

# Schlussbericht zum Vorhaben

Thema:

**EnOB: HLBhybrid – Entwicklung innovativer (schlanker und hochwärmedämmender) Fassaden-Sandwichelemente unter Verwendung von Holzleichtbeton und ligninbasierter, hochporöser Aerogel-Dämmung sowie nanostrukturierter Dämmung auf Basis von synthetisch amorpher Kieselsäure**

Zuwendungsempfänger:

**Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm [THN] (Projektleitung), Technische Universität Hamburg, Institut für Thermische Verfahrenstechnik (V-8) [TUHH-TVT]**

Förderkennzeichen

**03EN1072A, 03EN1072B**

Laufzeit:

**01.01.2023 – 30.06.2025**

Monat der Erstellung:

**Nürnberg, März 2026**

(kbp/ Roland Krippner)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) über den Projektträger Jülich, Fachbereich Energieeffizienz in Gebäuden (ESN1)/ Energieoptimierte Gebäude und Quartiere – dezentrale und solare Energieversorgung im Förderprogramm „7. Energieforschungsprogramm“ unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



# Schlussbericht zum Vorhaben

Thema:

**EnOB: HLBhybrid – Entwicklung innovativer (schlanker und hochwärmedämmender) Fassaden-Sandwichelemente unter Verwendung von Holzleichtbeton und ligninbasierter, hochporöser Aerogel-Dämmung sowie nanostrukturierter Dämmung auf Basis von synthetisch amorpher Kieselsäure**

Zuwendungsempfänger:

**Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm [THN]  
(Projektleitung), Technische Universität Hamburg, Institut für  
Thermische Verfahrenstechnik (V-8) [TUHH-TVT]**

Förderkennzeichen

**03EN1072A, 03EN1072B**

Laufzeit:

**01.01.2023 – 30.06.2025**

Monat der Erstellung:

**Nürnberg, März 2026**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger Jülich, Fachbereich Energieeffizienz in Gebäuden (ESN1)/ Energieoptimierte Gebäude und Quartiere – dezentrale und solare Energieversorgung im Förderprogramm „7. Energieforschungsprogramm“ unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Projektpartner\*innen/ Bearbeiter\*innen

### Teilvorhaben 1: (THN)

**Förderkennzeichen: 03EN1072A**

- Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm  
Fakultät Architektur (THN-AR)  
Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner (Projektleitung), Dr.-Ing. Peter Bonfig, M.A. Alina  
Burose, M.A. Markus Schilcher
- Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik/ Institut für Energie und Gebäude –  
rieg (THN-MB-VS/ieg)  
Prof. Dr. Pooyan Jahangiri, Dipl.-Ing. (FH) Mario Franz

### Unteraufträge

- Kauer | Brodmeier | Peter, Architekten & Ingenieure GmbH, Regensburg  
Dipl.-Ing. Architekt Thomas Kauer, Dipl.-Ing. (FH) Architekt Bernhard Brodmeier
- Hofmann & Tibad Beratende Ingenieure, PartG mbB, Regensburg  
Dipl. Ing. Univ. Marius Peter Tibad
- Möhler + Partner Ingenieure AG - Beratende Ingenieure für Schallschutz und  
Bauphysik, München  
Dipl.- Ing. (FH) Rudolf Liegl
- Meier Betonwerke GmbH, Lauterhofen  
Christian Franke, Dipl. Ing. (FH) Architektur
- Kingspan Insulation GmbH & Co.KG, Ibbenbüren  
Dr.-Ing. Gabriele Gärtner (Evonik)

### Teilvorhaben 2: (TUHH-TVT)

**Förderkennzeichen: 03EN1072B**

- Technische Universität Hamburg, Institut für Thermische Verfahrenstechnik (V-8)  
Prof. Dr.-Ing. Irina Smirnova, Dr.-Ing. Carsten Zetzl, Razan Altarabeen

---

Kurzfassung	7	Inhalt
Summary	8	
1. Kurze Darstellung	9	
2 Zur Aufgabenstellung	9	
3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9	
3.1 Potentialabschätzung Gebäudebestand – Nachverdichtung und Neubau	9	
3.2 Potentialabschätzung für Forschungsansatz HLBhybrid	11	
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	12	
4.1 Außenwand-/Fassadenbauteile aus Holz(leicht)beton (HLB/ HB)	13	
4.1.1 Zur ökologischen Optimierung von Holzleichtbeton	15	
4.2 Schlanke und hochwärmedämmende Fassadenbauteile	15	
4.3 Nanoporöse Materialien	15	
4.3.1 Ligninbasierte Aerogele	16	
4.3.2 Vakuumisulationspaneele (VIP)	17	
4.3.3 Mineralischer Dämmstoff auf der Basis von synthetisch amorpher Kieselsäure	18	
4.4 Umweltwirkung von Fassadenbauteilen	18	
4.4.1 Holzleichtbeton (HLB)	19	
4.4.2 Neue Dämmstoffe: Silikat und Lignin basierte Aerogele	19	
4.4.3 Bewertung von Wandkonstruktionen	20	
4.4.4 Weitere Schlussfolgerungen und Erkenntnisse zu Projektbeginn	21	
5 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens	21	
5.1 Technische Aspekte:	21	
5.2 Wissenschaftliche Aspekte:	22	
6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	22	

II.	Eingehende Darstellung	23	Inhalt
1	Entwicklung von Lösungsstrategien	23	
1.1	Lösungsstrategie I: Überblick zu möglichen Aufbauten	23	
1.2	Lösungsstrategie II: Überblick zu möglichen Aufbauten	27	
2	Material- und Bauteilentwicklung	30	
2.1	Materialentwicklung ((Holz-)Leichtbeton)	30	
2.2	Materialentwicklung (Ligninbasierte Aerogele)	33	
2.2.1	Lignin-Screening und Auswahlstrategie	33	
2.2.2	Lignin-Alginat-Hybrid-Aerogele	33	
2.2.3	Infrastruktur für den Scale-up	35	
2.2.4	Gepresste Aerogelplatten	35	
2.2.5	Untersuchungen, Bewertungen und Auswahl der Lösungsstrategien	37	
2.3	Bauteilentwicklung (Fassaden-Sandwichelement)	39	
2.3.1	Lastannahmen	39	
2.3.2	Maßgebende Lastkombination auf Schubgitter	40	
3	Funktionsmodelle und Untersuchungen zum Leistungsprofil	43	
3.1	Entwicklung und Realisierung eines Funktionsmodells	43	
3.2	Bauakustische Bewertung der Lösungsstrategien	45	
3.2.1	Zieldefinitionen	45	
3.2.2	Lösungsstrategie I	46	
3.2.3	Funktionsmodell I – Messung der Luftschalldämmung im Prüfstand	46	
3.2.4	Lösungsstrategie II	47	
3.2.5	Flankenschalldämmung	50	
3.2.6	Untersuchungen für biegeeweiche Vorsatzschale Lösungsstrategie II	51	
3.3	Bestimmung des U-Werts (Wärmedurchgangskoeffizient)	54	
3.4	Prüfungen zum Brandverhalten	57	
3.4.1	Heizwertermittlung	57	
3.4.2	Kleimbrenner-Prüfung	57	
3.4.3	SBI-Test	59	
4	Ökologische Bewertungen	60	
4.1	Ökologische Abschätzung Lösungsprinzip I.b	60	
4.2	Ökologische Bewertung Lignin-Aerogel-Dämmstoff	62	
4.3	Ökologische Bewertung Funktionsmodelle	64	
4.4	Beurteilung zum Einsatz der prototypischen Lösung im Bauprojekt	67	
4.5	Umweltproduktdeklaration (EPD, Environmental Product Declaration)	68	
4.6	Ökozertifizierung eines Musterbauvorhabens (BNB / Funktionsmodell fm.I.d)	68	
4.7	Zusammenfassung	69	
5	Optimierungen zu 'prototypischem' Fassadenbauteil	71	
5.1	Untersuchungen zur Eignung der Lösungsstrategien im baulichen Kontext	71	
5.2	„Praxisbeispiel“ „Kompaktes Hofhaus“	74	
5.3	Wirtschaftlichkeit – Überschlägige Abschätzung von Kosten	76	
5.4	Materialexperimente ((Holz-)Leichtbeton)	78	
5.4.1	Randbedingungen	78	
5.4.2	Zu den Ergebnissen	79	
5.4.3	Fazit	81	
5.4.4	Ökobilanzierung Materialexperimente	82	
6	Zusammenfassung der Ergebnisse	84	
7	Anhang / Literatur	89	Seite 6

Das Forschungsvorhaben thematisiert wesentliche Bereiche aktueller Herausforderungen von Architektur und Stadtplanung hinsichtlich Energie- und Ressourcenwende sowie Klimaanpassungsstrategien. Dabei sind auf dem Bausektor bauliche Interventionen im Gebäudebestand und die energetische Ertüchtigung der Altbauten von zentraler Bedeutung. Zum einen vertikale Erweiterungen, Aufstockung unter Ausnutzung der vorhandenen Tragstruktur, zum anderen horizontale Erweiterungen, Ergänzung neuer Räume, darüber hinaus ebenso die energetische Ertüchtigung der Außenwand/ Fassade. Hier sind insbesondere im (sub-) urbanen Bereich bauliche Verdichtungen von hoher Relevanz, um den weiteren immensen Flächenverbrauch zu minimieren.

Bei baulichen Maßnahmen im Bestand spielen oftmals erhöhte Flächen- und Ressourceneffizienz sowie Vorteile, die schlanke, hochwärmedämmende, vorgefertigte und geschoßhohe Fassaden-Sandwichelemente mit einer maximalen Bauteildicke von 18 cm bei einem Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  aufweisen, eine große Rolle. Damit könnten nach einer ersten Abschätzung Fassaden um mindestens 10 cm bis 18 cm schlanker ausgeführt werden.

Die grundlegende Basis für die Projektarbeiten bildet das im Fassadenbau universell etablierte Sandwich-Prinzip, wonach die Dämmung im Kern von widerstandsfähigen Schichten auf der Innen- und Außenseite geschützt wird. Bei der Kopplung der inneren und äußeren Leichtbeton (Holzleichtbeton) - Schichten bieten sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Strategien an, die als Lösungsstrategie I und als Lösungsstrategie II bezeichnet werden. In der Folge ist das Ergebnis der Lösungsstrategie I ein Mehrschichtverbundsystem, während Lösungsstrategie II eher die Charakteristik einer Holzrahmenbauweise hat, nur dass die inneren und äußeren Schichten vornehmlich aus einem Leichtbetonwerkstoff (mit textiler Bewehrung und ggf. organischen Zusatzstoffen) und nicht aus Holz bestehen.

Im Rahmen des HLBhybrid-Verbundvorhabens wird ein neuer Ansatz im Bereich von schlanken, hochwärmegedämmten Fassaden-Sandwichelementen etabliert, deren Leistungsfähigkeit die Projektergebnisse bestätigen. Für die beiden Deckschichten werden beim Bau der Funktionsmodelle optimierte Leichtbetone eingesetzt. Für Lösungsprinzip II eröffnen neuartige Mischungen von Sonderbetonen (im Bereich von plattenförmigen Bauteilen) auch den Einsatz organischer Sekundärmaterialien. Mit den entwickelten Hybrid-Aerogelen in Verbindung mit der ligninbasierten In-situ-Beschichtungstechnologie stehen hochleistungsfähige Alternativen für die Kerndämmung als Plattenmaterial bzw. in Granulatform zur Verfügung. Anhand von Lösungsstrategie I zeigen die theoretischen Betrachtungen der Tragwerksplanung die Machbarkeit des schlanken Fassadenbauteils ( $d = 170 \text{ mm}$ ). Durchgeführte Bauteilprüfungen bestätigen die Zielsetzungen: Wärmedurchgangskoeffizient  $U \approx 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ , korrigiertes, bewertetes Schalldämm-Maß  $R_w 40 \text{ dB}$  (Lösungsstrategie I) bzw.  $45 \text{ dB}$  (Lösungsstrategie II), ähnliches Brandverhalten wie ein Bauprodukt, das die Anforderungen an die Brandverhaltensklasse A1 erfüllt. Die ökologischen Vorteile des entwickelten Fassaden-Sandwichelementes ergeben sich vor allem durch eine erhöhte Flächen- und Ressourceneffizienz. Das bestätigen Untersuchungen und Abschätzungen an Praxisbeispielen. Auch bei hoch angesetzten Bauteilkosten für das Fassaden-Sandwichelement lassen sich Mehrkosten durch Flächensparnis gegenüber üblichen Aufbauten (Holzbau) kompensieren. Auf angespannten und hochpreisigen Wohnungsmärkten, sind sogar (deutliche) wirtschaftliche Vorteile möglich.

Damit leisten die Ergebnisse des HLBhybrid-Projekts wichtige Impulse für eine Transformation im Bauen; dies gleichermaßen bei Material- und Bauteilentwicklung hinsichtlich Energie- und Ressourcenwende sowie Klimaanpassungsstrategien. Das Fassadenbauteil eröffnet mit den beiden Lösungsstrategien neue Potentiale für den Geschoßwohnungs- und Verwaltungsbau, aber insbesondere für den Bereich „Serielle Sanierung“.

The research project addresses key areas of current challenges in architecture and urban planning with regard to energy and resource transition and climate adaptation strategies. In the construction sector, structural interventions in existing buildings and the energy-efficient retrofitting of old buildings are of central importance, particularly with regard to the social challenges of energy and resource transition and climate adaptation strategies. This includes vertical extensions, adding storeys using the existing supporting structure, horizontal extensions, adding new rooms, and improving the energy efficiency of the exterior walls/facade. In (sub)urban areas in particular, structural densification is highly relevant in order to minimise further immense land consumption.

In addition to component weights, increased space and resource efficiency often plays a major role in construction measures in existing buildings. The advantages of slim, highly insulated, prefabricated, floor-to-ceiling façade sandwich elements with a maximum component thickness of 18 cm and a heat transfer coefficient (U-value) of 0.20 W/m<sup>2</sup>K. According to initial estimates, this would allow façades to be made at least 10 cm to 18 cm slimmer.

The fundamental basis for the project work is the sandwich principle, which is universally established in façade construction, whereby the insulation is protected in the core by resistant layers on the inside and outside. When coupling the inner and outer lightweight concrete (lightweight wood concrete) layers, there are two fundamentally different strategies, referred to as solution strategy I and solution strategy II. The result of Solution Strategy I is a multi-layer composite system, while Solution Strategy II is more characteristic of a timber frame construction, except that the inner and outer layers consist primarily of a lightweight concrete material (with textile reinforcement and, if necessary, organic additives) rather than timber.

As part of the HLBhybrid joint project, a new approach is being established in the field of slim, highly thermally insulated façade sandwich elements, the performance of which is confirmed by the project results. Optimised lightweight concretes are used for the two cover layers in the construction of the functional models. For solution principle II, novel mixtures of special concretes (in the area of plate-shaped components) also open up the use of organic secondary materials. The developed hybrid aerogels in combination with lignin-based in-situ coating technology provide high-performance alternatives for core insulation as plate material or in granulate form. Based on solution strategy I, the theoretical considerations of the structural design demonstrate the feasibility of the slim façade component (d = 180 mm). Component tests confirm the objectives:

Heat transfer coefficient  $U \approx 0.23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , corrected, rated sound insulation measure  $R_w$  40 dB (solution strategy I) or 45 dB (solution strategy II), similar fire behaviour to a building product that meets the requirements of fire behaviour class A1. The ecological advantages of the developed façade sandwich element result primarily from increased space and resource efficiency. This is also confirmed by studies and estimates based on practical examples. Even with high component costs for the façade sandwich element, additional costs can be offset by space savings compared to conventional structures (timber construction). In tight and high-priced housing markets, (significant) economic advantages are even possible.

The results of the HLBhybrid project thus provide important impetus for a transformation in construction, both in terms of material and component development with regard to the energy and resource transition and climate adaptation strategies. With its two solution strategies, the façade component opens up new potential for multi-storey residential and administrative buildings, but especially for the area of 'serial renovation'.

## I. Kurze Darstellung

I. Kurze Darstellung

### 2 Zur Aufgabenstellung

Das Forschungsvorhaben thematisiert wesentliche Bereiche aktueller Herausforderungen von Architektur und Stadtplanung hinsichtlich Energie- und Ressourcenwende sowie Klimaanpassungsstrategien. Dabei ist eine Zukunftsaufgabe die energetische Ertüchtigung der Altbauten. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, dass der Gebäudebestand bis 2050 nahezu klimaneutral sein soll.<sup>1</sup>

Zentrales Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung nichttragender, hochwärmedämmender, schlanker, stabiler und wirtschaftlich herstellbarer, raumhoher Fassaden-Sandwichenelemente für den Geschloßwohnungs- und den Bürobau unter Verwendung eines möglichst hohen Anteils an regenerativen Baustoffen bei den Aufbauten und Schichtenfolgen. Diese setzen sich zusammen aus verschiedenen Lagen von (Holz-)Leichtbeton und mikro- bis nanostrukturierteren Dämmstoffen. In der Kombination und Weiterentwicklung dieser beiden Bereiche besteht ein vielversprechender Ansatz für ein nachhaltiges und wirtschaftliches Fassadenbauteil. Dabei eignet sich insbesondere Holzleichtbeton aufgrund seiner ästhetischen Qualitäten auch zur Verwendung für sichtoffene Oberflächengestaltungen.

Das Aufzeigen von Alternativen zum großen Bedarf an Baustoffen, die aus fossilen Rohstoffen oder mit einem hohen Aufwand an Primärenergie hergestellt werden, ist ein weiterer Fokus der angestrebte Forschungsarbeit. Eine ressourcenschonende und ökologische Bauweise bei Neubauten und der Sanierung des Gebäudebestandes trägt, besonders durch den Flächengewinn beim Einsatz von sehr schlanken Außenwänden, in vielerlei Hinsicht auch zur Einsparung von Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Dieser Ansatz erfordert kompakte Fassadenkonstruktionen mit hoher Wärmedämmleistung, die gleichzeitig die Anforderungen an Schalldämmung gegen Außenlärm erfüllen, um auf räumlich begrenzten Flächen zusätzliche Wohnungen und auch Büros zu ermöglichen.

Die Arbeiten zielen auf ein nachhaltiges Bauteil, das sich durch einfache und robuste Herstellung sowie praktikable Montage auf der Baustelle auszeichnet. Durch die primäre Verwendung von Holz – Holzverbundwerkstoffe und Holzreste (als Zuschlagsmaterial) sowie Holzbestandteile (Lignin), als ökologische Rohstoffe – soll ein Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Einsparung und Ressourceneffizienz im Bauen geleistet werden. Dabei werden die angestrebten Vorteile auch bezüglich Umweltwirkung (z. B. Primärenergiebedarf nicht erneuerbar (PEne), Treibhauspotential (GWP)) und Ressourceninanspruchnahme (Energie und Flächen) bewertet.

Die Arbeiten umfassen die Optimierung der Materialien (Holz-)Leichtbeton und ligninbasierte, hochporöse Aerogele. Mit Plattenwerkstoffen aus mikroporöser Dämmung auf Basis von synthetisch amorpher Kieselsäure soll daran anknüpfend die Entwicklung eines mehrschichtigen Fassaden-Sandwichenelements bis hin zur Realisierung von Funktionsmodellen erfolgen. Begleitet werden diese Arbeiten von mechanischen und bauphysikalischen Prüfungen sowie einer ökologischen Bewertung der eingesetzten Werkstoffe und des Bauteils.

### 3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

#### 3.1 Potentialabschätzung Gebäudebestand – Nachverdichtung und Neubau

Bei baulichen Interventionen im Gebäudebestand spielt oftmals neben Bauteilgewichten (gerade bei vertikalen Erweiterungen, Aufstockung unter Ausnutzung der vorhandenen Tragstruktur) die Flächeneffizienz eine große Rolle.

Die Technische Universität Darmstadt untersuchte mit dem ISP Eduard Pestel Institut für Systemforschung e.V. in der "Deutschland-Studie 2015"<sup>2</sup> Wohnraumpotentiale durch Aufstockungen im Bereich von mehrgeschossigen Wohnungsbauten und Siedlungsquartieren sowie beide mit dem VHT Institut für Leichtbau | Trockenbau | Holzbau in der "Deutschland-Studie 2019"<sup>3</sup> die Wohnraumpotentiale in urbanen Lagen durch Aufstockung und Umnutzung von Nichtwohngebäuden. Dabei identifizieren die Forscher ein enormes Potential an baulichen Verdichtungen im (sub-)urbanen Bereich.

Für Wohnungsbauten könnten durch Dachaufstockungen gerade in Großstädten und Ballungsräumen mehr als 1,5 Millionen zusätzliche Wohnungen entstehen. Das Gros von Mehrfamilienhäusern mit "Wohnraum-Reserven" bilden die Gebäude der Baualtersklassen zwischen 1950 und 1990. Hier eröffnen 580.000 Bauten die Errichtung von 1,12 Millionen Wohnungen. Und berücksichtigt man noch geeignete Wohnanlagen sowie Siedlungsquartiere, die vor 1950 entstanden sind, könnten mittels Aufstockung weitere 420.000 Wohnungen entstehen.<sup>4</sup>

1 BMWi (Hrsg.), 2015, S. 3

2 Tichelmann et al., 29. Februar 2016

3 Tichelmann et al. 13. Februar 2019

4 Vgl. <https://sdg21.eu/blog/15-mio-neue-wohnungen-durch-aufstockung> [14.06.2016] <04.10.2024>



Abb. 1 München, ehemalige Amtsgericht / Betreuungsgerecht vor Umbau (11/2017) (Foto: Roland Krippner)



Abb. 2 München, Parkplatzüberbauung am Dantebad (2016); Florian Nagler Architekten, München (Foto: Roland Krippner)

## I. Kurze Darstellung

Diese Potentiale bestätigen Projekte wie die Platensiedlung in Frankfurt am Main (2016ff.; Stefan Forster Architekten, Frankfurt am Main), in den vergangenen Jahren "eines der größten Nachverdichtungsprojekte Deutschlands". Dort entstand auf den obersten Geschossdecken der dreigeschossigen Zeilenbauten rund die Hälfte von etwa 700 neuen Wohnungen mittels zweigeschossiger Aufstockungen.<sup>5</sup>

Die Forschungsgruppe um Tichelmann zeigte in der zweiten Studie mit der "Deutschland-Inventur" im Bereich der Nicht-Wohngebäude ein noch größeres Potential. So bieten neben mehrgeschossigen Büro- und Geschäftshäusern nachgerade "eingeschossige Discounter mit ihren Parkplätzen ... ein enormes Potential für zusätzliche Wohnungen – durch Nachverdichtung wie Aufstocken, Umnutzung und Bebauung von Fehlflächen." Wenn diese vorhandenen innerstädtischen Flächen "intelligent und konsequent genutzt würden", könnten zwischen 2,3 und 2,7 Millionen zusätzliche Wohnungen entstehen, ohne Bauland teuer zu erschließen und den bereits in Deutschland hohen Flächenverbrauch weiter zu steigern.<sup>6</sup>

Daneben stellen auch leerstehende Verwaltungsbauten insbesondere in den Großstädten ein weiteres Potential für schlanke hochwärmedämmende Fassaden-Sandwich-elemente dar.

Auch wenn am Beispiel München der Leerstand von Büroflächen seit 2010 kontinuierlich zurückgeht, standen im Jahr 2020 "Büroflächen in einer Gesamtgröße von rund 530.000 Quadratmetern leer"<sup>7</sup>. Zwei Jahre COVID-19-Pandemie mit einer weitreichenden Verlagerung von Büroarbeitsplätzen ins Homeoffice lassen eine Umkehr dieses Trends mit großer Wahrscheinlichkeit erwarten, werden künftig durch geteilte Schreibtische und digitale Kommunikation neue Formen der Arbeit entstehen, die deutlich weniger Büroarbeitsplätze benötigen.

Bei diesen Bauten mit Tragwerken in Schotten- (Abb. 1) oder Skelettbauweise entfernt man in der Regel die Leichtmetallfassaden und ersetzt diese durch neue Konstruktionen. Auch hier eröffnet sich gerade bei der Umnutzung in Wohnungen ebenfalls ein großes Einsatzfeld. Als weitere Anwendungsbereiche für schlanke hochwärmedämmende Fassaden-Sandwich-elemente sind neben den Aufstockungen auch Parkplatzüberdachungen<sup>8</sup> und Tiny Houses von Relevanz.

In München entstanden einige exemplarische Bauvorhaben. So erhielten Florian Nagler Architekten mit der Parkplatzüberbauung am Dantebad / "Wohnen für Alle" (2016) in München (Abb. 2) den BDA Preis Bayern 2019 in der Kategorie Wohnungsbau, und realisierten mit "Dante II" fünf Jahre später ein Folgeprojekt in einer Blockrandbebauung.

Bei mobilen oder feststehenden Kleinst- und Modulhäusern (vorgefertigte Tiny Houses/ Tiny-Häuser) geht es ebenfalls um möglichst kompakte Wohnformen, die viel Komfort auf kleinem Raum ermöglichen. Diese Wohnmodelle gewinnen in Deutschland auch in größeren Städten zunehmend an Beliebtheit.

Ebenso haben in den letzten 10 Jahren die Bereiche Modulbau und Vorfertigung von Bauelementen stark an Marktanteilen dazugewonnen. Grundsätzlich wird zwischen Stahlbeton-, Stahl- und Holzmodulen unterschieden. Vereinzelt gibt es auch Hybridlösungen. Die meisten Raummodule sind mit nichttragenden Fassaden konstruiert, so dass auch hier die Vorteile von leichten, nachhaltigen und platzsparenden Sandwich-elementen zum Tragen kommen.

<sup>5</sup> Vgl. Przybilla, 18./19. Mai 2019, S. 49.

<sup>6</sup> Vgl. Pressemeldung <https://www.dgfm.de/aktuelles/artikel/studie-macht-deutschland-inventur-bei-nicht-wohngebaeuden> [27.02.2019] <26.09.2019>

<sup>7</sup> <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/209640/umfrage/leerstand-von-buer-oflaechen-in-koeln-seit-2003/> <04.04.2022>

<sup>8</sup> Vgl. Draxel, 30. März 2022, S. R5



Abb. 3 München-Freiham, Wohnungsbauprojekt „Z'am“ (2022); Zwischenräume, München (Foto: raumFair eG)

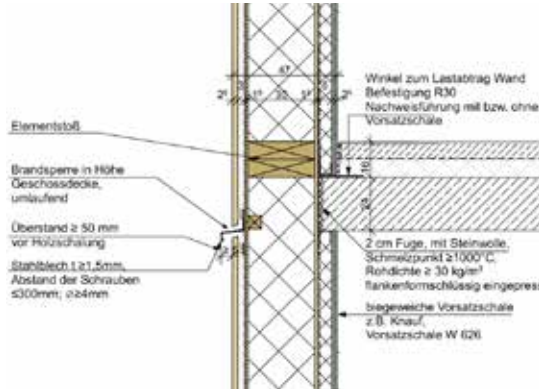


Abb. 4 ... Vertikalschnitt 1:20 (Verkleinerung) (Zeichnung: Zwischenräume Architekten + Stadtplaner, München)

I. Kurze Darstellung

In all den genannten Bauaufgaben eröffnen und erweitern kompakte Fassadenbauteile mit hoher Wärmedämmleistung die Optionen, auf räumlich begrenzten Flächen zusätzliche Wohn- und Büroflächen schaffen zu können.

**3.2 Potentialabschätzung für Forschungsansatz HLBHybrid**

Die Vorteile der Fassadenbauteile auf Basis von (Holz-)Leichtbeton mit nanostrukturierter und ligninbasierter, hochporöser Aerogel-Dämmung ergeben sich insbesondere durch erhöhte Flächen- und Ressourceneffizienz. Die schlanken hochwärmedämmenden, vorgefertigten und geschoßhohen Fassaden-Sandwichelemente sollen eine maximale Bauteildicke von 18 cm mit einem Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von 0,20 W/m<sup>2</sup>K aufweisen. Damit könnten nach einer ersten Abschätzung Fassaden um mindestens 10 cm bis 18 cm schlanker ausgeführt werden.

Flächeneffizienz:

Die Flächeneffizienz von Gebäuden wird durch das Verhältnis Nutzfläche zu Bruttogeschoßfläche ausgedrückt. Konstruktionsflächen besitzen einen Anteil von 10 % – 15 %.

Herkömmliche Außenwandkonstruktionen besitzen eine Wanddicke von 28 – 36 cm.<sup>9</sup> Gelingt es, bei vergleichbaren technischen Eigenschaften, diese auf 18 cm zu reduzieren, so kann eine Verringerung der BGF bzw. Erhöhung der NUF um 0,10 m<sup>2</sup> bis 0,18 m<sup>2</sup> je m Außenwandlänge erreicht werden.

Der Flächengewinn für eine Gebäudeeinheit ist von der Grundrissgeometrie abhängig. Bei einem quadratischen Grundriss (40 m x 40 m) ergibt sich ein U/A-Verhältnis von 0,1 und ein Flächengewinn von 1,0 % bis 1,8 % wird erreicht. Bei einem länglichen Grundriss (60 m x 18 m) ergibt sich ein U/A-Verhältnis von 0,14 und der Flächengewinn beträgt 1,4 % bis 3,0 %.

Umgerechnet auf Quadratmeter Wohnfläche und Wohneinheiten lassen sich diese möglichen Einspar- bzw. Gewinneffekte bei dem Wohnungsbauprojekt „Z'am“ (2022) mit ca. 66 Wohnungen in München-Freiham<sup>10</sup> veranschaulichen. (Abb. 3) Bei dem Neubau werden der Primärkonstruktion aus Stahlbeton nichttragenden Außenwände in Holzrahmenbauweise vorgesetzt. (Abb. 4) Realisiert wird ein mehrschichtiger Aufbau mit einer Gesamtstärke von 46,65 cm (U-Wert = 0,12 W/(m<sup>2</sup>K)).

Für den Vergleich mit dem HLBHybrid-Ansatz wird die Dämmstärke der Außenwand auf einen vergleichbaren Wert (U-Wert = 0,20 W/(m<sup>2</sup>K)) abgeändert und weist dann eine Stärke von 30,65 cm auf. Gegenüber den im Projekt angestrebten maximal 18 cm Wandstärke für die Fassaden-Sandwichelemente lassen sich nun die Veränderung der Wohnfläche beispielhaft darstellen:

- Ausgeführte Wand ca. 47 cm ca. 4.300,0 m<sup>2</sup>
- Vergleichswand ca. 30 cm ca. 4.410,8 m<sup>2</sup>
- HLBHybrid-Wand 18 cm ca. 4.498,4 m<sup>2</sup>

Aufgrund der Differenz von 12 cm errechnet sich ein Flächengewinn für die Wohnflächen zur Vergleichswand von 87,6 m<sup>2</sup>. Für das Wohnungsbauprojekt „Z'am“ könnten somit beispielsweise zusätzlich etwas mehr als zwei „1-Personen-Haushalte“ oder ein „4-Personen-Haus-

<sup>9</sup> Je nach Energiestandard sind auch Aufbauten bis mehr als 50 cm möglich (vgl. Passivhaus).

