rändern erfolgt die Befestigung des Deckenausbau über die Wand. Die erste Möglichkeit zur Befestigung am Rohbau ist 30 cm unter der Rohbaudecke gegeben. Damit die Tiefe der Abhängung flexibel bleiben kann, erfolgt der Anschluss an die Wandebene durch die Unterkonstruktion des Wandausbau. Das Lattungsprofil wird am oberen Ende modifiziert (seitliche Kanten ausgeschnitten) um einen besseren Anschluss zu ermöglichen. Der Wandwinkel wird 5 mm über der Wandverkleidung an die Lattungsprofile angeschraubt, um die Hinterlüftung der Wandkonstruktion nicht zu beeinträchtigen und eventuelle Toleranzen auszugleichen. Somit wird die Kante der Deckenkonstruktion hinter die Wandverkleidung geführt (Bild 108).

Bild 108 *Detail Ausbau am Decken-Wand-Anschluss*

#### 4.9.11 Beleuchtung

Eine der wichtigsten Funktionen der TGA für das Bauteil Decke ist die künstliche Beleuchtung. Im Normalfall werden die elektrischen Leitungen durch eine Bohrung aus der Decke herausgeführt, das angeschlossene Lichtelement wird an einem Hacken (in den Rohbau gebohrt) eingehängt oder direkt an die Deckenkonstruktion angeschraubt/-gebohrt. Da diese Vorgehensweise die Demontierbarkeit des Systems und des Versuchsbaus beeinträchtigt, sollten alternative Lösungen untersucht werden. Zwei Möglichkeiten werden im Weiteren vorgestellt.

Das erste System ist das Lifetime LED [67] (Bild 109) und das Zweite ist das Hängeleuchte-System [69] (Bild 110).

Bild 109 *Lifetime LED [67]*Bild 110 *Hängeleuchte-System [69]*

## OWA Lifetime LED

Lifetime LED (Bild 109) von OWA ist speziell für die OWA-Deckensysteme entwickelt worden. Das Lichtelement wird direkt in das Ausbausystem und -raster integriert und an der Unterkonstruktion befestigt. Die Montage wird dadurch vereinfacht. Die Platzierung des LEDs bleibt (innerhalb des Rasters) flexibel. Die Konstruktion des Deckenausbaus bleibt nicht angetastet, die Unterkonstruktion ist verdeckt. Hierbei wird ein energieeffizientes Leuchtmittel verwendet [68].

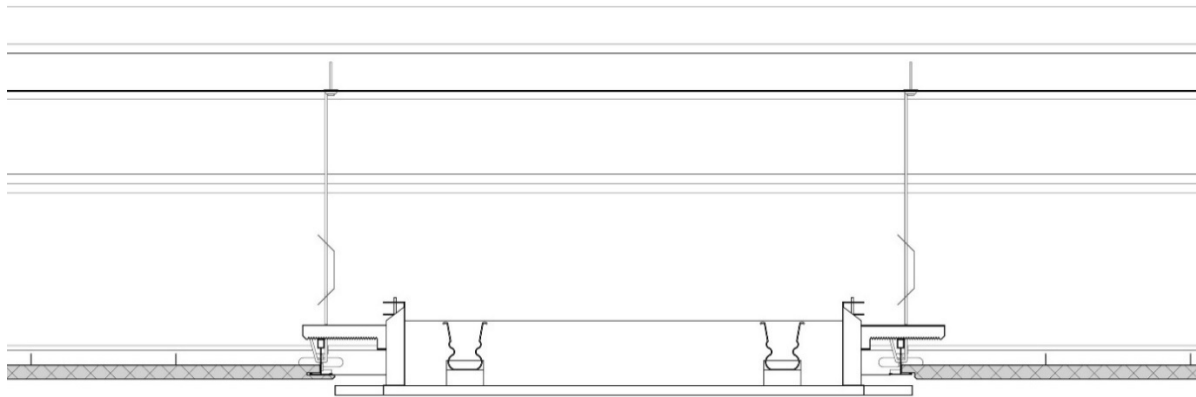


Bild 111 *Detail –Deckenbeleuchtung-Lifetime*

## Hängeleuchte-System

Statt Anbohren/Verschraubung an den Rohbau oder Ausbau bietet sich für die Hängeleuchten eine Befestigung an der Halfen-Schiene an. Dies schränkt allerdings die Möglichkeiten der Platzierung der Leuchte ein. Um den Ausbau der Decke intakt zu lassen, kann eine Hängeleuchte (Bild 110) innerhalb eines leeren Rasterfelds (Bild 112) abgehängt werden. Dabei sind größere Abmessungen des Lichtelements von Vorteil, um die Unterkonstruktion sowie den Installationsraum zu verdecken. Diese Lösung bietet dem Nutzer eine gestalterische Auswahl an, ist allerdings sehr kostenintensiv im Vergleich zu Lifetime LED.

Kleinere Abmessungen des Lichtelements wären möglich, wenn ein Deckenpaneel speziell für die Funktion der Beleuchtung modifiziert wird. Dies bedeutet, dass ein Paneel mit einem Durchbruch versehen wird, wo die Leitungen und Befestigung der Leuchte durchgeführt werden können. Das Paneel kann bei Wiederverwendung nur für diese Funktion eingesetzt werden.

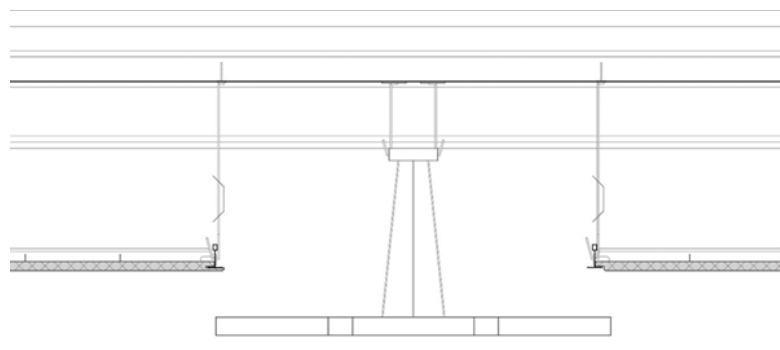


Bild 112 *Detail –Deckenbeleuchtung-Hängeleuchte-System*



#### 4.9.12 Allgemeine Kostenschätzung für den Innenausbau

In der folgenden Tabelle 7 ist eine Kostenschätzung des Innenausbaus durchgeführt

Diese Tabelle beinhaltet eine grobe Kostenschätzung des Innenausbaus für Erdgeschoss und Obergeschoss des Musterbaus. Für die Berechnungen wurde immer von dem kostengünstigsten Fall des Aufbaus ausgegangen. Die Bezugsgrößen wurden weitgehend aufgerundet, um den eventuellen Verschnitt mit zu berücksichtigen.

	Ausbaufläche	Bauelement	Bezugsgröße	Bezogene Kosten	Kosten
<b>Boden</b>	70,75 m <sup>2</sup>	Trockenschüttung (à 50 l, 16 l/m <sup>2</sup> )	1.150 l (1.132 l für 70,75 m <sup>2</sup> )	12,45 €	<u>286,35 €</u> (23 Säcke)
		Heizsystem (EG/OG gleich)	70,75 m <sup>2</sup>	75 €/m <sup>2</sup>	<u>5.306,25 €</u>
		Laminat	52,08 m <sup>2</sup>	3,99 €/m <sup>2</sup>	<u>210,67 €</u>
		PVC-Fliese	17,6 m <sup>2</sup>	40,80 €/m <sup>2</sup>	<u>718,08 €</u>
<b>Wand</b>	≈238,6 m <sup>2</sup>	Ständerwerk (Länge 2,6 m)	ca. 75 St.	3,89 €/St.	<u>291,75 €</u>
		Lattungsprofile	ca. 316 St.	3,95 €/St.	<u>1.248,20 €</u>
		Befestigungsklammern (à 50 St. für ca. 1,5 m <sup>2</sup> )	238,6 m <sup>2</sup>	8,95 € pro 1,5 m <sup>2</sup>	<u>1.423,65 €</u>
		Wandpaneele DP 250	≈178,175 m <sup>2</sup>	14,50 €/m <sup>2</sup>	<u>2.583,54 €</u>
		Wandpaneele SP 300	≈60,425 m <sup>2</sup>	27,07 €/m <sup>2</sup>	<u>1.635,70 €</u>
		Winkelleiste	ca. 20 St.	6,88 €/St.	<u>137,60 €</u>
<b>Decke</b>	≈71,41 m <sup>2</sup>	Tragprofile (Länge 3,75 m)	ca. 112,5 m (30 St.)	1,54 €/m	<u>173,25 €</u>
		Verbindungsprofile (Länge 0,625 m)	Ca. 70 m (112 St)	1,54 €/m	<u>107,80 €</u>
		Wandwinkel	ca. 88,5 m	2,33 €/m	<u>206,21 €</u>
		L-Profil	ca. 41 m	0,79 €/m	<u>38,71 €</u>
		Abhänger (à 100 St.)	ca. 63 St	69,09 € pro 100 St	<u>69,09 €</u> (ein Paket)
<b>Gesamtkosten Innenausbau:</b>					<b><u>14.499,79€</u></b>

Tabelle 7 Kostenschätzung-Innenausbau

Die Kostenschätzung wird auf die in Tabelle 7 angeführten Gewerke beschränkt.

#### 4.9.13 Prüfung der Wohnqualität

Die fertig geplanten Räume im Versuchsbau sollen auf die Wohnqualität überprüft werden. Dabei wird ein Möblierungsvorschlag mit Berücksichtigung der allgemeinen Normen des Wohnungsbaus unterbreitet [70].

Die Mindestanforderungen für Wohnen sind:

- Eingang
  - Tiefe Garderobe – 60 cm
  
- Wohnraum:
  - Esstisch für 4 Personen – min. 130 x 80 cm
  - Mindestabstand Essbereich-Wand/Couch – 30 cm
  - Tiefe Couch – ca. 85 cm
  - Tiefe Schrankwand – min 40 cm.
  - Mindestabstand Couch-Schrank – 90 cm
  
- Küche
  - Mindestabstand Küchenzeile-Wand – 120 cm
  - Tiefe Küchenzeile – 60 cm
  
- Schlafzimmer
  - Doppelbett – min. 160 x 200 cm
  - Kleiderschrank für 2 Personen – min. 60 x 220 cm
  
- Bad
  - Mindestbewegungsfläche vor den Sanitärobjekten – 75 x 75 cm
  - Mindestabstand zwischen Sanitärobjekten – 20 cm
  - WC-Anlage – ca. 40 x 60 cm
  - Handwaschbecken – min. 45 x 30 cm
  - Badewanne – min. 175 x 75 cm
  - Tiefe Waschmaschine – 60 cm
  - Hochschrank – min. 30 cm
  
- Ankleide/Abstellraum
  - Bewegungsfläche – min. 90 x 90 cm

Außerdem muss die Mindesthöhe von 2,30 m in den ausgebauten Wohnräumen eingehalten werden.

Die Folgenden Darstellungen zeigen die geplante Möblierung der Räume des Versuchsbaus.

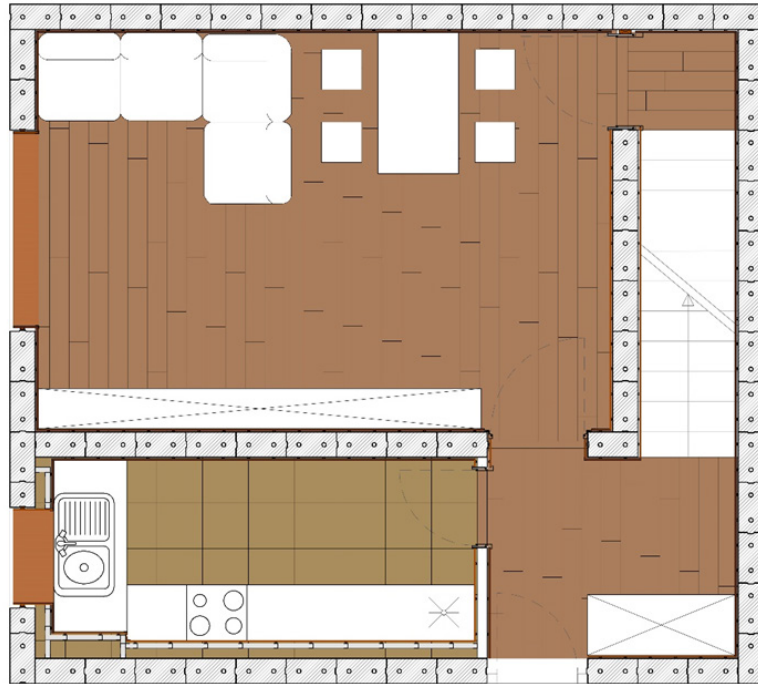


Bild 113 *Grundriss-EG-Versuchsbau- Möblierung*



Bild 114 *Grundriss-OG-Versuchsbau- Möblierung*

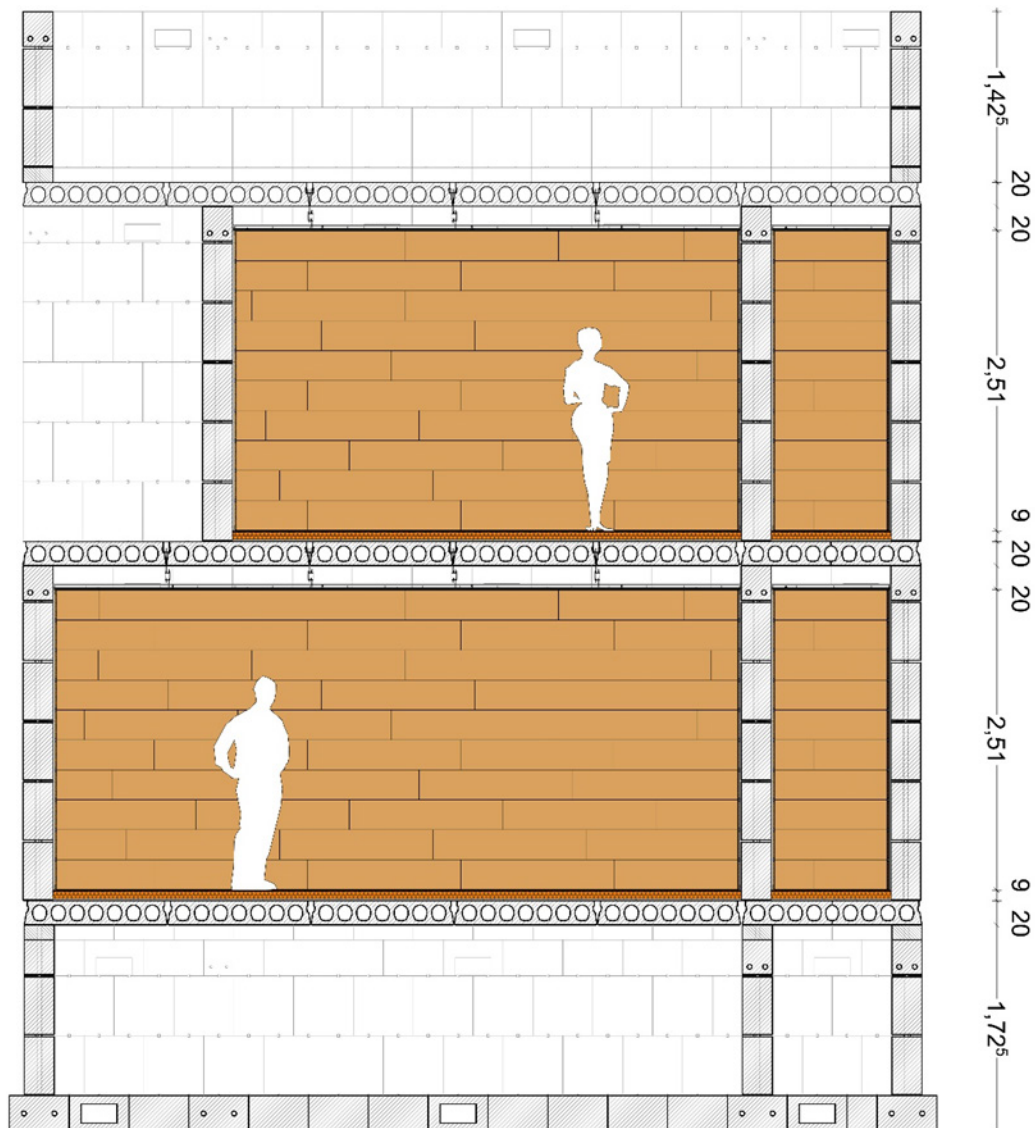


Bild 115 *Längsschnitt-Fertigmaße*

Die allgemeinen Mindestanforderungen sind bei dem geplanten Musterbau erfüllt.

Es wäre auch möglich, ein zusätzliches Fenster in der längeren Wand der Küche anzubringen, um den Raum und den Arbeits-(Koch-)bereich ausreichend mit Tageslicht zu beleuchten. Ein breiterer Raum würde die Wohnqualität der Küche ebenfalls verbessern.

Da in dem vorhandenen Entwurf keine barrierefreie Erschließung der Geschosse gegeben ist, kann der Musterbau grundsätzlich nicht barrierefrei gestaltet werden. Die Normen des barrierefreien Baus wurden aus diesem Grund nicht weiter überprüft. Für die Barrierefreiheit wären die Raummaße hinsichtlich der Bewegungsfreiheit mit dem Rollstuhl zu modifizieren sowie die Schwellenlosigkeit und die Erreichbarkeit der Geschosse mit dem Rollstuhl zu gewährleisten. Das sollte dann in den festgelegten Rastersprüngen erfolgen.

#### 4.9.14 Auswertung des entwickelten Innenausbau-Systems

Die Untersuchung des heutigen Marktes im Hinblick auf Baukonstruktionen des Innenausbau hat gezeigt, dass ein demontierbarer Ausbau im Allgemeinen möglich ist.

In dieser Arbeit wurden jeweils zwei Innenausbau-Systeme zum Aufbau des Bodens, Ausbau der Wand und der Decke vorgeschlagen, welche die eingesetzten Kriterien und Rahmenbedingungen beim Entwurf des Versuchsbaus am besten erfüllen und bei einer Breitenanwendung eingesetzt werden können.

Für jedes Bauteil wurde schließlich ein System ausgewählt. Alle ausgewählten Systeme sind im Allgemeinen demontierbar und ermöglichen eine sortenreine Trennung und Wiederverwendung. Durch die Nutzung der Klick-, Steck- und Einhängerverbindungen ist der Montageaufwand bei allen Systemen relativ gering. Durch den entstehenden Luftraum bei dem Decken- und Wandausbau und die zusätzliche dämmende Schicht des Bodenausbau wirken sich die Systeme positiv auf den Schall- und Wärmeschutz aus. Die einzelnen Bauelemente bestehen aus nachhaltigen Materialien, was die Wiederverwendung beziehungsweise das Recycling begünstigt. Die Verkleidungselemente werden von den Anbietern in unterschiedlichsten Ausführungen angeboten, wodurch eine relativ große Gestaltungsvielfalt geboten wird. Allerdings entsteht durch den modularen Aufbau der Systeme eine gerasterte Ansicht der Oberflächen, die Gestaltung teilweise einschränkt.

Bei der Auswahl der Systeme wurde darauf geachtet, dass kein übergroßer Kostenaufwand (siehe Kostenschätzung) entsteht. Im Vergleich zu ähnlichen Systemen, bei denen die Demontierbarkeit und sortenreine Trennung ebenfalls gegeben sind, ist die getroffene Auswahl relativ kostengünstig. Wenn man allerdings Standardlösungen zum Innenausbau betrachtet, stellt sich die Voraussetzung der rückstandslosen Demontierbarkeit als ein kostensteigernder Faktor heraus.

Auch wenn der allgemeine Aufbau der Systeme komplett nur mit löslichen Verbindungen ausgeführt werden kann, sind bei gewissen konstruktiven Punkten, wie zum Beispiel bei Ecken und Stöße an Laibungen Klebeverbindungen zur Stabilisierung des Ausbaus notwendig. Das Anschrauben im Bereich des Sturzes bei den Öffnungen ist ebenfalls nicht zu vermeiden. In der Zukunft sollten daher die Möglichkeiten einer demontierbaren Eckverbindung sowie Befestigungsmöglichkeiten am Sturz weiterverfolgt und untersucht werden.

## 5 Errichtung des Versuchsbaues

### 5.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte bzw. Bauphasen der Errichtung des Versuchsbaues auf dem Gelände der Stadtgutstraße der TU Dresden chronologisch beschrieben und dokumentiert.

Zuerst wurde der Rohbau für die halbe Unterkellerung mit dem Erdgeschoss aufgebaut. Am Ende dieser Phase wurde ein Belastungstest in situ durchgeführt. Danach erfolgte eine erste Demontage der 1 ½ Geschosse mit entsprechender Auswertung. Es wurde geprüft, inwieweit sich die Bauteile unbeschädigt bleiben und eine erneute 1:1-Verwendung machbar ist. Dazu wurde das Erdgeschoß ohne den ½ Keller wieder aufgebaut und dann der Rohbau bis zur Attika fertig gestellt. Es konnte damit die Frage, ob eine erneute Aufstellung an einem anderen Standort möglich ist, mit Ja beantwortet werden.

Im Anschluss wurden ausgewählte vorgeschlagene Ausbausysteme exemplarisch montiert. Zum Schluss erfolgte der finale Abbau des Versuchsbaus und die Auswertung der gesamten Bauablaufs.

### 5.2 Herstellung der Rohbauteile

#### 5.2.1 Herstellung der Fundamentsteine und Ringankersteine

Die für den Rohbau benötigten Fundamentsteine und Ringankersteine wurden nach den Prinzipien der entwickelten Trockenbauweise hergestellt (siehe 3.3.1 und 3.3.4). Die Betonsteine wurden im Betonwerk Heuchert produziert (Bild 116), nachdem die notwendigen Fertigteilpläne zur Produktion dieser Steine erstellt wurden.

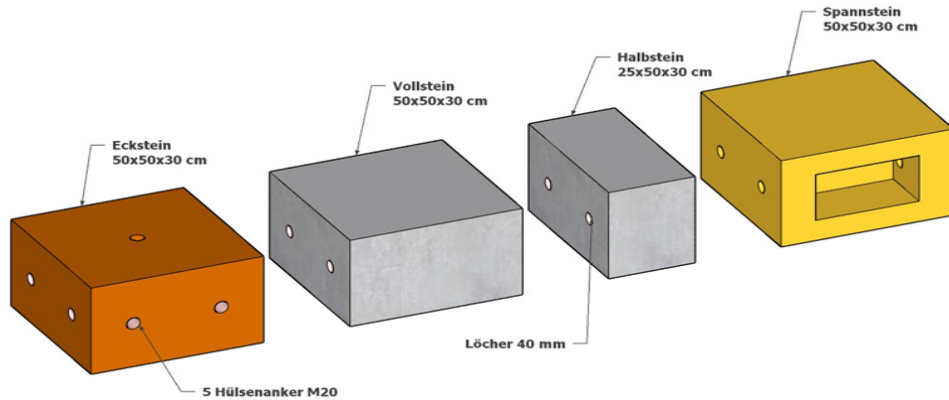


Bild 116 *Hergestellte Fundamentsteine*

Die Voll- und Halbsteine des Ringankers und der Fundamentstreifen unterliegen hauptsächlich der Druckbelastung. Daher wurden diese Steine unbewehrt aus Normalbeton C25/30 unter Beachtung der notwendigen Ausführungen hergestellt. Dies hat zur Folge, dass die Betonsteine in Anlehnung an [3] vollständig rezyklierbar sind. Aufgrund der auftretenden Zugspannungen bei den Ecksteinen und der besonderen Geometrie der Spannsteine wurden diese Steine bewehrt aus Beton C25/30 produziert.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung aller benötigten Betonsteine aus Recyclingbeton laut der in [3] entwickelten Beton-Rezepturen ist aus technischer Sicht realisierbar und bereits bei der Errichtung der Wohneinheit im Rahmen des Forschungsvorhaben RCWE-Modul [3] bewiesen worden. Aufgrund des begrenzten Zeitraumes zur Errichtung des Versuchshauses im Rahmen dieser Arbeit war es allerdings nicht möglich, die Betonsteine aus Recyclingbeton herzustellen.

Die erforderlichen Mengen an Fundamentsteinen und Ringankersteinen zur Errichtung des geplanten Versuchshauses sind den Tabellen (Tabelle 8 und Tabelle 9) aufgelistet.



Position	Anzahl
Eckstein	12
Vollstein	45
Halbstein	9
Spanstein	13

Tabelle 8 Erforderliche Menge an Fundamentsteinen für das Versuchshaus

Position	Eckstein	Vollstein	Halbstein	Spanstein
<b>Keller</b>	12	45	11	13
<b>Erdgeschoss</b>	13	46	10	15
<b>Obergeschoss</b>	14	40	13	15
<b>Attika-Geschoss</b>	10	33	4	10
<b>Summe</b>	<b>49</b>	<b>164</b>	<b>38</b>	<b>53</b>

Tabelle 9 Erforderliche Menge an Ringankersteinen für das Versuchshaus

### 5.2.2 Vorfertigung der Kalksandsteine und Kreuzverbinder

Der entwickelte KS-Modulstein ist das Kernelemente der Trockenbauweise. In Verbindung mit den Kreuzverbindern werden die Wände des Versuchshauses trocken ohne den herkömmlichen

Einsatz von Mörtel aufgebaut. Da der Kalksandstein (L x B x H=50 x 25 x 50 cm) über keine Standardabmessungen bzw. Prägungen und Durchführungen verfügt (siehe 3.3.2), wird zur Serienproduktion der KS-Steine eine spezielle neu angefertigte Pressform benötigt. Aus technischer Sicht und nach Rücksprachen mit Formherstellen bzw. KS-Werken wurde bestätigt, dass der angestrebte KS-Modulstein herstellbar ist.

Aufgrund des begrenzten Zeitraums zur Aufstellung des Versuchshauses im Rahmen dieser Arbeit und ausgehend von den geringen benötigten Mengen an KS-Modulsteinen (Tabelle 10) wäre eine Umrüstung einer Produktionslinie im KS-Werk für dieses Projekt zeitaufwendig und kostenintensiv gewesen. Unter Berücksichtigung der verfügbaren Mittel im Rahmen dieser



Arbeit musste die Produktion der Modulsteine für den Experimentalbau ausgeschlossen werden.

Alternativ und anpassend zur möglichen Bauzeit wurde vorgeschlagen, die KS-Wände aus KS-Quadro mit  $b = 24$  cm herzustellen. Die Quadro-Steine wurden zur planmäßigen Trockenbauweise ausgearbeitet. Die Prägungen wurden für begrenzte Anzahl von KS-Quadro-Steine in einer Werkstatt gefräst und die Durchführungen wurden für alle KS-Quadro, welche sich entlang der Spannglieder befinden, auf der Baustelle mit der Diamantkernbohrmaschine (50 mm) gebohrt

Position	Vollstein	Halbstein	Kreuzverbinder [lfm]
Keller	315	26	190
Keller (reduziert)	185	2	75
Erdgeschoss	315	26	190
Obergeschoss	308	32	185
Attika-Geschoss	55	0	30
Summe	993(863)	84(60)	595(435)

Tabelle 10 Erforderliche Mengen an KS-Steinen und Kreuzverbindern für das Versuchshaus

Die Kreuzverbinder bilden die erforderliche Verbindung der KS-Steine in der Lagerfuge und werden trocken in die vorgefertigte Prägung der KS-Steine eingelegt. Dadurch verzahnt jeder



Kreuzverbinder zwei KS-Steine in der Höhe. Die Kreuzverbinder wurden in einer begrenzten Anzahl, passend zu den gefrästen KS-Quadro hergestellt. Die Kreuzverbinder sitzen straff, sodass keine Bewegung der Steine möglich ist.

Die Herstellung der Kreuzverbinder im Spritzguss-Verfahren ist aus zeitlichen und finanziellen Gründen nicht realisierbar gewesen. Alternativ wurde hier das 3D-Druck-Verfahren zur Herstellung der Kreuzverbinder angewendet. Die erforderliche Anzahl von Kreuzverbindern wurde im Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden durch einen 3D-Drucker und in einem Füllgrad von 15% vom Gesamtmauerwerk angefertigt.

### 5.2.3 Herstellung der Deckenplatten

Für die Anwendung im Versuchshaus fiel aus ökonomischen Gründen die Entscheidung, Spannbetondeckenplatten einzusetzen. Die Spannbetonplatten (BRESPA-Decken) wurden von DW SYSTEMBAU GMBH im Werk in Schneverdingen produziert. Hierbei wurden die notwendigen, geringfügigen Anpassungen der BRESPA-Platten für den Versuchsbau vorgenommen. Für die Deckenplatten wurde die Platte A20B (Plattenstärke 20 cm) eingesetzt (siehe Bild 117). Die Platten werden trocken (ohne Fugenverguss) verlegt und nach unten verspannt. Die notwendigen Aussparungen bzw. Sondermaße bei bestimmten Platten werden bereits werkseitig berücksichtigt, wobei die erforderlichen Durchführungen für Spannelemente nachträglich auf der Baustelle gebohrt wurden (Bild 117).



Bild 117 *Hergestellte und angepasste Deckenplatten von DW-Systembau*

Für die Gesamtdecken im Versuchshaus (KG+EG+OG) wurden 12 Standardplatten des Typs A20B in einer Länge von 6,73 m und 13 weitere Sonderplatten in verschiedenen Abmessungen produziert.