<sup>10</sup> Genossenschaft raumFAIR eG, Regensburg mit Zwischenräume Architekten + Stadtplaner GmbH, München; <https://raumfair.de/freiham/<05.08.2022>>

Neubau Bruttogeschossfläche (BGF)	Flächeneinsparung 3 %	Primärenergieeinsparung PENE	Emissionseinsparung CO <sub>2</sub>
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[MWh]	[t]
1.000	30	51	14
10.000	300	510	144
100.000	3.000	5.100	1.440
1.000.000	30.000	51.000	14.400

Tab. 1 Primärenergie (PEne) und Emissionseinsparung (CO<sub>2</sub>) in Abhängigkeit der Neubaufäche, Werte für 3% Flächeneinsparung (Tabelle: Wolfram Stephan)

halt“ geschaffen werden. Bei einem Projekt wie der oben genannten Platensiedlung in Frankfurt am Main könnte allein bei den Aufstockungen die Anzahl zusätzlicher Wohneinheiten Faktor 5 und mehr betragen.

#### Ressourceneffizienz durch Flächenreduktion

Ein Flächengewinn bedeutet eine Verringerung des Ressourceneinsatzes (z. B. Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)) und der Emissionen (hier CO<sub>2</sub> als Äquivalenzwert für das (relative) Treibhauspotential/ Global Warming potential GWP). Bei der Ökobilanzierung eines Gebäudes nach DGNB<sup>11</sup> bzw. BNB<sup>12</sup> wird für die Baukonstruktion für die nicht erneuerbare Primärenergie (PEne) von einem Referenzwert von 34 kWh/m<sup>2</sup>a und für den äquivalenten CO<sub>2</sub>-Wert (GWP) von 9,4 kg/m<sup>2</sup>a ausgegangen. Der Betrachtungszeitraum beträgt 50 Jahre. In Abhängigkeit von der Neubaufäche ergeben sich die in Tabelle 1 gezeigten Einsparwerte.

## 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Eine wesentliche Zukunftsaufgabe, gerade hinsichtlich der gesellschaftlichen Herausforderungen Energie- und Ressourcenwende sowie Klimaanpassungsstrategien, ist die energetische Ertüchtigung der Altbauten. Im Kontext dieser aktuellen Aufgaben sind auf dem Bausektor bauliche Interventionen im Gebäudebestand von zentraler Bedeutung. Zum einen vertikale Erweiterungen, Aufstockung unter Ausnutzung der vorhandenen Tragstruktur, zum anderen horizontale Erweiterungen, Ergänzung neuer Räume, darüber hinaus ebenso die energetische Ertüchtigung der Außenwand/Fassade. Neben der Sanierung der Gebäudehülle sind hier insbesondere im (sub-)urbanen Bereich bauliche Verdichtungen von Relevanz, um den weiteren Flächenverbrauch zu minimieren.

Für den Mehrbedarf an Wohnungen vor allem in den boomenden Städten und (Metropol-)Regionen stellen Dachausbauten und Aufstockungen einen bereits vielfach erfolgreich realisierten Lösungsansatz dar. Damit muss kein neues Bauland ausgewiesen werden und die Infrastruktur ist bereits vorhanden. Nachverdichtungen können auch Impulse für „mehr Urbanität“ ermöglichen, durch eine „bessere soziale und funktionale Mischung“.<sup>13</sup>

Nicht zuletzt verbessert sich die Energieeffizienz der Gebäude, indem der Heizwärmebedarf für die obersten Wohnungen bis zur Hälfte gesenkt werden kann. Innerstädtische Baulücken haben ebenso ein großes Potential im Bereich Energieeinsparung.

Darüber hinaus gewinnen sparsamer Ressourcenverbrauch und nachhaltige Stoffkreisläufe im Bausektor weiter an Bedeutung. Die Natur bietet eine Vielzahl von alternativen Stoffen, die zeigen, dass diese genauso leistungsfähig sind, wie konventionelle Materialien. Nachwachsende Rohstoffe sind nicht nur als grundsätzliches Thema zu betrachten – bezogen auf Einsatzgebiete der Basismaterialien wie z. B. dem Holzbau – sondern müssen auch stets bezüglich ihrer chemischen Struktur und der Extraktion von Bestandteilen untersucht werden.

So gibt es für Betone neben den herkömmlichen Bewehrungsarten mittlerweile eine Reihe von Naturfasern, wie diese beispielweise in der Bauindustrie zur Bewehrung im Lehm- oder als Dämmstoff eingesetzt werden. In einer früheren Forschungsarbeit zu „Holzleichtbe-

11 DGNB System, Mai 2018

12 BNB Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), 2020, <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de> <26.07.2022>

13 Tichelmann et al., 29. Februar 2016, S. 65



Abb. 5 Experimentalgebäude „green:house“ an der Bauhaus-Universität in Weimar (Foto: Tobias Adam)



Abb. 6 Außenwandelement durch Extrusion von HLB hergestellt (Foto: TU München, Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion)

I. Kurze Darstellung

ton mit Textilbewehrung<sup>14</sup> wurden an der Technischen Hochschule Nürnberg bereits Hanf-, Jute- und Flachsfasern eingesetzt. Dabei zeigten alle natürliche Bewehrungsvarianten hohe E-Module zwischen 7.200 N/mm<sup>2</sup> und 16.400 N/mm<sup>2</sup>. Daneben konnten ebenfalls ausreichende Zugfestigkeiten zwischen 500 N/mm<sup>2</sup> und 800 N/mm<sup>2</sup> und Bruchdehnungen zwischen 3,1 % bis 7,8 % nachgewiesen werden.

#### 4.1 Außenwand-/Fassadenbauteile aus Holz(leicht)beton (HLB/ HB)

An der Technischen Universität München wurden in Folge von experimentellen Arbeiten mit Holzleichtbeton als Massivabsorber, die letztlich nur ein eingeschränktes Potential erkennen ließen, Konzepte für eine Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise erarbeitet. Die mehrschichtigen Aufbauten von Außenwandkonstruktionen stellen ein (Weiter-)Entwicklungspotential im Bereich des innovativen Holzbaus dar. Solche Verbundkonstruktionen können zu einer Verbesserung der statischen (geringeres Eigengewicht) und schalltechnischen Eigenschaften von Decken- und Wandbauteilen führen.

Der hohlraumarme Aufbau ermöglicht ein höheres Wärmespeichervermögen<sup>15</sup>, einen ausgeglicheneren Feuchtehaushalt und unterbindet die innere Brandweiterleitung. Für ein Holzhochhaus in Zürich, im Rahmen eines Planungsgutachtens entwickelt,<sup>16</sup> bildet die Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise die konzeptionelle Basis der baukonstruktiven Ausführung.

Unter Leitung von Walter Stamm-Teske wurde in Weimar an der Bauhaus-Universität das green:house-Projekt etabliert, das sich in Fortführung von Forschungs- und baupraktischen Arbeiten aus den 1960er und 1970er Jahren<sup>17</sup> mit Holzbeton<sup>18</sup> als Baustoff für Außenwandkonstruktionen beschäftigt. Dabei zeigt das diffusionsoffene Kompositmaterial statisch-aussteifende Eigenschaften bei guten Wärmedämm- und akustischen Werten. Verwendung findet ein Holzbeton, bei dem Holzhackschnitzel einer relativ groben Siebfraktion (20 – 50 mm) mit Zement als Bindemittel und Wasser zu 8 cm starken Bauplatten (1,25 m x 1,25 m) verarbeitet werden. Der Wandaufbau besteht aus einer ausgedämmten Holzrahmenkonstruktion, die beidseits mit den Holzbetonplatten bekleidet ist und sowohl im Außenbereich als auch raumseitig als Putzträgerschicht dient. Damit wird in dem realisierten kubischen Experimentalgebäude (Abb. 5), mit regelmäßigen hochformatigen Öffnungen in einem klaren Raster, dieser „alte und doch neue Baustoff“ jedoch nicht sichtbar eingesetzt.<sup>19</sup>

Einen äußerst spannenden Ansatz mit Holz-Zement-Mischungen zeigte ein Forschungsprojekt, bei dem großformatige Bauteile durch Extrusion von Holzleichtbeton additiv hergestellt werden<sup>20</sup>. (Abb. 6) Dabei fertigt ein Industrieroboter mit speziellem Extruder schichtweise und schalungsfrei geschosshohe monolithische Außenwandelemente mit Hohlkammern (1,00 x 0,275 m [L x B]). Die Oberflächen charakterisieren die horizontal aufgetragenen Raupen (etwa 25 mm breit und 10 mm hoch).<sup>20</sup> Inwieweit die aus dem Herstellungsprozess resultierende reliefartige Struktur bereits finale Oberflächen-Qualitäten aufweist oder diese erst durch Nachbearbeitungsschritte objektspezifisch erfolgen, ist noch offen.

14 Krippner/Freimann, November 2011, S. 30-49

15 Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien (PCM); vgl. Krippner, 3/2005

16 Vgl. Herzog/Sieveke, 2002

17 Vgl. u. a. Bursian/Pinternagel, 1973

18 Zum Material sowie verwendete Bezeichnungen/Synonyme vgl. <http://www.materialarchiv.ch/app-tablet/#detail/2119/holzbeton> <15.04.2020>

19 Vgl. Stamm-Teske, 2011

20 Winter et al., 2016

I. Kurze Darstellung



Abb. 7 Fassadezustand mit strukturierten Holzleichtbetonplatten als Fassadenbekleidung, 22.05.2014 (Foto: Roland Krippner)



Abb. 8 ... nach (Langzeit-)Bewitterung, 17.10.2024 (Foto: Roland Krippner)



Abb. 9 Rezyklierung von Holzleichtbeton (rHLB) (Foto: Thomas Freimann)

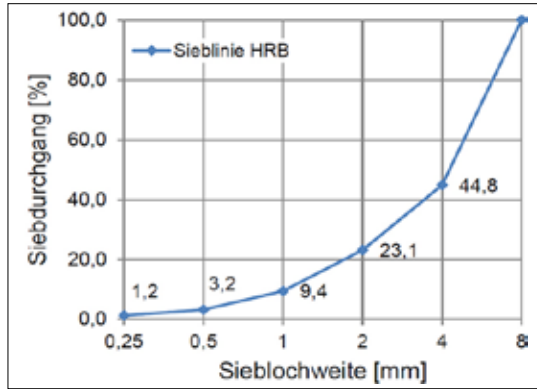


Abb. 10 Sieblinie des rHLB (Grafik: Thomas Freimann)

Holzleichtbeton<sup>21</sup> eignet sich aufgrund seiner bauphysikalischen Eigenschaften und ästhetischen Qualitäten, speziellen Eigenfarbigkeit und vielfältigen Möglichkeiten der Oberflächengestaltung, besonders zur Verwendung im nicht lasttragenden und vor allem sichtoffenen Bereich.

Zu berücksichtigen ist allerdings, dass beim langfristigen Austrocknen von plattenförmigen Bauteilen (liegend hergestellt) leicht einseitige Verkrümmungen auftreten können. Daher sind bei großformatigen Platten eine Reihe von herstellungsbedingten Besonderheiten zu berücksichtigen; besonders für raumhohe dünne Bauteile (Schlankheit  $\lambda \geq 30$ ) ist eine sachgerechte Lagerung nach dem Ausschalen zu beachten.<sup>22</sup>

Gerade im Fassadenbereich eröffnen plattenförmige Bauteile aus HLB durch unterschiedliche Formgebung, Zuschnitte, Befestigungs- und Montagesysteme sowie vielfältige Oberflächenbehandlungen ein weitreichendes Repertoire an Gestaltungsmöglichkeiten. Auch weist Holzleichtbeton eine sehr gute Dauerhaftigkeit und hohe Witterungsbeständigkeit auf, was Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen und Tests an Fassadenständen belegen.<sup>23</sup> Allerdings fehlen weiterhin noch Langzeitversuche. (Abb. 7 + 8)

Holzleichtbeton stellt eine Art 'Low Tech'-Ansatz im Bauwesen dar: Einsatz von Reststoffen bei energie- und ressourcensparsamen Herstellungsprozessen. Seit 2009 wird an den Fakultäten Architektur und Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm an verbesserten Materialeigenschaften und der Erweiterung des Einsatzspektrums gearbeitet.<sup>24</sup> Ziel ist die Optimierung von HLB als Material für plattenförmige Bauteile im Bereich von Innenwand und Unterdecke sowie zur Fassadenbekleidung. Der innovative Baustoff Holzleichtbeton befindet sich nach mehrjähriger Forschungsarbeit im Labormaßstab und ersten 1:1 Testversuchen an der Schwelle zur Praxisanwendung.

21 Vgl. Krippner et al., 2008, S. 21; Urbanas et al., 2009 und Freimann, 2014 sowie Deutscher Holzbaupreis 2005 [Engere Wahl "Innovative Bauprodukte"], Mai/2005, S. 41

22 Vgl. Krippner/Freimann, November 2011, S.84, 95

23 Vgl. Krippner, 2004, S.119ff., Krippner et al., 2008, S. 100ff.

24 Vgl. Krippner/Freimann, November 2011 und Krippner/Freimann, November 2017

#### 4.1.1 Zur ökologischen Optimierung von Holzleichtbeton

I. Kurze Darstellung

Bei ersten Einschätzungen<sup>25</sup> zur ökologischen Bewertung von Holzleichtbeton ist der maßgebliche Einfluss des Bindemittels offensichtlich geworden. Hier gilt es Alternativen zum Bindemittel Zement, zum Beispiel durch den Einsatz "alkalisch aktivierte(r) Binder"<sup>26</sup> oder calcinierter Tone<sup>27</sup> für eine auch ökologische Optimierung von Holzleichtbeton in die Materialuntersuchungen mit einzubeziehen.<sup>28</sup>

Darüber hinaus sind im Sinne einer nachhaltigen Verwendung von Baustoffen Rezyklierungsmöglichkeiten von HLB (rHLB) zu nutzen. In dem Projekt „Holzleichtbeton als Material für die Sanierung von Außenwänden“ wurde bereits der „Frage nachgegangen, ob eine Wiederverwendung bzw. Beimischung z. B. von ausgehärteten Reststücken oder Altbeton zum HLB möglich ist. Die orientierenden Versuche haben gezeigt, dass rezyklierter Holzleichtbeton (rHLB) (Abb. 9) unproblematisch hergestellt werden kann. Da die Holzspäne bereits durch Herstellung des Holzleichtbetons mineralisiert worden sind, konnten beim rezyklierten HLB geringere w/z-Werte und handelsübliche Normzemente verwendet werden, um eine vergleichbare Frischbetonkonsistenz einzustellen. Die Rohdichte stieg auf ca. 1,5 kg/dm<sup>3</sup> an. Mit Festigkeiten von 26 bis 33 N/mm<sup>2</sup> wurden beim rHLB deutlich höhere Werte gegenüber dem Holzleichtbeton erzielt. Die Sieblinie der rHLB-Gesteinskörnung ähnelt dabei dem Verlauf einer A8 Sieblinie (Abb. 10), wobei der k-Wert bzw. der Wasseranspruch mit  $k = 4,23$  vergleichsweise hoch ausfällt.“<sup>29</sup>

#### 4.2 Schlanke und hochwärmedämmende Fassadenbauteile

Im Bereich der Entwicklung schlanker und hochwärmedämmender Fassadenelemente stellt die Forschungsarbeit "vakutex. Vakuumgedämmte Fassadenelemente aus Textilbeton" an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig HTWK entstanden, eine wichtige Referenz dar. Die Forscher am ai:L Architektur-Institut haben für ihre Fassadenelemente Bauteilschichten aus Textilbeton mit einem Dämmkern aus mikro- bis nanostrukturierten Materialien (Vakuumisulationspaneele) kombiniert.

Nach zwei Jahren Forschung entstand ein Prototyp mit Abmessungen von 1,50 m x 3,20 m als "nichttragende vorgehängte Elementfassade". Das vorgefertigte Bauteil ist mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von 0,15 W/(m<sup>2</sup>K) für den Einsatz im Passivhaus geeignet. Das Projektteam stellt heraus, dass durch den "ressourcenschonenden Einsatz von Materialien in den schlanken und leichten Elementen (Gewicht: rd. 100 kg/m<sup>3</sup>) ... der Primärenergiebedarf um 60 %, das GWP um 75 % gegenüber einer energetisch vergleichbaren Stahlbeton-Vorhangfassade reduziert werden (kann). Je nach Gebäudegeometrie ergibt sich durch die schlanke Konstruktion ein Nettogrundflächengewinn von bis zu 15 %, woraus insbesondere in gehobenen Innenstadtlagen ein ökonomischer Mehrwert entsteht."<sup>30</sup>

Allerdings stellen die Forscher in ihrem Fazit heraus, dass "Entwicklungsbedarf besteht für das Element in der Optimierung der Elementfugen, der Herstellungsprozesse und der Haltbarkeit der Vakuumisulationspaneele"<sup>31</sup>. Ergänzend ist anzumerken, dass Vakuumisulationspaneele zusätzlich auch in der Werkhalle unter geschützten Arbeitsbedingungen eine besonders sorgfältige Handhabung erfordern und auch aktuell eine teure Materialgruppe darstellen.

In diesen Kontext können auch die Arbeiten an der Technischen Universität Dortmund, Architektur und Bauingenieurwesen zu "Aerogel – Entwicklung von Hybridbeton-Elementen mit Aerogel-Schaumbetonkern" verortet werden. Zwischen "zwei nanooptimierten UHPC-Deckschichten" bilden pulverförmige Aerogele in einem schnellhärtenden Leichtbeton einen tragfähigen Kern zur Herstellung von mehrschichtigen monolithischen Fassadenpaneelen.<sup>32</sup>

Zu den "Abmessungen des funktionsoptimierten Bauteils, das sich auch für den Einsatz im mehrgeschossigen Bauen eignet," heißt es, diese "erscheinen mit 37(!) cm vergleichsweise schlank".<sup>33</sup> Damit leistet der Ansatz indessen für Neubauplanungen im urbanen Kontext und bei Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand, keinen wirklich signifikanten Flächengewinn bei Außenwandkonstruktionen.

#### 4.3 Nanoporöse Materialien

Bei mikro- bis nanostrukturierten (Dämm-)Materialien sind in den vergangenen Jahren einige

25 Greis, WS 2012/13, S. 68-78

26 Dittrich, 01/2017

27 <https://www.vdz-online.de/leistungen/leistungsfahigkeit-von-zement/calcinierte-tone> <26.07.2022>

28 Vgl. Krippner/Freimann, November 2017, S. 31

29 Krippner/Freimann, November 2017, S. 12

30 Hülsmeier, 2013, S. 140f.

31 Hülsmeier, 2013, S. 141

32 <https://www.bauwesen.tu-dortmund.de/reb/de/Forschung/Aerogel-Hybridbeton/index.html> <15.02.2021>

33 Albus/Hollmann-Schröter, 2/2021, S. 66

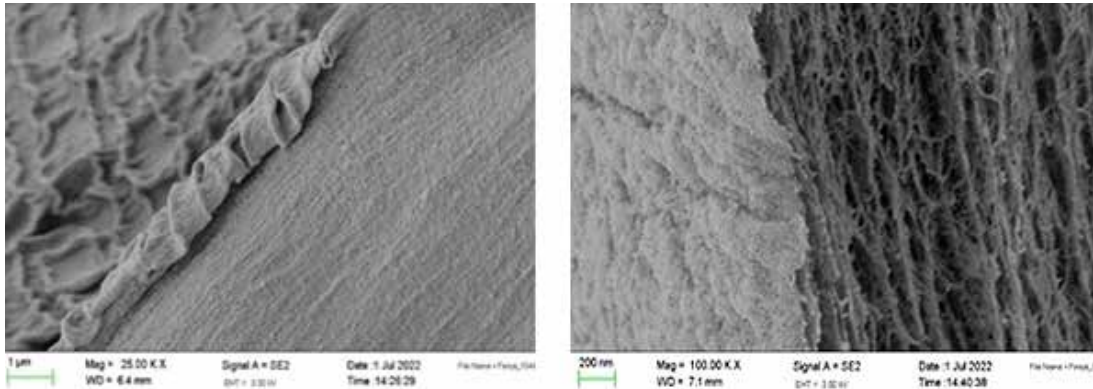


Abb. 11 Rasterelektronenmikroskop (REM)-Bilder der Ligninschicht (links) und der Alginat-Aerogel-Partikel (rechts) (Fotos: TUHH-TVt)

I. Kurze Darstellung

neue Forschungsarbeiten präsentiert worden und auch interessante und vielversprechende Produkte auf dem Markt mittlerweile verfügbar.

#### 4.3.1 Ligninbasierte Aerogele

In den letzten Jahren hat das Interesse an der Verwendung von biologisch nachwachsenden Rohstoffen als fortschrittliche Materialien für die Wärmedämmung zugenommen. Die daraus resultierenden Dämmstoffe sind in der Regel leicht und porös, was allerdings oft zu begrenzter mechanischer Stabilität führt. So wurde beispielsweise Lignin als Füllstoff verwendet, um die geringe mechanische Stabilität von Zellulose-Aerogele zu verbessern; das Aerogel mit 50 % Lignin fördert die Verringerung der Wärmeleitfähigkeit um 0,144 W.m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> im Vergleich zu 0,174 W.m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> für Aerogele mit 0 % Lignin und verbessert gleichzeitig die mechanische Stabilität. Die Zugabe von 95 % Lignin führte jedoch zu einem abrupten Anstieg der Dichte und damit zum Zerreißen des Zellulosenetzwerks.<sup>34</sup>

Bei Resorcin-Formaldehyd (RF) Aerogelen kann Lignin auch einen Teil des Resorcins in der Reaktion mit Formaldehyd ersetzen. Allerdings ist das Lignin weniger reaktiv als Resorcin, so dass eine hohe Ligninkonzentration (100-90 %) die Sol-Gel-Polymerisationsreaktion verhindert.<sup>35</sup> Anschließend waren die Oberfläche und das Volumen der Mikroporen solcher Aerogele geringer als das des RF-Aerogels, die Dichte entsprechend größer. Weiterhin wurde Lignin mit Polysacchariden Co-gelliert, um biobasierte hybride Aerogele herzustellen. Im Falle von Alginat konnten stabile hybride Hydrogele bis zu einem Verhältnis von 2:1 (w/w) Alginat zu Lignin (1,5 Gew.-% Gesamtbioolymerkonzentration) gebildet werden.<sup>36</sup>

Die daraus resultierenden Aerogele wiesen eine Schüttdichte im Bereich von 0,03-0,07 g.cm<sup>-3</sup> und einer Oberfläche von bis zu 564 m<sub>2</sub>.g<sup>-1</sup> auf. Die Nachteile der zuvor erwähnten Ansätze sind jedoch

- technologische Aspekte des Upscalings der Produktion von Aerogel-Monolithen
- ungenutztes Potential der Lignin-Funktionalität, wird dies als reiner Füllstoff verwendet.

Am Institut für Thermische Verfahrenstechnik der TUHH wurde im Rahmen des Projekts POLIGOM<sup>37</sup> Lignin erstmalig als Beschichtungsmaterial für hybride Alginat-Aerogele entwickelt. (Abb. 11) Eine solche Beschichtung ist vorteilhaft, da die Alginat-Aerogel-Partikel eine hydrophile Oberfläche und offene Porenstruktur aufweisen, die das Eindringen von Feuchtigkeit oder reaktiven Molekülen in das Innere der Materialien ermöglicht und eine Beschädigung der Poren verursachen kann. Die Beschichtung auf Ligninbasis führt zu einer hydrophoben Oberfläche, die die innere Porenstruktur des Alginats schützt und auch für mechanische Stabilität sorgt. Infolgedessen wurde die volumetrische Schrumpfung der Aerogelpartikel während der Herstellung erheblich reduziert, während gleichzeitig eine hohe spezifische Oberfläche von bis zu 300 m<sub>2</sub>.g<sup>-1</sup> erhalten blieb. (Abb. 12 + 13) Dieser experimentelle Ansatz ist den anderen konventionellen Beschichtungsverfahren überlegen, da er zum ersten Mal ein biobasiertes Material (Lignin) als Beschichtungsmaterial einführt und auch die Möglichkeit der gleichzeitigen Gelierung und Beschichtung von Alginat Aerogelen in einem Schritt bietet. Damit wird ein umweltfreundlicher Ein-Schritt-Ansatz für die Beschichtung von Biopolymer-Aerogelen eingeführt.

Die mit Lignin beschichteten Alginat-Aerogel-Partikel setzt man als innovative Dämmstoffe auf Biobasis für Bauelemente ein. Dazu werden die Lignin-Aerogel-Partikel mit zellulosebasierten Materialien in unterschiedlichen Gewichtsverhältnissen zwischen 32 und 2 Gewichts-% gemischt und die Änderung der Wärmeleitfähigkeit gemessen (Tab. 2).

34 Wang, et al, 2016, S. 1-9

35 Dias et al., 2017, S. 204-223

36 Qurashi, et al. 2015

37 <https://www.tuhh.de/v8/research/poligom.html> <05.08.2022>

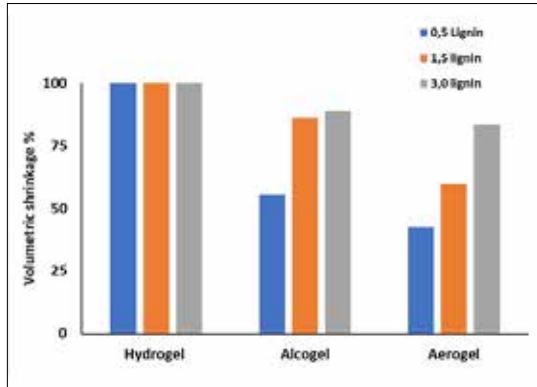


Abb. 12 Veränderung der volumetrischen Schrumpfung der Alginat-Aerogel-Partikel mit Erhöhung des Ligningehalts (Grafik: TUHH-TVTV)

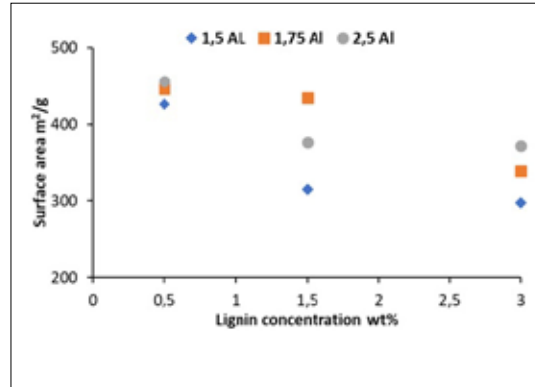


Abb. 13 Spezifische Oberfläche von mit Lignin beschichteten Aerogelpartikeln nach der BET-Adsorptionsmethode (Grafik: TUHH-TVTV)

I. Kurze Darstellung

Mischungsverhältnis von Lignin-Alginat-Aerogel-Partikeln [wt %]	Wärmeleitfähigkeit [mW/m*K]	Wärmeleitfähigkeit-Abnahme [%]
32,0	34,09	-9,0
8,0	36,70	-4,0
2,0	37,41	0,0

Tab. 2 Wärmeleitfähigkeit von Lignin-Aerogel-Zellulose-Mischmaterial (Tabelle: TUHH-TVTV)

Anschließend wurden die Ausgangsmaterialien in ausgehöhlte Bauelemente mit einem Dämmvolumen von 0,28 m<sup>3</sup> eingeblasen.

Es wurde festgestellt, dass der Ersatz von 32 Gewichts-% Lignin-Aerogelpartikeln die Wärmeleitfähigkeit um 10 % senkt und sich aufgrund ihrer mechanischen Stabilität und geringeren Schrumpfung im Vergleich zu ligninfreien Alginat-Aerogelpartikeln auch zum Einblasen in Dämmstoffe eignet. Allerdings neigen die Lignin-Aerogel-Partikel zur Agglomeration, was zu einer inhomogenen Vermischung mit der Zellulose als Ausgangsmaterial führt. Außerdem können die Lignin-Aerogel-Partikel aufgrund ihres geringen Gewichts und ihrer geringen Größe im Vergleich zu Zellulosefasern zuerst eingeblasen werden. Dies hat zur Folge, dass die Lignin-Aerogel-Partikel im Hohlraum von beidseitig beplankten Aufbauten in den Randbereichen sich nicht gut verteilen. Diese technischen Aspekte müssen näher untersucht und optimiert werden.

Insgesamt aber stellen Lignin-Aerogel-Partikel eine vielversprechende innovative biobasierte Wärmedämmung dar. Die Agglomeration der Lignin-Aerogel-Partikel ist in erster Linie auf die hydrophoben funktionellen Gruppen an der Oberfläche zurückzuführen, die die Elektrostatik erhöhen und somit die Agglomeration verursachen, was sich bei höherer Ligninkonzentration auch als problematisch für die Verteilung der Ligninpartikel innerhalb der Aerogel-Partikel erwies.

Außerdem ist der Mechanismus der Ligninbeschichtung während der Gelierung noch nicht vollständig geklärt. Weitere Erkenntnisse sind erforderlich, um die Ligninbeschichtung in Bezug auf Dicke und Homogenität zu kontrollieren. Nach der wissenschaftlichen und labormäßigen Entwicklung von Lignin-Aerogel-Partikeln, wird die Konstruktion der Lignin-Aerogel-Schicht entweder durch Verdichtung zu Platten oder durch Einfüllen in Holzrahmenstrukturen ausgeführt.

#### 4.3.2 Vakuumisolationspaneele (VIP)

Vakuumisolationspaneele "sind Wärmedämmungen, die aus einem feinkörnigen und sehr druckfesten Kernmaterialien bestehen, welche in eine Hochbarrierekunststoffolie oder in eine Edelstahlhülle eingeschweißt und evakuiert werden." Daraus resultiert, dass ein nur 2,5 cm dickes VIP den Wärmeschutz einer EPS-Dämmung mit 14 cm erreicht.<sup>38</sup>



Abb. 14 CALOSTAT® Sandwich – Kern aus CALOSTAT® Pure mit zwei Deckschichten (Foto: Evonik)

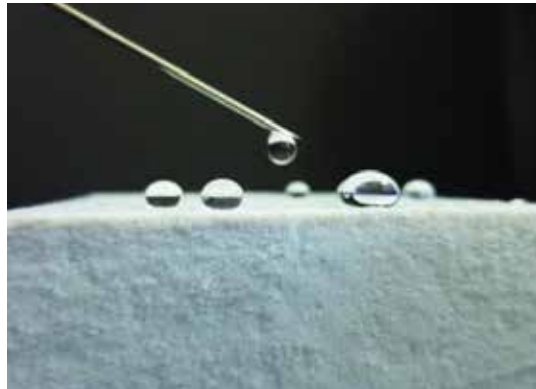


Abb. 15 Abperleffekt der Hydrophobierung (Foto: Evonik)

I. Kurze Darstellung

Am Markt werden Vakuumisolationspaneele<sup>39</sup> bereits seit Jahren sowohl in der Außen- als auch der Innendämmung mit Schwerpunkt bei Maßnahmen des Bauens im Bestand eingesetzt, wenn hohe Anforderungen an kompakten, schlanken Aufbauten bestehen, beispielsweise bei der thermischen Ertüchtigung von auskragenden Stahlbetonbauteilen.