### 5.3 Errichtung der Streifenfundamente

Zum Beginn der Aufstellung des Rohbaus des Versuchshauses wurden die Streifenfundamente gemäß der entwickelten Trockenbauweise auf der bereits ausgehärteten Sauberkeitsschicht aufgebaut. Zu diesem Zweck wurde ein herkömmlicher Mauerkran benötigt (Bild 118). Die Positionen der Ecksteine wurde auf der Sauberkeitsschicht abgesetzt.



Bild 118 *Mauerkran zum Verlegen der Fundamentsteine*



Bild 119 *Verlegen der Fundamentsteine*

Der erste Eckstein wird aufgesetzt und die Spannelemente (2 Stäbe mit Durchmesser 20 mm) werden schrittweise in horizontaler Richtung eingeschraubt und bis zum nächsten Halbstein verlängert. Die Fundamentsteine wurden durch einfache Einschlagmittel an den vorgesehenen, vertikalen Hülsenschrauben (12 mm) angehoben und mit Hilfe der horizontalen Rohrdurchführungen eingefädelt. Dadurch wird der planmäßige Verlauf realisiert (Bild 120).



Bild 120 *Eckausbildung und Anschluss Innenwandfundament*



Bild 121 *Verspannen der Fundamentstreifen am Spannstein durch Spannschlösser*

Im Spannstein können die von zwei Seiten zugeleiteten Spannstäbe mittels Spannschlössern (M20, L=100 mm) miteinander verbunden und verspannt werden. Die Vorspannung wird dabei mittels Drehmomentschlüssel in den seitlichen Aussparungen realisiert und bedarf keiner maschinellen Unterstützung. Ein digitaler Drehmomentschlüssel wird für das Nachprüfen der Spannkraft im Laufe der verschiedenen Bauphasen benötigt. Das Verspannen der Fundamentstreifen wird durch Verwendung von 4 Spannschlössern in den seitlichen Aussparungen im Spannstein (jeweils 2 Spannschlösser M20 je Seite) durchgeführt. Dafür ist für jede Seite ein Linksgewindestift (L~ 100 mm) zum Verspannen der Fundamentsteine zwischen zwei Ecksteinen notwendig (Bild 121).

Die Eckausbildungen bzw. die Querverläufe der Fundamentstreifen sind durch die seitlichen Hülsenanker am Eckstein problemlos zu realisieren und mit dem gleichen Prinzip auszuführen (Bild 120).

Bei der ersten Errichtung des Rohbaus wurde ein reduziertes Kellergeschoß realisiert. Zur Abdichtung der Unterkellerung gegen seitlich eindringende und aufsteigende Feuchtigkeit wurde eine robuste Sika-Dichtungsbahn (Sikaplan, WP 1100-15HL [73]) an der straßenseitigen

Kellerfassade exemplarisch eingesetzt. Die Verlegung der Dichtungsbahn wurde in zwei Schritten durchgeführt. Der erste Teil der Abdichtungsbahn wird unter den Fundamentstreifen verlegt. Der zweite Teil unter der ersten KS Reihe der KS-Wände im Erdgeschoss (siehe 5.4) angebracht. Zur Bildung einer ausreichenden Feuchteisolierung im Kellergeschoss werden beide Teile im späteren Schritt an den Kanten verschweißt. Bezugnehmend wurde in diesem Bauabschnitt der erste Teil der Sika-Dichtungsbahn zur Darstellung der Abdichtung an der vorderen Keller-Fassade auf der Grundplatte aufgebracht (Bild 122).



Bild 122 *Verlegen der Abdichtungsfolie vor dem Verlegen der Fundamentsteine*

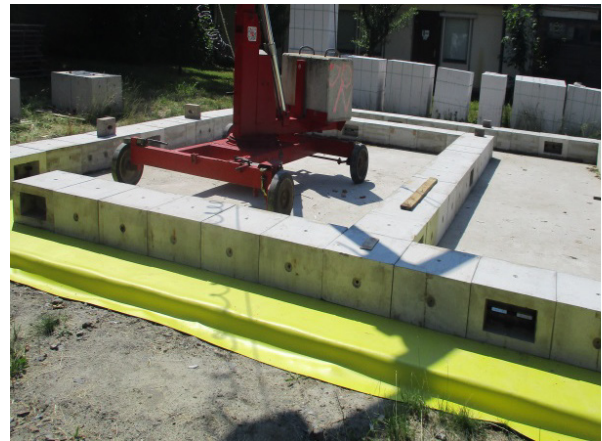


Bild 123 *Auf der Abdichtungsfolie verlegte Fundamentsteine*

Anschließend wurden die Fundamentstreifen entsprechend dem gewünschten Wandverlauf fortgesetzt (Bild 123).

Die Ausführung der Fundamentebene ist nach der entwickelten Trockenbauweise problemlos umsetzbar. Die geschätzte Arbeitsdauer für diesen Schritt betrug etwa 12 Stunden und wurde durch zwei Bauarbeiter mit Einsatz des Mauerkrans und einfacher Hebe- und Spanntechnik erledigt.

#### 5.4 Ausführung der reduzierten Unterkellerung

Die Unterkellerung wird exemplarisch als Hälfte ausgeführt, um die wichtigen Baumaßnahmen bezüglich der thermischen Entkopplung und die Abdichtung gegen Feuchtigkeit zu testen.

Für die Herstellung des Mauerwerks wurden zuerst die vertikalen Spannglieder an den Ecksteinen der Fundamentstreifen eingeschraubt. Das Aufmauern der KS-Wände der reduzierten Unterkellerung erfolgte nach den Grundsätzen der Trockenbauweise und entsprechend des Fundamentverlaufs mit Hilfe eines Mauerkrans (Bild 124).

Im nächsten Schritt wurde der Ringanker über der zweiten KS-Reihe aufgebaut. Die Montage des Ringankers erfolgt nach demselben Bauprinzip der Fundamentstreifen. Dabei wird besonders auf die Montage der Stürze geachtet. Dies erfolgte im Versuchsbau unter Einsatz von einfachen Holzstützsystemen sowie herkömmlichen Montagestützen (Bild 125).

Bild 124 *Aufmauern der KS-Wände der reduzierten Unterkellerung*Bild 125 *Montage des Ringankers für die Unterkellerung*Bild 126 *Verspannen des Ringankers am Spannstein durch Spannschlösser*

Das Verspannen des Ringankers in horizontaler Richtung wird durch Verwendung von 4 Spannschlössern M16 in den seitlichen Aussparungen des Spannsteins (jeweils 2 Spannschlösser je Seite) durchgeführt. Dafür ist für jede Seite ein Linksgewindestift (L~ 100 mm) zum Verspannen der Ringankersteine zwischen zwei Ecksteinen notwendig. Der Ringanker wird in vertikaler Richtung an den jeweiligen Ecksteinen mit den KS-Wänden durch die vertikalen Spannglieder M20 zusammengespannt (Bild 126). Die Unterkellerung im Versuchshaus wird kalt ausgeführt. Diesbezüglich erfolgt die thermische Entkopplung mittels druckfester Schaumglasstreifen, welche unter den Deckenplatten des Kellergeschosses verlegt werden. Die verlegten Schaumglasstreifen von Perinsul [74] sind druckfest und haben die Abmessungen 450x240x50 mm. Diese werden trocken entlang des Ringankers verlegt und deren Länge lässt sich mittels einer einfachen Handsäge anpassen. Die Durchlässe für die vertikalen Spannglieder (Durchmesser 30 mm) werden auf der Baustelle mittels einer herkömmlichen Bohrmaschine gebohrt (Bild 127).



Bild 127 *Thermische Entkopplung der Unterkellerung durch druckfeste Schaumglasstreifen*



Bild 128 *Montage der Deckenplatten für die Unterkellerung*

Die verwendeten Spannbetonplatten sind BRESPA-Hohldeckenplatten vom Typ A20B (Plattenstärke 20 cm) von DW-Systembau und wurden laut Verlegeplan mittels eines Autokranes trocken montiert. Die Durchlässe für vertikale Spannglieder wurden auf der Baustelle gebohrt. Nach dem Verlegen wurden die BRESPA-Deckenplatten nach unten verspannt.

Vor dem Beginn des Aufmauerns der KS-Wänden des Erdgeschosses wurde die zweite Bahn der Kellerabdichtung unter die erste KS-Reihe des EG verlegt. Dies wurde im Versuchshaus exemplarisch an der Hauptfassade ausgeführt (Bild 129). Danach wurde die erste KS-Reihe des Erdgeschosses aufgemauert und somit die Abdichtungsbahn eingeklemmt und gleichzeitig als horizontale Abdichtung verwendet.

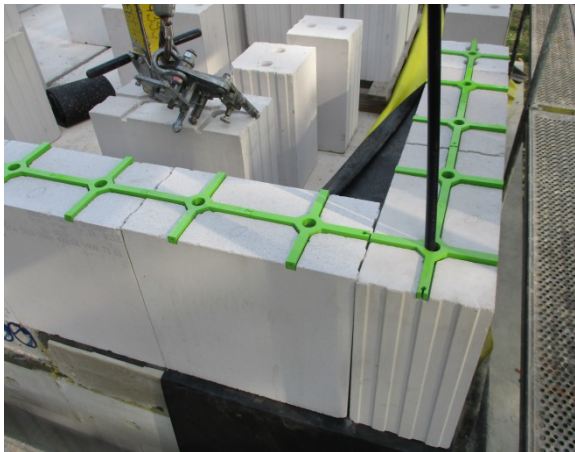


Bild 129 *Aufmauern der ersten KS-Reihe des EG auf der Abdichtungsfolie*



Bild 130 *Anschweißen der oberen Abdichtungsfolie mit der unteren zur Abdichtung der Unterkellerung - ausreichende Feuchteisolierung*

Die Fertigstellung der Feuchteisolierung im Kellergeschoss wird durch das Verschweißen der beiden Abdichtungsbahnteile verwirklicht. Dazu wird das gemäß den technischen Daten der schweißbaren Abdichtungsbahn von Sika vorgesehene Heißluftschweißgerät verwendet. Beim

Schweißen wird besonders darauf geachtet, die Abdichtungsbahn um die Ecken und entlang der Außenwände sorgfältig zu überlappen, um diese problemlos anschweißen zu können.

Die gewählte Form der Ausführung der Abdichtung gegen seitlich eindringende und aufsteigende Feuchtigkeit hat sich bewährt.

Die Ausführung der Unterkellerung ist nach den Grundsätzen der Trockenbauweise problemlos umsetzbar. Die Arbeitsdauer fürs Aufmauern der aus zwei Schichten bestehenden KS-Wände betrug bei Einsatz von zwei Bauarbeitern und mittels des Mauerkranes etwa 6 Stunden (geschätzte Dauer für 5 –KS-Schichten ungefähr 15 Stunden = 30 Mannstunden) und für die Montage des Ringankers etwa 5 Stunden (10 Mannstunden). Das Verlegen der Deckenplatten über dem KG wurde durch zwei Bauarbeiter und mittels eines Autokranes in 8 Stunden (16 Mannstunden + Kran) ausgeführt. Zum Anschweißen der Sika-Abdichtungen im dargestellten Bauabschnitt wurden etwa 3 Mannstunden benötigt. Dementsprechend sind für die Gesamtabdichtung der Unterkellerung etwa 12 Mannstunden nötig. Der Zeitaufwand zur Errichtung des Rohbaus der reduzierten Unterkellerung beträgt etwa 27 Arbeitsstunden und wurde von zwei Bauarbeitern mittels vorgenannter Technik ausgeführt (54 Mannstunden). Diesbezüglich beträgt die geschätzte Dauer der Bauarbeiten zur Errichtung der vollständigen Unterkellerung etwa 45 Stunden.

## 5.5 Errichtung des Erdgeschosses

### 5.5.1 Ausgleichschichten

Vor dem Beginn des Aufbaus der EG-Wände nach der entwickelten Trockenbauweise wurden die Ebenheiten der Untergründe bzw. die Höhendifferenzen der verlegten Deckenplatten (siehe 5.4) an den Oberseiten kontrolliert. Die Höhentoleranzen der Deckenplatten von DW-System lagen laut dem Hersteller [19] bei +13 bis -10 mm. Dies hat zur Folge, dass der Verlauf der Plattenoberseiten nicht gleichmäßig ist und dadurch ein Toleranzausgleich notwendig wird.

Angepasst zu den Anforderungen der entwickelten Trockenbauweise darf die Ausgleichschicht keine Rückstände bzw. Bauabfälle bei der Demontage hinterlassen. Diesbezüglich wurde im Rahmen der Errichtung des Versuchshauses die Lösung mit einer selbstnivellierenden Ausgleichsestrichschicht verworfen, da diese beim Rückbau nur mit Kraftaufwand zu trennen ist.

Zur Anwendung gekommen sind Hartgummistreifen als Ausgleichschicht an den erforderlichen Stellen. Die Hartgummistreifen folgen dem Verlauf der KS-Wände und werden je nach vorliegender Toleranz in erforderlicher Stärke verlegt (Bild 131).



Bild 131 *Ausgleichschicht aus Hartgummiplatten bzw. -streifen in verschiedenen Stärken*

Die Anwendung von Hartgummistreifen stellt die schnellste bzw. geeignetste Lösung dar. Diese Lösung bietet im Vergleich zur Anwendung vom Ausgleichmörtel mehr Flexibilität, indem die Mauerarbeiten ohne Zeiteinschränkungen fortgesetzt werden können. Die geschätzte Arbeitszeit zum Verlegen der Gummistreifen beträgt pro Etage etwa 2 Mannstunden. Diese Lösung kam für die Errichtung des Versuchshauses ebenso zur Anwendung wie bei dem späteren Wiederaufbau.

### 5.5.2 Aufmauern der EG-Wände unter Anwendung der Kreuzverbinder

Nach dem Verlegen des Toleranzausgleichs wurden die Mauerarbeiten mit dem Mauerkran fortgesetzt. Als Erstens waren die vertikalen Spannglieder M20 über passende Muffen M20 zu verlängern. Danach wurden zuerst die Steine mit durchgehenden vertikalen Kanälen an den Hausecken versetzt. Mit dem Mauerkran werden je 2 Vollsteine (KS-24 cm) gehoben. Beim Absetzen der KS-Steine werden diese über die vertikalen Kanäle in den Steinen auf die Spannstäbe aufgefädelt (Bild 132).



Bild 132 *Einfädeln der Spannstäbe in die Kanäle der KS-Steine*



Bild 133 *Anwendung von Mauerschnur und Gummihammer*

Die KS-Schichten wurden nach dem entworfenen Grundriss an ihren richtigen Positionen weiterverlegt. Beim Aufmauern wurde das übliche Handwerkszeug wie Mauerschnur zur Kontrolle der Flucht und der Höhe des Schichtverlaufs und Gummihammer zur Positionskorrektur der KS-Steine angewendet (Bild 133).

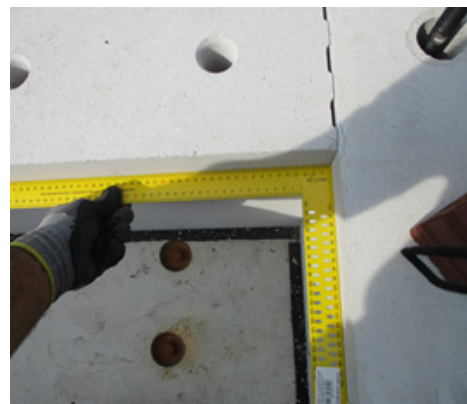


Bild 134 *Anwendung von Wasserwaage und Rechtwinkel zur Vermeidung einer Schiefstellung der KS-Wände im EG*

Die gemauerten KS-Steine werden zur Vermeidung einer möglichen Schiefstellung durch Anwendung von Wasserwaage und Winkel stets in ihrer Lage kontrolliert (Bild 134). Mittels eines Winkels werden die gemauerten Steine an den Ecken geprüft.

Einen wesentlichen Abschnitt bei den Mauerarbeiten im Erdgeschoss bildet das Verbauen der gefrästen KS-Modulsteine unter Anwendung der entwickelten Kreuzverbinder. Hierbei wird das Hauptprinzip der innovativen Trockenbauweise praktisch umgesetzt und dargestellt. Die gefrästen KS-Modulsteine werden an der Süd-Osten-Ecke des Versuchshauses (1m x 1m) aufgemauert. Nach dem Verlegen der ersten KS-Reihe werden die angefertigten einzelnen Kreuzverbinder in die gefrästen Aussparungen eingesetzt und miteinander durch das Klick-System verbunden. Dieser Prozess ist reibungslos erfolgt ( Bild 135).

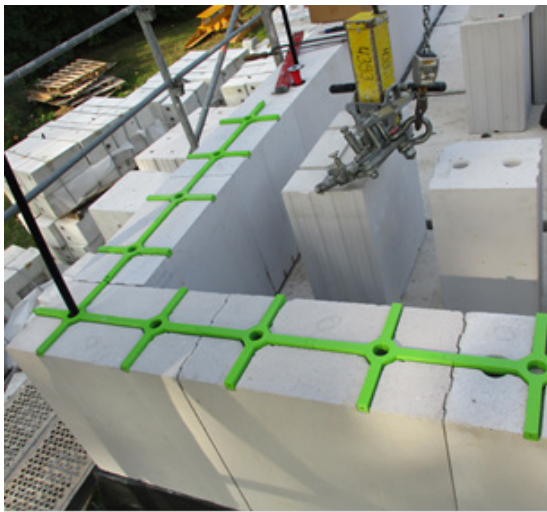


Bild 135 *Verbauen der gefrästen KS-Steine mit Anwendung der entwickelten Kreuzverbinder im EG*



Bild 136 *Fortsetzung des Aufmauerns der gefrästen KS-Steine im EG*

Beim Aufmauern der nächsten KS-Reihe wird darauf geachtet, dass die gefrästen KS-Modulsteine langsam und sorgfältig an ihren richtigen Positionen abgesetzt werden sollen. Dadurch wird eine Beschädigung an den Kunststoff-Kreuzverbindern durch die schweren KS-Steine vermieden.

Durch die vorgeplanten Maßtoleranzen zwischen Kreuzverbindern und Steinaussparungen. (Steinaussparungsbreite= Kreuzverbinderbreite + 1 mm, Steinaussparungstiefe= Kreuzverbinderhöhe + 1 mm) erfolgt das Verlegen der gefrästen KS-Modulsteine über die Kreuzverbinder beschädigungsfrei (Bild 136).

Die nächste Reihe von Kreuzverbinder wird mit der gleichen Bauweise verlegt. Nach Verlängern der Spannglieder wird die nächste Reihe von Modulsteinen sorgfältig aufgemauert. Dabei wird es beim Aufmauern der Eck-Modulsteine besonders auf das Einfädeln der Spannglieder M20 sowie das gleichzeitige Absetzen geachtet (Bild 135).

Die probemäßig vermauerten KS-Modulsteine mit den zugehörigen eingebauten Kreuzverbindern an der Versuchshausecke haben sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der entwickelten Trockenbauweise geliefert. Bild 137 zeigt die Anschlusspunkte an den Kreuzverbindern, welche in der späteren Bauphase für den Ausbau benötigt werden (siehe Abschnitt 8.3).





Bild 137 *Rohbauwand mit Kreuzverbindern*

Das Aufmauern der Quadro-Steine wurde bei den anderen KS-Wänden (ohne Kreuzverbinder) fortgesetzt. Nach dem Vermauern der fünften KS-Schicht waren die Mauerarbeiten im EG abgeschlossen).

Die Ausführung der KS-Wände des Erdgeschosses ist nach der entwickelten Trockenbauweise problemlos umsetzbar. Dies betrifft die entwickelten KS-Modulsteine mit den zugehörigen Kreuzverbindern sowie den restlichen vermauerten QUADRO-Steinen. Die Arbeitsdauer fürs Aufmauern der KS-Wände im EG betrug durch zwei Bauarbeiter und mittels des Mauerkranes etwa 18 Stunden (36 Mannstunden).

### 5.5.3 Montage des Ringankers im EG

Der nächste Schritt bei der Aufstellung des EG war die Montage des Ringankers. Dies erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie bei der Montage des Ringankers für der Unterkellerung (siehe 5.4). Die hergestellten Betonsteine des Ringankers wurden über der 5. Schicht der KS-Wände verlegt.

Bei der Montage wurde mit einem Eckstein begonnen. Die Ringankerbetonsteine wurden mittels Mauerkran durch Anwendung von mittig angeordneten Hülsenschrauben auf den Oberseiten versetzt. Beim Absetzen der Ecksteine werden die vertikalen Spannglieder M20 durch die vertikalen Aussparungen am Eckstein eingefädelt (Bild 138).



Bild 138 *Beginn der Montage des Ringankers im EG mit einem Eckstein - Einfädeln der Spannglieder M20 - Versetzen der Ringankersteine mittels Mauerkrans durch Anwendung der Hülsenschrauben*

Zur Fortsetzung der Ringanker-Montage werden die horizontalen Spannglieder M16 an den Ecksteinseiten eingeschraubt. Die passenden Längen der horizontalen Spannglieder sind durch die vorgesehenen Positionen der Spannsteine im Verlegplan zu bestimmen.

Danach werden die anderen Steine (Vollsteine, Halbstein & Spannsteine) laut Verlegplan durch die vorgesehenen horizontalen Aussparungen eingefädelt und an den richtigen Positionen angeordnet (Bild 139). Das Positionieren der Steine erfolgt mit Anwendung von einfachen Mauerwerkzeugen wie Gummihammer, Schnur und Wasserwaage.



Bild 139 Fortsetzung der Montage des Ringankers im EG - Einschrauben der horizontalen Spannglieder M16 - Einfädeln der Ringankersteine durch horizontal Aussparungen

Das Verspannen des Ringankers in horizontaler Richtung wird abschnittsweise durch Verwendung von 4 Spannschlössern M16 in den seitlichen Aussparungen des Spannsteins (jeweils 2 Spannschlösser je Seite) durchgeführt. Dafür ist für jede Seite ein Linksgewindestift (L~ 100 mm) zum Verspannen der Ringankersteine zwischen zwei Ecksteinen notwendig (Bild 140).



Bild 140 Vorspannung jedes Abschnitts des Ringankers im EG - Anwendung von 2 Spannschlössern M16 & Linksgewinde M16

Die Montage des Ringankers wird über Öffnungen fortgesetzt, wo entsprechende Montagehilfen in Form von Stützen notwendig sind. Hierbei werden einfache Holzstützsysteme sowie herkömmlichen Montagesstützen angewendet (Bild 141). Nach dem Verspannen der Steine über den Öffnungen können die Montagehilfssysteme entfernt werden. Der Ringanker fungiert hier gleichfalls als Sturz.



Bild 141 *Wegnahme der Montageunterstützung nach dem Vorspannen des Ringankers*

Nach Vervollständigung der Steinverlegung sowie dem Verspannen in horizontaler Richtung erfolgt das vertikale Vorspannen des Ringankers zu den vermauerten KS-Wänden. Das Ziel davon ist die Realisierung von stabilen Wandscheiben aus Ringanker und KS-Wänden. Dafür wird der Ringanker an den jeweiligen Ecksteinen mit den KS-Wänden durch die vertikalen Spannglieder M20 zusammengespant.

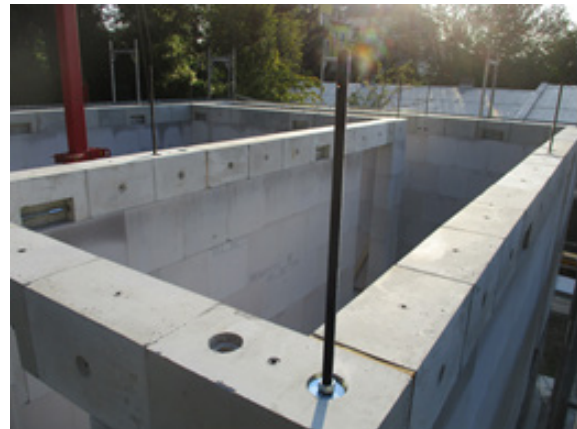


Bild 142 *Fortsetzung der Montage des Ringankers im EG in alle Richtungen laut des Positionsplans – Vervollständigen der Montage*

Die Ausführung des Ringankers im Erdgeschoss ist nach der entwickelten Trockenbauweise problemlos umsetzbar. Die dafür benötigte Arbeitsdauer betrug durch zwei Bauarbeiter und mittels des Mauerkranes etwa 10 Arbeitsstunden (20 Mannstunden).

#### 5.5.4 Montage der Deckenplatten über EG

In der nächsten Bauphase werden die Deckenplatten über Erdgeschoss trocken verlegt. Hierbei kommen die Spannbetondeckenplatten von BRESPA zum Einsatz (siehe auch 5.4).

Nach der Fertigstellung des Ringankers über EG werden elastische Gummistreifen am Lagerbereich unter den Deckenplatten verlegt. Das Ziel davon ist die bausichere Lastverteilung der einwirkenden Lasten auf die Deckenplatten sowie die Vermeidung von möglichen Abplatzungen der Ringankersteine im Auflagerbereich. Vor der Abhebung der Deckenplatten

werden die Durchlässe (empfohlener Durchmesser bis 50 mm) für die vertikalen Spannglieder M20 vor Ort mit einer geeigneten Bohrmaschine ausgeführt (Bild 143).

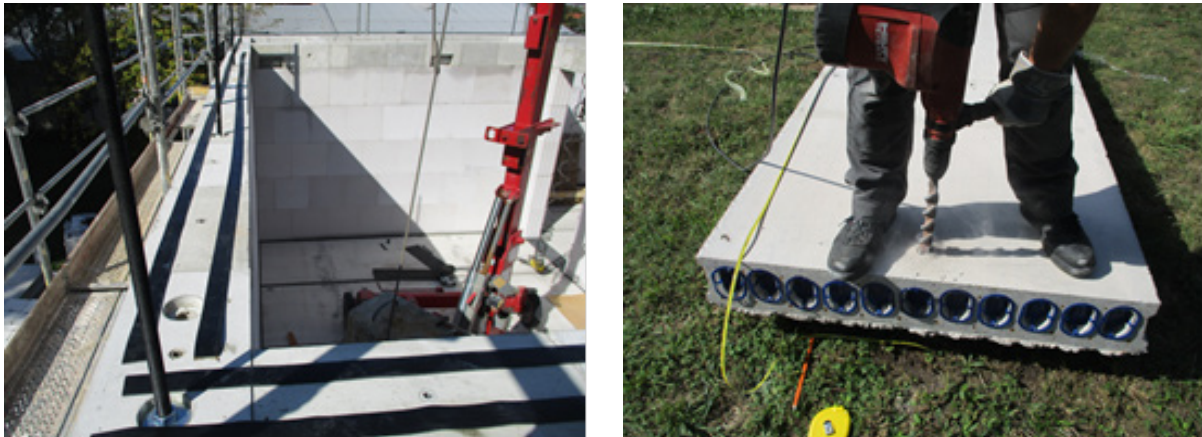


Bild 143 *Verlegung von elastischen Gummistreifen unter den Decken zur Lastverteilung – Baustellenseitiges Bohren der Deckenplatten an den Stellen der vertikalen Spannglieder laut Verlegplan*

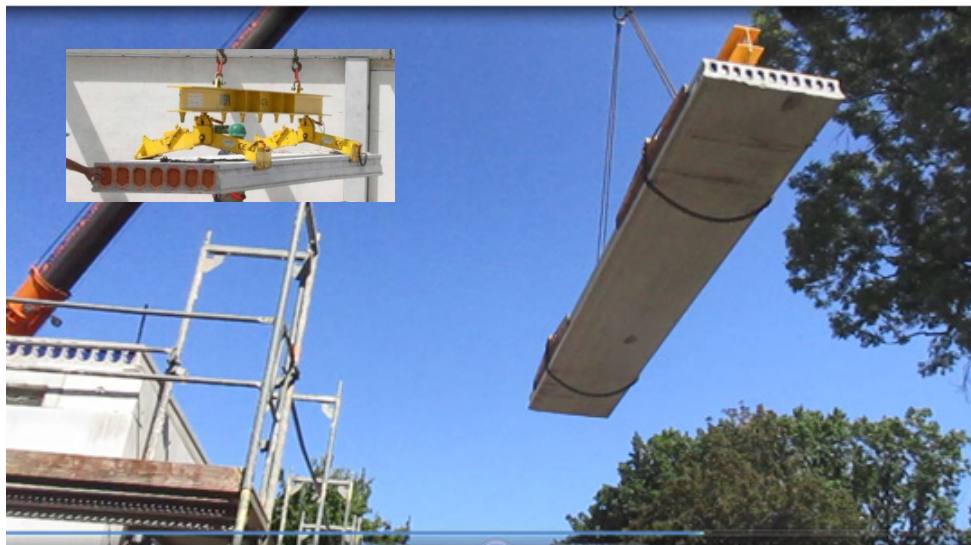


Bild 144 *Versetzung der Deckenplatten mittels Versetzzange- Verlegung der Deckenplatten über EG mittels Autokrans und Versetzzange – Anwendung der Sicherungsketten*

Zum Versetzen der Deckenplatten wird eine spezielle Versetzzange benötigt (Bild 144). Da die großen Spannbetonplatten etwa 3 Tonnen wiegen, werden die Platten mittels Autokrans gehoben. Aus Sicherheitsgründen sollen die Sicherungsketten der Versetzzange stets angelegt werden. Diese werden erst kurz vor der Plattenpositionierung ausgehangen.

Beim Absetzen der Deckenplatten an die vorgesehene Position werden die vertikalen Spannglieder gleichzeitig eingefädelt (Bild 145). Die Spannbetonplatten werden so dicht wie

möglich nebeneinander verlegt. Zur Befestigung der einzelnen Platten werden Muttergewinde M20 mit passenden Unterlegscheiben benötigt.

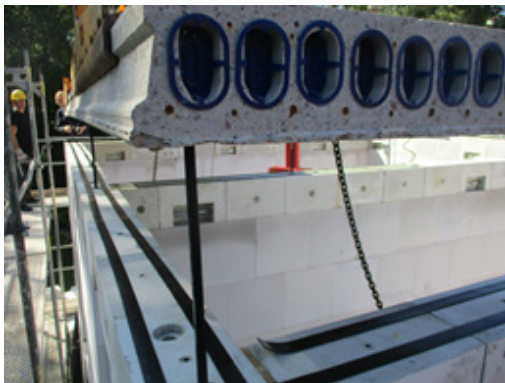


Bild 145 *Einfädeln der vertikalen Spannglieder M20 durch die Aussparungen –  
Verspannung der Deckenplatten zum Ringanker durch die vertikalen Spannglieder M20-*

Die Anwendung der Spannbetondeckenplatten (von DW-Systembau) über Erdgeschoss ist nach der entwickelten Trockenbauweise problemlos möglich (Bild 146). Die Deckenplatten wurden in diesem Bauabschnitt durch zwei Bauarbeiter und mit Hilfe eines Autokranes in etwa 5 Arbeitsstunden verlegt (10 Mannstunden).



Bild 146 *Fertigstellung der Deckenmontage über EG- Außen- und Innenansicht*

### 5.5.5 In Situ Untersuchung- Belastungstestes

Zur Prüfung der Stabilität des bereits errichteten Versuchshauses nach der entwickelten Trockenbauweise wurde planmäßig ein Belastungstest in dieser Bauphase am fertiggestellten EG-Rohbau durchgeführt. Mit dem Belastungstest wurden die herkömmlichen Geschosslasten simuliert. Die Gebrauchstauglichkeit der belasteten Bauteile sowie die Tragsicherheit der demontierbaren Verbindungen wurden durch eine 3D-Verformungsmessung (Laser-Scanning) erfasst und im Nachhinein ausgewertet.

Zur Durchführung des Belastungstestes wurden flächige Lasten auf die Deckenplatten über EG gebracht. Zu diesem Zweck wurden die vorhandenen Spannbetonplatten, welche bei der späteren Fortsetzung der Montage (siehe 6) als Deckenplatten über OG vorgesehen waren, als Lastplatten verwendet. Die aufgebrachten flächigen Lasten betragen damit etwa  $6 \text{ kN/m}^2$ . Mit dieser Last wurden die zu erwarteten Geschosslasten nach [75] als Bemessungslasten aufgebracht.

$$q_d = 4,0 \text{ kN/m}^2 * 1,35 + 3,0 \text{ kN/m}^2 * 1,5 \approx 10 \text{ kN/m}^2 = 4 \text{ kN/m}^2 + 6 \text{ kN/m}^2$$

Die Verteilung der Belastungsplatten wurde laut der Belastungsskizze umgesetzt (Bild 147).

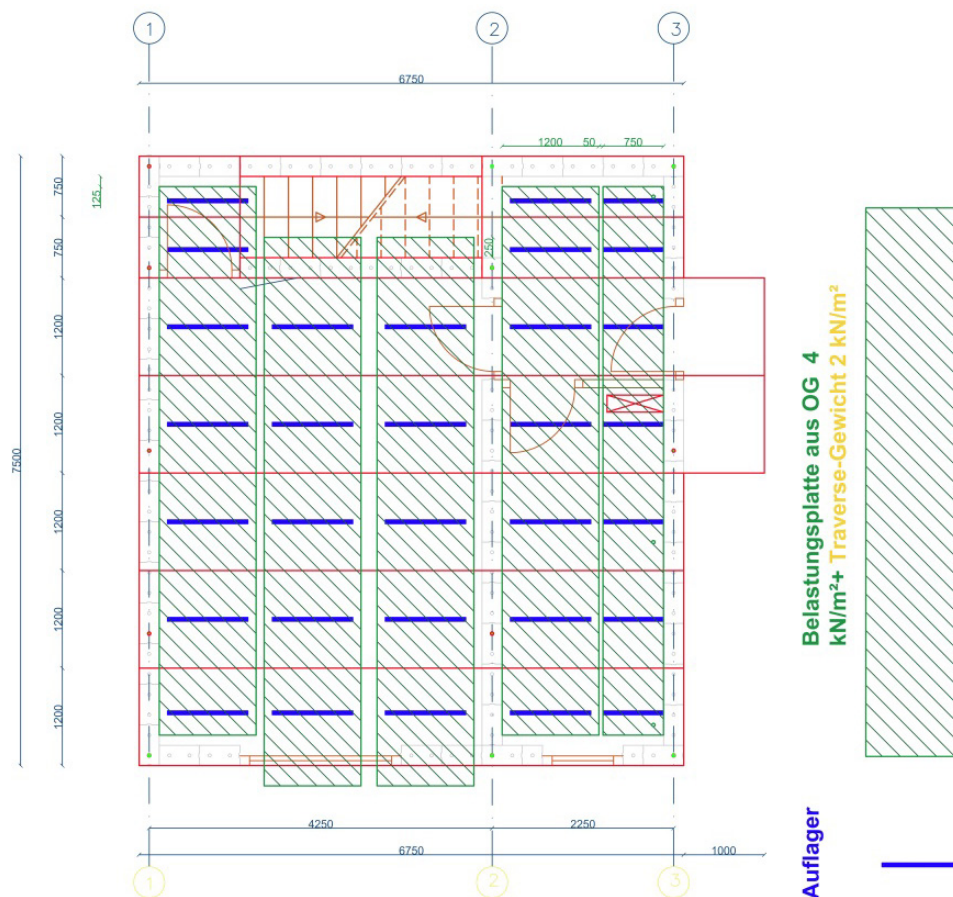


Bild 147 Belastungsskizze zur Durchführung des Belastungstestes auf EG-Rohbau

Für eine gleichmäßige Lastverteilung auf die Deckenplatten über EG wurden Auflager unter den Belastungsplatten angeordnet. Dies hat zur Folge, dass alle verlegten Deckenplatten über EG durch die Auflagerkräfte gleichmäßig belastet wurden (Bild 148).



Bild 148 *Anordnung der Auflagerpunkte zur Verteilung der Lasten*

Die Belastungsplatten werden mittels eines Autodrehkranes gehoben und auf die Deckenplatten über EG angeordnet. Dafür wurde eine spezielle Platten-Versetzzange angewendet (Bild 149).



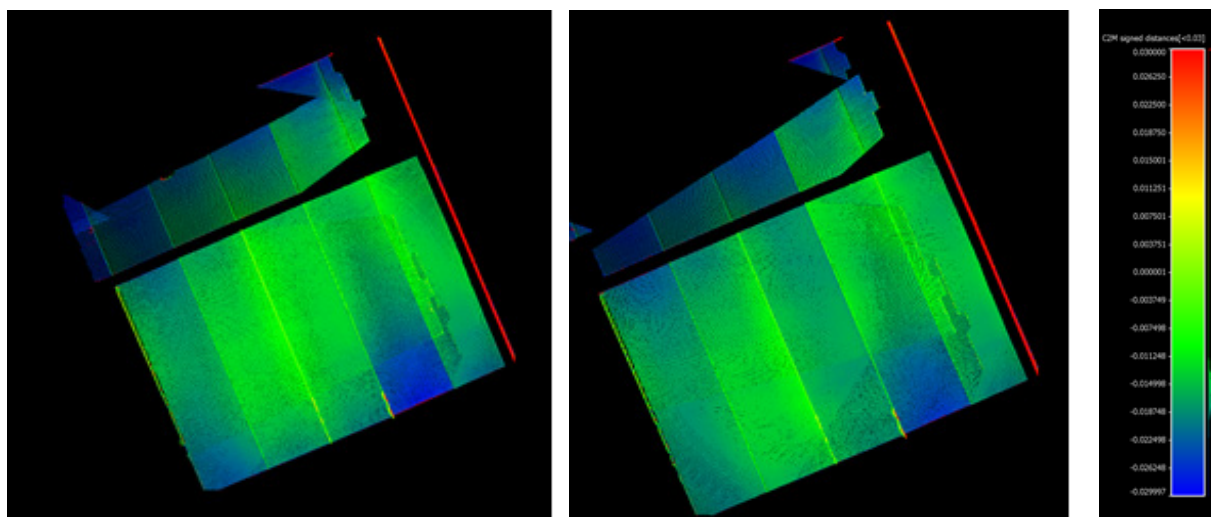
Bild 149 *Anordnung der Lastplatten laut Verlegplan*

Zur Erfassung der auftretenden Verformungen am Versuchshaus infolge des Belastungstestes wurde ein 3D-Laser-Scanner angewendet (Bild 150). Diesbezüglich wurden zwei 3D-Verformungsmessungen durchgeführt. Die erste 3D-Verformungsmessung wird unmittelbar vor der Durchführung des Belastungstestes aufgenommen. Gleich nach dem Aufsetzen der Belastungsplatten wurde das zweite Laser-Scanning durchgeführt.



Bild 150 3D-Verformungsmessung mittels Laser-Scanning vor und nach der Durchführung des Belastungstests.

Die Auswertung der gewonnenen Daten aus dem Laser-Scanning beim belasteten und unbelasteten Zustand (vor und nach der Durchführung des Belastungstestes am errichteten Versuchshaus) hat keine bedeutenden Verformungen in den Bauteilen und Verbindungspunkten sowie in den Deckenplatten über EG aufgezeigt (Bild 151). Die aufgetretenen Verformungen liegen bei weniger als 1 mm und sind deutlich unter den zugelassenen Verformungen im Stahlbetonbau. Damit ist die Stabilität des nach der Trockenbauweise errichteten Versuchshauses gegeben. Diesbezüglich eignet sich das Versuchshaus für die Übertragung der Geschosslasten als mehrgeschossiges Modell.



unbelastet

belastet

Bild 151 Auswertung der entstehenden Verformungen aus dem Belastungstests auf der Decke über EG



## 5.6 Auswertung der ersten Montage

### **Auswertung der Bauweise (Ablauf und Qualität):**

Die Ausführung der ersten Montage des Versuchshauses (Unterkellerung + Erdgeschoss) wurde nach der entwickelten Trockenbauweise problemlos, schnell und bausicher durchgeführt. Diesbezüglich wird die erste praktische Umsetzung des trockengebauten Versuchshauses auf dem Versuchsgelände der TU Dresden positiv bewertet.

Im Vergleich zu der Bauweise mit Steinvermörtelung und baustellenseitiger Betonage der Deckenplatten ist die Errichtung des Versuchshauses nach der Trockenbauweise deutlich schneller und kaum wetterabhängig. Für die gesamte Bauausführung des Rohbaus (Unterkellerung + Erdgeschoss) waren nur 77 Arbeitsstunden erforderlich, was nach der herkömmlichen Bauweise nicht realisierbar gewesen wäre.

Beim Aufbau des Rohbaus des Versuchshauses wurden keinerlei bzw. keine bedeutenden Beschädigungen an den verschiedenen Bauteilen (verschiedene Steinarten, Deckenplatten, Spannglieder etc.) sowie an deren zugehörigen Verbindungsmitteln festgestellt. Mit dem Experimentalbau sind die Ziele der komplett demontierbaren Trockenbauweise hinsichtlich des Aufbaus vollumfänglich erreicht worden.

### **Arbeitskräfte und Arbeitsmittel:**

Der erste Aufbau des Versuchshauses wurde hauptsächlich durch zwei Bauarbeiter unter Einhaltung der üblichen Bausicherungsmaßnahmen realisiert. Als wesentliche Hilfsmittel kamen ein Mauerkran zum Versetzen verschiedener Steinarten sowie ein Autodrehkran mit einer speziellen Plattenversetzange zum Einsatz. Zum Abheben der Bauteile bzw. der Steine sind Anschlagmittel wie Schlaufen und Steinzange erforderlich. Dazu kommen die herkömmlichen Handwerkzeuge (Spannschlösser, Bohrmaschinen, Kleinwerkzeug etc.).

### **Bedarf an Weiterentwicklung**

Es zeigte sich, dass trotz hoher Präzision der KS-Steine eine einfache Möglichkeit des Toleranzausgleichs gefunden werden muss, der in der Größenordnung von  $< 1$  mm liegt.

Die Fundament- und Ringankersteine erfüllten nicht die gleichen Genauigkeitsanforderungen wie die KS-Steine. Die Ursachen liegen im Formenbau und der Fertigung und müssen abgestellt werden.

Die Spannbeton-Hohldeckenplatten erfüllen ebenfalls nicht die Anforderungen an die Genauigkeit wegen der Fertigung im Spannbett. Sie sind aber ansonsten sehr effektiv.

Für eine Breitenanwendung ist eine breite Akzeptanz Voraussetzung, die statisch im Bereich der Nachweisführung der Aussteifung über Reibung zu suchen ist.

## 6 Erster Rückbau

Das Ziel des Rückbaues des bereits nach der entwickelten Trockenbauweise, errichteten Versuchshauses (Unterkellerung+ Erdgeschoss) ist die Prüfung der Demontierbarkeit des Rohbaus. Hierbei wird eine bausichere, zerstörungsfreie Demontage der verlegten Deckenplatten sowie der verspannten Ringankersteine bzw. der vermauerten KS-Steine und deren zugehörigen Kreuzverbinder erzielt.

Beim Wiederaufbau des Erdgeschosses wurde aus Gründen der Rationalisierung das ½ Kellergeschoß weggelassen.

Beim Rückbau musste die Abdichtung gegen seitlich eindringendes Wasser aufgeschnitten werden. Für eine Wiederverwendung mit Kellergeschoß bedeutet das ein Verlust an Material von etwa 5-10% dadurch, dass bei einer Wiederverwendung die Stöße überlappt und neu verschweißt werden müssen.

Bei dem ersten Durchlauf „Rückbau-Wiederaufbau“ konnten alle Ansätze der Rückbaubarkeit und Wiederverwendbarkeit bestätigt werden.

## 7 Fertigstellung des Rohbaus

Auf die Darstellung der Wiedererrichtung des Erdgeschosses ohne reduziertes Kellergeschoß wird hier verzichtet.

### 7.1 Obergeschoss

Nach der Wiedererrichtung des Erdgeschosses wurde planmäßig ein Obergeschoss aufgebaut. Das Obergeschoß wurde aus rückgebauten Bauelementen und neuen fehlenden Bauelementen aufgebaut. Die Arbeitsschritte waren analog den für das Erdgeschoß in dem Abschnitt 5.5 beschriebenen. Erfahrungen sind dabei eingeflossen. Die Produktivität konnte gesteigert werden.



Bild 152 *Fertigstellung der Mauerwände aus KS-Quadro-Steinen im OG nach der Trockenbauweise mittels Mauerkranes*



Bild 153 *Verlegen der Spannbetondeckenplatten im OG mittels Autodrehkran- Befestigung der Platten zum Ringanker und unterstehenden KS-Wänden- Bereitstellung der erforderlichen Steine für Attikageschoss*

## 7.2 Attika

Das Attikageschoss spielt für die Ausbildung des Daches und der Dachentwässerung eine wichtige Rolle.

Analog zu Abschnitt 5.5.1 wurde vor dem Beginn der Verlegung der Attikaelemente ein Toleranzausgleich mit Hartgummistreifen durchgeführt. Dabei kamen Streifen in unterschiedlicher Stärke je nach auszugleichender Toleranz zur Anwendung.

Die Attika wurde aus einer Schicht KS-Steine und einem draufliegenden Ringanker gebildet und ist thermisch vom übrigen Rohbau getrennt worden. Die thermische Trennung dient zur Vermeidung von Wärmebrücken beim Übergang zur Attika. Sie besteht aus einer 5 cm dicken Schaumglasschicht. Die Schaumglasstreifen werden an den Stellen der vertikalen Spannglieder durchgebohrt und entsprechend des Attikaverlaufs positioniert. Dieser Arbeitsgang wurde von zwei Mitarbeitern innerhalb von einer Stunde ausgeführt.



Bild 154 *Thermische Trennung durch Schaumglasstreifen*



Bild 155 *Attika aus einer Schicht KS-Quadro und einer Schicht Ringankersteine*

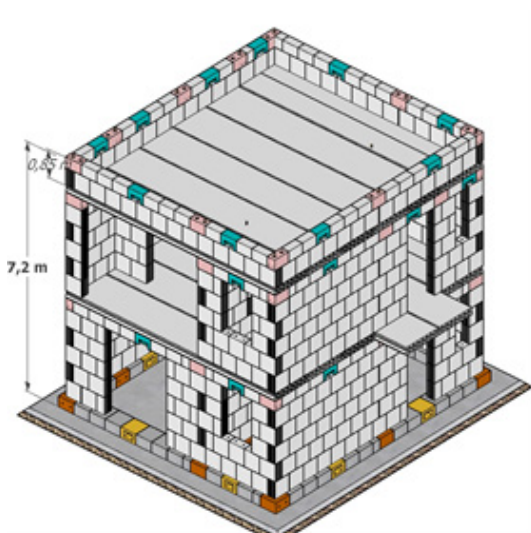


Bild 156 *Fertigstellung des Rohbaus des Versuchshauses- Isometrie links und Hauptfassade (Seite der Stadtgutstraße) rechts*



Die Ausführung des Ringankers im Attikageschosses ist nach der entwickelten Trockenbau-weise problemlos umsetzbar. Die dafür benötigte Arbeitszeit betrug für zwei Bauarbeiter 6 Arbeitsstunden einschließlich Mauerkran (12 Mannstunden).

Mit der Fertigstellung des Attikageschosses war die Errichtung des Rohbaus des zweigeschossigen Versuchshauses mit einer Gesamthöhe von 7,2 m abgeschlossen.

## 8 Montage des Ausbaues

### 8.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird der ausgeführte Ausbau des Versuchshauses dokumentiert. Der vorgeplante Ausbau bzw. Innenausbau konnte aus verschiedenen Gründen nur punktuell demonstriert und ausgeführt werden. Dies betrifft den Dach- und Attikaaufbau, den Fassadenausbau, Fußbodenaufbau und die abgehängte Decke. Hierbei spielte der eingeschränkte Zeitraum zur Errichtung des Versuchshauses im Rahmen dieser Arbeit eine entscheidende Rolle. Zusätzliche Gründe waren die Hochkonjunktur in der Bauindustrie und die „Ungewöhnlichkeit“ der auszuführenden Arbeiten, wegen der die Firmen nicht in der Lage waren, sichere Angebote abzugeben. Eine Vielzahl der Arbeiten musste von dem Forscherteam selbst ausgeführt werden.

### 8.2 Dachaufbau/Attikaaufbau

Der Dachaufbau bzw. Attikaaufbau bildet einen sehr wichtigen Ausbauteil des Versuchshauses zur Verhinderung des Eindringens der Feuchtigkeit sowie Entstehung von Wärmebrücken. I

#### 8.2.1 Vorbereitung/Verfüllung/Ausgleich/Dampfsperre

Aus bauphysikalischen Gründen ist eine Dampfsperre in dem Flachdach erforderlich. Die Ausführung einer einfachen Dampfsperre des Daches ist wegen der Schlossfugen zwischen den verlegten Deckenplatten nicht ausreichend. Grund dafür sind die entstehenden Hohlräume aufgrund der nebeneinander liegenden, trocken verlegten Deckenplatten. Diesbezüglich bildet der entstehende Konvektionsraum ein Risiko für Bauschäden. Das Deckenelementschloss kann jedoch nicht mit Mörtel verfüllt werden, da dann ein Rückbau nicht möglich ist. In diesem Sinne wurden zwei Lösungen vorgeschlagen bzw. ausgeführt:

- Verfüllen der Schlossfugen mit Kies oder körnigem Dämmmaterial (z.B. Keramsit/Blähton [82])
- Schließen der Deckenspalt mit spaltüberbrückenden Dampfsperklebeband

Beim ersten Vorschlag werden die Deckenelementfugen mit Kies (Bild 157) oder granuliertem mineralischem Dämmmaterial verfüllt. Vorher werden Folienstreifen in die Hohlräume eingelegt.



Bild 157 *Verfüllen der Deckenelementfugen mit feinem Kies (bis 8mm)*



Bild 158 *Verkleben der Spalten zwischen den Deckenelementen*

Der Hauptvorteil von dieser Lösung ist, dass eine vollständig lösbare und rückbaubare Fugenschlossdampfsperre geschaffen werden kann. Nachteil hierbei ist, dass die am Rand liegenden Restspalten besondere Sorgfalt erfordern.

Demzufolge wird beim zweiten Vorschlag eine Klebebandlösung als untere Dampfsperre gegen das Dach von Innen (Bild 158) angebracht. Der Vorteil der Klebebandlösung ist daher die Erschließung aller Restspalten, sodass das Risiko von Schäden durch Kondenswasser ausgeschlossen werden kann.

Der Nachteil ist hierbei, dass es dem eigentlichen Grundprinzip der vollständigen Trennbarkeit und Verbundlosigkeit widerspricht. Da es sich im Forschungsaufbau als günstig erwies und beim Wiederaufbau einfach wieder durch neues Klebeband überbrückt werden kann, wird dies dennoch als sichere Dampfsperrlösung empfohlen. Die restlose Entfernung des Klebebands ist möglich, aber aufwendig.

Zur Fortsetzung des Dachaufbaus wurden notwendige Wand-/Deckendurchbrüche hergestellt. Für die Dachentwässerung werden in entsprechender Höhe (über der Grunddämmung) zwei Wanddurchbrüche durch die Attikawand gebohrt (Bild 159). Ebenso wird für die Entlüftung der Sanitärinstallation ein Deckendurchbruch benötigt (Bild 160).



Bild 159 *Wanddurchbruch Attika für Dachentwässerungsanlage*



Bild 160 *Deckendurchbruch für Entlüftung Sanitärinstallation*

### 8.2.2 Ausführung der Dampfsperre

Nach der Ausführung der unteren Dampfsperre bzw. Verfüllung der Hohlräume wurde planmäßig eine Dampfsperre für den Dachaufbau verlegt. Die Dampfsperre wird auf eine Vliesbahn aufgelegt und bis auf die Attikaoberkante hochgezogen (Bild 161). Durchstoßpunkte, wie Verschraubungen, können mit dem Vlies bzw. der Dampfsperre nicht kompensiert werden. Die Verwendung einer einfachen PE-Bahn (Polyethylenfolie) ist mechanisch nur bedingt belastbar (Bild 163). Diesbezüglich wird eine FPO-Kunststoffbahn (modifiziertes Polyolefin) als Dampfsperre empfohlen, die zwischen Attikamauer (unterhalb des Attikadämmstreifens) und Deckenelemente eingespannt wird.



Bild 161 *Verlegung der Dampfsperre auf Vliesbahn mit dampfdichter Verklebung der Stöße*



Bild 162 *Beschädigung der Dampfsperre trotz darunter befindlichem Vlies*

Diese Variante konnte zu diesem Zeitpunkt nicht durchgeführt werden, weil die Attika-Aufmauerung schon fertiggestellt war. Demzufolge wurde die FPO-Kunststoffbahn als alternative Lösung bis auf der Attikaoberkante hochgeführt.

Die Dampfsperre soll daher prinzipiell vor der Attika-Aufmauerung auf die Deckenelemente verlegt werden, wobei ein Schnittstellenkonflikt zwischen Dachdecker- und Rohbauleistung entsteht, der in der Planung und Ausführung beachtet werden muss.

### 8.2.3 Ausführung der Dämmebenen

Sowohl die Grunddämmung als auch die Gefälledämmung werden nach Ausführungsbeschreibung des Herstellers fest mit dem jeweiligen Untergrund verklebt. Dies ist unter Einhaltung der Prinzipien der entwickelten Trockenbauweise nicht möglich. Demzufolge werden die Dämmplatten im Rahmen der Arbeit nur lose prass verlegt.

Durch die lose Verlegung werden Vor- und Nachteile ersichtlich.

Vorteile:

- Schnelle unkomplizierte Verlegearbeit
- Einfacher und rückstandsfreier Rückbau möglich

Nachteile:

- Die Platten unterliegen Temperaturschwankungen. Durch unterschiedliche Temperaturen an der Innen- bzw. Außenseite wölben sich die Platten leicht. Es ist aber davon auszugehen, dass bei vollständigem Dachaufbau mit kompletter Auflast die Verformungen nicht mehr auftreten. Hohe Schwankungen durch z.B. Sonneneinstrahlung sind dann nicht mehr zu erwarten.

Problempunkte und Empfehlungen:

- In diesem Fall wurde eine PU-Dämmung verwendet. Das Material bricht sehr leicht aus. Die entstehenden Spalten werden normalerweise ausgeschäumt. Das ist hier aber nicht möglich. Es muss darauf geachtet werden, dass alle auftretenden Spalten in der Grund-



und Gefälledämmung mit loser Stopfdämmung verfüllt werden. Hierbei hat sich z.B. Hanffaser sehr gut geeignet.

- Durch die Deckenelemente entstehen Höhendifferenzen, die ausgeglichen werden müssen. Die Ausgleichsschicht mit einer Vliesmatte als Grundschicht ist nicht ausreichend. Es wird hierfür eine Nivellierschicht als Grundschicht auf der vormontierten Dampfbremse benötigt. So können Höhenunterschiede zwischen den Elementen und kleineren Erhebungen wie z.B. Ankerpunkte ausgeglichen werden. Die folgenden Dämmschichten können dann plan und ohne Spiel verlegt werden. Die Nivellierschicht kann im Falle einer Trockenschüttung einfach zurückgebaut werden.

Bei der Verlegung der Dämmschichten wird zuerst mit der Grunddämmung begonnen. Die Dämmplatten der Grunddämmung werden nach Verlegplan lose verlegt (Bild 163). Demzufolge werden die Entwässerungstöpfe vor der nächsten Dämmschicht vorpositioniert (Bild 164).

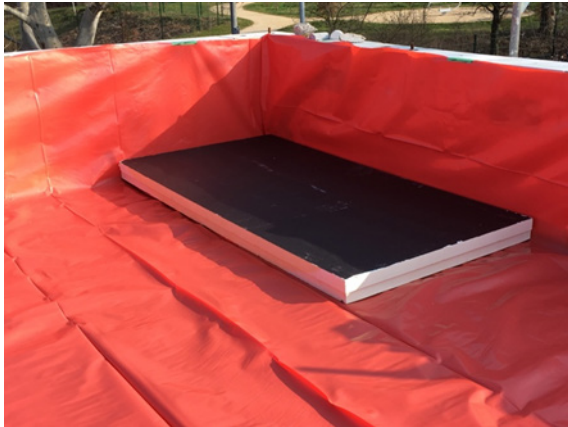


Bild 163 *Grunddämmung auf Dampfsperre-Dachaufbau*

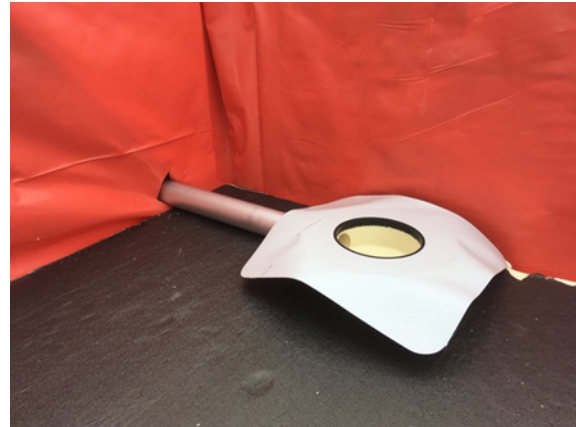


Bild 164 *Entwässerungstopf mit Kunststoffflansch auf Grunddämmung-Dachaufbau – der Durchstoßpunkt ist hier noch nicht eingeklebt*

Im nächsten Schritt wird die Gefälledämmung laut Verlegplan verlegt (Bild 165, Bild 166).