#### 4.3.3 Mineralischer Dämmstoff auf der Basis von synthetisch amorpher Kieselsäure

Mineralische Dämmstoffe auf der Basis von synthetisch amorpher Kieselsäure wie AlphaCore® von Kingspan sind innovative Hochleistungswerkstoffe. Diese wurden für die verschiedenen anspruchsvollen schlanken, sicheren und nachhaltigen Dämmanwendungen entwickelt, siehe CALOSTAT® von Evonik (Abb. 14). In der Baubranche schließen diese die Lücke eines nicht brennbaren Hochleistungsdämmstoffs.

Derartige Dämmstoffe auf der Basis von synthetisch amorpher Kieselsäure sind nicht brennbare Hochleistungsmaterialien auf Basis von Siliciumdioxid. Das rein mineralische Siliciumdioxid ist ein idealer Indikator für hervorragende bauphysikalische Produkteigenschaften, so ist AlphaCore® der Firma Kingspan der höchsten Baustoffklasse A1 (nicht brennbar) zuzuordnen.

Bemerkenswert ist die sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,019 \text{ W/(mK)}$ . Der Design Wert ( $\lambda_D$ ) wird mit  $0,020 \text{ W/(mK)}$  angegeben. Auf Siliziumdioxid basierende Hochleistungsdämmstoffe vergleichbar mit AlphaCore® nehmen kein Flüssigwasser auf (Abb. 15), sind aber dampfdiffusionsoffen und zeichnet sich darüber hinaus durch die Druckfestigkeit von  $\geq 90 \text{ kPa}$  und die Rohdichte von  $165 \text{ kg/m}^3$  aus. Sie beinhalten in der Regel weder Fungizide, Algizide oder Pestizide noch Binde- oder Flammschutzmittel und verhalten sich reaktionsneutral zu anderen Werkstoffen. Diese Materialklasse enthält in der Regel keine fogging-fördernde Inhaltsstoffe und ist im Unterschied zu den meisten markt gängigen fossilen Dämmmaterialien recyclingfähig.

#### 4.4 Umweltwirkung von Fassadenbauteilen

Die Wirkungsabschätzung hinsichtlich Primärenergiebedarf und Treibhauspotential basiert auf dem Bewertungssystem BNB<sup>40</sup>, berechnet mit dem Bauteileditor ELCA<sup>41</sup>. Die ökologischen Kennwerte der Bauteilinformationen werden gemäß: Ökobaudat OBD-2011-II\_A1<sup>42</sup> berücksichtigt

Während für einen Großteil der herkömmlichen Materialien vollständige Datensätze nach DIN EN 15804 und DIN EN 15978 vorliegen, gibt es für die im Forschungsprojekt neu zu entwickelnden Materialien

- (Holz-)Leicht- sowie weitere Sonderbetone unter Einsatz von organischen Reststoffen und Zement (konventionell und emissionsarm)
- Ligninbasierte Aerogele

keine zertifizierten Grundlagen zur Beurteilung der Umweltwirkung.

<sup>39</sup> "1 cm Vakuumdämmung entspricht 5 – 8 cm Standarddämmstoff. Der Lambda-Wert von  $0,007 \text{ W/(mK)}$  sowie der Up-Wert von bis zu  $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ". <http://www.variotec.de/start/30/produkte/aussendaemmung-vip-qasa-vakuum/> <14.04.202>

<sup>40</sup> <https://www.nachhaltigesbauen.de/> <06.04.2022>

<sup>41</sup> ELCA: <https://www.bauteileditor.de/> <06.04.2022>

<sup>42</sup> ÖKObaudat: <https://www.oekobaudat.de/> <06.04.2022>

I. Kurze Darstellung

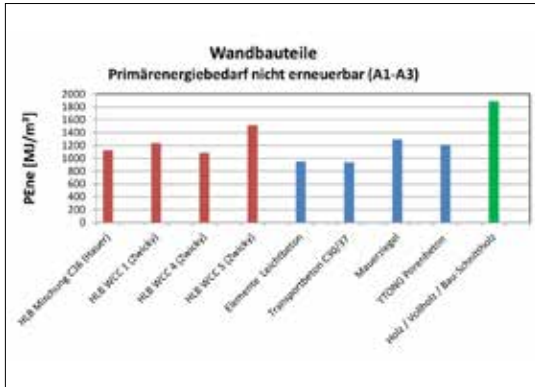


Abb. 16 Vergleich nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PEne) von HLB (rot) und konventionellen Baustoffen (blau) ... (Grafik: Wolfram Stephan)

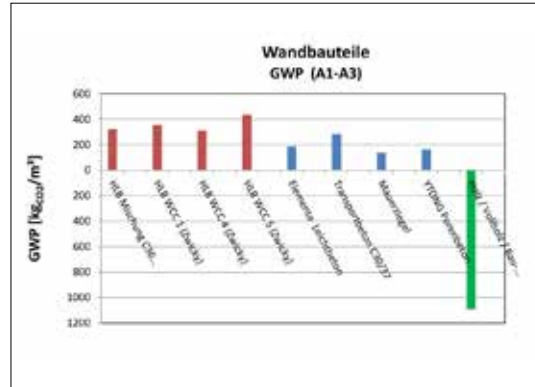


Abb. 17 ... und GWP-Wert von HLB (rot) und konventionellen Baustoffen (blau) für Lebenswegphasen A1,A2,A3 nach DIN EN 15978 (Grafik: Wolfram Stephan)

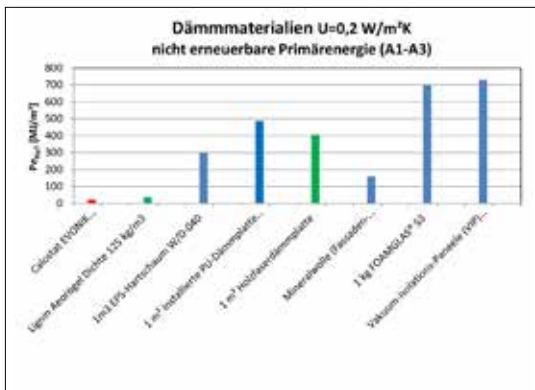


Abb. 18 Vergleich von Kennwerten (Dichte, Dämmstoffdicke) von Aerogelen mit Dämmstoffen und VIP (U-Wert =0,2 W/m²k) des PEne ...

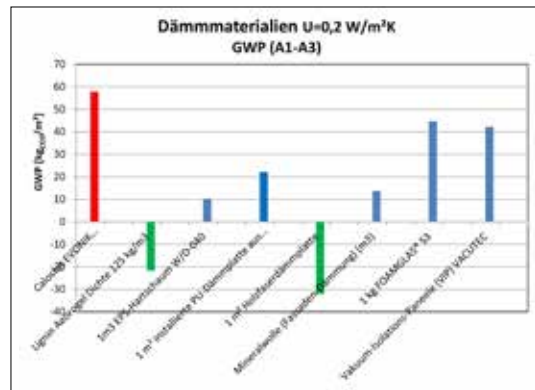


Abb. 19 ... und des GWP-Wertes für Lebenswegphasen A1,A2,A3 nach DIN EN 15978 (Grafiken: Wolfram Stephan)

Zu dem organischen Aerogel liegen ebenso zertifizierte Umweltproduktdeklarationen (epd) vor wie zum mineralischen Dämmstoff auf Basis von synthetisch amorpher Kieselsäure vom Projektpartner Kinspan (Evonik).<sup>43</sup>

#### 4.4.1 Holzleichtbeton (HLB)

Zu Holzleichtbeton liegen von Hauer<sup>44</sup> und Zwycski<sup>45</sup> Arbeiten vor. Eine erste Wirkungsabschätzung von Stephan<sup>46</sup> zeigt, dass insbesondere der Einsatz von Portland- (CEM I) oder Portlandkompositzementen (CEM II) die Umweltbilanz (nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (PEne) und CO<sub>2</sub>-Emissionen (GWP)) beeinflusst. (Abb. 16 + 17)

Durch Reduktion des Zementanteils und durch den Einsatz von emissionsarmem Zement (z. B. Calciumsulfoaluminat-Zement) ist bei HLB eine Reduktion der Werte um bis zu 50 % zu erwarten.<sup>47</sup>

#### 4.4.2 Neue Dämmstoffe: Silikat und Lignin basierte Aerogele

Durch den Einsatz von Silikat- oder lignin-basierten Rohstoffen ergeben sich niedrige Primärenergiekennwerte. Als Referenzprodukt für mineralische Dämmstoffe auf der Basis von synthetisch amorpher Kieselsäure wird Calostat, welches zwischenzeitlich durch das vergleichbare Produkt AlphaCore von Kinspan ersetzt wurde, und für lignin-basierte Aerogele Buchenholz als Ausgangsmaterial angesetzt. Entscheidend für die Emissionskennwerte sind die Herstellverfahren der Aerogele. (Abb. 18 + 19) Die Kennwerte für lignin-basierte müssen im Rahmen des Projekts weiter verifiziert werden.

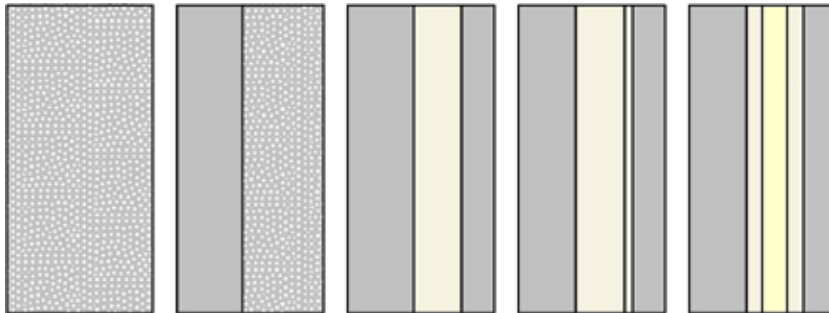
43 Calostat Evonik GmbH: EPDEVO20170122IBA1DE: Umweltproduktdeklaration nach /ISO 14025/ und /EN 15804/

44 Hauer, 2011

45 Zwycski, 01.02.2016

46 Stephan, 09.04.2022

47 <https://www.wwf.de> [Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie] <09.04.2022>



I. Kurze Darstellung

Abb. 20 Fassaden-Sandwich-Element, Aufbauten und Schichtenfolgen (Zeichnungen: Thomas Kauer)

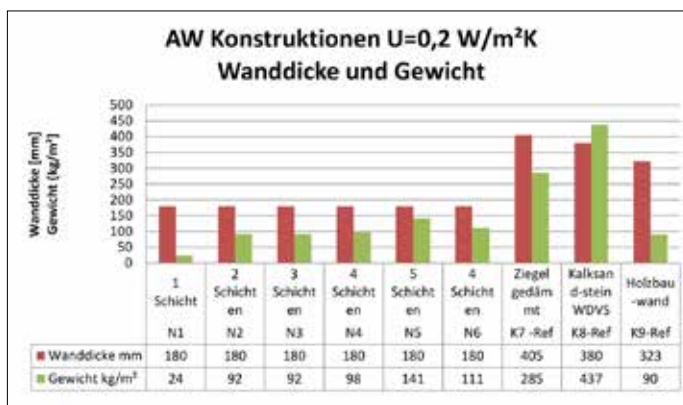


Abb. 21 Außenwandbauteil mit U-Wert 0,2 W/m²K - Vergleich der erforderlichen Wandstärke und Gewicht ...

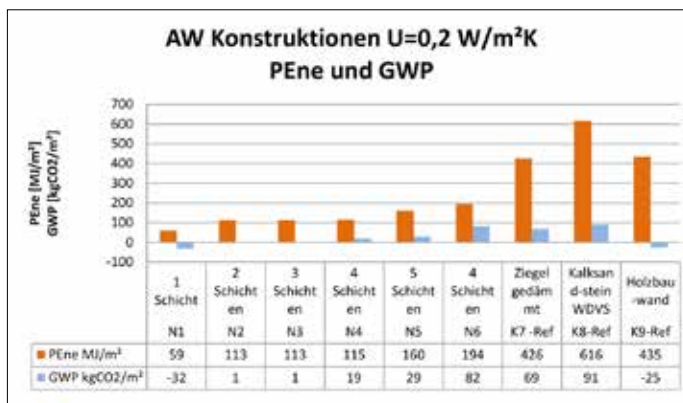


Abb. 22 ... sowie des Primärenergiebedarfs und der Umweltwirkung (GWP) (Grafiken: Wolfram Stephan)

#### 4.4.3 Bewertung von Wandkonstruktionen

Für die im HLBhybrid-Projekt vorgeschlagenen neuen Aufbauten (Abb. 20) liegt eine erste Abschätzung vor. Diese werden mit drei marktüblichen Wandkonstruktionen verglichen:

- Mauerwerk (Ziegel) gedämmt
- Kalksandstein plus Wärmedämmverbundsystem (WDVS)
- Holzrahmenbauweise [Holzbauwand]

Es zeigt sich, dass alle marktüblichen Wandaufbauten eine größere Wanddicke und ein größeres Gewicht aufweisen. Bei der Holzrahmenbauwand wird, der Bauart entsprechend, in der Regel eine Holzwerkstoff (OSB)-Platte zur Aussteifung der Ständerkonstruktion berücksichtigt. Diese wirkt sich negativ auf das Gewicht und den Primärenergiekennwert aus.

Alle neuen Konstruktionsprinzipien zeigen Vorteile beim Primärenergiebedarf. Durch den Zementanteil im Holzleichtbeton weisen die neuen Aufbauten gegenüber einer konventionellen Holzrahmenbauwand höhere GWP-Werte auf.

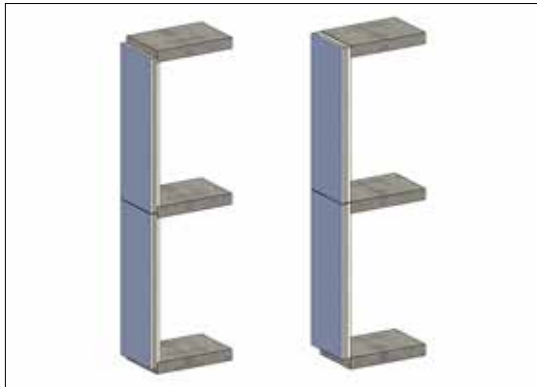


Abb. 23 Konstruktionsprinzipien Tragwerk - Fassade (Zeichnungen: Thomas Kauer; nach Albus et al., 2/ 2021, S. 66)

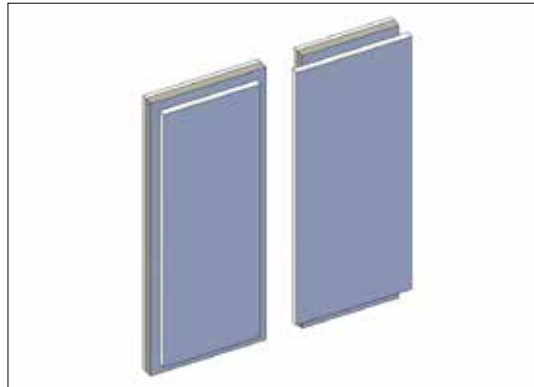


Abb. 24 Fügungssprinzipien Fassadenbauteile (Zeichnungen: Thomas Kauer; nach Albus et al., 2/ 2021, S. 66)

I. Kurze Darstellung

#### 4.4.4 Weitere Schlussfolgerungen und Erkenntnisse zu Projektbeginn

- Nur bei Konstruktionsprinzip 1 (Monolithisches Bauteil mit durchgängig homogenen Materialmix; Abb. 20 links) kann die Wandstärke von 180 mm nicht erreicht werden (zu hoher Anteil an lignin-basiertem Aerogel erforderlich)
- Das Gewicht ist für alle Konstruktionsprinzipien geringer als bei den marktüblichen Konstruktionen (Abb. 21)
- Je aufwändiger die Konstruktion, desto höher Primärenergiekennwert und Umweltbelastung (GWP) (Abb. 22)
- Alle neuen Außenwandkonstruktionen unterschreiten beim PENE und teilweise beim GWP-Wert die Werte der marktüblichen Konstruktionen erheblich, auch bedingt durch die geringe Bautiefe und den geringeren Materialeinsatz
- Eine Holzrahmenbauwand in konventioneller Bauweise schneidet beim GWP-Wert günstiger ab, da bei den neuen Konstruktionen Holzverbundwerkstoffe (HLB) mit Zement verarbeitet werden
- Für die neuen Baustoffe liegen derzeit keine validierten Datensätze für die Umweltwirkung vor. Die Kennwerte müssen im Forschungsprojekt bestätigt werden.

## 5 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Auf Basis der ausführlich genannten Forschungsarbeiten zu Holz(leicht)beton und den Einsatzgebieten mikro- bis nanostrukturierter Dämmmaterialien soll ein kombiniertes hochleistungsfähiges, schlankes Bauteil für nichttragende Außenwände entwickelt werden. In der Kombination und Weiterentwicklung dieser beiden Bereiche besteht ein vielversprechender Ansatz für ein nachhaltiges und wirtschaftliches Fassadenbauteil. Dabei eignet sich (Holz-) Leichtbeton aufgrund seiner ästhetischen Qualitäten auch zur Verwendung für sichtoffene Oberflächengestaltungen.

### 5.1 Technische Aspekte:

Ein besonderer Schwerpunkt der Projektarbeiten liegt darin, ein nachhaltiges und kostengünstiges Bauelement zu entwickeln, welches sich auch durch einfache Herstellung und eine praktikable Montage auf der Baustelle auszeichnet. Insbesondere soll durch die primäre Verwendung von Holz, Holzverbundwerkstoffen und Holzresten (als Zuschlagsmaterial) sowie Holzbestandteilen (Lignin), als ökologische Rohstoffe, ein Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Einsparung und Ressourceneffizienz geleistet werden.

Technische Eigenschaften (Mindestanforderungen) des neuen Fassadenbauteils:

- Wandstärke max. 180 mm
- Wärmedurchgangskoeffizient U 0,20 W/(m<sup>2</sup> K)
- Wärmedurchgangswiderstand R 4,88 (m<sup>2</sup> K)/W
- korrigiertes, bewertetes Schalldämm-Maß Rw mindestens 40 dB
- Brandschutz bei nichttragenden Außenwänden: Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102-2 / F60-A (hochfeuerhemmend)
- Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2018 Anhang A

- Installationsfähige Innenschicht mindestens 40 mm
- Witterungsbeständigkeit

I. Kurze  
Darstellung

Zur Sicherstellung der statischen Mindesteigenschaften werden je nach Grundstabilität des Bauteils textile Bewehrungen in Form von Matten und Schubgitter eingesetzt. Als Alternativen zu herkömmlichen 2D bzw. 3D- Gitter aus Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) oder Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) sollen auch natürliche Fasern und/oder nachhaltige, umweltschonende Gewebe aus Basalt, Jute etc. berücksichtigt werden. Menge und Position sind abhängig vom Aufbau und den mechanischen Anforderungen der jeweiligen Konstruktionen mit entsprechenden Materialzusammensetzungen.

## 5.2 Wissenschaftliche Aspekte:

- Ermittlung von mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften zunächst der Material-Rezepturen ((Holz-)Leichtbeton und ligninbasierte Aerogele).
- Auswahl und Evaluierung geeigneter (Holz-)Leichtbeton-Zusammensetzungen (Rohdichte, Zement-, Wasser-, Holz-Anteil etc.) für die Untersuchungen. Herstellung von Prüfkörpern und Platten unterschiedlicher Mischungen. Prüfungen verschiedener Mischungen hinsichtlich Kenndaten (u. a. Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit).
- Im Bereich von Lignin-PU-Schäumen stellen sich Fragen der möglichen Optimierung der schalltechnischen Eigenschaften, die im kleinen Maßstab (Labor) untersucht werden sollen.
- Systematisierung von Konstruktions- und Fügungsprinzipien des Fassadenbauteils sowie Untersuchung der Lagebeziehungen des Fassadenbauteils zur Primärkonstruktion einschließlich konstruktiver und bauphysikalischer Konsequenzen. (Abb. 23 + 24)
- Klärung der geometrischen und stofflichen Ausbildung der Fügung der Fassaden-Sandwich-elemente, u. a. hinsichtlich Feuchtigkeits- und Brandschutz, Luft- und Winddichtigkeit, Luft-/ Körperschall, Montage/Demontage.

## 6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Forschungsarbeiten an der Technischen Hochschule Nürnberg und bei den Projektpartnern haben mehrere Institutionen und Firmen mit (vergünstigten) Materialmustern und -proben sowie fachlicher Expertise in Detailfragen unterstützt:

- AGITEC AG  
Aerogel-Produkte  
Königstraße 27, 70173 Stuttgart  
Jürgen Mandry
- Carbon Cycle GmbH & Co. KG  
Pflanzenkohle  
Schwandorfer Straße 30, 92286 Rieden-Vilshofen  
Michael Wiederer
- Consulta AG  
Alternatives Bindemittel (Römerbeton)  
Nußbergerstraße 31, 94234 Viechtach  
Jürgen Weber, Ivo Fuchs
- rothycon – Roy Thyroff Consulting  
Textile Bewehrung  
Selbitzer Straße 28, 95119 Naila  
Roy Thyroff
- solidian keltex / solidian GmbH  
Textile Bewehrung  
Sigmaringer Straße 150, 72458 Albstadt  
Thomas Bischoff, Johann Josef Pfaff
- Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Labor für Beton- und Baustofftechnologie  
Materialexperimente ((Holz-)Leichtbeton)  
Kesslerplatz 12, 90489 Nürnberg  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann

## II. Eingehende Darstellung

II. Eingehende  
Darstellung

### 1 Entwicklung von Lösungsstrategien

Lösungsstrategien

Anknüpfend an die Aufbauten/ Schichtenfolgen aus dem Antrag (Abb. 20) werden erste grundlegende Entscheidungen für die Entwicklung des Fassaden-Sandwichelements getroffen und Konzepte zu Randausbildung, Befestigung, Fügungen etc. erarbeitet.

Erste Überlegungen betreffen Abmessungen, Öffnungen, Geometrie des angestrebten Fassadenbauteils. Es wird festgelegt, eher kleinformatig zu beginnen (z. B. 3,60 x 1,20 m, 3,60 x 1,35 m oder 3,60 x 2,70 m) im Hochformat. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen opaken Bauteilen ohne und opaken Bauteilen mit Öffnungsbereich(en) in der Fläche. Beim Fassadenkonzept sollen die Gebäudeöffnungen durch den Abstand der Wandbauteile erzeugt werden. Dies eröffnet größere Freiheitsgrade und Anpassungsoffenheit bei der Fassadengestaltung. Ebenso wird damit das Problem Kerbspannungsrisse in den Ecken vermieden. (Abb. A2 – A5 im Appendix)

Das im Fassadenbau universell etablierte Sandwich-Prinzip, wonach die Dämmung (D) im Kern von widerstandsfähigen Schichten auf der Innen- und Außenseite geschützt wird, bildet die grundlegende Basis für die Projektarbeiten.

Allerdings bieten sich bei der Kopplung der inneren und äußeren LB / HLB - Schichten zwei grundsätzlich unterschiedliche Strategien an, die als Lösungsstrategie I (Abb. 25) und als Lösungsstrategie II (Abb. 29) bezeichnet werden. In der Folge ist das Ergebnis der Lösungsstrategie I ein Mehrschichtverbundsystem, während Lösungsstrategie II eher die Charakteristik einer Holzrahmenbauweise hat, nur dass die inneren und äußeren Schalen vornehmlich aus einem Betonwerkstoff (mit textiler Bewehrung und ggf. organischen Zuschlagsstoffen) und nicht aus einem Holzwerkstoff bestehen.

Beide Wege haben ihre jeweiligen Vor- und Nachteile, die sich auch in der ökologischen Bilanz niederschlagen, aber vor allem Herstellung, Montage, Demontage und natürlich das Leistungsprofil des Fassadenelements betreffen.

Auch wenn Lösungsstrategie II nicht dem typischen Produktionsablauf eines Betonfertigteilherstellers wie der Meier Betonwerke entspricht, so wird auch dieser Weg in Versuchen und bei der Entwicklung und Herstellung von Funktionsmodellen verfolgt. Auch in der Diskussion mit den anderen Disziplinen und Projektpartnern ist man sich schließlich einig, dass ein zweigleisiger Weg mit einer Vergleichsmöglichkeit der jeweiligen Eigenschaften und Kennwerte von Fassadenelementen / Funktionsmodellen der beiden Strategien hilfreich ist, die Gesetzmäßigkeiten und Möglichkeiten auf dem Weg hin zu leistungsfähigen Fassadenbauteilen gemäß der Zielsetzung möglichst umfassend zu verstehen.

Mit der Entscheidung wird die Bandbreite an Aufbauten beider Lösungsstrategien aufgezeigt und diskutiert. Auch wenn nicht alle Ansätze auf den ersten Blick gleichermaßen vielsprechend sind, so tragen sie mindestens zum Verständnis bei und bergen darüber hinaus die Möglichkeit für innovative Aspekte.

#### 1.1 Lösungsstrategie I: Überblick zu möglichen Aufbauten

In schematischen Horizontalschnitten im Maßstab 1:10 werden Aufbauten mit variierten und unterschiedlich kombinierten Variablen aufgezeigt und diskutiert. (Abb. 26 – 28 und A7 im Appendix) Die markantesten Parameter / Variablen sind dabei die Werkstoffe selbst, ihre Schichtdicke und Abfolge im Aufbau und die daraus resultierende Gesamtstärke des Wandbauteils. Aber auch andere Aspekte wie die Ausformung der Ränder sowie die Fügung der Bauteile fließen in die Beispiele ein. Als Ergänzung dazu weitere Erläuterungen (Parameter / Variable):

##### *Stärke der Leichtbetonschichten*

Im Regelfall befindet sich die Tragschicht aus Leichtbeton auf der Innenseite, schon deshalb, weil dies die Montage auf der Baustelle von der Raumseite ohne Gefahr von Wärmebrücken gebietet.

Es mag Ausnahmen geben, bei denen die Schichten gleich stark sind oder die stärkere Schicht auf der Außenseite des Wandbauteils liegt. Die konstruktive Mindeststärke der äußeren Schicht liegt bei 30 mm, bei raumhohen Wandelementen ist die innenseitige Schicht in der Regel zur Abtragung von Windlasten über die Geschosshöhe mind. 70 - 80 mm stark, bei kleineren Elementen z. B. für den Brüstungsbereich kann die Stärke ggf. geringer ausfallen, wenn dies der Schallschutz erlaubt.

##### *Ausformung der Leichtbetonschichten*

Grundsätzlich ist es denkbar, die Schichten auch mit deutlich ausgeprägten Rippen zu profilieren, (Abb. 27) was mit folgenden Vorteilen einhergehen kann:

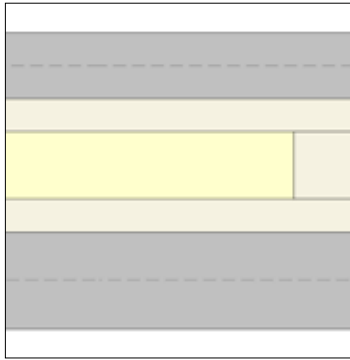


Abb. 25 Wandaufbau: Lösungsprinzip I.a (kpb / OHM-AR)

- Deckschicht (Außen): HLB (900 kg/m<sup>3</sup>), textildbewehrt (Typ Grid, Firma solidian) 40 mm
- Kerndämmung: AlphaCore (195 kg/m<sup>3</sup>), 20 mm
- Kerndämmung: VIP OPTIM-R® (230 kg/m<sup>3</sup>), 40 mm
- Kerndämmung: AlphaCore (195 kg/m<sup>3</sup>), 20 mm
- Deckschicht (Innen): HLB (1.250 kg/m<sup>3</sup>), textildbewehrt (Typ Grid, Firma solidian) 60 mm
- Gesamtaufbau: 180 mm

II. Eingehende Darstellung  
Lösungsstrategien

- effizienter Materialeinsatz für mehr Steifigkeit
- der Abstand zwischen LB i und LB a verringert sich auf 20 bis 30 mm, wodurch sich die Drehmomente bei der kraftschlüssigen Kopplung verringern bzw. die Verbindung der beiden Schichten erleichtert wird
- die Eigenfrequenz zwischen LB i profiliert und LB a ist voraussichtlich unterschiedlich, was dem Luftschallschutz zugutekommen kann
- der hohe profilierte Rand von LB i schützt die Dämmung, erleichtert Befestigungen und Transport
- die entstehenden Kammern können sich für ligninbasierte Aerogelschüttungen eignen
- je nach Herstellungsverfahren fungiert die Dämmung als verlorene Schalung oder sie wird nachträglich eingebracht
- die Gesamtstärke verringert sich, bei gleichzeitiger höherer Steifigkeit
- im Falle von Lösungsstrategie II verbinden auf der Oberseite der Rippen befestigte Holzlaten die Außenschicht mit der Innenschicht

Nachteile sind:

- ein höherer Aufwand bei der Herstellung der Rippen, der sich im Falle von Dämmung als verlorene Schalung verringern lässt
- die Rippen wirken sich nachteilig für den gesamten U-Wert aus, was mit etwas höherer Dämmstärke auszugleichen ist. Direkte Wärmebrücken sind aber vermeidbar.

Prinzipiell lassen sich mit textiler Anschlussbewehrung vorgefertigte Rippen beim Herstellen solcher profilierten Tragschichten verwenden. Dabei „unterfließt“ der Leichtbeton die in der Schalung positionierten Rippen.

#### *Oberflächen der Leichtbetonschichten*

Das Verfahren der Herstellung im Betonwerk entscheidet, welche der Oberflächen der Leichtbetonschichten (spätere sichtoffene Innen- oder Außenseite) gegen eine Schalung betoniert wird und welche nur abgezogen und ggf. nachträglich geglättet wird.

Neben schalungsglatten, glatt abgezogenen oder geglätteten Oberflächen sind auch profilierte bzw. strukturierte Oberflächen unterschiedlichster Ausprägung möglich. Auch nachträgliche Behandlungen der bereits erhärteten oder noch nicht erhärteten Oberflächen beispielsweise mittels Sandstrahlen sind hier zu erwähnen. Es bestehen vielfältige Möglichkeiten der Gestaltung.