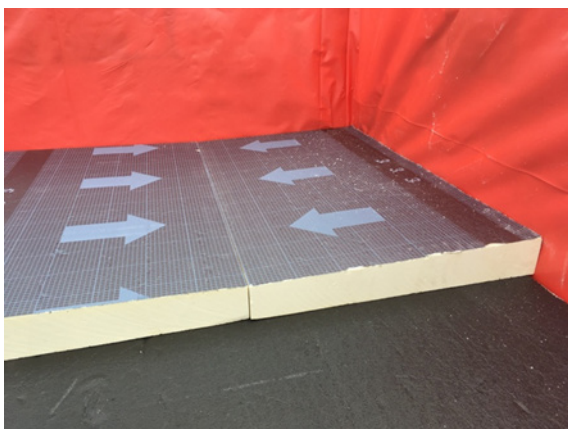


Bild 165 *Gefälledämmung auf Grunddämmung*

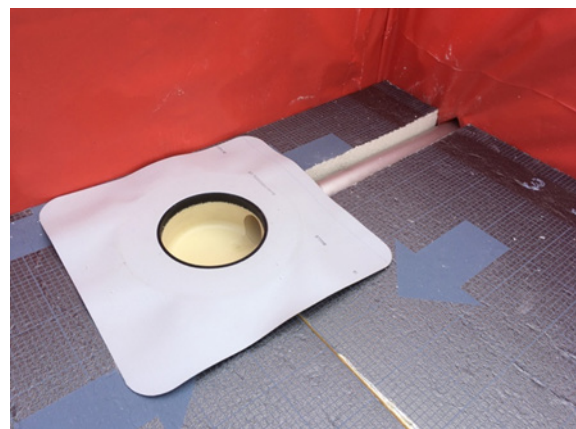


Bild 166 *Entwässerungstopf in Gefälledämmung*

Bei der Ausführung der Dämmebene sind folgende Problempunkte bzw. Empfehlungen zu nennen:

- Bei der Montage des Entwässerungstopfs hat sich gezeigt, dass der mitgelieferte Dämmkörper (H ca. 11 cm) nicht mit eingebaut werden konnte. Die Materialstärke von 8,5 cm am Tiefpunkt der Gefälledämmung war hierfür zu gering. Ein weiteres Absenken in die Grunddämmung war ohne weitere größerer Beschädigung des Dämmmaterials nicht möglich. Es ist darauf zu achten, dass der Dämmkörper für die Entwässerungstöpfe die gleiche Stärke wie das Material der Gefälledämmung am Tiefpunkt hat. Mit dem Einbau des Dämmkörpers können Wärmebrücken und Spalten, die gestopft werden müssen vermieden werden.
- Durch die Unebenheiten in der Deckenfläche sind Spalten zwischen den Dämmplatten aufgrund der losen Verlegung erkennbar (Bild 167). Diese Spalten können durch die Überlappungen nicht vollständig ausgeglichen werden. Als Lösung könnte eine Stopfdämmung verwendet werden.
- Durch die Auflast bei der Verlegung der Dachdämmung kann die Spaltbildung bedingt kompensiert werden. Die Ausgleichschüttung wäre hier eine sinnvolle Lösung.
- Durch die lose Verlegung der Gefälledämmung und die Fortpflanzung der Unebenheiten (Bild 168) aus den unteren Schichten treten mögliche Bewegungen beim Begehen auf. Dies könnte sich auf die Lebensdauer der Dämmebene ungünstig auswirken. Die Verwendung einer bereits genannten Trockenschüttung wäre hier sinnvoll.



Bild 167 *Deutliche Spaltbildung durch Unebenheiten in der Deckenoberfläche- Lösung: Stopfdämmung verwenden.*



Bild 168 *Fortpflanzung der Unebenheiten aus den unteren Schichten*

#### 8.2.4 Ausführung der Dachabdichtung

Für die Dachabdichtung wurden FPO Kunststoffbahnen von Bauder verwendet. Diese Kunststoffbahnen können mit Heißluft untereinander unkompliziert und flexibel verschweißt werden. Der große Vorteil dieser Lösung ist die Flexibilität beim Gestalten der Abdichtung. Die Dachabdichtung wird bis unter die Attika-UK gelegt, so dass diese von der UK winddicht angepresst werden kann. Im Bereich der Attika muss normalerweise nach technischer Regel ab

einer Abdichtungshöhe von 50 cm die FPO-Bahn an der Attika befestigt werden. Das ist nach den Prinzipien dieser Arbeit nicht ohne weiteres zulässig. Es wurde deshalb darauf geachtet, dass diese Höhe nicht überschritten wurde.

Die Streifen der FPO-Kunststoffbahn werden lose über die Dachdämmung verlegt und dann an den Rändern in ca. 5-10 cm Höhe für die Kehlleistenbefestigung beschnitten (Bild 169). An den Nahtstellen werden die Streifen zum Verschweißen überlappt. Die Überlappung der einzelnen Bahnen untereinander beträgt wenigstens 10 cm. Vorm Verschweißen der FPO-Streifen werden die Nahtstellen mit Reinigungsmittel gründlich gereinigt (Bild 170).



Bild 169 *Lose Verlegung der FPO-Dachbahnen*



Bild 170 *Gründliche Reinigung der zu verschweißenden Nahtstellen mit Reinigungsmittel*

Danach werden die FPO-Bahnen mit geeignetem Schweißautomat ordnungsgemäß verschweißt (Bild 171). Dabei wird es insbesondere auf die angegebene, technische Verschweißtemperatur des FPO-Materials geachtet. Die fertiggestellten, verschweißten Kunststoffbahnen werden als Schutz vorm Abheben durch Windsog provisorisch beschwert (Bild 172).



Bild 171 *Verschweißen der Bahnen mit Schweißautomat*



Bild 172 *Fertiggestellte Dachabdichtung mit provisorischer Beschwerung*

Die Dachabdichtung muss nach dem Schweißvorgang in der Kehle an der Attika gegen Verrutschen befestigt werden (Bild 173). Die Schweißschnur oberhalb der Befestigungsschiene bewirkt als „Keil“ über die Lastverteilung eine dauerhafte Fixierung der Kehle (Bild 174) und gleicht Toleranzen aus.



Bild 173 *Befestigungsschiene der Dachabdichtung in der Kehle zur Attika*

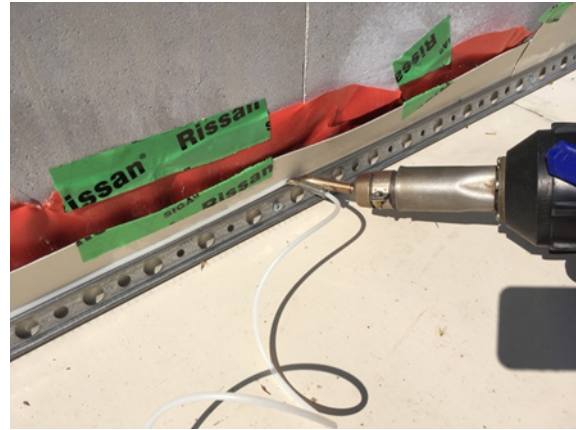


Bild 174 *Schweißschnur als Lastverteilung an der Befestigungsschiene*

Zunächst wird die Attika ebenfalls mit der Dichtbahn abgedichtet. Hierfür werden die Bahnen über die Attika gelegt und angeformt, so dass eine Überlappung von ca. 15 cm zur Dachabdichtung entsteht (Bild 175). Alle Bahnkanten müssen in den Bereichen mit einer Rolle und Heißluft gebrochen werden, so dass keine kapillaren Spalten bei der Überlappung entstehen. Die angeformten Bahnen werden manuell mit Heißluft und Rolle angeheftet (Bild 176).



Bild 175 *Bahnteilung 15 cm Überlappung-Attikaabdichtung*



Bild 176 *Bahnteilung Vorbereitung Schweißen: Ausrunden der Ecken*

Im Nachhinein werden die Bahnen an den Schweißstellen mit Reinigungsmittel gereinigt und dann mit dem Schweißautomat verschweißt (Bild 177, Bild 178). Ecken und Bahnstöße

werden grundsätzlich anschließend manuell verschweißt. Die Ecken von Überlappungen bei Bahnteilungen in der Attika werden großzügig ausgerundet und dann manuell mit Heißluft verschweißt. Die Ecken werden angepasst. Es sollte auf mindestens 15 cm Überlappung zur nächsten Bahn nach der Ecke geachtet werden.



Bild 177 *Schweißen der Attikaabdichtung mit der Dachdichtung an der 15 cm Überlappung mit Schweißautomat*



Bild 178 *Übergang Bahnteilung Attika*

Die Dichtbahn wird bis an die Kehle geschoben und ebenfalls mit einer Überlappung von mindestens 15 cm zur Dachabdichtung gezogen (Bild 179). Bei den Attikaecken werden hochstehende Eckfalten der Attikaabdichtung ausgebildet (Bild 180).



Bild 179 *Dichtbahn bis in die Kehle schieben mit einer 15 cm Überlappung*



Bild 180 *Ecke ausbilden mit hochstehender Eckfalte*

Bei den Attika-Eckabdichtungen sind Passstücke herzustellen. Die Passstücke werden mit Heißluftschweißgerät verschweißt (Bild 181).



Bild 181 *Attika-Eckabdichtung  
Anschweißen des Passstücks*



Bild 182 *Fertiggestellte Eckausbildung  
und Einbindung des  
Entwässerungstopfes*

Die fertiggestellten Eckausbildungen bzw. die Einbindung des Entwässerungstopfes zu der Dachabdichtung sind in Bild 182 detailliert dargestellt.



Zum Schluss wurde der Bahnüberhang auf Mauerwerkskante der Attika gekürzt und an den Ringankersteinen über die Gewindehülsen mit Bolzen und Unterlegscheiben befestigt (Bild 183).

Bild 183 *Zwischenfixierung der Abdichtung auf der  
Attika mittels Gewindebolzen und Unterlegscheiben  
in den Gewindehülsen der Steine*

### 8.2.5 Ausführung-Einbauten

Die Ausführung der Einbauten im Dachaufbau (Entlüftungsröhre für die Sanitärinstallation, Einlaufköpfe für die Regenentwässerung) gemäß den Grundsätzen der trocken demontierbaren Bauweise stellt eine große Herausforderung dar. Die Entlüftungsröhre wurden in der Grunddämmung eingebettet. An den Entlüftungsröhren wurde der Durchstoßpunkt mit der Dampfbremse unter Anwendung vom Dampfsperr-Klebeband eingebunden und abgedichtet (Bild 184, Bild 185).



Bild 184 *Entlüftungsröhr am Durchstoßpunkt Dampfbremse mit Dampfsperr-Klebeband eingebunden*



Bild 185 *Einbettung Grunddämmung*

Weiterhin wird das Entlüftungsröhr in die Gefälledämmung eingebettet. Der Durchstoßpunkt in der FPO-Dichtungsebene wird mit Passstücken mittels des Heißluftschweißgeräts abgedichtet.



Bild 186 *Einbettung des Entlüftungsröhr in die Gefälledämmung*



Bild 187 *Durchstoßpunkt Dichtungsebene (Anschweißmanschette ist noch herzustellen, da es sich nicht um ein Standard Entlüftungsröhr handelte)*

Die Einlaufflöpfe der Regenentwässerung werden ebenfalls in die Gefälledämmung eingebettet und angepasst (Bild 188). Der Einbautopf wird von oben in die Dichtbahn eingebracht (Bild 189).

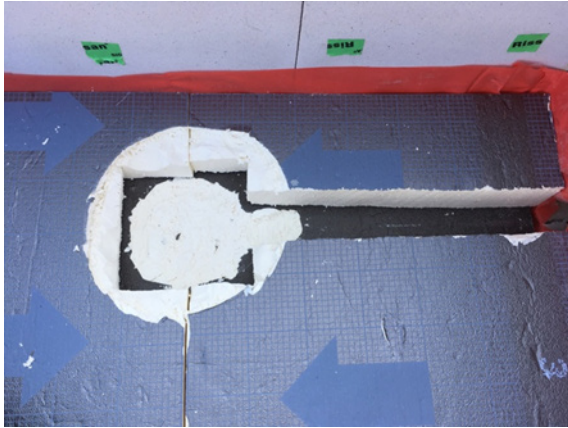


Bild 188 *Anpassung der Einbautopfgeometrie, da die Dämmkörper nicht verwendet werden können*

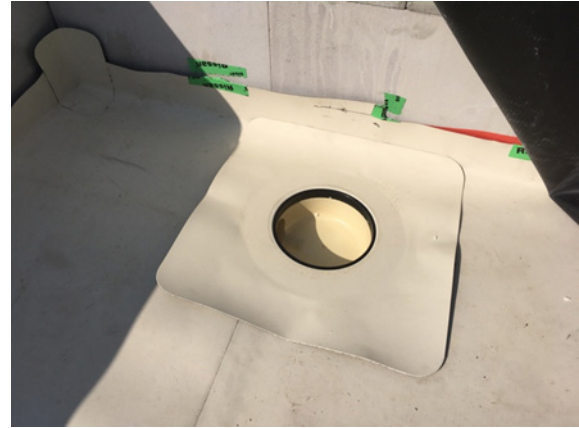


Bild 189 *Einbautopf wird von oben in die Dichtbahn eingebracht*

Die Dichtmanschette des Einbautopfes wird von oben an die Dichtbahn vollflächig angeschweißt (Bild 190). Abschließend wird im Tiefpunkt die Dichtbahn in der Kehle mit einer Befestigungsleiste fixiert (Bild 191).



Bild 190 *Vollständiges Anschweißen der Dichtmanschette von oben an die Dichtbahn*

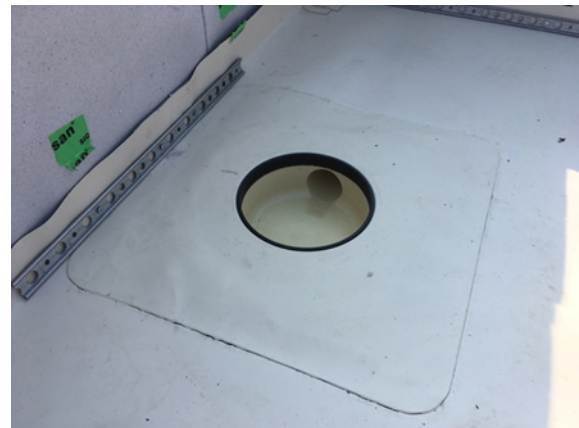


Bild 191 *Fixierung der Dichtbahn in der Kehle mit einer Befestigungsleiste*

Mit der Attika-Abdichtung wird die Dichtmanschette überlappt. Es ist darauf zu achten, dass die Kanten der Dichtmanschette gebrochen werden, da sonst kapillare Spalten entstehen können (Bild 192).





Bild 192 *Überlappung der Dichtmanschette mit der Attika-Abdichtung - Endzustand*

#### 8.2.6 Ausführung des Gründachaufbaus

Zu Demonstrationszwecken wurde ein Bereich gewählt, an dem der Gründachaufbau gezeigt werden konnte. Der Bereich war ca. 2 x 2,4 m groß und wurde mit geeigneten Leisten abgegrenzt. Zuerst wurde eine Schutzvliesmatte als erste Lage unter dem Gründachaufbau auf der verschweißten Dichtungsbahn verlegt. Darauf wurden Drainmatten bzw. Wasserspeichermatten angeordnet (Bild 193, Bild 194).



Bild 193 *Schutzvliesmatte als erste Lage unter dem Gründachaufbau*

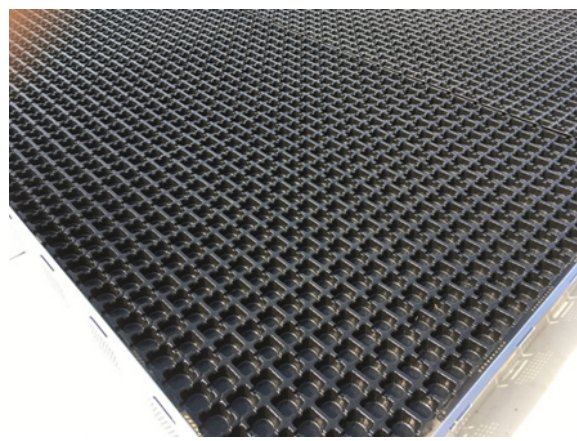


Bild 194 *Wasserspeichermatte*

Als weitere Schicht wurde ein Trennvlies auf die Wasserspeichermatten aufgebracht. Abschließend wurde zur Dachbegrünung das gewünschte Vegetationssubstrat aufgeschüttet (Bild 195, Bild 196).

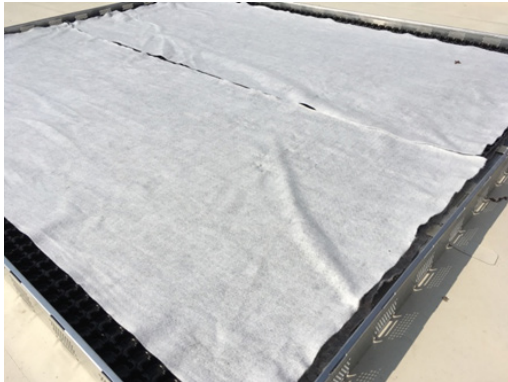


Bild 195 *Trennvlies auf Wasserspeichermatte*



Bild 196 *Vegetationssubstrat zur Begrünung des Daches*

### 8.2.7 Ausführung des Attikaaufbaus

Der Attikaaufbau wurde planmäßig in zwei Schritten ausgeführt. Als erstes wurde eine tragende Holzunterkonstruktion an der Oberkante des Attikaringankers eingebaut. Zum Anschluss werden speziell angefertigte Blechabdeckungen auf der Unterkonstruktion verlegt und befestigt. Der gesamte Attikaaufbau ist demontierbar und rückführbar auszuführen.

Bei der Montage der Holzunterkonstruktion werden zuerst zwei höhenunterschiedliche Holzlatten entlang der Oberkante des Ringankers und über der FBO-Abdichtungsfolie verlegt (Bild 197). Ziel der Höhenunterschiede ist die Abbildung der notwendigen Gefälle für die obere Zinkbleche zur Gewährleistung eines angemessenen Regenwasserabflusses vom Attikabereich in den Dachbereich. Über die Holzlatten kommen Holzquerträger zum Einsatz. Die Querträger werden an den oberen Hülsen der Ringankersteine (Abstand 50 cm) durch passende Hülsenschrauben befestigt (Bild 198). Dadurch werden die darunter liegenden Holzlatten stabilisiert.



Bild 197 *Holzlatten entlang der Attika mit unterschiedlicher Höhe zur Bildung der Attika-Gefälle*



Bild 198 *Demontierbare Befestigung der Unterkonstruktion an den Oberen Hülsen am Ringanker*

Im nächsten Schritt wurden über den Holzquerträgern OSB-Platten verlegt und an den Querträgern mit Holzschrauben befestigt. Somit entstand eine stabile Holzunterkonstruktion für die weiteren Ausbauschritte ( Bild 199, Bild 200).

Nachfolgend wurden dann die notwendigen Teile der Blechabdeckung montiert. Die Blechabdeckung wurde demontierbar ausgeführt. Die Blechabdeckung wurde als Stecksystem ausgebildet. Zuerst wurden Winkelprofile an der Außen- und Innenseite auf den OSB-Holzplatten mit Schrauben befestigt. Zur Verbindung der oberen Zinkbleche entlang der Attika kommen gewellte Verbindungselemente zum Einsatz ().



Bild 199 *Verlegen der OSB-Holzplatten über die Querträger und Befestigung mittels Holzschrauben*



Bild 200 *OSB-Holzplatten - Ansicht von Unten - Eckabbildung - Der Überstand deckt später die Dämmfassade ab*



Bild 201 *Befestigung der unteren Zinkbleche an den OSB-Holzplatten - dahinter gewelltes Unterlagsblech an der Verbindungsstelle*



Bild 202 *Befestigung der oberen Zinkbleche an den Verbindungselementen*

Die oberen Zinkbleche werden laut Verlegplan verteilt und als Stecksystem mit Hilfe der vormontierten Winkelprofile befestigt. Ein wichtiger Teil dabei ist die Befestigung an den Verbindungselementen um die Zinkbleche in Längsrichtung zu stabilisieren (Bild 202).

Die Zinkbleche müssen an den Attikaecken ebenfalls feuchtedicht montiert werden. Diesbezüglich wurden diese zur Eckausführung mit passendem Werkzeug (Blechscher, Blechzange etc.) zurechtgeschnitten und verbogen. Danach wurden Passstücke (Form ähnlich einer Halfenschiene) über die Ecklinien geschoben und befestigt (Bild 203, Bild 204 und Bild 205).



Bild 203 *Verlegen der oberen Zinkbleche - Eckabbildung*



Bild 204 *Extrateile/Passstücke zur besseren Abdichtung durch Zinkbleche an den Ecken*

Der fertiggestellte Attikaaufbau wurde auf diese Weise trocken und demontierbar ausgeführt und hat somit die Anforderung der Trockenbauweise erfüllt.



Bild 205 *Obere Zinkbleche - Fertigstellung der Eckabbildung*



Bild 206 *Fertige Attika*

Der Attikaaufbau wurde i.W. von 2 Bauarbeitern (1 eingearbeiteter Facharbeiter) in etwa 12 Arbeitsstunden (24 Mannstunden) unter Anwendung von üblichen Werkzeugen (Kreissäge, Zinkblechwerkzeuge etc.) ausgeführt. Die Ausführung ist somit praxistauglich.

### 8.2.8 Auswertung der Dach-Attika-Abdichtung

Die Dachabdichtung konnte regelkonform und problemlos verlegt werden. Das Dach wurde im beschriebenen Zustand beobachtet. Die Entwässerung zeigte sich als voll funktionsfähig. Im Tiefpunktbereich bildeten sich kleinere Pfützen, die lt. Hersteller bei einem Gründach unproblematisch sind.

Die Befestigung der Dichtungsbahn in der Kehle erfolgte mittels Schiene und Schlagdübel. Auf die Befestigungsschiene kann nicht verzichtet werden. Bei Verwendung eines Hinterschnitt-Ankers wäre die Befestigung vollständig demontierbar.

Der Rückbau der Abdichtung wurde vom Hersteller wie folgt vorgeschlagen:

1. Teilen der Abdichtung in drei Teile (inkl. Attikaabdichtung) quer zu den Schweißnähten in Richtung des Gefälles
2. Zusammenlegen der einzelnen Teile auf Paletten und Transport mit Kran
3. Beim Wiederaufbau werden die Teile mit einer weiteren Differenzbahn verschweißt

Der Materialverlust bei der Dichtungsbahn ist dabei gering und bewegt sich in einer Größenordnung von ca. 5 %.

### 8.3 Fußbodenaufbau

Der entwickelte Fußbodenaufbau wurde planmäßig für das Versuchshaus bei der Variante ohne Unterkellerung im Erdgeschoss ausgeführt (siehe 4.9.7). Die Ausführung des Fußbodenaufbaus erfolgte mit einer tragenden Unterkonstruktion, zwischen die die notwendige Dämmung gegen Erdreich verlegt wurde. Für die tragende Unterkonstruktion kamen die Holzstegträger von Steico [81] zum Einsatz. Als Abstand der Stegträger wurden 30 cm gewählt, um die Tragfähigkeit der Belagsplatten zu gewährleisten.



Bild 207 *Verlegen der Holzstegträger im kleinen Raum - Fußbodenaufbau*



Bild 208 *Verlegen der Profilträger im großen Raum - Fußbodenaufbau*

Zum Schutz der Holzunterkonstruktion vor der aufsteigenden Feuchtigkeit werden die Stegträger auf eine Folie (Dampfbremse) verlegt. Diese Folie ist die gleiche Folie, welche bei der Unterkellerung angewendet wurde (Bild 210). Für eine effektive Dämmwirkung wird Zwischendämmung aus Holzwolle bzw. Dämmplatten aus Mineralwolle zwischen den Stegträgern verlegt (Bild 209).



Bild 209 *Verlegen der Dämmstreifen zwischen den Profilträgern - Fußbodenaufbau*



Bild 210 *Verlegen der Dampfbremse (bzw. Abdichtung gegen aufsteigende Feuchte) - Fußbodenaufbau exemplarisch*

Im letzten Schritt bei der Unterkonstruktion werden die OSB-Holzplatten über die Stegträger versetzt verlegt, wobei das Stecksystem der Platten berücksichtigt wird und die Entstehung von durchgehenden Fugen vermieden wird. Anschließend werden die OSB-Platten an den oberen Stegen der Stegträger alle 50 cm zur Lagesicherung angeschraubt (Bild 211).



Bild 211 *Verschrauben der OSB-Platten an den Stegträgern - Fußbodenaufbau*



Bild 212 *Fertigstellung des Fußbodenaufbaus - ohne Belag*

Die Fertigstellung der Unterkonstruktion für den Fußbodenaufbau verlief problemlos und schnell. Die Verlegung der Stegträger und die Montage der OSB-Platten sowie die Anordnung der Dämmplatten wurde entsprechend der entwickelten Trockenbauweise zerstörungsfrei demontierbar ausgeführt. Alle Bestandteile der Fußbodenunterkonstruktion können abgeschraubt, demontiert und wiederverwendet werden.

Der Fußbodenaufbau wurde im gesamten EG durch 2 Baufacharbeiter in etwa 8 Arbeitsstunden (16Mannstunden) unter Anwendung von üblichen Werkzeugen (Kreissäge, Akkuschrauber etc.) ausgeführt. Er hat sich damit als praxistauglich erwiesen.

## 8.4 Fassadenausbau

### 8.4.1 VIP-Dämmung mit exemplarischem Click-Brick-System

Das entwickelte Dämmsystem aus Vakuumpanelen und Polyamidankern (siehe 4) wurde auf der Hauptfassade des Musterhauses exemplarisch montiert. Besonders betrachtet wird die Montage des Dämmsystems an der Stelle der Kreuzverbinder, um die Passgenauigkeit bzw. die Anwendbarkeit des entwickelten Systems zu prüfen. Auch im Bereich der Quadro-Steine (ohne Kreuzverbinder) wurden Vakuumpaneele angebracht. Dies dient zur Prüfung der Flexibilität des Dämmsystems.

Die Positionspläne zum Verlegen der Vakuumpaneele wurden für das gesamte Versuchshaus geplant. Bei entsprechender Softwareunterstützung kann dieser Arbeitsgang zügig ausgeführt werden. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung zur Ausführung des Ausbaus und gegebenenfalls des Dämmsystems wurden die Vakuumpaneele nur exemplarisch an der Hauptfassade eingesetzt. Die angewendeten Dämmplatten (Vakuumpanelle) wurden bei der Firma Variotec in Zusammenarbeit entwickelt und in einer Wandstärke von 5 cm angefertigt.

Das Verlegen der Dämmplatten an den Stellen der Kreuzverbinder erfolgt durch Befestigung der Paneele über die vorgesehenen Löcher an den Stegen der Kreuzverbinder durch Anschrauben der entwickelten Polyamidanker (Bild 216). Die Dämmplatten wurden laut Verlegplan positioniert. Dabei wird die Richtung der versetzten GFK-Platten berücksichtigt (siehe 4). Die Montage der Dämmpaneele lief reibungslos und schnell (Bild 213, Bild 214).



Bild 213 *Verlegen der entwickelten Vakuumpaneele von Variotec an den vorgesehenen Kreuzverbindern*

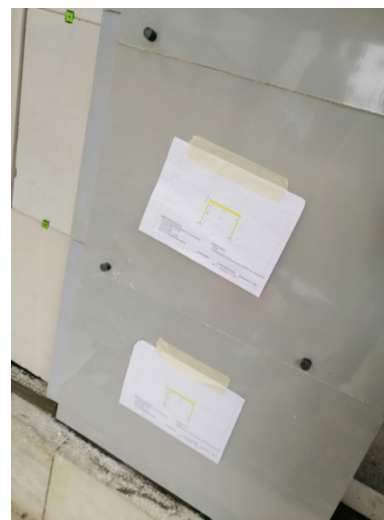


Bild 214 *Einschrauben der entwickelten Polyamidanker durch die vorgesehenen Löcher an den Kreuzverbinder*

Beim Einschrauben des Polyamidankers und für eine bessere Dämmwirkung sollten die Dämmpaneele an der Wandaußenseite dicht befestigt werden. Die seitliche Ansicht der montierten Dämmpaneele im Bereich der Kreuzverbinder zeigt eine sehr gute Dichtheit (Bild 215, 0).



Bild 215 *Seitliche Ansicht der entwickelten Vakuumpaneele von Variotec – 5 cm Dämmsystem*



Bild 216 *Anwendung des entwickelten, anschraubbaren Polyamidankers zur Befestigung der Vakuumpaneele an den Kreuzverbindern*

Bei der Montage der Dämmplatten an der Außenwand um die Ecke im Bereich der Kreuzverbinder zeigt das Dämmsystem eine gute Passgenauigkeit an der Eckverbindung (Bild 217). Die montierten Dämmpaneele eignen sich damit für die Anwendung im Bereich der Kreuzverbinder, was als positive Bewertung für die Eignung der entwickelten Trockenbauweise hinsichtlich des Ausbaus dient.



Ansicht der montierten Vakuumpaneele von Variotec – 5<sup>0</sup> cm Dämmsystem



Bild 217 *Montierte Vakuumpaneele im Bereich der Kreuzverbinder-Eckverbindung*



Die Montage des Dämmsystems wurde auch im Bereich der Quadro-Steine ohne Kreuzverbinder geprüft. Hierbei wurden geeignete Dübel an der Außenwand zum Ersetzen der Anschlusspunkte der Kreuzverbinder angebracht. Danach wurden die Dämmpaneele laut Verlegeplan mit den Polyamidankern montiert (analog zu Bild 50). Das Verlegen des Dämmsystems mit Vakuumpaneele im Versuchshaus hat die praktische Anwendbarkeit bestätigt. Die aufgetretenen geringen Bautoleranzen konnten über die Schraubverbindung problemlos ausgeglichen werden.

Die vorgesehene Click-Brick-Vormauerung in Trockenbauweise konnte nicht realisiert werden, da die Firma Lieferschwierigkeiten aufgrund eines technologisch erforderlichen Produktionstopps hatte.

Die exemplarische Montage wurde durch einen Bauarbeiter in 4 Stunden ausgeführt. Der geschätzte Zeitaufwand für die komplette Montage des Dämmsystems für das Versuchshaus durch 2 Bauarbeiter beträgt 30 Stunden.

#### 8.4.2 Fasadensystem aus Stegträgern und Eternitplatten

Dieses Fasadensystem wurde exemplarisch im Eckbereich der zwei Hauptfassaden des Versuchshauses realisiert. Das Ziel der exemplarischen Darstellung ist, eine ausreichende Erläuterung aller zutreffenden Details bei der Montage des Fasadensystems aus Stegträgern und Eternitplatten zu präsentieren. Die komplette Darstellung dieses Fasadensystems und aller unterschiedlichen Ausbausysteme war aufgrund der begrenzten Mittel und Forschungsdauer nicht möglich.

Die Montage des Fasadensystems aus Stegträgern und Eternitplatten bedarf ebenfalls einer planerischen Vorbereitung. Die Befestigungspunkte der Stegträger sind gemäß dieser Planung am Rohbau abzusetzen. Zur Befestigung der Stegträger wurden Winkelverbinder mit speziell demontierbaren Schrauben für Kalksandstein sowie Holzschrauben angewendet (Bild 218).



Bild 218 *Befestigung der Stegträger an den Winkelverbinder durch abschraubbare Holzschrauben*



Bild 219 *Montage der Stegträger - Schwelle aus Brettschichtholz als Abfangung im Erdgeschoss*

Systembedingt wurden Schwellungen aus Brettschichtholz als Abfangungen im EG und OG montiert. Die Schwellungen sind im Erdgeschoss auf der Oberkante der Fundamentsteine (unter Beachtung der Spritzwassergrenze) und im Obergeschoss auf der auf Höhe der Oberkante der Deckenplatten über dem EG zu montieren (Bild 219).

Danach wurden die Fenster- und Türleibungen in zwei verschiedenen Varianten montiert und präsentiert. Bei der ersten Lösung wurden Furnierschichtholzbretter direkt um die Öffnungen angepasst und mit der gleichen Befestigungsweise wie bei den Stegträgern montiert (Bild 220). Bei der anderen Möglichkeit wurden um die Stege der Stegträger anstelle der Laibungen passende OSB-Platten verwendet, sodass die Tragkonstruktion zur Montage der Türen und Fenster gegeben ist (Bild 221).



Bild 220 *Montage der Fensterleibungen durch Furnierschichtholz (STEICO LVL R)*



Bild 221 *Montage der Fensterleibungen durch Abdeckung der Stegträger mit OSB-Platten*

Im letzten Schritt der Montage der Unterkonstruktion des Fassadensystems werden Holzlatten als Befestigungsgrundlage für die Faserzementplatten an der äußeren Seite der Stegträger montiert (Bild 222). Dadurch wird ein Luftspalt zwischen den Fassadenpaneelen und der Dämmung erreicht.



Bild 222 *Montage der Holzlatten an den Stegträgern als Grundlage zur Montage der Eternitplatten links und fertiggestellte Unterkonstruktion rechts*

Die tragende Unterkonstruktion des Fassadensystems aus Stegträgern für die Faserzementpaneele war damit komplett (Bild 222, rechts). Alle Teile dieser Unterkonstruktion sind demontierbar. Die exemplarische Anbringung der Unterkonstruktion wurde durch zwei

Bauarbeiter in 10 Stunden ausgeführt. Der geschätzte Zeitaufwand für die komplette Montage der Unterkonstruktion für das Versuchshaus durch 2 Bauarbeiter beträgt somit 30 Stunden (60 Mannstunden).

Es folgte das Verlegen der Faserdämmmatten. Dazu wurden vorher die Stege der Stegträger mit Dämmung versehen, um den Kältebrückeneffekt zu minimieren. (Bild 223).



Bild 223 *Verlegen der Fassadendämmung - seitliche Dämmstreifen an den Stegträgern (links) Einbau der Dämmmatte (Mitte) und vollkommen gefülltes Gefach (rechts)*

Für einen besseren Feuchteschutz werden über den Holzlatten passende Dichtungsbahnen angebracht (Bild 224). Die Ausführung des Fassadensystems von CEDRAL [80] beginnt mit der Montage der zugehörigen Eck- und Startprofile (Bild 225, Bild 226).



Bild 224 *Montage des Fassadensystems - Anbringen der Dichtungsbahnen an den Holzlatten*



Bild 225 *Montage des Fassadensystems - Montage der Eckprofile*

Nach der Vorbereitung der notwendigen Systemprofile wird mit dem Verlegen der Eternitplatten begonnen. Die erste Eternitplatte liegt horizontal und direkt an dem Startprofil und

wird mit passenden Systemschrauben in einem Abstand von etwa 3 cm vom oberen Plattenrand an den unterliegenden vertikalen Holzlatten befestigt (Bild 227).



Bild 226 *Montage des Fassadensystems - Montage der Startprofile*



Bild 227 *Montage des Fassadensystems - Cedral Lap*

Da das angewendete Fassadensystem von CEDRAL auf dem Prinzip der Stülpschalung beruht, werden die nächsten Platten horizontal in einer Überlappung von etwa 3 cm auf die untere Eternitplatte verlegt, sodass die Befestigungsschrauben der unteren Platte verdeckt werden.

Bei den Fenster- und Türausführungen ist auf Besonderheiten bezüglich der Passstücke und Hinterlüftungsprofile sowie der Eckprofile des Fassadensystems zu achten (Bild 228).



Bild 228 *Montage des Fassadensystems des Fassadensystems links - Montage der Profile und Passstücke in die Fenster- und Türlaubungen rechts*

Das Verlegen der Eternitpaneele wird mit der gleichen Vorgehensweise im Obergeschoss fortgesetzt. Beim Attikaabschluss sollen das letzte Eternitpaneel unter dem Attikablech befestigt werden.

Die exemplarische Ausführung des vorgeschlagenen Fassadensystems wurde planmäßig komplett demontierbar ausgeführt. Die schnelle Montage dieses Systems erfüllt das Ziel

der entwickelten Trockenbauweise. Die exemplarische Montage des Fassadensystems von CEDRAL wurde durch zwei Bauarbeiter in 12 Stunden durchgeführt.

Der geschätzte Zeitaufwand für die komplette Montage des Fassadensystems für das Versuchshaus durch 2 Bauarbeiter beträgt 30 Stunden. Somit wird der Zeitaufwand der Gesamtausführung des demontierbaren Fassadensystems mit der zugehörigen Tragunterkonstruktion durch 2 Bauarbeiter mit etwa 60 Stunden (120 Mannstunden) geschätzt. Die Praxistauglichkeit konnte damit unter Beweis gestellt werden.



Bild 229 *Fertigstellung des exemplarischen Fassadensystems aus Eternitplatten von CEDRAL*

## 8.5 Treppe



Bild 230 *Einbau der Holzstufen –*



Bild 231 *Fertigstellung der demontierbaren, wiederverwendbaren Treppenkonstruktion*

Als Treppe kam eine eingeschobene Holztreppe ohne Verleimung nur mit horizontaler Verspannung zum Einsatz. Sie wurde zimmermannsmäßig aufgerissen, hergestellt und

eingebaut. Sie ist damit demontierbar und wiederverwendbar (Bild 231). Der Bau der Treppe wurde durch einen Bauarbeiter in 5 Arbeitsstunden ausgeführt.

## **8.6 Weitere Ausbaugewerke**

Weitere Ausbaugewerke waren in der Planung bearbeitet worden. Dort wurden auch Lösungen vorgeschlagen und beurteilt. Auf Grund des erheblichen Umfangs der bereits hier in der Vorbereitung und Ausführung dargestellten Gewerke musste von einer Realisierung weiterer abgesehen werden.

## 9 Rückbau des Experimentalbaus

### 9.1 Allgemeines

Das Ziel des Rückbaus des kompletten in Trockenbauweise errichteten Versuchshauses (Rohbau (EG+OG) + Ausbau), war, die Hypothese der kompletten, zerstörungsfreien Demontierbarkeit des Rohbaus sowie des Ausbaus zu prüfen. Bei letzterem erfolgte die Beschränkung auf den im Versuchsstadium realisierten Ausbau (Fassadenausbau, Dachaufbau und Bodenaufbau), aus dem jedoch auf die restlichen Ausbaugewerke geschlossen werden kann.

### 9.2 Rückbau des Ausbaues

Der Rückbau begann mit dem realisierten Ausbau.

#### 9.2.1 Rückbau der Fassade und der Fenster/Fenstertüren

In diesem Abschnitt wird die Demontage des Fassadensystems aus Stegträgern und Cedral Fassadenpaneelen (s. Abschnitt 4.4.3) beschrieben. Die Demontage des exemplarisch dargestellten Fassadensystems wird in der umgekehrten Reihenfolge der Montage ausgeführt.

Zuerst wurden die in Form einer Stülpchalung sich überlappenden Eternitplatten ab dem Attikabereich demontiert, indem die Befestigungsschrauben von den Holzlatten abgeschraubt wurden (Bild 215). Bei der Demontage der Passstücke und Sondereternitplatten an den Laibungen wurde insbesondere darauf geachtet, dass die Platten zerstörungsfrei bleiben (Bild 233).



Bild 232 *Demontage der Eternitpaneele - ab dem Attikabereich*



Bild 233 *Demontage der Sonderpaneele an den Laibungen*

Die Schrauben der Paneele sind durch die Überstülpung immer vom nächsten Paneel überdeckt und lassen sich deshalb unproblematisch mit einem Akkuschrauber von der Attika beginnend entfernen.

Die Entfernung der Fassadenpaneele wurde bis zu den Systemprofilen fortgesetzt (Bild 234). Die Paneele wurden sorgfältig für den Abtransport palettiert und gesichert. Anschließend wurden die Dichtungsbahnen von den Holzlatten entfernt sowie die Systemprofile und Eckprofile abgeschraubt. Die Fenster ließen sich einfach durch Herausdrehen der Befestigungsschrauben (Bild 235) lösen. Entscheidend ist, für den Ausbau der Fenster und Fenstertüren die dazu entsprechenden Hilfsmittel für Transport und Zwischenlagerung maßkonkret zur Verfügung zu haben.

Bild 234 *Demontage der Systemprofile*Bild 235 *Demontage des Fensters*

Nach dem Abbau Lap-Fassade wurden die Dämmstreifen aus Mineralwolle entfernt, gestapelt und für eine Wiederverwendung in Folie eingepackt. Die Mineralwolle-Platten sind sehr empfindlich und werden bei Ausbau leicht beschädigt. Das Belassen von Foliestreifen mit Grifföchern beim Einbau (bereits in der Produktion vorzusehen) könnte hier hilfreich sein.

Bild 236 *Demontage der Holzlatten, Bohlen und Stegträger*Bild 237 *Demontage der Befestigungswinkel für die Stegträger und die Bohlen*

Nach der Demontage der Fassadenunterkonstruktion sind die Winkel zur Befestigung der Stegträger und Bohlen abzuschrauben (Bild 238). Somit wird das Fassadensystem zerstörungsfrei und komplett demontiert. Die Arbeitsdauer zur Demontage des exemplarischen Fassadensystems von CEDRAL betrug etwa 7 Stunden und wurde durch zwei Bauarbeiter durchgeführt (Bild 239).





Bild 238 *Abschrauben eine Befestigungswinkel für Stegträger*



Bild 239 *Endzustand der Demontage der Fassade*

Im Bereich der Kreuzverbinder der KS-Quadro-Steine mit Prägungen an den Lagerflächen wurde das exemplarisch montierte Dämmsystem aus Vakuumpaneelen und Polyamidankern an der Hauptfassade abgebaut. Die Polyamidanker werden zuerst abgeschraubt. Nachher kann jedes Vakuumpaneel in der umgekehrten Montagereihenfolge entfernt werden, sodass die Richtung der versetzten Paneele berücksichtigt wird (Bild 240).

Es folgte dann die Demontage der VIP-Paneele. Nachher werden die Befestigungsstifte aus den Kreuzverbindern bzw. aus den Quadro-Steinen abgeschraubt. Die demontierten Paneele werden anschließend sorgfältig palettiert. Die Arbeitsdauer zur Demontage des exemplarischen Fassadensystems aus Vakuumpaneelen und Polyamidankern betrug etwa 1 Stunde und wurde durch einen Bauarbeiter durchgeführt (Bild 241).

Der Demontage des gesamten Fassadenausbaues lief zerstörungsfrei und schnell. Diesbezüglich konnten mit den angewendeten Bauteilen und Lösungen die zerstörungsfreie Demontierbarkeit nachgewiesen werden.



Bild 240 *Demontage der Vakuumpanelle - Abschrauben der Polyamidanker*



Bild 241 *Enddemontage der VIP-Paneele von den Kreuzverbindern*

## 9.2.2 Rückbau des Fußbodenaufbaus und der Treppe

Die Demontage des entwickelten Fußbodenaufbaus begann mit dem Abschrauben der bereits verlegten OSB-Platten (Bild 242). Hierbei wurde auf das Nut- und Federsystem der OSB-Platten geachtet. Im nächsten Schritt wurden die Dämmplatten zwischen den Stegrägern sowie die unterliegenden Schutzfolien entfernt und abgelagert. (Bild 243). Das Dämmmaterial ist dabei wieder in Folie zu verpacken.



Bild 242 *Rückbau des Fußbodenaufbaus - Demontage der OSB-Platten*

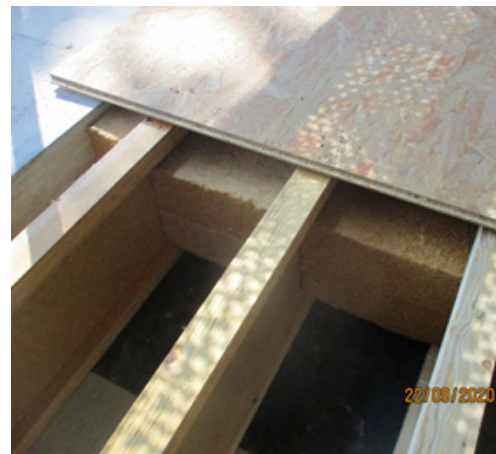


Bild 243 *Rückbau des Fußbodenaufbaus - Demontage der Dämmplatten*

Danach wurden die Stegräger demontiert und gestapelt (Bild 244). Der Rückbau des Fußbodenaufbaus lässt sich sehr schnell und zerstörungsfrei realisieren. Die Arbeitsdauer betrug

etwa 2 Stunden und wurde durch zwei Bauarbeiter komplett durchgeführt (Bild 245). Somit wurde die zerstörungsfreie Demontierbarkeit des konstruktiven Fußbodenaufbaus nachgewiesen.



Bild 244 *Rückbau des Fußbodenaufbaus - Demontage der Stegträger*



Bild 245 *Rückbau des Fußbodenaufbaus - Endzustand*

Die Demontage der Treppe wurde ebenfalls in umgekehrter Reihenfolge der Montage durchgeführt (Bild 246, Bild 247). Alle Elemente der Innentreppe konnten zerstörungsfrei ausgebaut und gelagert werden. Dieser Arbeitsgang lief schnell und wurde von zwei Bauarbeitern in einer Stunde ausgeführt (2 Mannstunden).



Bild 246 *Rückbau der Treppe – Demontage der Stufen und der Gewindestangen*



Bild 247 *Rückbau der Treppe – Demontage der Holzträger und OSB-Platte*

### 9.2.3 Rückbau des Dachaufbaus und der Attikaabdeckung

Der Rückbau wurde in einer umgekehrten Reihenfolge des Aufbaus durchgeführt. Dabei wurden alle Bauteile des Dachaufbaus sorgfältig demontiert und für eine erneute Anwendung beim nächsten Wiederaufbau gelagert.

Es wurde mit dem Attikarückbau begonnen. Hierbei wurden zuerst die oberen Zinkbleche demontiert. Dazu wurden die Sonderprofile zur Befestigung der Eckausbildungen herausgezogen (Bild 248). Als nächstes wurden die Zinkbleche in umgekehrter Weise des Einklicksystems ausgeklickt und gestapelt (Bild 249). Es empfiehlt sich, die Zinkbleche vor dem Rückbau zu nummerieren, sodass der Wiederaufbau leichter und plausibler erfolgen kann, auch wenn sich die Geometrie ggf. ändert. Die demontierten Zinkbleche werden sorgfältig nach unten gebracht. Es sollen dabei keine Verbiegungen an den Blechen entstehen.



Bild 248 *Rückbau des Attikaaufbaus –  
Demontage der Bleche und  
Sondereckprofile*



Bild 249 *Rückbau des Attikaaufbaus –  
Demontage der Bleche als  
Einklicksystem*

Im nächsten Schritt werden die Unterbleche (Längsbleche und Verbindungsbleche), welche sich unter den Zinkblechen befinden, demontiert und gestapelt (Bild 250). Im Nachhinein werden die OSB-Platten aus den unteren Holzlatten abgeschraubt und rückgebaut. Hierbei wird ebenfalls empfohlen, die OSB-Platten vor dem Rückbau zu nummerieren, sodass der Wiederaufbau schneller erfolgen kann.



Bild 250 *Rückbau des Attikaaufbaus – Demontage der Unterbleche und nachfolgend der OSB-Platten*



Bild 251 *Rückbau des Attikaaufbaus – Demontage der Holzlatten*

Danach werden die Holzlatten (Querlatten und Längslatten) demontiert (Bild 251). Dies erfolgt durch Ablösung der Befestigungsschrauben zwischen den Querlatten und dem Attikarohrbau. Der Rückbau der Attikaabdeckung wurde durch 2 Bauarbeiter in etwa 4 Arbeitsstunden unter Anwendung von üblichen Werkzeugen schnell und zerstörungsfrei ausgeführt (8 Mannstunden).

Nach dem Rückbau des Attikaaufbaus wurde mit dem Rückbau des Dachaufbaus begonnen. Allgemein wurde stets bei der Demontage des Dachaufbaus und der Dachabdichtungen auf die Wiederverwendbarkeit geachtet. Erstens wurde das exemplarisch ausgeführte Gründach demontiert. Zuerst war dazu die Vegetationsschicht abzutragen (Bild 252). Danach wurden die Filterschichten und die Noppenfolie mit dem Vlies entfernt (Bild 253).



Bild 252 *Rückbau des exemplarischen Grün-dachs - Abtragung der Vegetationstragschicht*

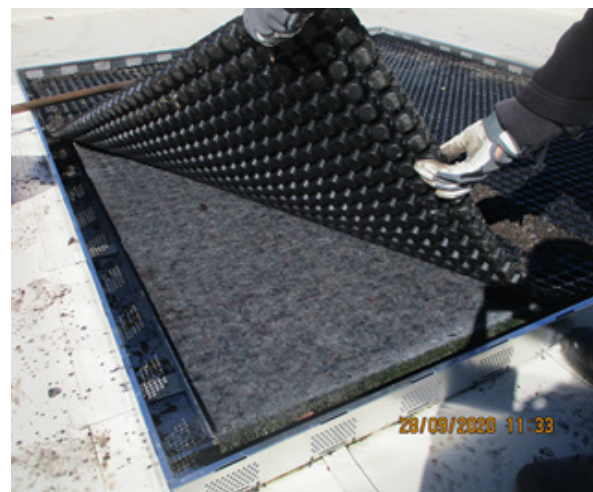


Bild 253 *Rückbau des exemplarischen Gründachs - Demontage der Filterschicht*

Es folgte dann das Abschrauben der Befestigungsleiste der FPO-Folie (Bild 255). Die FPO-Folie wird nachher in drei Teile gerade geteilt und sorgfältig auf Paletten zusammengelegt (Bild 254). Die Dichtungsschnur konnte rückstandsfrei entfernt werden.

Beim Zusammenlegen der Dachabdichtungsbahnen werden die Stellen der Abflüsse zur Vermeidung von Rissen sorgfältig gerollt. Zum Wiederaufbau wird die demontierte Dachabdichtung später mit weiteren, ergänzenden Deckbahnen verschweißt.



Bild 254 Rückbau des Dachaufbaus -  
Teilung der FPO-Abdichtungsbahnen  
in drei Teile



Bild 255 Rückbau des Dachaufbaus -  
Demontage der FPO-Abdichtungsbahnen -  
Abschrauben der Befestigungsleiste

Nachfolgend wurden die Platten der Gefälledämmung aufgenommen, gestapelt und abtransportiert (Bild 256). Ebenso wurden danach die gleichstarken Dachdämmungsplatten zusammengelegt und abtransportiert (Bild 257).

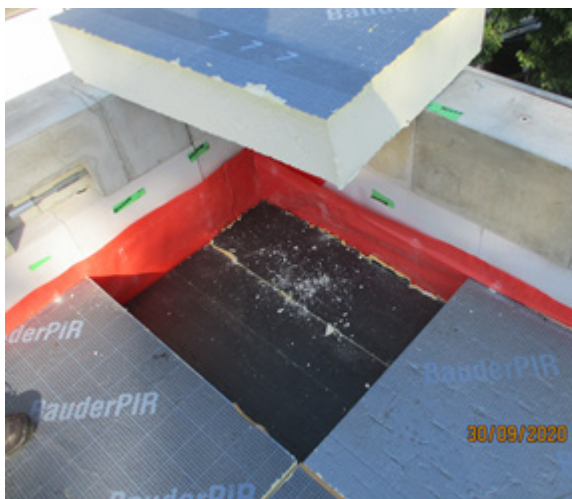


Bild 256 Rückbau des Dachaufbaus -  
Demontage der Gefälledämmung



Bild 257 Rückbau des Dachaufbaus  
Demontage der gleichstarken  
Dachdämmung

Im nächsten Schritt wird die Dampfsperre zusammengelegt und sorgfältig gefaltet, sodass keine unerwünschten Risse entstehen können (Bild 258). Allerdings hat sich gezeigt, dass doch Beschädigungen auftreten können und robusteres Material notwendig ist. Nachfolgend

wird dann die Vliesschicht, bestehend aus mehreren Streifen, zusammengerollt und abtransportiert (Bild 259).



Bild 258 *Rückbau des Dachaufbaus - Rückbau der Dampfsperre*



Bild 259 *Rückbau des Dachaufbaus - Rückbau der Vliesschicht*

Als letzter Schritt wird der Füllkies aus den Zwischenräumen der Deckenplatten herausgenommen (Bild 260).



Bild 260 *Rückbau des Dachaufbaus - Abtragung des Füllkieses*



Bild 261 *Endzustand Rückbau des Dachaufbaus - 100% Demontierbarkeit*

Der gesamte Rückbau des Dachaufbaus wurde durch zwei Bauarbeiter in etwa 8 Stunden durchgeführt (Bild 261) (16 Mannstunden). Hierbei wurden nur handübliche Werkzeuge benutzt.

Der Rückbau des Dach- und Attikaaufbaus ließ sich schnell und problemlos realisieren. Es sind keine Mängel am Bestand festgestellt worden. Der Rückbau konnte – bis auf das Aufschneiden der FPO-Bahnen – zerstörungsfrei und ohne Beschädigungen durchgeführt werden.

## 9.3 Rückbau des Rohbaus

### 9.3.1 Ziel

Das Ziel des Rückbaues war, den Beweis anzutreten, dass mit zerstörungsfreien Methoden eine vollständige Zerlegung des Rohbaus möglich ist und dass die dabei gewonnenen Bauteile und Materialien sich 1:1 bei der Errichtung eines neuen Gebäudes verwenden lassen.

### 9.3.2 Rückbau des Attikageschosses

Das Attikageschoss besteht aus einer Reihe Quadro-KS-Steine und dem draufliegenden Ringanker aus Betonsteinen. Die KS-Steine liegen auf dem Schaumglasstreifen auf, der für die thermische Trennung sorgt. Als erster Schritt wurde mit dem Rückbau des Ringankers begonnen. Dazu wurden die angespannten vertikalen Spannglieder abgelöst, indem die Muttern M20 und die zugehörigen Unterlegscheiben entfernt wurden (Bild 262). Zunächst wird der Ringanker abschnittsweise demontiert. Nach der Ablösung der Horizontalspannglieder an der Stelle der Spannsteine (Ablösung der Spannschlösser M16 und der Linksgewindestifte (Bild 263)) werden die horizontalen Gewindestangen M16 von den Ringanker-Ecksteinen abgeschraubt.



Bild 262 *Rückbau des Attikageschosses - Rückbau des Ringankers-Ablösung der Vertikalspannglieder*



Bild 263 *Rückbau des Attikageschosses - Rückbau des Ringankers-Ablösung der Horizontalspannglieder*

Somit sind die Ringankersteine in jedem Abschnitt freistehend und können einzelnen mit dem Mauerkran abgetragen und auf Paletten gestapelt werden (Bild 264).





Bild 264 *Rückbau des Attikageschosses - Rückbau der Ringankersteine-*



Bild 265 *Rückbau des Attikageschosses - Rückbau der KS-Steine*

Nach Abschluss der Demontage der Ringankersteine wurden die trocken vermauerten Quadro-KS-Steine mittels dem Mauerkran und der Versetzzange abgetragen und auf Paletten gestapelt (Bild 265). Als letzter Schritt wurden die trocken verlegten Schaumglasstreifen aufgesammelt und auf einer Palette zusammengelegt (Bild 266).



Bild 266 *Rückbau des Attikageschosses - Rückbau der Schaumglas-Plattenreifen*



Bild 267 *Rückbau des Attikageschosses - 100% Demontierbarkeit*

Somit wird der Rohbau im Attikageschoss bausicher und 100% zerstörungsfrei demontiert (Bild 267). Die palettierten Steine wurden mittels Baukrans ins Lager gesetzt.

Der Rückbau des Attikageschosses erfolgte schnell und ohne Zerstörungen. Er wurde von zwei Bauarbeiter mit Hilfe eines Mauerkranes in etwa 4 Arbeitsstunden durchgeführt (8 Mannstunden). Dementsprechend erfüllte die Trockenkonstruktion der Attika aus Ringanker- KS-Steinen die Anforderungen an die vollständige Demontierbarkeit in vollem Umfange.

### 9.3.3 Rückbau des Obergeschosses

Der Abbau der Deckenplatten im OG begann mit der Ablösung der vertikalen Verspannung zu dem Ringanker mit dem Abschrauben der fest gedrehten Gewindemutter (Bild 268) an den einzelnen Spannstäben. Um die Demontage der Deckenplatten zu erleichtern wurden die vertikalen Spanngliedern zurückgebaut.



Bild 268 Rückbau des OG - Rückbau der Deckenplatten über OG – Ablösung der Vertikalspannung



Bild 269 OG-Rückbau der Deckenplatten über OG- Demontage der einzelnen Spannbeton-Platten

Die Spannbeton-Platten wurden mittels der speziellen Plattenzange bzw. der Anschlagmittel vorsichtig abgehoben (Bild 269) und an einem freien Platz neben dem Rohbau abgesetzt und gestapelt. Der Abbau der Deckenplatten ist in der umgekehrten Reihenfolge der Deckenmontage erfolgt (Bild 270, Bild 271).

Der Rückbau der Deckenplatten im OG erfolgte zerstörungs- und schadenfrei und wurde durch zwei Bauarbeiter mit Hilfe eines Autokrane in etwa 2 Arbeitsstunden durchgeführt (4 Mannstunden). Somit konnte die Erfüllung der Anforderung an die Demontierbarkeit für die trocken verlegte Deckenkonstruktion nachgewiesen werden.

Im nächsten Schritt des Rohbaurückbaus im OG wurde der Ringanker demontiert. Dazu musste zuerst die Verspannung zu den darunter liegenden KS-Wänden (Muttern M20) abgelöst werden, um die Ringanker von den darunter befindlichen Wänden zu entkoppeln. Vor den weiteren Abbauschritten wurden, wo es erforderlich war, Stützsysteme aus Montagestützen und Leerschalung unter den Stürzen über Türen und Fenstern aufgestellt (Bild 272). Danach konnte die horizontale Verspannung M16 in den Spannfenstern gelöst, die Ringankersteine in umgekehrter Reihenfolge abgebaut und auf Paletten gestapelt werden. Die Ringankersteine wurden über Schraubösen angeschlagen.



Bild 270 Rückbau des OG - Fortsetzung des Rückbaus der Deckenplatten über OG



Bild 271 Rückbau des OG - Endzustand des Rückbaus der Deckenplatten über OG

Nach der Befreiung der Ringankerecksteine werden diese durch die Anschlagmittel abgehoben. Des Weiteren werden alle anderen Ringankersteine im Abschnitt sorgfältig ausgefädelt und angehoben und gegebenenfalls auf Holzpaletten gestapelt.

Dieser Rückbauprozess der Ringankersteine wird wiederholt, bis alle Ringankerabschnitte im jeweiligen Geschoss demontiert sind (Bild 273).



Bild 272 Rückbau des OG - Montagestützen sichern die Lage der Ringankersteine über Öffnungen



Bild 273 Rückbau des OG - Demontage des Ringankers

Der Rückbau des Ringankers im OG erfolgte ebenfalls schadenfrei und wird durch zwei Bauarbeiter mit Hilfe eines Mauerkranes in etwa 7 Arbeitsstunden durchgeführt (14 Mannstunden).

Der Rückbau erfolgte zerstörungsfrei und ohne Schäden an den Ringankersteinen. Die vorgeschlagene Trockenbauweise hat sich somit für die Ringanker bewährt.

Nach der Demontage des Ringankers im OG wurden die KS-Quadro-Wände rückgebaut. Die KS-Schichten standen ohne Verspannungen unter dem Eigengewicht stabil. Die vermauerten Steine wurden schichtenweise mittels der Versetzzange mit dem Mauerkran rückgebaut (Bild 274). Die vertikalen Spannglieder M20 wurden meterweise abgeschraubt. Die abgebauten KS-Steine wurden für den folgenden Wiederaufbau mit dem Mauerkran neben dem Versuchshaus auf Europaletten gestapelt.

Der Rückbau der KS-Wände im Obergeschoss wurde durch zwei Bauarbeiter mit Hilfe eines Mauerkranes in etwa 6 Arbeitsstunden durchgeführt (12 Mannstunden). Die Trockenbauweise hat sich somit auch hinsichtlich der Anforderung an die Demontierbarkeit bewährt (Bild 275).



Bild 274 *Demontage des OG - Rückbau der KS-Wände*



Bild 275 *Fertiger Rückbau des OG*

#### 9.3.4 Rückbau des Erdgeschosses

Der Rückbau des Erdgeschosses lief analog dem Obergeschoss ab. Auch hier hat sich das Trockenbausystem der Wände und des Ringankers bewährt.