#### *Farbigkeit der Leichtbetonschichten*

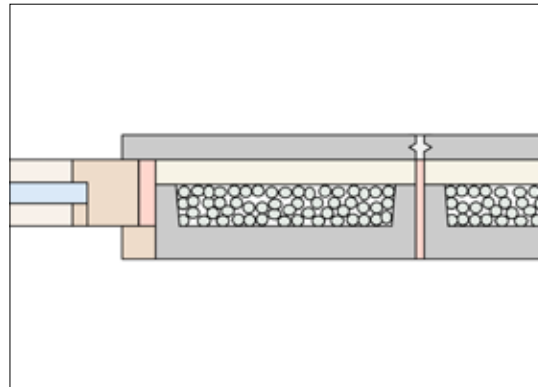
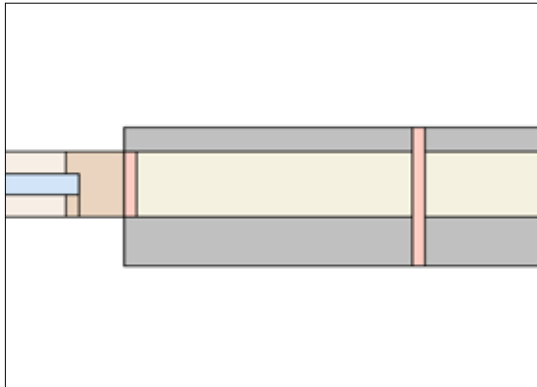
Jede Rezeptur der Leichtbetonschichten hat auch eine bestimmte Farbigkeit zur Folge, deren Wirkung natürlich auch von der Variable „Oberfläche“ abhängt. Mit Zugabe von z. B. Farbpigmenten lässt sich noch gezielter die sichtoffene Wirkung des Werkstoffs steuern.

#### *Herstellungsprozess*

Je nachdem welche der Leichtbetonoberflächen (außen oder innen) schalungsglatt sein soll, kommt entweder das Negativ- oder das Positivverfahren zur Anwendung. Beim Negativverfahren wird die äußere Schicht zuerst gegen die Schalung betoniert und die innere Oberfläche muss dann geglättet werden, falls nicht das ganze Element im Herstellungsprozess aufwendig gewendet wird.

#### *Anzahl, Stärke und Werkstoffe der Dämmschichten*

Wie die Untersuchungen veranschaulichen, sind ein oder mehrere Dämmschichten aus einem oder mehreren Werkstoffen möglich bzw. können aus folgenden Gründen sinnvoll



II. Eingehende Darstellung Lösungsstrategien

Abb. 26 Fassadenbauteil: Lösungsstrategie I – Prinzip (OHM-AR / Peter Bonfig)

Abb. 27 Fassadenbauteil: Lösungsstrategie I – Variante mit Randaufkantungen / Aerogelschüttung (OHM-AR / Peter Bonfig)

<p><b>I.a.1</b> Flächige / teilflächige kraftschlüssige Verbindung mittels Verklebung von LB i, D und LB a. Dies setzt ausreichend schubfeste Dämmmaterialien voraus und schließt Schütungen aus. Stumpfer Stoß der Wandelemente. Montage von Fensterelementen von innen mit Anschlag und Abdeckprofil.</p>	<p><b>I.a.5</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Montage von Fensterelementen mit stumpfem Stoß. Drei Dämmschichten mit geschützter Vakuumdämmung im Kern.</p>	<p><b>I.b.4</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Fügungen mit Versatz und Dichtbändern, in der Variante teils unflexible Abfolge von Montage und Demontage. Integration von Elektroinstallationen.</p>
<p><b>I.a.2</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Montage von Fensterelementen von innen mit Anschlag und Abdeckprofil. Außen- und Innenfuge mit plastischem Mörtel verfügt.</p>	<p><b>I.b.1</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Stöße mit Komprimändern und Versatz. Ausbildung des Versatzes kann Einfluss auf Abfolge von Montage und Demontage zur Folge haben.</p>	<p><b>I.b.5</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Fügungen mit Versatz und Dichtungsprofilen, teils unflexible Abfolge von Montage und Demontage. Außen- und Innenfuge mit plastischem Mörtel verfügt.</p>
<p><b>I.a.3</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Fügungen mit stumpfen Stößen von innen oder außen, mit zusätzlichen Abdeckprofilen bei Fensteranschluss.</p>	<p><b>I.b.2</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Fügungen mit Versatz und Dichtungsprofil und ggf. Dichtstoffen bei den Stößen der LB-Platten. Unflexible Abfolge von Montage und Demontage.</p>	<p><b>I.b.6</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Stumpfer Stoß mit Komprimändern und Versatz der LB-Platten bei teils unflexibler Abfolge von Montage und Demontage. Zusätzliches Sonderelement für Elektroinstallationen.</p>
<p><b>I.a.4</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Montage von Fensterelementen (z. B. Systemfenster mit integriertem Sonnenschutz) mit stumpfem Stoß. Fugen bei Wandelementstößen mit plastischem Mörtel verfügt.</p>	<p><b>I.b.3</b> Lineare oder punktförmige kraftschlüssige Verbindung von D, LB i und LB a, z. B. mit Schubgittern oder Ankern. Fügung der Elemente untereinander nach dem Nut- und Feder-Prinzip mit unflexibler Abfolge von Montage und Demontage.</p>	<p><b>I.c.1</b> Kraftschlüssige Kopplung von LB i und LB a über Profile, z.B. aus GFK-verstärktem Kunststoff. Stumpfer Stoß der Elemente, Außen- und Innenfuge mit plastischem Mörtel verfügt.</p>

Abb. 28 Fassadenbauteil: Lösungsstrategie I – Varianten als Beispiele (Auswahl) (OHM-AR / Peter Bonfig)

sein:

- mit einer konfektioniert verfügbaren Schichtdicke wird nicht die notwendige Dämmstärke erreicht
- zur Erzielung des gewünschten Leistungsprofils sind verschiedene Dämmstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften erforderlich
- gegen mechanische Beanspruchung unempfindlichere Dämmungen schützen empfindlichere Dämmungen wie z. B. Vakuumdämmungen, die bei der geringsten Perforation der Aluminiumhülle ihre Leistungsfähigkeit einbüßen
- Dämmung als Schüttungen werden durch steife plattenartige Dämmungen oder bedingt auch Folien in ihrer Lage gesichert

II. Eingehende  
Darstellung  
Lösungsstrategien

#### *Abfolge der Schichten*

Auch die Abfolge der Schichten, vor allem bei unterschiedlichen Materialeigenschaften, kann ebenso für die Funktion des Wandbauteils von Bedeutung sein, wenn dies die Regelung der Dampfdiffusion oder des Schallschutzes erfordert.

#### *Kopplung der Leichtbetonschichten*

Die kraftschlüssige Verbindung der Leichtbetonschichten durch die Dämmebene ist ein Schlüsselthema aller Lösungsstrategien und beeinflusst Herstellungsweise und das Leistungsprofil im Ergebnis vor allem bezüglich Wärmeschutz (Wärmebrücken) und Schallschutz.

Typische Lösungen bei Betonfertigteilen in Sandwichbauweise mit hochwärmedämmendem Kern sind Gewebe / Gitter (2D) sowie Formteile (3D) aus Kunststoffen bzw. Verbundwerkstoffen als Fasern aus Glas oder Carbon, die zusätzlich mit (weiteren) Kunststoffen verstärkt und stabilisiert werden.

#### *Fügung der Wandbauteile untereinander (Vertikalstoß)*

Beispiele für unterschiedliche Strategien der Fügung der Wandbauteile untereinander und zu anderen Bauteilen wie Fensterelemente werden ebenso grafisch erarbeitet und diskutiert. Dargestellt sind Horizontalschnitte und somit die Ausführung der Vertikalfugen. Die Prinzipien lassen sich aber weitgehend auch auf Horizontalfugen übertragen.

Hygroskopisch und / oder durch Temperatur und / oder Last bedingte Veränderungen von Größe und Form sowie Fertigungstoleranzen der Fassadenelemente und der Primärkonstruktionen bestimmen die Fugenbreite und aufzunehmenden Bewegungen. Dies kann mit wartungsintensiven Dichtmassen und / oder mit Hinterschneidungen / Überlappungen wie nach dem Nut-und-Feder-Prinzip gelöst werden, um die geforderte Dichtheit für Feuchtigkeit, Niederschläge, Wind, Luft, Dampfdiffusion und vor allem Schall zu gewährleisten. Über den Rand des Dämmkerns vorstehende Leichtbetonplatten können sich vorteilhaft bei der Fügung auswirken.

Die dargestellten und erläuterten Lösungswege sind miteinander kombinierbar. Neben den funktionalen Anforderungen wird das gewünschte Erscheinungsbild der innen wie außen sichtbaren Fugen die Wahl der Mittel bestimmen. Auch Profile / Leisten zur Abdeckung der Fugen können ein probates Mittel sein. Innen- und Außenfugen können unterschiedlich gelöst werden.

#### *Abhängigkeit Fügung und Ablauf der Montage und Demontage*

Je nach geometrischer Ausformung der Überlappungen der Bauteile wird die Reihenfolge bei der Montage bzw. Demontage bestimmt. Szenarien für den einzelnen Austausch von defekten Wandelementen sind zu bedenken. Ebenso ist zu klären, ob die Montage von innen oder von außen erfolgen kann / soll. Dies betrifft auch anschließende Bauteile wie Fensterelemente.

#### *Parameter: Ausbildung der Fuge, Schließen der Fuge*

Bei stumpfen Stößen von Bauteilflanken stellen Kompribänder, Dichtmassen oder plastischer Mörtel Lösungen dar; Nuten helfen auf verschiedene Weise zusätzlich bei der Abdichtung.

#### *Abschluss der Ränder*

Für den Transport wie für die Fügung hat der Abschluss der Ränder, vor allem im Bereich der Kernzone mit der Hochleistungsämmung, eine große Bedeutung. Der Schutz der Dämmung hat hohe Priorität und gleichzeitig sollten Befestigungsmöglichkeiten in Form von z. B. Schraubgründen vorhanden sein.

#### *Fügung Wandbauteil und Fensterelement*

Varianten für den Anschlag und das Andichten von anschließenden Fensterelementen sind in die schematischen Darstellungen aufgenommen. Auch hier stellt sich die Frage nach der

Reihenfolge der Montage / Demontage und ob die Fenster von innen oder von außen ange schlagen bzw. montiert werden.

II. Eingehende Darstellung

### *Integration von Elektroinstallationen*

Lösungsstrategien

Die Integration von Elektroinstallationen in das Wandteil selbst sind grundsätzlich denkbar, aber in Anbetracht der geringen Materialstärken und in Bezug auf den Schallschutz zu klären. Lösungen, die zusätzliche Bauteile / Kanäle z. B. im Bereich des Fensteranschlags vorsehen, sind vielversprechender. In den laufenden Projektarbeiten ist man sich einig, Elektroinstallationen strategisch nicht als Teil der schlanken und optimierten Fassadenelemente zu verfolgen, sondern davon unabhängigen Lösungen den Vorzug zu geben.

### *Vorläufiges Fazit*

Im Betonfertigteilwerk lässt sich mit den üblichen Produktionsmethoden ein hoher Vorfertigungsgrad mittels kraftschlüssiger Verbindungen über Gewebegitter, die in die Leichtbetonschichten eingebettet werden, erreichen. Die Vielfalt der Parameter / Variablen ermöglicht unterschiedliche und optimierte Leistungsprofile. Für die Montage und Fügung auf der Baustelle gibt es je nach Ausbildung der Ränder vielfältige Optionen, die der Stand der Technik bereithält. Wie bei einem Mehrschichtverbundsystem üblich ist allerdings die sortenreine Trennung erschwert, was ökologische und ökonomische Nachteile mit sich bringen kann.

## **1.2 Lösungsstrategie II: Überblick zu möglichen Aufbauten**

Im Gegensatz zu Lösungsstrategie I als Mehrschichtverbundsystem hat Lösungsstrategie II die Charakteristik einer Rahmenbauweise, bei der die (Holz-)Leichtbetonschichten über Profile mit dazwischen angeordneter Hochleistungsdämmung gekoppelt werden. (Abb. 29)

Auch wenn die damit verbundenen Arbeitsprozesse von denen eines Betonfertigteilherstellers abweichen, so sieht der Industriepartner Meier Betonwerke auch das erweiterte Potenzial für das Leistungsprofil eines solchen Fassadenelementes, das sich als Produkt zusätzlich bzw. besonders auch für den Holzrahmen- oder Holzskelettbau eignen kann. Zwar kann das angestrebte schlanke und folglich „nichttragende“ Fassadenelement keine Vertikallasten abtragende Wand in Holzrahmenbauweise ersetzen, aber es lässt sich dank seiner verwandten Merkmale voraussichtlich gut in den Montageablauf auf der Baustelle integrieren.

Neben der Charakteristik der Oberflächen wäre die Nichtbrennbarkeit (Baustoffklasse A1 oder A2) der äußeren Schicht aus Leichtbeton oder Holzleichtbeton von großem Vorteil, insbesondere bei Anwendungen in der Gebäudeklasse IV.

Wie bei Lösungsstrategie I lassen sich Hochleistungsdämmstoffe in unterschiedlich starken Schichten miteinander kombinieren, wobei eine Anordnung mit versetzten Stößen bei Plattenmaterial zu empfehlen ist. Gegenüber Lösungsprinzip I erweitert die zusätzliche Rahmenstruktur die Möglichkeiten beim Aufbau und bei der Montage, auch lassen sich dadurch Schüttungen, die in der Regel gegenüber Plattenmaterial ökologisch vorteilhafter sind, besser in den Aufbau integrieren. (Abb. 30 + 31 und A8 im Appendix) Als Ergänzung dazu weitere Erläuterungen (Parameter / Variable):

### *Kopplung der Leichtbetonschichten*

Die Kopplung der Leichtbetonplatten (LB a) mit der raumseitigen Tragschicht (LB i) über Profile aus Holz und / oder Kunststoff bringt Vor- und Nachteile mit sich. Bei einem hochwärmedämmenden schlanken Bauteil gilt es, Wärmebrücken auf ein Minimum zu reduzieren. Die Holzrahmenbauweise hält dafür Lösungen bereit. Profile in zwei Lagen, um 90 Grad zueinander verdreht (Prinzip Lattung - Konterlattung) helfen, direkte Wärmeflüsse auf kleine Flächenanteile zu reduzieren. Geeignete Materialität sowie Form der Profile und zusätzliche thermische Trennungen stellen weitere Optimierungen da.

### *Luftschicht bzw. Hinterlüftung*

Wie bei Lösungsstrategie I kann der Aufbau kompakt ohne Luftschicht gewählt werden. Zusätzlich zu Lösungsstrategie I ermöglicht es die Lösungsstrategie II, die äußere Schicht bzw. Lage mit einer Luftschicht abzusetzen, um so z. B. eine Entspannungsschicht oder eine vollständige Hinterlüftung der Wetterschale zur Abführung von Dampfdruck und Feuchtigkeit zu gewinnen.

### *Verbesserungen des Luftschallschutzes*

Ist die äußere Schale ausreichend biegeweich (möglichst nicht stärker als 30 mm) und durch die Luftschicht ausreichend (akustisch) entkoppelt, lässt sich der Luftschallschutz verbessern.

### *Außenschale austauschbar*

Im Gegensatz zur Lösungsstrategie I erlaubt die Lösungsstrategie II die flexible Montage /

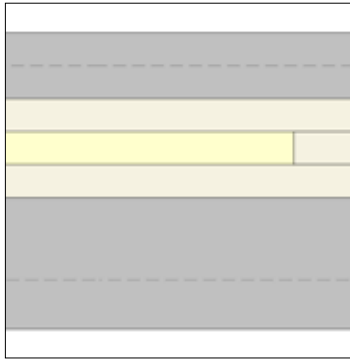


Abb. 29 Wandaufbau: Lösungsprinzip I.b (kpb / OHM-AR)

- Deckschicht (Außen): HLB (900 kg/m<sup>3</sup>), textilbewehrt (Typ Grid, Firma solidian) 40 mm
- Kerndämmung: AlphaCore (195 kg/m<sup>3</sup>), 20 mm
- Kerndämmung: VIP OPTIM-R® (230 kg/m<sup>3</sup>), 20 mm
- Kerndämmung: AlphaCore (195 kg/m<sup>3</sup>), 20 mm
- Deckschicht (Innen): HLB (1.500 kg/m<sup>3</sup>), textilbewehrt (Typ Grid, Firma solidian) 80 mm
- Gesamtaufbau: 180 mm

II. Eingehende Darstellung  
Lösungsstrategien

Demontage / Austauschbarkeit der äußeren Schale. Als Materialien kommen neben Leichtbeton auch Holzleichtbeton oder andere Lösungen wie eine Holzschalung in Frage. Die Herstellung von Holzleichtbetonplatten (mit langen Abbindungszeiten) lässt sich zeitlich und räumlich vom übrigen Aufbau entkoppeln.

Eine Gliederung mit kleinteiligeren Platten ist ebenso unproblematisch umzusetzen, wodurch der Gestaltungsspielraum erhöht und partielle Beschädigungen sich mittels Austausch der kleinflächigen Platten beheben lassen. Erfolgt die Montage der äußeren Schale erst auf der Baustelle, ergeben sich zusätzlich weitere Optionen der Befestigung, Fügung und Abdichtung der Fassadenbauteile (auch im Sinne einer größeren Fehlertoleranz).

Kontrolle und Reparatur bei Schäden sind einfacher und zerstörungsfrei möglich. Die Abnehmbarkeit der äußeren Wetterschale kann auch die Montage z. B. von Fensterelementen (ggf. Sonnenschutz und dergleichen) und Abdichtungsbänder / -folien für die Garantie der Winddichtigkeit erleichtern. So lässt sich die Fehlertoleranz erhöhen und auch die spätere sortenreine Trennung der Materialien / Werkstoffe wird erleichtert.

#### Transport und Montage auf der Baustelle

Die systembedingten Randprofile bilden einen Schutz des Dämmkerns und können zusätzlich Aufgaben bei notwendigen Befestigungen und bei der Fügung erfüllen.

#### Sortenreine Trennung

Bei der sortenreinen Trennung der Komponenten liegen die Vorteile der Lösungsstrategie II gegenüber Mehrschichtverbundsystemen auf der Hand. Verbindungen sind in der Regel lösbar möglich und somit auch einfacher wieder trennbar, meist zerstörungsfrei. Das erlaubt die Wiederverwendung ganzer Komponenten wie z. B. Dämmplatten, -schüttungen und Kantenhölzer. Wiederverwendung ist aus ökologischen wie ökonomischen Gründen dem Recyceln vorzuziehen.

#### Vorläufiges Fazit

Im Bearbeitungszeitraum wurden die Annahmen noch nicht experimentell überprüft, daher steht eine Bewertung des Ansatzes noch aus.

Konstruktionsprinzip 5 (Aufbauten und Schichtenfolgen aus dem Projektantrag; FSE mit fünf Schichten; Abb. 20 rechts) wird als Lösungsprinzip I zunächst priorisiert. Erforderliche Schalldämmeigenschaften sind durch verschiedene Schichtdicken mit unterschiedlichen Rohdichten der HLB-Deckschichten erreichbar. Kerndämmung aus eingebetteten VIP Paneelen (OPTIM-R) – allseitig von AlphaCore umgeben (Randbereiche und Bereiche der Schubbewehrung ohne VIP).

Für den Schichtenaufbau des Fassaden-Sandwichelements und seiner Dimensionen wird ein erster Ansatz festgelegt (Lösungsprinzip I.a) (Abb. A53 im Appendix) und nach ersten Bewertungen modifiziert (Lösungsprinzip I.b). (Abb. A54 im Appendix)

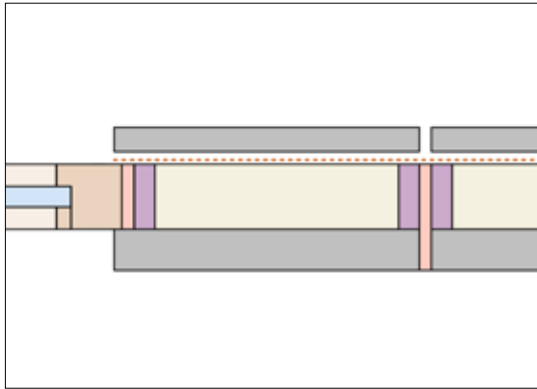


Abb. 30 Fassadenbauteil: Lösungsstrategie II – Prinzip (OHM-AR / Peter Bonfig)

II. Eingehende Darstellung  
Lösungsstrategien

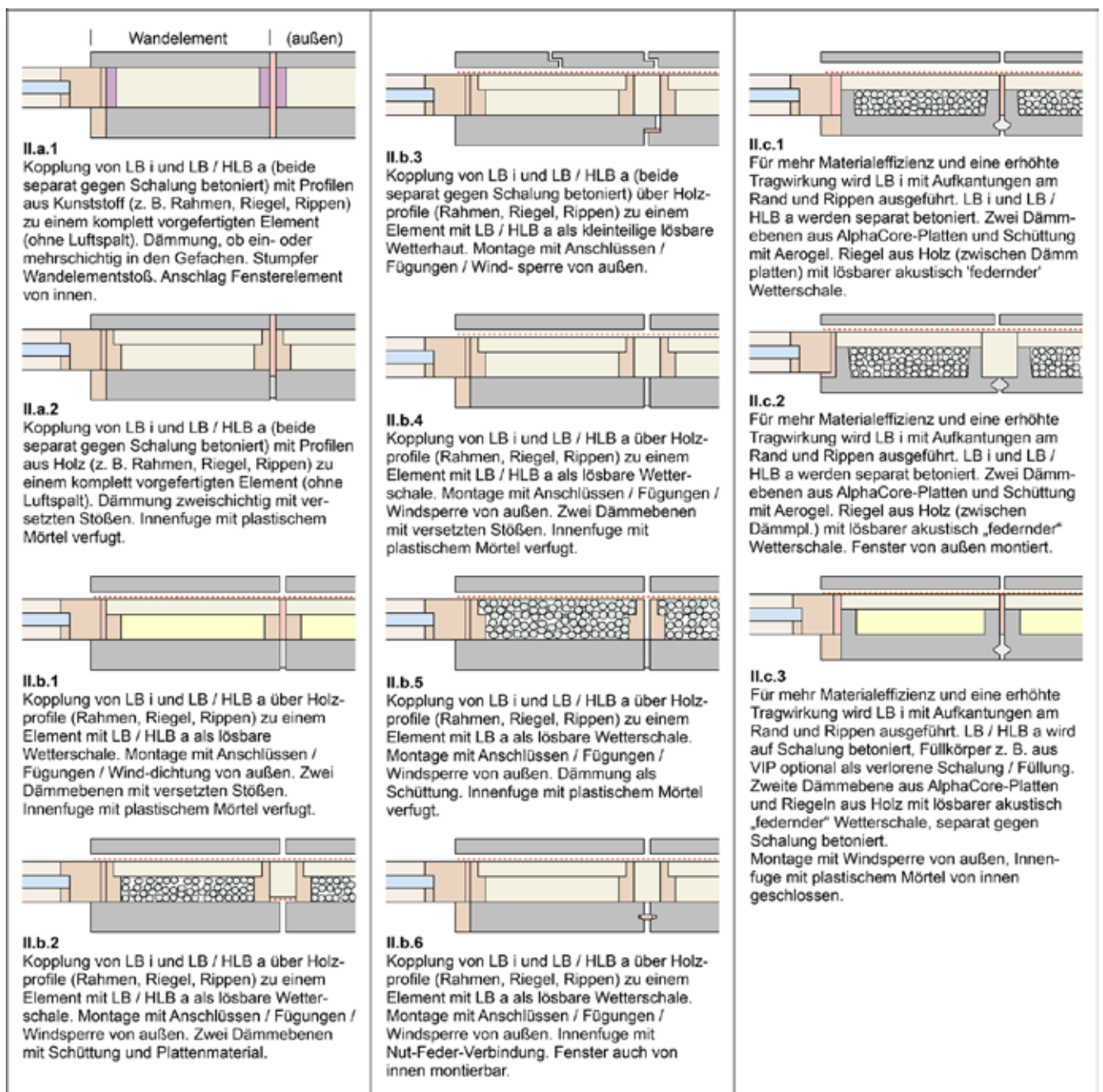


Abb. 31 Fassadenbauteil: Lösungsstrategie II – Varianten als Beispiele (Auswahl) (OHM-AR / Peter Bonfig)

## 2 Material- und Bauteilentwicklung

II. Eingehende Darstellung

### 2.1 Materialentwicklung ((Holz-)Leichtbeton)

Material- und Bauteilentwicklung

Bei Meier Betonwerke werden Grundlagen zu Laborvorversuchen/ Rezepturenentwicklungen erarbeitet. Ziel ist es, eine für den Einsatz in einem Fertigteilwerk brauchbare Holzleichtbeton-Rezepturen zu entwickeln. Die Rezepturen werden vorab bewertet in Hinblick auf

- Verfügbarkeit / Kosten der Materialien
- Ökologie (CO<sub>2</sub>-Footprint)
- Baubiologie (Schadstoffbelastung)
- Verarbeitbarkeit

Der Beton setzt sich zusammen aus:

- Bindemittel
- Zuschlagstoffe aus Holz (Körnungen, Fasern ...)
- Zugabewasser
- ggf. Zusatzmittel (Beschleuniger, Fließmittel ...)

Die Vorversuche werden in einem Labormischer (Eimermischer, 20 Liter) angemischt und in Schalungen (L x B x H 180mm x 180mm x 30mm) eingebracht verdichtet.

Die Vorversuche geben einen Hinweis auf die Verarbeitbarkeit der Holzleichtbeton-Rezepturen. Über die Mischbarkeit, Verdichtungswilligkeit und das Abbindeverhalten kann direkt aus den Versuchen auf die Gebrauchstauglichkeit im Fertigteilwerk geschlossen werden.

Bindemittel

- Zement: Verwendet werden für alle Versuche der in den MEIER Betonwerken zur Verfügung stehende Zement CEM II / A-LL 52,5 R (Portlandkalksteinzement). Dieser dient zur Herstellung von frühhochfestem Beton und ist damit besonders für die Herstellung von Betonfertigteilen geeignet.
- Calciniertes Ton: Die Nutzung calcinierter Tone als Zementsubstitut ist aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten interessant. Bewährt hat sich ein Austausch von bis zu 30 %. Nachteilig ist die verzögerte Festigkeitsentwicklung. Auf die Nennfestigkeit des Betons hat dies allerdings keinen Einfluss.

Zuschlagstoffe (Holz, alternative nachwachsende Rohstoffe)

- Holzspäne / Hobelspäne (Abb. A9 im Appendix): Deren Größen und Formen sind vielfältig. Hobelspäne können in langen Streifen anfallen, die sich beim Abhobeln einrollen, aber auch in kürzeren oder sehr schmalen Streifen. Außerdem gibt es spitze und stückige Formen (z. B. stiftförmig oder als Holzflocken). Sägespäne sind wesentlich kleiner als Hobelspäne; die Dimensionsgrenze zwischen Sägespänen und Sägemehl ist nicht genau bestimmbar.  
Unabhängig von der Größe der Stücke können Rindenanteile enthalten sein oder die Späne sind aus rindenlosem Holz erzeugt.  
Bei der Schnittholzproduktion liegt der Sägeholzanfall bei rund 60 % des Hauptprodukts Schnittholz. In Deutschland fällt gut ein Drittel des jährlichen Aufkommens von Sägebeneprodukten von ca. 17,0 Mio. Festmeter als Sägespäne und Sägemehl an, mehr als die Hälfte sind Hackschnitzel und der Rest sind Schwarten und Splitter.<sup>48</sup>
- CEMWOOD (Abb. 32): Im CEMWOOD-Herstellungsprozess werden definierte Holzhack-schnitzel (Hobelspäne) ohne Verwendung von chemischen Zusätzen mineralisiert. Die Mineralisierung der Holzhack-schnitzel erfolgt durch ein hochwertiges hydraulisches Bindemittel. Dies führt dazu, dass neben der Spanoberfläche auch die offenen Porenräume der Holzstruktur mit einer verfestigenden und konservierend wirkenden Calciumsilikathydratschicht belegt werden.<sup>49</sup>
- Holzhack-schnitzel (Abb. A10 im Appendix) sind mit schneidenden Werkzeugen zerkleinertes Holz und werden aus Schwachholz bzw. Kalamitätenholz hergestellt. Hackschnitzel stehen in einer großen Bandbreite der Spangrößen und Formen zur Verfügung.
- Leinschäben (Abb. A11 im Appendix) sind der holzige Anteil der Leinpflanze (Flachs). Diese fallen als Reststoff bei der Herstellung der Leinfasern an. Wie bei vielen anderen Pflanzen, besteht der Stängel von Bastfaserpflanzen (z. B. Flachs, Hanf, Jute, Kenaf) aus den Fasern und dem "holzigen Stängelbestandteil" (den sogenannten Schäben). Die Fasern befinden sich im Außenring, die Schäben liegen im Inneren. Das Verhältnis beträgt ca. 2:1. Daher ist die Schäbenerzeugung rund zweimal größer als die Faserproduktion.<sup>50</sup>

48 <https://de.wikipedia.org/wiki/Holzspan> <19.04.2024>

49 <https://www.cemwood.de/technologie/> <19.04.2024>

50 <https://www.hessenleinen.de/fasern-fibres/> <19.04.2024>



Abb. 32 Betonlabor – Zuschlagstoff: CEM-WOOD (Meier)



Abb. 33 Betonlabor – Zuschlagstoff: Durchwachsene Silphie (Meier)

II. Eingehende Darstellung  
Material- und Bauteilentwicklung

- Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*) (Abb. 33) ist eine in Nordamerika beheimatete Pflanzenart aus der Familie der Korbblütler (*Asteraceae*). Sie ist eine ausdauernde und mehrjährige Pflanze, die aufgrund ihrer großen Biomasseproduktion als Energiepflanze angebaut werden kann.
- Pflanzenkohle (Abb. A12 im Appendix) wird unter Luftabschluss bei Temperaturen zwischen 380 °C und 1000 °C hergestellt. Unter diesen Prozessbedingungen wird vorwiegend Wasser abgespalten, wobei Pflanzenkohle, Synthesegas und Abwärme entstehen.<sup>51</sup> Das Synthesegas und die Abwärme wird für die dezentrale Wärme- und Stromversorgung genutzt.

Bei Meier Betonwerke werden erste Mischungen mit den o. g. Zuschlagstoffen und Bindemitteln durchgeführt. Es zeigen sich bisher große Probleme durch den Einfluss von Holzzucker.<sup>52</sup>

Holzzucker (Xylose) ist in veränderlichen Anteilen in den Pflanzen enthalten. In der Beton-technologie ist der Einfluss des Holzzuckers auf das Abbindeverhalten des Zements seit langem bekannt. Bei Verwendung von fabrikneuen (unbeschichteten) Holzschalungen kann das Abbinden des Zementleims an der Oberfläche verhindert werden. Die Folge ist ein Absanden an der Betonoberfläche.

Im Betonlabor werden 16 verschiedene HLB-Rezepturen untersucht.<sup>53</sup> Ziele sind: Verarbeitbarkeit sicherzustellen und gleichzeitig auch den Zementanteil zu senken sowie Alternativen wie Calcinierte Tone einzusetzen.

Eine erste Zielsetzung der Versuche ist es, den hohen Zementgehalt bei den Mischungen zu reduzieren. Dies führte bisher jedoch noch nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen, insbesondere unter den prozessualen Abläufen und Bedingungen im Fertigteilwerk.

Anhand einer Vielzahl kleinformatiger Muster (180 x 180 mm) und einer Platte (500 x 500 mm) werden aktuelle Herausforderungen wie Abbindezeiten/ Grünstandfestigkeit vorgestellt.