Bild 276 *Rückbau des EG - Rückbau der KS-Wände*



Bild 277 *Rückbau des EG - Freilegung der Schaumglasschicht*

Bild 277 zeigt die freigelegte Schaumglasschicht. Diese ist hinsichtlich Beschädigungen beim Rückbau anfällig. Mit einem gewissen Verlust bei einer vorgesehenen Wiederverwendung muss gerechnet werden.

Die KS-Modulsteine mit den Kreuzverbindern wurden langsam angehoben, damit die Kreuzverbinder intakt bleiben. Dieser Prozess erfolgte beim Rückbau problemlos, sodass keine Beschädigungen sowohl an den Kreuzverbindern als auch an den KS-Modulsteinen festzustellen waren (Bild 278, Bild 279). Als letzter Schritt werden die trocken verlegten Schaumglasstreifen gesammelt und auf einer Palette zusammengelegt. Die KS-Modulsteine und die zugehörigen Kreuzverbinder bestätigten somit die Erfüllung der Anforderung der Rückführbarkeit.

Der Rückbau der KS-Wände im Erdgeschoss wurde durch drei Bauarbeiter mit Hilfe eines Mauerkranes in etwa 4 Arbeitsstunden durchgeführt (12 Mannstunden).



Bild 278 *Rückbau des EG - Rückbau der KS-Modulsteine mit den Kreuzverbindern*



Bild 279 *zerstörungsfreier Rückbau der KS-Modulsteine mit den Kreuzverbindern*

### 9.3.5 Fundamente

Zuletzt wurden dann die Fundamente, bestehend aus den Fundamentmodulsteinen, demontiert. Die Fundamentstreifen und die Ringanker wurden nach dem gleichen Prinzip demontiert. Der Abbau der verspannten Fundamentstreifen erfolgte abschnittsweise durch Ablösung der festgeschraubten Spannschlösser M20 in den Aussparungen des jeweiligen Fundamentspannsteines (Bild 280).

Dann wurden die mittleren Linksgewindestifte entfernt und somit auch die horizontalen Spannglieder M20 aus den Ecksteinen abgeschraubt. Prinzipiell wird bei der Demontage der Fundamentstreifen mit dem letztmontierten Fundamentabschnitt begonnen. Nach der Freistellung der Fundamentsteine wurden diese mit dem Mauerkran ausgefädelt (Bild 281).

Alle Fundamentsteine wurden auf Holzpaletten gestapelt und für den Transport ordnungsgemäß palettiert (Bild 282).



Bild 280 *Rückbau der Fundamentebene - Ablösen der Spannglieder*



Bild 281 *Rückbau der Fundamentebene - Fortsetzung der Demontage der Fundamentsteine*

Die Demontage der Fundamentstreifen konnte durch zwei Bauarbeiter mit Hilfe eines Mauerkranes in etwa 4 Stunden erledigt werden (8 Mannstunden). Diesbezüglich erfüllen die Fundamentstreifen, die in Trockenbauweise montiert worden sind, die Anforderung der komplett schadenfreien Demontierbarkeit.



Bild 282 *Ende der Demontage des Rohbaus des Versuchshauses - 100% Demontierbarkeit*

## 9.4 Logistik und Transport nach dem Rückbau

Wie es bei jeder einzelnen Rückbauphase erwähnt wurde, werden die Bauteile nach der Demontage auf geeigneten Paletten palettiert und für einen sicheren späteren Transport vorbereitet. Für einen schnellen Wiederaufbau an einem neuen Standort sollen die demontierten Bauteile und Materialien effizient gelagert und wirtschaftlich vorteilhaft abtransportiert werden. Dazu ist eine entsprechende Lager- und Logistikplanung erforderlich.

Die Arbeitsstunden des Wiederaufbaus des Versuchshauses im Rohbau in veränderter Bauform lagen bei etwa 228 Mannstunden, wobei passende Baugeräte (Autokran, Mauerkran, verschiedenen Bauwerkzeuge) zur Verfügung standen.

Abhängig von der Größe der Bebauungsfläche um das Objekt und der Zeitfrist zum Abtransport des Musterhauses sind zwei Szenarien zu betrachten:

Im Falle der Verfügbarkeit einer ausreichenden Lagerfläche um das Erstobjekt sowie die Möglichkeit zur Nutzung dieser Fläche zur Lagerung der Bauteile und Materialien werden diese in einer effizienten Reihenfolge gelagert und nach Bedarf abtransportiert, sodass keine Mehrkosten sowie keine Lagerproblematik am neuen Standort entstehen (Bild 283).

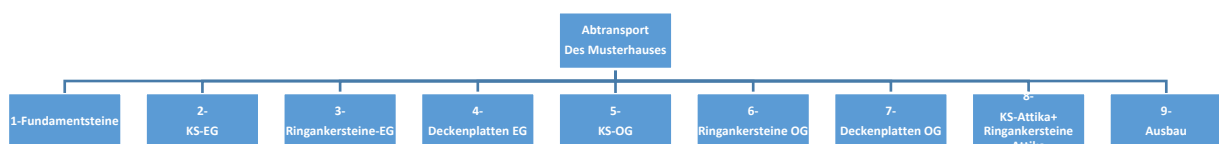


Bild 283 *Effiziente Reihenfolge zum Abtransport des Musterhauses*

Zuerst werden die Bauelemente des Rohbaus passend zu jeder auszuführenden Bauphase (Fundamentsteine und Verbundtechnik, KS-Steine, Deckenplatten etc.) und im Anschluss die Bauteile des Ausbaus abtransportiert. In anderen Fällen bietet sich eine Möglichkeit zur temporären Zwischenlagerung der Bauteile in einer herkömmlichen Mietlagerfläche für die notwendige Mietdauer von etwa 5 Wochen an.

Beim Rückbau des Musterhauses wurde die dort verfügbare Fläche als Zwischenlager genutzt. Die Bauteile des Rohbaus wurden nach Bedarf zum neuen Bauort wirtschaftlich vorteilhaft und effizient abtransportiert.

## 9.5 Auswertung des Rückbaus

In Auswertung der zweiten (kompletten) Demontage des Versuchshauses hat positive Ergebnisse erbracht und die Ansätze des Projektes und der Bauweise bestätigt.

### 9.5.1 Auswertung der Demontage (Ablauf und Qualität):

Die Ausführung der zweiten Demontage des nach der entwickelten Trockenbauweise aufgestellten Versuchshauses (Obergeschoss + Erdgeschoss + Attikageschoss) wurde sowohl

für den Ausbau als auch Rohbau komplett schadensfrei, schnell und sicher durchgeführt. Diesbezüglich wird die Demontagequalität des trocken gebauten Versuchshauses auf dem Versuchsgelände der TU Dresden positiv bewertet.

Beim Abbau aller trockengebauten Bauteile des Rohbaus wurden keinerlei bzw. keine bedeutenden Beschädigungen an den verschiedenen Bauelementen (verschiedene Steinarten, Deckenplatten, Spannglieder etc.) sowie an deren zugehörigen Verbindungsmitteln (Kreuzverbinder aus Polyamid) festgestellt. Lediglich bei den Abdichtungsbahnen und der Schaumglas-anwendung ist mit geringfügigen Verlusten zu rechnen.

Das bereits abgebaute Bauobjekt hat die definierten Anforderungen an eine komplett rückführbare Trockenbauweise bei der Demontage qualitativ erfüllt. Die schnelle Umsetzung des Rückbaues und die Ersparnis an Energieverbrauch spricht eindeutig für die entwickelte Bauweise. Alle Bauteile des Roh- und Ausbaus lassen sich rückstandlos demontieren sowie alle angewendeten Baumaterialien lassen sich sortenrein rückführen.

Wiederum wurde beim zweiten Rückbau des kompletten Gebäudes nachgewiesen, dass der Abbau des nach der hier entwickelten Trockenbauweise im Vergleich zum Abriss der herkömmlich gebauten Bauobjekte in Mauerwerksbauweise mit Ortbetondecken deutlich schneller und lärmärmer sowie umweltfreundlicher ist. Für die gesamte Demontage des Rohbaus (Obergeschoss + Erdgeschoss + Attikageschoss) waren nur 35 Arbeitsstunden (50 % der Montagezeit) erforderlich, welches das Ziel der schnellen Demontierbarkeit erfüllt. Die Arbeitszeit zum Rückbau des teilweise exemplarisch realisierten Ausbaus betrug etwa 23 Stunden (37 % der Montagezeit, welche 63 Arbeitsstunden betrug).

#### 9.5.2 Arbeitskräfte und Arbeitsmittel

Der Abbau des kompletten Versuchshauses (Roh- und Ausbau) wurde hauptsächlich durch zwei Bauarbeiter unter Einhaltung der üblichen Bausicherungsmaßnahmen realisiert. Als wesentliche Hilfsmittel kamen ein Mauerkran zum Versetzen verschiedener Steinarten sowie ein Autodrehkran mit einer speziellen Plattenversetzzange zum Abbau der Deckenplatten zum Einsatz. Zum Abheben der abgebauten Bauteile bzw. der Steine sind Anschlagmittel wie Schlaufen und Steinzange erforderlich. Dazu kommen die herkömmlichen Handwerkzeuge (Spannschlösser, Akkuschauber etc.) zum Einsatz.



## 10 Umsetzung des Experimentalbaus an einen neuen Standort / Prüfung der Baumobilität und Änderung der Bauform

### 10.1 Allgemeines/Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel wird das Versuchshaus nach dem kompletten Rückbau (siehe 9) an einem neuen Standort wieder aufgebaut. Das Hauptziel dabei war, die Möglichkeit zur Anpassung an einen völlig veränderten Grundriss und Ausbau bei gleichzeitiger Veränderung der Gebäudefunktion und Bauform zu prüfen sowie die damit verbundenen Herausforderungen bei Transport und Logistik zu überprüfen und zu bewerten. Es ergab sich dann auch die Möglichkeit, die Trockenbauweise hinsichtlich ungünstiger Witterungsbedingungen einzuschätzen.

Beim neu errichteten zweigeschossigen Forschungsgebäude wurde die Wiederverwendbarkeit aller im Kapitel 9 demontierten Ausbau- und Rohbauteile nachgeprüft. Hierzu wurden alle Bauphasen der Umsetzung des Forschungsgebäudes ausführlich dokumentiert und ausgewertet.

### 10.2 Rahmenbedingungen/ Neue Bauform

Das umzusetzende Forschungsgebäude wird zweigeschossig am neuen Standort (Meißen) aufgebaut und besteht aus Erdgeschoss zur Nutzung als Versuchsraum, einem Obergeschoss mit einem Büroraum, einem Laborraum und einem Technikraum sowie einem abgekürzten Attikageschoss mit Gründach (Bild 284).

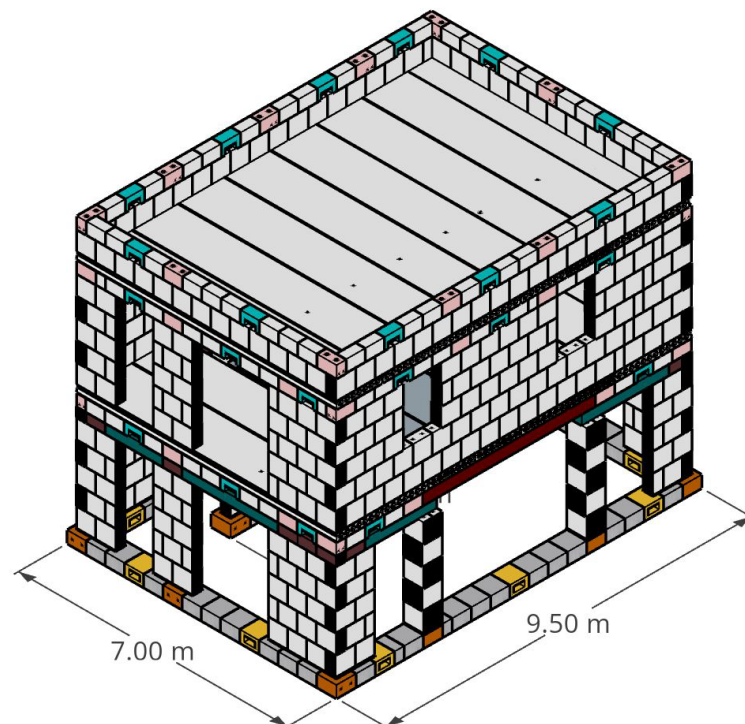


Bild 284 *Planmäßiger Entwurf des Forschungsgebäudes – 3D-Modell des Rohbaus*

Unter Betrachtung der Wiederverwendbarkeit aller Bauteile des demontierten Versuchshauses wurden beim neuen Entwurf des Forschungsgebäudes folgende Veränderungen des Grundrisses und des Tragsystems und somit der Gebäudefunktion vorgesehen:

- Der neue Grundriss verfügt über Außenabmessungen von (L X B = 6,75 m x 9,25 m). Hiermit wird die Länge des Gebäudes im Vergleich zum demontierten Versuchshaus im Kapitel 9 um 1,75 m erweitert.
- Das Erdgeschoss des demontierten Versuchshauses wurde als Wohnfläche geplant (Wohnzimmer+ Küche +Treppe). Dies ist beim neuen Forschungsgebäude als Werkstatt und Versuchsraum vorgesehen (Bild 285)
- Das Obergeschoss des demontierten Versuchshauses wurde als Wohnfläche geplant (Schlafzimmer + Badzimmer und Abstellraum). Bei dem neuen Forschungsgebäude als sind ein Büroraum, ein Laborraum und ein Technikraum in freiem Ausbau vorgesehen (Bild 286).
- Das Attikageschoss des neuen Forschungsgebäudes in Meißen wird analog zum Attikageschoss des demontierten Musterhauses aufgebaut. Wegen bauordnungsrechtlicher Höhenbegrenzung musste die Attika in der Höhe verringert werden (Bild 284).
- Die Tragkonstruktion des Forschungsgebäudes in Meißen wird im Allgemeinen mit dem gleichen Bauprinzip des entwickelten Trockenbauweise durchgeführt. Alle Bauteile werden trocken und demontierbar aufgebaut. Bei den Wänden wird nach wie vor auf den Verbund im Mauerwerk verzichtet. Eine Änderung in der Tragkonstruktion ergibt sich aber aufgrund der notwendigen Öffnungen im EG des Rohbaus (Bild 285). Hierbei werden speziell angefertigte Stahlträger in der Ebene des Ringankers benötigt. Diese Stahlträger werden zu den Ringankersteinen angepasst, sodass der Ringanker einen geschlossenen Ring bildet (Bild 285).
- Eine zweite Modifizierung der Trockenbauweise bestand darin, trocken errichtete Mauerpfeiler aus Quadro-KS-Steinen mit dem gleichen entwickelten Bauprinzip auszuführen. Im Forschungsgebäude wurden zwei KS-Pfeiler ausgeführt. Die Quadro-Steine der Pfeiler wurden durch je vier vertikale Spannglieder zusammenverspannt und stabilisiert. Die Pfeiler dienen als Auflager für die drauf montierten Stahlträger und werden direkt auf den Fundamentstreifen aufgemauert (Bild 285, siehe 10.3) und mit diesem verankert.
- Die Errichtung des Musterhauses am Campusgelände der technischen Universität Dresden erfolgte auf einer vorbereiteten, vor Ort vergossenen Sauberkeitsschicht (siehe 5). Die neue Herausforderung bei der Errichtung des Forschungsgebäudes in Meißen war die Montage der Fundamentstreifen gemäß Trockenbauweise auf unbewehrten Streifenfundamenten, da eine Sauberkeitsschicht in frostsicherer Tiefe nicht möglich war (Reste einer Altbebauung).

- Bei der Errichtung des Erdgeschosses des Forschungsgebäudes musste die Geschosshöhe um 25 cm erhöht werden. Dies ist durch Anwendung von Halbsteinen (H=25cm) und Fertigstürzen über den Öffnungen gelöst worden. Diesbezüglich zeigt die entwickelte Trockenbauweise die Möglichkeit der weiteren Modifizierung der Gebäudegestaltung.

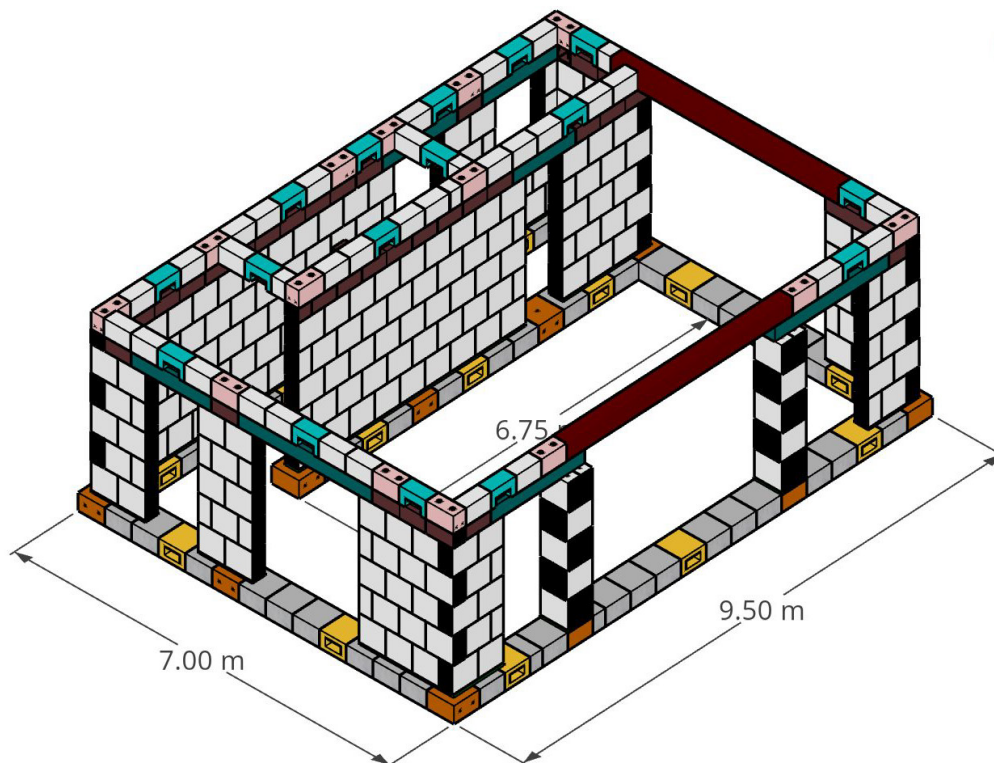


Bild 285 *Veränderter Entwurf des Forschungsgebäude - Grundriss EG - Tragwände und Ringanker als Verbundbau*

- Bei der Errichtung des Obergeschosses des Forschungsgebäudes in Meißen werden reduzierte Aussteifungswände statt langer aussteifender Innenwände vorgesehen. Diese Änderung erlaubt eine flexible Raumlösung in Abhängigkeit vom sich entwickelnden bedarf. Zugleich wird damit eine Gestaltungsvielfalt im Grundriss gezeigt (Bild 286).

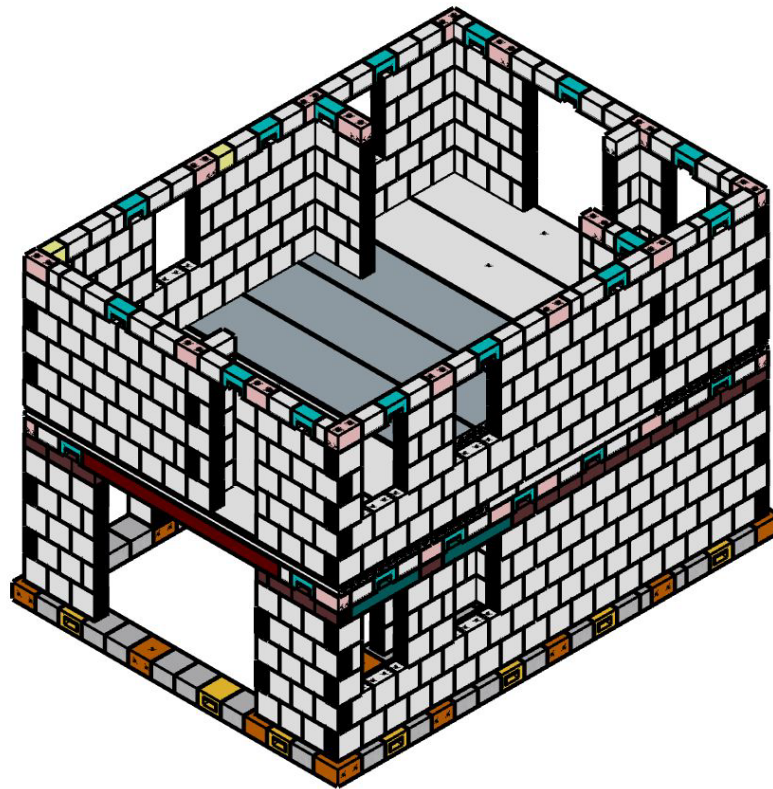


Bild 286 *Veränderter Entwurf des Forschungsgebäude - Grundriss OG - Tragwände und Ringanker als Verbundbau*

- Das entwickelte Trockenbauprinzip wurde bei der Umsetzung des Gebäudes in Meißen in allen Bauphasen eingehalten (siehe 10.3).

### 10.3 Errichtung des Forschungsgebäudes in Meißen

#### 10.3.1 Allgemeines

Das Ziel des Wiederaufbaues des im Kapitel 9 rückgebauten Musterhauses (Erdgeschoss & Obergeschoss & Attikageschoss) war, die Möglichkeiten der Modifikation des modularen Bauprinzips und der Wiederverwendbarkeit für ein Gebäude anderer Funktion (Forschungsgebäude mit Erdgeschoss, Obergeschoss und Attikageschoss) zu prüfen und zu demonstrieren. Hierfür wurden alle bereits bei dem kompletten Aufbau des Wohngebäudes verwendeten Bauteile zum Wiederaufbau des Forschungsgebäudes nach der entwickelten Trockenbauweise wiederverwendet.

#### 10.3.2 Umsetzung des Erdgeschosses

Mit der gleichen Vorgehensweise im Kapitel 5 wurde das Forschungsgebäude in Meißen errichtet. Im ersten Schritt und vor der Montage der Fundamentsteine wurden massive unbewehrte Streifenfundamente hergestellt. Der Untergrund war stark felsig und enthielt Überreste einer Altbebauung. Die unbewehrten Streifenfundamente wurden mit Hilfe von Schalungssteinen auf einer verdichteten Kiesschicht verlegt und vermörtelt. Zum Schluss wurden die Schalungssteine mit Ortbeton verfüllt (Bild 287).



Bild 287 *Vorbereitung der Streifenfundamente zur Herstellung der Aufbauebene für das Forschungsgebäude in Meißen – Schalungssteine mit Ortbeton*



Bild 288 *Ausgleichschicht mit Ausgleichmörtel zum Toleranzausgleich für die Trockenfundamente*

Aufgrund der Unebenheiten der Streifenfundamente war eine Ausgleichschicht aus einem schnell aushärtenden Ausgleichmörtel erforderlich (Bild 288). Somit wird der Untergrund zum Beginn der Errichtung des Rohbaus vorbereitet. Im nächsten Schritt wurde die Fundamentebene des Forschungsgebäudes in Trockenbauweise gebaut. Vor der Montage der Fundamentstreifen wird eine Abdichtungsfolie aus einem geeigneten Material zum Schutz vor aufsteigender Feuchtigkeit verlegt (Bild 289). Analog zum Abschnitt 5.3 bzw. mit der gleichen Bauweise wurden die Fundamentstreifen des Rohbaus laut Verlegplan montiert. Die Montage begann mit dem Aufsetzen eines Fundament-Ecksteins. Danach wurden die horizontalen Spannelemente M20 eingeschraubt und die nächsten Fundamentsteine in jedem Abschnitt mittels Mauerkran und einfacher Anschlagmittel versetzt und eingefädelt (Bild 290).



Bild 289 *Verlegen der Abdichtungsfolie - Montage der Fundamentebene*



Bild 290 *Verlegen der Fundamentsteine mit der horizontalen Verspannung – Montage der Fundamentebene*

Das Verspannen der Fundamentstreifen erfolgt im Spannstein. In den Aussparungen des Spannsteines können die von zwei Seiten zugeleiteten Spannstäbe mittels Spannschlössern (M20, L=100 mm) miteinander verbunden und verspannt werden (Bild 291). Die Vorspannung wird dabei mittels Drehmomentschlüssel handwerklich realisiert und bedarf keiner maschinellen Unterstützung. Die Montage der Fundamentstreifen wird dementsprechend fortgesetzt (Bild 292).



Bild 291 *Verspannungsprozess - Montage der Fundamentebene*



Bild 292 *Bildung der Fundamentstreifen – Montage der Fundamentebene*

Die Eckbildungen bzw. die Querverläufe der Fundamentstreifen waren durch die seitlichen Hülankenker am Eckstein problemlos zu realisieren (Bild 293).



Bild 293 *Fundamente der Außenwände in Trockenbauweise*

Die Wiedererrichtung der Fundamentebene am neuen Standort wurde nach der entwickelten Trockenbauweise problemlos umgesetzt. Die notwendige Arbeitsdauer für diesen Schritt betrug etwa 10 Stunden und wurde von drei Bauarbeiter mit Einsatz des Mauerkrans und einfacher Hebe- und Spanntechnik erledigt.

Nach der Fertigstellung der Montage der Fundamentebene wurden die KS-Wände im Erdgeschoss trocken aufgestellt. Hierfür wurden die KS-Quadro-Steine vom alten Standort auf Anforderung antransportiert. Vor dem Beginn des Vermauerns wurde wieder eine thermische Trennung der KS-Wände von der Fundamentebene durch Anwendung der bereits demontierten Glasschaumstreifen durchgeführt (Bild 294). Danach wurden die KS-Quadro-Steine schichtenweise und laut Verlegplan vermauert. Die vorgesehenen, vertikalen Spannglieder werden an den Ecksteinen der Fundamentsteifen eingeschraubt. Die Spannglieder wurden mit Fortsetzung der Mauerarbeiten verlängert (Bild 295).



Bild 294 Vermauern der KS-Quadro-Steine im EG - Thermische Trennung mit Schaumglasstreifen



Bild 295 Vermauern der KS-Wände im EG

Das Vermauern der KS-Wände aus Quadrosteinen 1/1 wurde planmäßig bis zur 5. Schicht (2,50 m) und entsprechend des veränderten Grundrisses gemäß Trockenbauweise fortgesetzt (Bild 296, Bild 297). Da es keine seitliche Halterung gab, wurde die Stabilität der KS-Wände in dieser Bauphase nur durch das Eigengewicht der Wände nachgewiesen und gewährleistet.

Aufgrund der veränderten Grundrissgestaltung des Forschungsgebäudes ergab sich eine weitere Besonderheit durch das Vermauern von KS-Pfeilern unter Anwendung der Quadro-KS-Steine mit der gleichen Spanntechnik zur Stabilisierung. Diesbezüglich wurden an den vorgeplanten Stellen (an den ausgewählten Fundamentecksteinen) passende Bohrungen (100-120 mm) für die Innengewindeanker gebohrt. Die Innengewindestifte wurden mit einem passenden Klebematerial eingeklebt und in der angegebenen Aushärtungsdauer aushärten gelassen (Bild 298). Nach der Aushärtung wurden die vertikalen Spannglieder der KS-Pfeiler eingeschraubt (Bild 299).



Bild 296 Fortsetzung des Vermauerns der KS-Quadro-Steine im EG



Bild 297 KS-Wände im EG nach Veränderung der Bauform



Bild 298 Aufmauern der KS-Pfeiler - Einkleben der Innengewindestifte der vertikalen Spannglieder an den Fundamenteckstein



Bild 299 Einschrauben der vertikalen Spannglieder für die KS-Pfeiler

Vor dem Aufmauern der KS-Steine der Pfeiler wurde eine thermische Trennschicht (5 cm) aus Kimmsteinen verlegt (Bild 300). Danach wurden die Quadro-Steine der Pfeiler mit abwechselnder Richtung schichtenweise versetzt (Bild 301).





Bild 300 *Aufmauern einer thermischen Trennschicht unter den KS-Pfeilern aus Kimmsteinen*



Bild 301 *Vermauern der KS-Pfeiler*

Die KS-Pfeiler wurden an den oberen Steinschicht vorgespannt. Hierfür wurden Unterlegscheiben und Muttern M20 angewendet. Eine weitere Befestigung Spannanker erfolgte über die Stahlträger, die wiederum zugfest mit den Ringankersteinen über EG verbunden sind (Bild 303).

Aufgrund der Änderung der Gebäudenutzung wird eine Innenraumhöhe des Erdgeschosses von etwa 3,05 m benötigt. Hierfür wird die 6. Reihe aus KS-Steinen des Formates LxBxH= 50x25x25 cm vermauert (Bild 303). An den Stellen der Öffnungen werden zur Einhaltung der Höhe der Türen und Fenster fertigbetonierte Stürze montiert. Die Stürze wurden auf der Baustelle unter Anwendung von Schalungssteinen und Bewehrungsstahl betoniert und nach der Aushärungszeit angehoben und trocken verbaut (Bild 302). Die notwendige Arbeitsdauer für die Errichtung der KS-Wände mit den KS-Pfeilern und Stürzen betrug etwa 12 Stunden und wird durch drei Bauarbeiter mit Einsatz des Mauerkrans und einfacher Hebe- und Spanntechnik ausgeführt.



Bild 302 *Erhöhung des Erdgeschosses mittels Einsatzes von KS-Halbsteinen und Stürzen*



Bild 303 *Errichtung des EG nach dem Prinzip des Verbundbaus - Montage der Stahlträger in der Ringankerebene*

Im nächsten Schritt wurde die Ringankersteine montiert und ein geschlossener Ring über der Außenmauer hergestellt. Die Montage des Ringankerteiles aus Betonsteinen erfolgte analog zum Abschnitt 5.5.3. Das Verspannen der Ringankerabschnitte in horizontaler Richtung wurde wieder unter Verwendung von 4 Spannschlössern M16 in den seitlichen Aussparungen der Spannsteine (jeweils 2 Spannschlösser je Seite) durchgeführt. Dafür war für jede Seite ein Linksgewindestift (L~ 100 mm) zum Verspannen der Ringankersteine zwischen zwei Ecksteinen notwendig. Der Ringanker wurde in vertikaler Richtung an den jeweiligen Ecksteinen mit den darunter befindlichen KS-Wänden durch die vertikalen Spannglieder M20 zusammengespannt (Bild 304). Zum Abschluss der Montage der Ringankerebene wurden die Stahlträger mit den benachbarten Ringankerabschnitten verbunden und mit den horizontalen Spanngliedern M16 durch die vorgesehenen seitlichen Löcher an den Trägerstirnseiten verspannt (Bild 305). Mit der so realisierten Verspannung- und Verbindungstechnik verfügt das Tragsystem (Ringanker, KS-Wände und Fundamentebene) über die notwendige, ausreichende Stabilität vor dem Verlegen der Deckenplatten. Die Arbeitsdauer für die Montage der Ringankerebene (Ringankerbetonsteine + Stahlträger) betrug etwa 12 Stunden a drei Bauarbeiter mit Einsatz des Mauerkrans und einfacher Hebe- und Spanntechnik (36 Mannstunden).



Bild 304 *Montage des Ringankers im EG - Montage der Ringankersteine*



Bild 305 *Montage des Ringankers im EG - Endmontage der Stahlträger in der Ringankerebene und Verbindung mit den Ringankersteinen*

Nach der Endmontage der Ringankerebene wurden die Deckenplatten über dem Erdgeschoss verlegt. Zur Lastverteilung und Vermeidung von Lastkonzentrationen auf den einzelnen Ringankersteinen werden Hartgummistreifen unter den Deckenplatten gelegt (Bild 306). Die rückgebauten Spannbetonplatten vom Typ BRESPA-Decken A20B (Plattenstärke 20 cm) wurden laut Verlegplan mittels eines Autokranes bewegt und trocken montiert. Die Anlieferung erfolgte auf Anforderung von dem Zwischenlager im TU Campus.



Bild 306 *Montage der Deckenplatten über EG - Verlegen einer Hartgummischicht zur Lastverteilung*



Bild 307 *Verlegte Deckenplatten über EG*

Abhängig von den neuen Positionen der vertikalen Spannglieder mussten die Bohrungen in den Deckenplatten auf der Baustelle neu gebohrt werden. In Endlage wurden die Platten mittels Unterlegscheiben und M20-Muttern nach unten mit dem Ringanker verspannt (Bild 307). Die Arbeitsdauer für die Montage der Deckenplatten über EG betrug etwa 4 Stunden und wurde von zwei Bauarbeiter mit Einsatz des Mauerkrans und einfacher Hebe- und Spanntechnik ausgeführt.

Die Umsetzung des Erdgeschosses (Fundamentebene, KS-Wände, Ringankerebene und Deckenplatten) nach der entwickelten Trockenbauweise war am neuen Standort problemlos umsetzbar.

### 10.3.3 Umsetzung des Obergeschosses und Attikageschosses

Die Errichtung des Obergeschosses erfolgte unter Wiederverwendung der im Kapitel 9.3 rückgebauten Bauelemente bzw. mit Ergänzung neuer, fehlender Bauelemente. Zum Aufbau des Obergeschosses kamen die im Kapitel 9.3 abgebauten Quadro-Steine, Ringankermodulsteine sowie die Spannbeton-Decken über OG zum Einsatz.

Vor dem Beginn der Mauerarbeiten im Obergeschoss wurde eine Toleranz-Ausgleichsschicht aus belastbaren Hartgummistreifen auf die Deckenplatten unter der ersten KS-Reihe der OG-Wände verlegt. Hierzu wurden Streifen zurechtgeschnitten und an den Stellen der Spannglieder durchgelocht. Die Hartgummistreifen wurden an den Bedarfsstellen je nach erforderlicher Stärke verlegt. Die vertikalen Spannglieder M20 wurden meterweise über entsprechende Verlängerungsmuffen M20 verlängert. Dann wurden die Quadro-Steine mittels Mauerkran und laut dem Verlegplan für das Obergeschoß versetzt (Bild 308).

Das Aufmauern der Quadro-Steine im OG erfolgte mit Hilfe von Schnur, Wasserwaage und Winkel.

Auf die Ausbildung der Mauerkreuzungen an den Stellen der vorgeplanten reduzierten Aussteifungswände (Vorlagen) wurde besonders geachtet. Zur Absicherung der Aussteifungswände werden diese am Anfang und Ende mit Spanngliedern verspannt (Bild 310). Somit sind die Aussteifungswände stabil und erfüllen ihre Funktion. Die notwendige Arbeitsdauer für die KS-Wände im OG betrug etwa 10 Stunden. Die Arbeiten wurden von drei Bauarbeiter mit Einsatz des Mauerkrans und einfacher Hebe- und Spanntechnik ausgeführt (30 Mannstunden).



Bild 308 *Vermauern Der KS-Wände im OG - Verlängern der vertikalen Spannglieder und Einfädeln der Quadro-Steine*



Bild 309 *Fortsetzung des Vermauerns der KS-Wände im OG*



Bild 310 *Vermauern der verkürzten Aussteifungswände im OG nach dem gleichen Bauprinzip*



Bild 311 *Montage des Ringankers im OG - Anwendung von Stützsystemen im Bereich der Öffnungen*

Im nächsten Bauschritt erfolgt die Montage des Ringankers im Obergeschoss des Forschungsgebäudes unter Einsatz der Steine vom ursprünglichen Standort (TU Campus). Diese wird nach dem gleichen Prinzip wie bei der Montage des Ringankers im dortigen Versuchshaus (siehe Abschnitt 5.5.3) durchgeführt. Zum Aufbau des Ringankers werden die abtransportierten, rückgebauten Ringankersteine des Versuchshaus wiederverwendet (siehe 9.3). Nach Vervollständigung der Steinverlegung sowie dem Verspannen in horizontaler Richtung erfolgt das vertikale Vorspannen des Ringankers zu den vermauerten KS-Wänden. Dadurch werden die Wandscheiben (KS-Wände und drauf liegender Ringanker) erst stabilisiert. Dafür wird der

Ringanker an den jeweiligen Ecksteinen mit den KS-Wänden durch die vertikalen Spannglieder M20 zusammengespannt. Die Ausführung des Ringankers im OG betrug etwa 12 Stunden und wird durch drei Bauarbeiter mit Einsatz des Mauerkrans und einfacher Hebe- und Spanntechnik ausgeführt.



Bild 312 *Fertigmontage des Ringankers im OG – Verspannen zu den stehenden KS-Wänden*



Bild 313 *Verlegen der Spannbetondeckenplatten über OG - Abdichtungstreifen unter dem Attikageschoss*

Nach Fertigstellung des Ringankers wurden die Spannbeton-Hohlplatten wie in Abschnitt 5.5.4 beschrieben verlegt. Hierbei kamen die im Abschnitt 9.3 rückgebauten Spannbetonplatten von BRESPA zum Einsatz. Gebraucht wurde auch aufgrund der Gebäudeänderung eine weitere Deckenplatte (LxBxH= 675 x 55x 20 cm), welche vor Ort bewehrt und betoniert wurde. Die Verlegung der Spannbetondeckenplatten (von DW-Systembau) über dem Obergeschoss wurde nach der entwickelten Trockenbauweise problemlos durchgeführt. Die Deckenplatten wurden in diesem Bauschritt durch drei Bauarbeiter und mit Hilfe eines Autokranes in etwa 5 Arbeitsstunden verlegt (15 Mannstunden). Die Anlieferung der bereits einmal verwendeten Deckenplatten erfolgte auf Anforderung. Eine Vorlagerung auf dem Baugrundstück war nicht möglich. Die Anlieferung musste stundenkonkret erfolgen, da das Baugrundstück an einer viel befahrenen Bundesstraße liegt.

Direkt nach der Verlegung der Spannbetonplatten wurden die erforderlichen Steine (KS-Halbsteine + Ringankersteine) für das Attikageschoss bereitgestellt (Bild 313). Im letzten Schritt der Umsetzung des Rohbaus des Forschungsgebäudes wurde planmäßig ein kurzes Attikageschoss mit einer Höhe von etwa 60 cm bestehend aus einer KS-Schicht (25cm), einer Ringankerschicht (30cm) und einer thermischen Entkopplung aus belastbaren Schaumglasplatten (5 cm) aufgebaut.

Vor dem Beginn der Steinverlegung wurde unter den Schaumglasstreifen eine Dachabdichtungsfolie als Verbesserungsvorschlag für den Feuchteschutz verlegt und an den Gebäudeecken angeschweißt (Bild 314). Zur Vermeidung von Wärmebrücken im Attikabereich wurden wieder die Schaumglasstreifen verlegt. Die vertikalen Spannglieder M20 wurden mittels Verlängerungsmuffen M20 bis auf der Ringankeroberkante verlängert. Anschließend wurde die KS-Schicht aus KS-Halbsteinen mittels des Mauerkrans und der Steinzange versetzt. Die

durchgebohrten Halbsteine wurden auf die vertikalen Spannglieder aufgefädelt und laut dem Verlegplan positioniert (Bild 315).



Bild 314 *Thermische Trennung des Attikageschosses mittels 5 cm Schaumglasstreifen*



Bild 315 *Errichtung des Attikageschosses - 25 cm KS-Reihe*

Nach dem Versetzen der KS-Schicht wurde der Ringanker aufgebaut. Dies erfolgte nach dem gleichen Bauprinzip wie bei der Montage des vorherigen Ringankers im OG. Nach Vervollständigung der Ringankersteine sowie des Verspannens in horizontaler Richtung erfolgte das vertikale Vorspannen des Ringankers zu der verlegten KS-Schicht. Dadurch wird die Attika (KS-Schicht und draufliegender Ringanker) erst stabilisiert. (Bild 316). Nach der Fertigstellung des Attikageschosses wurde eine Abdichtungslage über dem Dachgeschoss zum temporären Feuchtschutz vervollständigt (Bild 317).



Bild 316 *Errichtung des Attikageschosses - Ringankerebene*



Bild 317 *Errichtung des Attikageschosses - Rohbaufertigstellung*

Die Umsetzung des Attikageschosses am neuen Standort war nach der entwickelten Trockenbauweise problemlos ausführbar. Die dafür benötigte Arbeitsdauer betrug beim Einsatz von drei Bauarbeitern und mittels Mauerkran etwa 10 Arbeitsstunden (30 Mannstunden).

Mit der Fertigstellung des Attikageschosses wurde der Rohbau des zweigeschossigen Forschungsgebäudes unter Verwendung gebrauchter Bauteile am neuen Standort mit einer Gesamthöhe von 7,2 m erfolgreich abgeschlossen. Der Zeitraum zur Ausführung der Bauarbeiten des Rohbaus war zwischen November und Dezember im Jahr 2020, wobei die Temperaturen an meisten Tagen während der Bauphasen im Minusbereich lagen. Die Erstellung des Rohbaus des Forschungsgebäudes (Erdgeschoss, Obergeschoss und Attikageschoss) nach der entwickelten Trockenbauweise war am neuen Standort insgesamt problemlos, wetterunabhängig und schadenfrei möglich.

Die dafür benötigte Bauzeit betrug bei drei Bauarbeitern und unter Einsatz eines Mauerkranes und zeitweise eines Autodrehkranes etwa 76 Arbeitsstunden (228 Mannstunden). Die geplanten Änderungen an Funktion und Bauform des Gebäudes wurden zielgerecht vollständig und erfolgreich realisiert (Bild 318).



Bild 318 *Fertiggestellter Rohbau des Forschungsgebäudes*

### 10.3.4 Remontage des Ausbaus

Das Ziel des Wiederaufbaus des Ausbaus war die Überprüfung der Wiederverwendbarkeit der bereits im Kapitel 9.2 rückgebauten Ausbausysteme, welche zur Anwendung im Rahmen der entwickelten Trockenbauweise modifiziert und ausgeführt wurden. Die Remontage des Ausbaus fokussiert auf den Attika- und Dachaufbau sowie auf den Fassadenausbau als wichtigste Ausbaubestandteile bei der Errichtung des Forschungsgebäudes.

Nach der gleichen Vorgehensweise wie bei der ersten Montage beginnt die Remontage des Dachaufbaus mit der Verlegung einer Dampfsperre aus angeschweißten und verschweißten Kunststoffbahnen (Bild 319), die sehr robust ist und den Nachteil der Folie bei dem Erstaufbau im TU-Campus beseitigt. Die Dämmplatten (10 cm) sowie die Gefälledämmung konnten nachfolgend auf der Dampfsperre gemäß Verlegplan problemlos verlegt werden (Bild 320).



Bild 319 *Verlegung der Dampfsperre aus angeschweißten PVC-Bahnen*



Bild 320 *Verlegung der Dämmplatten und Gefälledämmung*

Die größte Herausforderung des Dachaufbaus liegt bei der Wiederverwendung der bereits im Abschnitt 9.2 zerlegten Folien der Dachabdichtung. Die drei Abdichtungsbahnen wurden ausgerollt und mit einer neuen vierten Bahn aufgrund der Längenveränderung des Forschungsgebäudes erweitert (Bild 320, Bild 321), Damit konnten auch die geringen Längenverluste infolge des Auftrennens kompensiert werden. Danach wurden die ausgerollten Bahnen mit Reinigungsmittel gereinigt und dann mit dem Schweißautomat ordnungsgemäß verschweißt (Bild 322).

Die Dachabdichtung muss nach dem Schweißvorgang in der Kehle an der Attika gegen Verrutschen befestigt werden (Bild 323). Die Schweißschnur oberhalb der Befestigungsschiene bewirkt als „Keil“ über die Lastverteilung eine dauerhafte Fixierung der Kehle. Ecken und Bahnenstöße werden grundsätzlich anschließend manuell verschweißt.





Bild 321 *Verlegung einer vierten Abdichtungsbahn zur Anpassung der Längenänderung des Forschungsgebäudes*



Bild 322 *Verschweißen der verlegten Abdichtungsbahnen mit dem speziellen Schweißautomat*



Bild 323 *Befestigung der Abdichtungsbahnen mit einer Befestigungsschiene am Attikaunterkante*



Bild 324 *Verlegung der Abdichtungsbahnen über den Attikarohbau*

Die Bahnen im Attikabereich werden ebenfalls mit Reinigungsmittel gereinigt und dann mit dem Schweißautomat verschweißt. Die entstehenden Ecken und Bahnstöße werden grundsätzlich anschließend manuell verschweißt. Die Ecken von Überlappungen, bei Bahnteilungen in der Attika, werden großzügig vorrondet und dann manuell mit Heißluft verschweißt. Die Ecken werden im Anformungsschritt angepasst. Es sollte auf mindestens 15 cm Überlappung zur nächsten Bahn nach der Ecke geachtet werden (s. auch Abschnitt 7.2).

Zum Abschluss der Remontage des Dachaufbaus wurde das Gründach aufgebaut. Zuerst wurde eine Schutzvliesmatte als erste Lage unter dem Gründachaufbau verlegt. Darauf wurden Wasserspeichermatten angeordnet (Bild 325). Als weitere Schicht folgte ein Trennvlies auf den Wasserspeichermatten. Abschließend wurde zur Dachbegrünung das gewünschte Vegetationssubstrat geschüttet (Bild 326).



Bild 325 *Aufbau des Gründaches-  
Schutzvliesmatte/  
Wasserspeichermatte/ Vegetations-  
substrat zur Begrünung des Daches*



Bild 326 *Forstsetzung- Aufbau des  
Gründaches*

Somit wurde der Wiederaufbau der Dachabdichtung bei voller Wiederverwendbarkeit der einzelnen Materialien erfolgreich ausgeführt.

Die Remontage des Fassadensystems aus Stegträgern und Cedral Paneelen wurde ebenfalls unter Anwendung der im Kapitel 9.2 demontierten Ausbauteile sowie durch den Einsatz von neuen Stegträgern und Paneelen ausgeführt und erweitert.

Die Remontage des Fassadensystems aus Stegträgern und Cedral Paneelen begann mit der Befestigung der Stegträger am Rohbau. Dazu wurden Winkelverbinder mit speziell demontierbaren Schrauben für Kalksandstein sowie Holzschrauben angewendet (Bild 327). Nach der Befestigung der Stegträger wurden Holzlatten als Untergrund zur späteren Befestigung der Fassadenpaneele an der äußeren Seite der Stegträger montiert (Bild 328). Danach erfolgte die Montage der Fenster- und Türleibungen. Hierfür wurden die Stege der Stegträger an den Stellen der Leibungen durch passende OSB-Plattenstreifen verschlossen, sodass die Tragkonstruktion zur Montage der Türen und Fenster gegeben war (Bild 329).

Die Remontage des Fassadensystems wird mit dem Verlegen der Fassadendämmung zwischen den Stegträgern sowie Anbringen der Dichtungsbahnen für einen besseren Feuchteschutz an den Holzlatten fortgesetzt (Bild 330).



Bild 327 Fassaden-Remontage: Montage der Stegträger- Befestigung der tragenden Winkerverbinder am KS-Stein durch demontierbare Schrauben



Bild 328 Forstsetzung- Remontage der Holzlatten an den Stegträgern als Grundlage zur Montage der Eternitplatten- Verlegen der Fassadendämmung zwischen den Stegträgern



Bild 329 Fassaden-Remontage: Montage der Fensterlaibungen durch Er-schließung der Stegträger mit OSB-Platten



Bild 330 Remontage des Fassadensystems- Anbringen der Dichtungsbahnen an den Holzlatten

Die Ausführung des Fassadensystem vom CEDRAL begann mit der Remontage der zugehörigen Eck- und Startprofile (Bild 331). Nach der Vorbereitung der notwendigen Systemprofile wurde mit dem Verlegen der Fassadenpaneele begonnen. Das erste Paneel liegt horizontal und direkt an dem Startprofil und wird mit passenden Systemschrauben in einem Abstand von etwa 3 cm vom oberen Rand des Paneels an den unterliegenden vertikalen Holzlatten befestigt (Bild 332).



Bild 331 *Remontage des Fassadensystems- Montage der Eckprofile und Startprofile*



Bild 332 *Remontage des Fassadensystems- Montage der Eternitplatten*

Das Verlegen und die Befestigung der Paneele wurde bis zum Attikabereich fortgesetzt (Bild 333).



Bild 333 *Fortsetzung des Fassadenausbaus*



Bild 334 *Positionierung Fenster*

Die demontierten Fenster und Fenstertüren konnten problemlos wieder eingebaut werden (Bild 334).

Auf weitere Ausbaugewerke musste aus Zeit- und Kostengründen verzichtet werden.



Bild 335 Ansicht des Forschungsgebäudes von Nord-Ost

## 10.4 Auswertung der Errichtung des Forschungsgebäudes

### 10.4.1 Auswertung der Rückführbarkeit (Ablauf und Bauqualität):

Die Ausführung der Bauarbeiten zur Umsetzung des Forschungsgebäudes (Erdgeschoss u. Obergeschoss u. Attikageschoss) wurde nach der entwickelten Trockenbauweise am neuen Standort problemlos, schnell, bausicher, wetterunabhängig, umweltfreundlich und schadenfrei durchgeführt. Diesbezüglich wurden der Abtransport des demontierten Versuchshauses, welches auf dem Versuchsgelände Stadtgutstrasse aufgebaut war, sowie der Wiederaufbau als Forschungsgebäude an einem neuen Standort (Meißen) praktisch umgesetzt und durchgängig positiv bewertet.

Beim Rückbau des trockengebauten Forschungsgebäudes hat sich durch die entwickelte Trockenbauweise nochmals bestätigt, dass die Errichtung des Gebäudes nach der Trockenbauweise im Vergleich zu der herkömmlichen Bauweise mit Steinvermörtelung und mit Ortbetondecken deutlich schneller ist und kaum Wetterabhängigkeit aufweist. Für den gesamten Rückbau des Rohbaus (Erdgeschoss & Obergeschoss & Attikageschoss) waren nur 76 Arbeitsstunden für ein Bauteam von drei Arbeitern erforderlich, welches nach der herkömmlichen Bauweise nicht realisierbar wäre.

Bei der Wiedererrichtung des Rohbaus des Forschungsgebäudes wurden keinerlei bedeutenden Beschädigungen an den verschiedenen, wieder zu verbauenden Bauteilen (verschiedene Steinarten, Deckenplatten, Spannglieder etc.) sowie an deren zugehörigen Verbindungsmitteln aufgenommen. Mit dem so entstandenen Bauobjekt konnten die Anforderungen an eine komplett demontierbaren, rückführbare Trockenbauweise bei der Remontage qualitativ erfüllt werden. Die schnelle Umsetzung bzw. dessen diesbezügliche Ersparnis an Energieverbrauch und Reduzierung der resultierenden Bauabfälle zeigt die Effizienz und die Umweltfreundlichkeit der entwickelten Trockenbauweise.

Mit der Wiedererrichtung des Forschungsgebäudes an einem neuen Standort wurde die Ausführung der notwendigen Anpassungen an Grundriss und Ausbau bei der Veränderung der Gebäudefunktion und Bauform auf der Grundlage des Modulsystems unter Beweis gestellt. Somit weist die entwickelte Trockenbauweise die erforderliche Flexibilität bezüglich der Bauform- und Nutzungsänderung des Bauobjektes auf.

Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass bei guter Planung der Lagerung und der Abforderung der Bauteile bei der Remontage eine hohe Effizienz im Bauprozess erreicht werden kann. Die Anlieferung erfolgte auf stundengenauen Abruf der Bauteile jeweils in LKW-Ladungen. Dadurch konnte eine platz- und zeitraubende Lagerung auf der Baustelle der Remontage vermieden werden (Delivery On Demand).

#### 10.4.2 Arbeitskräfte und Arbeitsmittel

Die Wiedererrichtung des Forschungsgebäudes wurde hauptsächlich durch drei Bauarbeiter unter Einhaltung der üblichen Bausicherungsmaßnahmen realisiert. Als wesentliche Hilfsmittel kamen ein Mauerkran zum Versetzen verschiedener Steinarten sowie ein Autodrehkran mit einer speziellen Plattenversetzzange zum Zeitpunkt der Deckenmontage zum Einsatz. Zum Abheben der Bauteile bzw. der Steine sind Anschlagmittel wie Schlaufen und Steinzange erforderlich. Weiter kommen die herkömmlichen Handwerkzeuge (Spannschlösser, Bohrmaschinen, Gummihammer, Schnur, Wasserwaage und Richtscheit etc.) im Gebrauch. Die benötigte Arbeitsdauer zur Wiedererrichtung des Forschungsgebäudes in Meißen betrug etwa 76 Arbeitsstunden (228 Mannstunden).

## 11 Allgemeine Auswertung und Ausblick

### 11.1 Auswertung der entwickelten Trockenbauweise - Rohbau und Ausbau

Die im Rahmen dieser Arbeit, entwickelte und anwendbare Trockenbauweise beim Aufbau von demontierbaren, energiehocheffizienten, massiven Musterhäusern wurde in der Praxis durch die Errichtung und den Rückbau eines vorgeplanten Experimentalbaus sowie eines Forschungsgebäudes erfolgreich erprobt.

Im Laufe dieser Arbeit wurden verschiedene Phasen (Bild 336) durchlaufen. In der Planungsphase wurden die notwendigen Neuentwicklungen aller benötigten modularen Bauteile zur Ausführung der vorgeplanten Experimentallbauten zusammengeführt, Varianten abgewogen und Vorzugslösungen festgelegt. Dabei wurden am Markt befindliche Lösungen geprüft und angepasst. Hierfür wurden die verschiedenen, einzelnen Bauelemente sowie Konstruktionsdetails entworfen und entwickelt.

Bezüglich der Bauelemente des Rohbaus (Fundamentebene, Mauerwände, Ringanker und Deckenplatten) wurden im Rahmen der entwickelten Trockenbauweise demontierbare bzw. wiederverwendbare Einzelbauteile konstruiert. Für die Errichtung der tragenden, demontierbaren Mauerwerkswände wurde ein Wandmodulstein aus Kalksandstein mit einem zugehörigen Kreuzverbindersystem zur späteren Installation von Ausbausystemen entwickelt. Zur Montage der Fundament- und der Ringankerebenen wurden spezielle Betonmodulsteine angefertigt und angewendet. Bei den Deckenplatten kam ein modifiziertes System von Spannbeton-Hohlplatten zum Einsatz. Alle verwendeten Bauteile wurden planmäßig trocken verbaut und mittels vorgesehener, einfacher Spanntechnik stabilisiert. Die Übertragung von Horizontalkräfte erfolgt dann planmäßig über Reibung.

Zur Überprüfung sämtlicher Bauteilentwicklungen wurden im Voraus Voruntersuchungen zur Testung der erforderlichen Stabilität und Tragfähigkeit der demontierbaren Bauelemente durchgeführt. Die Auswertung der durchgeführten Biegezugversuche am Ringankersystem sowie der Zugversuche an den hergestellten Kreuzverbindern zeigten die erforderliche Tragfähigkeit. Im Anschluss wurden alle benötigten Mengen an Bauteilen entsprechend der Bauplanung angefertigt und am ersten Baustandort (Gelände des Lehrstuhls Tragwerksplanung an der TU Dresden) angeliefert.

In den Ausführungsphasen des Experimentalbaus sind verschiedene Varianten in Betracht gezogen worden. Zuerst wurde der Experimentalbau mit einem halben Kellergeschoß bis Decke über Erdgeschoß im Rohbau aufgebaut. Mit der halben Unterkellerung auf OK Gelände wurden die wichtigen Lösungen bezüglich der thermischen Entkopplung und Abdichtung gegen Wasser erprobt. Bei der Errichtung des Erdgeschosses wurden die Wandmodulsteine mit den zugehörigen Kreuzverbindern praktisch umgesetzt. Nach der Fertigstellung des Rohbaus wurde ein Belastungsversuch zur Prüfung der Standsicherheit auf Bemessungslastniveau in situ durchgeführt. Aus den ausgewerteten Versuchsdaten ging deutlich hervor, dass sich das errichtete Versuchshaus für die Übertragung der Geschosslasten als mehrgeschossiges Modell eignet. In der nächsten Phase wurde dann der Rohbau des 1 1/2 -geschossigen Gebäudes demontiert. Das Ziel des ersten Rückbaues war, zeitig ggf. erforderliche Schlussfolgerungen für eine spätere Umsetzung an einen endgültigen Standort hinsichtlich der Demontierbarkeit und der Wiederverwendbarkeit der Bauteile und Materialien des Rohbaus ziehen zu können. Hierbei wurde eine schnelle, schadenfreie Demontage der verlegten Deckenplatten sowie der verspannten Ringankersteine bzw. der vermauerten KS-Modulsteine und deren zugehörigen Kreuzverbinder nachgewiesen. Alle Bauteile wiesen nach dem Rückbau keinerlei Schäden auf. Somit konnte die erste Demontierbarkeit des Versuchshauses erfolgreich nachgewiesen werden.

In der nächsten Bauphase wurde der Experimentalbau, bestehend aus einem Erdgeschoss, Obergeschoss sowie Attikageschoss wieder aufgebaut. Durch den Wiederaufbau wurde die Rückführbarkeit und Wiederverwendbarkeit der in der ersten Bauphase bereits demontierten Bauteile durch die Wiedererrichtung eines zweigeschossigen Experimentalbaus in gleicher Form und Struktur erfolgreich nachgewiesen. Bei der Wiedererrichtung des Rohbaus des Experimentalhauses wurden keinerlei bzw. keine bedeutenden Beschädigungen an den verschiedenen Bauteilen (verschiedene Steinarten, Deckenplatten, Spannglieder etc.) sowie an deren zugehörigen Verbindungsmitteln festgestellt. Das damit entstandene Bauobjekt hat die Anforderungen an eine komplett demontierbare und rückführbare Trockenbauweise bei der Remontage in hoher Qualität nachgewiesen. Die schnelle Umsetzung bzw. dessen diesbezügliche Ersparnis an Energieverbrauch bringt einen hocheffizienten umweltfreundlichen Aspekt der Bauweise zum Ausdruck. Am wiedererrichteten Experimentalhaus wurden die entwickelten Ausbausysteme komplett (Dach- und Attikaaufbau) bzw. nur teilweise exemplarisch (Fassadenausbau und Fußbodenaufbau) realisiert. Der gesamte Ausbau des Experimentalbaus konnte regelkonform und problemlos montiert werden.