Es gilt zu überlegen, ob zur Klärung wichtiger herstellungstechnischer Fragen für die Anfertigung eines Funktionsmodells auch zunächst mit 'bekannteren' Rezepturen gearbeitet wird und parallel die Optimierungsarbeiten fortgeführt werden.

In weiteren Schritten soll der Einsatz alternativer Bindemittel und Zuschlagstoffe geprüft werden. Bei Materialien wie Hochofenschlacke oder Schwarz-, Grün-, Weißlaugen aber auch Verfügbarkeit und ggf. Umweltbelastung sind zu klären. Optionen wären auch Bioasche oder Pflanzenkohle (PK), die bei der Fa. Meier Betonwerke bereits in der Laborerprobung ist. Ergebnisse zeigen, dass PK, im Gegensatz zu Holz (Fasern, Schäben etc.), die zeitliche Festigkeitsentwicklung des Zements nicht behindert.

Die Verarbeitung des Materials ist prinzipiell gut, aber bzgl. Festigkeitsentwicklung lassen sich mit den bisher eingesetzten Zementen noch keine adäquaten Rezepturen erzielen.

Beim Umlaufverfahren im Werk müssen die Bauteile spätestens nach 12 Stunden entschalt werden. Insbesondere die Rezepturen mit mineralisch ummantelten Holzspänen (CEM-WOOD) waren bisher nicht erfolgversprechend; eine Variable stellt möglicherweise der Mischprozess dar.

Als Alternative zum Einsatz von speziellen Schnellzementen oder höherer Anteile des Bindemittels wird nun der Einsatz von Pflanzenkohle verfolgt. Erste Versuche zeigen, dass hier

51 <https://de.wikipedia.org/wiki/Pflanzenkohle> <19.04.2024>

52 Erfahrungsaustausch mit der Südtiroler Firma Schönthaler Bausteinwerk GmbH / Schönthaler Baustoffe GmbH in Eyrs/BZ.

53 Vgl. Appendix, Kapitel A2.1.1, S. 13 – 26.



Abb. 34 Holzleichtbeton (HLB) – Plattenmuster (OHM-AR)



Abb. 35 HLB – Probewürfel / Holz hackschnitzel (Meier)



Abb. 36 HLB – Plattenmuster / Holz hackschnitzel (Meier)

II. Eingehende Darstellung  
Material- und Bauteilentwicklung

keine Behinderung der Festigkeitsentwicklung erkennbar ist.

Weitere Zielsetzung der Materialexperimente ist, CO<sub>2</sub> nicht nur in der Produktion einzusparen, sondern die Betone auch zum CO<sub>2</sub>-Speicher zu entwickeln (CCS Carbon Capture and Storage). Weitere Optionen sind der Einsatz von calcinierten Tonen oder Geopolymeren.

Die bisher bei der Fa. Meier im Betonlabor hergestellten Materialmuster (Abb. 34 + 36) haben Plattengrößen von 180 x 180 x 30 mm und 500 x 500 x 30 mm.

Vorversuche mit Holz hackschnitzel haben ergeben, dass der Einfluss des Holzzuckers auf die Festigkeitsentwicklung des Bindemittels Zement am geringsten ist. Erklärbar ist dies durch das günstigere Verhältnis von Volumen zu Oberfläche. Damit reduziert sich die Kontaktfläche von Holz zu Zement. Weitere Mischungen werden in Probewürfeln (150mm x 150mm x 150mm) für Druckfestigkeitsprüfungen vorbereitet. (Abb. 35)

Die umfangreichen Vorversuche mit organischem Zuschlagsmaterial zeigen, dass die Verarbeitung von Holzpartikeln und Hanfschäben prinzipiell gut ist, aber bzgl. der Festigkeitsentwicklung sich mit den bisher eingesetzten Zementen noch keine adäquaten Rezepturen erzielen lassen. Daher wurden für die beiden Deckschichten (Innen- (Tragschicht) und Außenschicht (Fassade)) beim Bau der Funktionsmodelle optimierte Leichtbetone (LB) (ohne Holzzuschlagstoffe) erarbeitet und eingesetzt. (Tab. A25 – A28 im Appendix)

Als Substitut für Holz als Leichtzuschlagstoff wird zunächst Blähton der Firma Liapor (Abb. A46 im Appendix) verwendet. Zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Footprints ist als Füller Kalksteinmehl in beiden Schichten und zusätzlich Pflanzenkohle in der Innenschicht (Tragschicht) beigemischt. Die Versuche zum Einsatz von Pflanzenkohle zeigen, dass hier keine Behinderung der Festigkeitsentwicklung erkennbar ist, die Zugabe funktioniert auch bzgl. der Verarbeitung gut in unterschiedlichen Mengen. Damit kann nicht nur der Beton CO<sub>2</sub>-ärmer hergestellt werden, sondern dient zudem als wirksamer CO<sub>2</sub>-Speicher.

In Verbindung mit dem Lösungsprinzip II (mehrschaliger Aufbau mit Bekleidung und Luftschicht bzw. Hinterlüftung) (vgl. Seite 27ff.) sollen jedoch Holzleichtbetone (HLB) bzw. Leichtbetone mit anderen organischen Zuschlagsmaterialien für die plattenförmigen Bauteile eingesetzt werden. Hierzu wird an der Fakultät Architektur der Technischen Hochschule Nürnberg im Wintersemester 2024/2025 begonnen, im Rahmen von experimentellen Studien in einer Abschlussarbeit<sup>54</sup> sowie zwei Seminaren<sup>55</sup> Rezepturen zu erarbeiten.<sup>56</sup>

54 Meyerhöfer Februar 2025

55 Krippner/Freimann, Wintersemester 2024/2025 und Krippner/Freimann, Wintersemester 2025/2026

56 Vgl. Kapitel 5.4, S. 78ff. und Appendix, Kapitel A5.3, S. 96–157

## 2.2 Materialentwicklung (Ligninbasierte Aerogele)

### 2.2.1 Lignin-Screening und Auswahlstrategie

Die Ergebnisse des Screenings von 23 technischen Lignintypen (basierend auf der im POLIGOM-Projekt<sup>57</sup> etablierten Methodik) wurden detailliert untersucht und weiter analysiert. Im Rahmen der Lignincharakterisierung wurden unter anderem folgende Parameter bestimmt:

- Partikelgröße
- Zuckergehalt
- Feuchtigkeitsgehalt
- Quantifizierung funktioneller Gruppen (z. B. OH-Gruppen)

Nachfolgend sind die im Rahmen des Lignin-Screenings ermittelten Charakterisierungsdaten aufgeführt (Tab. 3) Auf Grundlage dieser Analysen wurde ein strukturiertes Set von Auswahlkriterien entwickelt, das sowohl materialbezogene Eigenschaften als auch wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt. Dazu zählten:

- Ergebnisse der Lignincharakterisierung
- kommerzielle Verfügbarkeit
- Preis (sofern relevant und belastbar ermittelbar)

Unter Anwendung dieser Kriterien wurde Soda-Lignin als der am besten geeignete Lignintyp für die Entwicklung der Lignin–Alginat-Hybrid-Aerogele identifiziert.

### 2.2.2 Lignin–Alginat-Hybrid-Aerogele

Lignin–Alginat-Hybrid-Aerogele wurden hergestellt, indem gelöstes Lignin vor der calcium-induzierten Gelierung in ein Alginat-Sol eingemischt wurde. Bei diesem Ansatz („Hybrid-Ansatz“) wird Lignin in die wässrige Alginat-Vorlösung integriert und während der Gelierung physikalisch in das Polymernetzwerk eingebunden, wenn sich das Hydrogel bildet. (Abb. 37)

Die im Projekt untersuchten Formulierungen umfassten neun Kombinationen aus Alginat- und Ligninkonzentrationen: (Tab. 4)

- cAlg = 1,50; 1,75; 2,50 Gew.-%
- cLig = 0,5; 1,5; 3,0 Gew.-%

Hieraus resultierten Hybridgele mit Ligninmassenanteilen (bezogen auf die Gesamtbiopolymermasse) von:

- 16,7–66,7 Gew.-% Lignin, abhängig von der jeweiligen Formulierung.

Diese Zusammensetzungen bildeten die Grundlage für die Bewertung des Einflusses von Lignin auf Trocknungsverhalten, Porosität und mechanische Stabilität.

Mit zunehmendem Ligninanteil in den Hybridformulierungen zeigte sich für alle drei untersuchten Materialparameter ein klarer und konsistenter Trend.

Erstens nahm die spezifische Oberfläche mit steigendem Ligninmassenanteil (cLig,Alg) systematisch ab – unabhängig von der eingesetzten Alginatkonzentration. Reine Alginat-Aerogele wiesen die höchsten spezifischen Oberflächen auf, während Proben mit hohem Ligningehalten ( $\geq 60$  Gew.-%) Werte von etwa  $300 \text{ m}^2/\text{g}$  erreichten. Die lineare Korrelation ( $R^2 = 0,887$ ) zeigt, dass durch die Ligninintegration ein Teil der verfügbaren mesoporösen Oberfläche reduziert wird, die Aerogele jedoch weiterhin im typischen Oberflächenbereich biobasierter Aerogele liegen. (Abb. 38, links)

Zweitens erhöhte sich die volumetrische Ausbeute deutlich mit steigendem Ligninanteil. Bei geringen Ligningehalt ( $< 30$  Gew.-%) entsprach die volumetrische Ausbeute<sup>58</sup> weitgehend jener von reinem Alginat-Aerogel. Ab etwa  $40\text{--}50$  Gew.-% Lignin zeigte sich jedoch eine ausgeprägte Verbesserung: Die volumetrische Ausbeute näherte sich bei  $60\text{--}65$  Gew.-% Lignin Werten um  $\sim 0,8$  an. Dies belegt, dass Lignin das Gel während der  $\text{ScCO}_2$ -Trocknung stabilisiert und Schrumpfungsprozesse effektiv reduziert. Dieser Stabilisierungseffekt trat konsistent bei allen untersuchten Alginatkonzentrationen auf und stellt einen wesentlichen Vorteil des Hybridansatzes dar. (Abb. 38, mitte)

Drittens nahm die mechanische Stabilität der Aerogele mit steigendem Ligninanteil deutlich zu. Die maximale Druckkraft  $F_{\text{max}}$  stieg in allen Formulierungen an, wobei insbesondere Hybridproben mit mehr als  $50$  Gew.-% Lignin eine wesentlich höhere Widerstandsfähigkeit

<sup>57</sup> POLIGOM (2019 – 2022)

<sup>58</sup> Die volumetrische Ausbeute bei der Herstellung von Aerogelen beschreibt das Verhältnis zwischen dem tatsächlich erhaltenen Aerogelvolumen und dem theoretisch erwarteten Gelvolumen nach der Sol-Gel-Synthese, vor dem Trocknungsschritt.

Process	Source	Ash content, %	Klason minus ash, %	ASE350 acetone extract, %	Average OMe, mmol/g	Aromatic OH, mmol/g	Total OH, mmol/g
Hydrothermal + Enzyme	Weizenstroh	10.15	70.77	22.68	2.4775	1.76	2.71
Hydrolyse	Laubholz	0.1	68.12	30.77	5.5102	2.65	5.45
HCT / mechanisch	Laubholz	1.67	77.23	46.56	4.8886	2.34	6.21
3-freier saurer Aufschluss	Nadelholz	0.45	93.44	7.39	3.8526	1.51	2.32
Dampf / Enzyme	Miscanthus	21.03	61.60	7.12	1.5030	1.94	3.16
verd. Säure + Enzyme	Nadelholz	0.16	75.51	12.20	3.4709	2.89	4.84
unbekannt	unbekannt	6.85	68.70	7.10	2.8295	1.75	2.71
Soda-Aufschluss	Bagasse	37.72	N/A	n/a	1.0025	N/A	N/A
unbekannt	Bagasse	0.89	73.11	66.17	3.7891	3.77	5.01
Sulfit-Aufschluss	Laubholz	13.54	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Sulfit-Aufschluss	Laubholz	51.09	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Organosolv	Buche	0.11	93.29	= 100	7.0938	2.69	3.47
Kraft	Nadelholz	0.1	88.64	= 100	5.4178	2.45	3.36
Organosolv (Rot)	Buche	0.13	89.51	96.58	6.4234	3.25	5.03
Überkritisch Wasser	variabel	0.07	80.73	47.02	5.2441	3.15	4.57
unklar	n/a	56.79	N/A	7.92	N/A	N/A	N/A
Soda Aufschluss	Variable	2.44	N/A	82.34	N/A	0.87	1.35
Soda Aufschluss	Wheat Straw	2.78	N/A	86.39	N/A	1.15	2.15
Soda Aufschluss	Wheat Straw	1.53	N/A	84.09	N/A	3.43	5.08
Soda Aufschluss	Wheat Straw	1.56	N/A	53.92	N/A	2.14	3.50
Ionische Flüssigkeiten	n/a	0.18	N/A	48.39	N/A	1.77	2.46

II. Eingehende Darstellung  
Material- und Bauteilentwicklung

Tab. 3 Charakterisierungsdaten der 23 untersuchten technischen Lignine. (TUHH-TVT)



Abb. 37 Lignin–Alginate-Hydrogelpartikel direkt nach der Gelierung (Hybrid-Ansatz). (TUHH-TVT)

C <sub>Alg,Wasser</sub> [Gew.-%]	C <sub>Lig,Wasser</sub> [Gew.-%]	C <sub>Lig,Alg</sub> [Gew.-%]
1,50	0,5	25,0
	1,5	50,0
	3,0	66,7
1,75	0,5	22,2
	1,5	46,2
	3,0	63,2
2,50	0,5	16,7
	1,5	37,5
	3,0	54,6

Tab. 4 Zusammensetzungen der untersuchten Lignin–Alginate-Hybridformulierungen. (TUHH-TVT)

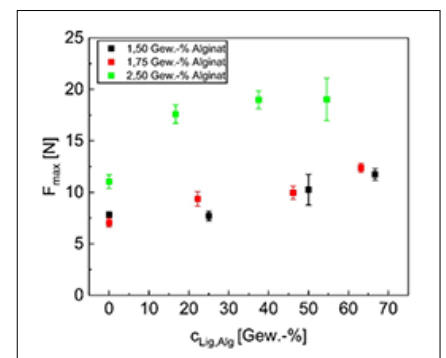
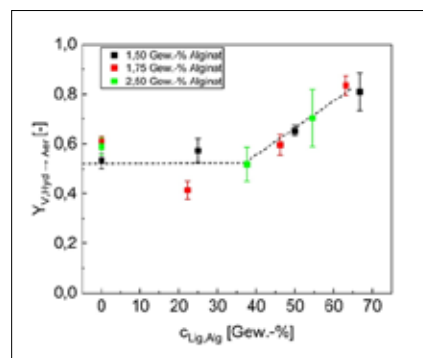
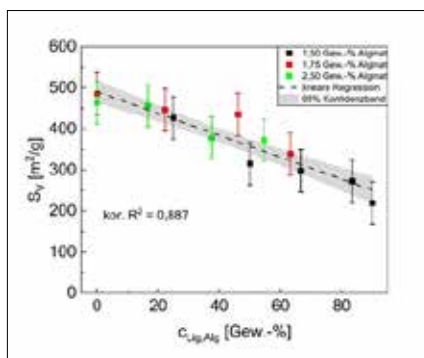


Abb. 38 Charakterisierung der Lignin–Alginate-Hybrid-Aerogele: (links) Spezifische Oberfläche  $S_v$ , (mitte) volumetrische Ausbeute  $Y_{v,Hybrid}$ , (rechts) maximale Druckkraft  $F_{max}$  in Abhängigkeit Ligninmassenanteil ( $C_{Lig,Alg}$ ). (TUHH-TVT)

zeigten. Diese Proben deformierten sich gradueller und brachen weniger spröde, während hybride Aerogele mit geringem Ligningehalt ein mechanisches Verhalten aufwiesen, das dem von reinem Alginate entsprach und bei niedrigeren Kräften versagte. Die Ergebnisse bestätigen, dass Lignin das Polymer Netzwerk effektiv verstärkt und die Tragfähigkeit signifikant verbessert. (Abb. 38, rechts)



Abb. 39 64-Liter-Autoklav für überkritisches CO<sub>2</sub>-Trocknen. (TUHH-TVV)



Abb. 40 1-m<sup>3</sup>-Nachbehandlungsofen zur thermischen Konditionierung von Aerogelpartikeln. (TUHH-TVV)

II. Eingehende Darstellung  
Material- und Bauteilentwicklung

### 2.2.3 Infrastruktur für den Scale-up

Für das Scale-up wurde die Synthese von kleinen Labormaßstäben auf größere Produktionsvolumina übertragen. Die Aerogelpartikel wurden in für Bauteilanwendungen relevanten Mengen hergestellt und in einem 64-L-Autoklaven (Abb. 39) getrocknet, was die kontinuierliche Verarbeitung größerer Partikelchargen ermöglicht. Zusätzlich wurden Experimente zu einem kontinuierlichen Trocknungsprozess durchgeführt, wodurch die Trocknungszeit auf nur wenige Minuten reduziert werden konnte. Zusammen mit der Beschaffung des 1-m<sup>3</sup>-Nachbehandlungsofens (Abb. 40) ermöglicht dies eine großskaligere, schnellere und insgesamt effizientere Produktion von Lignin-Alginat-Aerogelpartikeln.

### 2.2.4 Gepresste Aerogelplatten

Die getrockneten Hybrid-Aerogelpartikel wurden mechanisch vermahlen, um eine gleichmäßigere Partikelmorphologie zu erhalten, und anschließend unter verschiedenen Pressdrücken mit einer mechanischen Presse zu Platten verdichtet, um den Einfluss des Verdichtungsdrucks auf die Plattenstabilität zu untersuchen. Die Standardlaborplattengröße betrug 11 × 11 cm, wodurch eine ausreichende Fläche zur Bewertung der mechanischen Stabilität, der Wärmeleitfähigkeit und der Feuchteempfindlichkeit zur Verfügung stand.

Unterschiedliche Formulierungen wurden hergestellt, indem der Ligningehalt innerhalb der Aerogelpartikel variiert wurde (z. B. Hybridmaterialien mit niedrigem Ligningehalt ~8 Gew.-% vs. solche mit hohem Ligningehalt ~64 Gew.-%). Dadurch war eine systematische Untersuchung möglich, wie die intrinsische Partikelzusammensetzung die Kohäsion und Leistungsfähigkeit der gepressten Platten beeinflusst. (Abb. 41 + 42)

Ein zentrales Ergebnis der Arbeiten ist, dass die Aerogelpartikel – selbst bei einem niedrigen Ligningehalt von nur 8 % – ohne jegliche Faserverstärkung zu kohäsiven und mechanisch stabilen Platten verpresst werden konnten. Dies stellt einen bedeutenden Materialvorteil dar, da herkömmliche biobasierte Dämmstoffe für ihre strukturelle Integrität beim Pressen oftmals auf Faserzusätze angewiesen sind.

Die Wärmeleitfähigkeit der hergestellten Platten (Abb. 43) wurde gemäß DIN EN 12667 mittels Heizplattenverfahrens bestimmt. Dabei wurde sowohl die Wärmeleitfähigkeit der Aerogelpartikel vor dem Pressen als auch die der gepressten Platten untersucht, um mögliche strukturelle Veränderungen durch den Verdichtungsprozess zu erfassen.

Nach dem Pressen lagen die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 0,024 bis 0,03 W/mK, womit die Platten im typischen Bereich hochporöser, biobasierter Dämmstoffe liegen. Dies zeigt, dass der Pressvorgang die innere Porenstruktur weitgehend erhält und keine signifikante Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit verursacht. Die zugehörigen Rohdichten der gepressten Platten lagen zwischen 100 und 220 kg/m<sup>3</sup>, abhängig vom eingesetzten Pressdruck und dem Ligningehalt der Hybridpartikel.

Die Ergebnisse bestätigen, dass Lignin-Alginat-Hybrid-Aerogele auch nach der mechanischen Verdichtung eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen und somit für den Einsatz als biobasierte Dämmstoffe geeignet sind.



II. Eingehende Darstellung  
Material- und Bauteilentwicklung

Abb. 41 Gepresste Lignin–Alginat-Aerogelplatten mit unterschiedlichen Ligningehaltanteilen (8 % [links] und 32 % [rechts]). (TUHH-TVT)

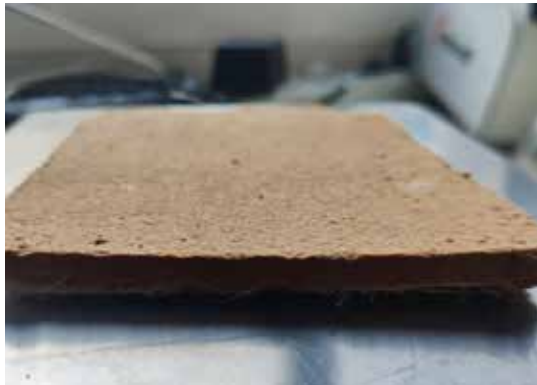


Abb. 42 Gepresste Lignin–Alginat-Aerogelplatten mit unterschiedlichen Ligningehaltanteilen (32 % [links] und 64 % [rechts]). (TUHH-TVT)

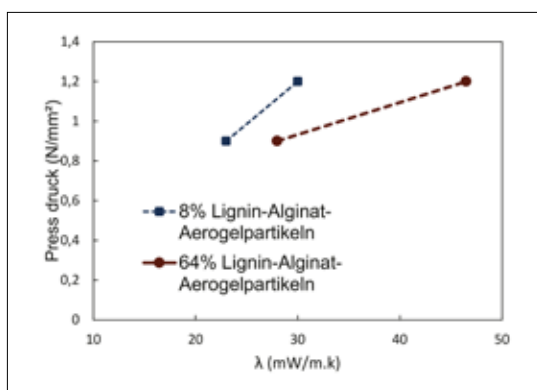


Abb. 43 Zusammenhang zwischen Pressdruck und Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) der Lignin–Alginat-Aerogelplatten für zwei Ligningehaltanteile (8 % und 64 %). (TUHH-TVT)

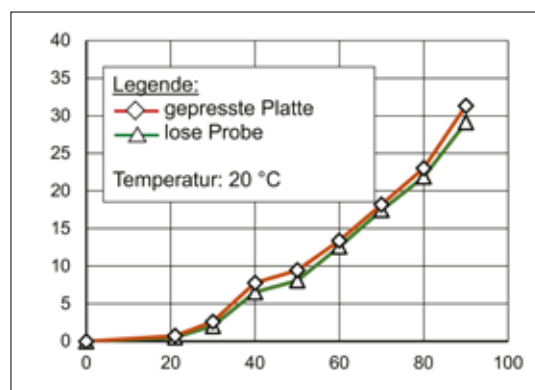


Abb. 44 Sorptionsisotherme der Lignin–Alginat-Hybrid-Aerogele (Adsorption) bei 20 °C. Dargestellt sind lose Aerogelpartikel sowie gepresste Platten. (TUHH-TVT)

Die Feuchteaufnahme der Hybrid-Aerogelmaterialien wurde bei 20 °C mittels dynamischer Klimatisierung untersucht. Die Sorptionsisothermen für sowohl lose Aerogelpartikel als auch gepresste Platten zeigen einen klaren, sorptionstypischen sigmoiden Verlauf. (Abb. 44) Bei geringer relativer Luftfeuchte (< 40 % r.F.) ist die Wasseraufnahme gering (< 5 Masse-%). Ab etwa 50–60 % r.F. steigt der Feuchtigkeitsgehalt deutlich an, und bei 80–90 % r.F. werden Werte von ca. 30–35 Masse-% erreicht. Die maximale Feuchteaufnahme im Messbereich (nahe 95 % r.F.) liegt bei rund 38–40 Masse-% für beide Probengeometrien.



Abb. 45 Kontaktwinkelmessung auf gepressten Lignintabletten nach C4F8-Plasmabehandlung. (TUHH-TVt)

II. Eingehende Darstellung  
Material- und Bauteilentwicklung

Diese Ergebnisse stimmen mit früheren Beobachtungen überein, dass ligninbasierte Hybrid-Aerogele trotz verbesserter mechanischer Stabilität hygroscopisch bleiben.

Auffällig ist, dass zwischen gepressten Platten und losen Partikeln nur geringe Unterschiede im Feuchteverhalten bestehen. Dies zeigt, dass der Pressvorgang die Porenstruktur zwar verdichtet, die sorptiven Eigenschaften des Materials jedoch nicht wesentlich verändert. Die hohe Feuchteaufnahme bei hoher relativer Luftfeuchte bleibt damit eine zentrale Herausforderung für die spätere Anwendung in Bauelementen und motivierte die Entwicklung zusätzlicher hydrophobierender Strategien (Plasma und Ligninbeschichtung).

#### Hydrophobisierung mittels C4F8-Plasma – Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen

Die C4F8-Plasmabehandlung führte zu einer deutlichen Erhöhung der Oberflächenhydrophobizität der gepressten Lignintabletten. Die mittels Elliptical-Fit ausgewerteten statischen Kontaktwinkelmessungen zeigen für Proben, die 20 Minuten plasmafunktionalisiert wurden, hohe Kontaktwinkel zwischen 126° und 136° (Mittelwert 130,3°). Diese Werte bestätigen eine ausgeprägt hydrophobe Oberfläche, die das Eindringen von Wasser effektiv verhindert.

Wird dieselbe Probe nach 30 Sekunden Tropfenalterung gemessen, reduziert sich der Kontaktwinkel auf 91–95° (Mittelwert 92,7°). Dies deutet darauf hin, dass der plasmainduzierte hydrophobe Effekt zeitabhängige Relaxationsprozesse oder Oberflächenbenetzungseffekte zeigt, jedoch weiterhin im hydrophoben Bereich bleibt.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass die C4F8-Plasmabehandlung eine wirksame und reproduzierbare Methode zur Hydrophobisierung der Oberflächen gepresster Lignintabletten darstellt. (Abb. 45)

#### Hydrophobisierung durch Beschichtung – Ergebnisse der Feuchtesorptionsmessungen

Die Ligninbeschichtung führte zu einer deutlichen Verbesserung der Feuchtebeständigkeit der alginatbasierten Aerogele. Dynamische Wasserdampfsorptionsmessungen zeigten, dass optimierte Ligninschichten die Feuchteaufnahme gegenüber dem unbehandelten Referenzmaterial ( $\approx 40\text{--}42$  Gew.-% bei 90 % r. F.) auf etwa 26–29 Gew.-% reduzieren. Besonders relevant ist die Verschiebung des kritischen Feuchtepunktes, also jener relativen Luftfeuchtigkeit, ab der unbehandelte Aerogele beginnen, stark zu kollabieren. Während dieser Punkt bei den Referenzproben bereits zwischen 60–70 % r. F. erreicht wird, zeigen ligninbeschichtete Proben erst bei deutlich höheren Feuchten eine entsprechende strukturelle Beeinträchtigung.

Die Mikrostruktur des Aerogels blieb trotz Beschichtung weitgehend erhalten, wie Stickstoffphysorption und REM-Aufnahmen bestätigten; die spezifische Oberfläche nahm nur geringfügig ab. In Kombination mit einer nachgeschalteten Vernetzung der Ligninschicht konnte zudem die dimensionsstabilisierende Wirkung verstärkt werden: Für geeignete Lignin-PU-Systeme betrug die volumetrische Schwindung bei 70 % r. F. nur rund 21 %, während unbehandelte Proben in diesem Feuchtebereich deutlich stärker kollabierten.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die integrierte Ligninbeschichtung eine wirksame und reproduzierbare Strategie zur Hydrophobisierung und Erhöhung des kritischen Feuchtepunktes biobasierter Aerogele darstellt, ohne deren poröse Kernstruktur grundlegend zu verändern.

### 2.2.5 Untersuchungen, Bewertungen und Auswahl der Lösungsstrategien

Die entwickelten Lignin-Alginat-Hybrid-Aerogele wurden systematisch hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet, um die geeignetsten Strategien für eine spätere Anwendung in

Fassadensystemen zu identifizieren. Die Pressversuche zeigten, dass Formulierungen mit einem Ligningehalt von 8–32 Gew.-% die günstigste Balance aus Kohäsion, mechanischer Stabilität und geringer Wärmeleitfähigkeit aufweisen; in diesem Bereich konnten stabile, binderfreie Pressplatten hergestellt werden, deren Dämmleistung mit  $\lambda$ -Werten von 0,024–0,03 W/m·K erhalten blieb. Die Sorptionsmessungen bestätigten jedoch eine ausgeprägte Hygroskopie, da sowohl lose Partikel als auch gepresste Platten bei hoher relativer Luftfeuchte Feuchtaufnahmen von bis zu 38–40 Gew.-% erreichten. Um diese zentrale materialspezifische Herausforderung zu adressieren, wurden zwei Modifikationsansätze untersucht: die C4F8-Plasmahydrophobierung und eine ligninbasierte In-situ-Beschichtung. Während die Plasmabehandlung eine oberflächenwirksame Wasserabweisung erzeugte, zielte die ligninbasierte Beschichtungsstrategie darauf ab, die Feuchtaufnahme durch eine physische Barriere im Partikelgefüge zu reduzieren und so das Eindringen von Wasser sowie die dimensionsbezogene Instabilität deutlich zu verringern. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden Hybrid-Aerogele mit 8–32 Gew.-% Lignin in Kombination mit der skalierbaren ligninbasierten Beschichtung als bevorzugte Lösungsstrategie für die weitere Entwicklung ausgewählt.

II. Eingehende  
Darstellung  
Material- und Bau-  
teilentwicklung

## 2.3 Bauteilentwicklung (Fassaden-Sandwichelement)

Anhand von Lösungsprinzip I.a.5 (Abb. 28, mittlere Spalte, Zeile 1) erfolgen zunächst umfangreiche Abschätzungen und Berechnungen seitens der Tragwerkplaner zum Fassaden-Sandwichelement (FSE). (Abb. A51 + A52) Dabei wird vor allem auf die angesetzten Lasten, Weiterleitung der Lasten und weitere Arbeitsschritte eingegangen.<sup>59</sup>

Bei der verwendeten Version zur Ermittlung der Eigenlasten handelt es sich um das optimierte FSE (Lösungsprinzip I.a.5). Die Außenmaße betragen 1300/3150 mm (Fläche von 4,095 m<sup>2</sup>) und ergeben sich aus der Kombination von vier OPTIM-R-Paneelen mit den Maßen 600/1200 mm und zwei Paneelen mit den Maßen 600/600 mm. Vor der Einbindung der Firma Kingspan in das Projekt werden zur Ermittlung des Eigengewichts die VIPs der Firma va-Q-tec angesetzt. Um jedes Paneel ist ein Rand von 25 mm aus AlphaCore Dämmstreifen eingeplant. Zwischen diesen Randstreifen sollen Schubgitter aus Textilbewehrung verlaufen, welche die Innen- und Außenschicht aus Leichtbeton verbinden. Für die Materialität der Schubgitter wurde zunächst Bewehrung aus Carbonfasern in Betracht gezogen.