Bild 336 *Vorgehensweise bei der Entwicklung der praktischen Anwendbarkeit der Trockenbauweise*



Im letzten Ausführungsphase der vorgestellten Arbeit wurde aus dem demontierten Versuchshaus (nach dem zweiten Rückbau) ein Forschungsgebäude an einem neuen Standort wiederaufgebaut. Hiermit lag der Fokus auf der Prüfung und Bewertung der Ausführung der notwendigen Anpassungen an Grundriss und Ausbau bei der Veränderung der Gebäudefunktion und Bauform sowie der damit verbundenen Herausforderungen bei Transport und Logistik (Baumobilität). Dabei wurde ein weiterer Vorteil der Trockenbauweise mit betrachtet, nämlich die weitgehende Wetter- und Temperaturunabhängigkeit. unterschiedenen Wetterbedingungen auf den verschiedenen Bauphasen und dem Bauzeitverlauf mitberücksichtigt. Zur Überprüfung der Wiederverwendbarkeit der Ausbausysteme wurde am errichteten Forschungsgebäude der demontierte Dach- und Attikaaufbau wiederaufgebaut. Weiter wurden die Fenster und Fenstertüren wieder verwendet und eingebaut. Die Remontage der genannten Ausbausysteme konnte ebenfalls erfolgreich durchgeführt werden.

Die Auswertung und Analyse der gewonnenen Ergebnisse zeigen deutlich auf, dass die Errichtung von massiven, demontierbaren Musterhäusern in einer trockenen Bauweise durch den Verzicht auf Stein-Mörtel-Verbund sowie baustellenseitigen Ortbeton bzw. durch die Anwendung des entwickelten, wiederverwendbaren Komplettsystems, für den Roh- und Ausbau, bausicher, schadenfrei und umweltfreundlich realisierbar ist.

Bei dem Aufbau und Rückbau sowie der Wiedererrichtung des Rohbaus der Experimentalbauten wurden keinerlei bzw. keine bedeutenden Beschädigungen an den unterschiedlichen Bauteilen (verschiedene Steinarten, Deckenplatten, Spannglieder etc.) sowie an deren zugehörigen Verbindungsmitteln festgestellt. Die errichteten Bauobjekte haben diesbezüglich die gezielten Anforderungen an die komplett demontierbare, rückführbare Trockenbauweise bei der Montage und Remontage in hoher Qualität erfüllt. Die ausgeführten Bauarbeiten waren im Rahmen dieser Arbeit auf alle Jahreszeiten (Sommer, Winter) verteilt und wurden bei verschiedenen Wetterbedingungen (Kälte, Hitze, Frost, Schnee etc.) durchgeführt. Somit hat die entwickelte Bauweise kaum Wetterabhängigkeit gezeigt, was sich auf die Bauzeit des Bauobjektes sehr positiv auswirkt. Die schnelle Umsetzung bzw. dessen diesbezügliche Ersparnis an Energieverbrauch und Reduzierung der resultierenden Bauabfälle zeigen hinsichtlich Effizienz und Umweltverträglichkeit erhebliche Vorteile gegenüber traditionellen Bauweisen auf. Aus vorherigen, vom Verfasser gewonnen positiven Ergebnissen bezüglich der Anwendbarkeit des Recyclingbetons zum Einsatz bei der Errichtung von modularen Wohneinheiten ist die Modifizierung auf die bereits entwickelte Trockenbauweise hinsichtlich der Produktion verschiedener Bestandteile des Rohbaus (RC-Deckenplatten, RC-Betonsteine, Recyclingkalksandsteine) realisierbar. In diesem Sinne und beziehungsweise auf den Rohstoffverbrauch sowie den Energieverbrauch zeigt sich die entwickelte Trockenbauweise als sehr sparsam und effizient.

Die Ausführung sämtlicher Bauphasen (Aufbau, Abbau und Wiederaufbau) wurde hauptsächlich durch 2 Bauarbeiter unter Einhaltung der üblichen Bausicherungsmaßnahmen realisiert. Als wesentliche Hilfsmittel kamen ein Mauerkran zum Versetzen verschiedener Steinarten sowie ein Autodrehkran mit einer speziellen Plattenversetzzange zum Einsatz. Zum Abheben der Bauteile bzw. der Steine sind Anschlagmittel wie Schlaufen und Steinzange erforderlich. Dazu kamen auch die herkömmlichen Handwerkzeuge (Spannschlösser, Bohrmaschinen, Gummihammer, Schnur, Wasserwaage, Richtscheit, Winkel, etc.) zum Einsatz.

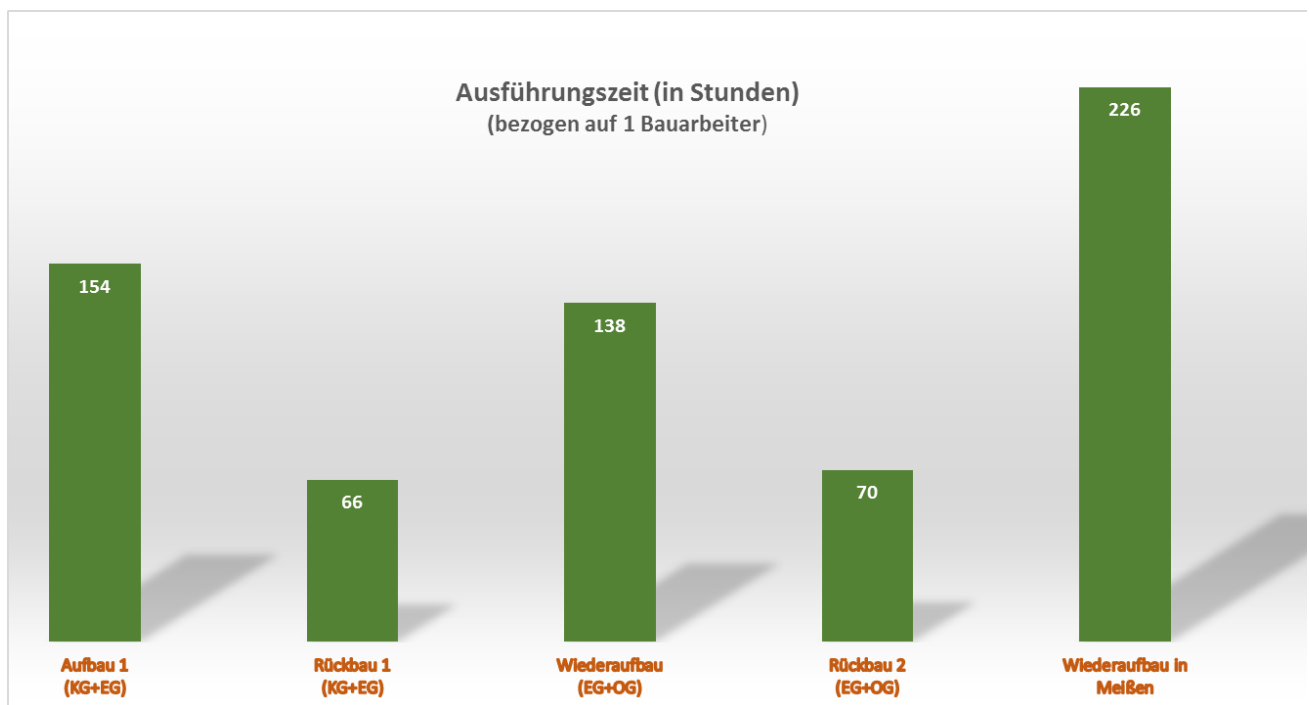


Bild 337 *Allgemeine Ausführungszeit der Rohbauarbeiten (in Stunden) - Auswertung*

Die kapazitätssparende Realisierung der Bauarbeiten durch den Einsatz weniger Bauarbeiter sowie einfacher Bauhilfsmittel weist einen sehr wirtschaftlichen Aspekt zur Einsparung von Baukosten bei der entwickelten Trockenbauweise auf. Diese Kosten liegen bei der herkömmlichen Bauweise deutlich höher. Die zeitsparende Ausführung der Bauarbeiten lässt sich insbesondere bei der Durchführung der Rohbauarbeiten verdeutlichen. Hiermit wurde bestätigt, dass die notwendige Bauzeit zur Fertigstellung des Rohbaus nach der entwickelten Trockenbauweise durch 2 Bauarbeiter weniger als 4 Wochen beträgt (Bild 337, Bild 338). Diese liegt bei der Errichtung eines vergleichbaren, massiven Rohbaus nach den herkömmlichen Bauweisen deutlich höher.

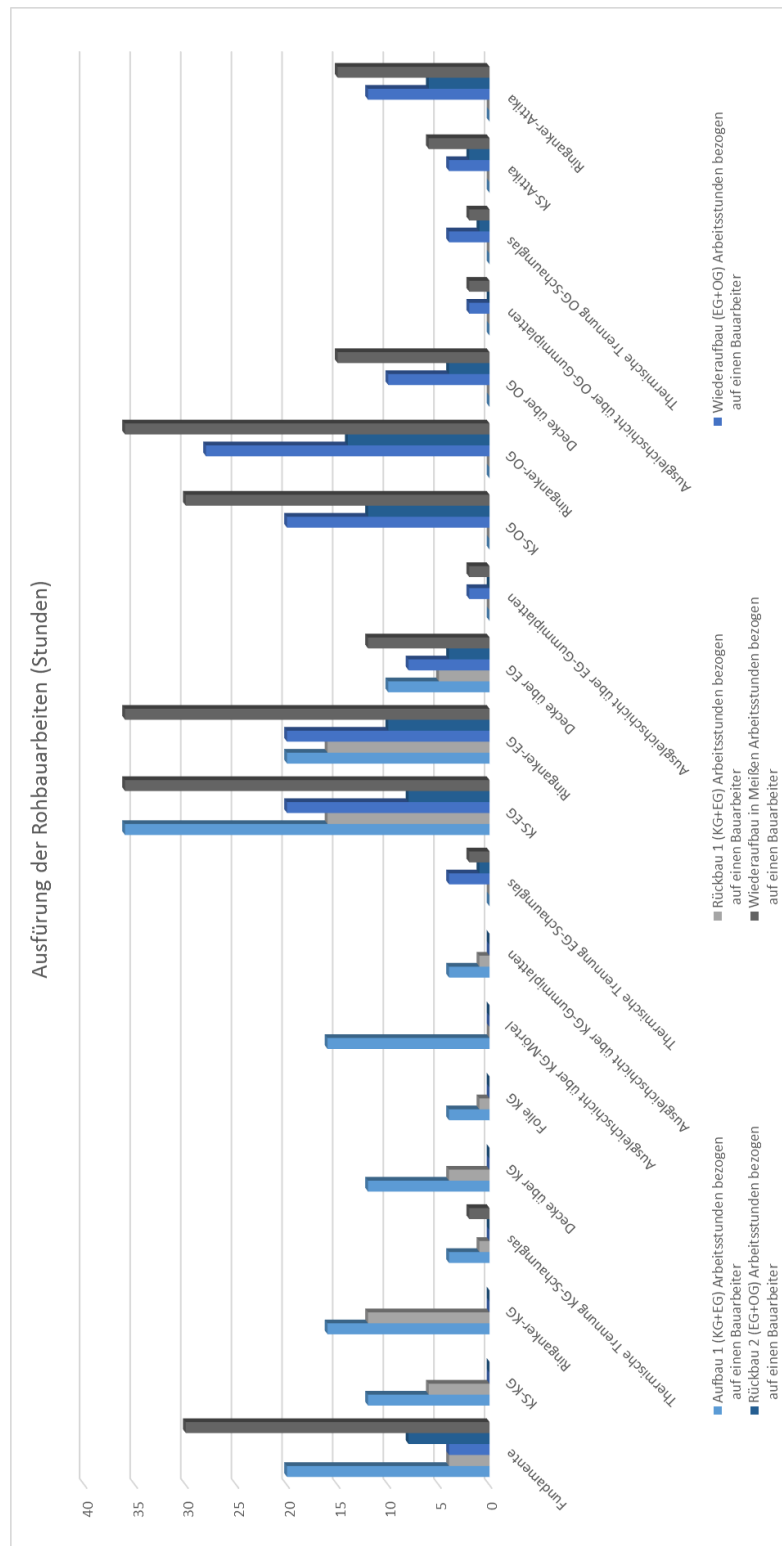


Bild 338 Allgemeine Ausführungszeit der Rohbauarbeiten (in Stunden)- Auswertung

Die benötigte Rückbauzeit zur Demontage des Rohbaus beträgt unter den gleichen Bedingungen nur die Hälfte der Aufbauzeit (Bild 337, Bild 338), was der Ausdruck für eine sehr effiziente, zeit- und kostensparende Demontage ist.

## 11.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Arbeit wurde herausgestellt, dass die entwickelte Trockenbauweise zum Aufbau von demontierbaren, energiehocheffizienten, massiven Musterhäusern anwendbar, energie- und kostensparend sowie zeitsparend ist. Außerdem bietet diese Bauweise die notwendige Wohnflexibilität und -qualität durch die zu Grunde gelegte Modularität, die erprobte Demontierbarkeit, die Baumobilität und Wiederverwendbarkeit.

Mit der Annahme, dass die Mauerwerksbauweise als wesentliche Bauweise beim Aufbau von Wohnbauten weiterhin einen hohen Stellenwert besitzt und angewendet wird, wäre der Einsatz der entwickelten Trockenbauweise dafür sehr empfehlenswert. Die Errichtung der Mauerwerksbauten nach dieser Bauweise ist daher umweltfreundlicher, schneller und energieeffizienter als bei der Anwendung der herkömmlichen Bauweisen.

Vor dem Hintergrund, zukünftig klimaneutral zu bauen, bietet die entwickelte Trockenbauweise einerseits die für Menschen notwendigen Wohnflächen und Nutzräume in hoher Qualität an und andererseits mindert diese Bauweise den Umweltschaden infolge Energieverbrauch und Schuttentstehung. Die Rohstoffressourcen werden wesentlich effizienter und länger genutzt und das Downcycling wird ausgeschlossen.

Der Bauprozess erhält eine völlig neue Qualität und senkt die körperliche Belastung erheblich. Der bisherige Maurer wird zum Mauerwerksmonteur. Der Bauprozess rückt näher in Qualitäten anderer hocheffizienter Industriezweige heran.

Mit der Arbeit wird für den Wohnungsmarkt ein Beitrag geleistet, indem eine neue anwendbare, schnelle und allseitig effiziente Baumethode zur Verfügung gestellt wird. Sie wird das Schuttaufkommen infolge der Bauindustrie drastisch senken helfen. Die Anwendung der Recyclingmaterialien im Rahmen der entwickelten Trockenbauweise öffnet bei den Baustoffherstellern neue, wirtschaftliche und ressourcenschonende Wege zur Produktion der notwendigen demontierbaren, wiederverwendbaren und modularen Bauteile.

Die entwickelte Trockenbauweise ist daher bausicher, schnell, schadenfrei, ökonomisch und ökologisch und eignet sich für qualitativ hochwertige Bauobjekte.

Als weitere Entwicklungen und Modifizierungen sollte der Fokus auf die hundertprozentige Herstellung aller Bauteile aus Recyclingmaterialien (inklusive der Kalksandsteine), auf die Anwendbarkeit des automatisierten Bauens bei der Bauausführung sowie auf den 3D-Druck bei der Produktion der einzelnen Bauteile im Rahmen der entwickelten Trockenbauweise gelegt werden.

Die derzeit gefertigten Bauelemente weisen in der Regel eine hohe geometrische Qualität auf. Dennoch treten Toleranzen auf, die es intelligent im Sinne der Trockenbauweise auszugleichen gilt. Erste Ansätze dazu wurden im Rahmen des Projektes aufgezeigt.

## 12 Quellen

- [1] Schlussbericht zum Forschungsprojekt ReMoMaB Entwicklung von Grundprinzipien für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis vom 22.02.2013. Forschungsprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung; Institut für Leichtbau, Entwurf und Konstruktion der Universität Stuttgart; Werner Sobek Green Technology Stuttgart.
- [2] Jäger, W.; Alkhateeb, E.; Youssef, Hassan: Schlussbericht „0-EneMau“. Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards. Forschungsbericht. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung. Erarbeitung im Rahmen des vom BBSR geförderten gleichnamigen Forschungsvorhabens. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung.
- [3] Jäger, W.; Youssef, Hassan: Schlussbericht „RC-WE-Modul“: Entwicklung und Anwendung von komplett demontablen Wohneinheiten aus ressourcenschonendem Beton. Forschungsbericht. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung. Erarbeitung im Rahmen des vom BBSR geförderten gleichnamigen Forschungsvorhabens. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung.
- [4] Mettke, A.: Material- und Produktrecycling am Beispiel von Plattenbauten. Habilitationsschrift. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2010
- [5] Jäger, W.; Pfeifer, G.: Konstruktionsregeln für Mauerwerk. Teil 1: Mauerwerksarten, Verbände und Maßordnung. In: Mauerwerk-Kalender 30 (2005). Hrsg. H.J. Irmschler, W. Jäger und P. Schubert., Ernst & Sohn. Berlin 2005, S. 233–264
- [6] DIN 55699: 2017-08: Anwendung und Verarbeitung von außenseitigen Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) mit Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) oder Mineralwolle (MW). NA Bau im DIN, Berlin 2017
- [7] Lindner, Doppelboden, VENTEC,  
[https://www.lindnergroup.com/de\\_DE/ausbauprodukte/boden/doppelboden/ventec](https://www.lindnergroup.com/de_DE/ausbauprodukte/boden/doppelboden/ventec)
- [8] Datenblatt, Doppelboden, Typ VENTEC H 36 L 16 x H, Lindner Group, Dopus Bodensystem, Messeboden,  
<https://www.dopus.de/produkte/bodensystemueberblick/>,
- [9] Dopus Bodensystem, Messeboden,  
<https://www.dopus.de/produkte/bodensystemueberblick/>,
- [10] Knauf, Hohlbodensysteme GIFAFLOOR HFB,  
<http://www.knauf.ch/de/sortiment/boden/systeme/hohlboden-systeme/>
- [11] F18 Knauf integral GIFAFLOOR Flächenhohlboden, Detailblatt 02/2011
- [12] Lindner, Wand-/ Deckenbekleidung, Lindner Free 900 Holzwandbekleidung,  
[https://www.lindner-group.com/de\\_DE/ausbauprodukte/wand/wanddeckenbekleidungen/lindner-free-900/](https://www.lindner-group.com/de_DE/ausbauprodukte/wand/wanddeckenbekleidungen/lindner-free-900/)
- [13] Produktdatenblatt, Holzwandbekleidung – Lindner Free 900, Lindner Group,
- [14] Sto Systain: Klett statt Kleber, [www.Sto.de](http://www.sto.de), Presse,  
[http://www.sto.de/de/topnav/presse/pressemeldungen\\_163968.html](http://www.sto.de/de/topnav/presse/pressemeldungen_163968.html)

- 
- [15] System Duplex, Wandverkleidung HPL, <http://systemduplex.com/wandverkleidung-hpl/>  
Kreativer Innenausbau – Wandverkleidung mit System, Broschüre, System Duplex, [www.system-duplex.com](http://www.system-duplex.com)
- [16] Lindner, Einhängedecken, LMD-E 210 Einhängedecke mit Haarfuge, [https://www.lindnergroup.com/de\\_DE/ausbauprodukte/decke/einhaengedecken/lmd-e-210/](https://www.lindnergroup.com/de_DE/ausbauprodukte/decke/einhaengedecken/lmd-e-210/), 30.03.2021
- [17] Sto Systain: Klett statt Kleber, [www.Sto.de](http://www.Sto.de), Presse,
- [18] [http://www.sto.de/de/topnav/presse/pressemeldungen\\_163968.html](http://www.sto.de/de/topnav/presse/pressemeldungen_163968.html),
- [19] Technische Broschüre über Brespa-Decken, <https://www.dwsystembau.de/sites/default/files/DW%20SYSTEMBAU%20TECHNISCHE%20BROSCHÜRE%20DW04%20002%20WEB.pdf> (Zugriff am 18.06.2019)
- [20] Guy, B.; Ciarimboli, N.: Design for Disassembly guide, City Seattle, King County, WA, Resource Venture Inc, designed for electronic publication.
- [21] Philip Crowther (2005), Design for Disassembly – themes and principles, RAIA/BDP Environment Design Guide.
- [22] Wessels, H.: Trockenbauweisen zum Einsatz beim Aufbau von demontierbaren, energiehocheffizienten Musterhäusern. Diplomarbeit, Betreuer Hassan Youssef. Lehrstuhl Tragwerksplanung der TU Dresden, 2019
- [23] EPEA Switzerland, Cradle to Cradle Design – rethinking the way we make things, EPEA Switzerland GmbH
- [24] Schüco Leitfaden Cradle to Cradle – von der Weder bis zur Wiege. [https://www.schueco.com/web2/de/unternehmen/nachhaltigkeit/wertorientierte\\_perspektive/cradle\\_to\\_cradle](https://www.schueco.com/web2/de/unternehmen/nachhaltigkeit/wertorientierte_perspektive/cradle_to_cradle) (Zugriff am 15.06.2019)
- [25] Kalogerakis, K.; Dabe, V., Paramasivam, M., Herstatt, C. : Closed-Loop Supply Chains for Cradle to Cradle Products, Sustainability in Logistics and Supply Chain Management, 2015
- [26] Meyer, L.; Schroeder, R.: Cradle to Cradle – Utopie oder Zukunftsvision, Philotec 2013
- [27] Greenbuilding, <https://www.greenbuildingproducts.eu/cradle-to-cradle-kreislauffuehrendes-designkonzept-im-leed-system/> (Zugriff am 08.06.2019)
- [28] Cradle to Cradle Innovation Institute (2013), Cradle to Cradle certified – Product standard version 3.0
- [29] DGNB-Kriterienkatalog, <https://www.dgnb-system.de/de/system/version2018/kriterien> (Zugriff am 15.06.2019)
- [30] Ellen Macarthur Foundation, Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe
- [31] Ruiz Duran, C., Lemaitre, C., Braune, A.: Circular Economy – Kreisläufe schließen, heißt zukunftsfähig sein, DGNB e.V., Report Januar 2019
- [32] Big Bags: Rückgabe von sortenreinen Verarbeitungsresten, Bettina Sigmund, Detail, 12.11.2014, <https://www.detail.de/artikel/big-bags-rueckgabe-von-sortenreinen-verarbeitungsresten-12722/> (Zugriff am 15.06.2019)
- [33] GXN (2018), Circle House- Denmarks first circular housing project
- [34] Circle Building 2016, Arup, <http://circularbuilding.arup.com> (Zugriff am 20.06.2019)

- [35] Herzog, T.; Krippner, R.; Lang, W.: Fassadenatlas. Institut für internationale Architektur-Dokumentation, Detail München 2004
- [36] Althaus, N.: Zweischalige Außenwände: Kommentar zur DIN 18195 Beiblatt 1. Mauerwerk 16 (2012) H. 6, S. 293–296
- [37] ...: VHF - Planung und Ausführung. Berlin: FVHF- Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte Fassaden e.V, 2017
- [38] GIP-Fassade GmbH (2019), Fassadenunterkonstruktionen
- [39] DIN 18516-1: 2010-06: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze. Berlin: NABau im DIN 2010
- [40] Jordi, M.; Erb, M.; Ragonesi, M.: Entwicklung eines Passivhausfassadenelements mit Vakuum-Dämmung. Schlussbericht. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Energie BFE. Schweizerische Eidgenossenschaft. Bern 2007
- [41] Click-Brick-Broschüre (niederländisch), <https://www.daasbaksteen.nl/01/MyDocuments/clickbricktechnisch.pdf> (Zugriff am 12.04.2019)
- [42] LithoDecor, Textilbeton (BetoShell), [https://www.lithodecor.com/fileadmin/lithodecor/media/brochures/LITHODECOR\\_Bro\\_betoShell.pdf](https://www.lithodecor.com/fileadmin/lithodecor/media/brochures/LITHODECOR_Bro_betoShell.pdf) (Zugriff am 21.06.2019)
- [43] Knackstedt, J., Boddenberg, R.-W., Herrman, H.: Vorgehängte, hinterlüftete Fassaden-Technik, Brandschutz und statische Berechnung
- [44] DIN EN 438-6:2016-06: Dekorative Hochdruck-Schichtpressstoffplatten (HPL) - Platten auf Basis härtbarer Harze (Schichtpressstoffe) - Teil 6: Klassifizierung und Spezifikationen für Kompakt-Schichtpressstoffe für die Anwendung im Freien mit einer Dicke von 2 mm und größer; Deutsche Fassung EN 438-6:2016
- [45] Broschüre HPL-Platten, <https://www.leeuw.de/wellplatten-stegplatten/wp-content/uploads/2013/11/Fassade.pdf> (Zugriff am 29.06.2019)
- [46] GIP-Fassade GmbH (2019), Fassadenunterkonstruktionen
- [47] DIN 18533-1:2017-07: Abdichtung von erdberührten Bauteilen - Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze
- [48] DIN 18195 Teil 4: Abdichtung gegen Bodenfeuchte und nichtstauendes Sickerwasser
- [49] DIN 4108-7:2011-01: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele
- [50] DIN 18531-1:2017-07: Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen - Teil 1: Nicht genutzte und genutzte Dächer - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze
- [51] DIN EN ISO 10211:2018-03: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2017); Deutsche Fassung EN ISO 10211:2017
- [52] DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

- 
- [53] DIN EN ISO 14040:2009-11: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006
- [54] DIN EN ISO 14044:2018-05: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018
- [55] Webaufttritt TU-Delft: facade leasing, Online-Avaible:<https://www.climate-kic.org/success-stories/facade-leasing/> (Zugriff am 05.07.2019)
- [56] <https://www.selfio.de/fussbodenheizung/noppensystem/fussbodenheizung-noppensystem.html>, letzter Abruf am 19.06.2019
- [57] <https://quick-tec.com/fussbodenheizung/fussbodenheizung-greenline/>, letzter Abruf am 17.07.2019
- [58] <https://system-duplex.com/wandverkleidung-impact/>, letzter Abruf am 19.06.2019
- [59] <https://www.meister.com/de/paneele.html>, letzter Abruf am 24.07.2019
- [60] <https://www.mein-wohndesign24.de/paneele>, letzter Abruf am 24.07.2019
- [61] <https://www.kransen-floor.de/zubehoer/>, letzter Abruf am 24.07.2019
- [62] <https://www.nordseekuechen.de/thebo-st3007-ecksteckdose-edelstahl>, Abruf 27.07.2019
- [63] <https://www.schalter-steckdosen-shop24.de/ratgeber/faq/themen/wie-tief-werden-unterputzdosen-gesetzt.php>, Abruf 27.07.2019
- [64] <https://www.knauf.de/profi/sortiment/systeme/knauf-freitragende-decke.html>, Abruf am 19.06.2019
- [65] <https://www.owa.de/en/system/s9b/>, letzter Abruf am 28.07.2019
- [66] <https://www.owa.de/en/system/s9aall/>, letzter Abruf am 27.07.2019
- [67] <https://www.owa.de/de/produktuebersicht/>, letzter Abruf am 27.07.2019
- [68] <https://www.owa.de/de/produkt/lifetime-led/>, letzter Abruf am 28.07.2019
- [69] <https://www.lampenwelt.de/led-haengeleuchten/?p=9>, letzter Abruf am 28.07.2019
- [70] Jocher, Thomas; Loch, Sigrid: Raumpilot: Grundlagen, Wüstenrot Stiftung; Karl Krämer Verlag Stuttgart + Zürich, 2012
- [71] DIN 1048-2: Prüfverfahren für Beton; Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, 1991-06
- [72] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten
- [73] Sikaplan® WP 1100-15HL, Produktdatenblatt: Kunststoff-Dichtungsbahn auf der Basis Polyvinylchlorid weich (PVC-P).
- [74] Foamglas-Perinsul: Produktdatenblatt: FOAMGLAS-PERINSUL (Hoch belastbar).
- [75] DIN EN 1991-1 - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Allgemeine Einwirkungen
- [76] BAUDER Gründach-Systeme: Produktübersicht, Stand September 2017.



- 
- [77] REINZINK: Abdeckungen und Anschlüsse, optimaler Schutz für Mauern, Dachdächer, Gesimse und Fensterbänke, Stand Mai 2020.
- [78] DIN 4108: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden
- [79] DIN 18516-1: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet: Anforderungen, Prüfgrundsätze
- [80] Fassadenpaneele Cedral Click: <https://www.cedral.world/de-de/fassaden/fassadenpaneele/cedral-click/> (Zugriff am 07.09.2020)
- [81] Steico - das Naturbausystem: Konstruktionsheft Stegträger- Konstruktive Bauelemente natürlich aus Holz- Technik und Details
- [82] Hersteller von Blähton: <https://www.wlw.de/de/suche/blaehnton> Aufruf, 01.12.2021
- [83] DIN EN 771-2:2015-11: Festlegungen für Mauersteine. Kalksandsteine; Deutsche Fassung EN 771-2:2011+A1:2015. Berlin: NABau im DIN 2015
- [84] Ellen MacArthur Foundation: How to build a circular economy. <https://ellenmacarthurfoundation.org> 15.12.2021
- [85] Blaser, W.: R 128 by Werner Sobek: Bauen im 21. Jahrhundert. Basel: Birkhäuser 2002
- [86] Das Prinzip der vorgehängten hinterlüfteten Fassade. Eternit. Hinterlüftete Fassade <https://46.231.92.10/gestaltung/prinzip-der-vorgehaengten-hinterluefteten-fassade> 16.12.2021
- [87] ...: Leitfaden zur Planung und Ausführung der Montage von Fenstern und Haustüren für Neubau und Renovierung. Ausgabe März 2020. Rosenheim: ift 2020
- [88] ...: Elektrische Fußbodenheizung ecofilm 80-100. <https://www.imowell.de/elektrische-Fussbodenheizung-ecofilm-80-100>
- [89] ....eLCA Handbuch. Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung. <https://www.r-i-g.de/Handbuch/eLCA%20Online%20Handbuch.html> 31.10.2021