Im weiteren Verlauf des Projekts werden diese durch Bewehrungsgitter aus Glasfasern, aufgrund der günstigeren Wärmeleitfähigkeit, ersetzt. Beide Leichtbetonschichten sollen zusätzlich mit je einer flächigen Lage Textilbewehrung bewehrt werden. In späteren Modellen wird die Tragschale mit einer inneren und äußeren Bewehrungslage verstärkt. Die Wahl und Anordnung der Bewehrung erfolgt auf Grundlage der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung „Z-71.3-39“ der Firma Solidian.<sup>60</sup>

### 2.3.1 Lastannahmen

Da die HLB-Innenschicht als Tragschicht fungiert, wird deren Dichte wesentlich höher als die der Außenschicht angenommen. Die „Z“-förmigen Schubgitter besitzen eine Querschnittslänge von 650 mm und ein Flächengewicht von 0,012 kN/m<sup>2</sup>. Zusammen mit der Flächenbewehrung ergibt sich eine Flächenlast aus der Textilbewehrung von 0,052 kN/m<sup>2</sup>. Insgesamt resultiert aus den Dichten und Dicken der einzelnen Schichten, der Flächenlast der Bewehrung und einem gewählten Zuschlag für sonstige Kleinteile von 0,016 kN/m<sup>2</sup>, eine Flächenlast für das FSE von 1,75 kN/m<sup>2</sup>. Bei einer Fläche von 4,095 m<sup>2</sup> führt dies zu einem Gesamtgewicht von 7,17 kN (717 kg). Der ursprüngliche Ansatz mit einer Dicke der Tragschicht von 60 mm (Abb. 25) lieferte ein Eigengewicht von 5,53 kN (553 kg), wurde jedoch aufgrund der zu dünnen Tragschicht nicht weiterverfolgt. Im weiteren Projektverlauf bewegte sich das resultierende Eigengewicht zwischen 7,17 kN und 9,01 kN bedingt durch variierende Schichtdicken und Wichten des Betons. Die zuletzt berechnete Version des FSEs ergab ein Eigengewicht von 7,78 kN.

Für die weiteren statischen Berechnungen wird auf das FSE (Lösungsprinzip I.a) Bezug genommen. Dieser Ansatz berücksichtigt die oben beschriebenen Vakuumpaneele OPTIM-R der Firma Kingspan mit einer Dichte von 220 kg/m<sup>3</sup>. (Abb. 46)

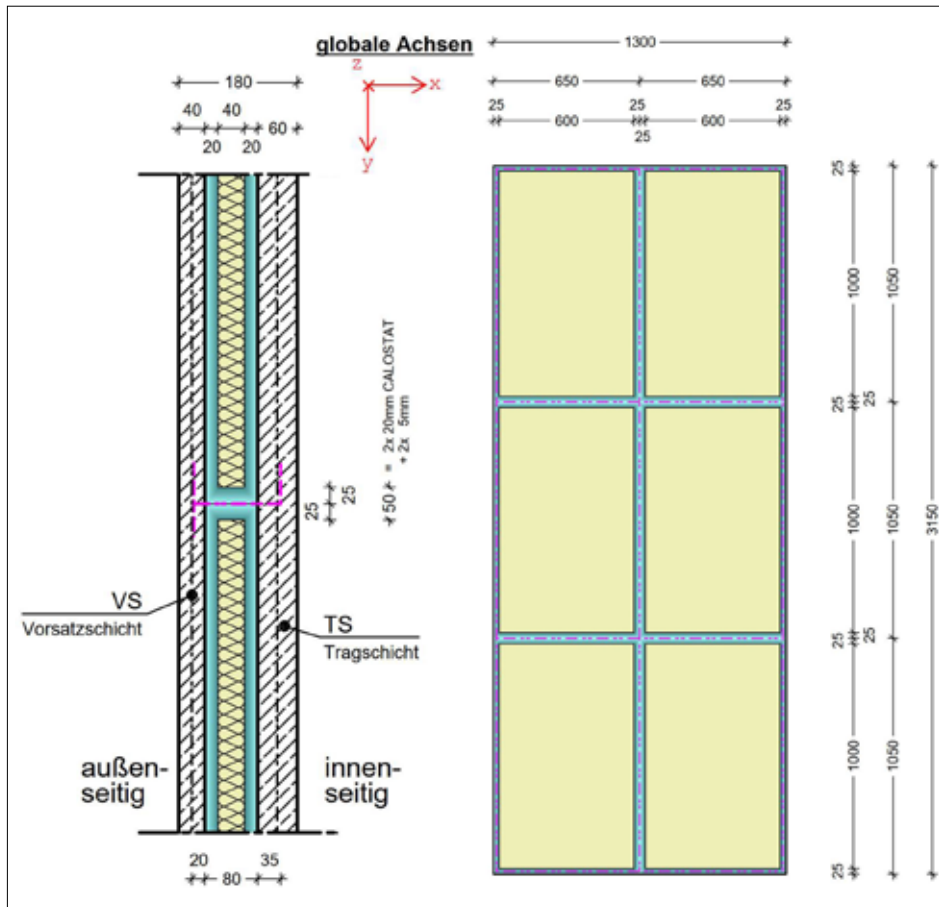
Da die innere LB-Deckschicht als Tragschicht wirkt, sind die weiteren Schichten verbunden durch die Schubgitter an diese ‚angehängt‘. Die äußeren Schichten können somit ihre Eigenlasten nicht im Schwerpunkt der Tragschicht abtragen. Durch diese Exzentrizität entsteht ein Versatzmoment, welches als horizontales Kräftepaar (oben Zug und unten Druck) weitergeleitet wird. (Abb. 36) Die Zugkraft wird in die Schubgitter und anschließend in die Tragschicht eingeleitet. Die Größe des entstandenen Moments und damit auch der Zug- und Druckkraft variiert ebenfalls aufgrund der sich ändernden Schichtdicken. Im bisherigen Ansatz ist vorgesehen, die Druckkraft über die Dämmung weiterzuleiten. Dies bedarf jedoch weiterer Abstimmung, da dies eventuell nicht erfüllt werden kann, falls die Wahl auf ein weiches Dämmmaterial oder sogar auf eine -schüttung fällt.

Für die Ermittlung der Windlasten wird ein Beispielgebäude mit einer Grundfläche von 15 x 15 m und einer Höhe von 15 m mit Standort in Regensburg gewählt. Bedingt durch die gewählte Lage befindet sich das Gebäude in der Windzone 1 sowie in der Geländekategorie „Mischprofil Binnenland“, welche den Übergangsbereich zwischen den Geländekategorien II (landwirtschaftliche Gebiete) und III (Vorstadt, Industrie und Gewerbe) darstellt. Daraus resultiert ein Geschwindigkeitsdruck von  $q_{p,k} = 0,65 \text{ kN/m}^2$ . Die Fassade des Gebäudes wird in verschiedene Bereiche (A, B, D) unterteilt und es werden für den Windaußendruck die Werte ermittelt.

Da das FSE später auch als Absturzsicherung wirkt, ist darauf zusätzlich eine horizontale Nutzlast anzusetzen. (Abb. 47 + 48) Absturzsicherungen sind im Sinne des EC0 und der ETB-RL in Richtung des Absturzes in Höhe von 0,9 m über der Fußboden-Oberkante mit 100 %, in Gegenrichtung mit 50 % zu belasten (mindestens jedoch 0,5 kN/m) und Befestigungselemente mit „Ersatzlast aus weichem Stoß“ zu bemessen. Für die Bemessung relevant sind die Nutzungskategorien B1 und B2.

<sup>59</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A2.2, S. 28

<sup>60</sup> Diese Zulassung behandelt ein mit Textilgittern bewehrtes Sandwichelement aus „normalem“ Beton. Deutsches Institut für Bautechnik: Z-71.3-39 (o.J.). <https://www.dibt.de/de/service/zulassungsdownload/detail/z-713-39<28.01.2026>>



II. Eingehende Darstellung  
Material- und Bauteilentwicklung

Abb. 46 Fassadensandwichelement (FSE) / letzter Berechnungsansatz vom 26.05.2025 (HT)

### 2.3.2 Maßgebende Lastkombination auf Schubgitter

Die Schubgitter sollen Zuglasten aus der äußeren in die innere HLB-Deckschicht übertragen können. Ob sie auch Druckkräfte aufnehmen können, soll im weiteren Projektverlauf geklärt werden. Zwischenzeitlich wurde das Projektteam auf den neuen Entwicklungsansatz der Firma solidian aufmerksam. Dieser beinhaltet den Einsatz von sogenannten „PIN-Connectoren“, um Druckkräfte aus der Vorsatz- in die Tragschicht einzuleiten. Diese stiftförmigen Verbinder „durchstechen“ dabei die Dämmschicht. Da jedoch ein Durchdringen der hier verwendeten Vakuumisulationspaneele nicht möglich ist, wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

Nach den aktuellen Ansätzen müssen die vertikalen Lasten aus den Eigengewichten der Dämmschichten sowie der Außenschicht auf die Tragschicht übertragen werden. Zum Lastabtrag wurden hierbei die horizontal angeordneten Schubgitter nicht mit angesetzt.

Die maßgebende Lastkombination setzt sich aus den in horizontale Richtung wirkenden Lasten, welche in den Schubgittern Zug erzeugen, zusammen. Dazu zählt zum einen der Windsog, wobei der Sog im Eckbereich aufgrund der größeren Werte von  $-0,83 \text{ kN/m}^2$  angesetzt wird. Diese Flächenlast wird mithilfe von Lasteinzugsflächen auf die einzelnen Schubgitter-Achsen aufgeteilt. Die größte dadurch entstehende Linienlast wirkt auf die mittlere vertikale Achse. Zum anderen wird zusätzlich die bereits erwähnte Zuglast aus dem Versatzmoment in die Schubgitter eingeleitet. Hierbei wird wiederum mithilfe der Schubgitterabstände die Flächenlast auf eine Linienlast umgerechnet. Die Summe dieser einwirkenden Lasten soll im weiteren Verlauf mit der Zugfestigkeit der Textilbewehrung verglichen werden. Die Nutzlast aus der Absturzicherung hat keinen Einfluss auf die Schubgitter, da diese direkt an der Tragschicht angreift. (Abb. 47 – 49)

Um die Tragfähigkeit des Bauteils nachzuweisen werden zunächst die auftretenden Schnittgrößen ermittelt. Hierfür soll die Methode der Finiten Elemente (FEM), unterstützt durch geeignete Software, angewandt werden. Erste Berechnungsversuche erfolgen mit dem in Friedrich + Lochner (Frilo) enthaltenen Programm PLT (Version 02/23) (Abb. 50) sowie mit Dlubal RFEM 6.04.

In Dlubal RFEM ist es möglich eine Platte mit Schichtaufbau und benutzerdefinierten Materialeigenschaften zu modellieren. Zusätzlich sind eine genauere Lasteingabe sowie eine bessere Modellierung der geplanten Textilbewehrung möglich. Aufgrund dieser Faktoren soll

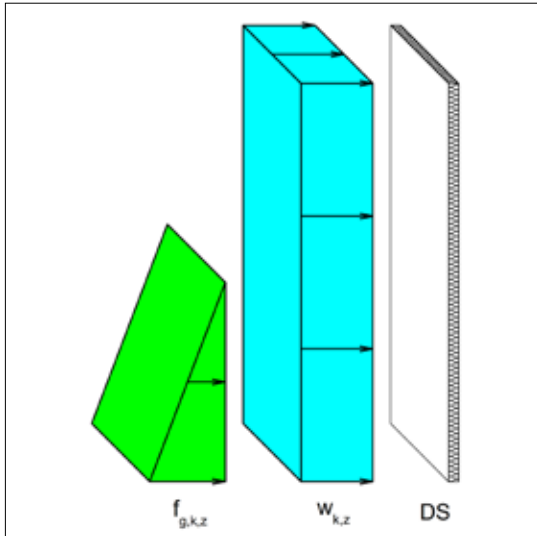


Abb. 47 FSE / Lastbild auf Dämmschicht, bestehend aus Winddruckkraft  $w_{k,z}$  und Druck aus Versatzmoment  $f_{g,k,z}$  (H+T)

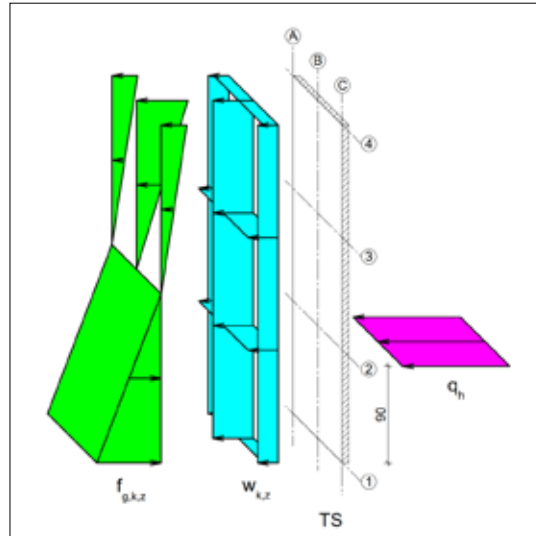


Abb. 48 FSE / Lastbild der Lastkombination 2 auf die Tragschicht; u.a. Nutzlast aus Absturzsicherung  $q_h$  in Stoßrichtung (H+T)

II. Eingehende Darstellung  
Material- und Bauteilentwicklung

dieses Programm für den weiteren Projektverlauf verwendet werden. Das Frilo-Programm PLT weist in den genannten Bereichen weniger Anpassbarkeit in der Eingabe auf und ist deswegen für eine genaue Bemessung in diesem Fall nicht geeignet. Jedoch sollte es zum Beispiel für Vergleichsberechnungen nicht ganz außer Acht gelassen werden.

Um genaue Berechnungsergebnisse zu erlangen, müssen im weiteren Projektverlauf Punkte geklärt werden, welche sich aktuell in Abstimmung befinden. Besonders die Kenntnis der Materialkennwerte, wie des Elastizitätsmoduls, Zug- bzw. Druckfestigkeiten oder Temperaturdehnzahlen, ist wichtig für die Tragwerksplanung. Außerdem müssen auch alle Bauablaufs-Prozesse, wie Herstellung, Transport und Montage, besprochen und eventuell statisch berechnet werden. Bei der Betonage der zweiten HLB-Schicht muss beispielsweise das Gewicht dieser über die Dämmung oder anderweitig abgetragen werden. Ebenfalls in Arbeit befinden sich Elementstöße, Ecken oder Befestigungsvarianten am Gebäude, wobei auch geeignete Befestigungsmittel gewählt werden müssen. Abstimmungsbedarf ist auch bei der Art, Anordnung und Bemessung der Textilbewehrung und damit auch der Schubgitter vorhanden.

Mit der Anpassung an die Ergebnisse aus den laufenden Abstimmungen, sollen mithilfe der Statiksoftware die auftretenden Schnittgrößen errechnet werden. Im Anschluss hierzu können diese an Meier Betonwerke GmbH übermittelt werden, um eine eventuelle Probebelastung am Prüfstand zu ermöglichen. Dabei ist das Ziel die Herleitung empirischer Formeln, um die statische Bemessung des FSEs flexibel zu typisieren.

Ausgehend von grundsätzlichen Analysen der unterschiedlichen Materialien und Schichtdicken des FSE-Aufbaues (Abb. 46) erfolgen Berechnungen der flächenbezogenen Massen  $m'$  und der wahrscheinlichen späteren Einstufung als schalltechnisch biegesteife oder biegeweiche Konstruktionen. Bei gleicher flächenbezogener Masse erreichen biegeweiche Schichten höhere bewertete Schalldämm-Maße. Die Höhe der Schalldämmung des FSE wird ganz maßgeblich von der Trag- und Deckschicht bestimmt. Für beide wird aufgrund der voraussichtlichen Kennwerte für E-Modul, Dichte und Schichtdicke erwartet, dass das FSE als schalltechnisch biegesteife Konstruktion entstehen wird. Der für biegeweiche Konstruktionen zu erwartende Schalldämmgewinn wird sich nicht einstellen.

Dennoch hat die Prognose des bewerteten Schalldämm-Maßes ausgehend vom optimierten Lösungsprinzip I.a.5 mit einem  $R_w$  von 41 dB bei einer flächenbezogenen Masse  $m'$  insgesamt von 168 kg/m<sup>2</sup> ein für die Praxis bereits brauchbares Ergebnis gezeigt.

Abgeleitet aus DIN 4109, Schallschutz im Hochbau können Außenlärmbelastungen bis zu einem maßgeblichen Außenlärmpegel von  $L_a = 68$  dB(A) abdeckt werden. Zum aktuellen Stand der Arbeiten ist eine Unsicherheit der Aussage von 2 bis 3 dB anzunehmen.

Bei der weiteren Entwicklung sind Fragen der Schalldämmung im Bereich der Stöße der FSE und Frage der Flankenschalldämmung, d. h. der ausreichenden Begrenzung der Schallübertragung längs der Fassade über die Anschlüsse von Trennwänden und Trenndecken hinweg zu behandeln.

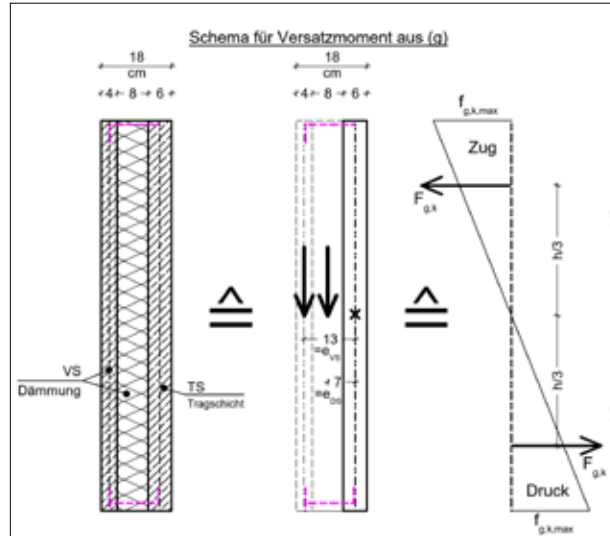
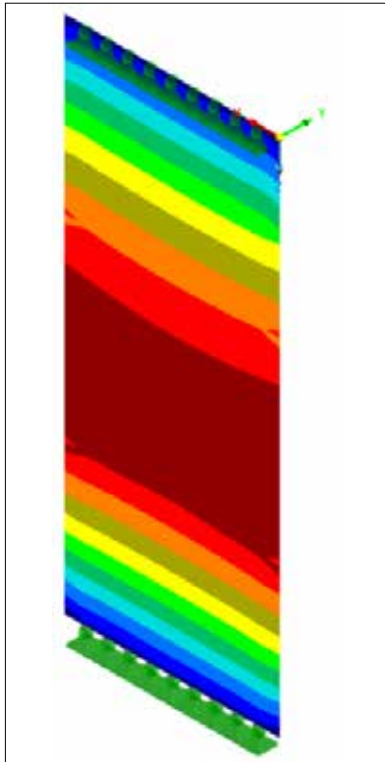


Abb. 49 FSE / Versatzmoment aus Eigengewicht von Vorsatz- und Dämmschicht mit Darstellung der daraus entstehenden Zug- und Druckkraft (H+T)

Abb. 50 FSE / Momentenverlauf (schematisch) in Tragschicht aus Programm Dlubal RFEM (H+T)

II. Eingehende Darstellung  
Material- und Bauteilentwicklung

In den bisherigen Arbeitsschritten wird ebenfalls untersucht, inwieweit durch eine elastische Entkopplung der Konstruktionsschichten, z. B. durch den Einbau von Mineralwollelagen, ein mehrschaliger Aufbau mit höheren Schalldämm-Maßen herstellbar ist. Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass Tragschicht und Deckschicht als biegesteife Platten aufzufassen sind, die durch eine mit Mineralwolle verfüllte Fuge von einigen Zentimetern Dicke voneinander getrennt werden müssten, wobei sich Schallbrücken, z. B. an den Rändern ungünstig auswirken. Aufgrund des Ziels möglichst schlanker FSE und der vorgesehenen Textilbewehrung zur Verbindung von Innen- und Außenschicht aus Holzleichtbeton (= Schallbrücke) wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

Ein zweischaliger Aufbau ausgehend von Lösungsprinzip I.b, ergänzt durch eine zusätzliche schalltechnisch biegeeweiche Vorsatzschale (z. B. Fassadenplatten Pfeilerer Duropol XTerior compact, Dicke 6 mm) kann das bewertete Schalldämm-Maß grundsätzlich um 10 dB und mehr erhöhen. Dieser Ansatz einer Art VHF und deutlichen Zunahme der Bauteildicke auf mindestens 230 mm entspricht zunächst nicht den Projektzielen, soll aber als Lösungsprinzip II optimiert und ebenfalls weiter untersucht werden.

### 3 Funktionsmodelle und Untersuchungen zum Leistungsprofil

II. Eingehende Darstellung

#### 3.1 Entwicklung und Realisierung eines Funktionsmodells

Funktionsmodelle + Leistungsprofil

Das Funktionsmodell bildet das Konstruktionsprinzip ab.<sup>61</sup> Fügungen zwischen den Sandwichelementen, dem Rohbau und anderen Bauteilen (z. B. Fenster) sind zunächst nicht berücksichtigt. (Abb. 57) Es besteht aus drei Schichten:

- Innenschicht (Tragschicht aus Leichtbeton)
- Dämmstoffpaket
- Außenschicht (Vorsatzschicht / Fassade aus Leichtbeton)

Das Dämmstoffpaket ist in drei Schichten aufgeteilt.

- Kingspan Alphacore Pure (Abb. 51)  
Wärmeleitfähigkeit<sup>62</sup>:  $\lambda = 0,021 \text{ W/mK}$
- Kingspan Optim-R (VIP) (Abb. 52)  
Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,007 \text{ W/mK}$
- Kingspan Alphacore Pure (Abb. 51)  
Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,021 \text{ W/mK}$

Um das Vakuuminulationspaneel (VIP) vor Beschädigungen zu schützen, wird es allseitig durch Dämmstoffschichten geschützt. Für die Randdämmung ist eine kraftschlüssige Anbindung an beide Leichtbetonschichten erforderlich. Mit dem hochhydrophoben Dämmstoff Alphacore Pure ist diese nicht gewährleistet. Als Randdämmung wird

- Kingspan Kooltherm K20 (Abb. 53)  
Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,022 \text{ W/mK}$

gewählt. Hier sind andere, hydrophile und druckstabile Dämmstoffe, wie z. B. Kork oder Holzfaser ebenfalls geeignet. Kingspan Kooltherm K20 bietet gegenüber diesen Dämmstoffen allerdings eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig hoher Stabilität.

Für das Funktionsmodell (Lösungsstrategie I / fm.I.a – Oktober 2024 (Abb. A53 im Appendix); nachfolgend Funktionsmodell I) werden Rezepturen von Leichtbetonen ohne Holzzuslagstoffe berechnet. (Abb. A25 und A26 im Appendix)<sup>63</sup>

Für die Bauteilentwicklung bzw. die Entwicklung und Realisierung eines Funktionsmodells werden zunächst statische Berechnungen und ökologische Bewertungen der notwendigen textilen Bewehrung auf Basis von Geweben und Formteilen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) durchgeführt. Für den Bau des Funktionsmodells (Lösungsstrategie I / fm.I.a) erfolgt aufgrund der Schlankheit der beiden Deckschichten und den eingesetzten Leichtbetonen nach Rücksprache mit der Firma Solidian der Einsatz von zweiseitig verfestigtem (2D) Gewebe und dreidirektionalen (3D) und Formteilen aus carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK). An sich gibt es zwischen CFK und GFK wesentliche Unterschiede, aber aufgrund der relativ geringen verbauten Menge fällt dieser Unterschied nicht so ins Gewicht.

- Flächenarmierung: Solidian GRID Q95-CCE-38 (Abb. A62 im Appendix)
- Randarmierung: L-Profil aus Solidian GRID Q85-CCE-21 (Abb. A65 im Appendix)

Carbon-Bewehrungen sind gegenüber Stahlbewehrungen leichter und weisen eine bis zu zehnmal höhere Zugfestigkeit auf. Da CFK-Gewebe nichtrostend sind kann die Betonüberdeckung und damit der Betonquerschnitt geringer sein als bei üblichen Stahlbewehrungen.

Solidian gibt eine Mindestbetonüberdeckung von 15 mm an. Damit ist in der Außenschicht ( $d = 30 \text{ mm}$ ) die Bewehrung einlagig mittig positioniert. In der Innenschicht konnten zwei Bewehrungslagen eingeplant werden.

Mit dem Funktionsmodell I wird im Labormaßstab die Produzierbarkeit des Fassaden-Sandwichelements erprobt. Die gewählte Größe erlaubt schalltechnische und wärmeschutztechnische Untersuchungen mit hinreichender Genauigkeit.

Die Randdämmung (Kooltherm K20) wird mit dem CFK-L-Profil verklebt und an der Randschalung fixiert. (Abb. 54 + A65 im Appendix) Dadurch ist die Position der Rand- und Flächenbewehrung und damit die Betonüberdeckung von 15 mm gewährleistet.

Zur Herstellung

Außenschicht (Fassade): Unter Laborbedingungen ist eine übliche Verdichtung (Rütteltisch) nicht möglich. Der Beton wird deshalb „selbstverdichtend“ eingestellt. Um ein „Aufschwimmen“ der Flächenbewehrung zu vermeiden ist das Bewehrungsgitter vor der Betonage am L-Profil fixiert. (Abb. 54)

61 Vgl. Appendix, Kapitel A3.1, S. 29ff.

62 Angegeben ist jeweils der Bemessungswert, wie bei der Berechnungen des U-Werts verwendet.

63 Vgl. 2 Material- und Bauteilentwicklung / 2.1 Materialentwicklung ((Holz-)Leichtbeton), S. 30ff.

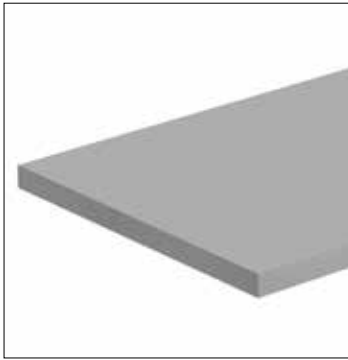


Abb. 51 Alphacore Pure  
Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,021 \text{ W/mK}$   
(Kingspan)



Abb. 52 ViP Optim-R  
Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,007 \text{ W/mK}$   
(Kingspan)



Abb. 53 Kooltherm K20  
Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,022 \text{ W/mK}$   
(Kingspan)

II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil



Abb. 54 Flächenarmierung und  
Betonage (Meier)



Abb. 55 Zweite Lage VIP  
Optim-R (Meier)



Abb. 56 Einarbeiten zweite Be-  
wehrungslage (Meier)



Abb. 57 Vorderseite / Außenschicht – In der Ober-  
fläche sind Rissbildungen zu erkennen  
(Ohm-AR)

Der Beton der Außenschicht wird nach der Betoneinfüllung abgezogen und zur Belegung mit den Dämmstofflagen vorbereitet. Die einzelnen Dämmstofflagen sind anschließend ‚knirsch‘ in die vorbereitete Randdämmung eingelegt. (Abb. 55 und A66 + A67 im Appendix) Innenschicht (Tragschicht): Im Lauf des Betonierfortschritts werden die beiden Bewehrungslagen eingebettet. (Abb. 54, 56 + A68 im Appendix) Der Arbeitsablauf lässt sich in den industriellen Fertigungsprozess eines Betonwerks problemlos übertragen.

Die Rezepturen des Leichtbetons sind stabil. Entmischungen werden nicht festgestellt. Die geplanten Betonrohddichten konnten eingehalten werden. Rissbildung in der Außenschicht. (Abb. 57) Die Ursachen sind die mittige Lage der Bewehrung und das Ausschalen (Kippen ohne Unterstützung) über die kurze Seite. (Abb. A64 im Appendix) Im industriellen Fertigungsprozess wird mit Kipptischen entschalt. Die beim Funktionsmodell I entstandenen Zugspannungen werden damit vermieden.

## 3.2 Bauakustische Bewertung der Lösungsstrategien

### 3.2.1 Zieldefinitionen

Der Schallschutz gegen Außenlärm und zwischen verschiedenen Nutzern ist insbesondere in Wohngebäuden ein wichtiger Gesichtspunkt.

Für das Vorhaben wurde ein Zielwert von  $R_w \geq 40$  dB im Schalldurchgang formuliert, um für Wohnungen mittlere Außenlärmbelastungen abfangen zu können.  $R_w \geq 40$  dB entspricht beispielsweise den Werten von Außenwänden aus hochwärmedämmenden Ziegeln für niedrige Druckspannungen. Eine qualitative Einordnung ergibt sich aus einem Vergleich mit den in VDI 2719:1987-08 beschriebenen Schallschutzklassen (SSK) von Fenstern. (Tab. A27 im Appendix)

Bei Erreichen des Zielwerts kann somit eine Eignung für mäßige bis hohe Außenlärmbelastungen erwartet werden, auch unter der Randbedingung, dass die Schalldämmung von Wänden gegenüber Fenstern üblicherweise höher liegen sollte.

Neben dem Schallschutz gegen Außenlärm muss eine Fassade eine Vielzahl weiterer Funktionen übernehmen. Im Bereich des Schallschutzes ist in diesem Zusammenhang die Flankenschallübertragung zwischen neben- und übereinanderliegenden Wohnungen und Räumen zu beachten, genauer, die ausreichende Begrenzung dieser Flankenschallübertragung. Um den Mindestschallschutz nach DIN 4109-1<sup>64</sup> oder ggf. auch die Empfehlungen für erhöhten Schallschutz nach DIN 4109-5 erreichen zu können, ist für die Fassade in horizontaler / vertikaler Richtung eine bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz  $\geq$  ca. 58 / 60 dB wünschenswert.

Die im Vorhaben erarbeiteten Konstruktionen führen zielgemäß zu schlanken Tragschichten auf der Innenseite, mit einer entsprechend geringen flächenbezogenen Masse von größenordnungsmäßig 110 bis 200 kg/m<sup>2</sup>. Die daraus resultierenden bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenzen über das durchlaufende Fassadenelement (ohne Stoßstellen und ohne Trennung) lassen lediglich 43 bis 49 dB erwarten, deutlich ungünstiger als erforderlich. Nachfolgend werden die zielführenden Schritte (Segmentierung der Fassade, Aktivierung der Stoßstellendämmung an Wohnungstrennwänden und -decken) beschrieben, um in den Zielbereich zu gelangen.

#### Bewertetes Schalldämm-Maß in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse

Eine der wichtigsten Größen der Bauakustik ist das Schalldämmmaß  $R$ , das u. a. von der flächenbezogenen Masse  $m'$  einer trennenden Schicht und der Tonfrequenz  $f$  abhängig ist. Die grundlegenden bauphysikalischen Zusammenhänge hat Richard Berger in seiner Dissertation an der Technischen Hochschule München bereits im Jahr 1911 beschrieben:

In den folgenden Jahrzehnten wurden die von Berger gefundenen systematischen Zusammenhänge weiter untersucht, auch mit dem Ziel, nicht nur in den einzelnen Terz- oder Oktavbändern, sondern auch für den Einzahlwert des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w$  einen Zusammenhang mit der flächenbezogenen Masse einer flächigen Baukonstruktion zu finden. In die Bildung von  $R_w$  fließen die Energiebeiträge aller Frequenzbänder des sogenannten bauakustischen Messbereichs von 100 Hz bis 3.150 Hz ein. Das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  bzw. Kenngrößen, die daraus direkt abgeleitet werden können, hat sich in der Praxis des Planens und Bauens des Schallschutzes in Gebäuden als Maßstab durchgesetzt.

In Deutschland hat in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts insbesondere Lothar Cremer<sup>65</sup> wesentlich zur Umsetzung der akustischen Erkenntnisse in die bauliche Praxis beigetragen. Seine und die Arbeiten von Karl Gösele<sup>66</sup> waren wesentliche Grundlagen in der DIN 4109 hinterlegten bauakustischen Rechenverfahren. Gösele<sup>67</sup> hat die Abhängigkeit des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R'_w$  von der flächenbezogenen Masse  $m'$  dargestellt. Die dort ablesbaren Werte liegen gegenüber den Rechenwerten  $R_w$  für Beton (Gleichung (13)) bzw. Leichtbeton (Gleichung (14)) der aktuellen Fassung der DIN 4109-32 um ca. 3 bzw. 5 dB niedriger, u. a. wegen der von Gösele in den damaligen bauakustischen Prüfständen „mitgemessenen“ Flankenschallübertragung. Die Frage, ob im Vorhaben stärker die schalltechnischen Eigenschaften von Beton oder Leichtbeton anzunehmen sind, kann nicht abschließend beantwortet werden.

Unter Abwägung der unterschiedlichen Gesichtspunkte, u. a. der Unsicherheiten infolge der neuen mehrschichtigen Konstruktionen ohne breite Vorkenntnis derer bauakustischer Eigenschaften, wurde bereits zu Beginn des Vorhabens entschieden, das Diagramm von Gösele den Prognosen der bewerteten Schalldämm-Maße  $R_w$  zugrundezulegen. (Abb. 58) Dieses Vorgehen hat sich im weiteren Verlauf des Vorhabens als zweckmäßig erwiesen.

II. Eingehende Darstellung

Funktionsmodelle + Leistungsprofil

64 Wohnungstrennwände  $R'_w \geq 53$  dB, Wohnungstrenndecken  $R'_w \geq 54$  dB

65 z. B. Cremer 1942

66 z. B. Gösele et al., 1997

67 z. B. Gösele et al., 1997

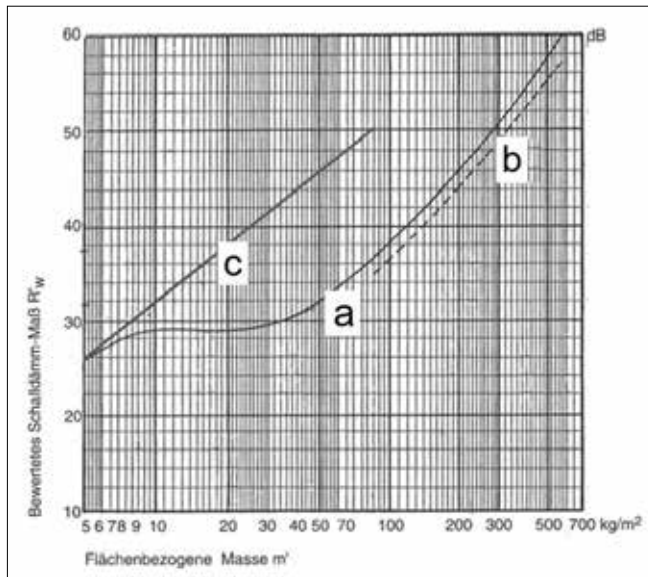


Abb. 58

Abhängigkeit des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R'_w$  (bzw. im Rahmen des Vorhabens  $R_w$ ) von der flächenbezogenen Masse  $m'$  für Konstruktionen mit normaler Biegesteifigkeit (biegehart) a) und geringer Biegesteifigkeit (biegeweich) c). Die gestrichelte Kurve b) entspricht a), verringert um das früher verwendete sogenannte „Vorhaltemaß“

II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

Prüfkörper (Fenstergrößen)	Schallschutzwert für Fenster
Gesamtfläche $\leq 2,7 \text{ m}^2$	$R_w$ und $R_w + C_{tr} = 0 \text{ dB}$
$2,7 \text{ m}^2 < \text{Gesamtfläche} < 3,6 \text{ m}^2$	$R_w$ und $R_w + C_{tr} = -1 \text{ dB}$
$3,6 \text{ m}^2 < \text{Gesamtfläche} < 4,6 \text{ m}^2$	$R_w$ und $R_w + C_{tr} = -2 \text{ dB}$
$4,6 \text{ m}^2 < \text{Gesamtfläche}$	$R_w$ und $R_w + C_{tr} = -3 \text{ dB}$

Tab. 5 Extrapolationsregeln bei Prüfkörper-Gesamtflächen für unterschiedliche Fenstergrößen nach DIN EN 14351-1, Tabelle B.3 (MoPa)

### 3.2.2 Lösungsstrategie I

Der Aufbau des Fassadenelements stellt ein Mehrschichtverbundsystem dar, dessen Schichten fest verbunden sind und das u. a. aufgrund der Dicke der Innenschicht als schalltechnisch biegesteif einzustufen ist. Für Lösungsstrategie I resultiert ein Erwartungswert für das bewertete Schalldämm-Maß von  $R_w = 45 \text{ dB}$ , wobei Korrekturen zur Berücksichtigung der geplanten Elementgrößen und von Unsicherheiten beim späteren Einsatz am Bau noch nicht eingeflossen sind. Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei einer neu entworfenen Konstruktion, wie sie das aus Lösungsstrategie I resultierende Funktionsmodell I darstellt, unerwartete schalltechnische Effekte zu Tage treten können, mit der Folge von mehr oder weniger hohen, ggf. negativen Abweichungen vom Erwartungswert.

Das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w = 45 \text{ dB}$  (Abb. A73 im Appendix) kann grundsätzlich für ein in einem schalltechnischen Prüfstand eingebautes Element erwartet werden, das eine Fläche von  $2,57 \text{ m}^2$  oder kleiner aufweist. Größere Abmessungen verursachen erfahrungsgemäß mit der Elementfläche ansteigende Abminderungen der Schalldämmung.<sup>68</sup> (Tab. 5)

Sofern das spätere marktfähige Produkt in den vorgesehenen Größen  $S = 3,60 \text{ m} \times 1,35 \text{ m} = 4,86 \text{ m}^2$  hergestellt werden kann, könnte sich somit im Prüfstand ein Wert von  $R_w = 45 - 3 = 42 \text{ dB}$  einstellen.

Die Unsicherheit der Prognose wird im Rahmen des Vorhabens entsprechend DIN 4109-2 mit einem Abzug von  $2 \text{ dB}$  in Ansatz gebracht. Somit beträgt der

Prognosewert am Bau abzüglich der Unsicherheit  $R_w = 40 \text{ dB}$ .

Diese Prognose wurde durch die Messung der Schalldämmung für das Funktionsmodell I im bauakustischen Prüfstand des IFT Rosenheim überprüft.

### 3.2.3 Funktionsmodell I – Messung der Luftschalldämmung im Prüfstand

Mit dem Funktionsmodell wurden am 6.11.2024 im Fensterprüfstand des Instituts für Fenstertechnik, ift Roenheim GmbH bauakustische Prüfungen durchgeführt, (Abb. 59 + 60 und

<sup>68</sup> DIN EN 14351-1, Tabelle B3 gibt einen Anhalt für die Auswirkungen größerer Elementflächen auf das bewertete Schalldämm-Maß.



Abb. 59 Rosenheim, Prüfstand Senderaum, Messung Luftschalldämmung am Funktionsmodell I, 06.11.2024 (OHM-AR)



Abb. 60 Rosenheim, Prüfstand Empfängerraum, Messung Luftschalldämmung am Funktionsmodell I, 06.11.2024 (OHM-AR)

II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

A77 – A79 im Appendix) mit dem Prüfwert des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w = 45$  dB. Dieser Wert kann als Bestätigung des Prognoseverfahrens für die Schalldämmung der Konstruktionen im Rahmen des Vorhabens aufgefasst werden.

Auch vom Prüfstandswert  $R_w = 45$  dB ist für einen späteren Einsatz am Bau im Sinne der DIN 4109 eine Unsicherheit von 2 dB abzuziehen, weiterhin eine Korrektur für die Abweichungen aufgrund der Größe des Prüfobjekts ( $S = 1,25 \text{ m} \times 0,64 \text{ m} = 0,80 \text{ m}^2$ ) von den Abmessungen der geplanten Fassadenelemente ( $S = 3,60 \text{ m} \times 1,35 \text{ m} = 4,86 \text{ m}^2$ ) vorzunehmen. Größere Plattenmaße führen dabei zu geringeren bewerteten Schalldämm-Maßen.

Entsprechende Korrekturwerte bei Prüfkörper-Gesamtflächen  $> 4,60 \text{ m}^2$  berücksichtigt (Tab. 5) kann für das Fassadenelement Lösungsstrategie I auch vom Prüfstandswert ausgehend ein bewertetes Schalldämm-Maß  $R_w = 45 - 2 - 3 = 40$  dB erwartet werden.

### 3.2.4 Lösungsstrategie II

Zur Umsetzung der Lösungsstrategie II sind eine Reihe von Varianten denkbar. Stellt man die Verbesserung der Schalldämmung der Grundkonstruktion in den Mittelpunkt der Betrachtung, bietet die Variante II.c.1 die besten Optionen, da hier die Luftschicht zwischen innen-seitiger Tragschicht und außenseitiger Vorsatzschale am größten ist. (Abb. 31, Seite 29)

Ohne Beachtung der Zweischaligkeit, d. h. betrachtet als einschaliges Bauteil mit der Summe der flächenbezogenen Massen von Tragschicht und Vorsatzschale ergibt sich der Erwartungswert für das bewertete Schalldämm-Maß in Höhe von  $R_w = 42$  dB. (Abb. A74 im Appendix) Dieser Wert, der als mindestens erreichbarer Wert anzusehen ist, liegt als Folge der angestrebten dünnen und leichten Konstruktion um 3 dB niedriger als für das Funktionsmodell I, und dies bei absehbar höherem konstruktivem Aufwand infolge der Trennung der Schalen.

Aus schalltechnischer Sicht besteht im Rahmen der Lösungsstrategie II die Aufgabe, die Potentiale einer zweischaligen Konstruktion gegenüber Lösungsstrategie I herauszustellen und den Weg zu einem leistungsfähigeren schalltechnischen Aufbau für ein späteres Funktionsmodell II aufzuzeigen.

Bei der Analyse der Verbesserungspotentiale durch eine Vorsatzschale sind zwei Fallkonstellationen zu unterscheiden, Vorsatzschale als:

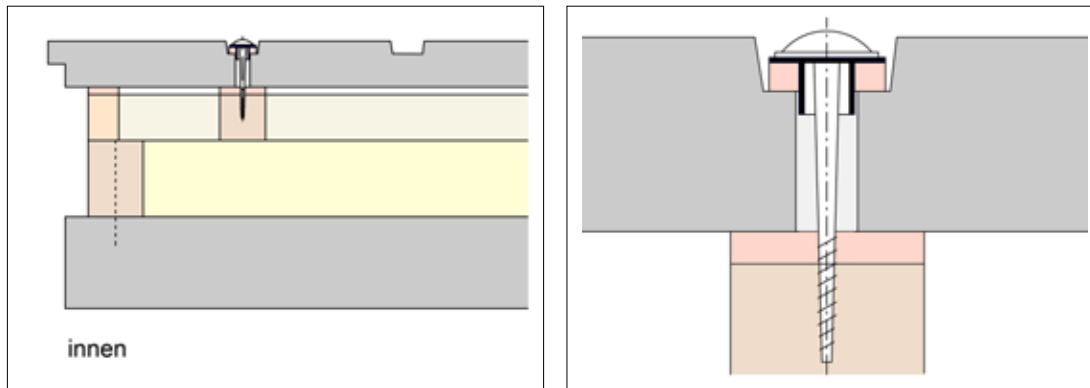
- schalltechnisch biegesteife Platte
- schalltechnisch biegeweiche Platte.

Diese Unterscheidung führt zu einer relevanten Differenz in der schalltechnischen Leistungsfähigkeit.

#### Abschätzung des erreichbaren bewerteten Schalldämm-Maßes $R_w$ mit schalltechnisch biegesteifer Platte als Vorsatzschale

Für die schalltechnische Bewertung steht kein detailliertes Berechnungsverfahren zur Verfügung. Es ist deshalb im Rahmen des Vorhabens zweckmäßig, sich an den Erfahrungen mit bewährten Baukonstruktionen zu orientieren, in diesem Fall an der insbesondere in Norddeutschland verbreiteten Bauweise zweischaliger Außenwände nach DIN 1053-1 mit Luftschicht.<sup>69</sup>

69 Der Fachverband der Ziegelindustrie Nord e.V. beschreibt die Konstruktion: „Die zweischalige Außenwand besteht aus einer tragenden Innenschale, Hohl-schicht und nichttragenden Außenschale (Verblendschale). Die beiden Wandschalen sind durch bauaufsichtlich zugelassene Ankersysteme miteinander verbunden. ... Bei der



II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

Abb. 61 Lösungsstrategie II; Körperschallentkopplung der Vorsatzschale (schematisch); Grundlage Funktionsmuster fm.II.a (MoPa; OHM-AR / Peter Bonfig)

Lösungsstrategie IIa führt zu einer Konstruktion mit prinzipiell vergleichbarem Aufbau, allerdings mit deutlich geringeren flächenbezogenen Massen der Schalen gegenüber der Ziegelbauweise. Fasold und Veres beschreiben in diesem Zusammenhang bei zweischaligen Wänden aus sehr leichten biegeweichen Schalen eine unbefriedigende Schalldämmung, insbesondere bei zwei gleichen Schalen und empfehlen die Wahl verschiedener Schichtdicken oder Materialien („Verstimmung“) als wirkungsvolle Maßnahme, um diesen Einfluss abzumindern.<sup>70</sup> Das Verhältnis der flächenbezogenen Massen von Tragschale (110 kg/m<sup>2</sup>) zu Vorsatzschale (42 kg/m<sup>2</sup>) bei Lösungsstrategie IIa führt zu einer nennenswerten „Verstimmung“ um den Faktor 2,6 : 1, weshalb im Vorhaben die Annahme getroffen wird, dass die von Fasold und Veres beschriebenen Effekte die angestrebte Erhöhung der Schalldämmung möglichst um 8 dB nicht infrage stellen. Es liegt in der Natur der Sache, dass diesbezüglich bei Abschluss des Vorhabens eine nicht exakt quantifizierbare Unsicherheit verbleibt. Unabhängig davon führt eine Prüfung weiterer bauakustischer Kriterien zu folgendem Bild:

- Resonanzfrequenz  
Als Grundregel gilt, dass die Resonanzfrequenz des zweischaligen Wandaufbaus als Mindestanforderung  $f_0 = 100$  Hz nicht überschreiten soll. Mit den Werten für Lösungsstrategie IIa errechnet sich nach Kapitel 1.2.4  $f_0 = 56$  Hz und damit ausreichend niedrig.
- Verbindungen zwischen den Schalen  
Bei zweischaligen Außenwänden nach DIN 1053-1 dienen die Verbindungsmittel lediglich der Abtragung von Windlasten und erfolgen durch einfache Drahtanker, ca. 5 Stk./m<sup>2</sup>, mit 3 – 4 mm Dicke, deren Körperschallweiterleitung als gering zu bewerten ist. So wird der positive Effekt der Zweischaligkeit für die Schalldämmung nicht wesentlich geschmälert. Im Rahmen der Lösungsstrategie IIa muss eine Lösung gefunden werden, die Vorsatzschale körperschallentkoppelt mit der Tragschicht zu verbinden. Eine denkbare Lösung besteht aus einer elastischen Schicht zwischen den Holzriegeln und der Vorsatzschale. Die Senkkopfschrauben werden durch Kopfschrauben ersetzt, die gegen elastisch hinterlegte Beilagscheiben arbeiten. Die Schrauben werden mit einer körperschallisolierenden Hülse durch die Vorsatzschale geführt, mit Drehmomentschlüssel definiert angezogen und das Elastomerlager so ausgelastet, dass eine möglichst niedrige Lagereigenfrequenz resultiert. (Abb. 61)
- Schalenabstand 40 mm  
40 mm (Lösungsstrategie II - Variante II.c.1) (Abb. 31, rechte Spalte, Zeile 1)
- An Außenwand anschließende Trennwände größer als 50 % der flächenbezogenen Masse der inneren Schale der Außenwand  
50 % der flächenbezogenen Masse der inneren Schale der Außenwand entsprechen  $m' = 55$  kg/m<sup>2</sup>. Bereits leichte Innenwände in Massivbauweise (Ziegel d = 115 mm, RD 1.0) erreichen 100 % der flächenbezogenen Masse der inneren Schale der Außenwand.

Zusammenfassend sind die formalen Voraussetzungen gegeben, mit Lösungsstrategie IIa einen Erwartungswert des bewerteten Schalldämm-Maßes von  $R_w = 42 + 8 = 50$  dB zu erreichen, somit am Bau unter Berücksichtigung der Größe der Fassadenelemente (- 3 dB)

Ausführung ohne Wärmedämmung in der Hohlchicht muss der Schalenabstand mindestens 4 cm betragen. ... Bei zweischaligen Außenwänden nach DIN 1053-1 mit oder ohne Luftschicht darf das bewertete Schalldämm-Maß ... aus der Summe der flächenbezogenen Massen beider Schalen, wie bei einschaligem Mauerwerk mit biegesteifen Wänden, ermittelt werden. Der so ermittelte Wert darf um 5 dB erhöht werden, da die Luftschicht bzw. die Dämmschicht zwischen den Schalen einen zusätzlichen Schallschutz ergibt. Der Zuschlagwert darf sogar 8 dB betragen, wenn die flächenbezogene Masse der auf die Innenschale der Außenwand anschließender Trennwände größer als 50 % der flächenbezogenen Masse der inneren Schale der Außenwand ist.“  
<https://www.ziegelindustrie.de>

Material VSS	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Plattendicke [mm]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	GF [Hz]
LB** C12/15	1.400	30	17.200	<b>608</b>
Holzleichtbeton	900	250	1.400	<b>1.710</b>

II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

Tab. 6 Materialdaten von üblichem Leichtbeton und Holzleichtbeton als Material für Vorsatzschale (VSS) und daraus folgend jeweils Kennwerte der Grenzfrequenz (MoPa)

- \* E-Modul (Elastizitätsmodul)
- \*\* GF (Grenzfrequenz)
- \*\*\* LB (Leichtbeton)
- Biegesteif**
- Biegeweich**

und der Unsicherheit (- 2 dB):

$R_w = 45 \text{ dB}$ .

Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei einer neu entworfenen Konstruktion, wie sie das aus Lösungsstrategie IIa abzuleitende spätere Funktionsmodell IIa darstellt, unerwartete schalltechnische Effekte zu Tage treten können, mit der Folge von mehr oder weniger hohen, ggf. negativen Abweichungen vom Erwartungswert. Weitergehende Untersuchungen zu den schalltechnischen Auswirkungen von Fugen oder Stößen zwischen den Vorsatzschalenelementen sind zu prüfen. Das ggf. erforderliche Schließen der Fugen und/oder Stöße stellt eine weitere konstruktive und ggf. auch feuchteschutz-technische Aufgabe dar. Daraus können zusätzliche Unwägbarkeiten resultieren.

Abschätzung des erreichbaren bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w$  mit einer schalltechnisch biegeweichen Platte als Vorsatzschale

Ausgangspunkt der bauakustischen Vorbemessung für ein späteres Funktionsmodell IIb ist die bauakustische Bewertung der inneren Tragschicht, die u. a. aufgrund der Dicke der Leichtbetonschicht von 60 mm als schalltechnisch biegesteif einzustufen ist.

Für die innere Schicht resultiert ein Erwartungswert für das bewertete Schalldämm-Maß von  $R_w = 39 \text{ dB}$ , (Abb. A75 im Appendix) wobei Korrekturen zur Berücksichtigung der geplanten Elementgrößen und von Unsicherheiten beim späteren Einsatz am Bau noch nicht eingeflossen sind.

Das akustische Verhalten der Vorsatzschale (biegesteif / biegeweich) steht gemäß der Gleichung für die Grenzfrequenz (S. 41 im Appendix) in Abhängigkeit von der Plattendicke  $d$ , der Materialdichte  $\rho$  und deren Elastizitätsmodul  $E$ .

Daraus folgen jeweils die in Tabelle 2 enthaltenen Kennwerte der Grenzfrequenz

Im Vorhaben haben die Arbeiten von Meier Betonwerke gezeigt, dass eine Dicke von 30 mm eine herstellungstechnisch zweckmäßige minimale Schichtdicke für die Außenschale darstellt. Die eingesetzte Beton-Rezeptur führt zu einer Dichte des Vorsatzschalenmaterials von  $1.400 \text{ kg/m}^3$ .

Während üblicher Leichtbeton zu einem eindeutig biegesteifen Verhalten führt, zeigt sich für Holzleichtbeton, vorbehaltlich einer noch durchzuführenden erfolgreichen technologischen Weiterentwicklung des Produkts, die Option für ein positiv einzuordnendes bauakustisches Verhalten.

Es wird deutlich, dass eine Optimierung der Vorsatzschale als biegeweiches Bauteil interessante Potentiale haben kann, wenn die denkbare Verbesserung der Schalldämmung nach DIN 4109-34, Tabelle 1 für eine biegeweiche Vorsatzschale betrachtet wird:

Die Resonanzfrequenz beträgt Im Falle des in der Tabelle beschriebenen Holzleichtbetons  $f_0 = 71 \text{ Hz}$ . Mit dem bewerteten Schalldämm-Maß  $R_w = 39 \text{ dB}$  nach Abb. 44 ergibt sich  $\Delta R_w = 74,4 - 20 \lg 71 - 0,5 \cdot 39 = + 17,9 \text{ dB}$ .

Davon ausgehend könnte im Rahmen der Lösungsstrategie IIb somit ein Erwartungswert des bewerteten Schalldämm-Maßes von  $R_w = 39 + 18 = 57 \text{ dB}$  abgeleitet werden. Somit am Bau unter Berücksichtigung der Größe der Fassadenelemente (- 3 dB) und der Unsicherheit (- 2 dB):

$R_w = 52 \text{ dB}$ .

Ferner werden die Vorsatzschalen durch Körperschallmessungen im Labor genauer analysiert und Kennwerte für eine aus bauakustischer Sicht zweckmäßige Weiterentwicklung der Betonrezeptur und der Konstruktion abgeleitet. Für eine solche Optimierung kann ein vergleichbarer Erwartungswert des bewerteten Schalldämm-Maßes als Ziel formuliert werden.

Die Befestigung der Vorsatzschale bei Lösungsstrategie IIb könnte grundsätzlich körperschallentkoppelt erfolgen. (Abb. 61) Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei einer neu entworfenen Konstruktion, wie sie das aus Lösungsstrategie IIb abzuleitende spätere Funktionsmodell IIb darstellt, unerwartete schalltechnische Effekte zu Tage treten können, mit der Folge von mehr oder weniger hohen, ggf. negativen Abweichungen vom Erwartungswert. Weitergehende Untersuchungen zu den schalltechnischen Auswirkungen von Fugen oder Stößen zwischen den Vorsatzschalenelementen sind zu prüfen. Das ggf. erforderliche Schließen der Fugen und/oder Stöße stellt eine weitere konstruktive und feuchteschutztechnische Aufgabe dar. Daraus können zusätzliche Unwägbarkeiten resultieren.

II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

### 3.2.5 Flankenschalldämmung<sup>71</sup>

Neben der Schalldämmung gegen Außenlärm muss eine Fassade insbesondere im Wohnungsbau auch eine ausreichende Flankenschalldämmung erreichen. Aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens können hierzu die im Folgenden dargestellten systematischen Erkenntnisse abgeleitet werden. Im Rahmen einer Weiterführung des Vorhabens sind daraus technische Umsetzungen im Detail aufzubauen und deren Wirksamkeit messtechnisch zu überprüfen.

Entsprechend der Direktschalldämmung im Durchgang steigt auch die Flankenschalldämmung mit der flächenbezogenen Masse einer Konstruktion an. Bei den folgenden Betrachtungen wird für Lösungsstrategie I das beschriebene schalltechnisch einschalige Verhalten angenommen und der Betrachtung zur Flankenschalldämmung die gesamte flächenbezogene Masse des Elements  $m' = 192 \text{ kg/m}^2$  zugrundegelegt. Im Falle der Lösungsstrategie II wird für die Flankenschalldämmung nur die innere Tragschicht wirksam. Auch hier wird deren gesamte flächenbezogene Masse  $m' = 110 \text{ kg/m}^2$  angesetzt.

Im Bereich der Geschossdecken (vertikal) bestehen günstigere Voraussetzungen für eine bauakustisch wirksame Segmentierung der Fassade, während in horizontaler Richtung von einem vergleichsweise schmalen Elementstoß auszugehen ist. Nachfolgend wird der kritischere Fall der Schalldämmung von Wohnungstrennwänden behandelt, unter Berücksichtigung der Flankenschallübertragung der Fassaden in horizontaler Richtung.<sup>72</sup>

#### Lösungsstrategie I

Betrachtet man bauakustische Verhältnisse für unterschiedliche bauliche Ausführungen der Trennwand (massiv / Leichtbau) und des Fassadenanschlusses (starr verbunden / entkoppelt) wird die Relevanz der Stoßstellendämmung deutlich.

- Bei Wegfall der Stoßstellendämmung wird der Mindestschallschutz DIN 4109-1 verfehlt (Tab. A33, im Appendix; Vergleich Zeile 2 mit Zeile 1).
- Mit einer bewerteten Verbesserung des Flankenschalldämmung um  $\geq 13 \text{ dB}$  kann der Entfall der Stoßstellendämmung kompensiert werden (Tab. A33, im Appendix; Zeile 3). Dies könnte durch eine optimierte Fügung mit elastischen Dichtbändern grundsätzlich erreicht werden.
- Mit einer bewerteten Verbesserung des Flankenschalldämm-Maßes um  $\geq 13 \text{ dB}$  kann der Entfall der Stoßstellendämmung auch in Verbindung mit Trockenbau-Trennwänden kompensiert werden. (Tab. A33, im Appendix; Zeile 4) Dies könnte durch eine optimierte Fügung mit elastischen Dichtbändern grundsätzlich erreicht werden.

Es wird deutlich, dass ein Einsatz der Fassadenelemente Lösungsstrategie I im Wohnungsbau denkbar ist, insbesondere im neuen Gebäudetyp E. Der Einsatz im Bereich des erhöhten Schallschutzes lässt dagegen erheblichen Aufwand erwarten.

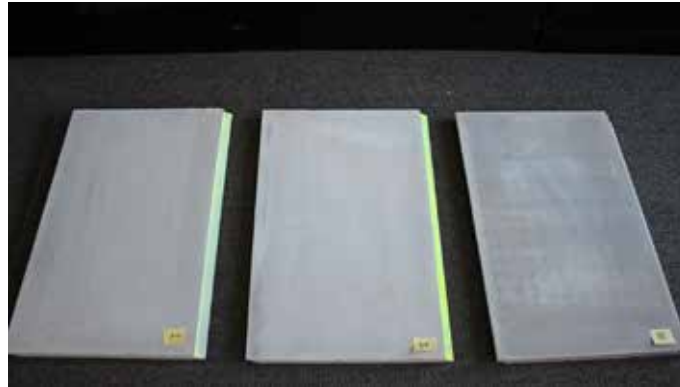
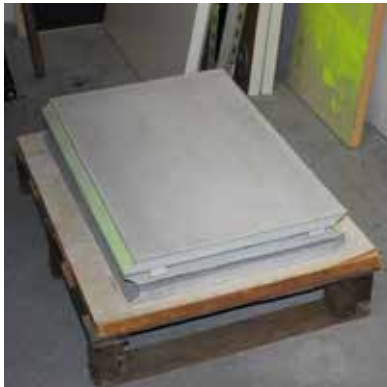
#### Lösungsstrategie II

Der Einfluss der leichteren Tragschicht verdeutlicht, dass die Stoßstellendämmung nicht mehr ausreicht, um die geringere Flankenschalldämmung im Hinblick auf den Mindestschallschutz DIN 4109-1 zu kompensieren. (Tab. A34, im Appendix; Zeile 1)

Dementsprechend ist bei Wegfall der Stoßstellendämmung eine gegenüber Lösungsstrategie I um 6 dB höhere erforderlichen bewertete Verbesserung der Flankenschalldämmung um 19 dB anzunehmen, wenn der Mindestschallschutz DIN 4109-1 erreicht werden soll (Tab. A34, im Appendix; Zeile 3). Mit einer bewerteten Verbesserung des Flankenschalldämmung um  $\geq 19 \text{ dB}$  kann der Entfall der Stoßstellendämmung auch in Verbindung mit Trockenbau-Trennwänden kompensiert werden (Tab. A34, im Appendix; Zeile 4). Dies könnte jeweils durch eine optimierte Fügung mit elastischen Dichtbändern grundsätzlich erreicht werden. Der Aufwand für die Konzeption und Verifizierung kann gegenüber Lösungsstrategie I relevant höher sein.

<sup>71</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A3.2.5, S. 46

<sup>72</sup> Die folgenden bauakustischen Berechnungen erfolgten nach DIN 4109-2 und DIN 4109-32 mit der allgemein zugänglichen und weit verbreiteten Software KS-Schallschutzrechner, 2021



II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

Abb. 62 Anlieferung der drei Bekleidungsplatten für Vorsatzschale (VSS) (links); im weiteren bezeichnet als FM II.b\_VSS.1, FM II.b\_VSS.2, FM II.b\_VSS.3 (Funktionsmuster Lösungsstrategie II.b, Meier Betonwerke GmbH) (rechts) (beide MoPa)

Prüfkörper	Masse [kg]	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	EF (FEM) [Hz]
FMII.b_VSS.1	11,6	1.260	≈ 3.600	62,5
FMII.b_VSS.2	12,3	1.330	≈ 4.600	68,8
FMII.b_VSS.3	14,3	1.550	≈ 6.300	75,0

Tab. 7 Kennwerte der untersuchten Funktionsmuster FMII.b\_VSS, Abmessungen 700 mm x 440 mm x 30 mm (MoPa)

Es wird deutlich, dass ein Einsatz der Fassadenelemente Lösungsstrategie II im Wohnungsbau denkbar ist, insbesondere im neuen Gebäudetyp E. Der Entwicklungsaufwand dürfte gegenüber Lösungsstrategie I höher einzuschätzen sein. Eine Eignung für den Einsatz im Bereich des erhöhten Schallschutzes kann an Grenzen stoßen.

### 3.2.6 Untersuchungen für biegeweiche Vorsatzschale Lösungsstrategie II

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird kein vollständiges Funktionsmodell II hergestellt, jedoch drei Funktionsmuster der späteren, zielmäßig biegeweichen Vorsatzschale (FMII.b\_VSS) in den Abmessungen 700 mm x 440 mm x 30 mm. (Abb. 62) Die Untersuchungen erfolgen mit dem Ziel, Ansatzpunkte für eine Aktivierung der Verbesserungspotentiale zu gewinnen. Von Interesse ist insbesondere, welche elastodynamische Eigenschaften FMII.b\_VSS im Vergleich zu einer gedanklich entworfenen Vorsatzschale aus Holzleichtbeton und einer Platte aus üblichem Leichtbeton aufweist.<sup>73</sup>

#### Masse und Dichte der untersuchten Funktionsmuster FMII.b\_VSS

Der Mittelwert der Dichte beträgt 1.380 kg/m<sup>3</sup> in etwa dem Planungswert 1.400 kg/m<sup>3</sup> entsprechend, wobei der Höchstwert den untersten Wert um 290 kg/m<sup>3</sup> (+23 %) übersteigt. Hier wird der Labormaßstab bei der Herstellung der Muster erkennbar, mit einer gegenüber einer Serienproduktion geringeren Wiederholgenauigkeit der Produkteigenschaften. (Tab. 7)

#### Versuchsaufbau

Die Vorgehensweise baut teilweise auf den Arbeiten von Waldemar Mayenhölder<sup>74</sup> auf, der über viele Jahre zu den Möglichkeiten geforscht hat, die elastodynamischen Kennwerte von Bauprodukten und Bauelementen auf der Grundlage von Körperschallmessungen und Simulationsrechnungen bauakustisch zu charakterisieren.<sup>75, 76</sup> Im Vorhaben hat sich die Messung der Platteneigenfrequenzen aus deren Ausschwingverhalten gegenüber den von Maysenhölder Anfang der 1990er-Jahre favorisierten Messungen der mittleren Admittanzen als besser durchführbar herausgestellt. Insbesondere ist die Anregung der Grundschwingungen bei den Messungen des Ausschwingverhaltens leicht und mit hoher Wiederholgenauigkeit möglich.

Um für eine anschließende FEM-gestützte Modalanalyse gut definierte Randbedingungen

<sup>73</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A3.2.6, S. 46ff

<sup>74</sup> Fraunhoferinstitut für Bauphysik IBP in Stuttgart

<sup>75</sup> Maysenhölder, 1993

<sup>76</sup> Maysenhölder, 2008



Abb. 63 Untersuchungen für biegeweiche Vorsatzschale Lösungsstrategie II – Prüfung der waagrechten Plattenlage (MoPa)



Abb. 64 Untersuchungen für biegeweiche Vorsatzschale Lösungsstrategie II – Messaufbau, Impulsanregung (MoPa)

II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

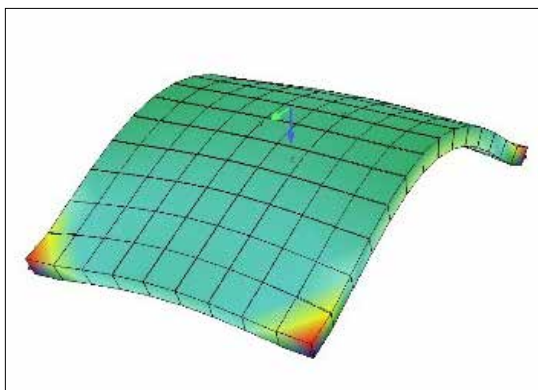


Abb. 65 Berechnete Eigenform der ersten Biege-eigenfrequenz des FE-Modells; Schwingungsformen in graphisch aufbereiteter Form für FMII.b\_VSS.1 – 3 (MoPa)

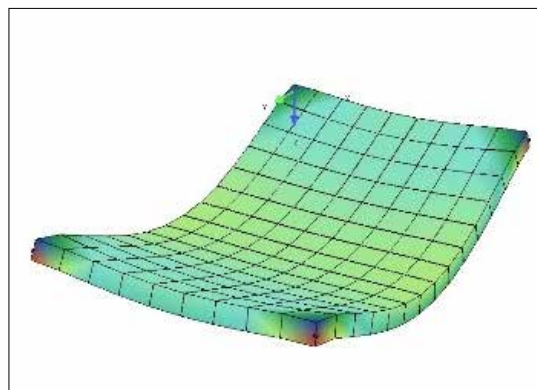


Abb. 66 Berechnete Eigenform der ersten Biege-eigenfrequenz des FE-Modells; Schwingungsformen in graphisch aufbereiteter Form für FMII.b\_VSS.1 – 3 (MoPa)

zu erhalten, wurden die Platten starr an den Ecken aufgestützt, ähnlich der Randbedingung einer Lagerung auf den Stützfüßchen für die Doppelbodenplatten.<sup>77</sup> Die von Mayenhölder beschriebenen Einschränkungen bei der Herstellung einer gleichmäßigen Belastung der vier Stützen konnten überwunden werden, da gut höhenjustierbare Stützfüßchen konzipiert wurden, die eine gleichmäßige Belastung in einfacher Weise ermöglichten und ein „Wackeln“ der Platten mit der Folge von Messunsicherheiten vermieden. Die endgültigen Versuche wurden in einem Untergeschoßraum durchgeführt. Die Aufstellung der Prüfobjekte auf der Bodenplatte aus Stahlbeton ohne darunterliegende Dämmschichten schließen Rückwirkungen der Konstruktion unterhalb des Versuchsaufbaus auf die Ergebnisse aufgrund der hohen Körperschallimpedanz bei gleichzeitig geringen Schwingungsamplituden praktisch aus. (Abb. 63 + 64)

#### Modalanalyse mit FEM-Simulationen für die Bestimmung der elastodynamischen Kennwerte

Mithilfe der FEM-Software SOFiStiK wurden Simulationsmodelle erstellt, deren Materialparameter iterativ variiert wurden, bis das resultierende Schwingungsverhalten der Simulationsmodelle, insbesondere die ersten Biege-eigenfrequenz denjenigen entsprach, die aus der Messung des Abklingverhaltens ermittelt worden waren.<sup>78</sup>

Die Platten wurden entsprechend ihrer Abmessungen in dem FE-Modell als in den Eckpunkten eingespannte Schalenelemente modelliert, das Materialverhalten wurde vereinfacht als linear-elastisch angenommen.

<sup>77</sup> Mayenhölder, 1993

<sup>78</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A3.2.6, S. 47ff.

Material VSS*	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Plattendicke [mm]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	GF [Hz]
LB** C12/15	1.400	30	17.200	<b>608</b>
Holzleichtbeton	900	250	1.400	<b>1.710</b>
FMII.b_VSS.1	1.260	300	≈ 3.600	<b>1.262</b>
FMII.b_VSS.2	1.330	300	≈ 4.600	<b>1.147</b>
FMII.b_VSS.3	1.550	300	≈ 6.300	<b>1.058</b>
<b>WE* FMII.b_VSS</b>	<b>1.400</b>	<b>250</b>	<b>3600</b>	<b>1.596</b>

II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

Tab. 8 Materialdaten von üblichen Leichtbeton und Holzleichtbeton als Material für Vorsatzschale (VSS) (MoPa)

\* E-Modul (Elastizitätsmodul)

\*\* GF (Grenzfrequenz)

\*\*\* LB (Leichtbeton)

**Biegesteif**

**Biegeweich**

Zur Bestimmung der Platteneigenfrequenzen sind Modalanalysen (Lanczos Verfahren) durchgeführt worden. Die berechneten Eigenformen der ersten Biegeeigenfrequenz des FE-Modells bilden sich deutlich aus, erwartungsgemäß mit der stärksten Auslenkung in Plattenmitte. (Abb. 65 + 66)

Die FEM-Simulationen führten zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls E. Zur besseren Vergleichbarkeit der Unterschiede im Schwingungsverhalten zwischen den drei Funktionsmustern wurde jeweils eine Querdehnzahl von  $\nu = 0,2$  in Ansatz gebracht. Die Plattenmassen wurden entsprechend den tatsächlichen Massewerten berücksichtigt. (Tab. 8)

#### Einordnung der ermittelten Kennwerte

Die im Vorhaben ermittelten Kennwerte der Funktionsmuster erlauben beispielsweise gegenüber üblichem Leichtbeton eine deutliche Annäherung an die mit  $f_{gr} \geq \text{ca. } 1.600 \text{ Hz}$  anzunehmenden Grenze zu einem biegeweichen Verhalten.

Als Zieldefinitionen für ein Anschlussvorhaben können für eine schalltechnisch gut wirksame Vorsatzschale im Rahmen der Lösungsstrategie II folgende Kennwerte formuliert werden:

- Erhöhung Materialdichte auf  $1.400 \text{ kg/m}^3$
- Reduzierung der Plattendicke auf  $25 \text{ mm}$
- Elastizitätsmodul  $E = 3.600 \text{ N/mm}^2$  (FMII.b\_VSS.1)

### 3.3 Bestimmung des U-Werts (Wärmedurchgangskoeffizient)

Für eine erste Abschätzung des U-Werts für das Funktionsmodell I (fm.I.a) werden für die beiden Leichtbeton-Rezepturen<sup>79</sup> Wärmeleitfähigkeitswerte nach DIN 4108-4 angesetzt:

- Außenschicht (Vorsatzschicht / Fassade): 0,79 W/mK;
- Innenschicht (Tragschicht): 1,15 W/mK.

Der U-Wert für das Bauteil ergibt sich folglich nach DIN EN ISO 6946 unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeitswerte für die eingesetzten Dämmstoffe (Seite 43) zu 0,207 W/m<sup>2</sup>K.

Im Dezember 2024 wird beim Center for Applied Energy Research e.V. (CAE) in Würzburg eine Bestimmung des U-Werts anhand des Funktionsmodells I (fm.I.a) durchgeführt. Nach der Zusammenstellung der Materialdicken der Bauteilschichten mit den verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten ergibt eine rechnerische Abschätzung des zu erwartenden U-Werts für den Aufbau einen Wert von 0,137 W/m<sup>2</sup>K.<sup>80</sup>

Die thermophysikalischen Messungen erfolgen an der CAE eigenen "Hotbox".<sup>81</sup> (Abb. 67 + 68) Dabei wird ein Probekörper (das Funktionsmodell) in eine Rahmenöffnung zwischen zwei Räumen mit unterschiedlichen Temperaturen eingebaut. Im stationären Fall fließt ein konstanter Wärmestrom von der warmen Seite durch den Probekörper auf die kalte Seite. Durch dessen Vermessung bei verschiedenen Temperaturgradienten und konstanter Mitteltemperatur können laterale Wärmeströme im Prüfkörper und Konvektionseffekte berücksichtigt werden.<sup>82</sup>

Die Messergebnisse zeigen dann, dass die durch den Probekörper fließende Leistung überraschenderweise fast doppelt so hoch ist wie bei der Kalibrationsprobe. Dementsprechend liegt auch der U-Wert für das Funktionsmodell I im Passepartout fast doppelt so hoch, etwa bei 0,28 W/m<sup>2</sup>K. Der errechnete U-Wert ohne Passepartout beträgt 0,46 W/m<sup>2</sup>K. Ein für das avisierte Leistungsprofil des Fassadenelements viel zu hoher Wert.

Daraufhin erfolgt zu Jahresbeginn 2025 die Erarbeitung verschiedener Erklärungs- und Lösungsansätze. Zunächst wird nach Neuberechnung der Wärmeleitfähigkeit des VIPs, anstelle des Bemessungswerts (0,007 W/mK) wird ein belüftetes VIP (0,020 W/mK) angesetzt, vermutet, dass der hohe U-Wert auf Beschädigungen des VIPs hinweisen könnte.<sup>83</sup>

Nach Studium des Herstellungsprozesses und der eingesetzten CFK-Bewehrung rückten die CFK-Formteile als Randbewehrung in den Fokus, die die beiden Leichtbetondeckschichten sowohl statisch als auch thermisch verbinden. Zur Überprüfung „wurden dreidimensionale thermische Simulationen mit der Software HEAT3 6.1 durchgeführt“. Dabei sind die Bewehrungsmatten in den Deckschichten (Tragschicht zweilagig/ Randlage und Vorsatzschicht einlagig/Mittellage) nicht berücksichtigt worden, „da deren Einfluss als geringer zu erachten ist.“<sup>84</sup>

Die CFK-Formteile bestehen aus dem Produkt solidian GRID Q85-CCE-21<sup>85</sup> mit einer Querschnittsfläche je Faser von 4,4 mm<sup>2</sup>. Allerdings fehlen Angaben über deren Wärmeleitfähigkeit. Daher werden die Werte eines Bewehrungsstabs aus carbonfaserverstärktem Kunststoff<sup>86</sup> zugrunde gelegt und „mit einer Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung von 15 W/mK gerechnet“. Als Querschnittsfläche ist „je 60 cm mit 2 x 21 Fasern angenommen“ worden. Zur Vereinfachung liegen die diagonal verlaufenden Fasern im Simulationsmodell senkrecht zur Bauteiloberfläche. (Abb. 69)

Die Simulationsergebnisse zeigen deutlich den Einfluss der Randbewehrung aus CFK-Formteilen, die aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Carbon längs zur Faser, die deutliche Erhöhung der U-Wertes verursachen. Aufbau (im PUR-Passepartout):<sup>87</sup> (Abb. 70)

- ohne Bewehrung = 0,196 W/m<sup>2</sup>K
- mit Bewehrung = 0,284 W/m<sup>2</sup>K

Ein Effekt, der in den vorangegangenen Abstimmungsgesprächen so nicht absehbar war. In der Baupraxis muss auch noch die relativ hohe Querleitfähigkeit des Leichtbetons, einschließlich der Flächenbewehrung berücksichtigt werden.

Um den Wärmedurchgangskoeffizient deutlich zu verringern, werden verschiedene Szenarien vorgeschlagen und diskutiert:

- Reduzierung der Formteile; anstelle einer umlaufenden nur mehr punktuelle Anordnung

79 Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge unter Verwendung von Zuschlägen mit porigem Gefüge.

80 Vgl. Manara/Stark, 09.01.2025, S. 6

81 Vgl. Appendix, Kapitel A3.3, S. 51

82 Vgl. Manara/Stark, 09.01.2025, S. 7

83 Vgl. Manara/Stark, 09.01.2025, S. 10

84 Vgl. Manara/Stark, 09.01.2025, S. 12

85 solidian GRID Q85-CCE-21, 08.07.2024

86 solidian REBAR, 08.08.2022

87 Vgl. Manara/Stark, 09.01.2025, S. 13f.



Bei der Wärmeleitung quer zur Faser beträgt die Differenz zwischen Glas- (GFK 0,77 W/mK) und Carbonfasergewebe (CFK 1,09 W/mK) etwa 40 %. Betrachtet man bei beiden Materialien die Wärmeleitung längs zur Faser GFK (0,85 W/mK) und CFK (8,76 W/mK) erhöht sich der Unterschied auf mehr als das zehnfache. Es wird auch deutlich, dass beim CFK die Wärmeleitung längs um Faktor acht höher ist als quer zur Faser; beim GFK beträgt der Unterschied nur 10 %.

In der Fachliteratur<sup>89</sup> werden bei der Wärmeleitung in Faserlängsrichtung von CFK deutlich höhere Werte angenommen, sodass eine Wärmeleitfähigkeit von 15 W/mK realistisch erscheint.<sup>90</sup>

In weiteren Schritten wird die Materialstärke des VIP erhöht und als Bewehrung Gewebe und Formteile aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) in einem modifizierten Funktionsmodell fm.I.d (Abb. A56 im Appendix) eingesetzt.

Gegenüber dem ersten Funktionsmodell ist die Tragschicht von 80 mm auf 70 mm reduziert worden und die Materialstärke des VIPs wird von 20 mm auf 30 mm erhöht. Der Gesamtaufbau bleibt bei 170 mm. Die GFK-Formteile der Randbewehrung sind jeweils mit 10 mm Streifen aus Aero A2 Board eingefasst, wie auch die VIPs von einem 10 mm Streifen desselben Produkts getrennt angeordnet sind. Bei diesem Material ist ebenfalls die Faserrichtung zu beachten. Die GFK-Formteile (Länge 200 mm) sind nur mehr jeweils an den Ecken des Funktionsmodells angeordnet und in Mitte der Längsseiten.

Bei den Messungen, Versuchsbau wie oben beschrieben, (Abb. A92 + A93 im Appendix) zeigen sich zu Beginn neue Herausforderungen, denn nach 7 Tagen wurde „bei der ersten Temperaturdifferenz ... festgestellt, dass das Ergebnis stark driftete. Daher wurde über mehrere Tage der U-Wert bei dieser Temperaturdifferenz bestimmt.“<sup>91</sup> Messungen mit einem Feuchtesensors ergaben „auf der warmen Seite (28 °C) eine hohe Luftfeuchtigkeit“, die jedoch kontinuierlich abnahm. Die „hohe Restfeuchte“ in den Leichtbetondeckschichten resultierte aus dem noch relativ ‚frischen‘ Funktionsmodell. (Abb. A94 + A95 im Appendix) Im Gegensatz zu den Messungen im Dezember 2024 lagen diesmal nur wenige Wochen zwischen Fertigung und Versuchsaufbau.

Zunächst will man eine erhöhte Temperierung (30 °C), die den Trocknungsprozess beschleunigt, möglichst vermeiden. Aufgrund anhaltender und nicht abgeschlossener Feuchteänderungen über einen Zeitraum von zweieinhalb Wochen, wird das eingebaute Funktionsmodell schließlich „auf beiden Seiten für mehrere Tage bei 29 °C getrocknet“.<sup>92</sup> Danach kann die U-Wert-Messung durchgeführt werden.

Unter Berücksichtigung der Passepartoutfläche und des linearen Wärmebrückenverlustkoeffizienten zwischen Funktionsmodell und Passepartout lässt sich ein U-Wert errechnen. Ausgehend von einem gemessenen U-Wert von 0,19 W/m<sup>2</sup>K ergeben sich folgende Werte:<sup>93</sup>

- im Passepartout = 0,19 W/m<sup>2</sup>K
- ohne Passepartout = 0,23 ± 0,02 W/m<sup>2</sup>K

Mit diesem Wert wird die Zielsetzung im Projekt, schlankes Fassadenbauteil (180 mm) bei gutem Wärmeschutz (0,20 W/m<sup>2</sup>K) mit reduziertem Aufbau beim Funktionsmodell (170 mm) (annähernd) erfüllt.

II. Eingehende  
Darstellung  
Funktionsmodelle  
+ Leistungsprofil

89 Vgl. Barbero, 3/2017

90 Vgl. auch solidian REBAR, 08.08.2022

91 Vgl. Manara/Stark, 29.07.2025, S. 9

92 Vgl. Manara/Stark, 29.07.2025, S. 10

93 Vgl. Manara/Stark, 29.07.2025, S. 11

### 3.4 Prüfungen zum Brandverhalten

#### 3.4.1 Heizwertermittlung

In einem ersten Schritt werden die im Fassaden-Sandwichelement (Funktionsmodell I) eingesetzten Materialien zur Unterscheidung im baulichen Brandschutz zwischen brennbar und nicht-brennbar untersucht. Dabei wird nach DIN EN ISO 1716 als Grundlage für einen Klassifizierungsbericht die maximal theoretische Wärmefreisetzung (Brutto-Verbrennungswärme) ermittelt.

Als Materialkennwerte lagen die Flächengewichte der eingesetzten Bauteile vor (von innen nach außen):<sup>94</sup>

- Tragschicht Leichtbeton 1800 kg/m<sup>3</sup>: 144 kg/m<sup>2</sup>
- Kern Optim R: 4,4 kg/m<sup>2</sup>
- Vlies Optim R: 0,1204 kg/m<sup>2</sup>
- Folie Optim R: 0,2824 kg/m<sup>2</sup>
- Kern Kooltherm: 0,7 kg/m<sup>2</sup>
- Vlies Kooltherm: keine Angaben
- Vorsatzschicht Leichtbeton 1400 kg/m<sup>3</sup>: 56 kg/m<sup>2</sup>

Nach einer Konditionierung bis zur Massenkonstanz (bei 23 °C und 50% relativer Feuchte) werden aus den bereitgestellten Materialmustern Probekörper entnommen. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Brutto-Verbrennungswärme  $Q_{PCS}$ .<sup>95</sup>

Bei der Einordnung der Ergebnisse wird unterschieden zwischen<sup>96</sup>

- (Inneren) Nicht-substantiellen Komponenten (Flächengewicht < 1,0 kg/m<sup>2</sup> und Dicke < 1,0 mm): maximaler  $Q_{PCSS}$ -Wert  $\leq 4,0$  MJ/m<sup>2</sup>
- (Äußeren) Substantiellen Komponenten: maximaler  $Q_{PCS}$ -Wert  $\leq 3,0$  MJ/kg

Die Bestimmung der  $Q_{PCS}$ -Werte in MJ/kg für das Fassaden-Sandwichelement zeigt Abweichungen beim Kern Kooltherm und bei dem eingesetzten CFK-Bewehrungsmaterial (Typ 1: Flächenbewehrung; Typ 2: L-förmige Randbewehrung).

Bei den  $Q_{PCSS}$ -Werten in MJ/m<sup>2</sup> werden diese für die Folie bei Optim R überschritten. (Tab. 1 + 2)

Für das Fassaden-Sandwichelement als Ganzes erfolgt eine vorläufige Einschätzung:

- $\Sigma$  Flächenmasse: 211,320 kg/m<sup>2</sup>
- $\Sigma$   $Q_{PCSS}$ : 94,8 MJ/m<sup>2</sup>
- $Q_{PCS}$ : 0,4 MJ/kg

Aufgrund fehlender Angaben für das gesamte Fassadenbauteil (Flächengewicht: Vlies Kooltherm) ist „keine exakte Kalkulation möglich“, aber die vorliegenden Werte des Klassifizierungsberichtes bestätigen vorliegende Einschätzungen. (Tab. 35 + 36 im Appendix)

Für das Produkt Kooltherm wird bei weiteren Funktionsmodellen als Kantenschutz Aero A2 Board<sup>97</sup> eingesetzt, dessen Brandverhalten (EN 13501-1) mit A2<sup>98</sup> bewertet ist.

Bauteile aus Leichtbeton mit Carbon-Bewehrungsgittern erfüllen in der Regel mindestens die Anforderung „normalentflammbar“<sup>99</sup>.

#### 3.4.2 Kleinbrenner-Prüfung

Im Anschluss an die Heizwertermittlung wird eine Kleinbrenner-Prüfung nach DIN EN ISO 11925-2:2020-07 im Rahmen von orientierenden Versuchen durchgeführt. Ziel ist eine Einstufung der im Fassaden-Sandwichelement (Funktionsmodell I) eingesetzten Materialien als schwerentflammbar (B1) oder normalentflammbar (B2). Dabei wird eine Flamme 15 Sekunden lang an eine 30 cm lange Materialprobe gehalten, um Entzündbarkeit, Flammenausbreitung und das Abtropfen brennender Stoffe zu bewerten.

Von der MFPA Leipzig werden folgende Kennwerte ermittelt:<sup>100</sup>

- Dicke des Prüfkörpers: (60,0 ± 0,1) mm

94 MFPA Leipzig, 7. Mai 2025, S. 2

95 Das Wasseräquivalent des verwendeten Kalorimeters betrug 8,058 bzw. 8,050 kJ/K.

96 MFPA Leipzig, 7. Mai 2025, S. 3

97 AGITEC GmbH, Stuttgart

98 AGITEC, 23.04.2024

99 solidian abZ/ aBG, 01.08.2024, S. 11

100 MFPA Leipzig, 17. September 2025a, S. 2

II. Eingehende Darstellung

Funktionsmodelle + Leistungsprofil

Angaben nach DIN EN ISO 11925-2		Prüfergebnisse							
		Probe Nr.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Entflammung	[s]	./.	./.	./.	./.	./.	./.	-	-
Größte Flammenhöhe	[mm]	./.	./.	./.	./.	./.	./.	-	-
Zeitpunkt des Auftretens	[s]	./.	./.	./.	./.	./.	./.	-	-
Flammenspitze an Messmarke	[s]	./.	./.	./.	./.	./.	./.	-	-
Erlöschen der Flamme vor Erreichen der Messmarke	[s]	./.	./.	./.	./.	./.	./.	-	-
Weiterbrennen nach Versuchsende	[s]	./.	./.	./.	./.	./.	./.	-	-
Entzündung des Filterpapiers	[s]	./.	./.	./.	./.	./.	./.	-	-
besondere Beobachtungen:	Brennendes Abtropfen / Abfallen sowie eine Entzündung des Filterpapiers trat nicht auf.								
Rauchentwicklung (visuell):	gering		mäßig		stark		sehr stark		

II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

Tab. 9 Beflammung nach DIN EN ISO 11925-2:2020-07, Abschnitt 7.3.3.2 (Kantenbeflammung) des Produktes „Fassaden-Sandwichelement (Mehrschichtbauteil) mit hochwärmedämmendem Kern“. (MFPA Leipzig, 17. September 2025a)

Probe 1 bis 3: Kantenbeflammung – Tragschicht Leichtbeton 1800 kg/m<sup>3</sup>  
 Probe 4 bis 6: Kantenbeflammung – Vorsatzschicht Leichtbeton 1400 kg/m<sup>3</sup>  
 ./.: kein Auftreten des Ereignisses  
 - keine Angabe

DZ3.1/25-141	Anforderungen gem. DIN EN 13501-1:2019-05*
Beflammung der Tragschicht	F <sub>s</sub> ≤ 150 mm Kein brennendes Abtropfen/Abfallen
Beflammung der Vorsatzschicht	

Tab. 10 Vergleich der Versuchsergebnisse aus Kleinbrenner-Prüfung mit Anforderungen gemäß DIN EN 13501-1:2019-05. (MFPA Leipzig, 17. September 2025a)

F<sub>s</sub> Flammenausbreitung

sowie Flächengewicht

- Tragschicht Leichtbeton 1800 kg/m<sup>3</sup>: (101,0 ± 2,0) kg/m<sup>2</sup>
- Vorsatzschicht Leichtbeton 1400 kg/m<sup>3</sup>: (75,3 ± 1,4) kg/m<sup>2</sup>

Nach der Konditionierung der Probekörper<sup>101</sup> sowie des Filterpapiers erfolgte die Versuchsdurchführung anhand von jeweils 3 Prüfkörpern für die beiden Leichtbetone in den Abmessungen 250 mm x 90 mm x 60 mm. Die Beflammung wird „gemäß DIN EN ISO 11925-2, Abschnitt 7.3.3.2 (Kantenbeflammung) durchgeführt“ und die Proben in freihängender Anordnung bei einer Dauer von 30 Sekunden geprüft.<sup>102</sup>

Die Ergebnisse zur Prüfungen Entzündbarkeit zeigen:<sup>103</sup> (Tab. 9)

- Brennendes Abtropfen / Abfallen sowie eine Entzündung des Filterpapiers tritt nicht auf
- Rauchentwicklung (visuell) gering

Zunächst sollten auch noch Probekörper von Aero A2 Board<sup>104</sup> geprüft werden (Probe Nr. 7 und 8); allerdings ist das Brandverhalten (EN 13501-1) bereits mit A2<sup>105</sup> bewertet.

Aus einem orientierenden Vergleich der Versuchsergebnisse mit den generellen Anforderungen an Bauprodukte nach DIN EN 13501-1:2019-05 (Tab. 10) „kann ... abgeleitet werden, dass das Fassaden-Sandwichelement (Mehrschichtbauteil) mit hochwärmedämmendem Kern ein ähnliches Brandverhalten zeigt wie ein Bauprodukt, das die Anforderungen an die Brandverhaltensklasse B bis D erfüllt.“<sup>106</sup>

101 Abweichend von DIN EN 13238:2010-06.  
 102 MFPA Leipzig, 17. September 2025a, S. 2  
 103 MFPA Leipzig, 17. September 2025a, S. 3  
 104 AGITEC GmbH, Stuttgart  
 105 AGITEC, 23.04.2024  
 106 MFPA Leipzig, 17. September 2025a, Anlage 1, S. 1

Parameter	DZ3.1/25-141B	Anforderungen gem. DIN EN 13501-1:2019-05*				
		hinsichtlich Brandverhalten				
	Beflammung der Vorsatzschicht	A1	A2	B	C	D
FIGRA <sub>0,2 MJ</sub> [W/s]	0	≤ 20	≤ 120	≤ 120	-	-
FIGRA <sub>0,4 MJ</sub> [W/s]	0	-	-	-	≤ 250	≤ 750
THR <sub>600 s</sub> [MJ]	0,0	≤ 4,0	≤ 7,5	≤ 7,5	≤ 15,0	-
Seitliche Flammenausbreitung (LFS)	nein	nein	nein	nein	nein	-
		hinsichtlich Rauchentwicklung				
		s1	s2	s3		
SMOGR <sub>A</sub> [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0	≤ 30	≤ 180	> 180		
TSP <sub>600 s</sub> [m <sup>2</sup> ]	0	≤ 50	≤ 200	> 200		
		hinsichtlich brennenden Abtropfens/ Abfallens				
		d0	d1	d2		
Brennendes Abtropfen/ Abfallen	nein	nein	ja	ja		
Brennendes Abtropfen/ Abfallen länger als 10 s	nein	nein	nein	ja		

II. Eingehende Darstellung  
Funktionsmodelle + Leistungsprofil

Tab. 11 Vergleich der Versuchsergebnisse aus SBI-Test mit Anforderungen gemäß DIN EN 13501-1:2019-05. (MFPA Leipzig, 17. September 2025b)

Zur Ermittlung einer Brandverhaltensklasse gemäß DIN EN 13501-1:2019-05 werden die o.g. Parameter wie folgt zur Generierung einer Klasse verwendet:  
A1, A2, B, C, D >>> FIGRA<sub>0.2MJ</sub>, FIGRA<sub>0.4MJ</sub>, THR<sub>600s</sub> und LFS  
s1, s2, s3 >>> SMOGR<sub>A</sub> und TSP<sub>600s</sub>  
d0, d1, d2 >>> „Brennendes Abtropfen/ Abfallen“ und „Brennendes Abtropfen/ Abfallen länger als 10 s“

### 3.4.3 SBI-Test

Nach der Charakterisierung der eingesetzten Materialien erfolgt abschließend eine Prüfung zum Brandverhalten des Fassaden-Sandwichelements (Funktionsmodell fm.l.b) mittels SBI-Verfahren nach DIN EN 13823:2023-04 im Rahmen von orientierenden Versuchen. Dabei wird ein Entstehungsbrand simuliert, durch eine brennende Quelle in einer Raumecke. (Abb. 96 – 98 im Appendix)

Ziel der Prüfung ist eine Klärung, inwieweit das Fassadenbauteil die Brandausbreitung befördert. Dabei wird ermittelt, wie schnell und wie stark das Produkt zum Brand beiträgt (Wärmefreisetzung), wie viel Rauch entsteht (Rauchentwicklung) und ob brennende Teile abfallen (Brennendes Abtropfen/Abfallen).

Da die avisierten Ergebnisse noch kein Bestandteil einer eventuell später stattfindenden Klassifizierung sind, werden die Prüfkörper etwas vereinfacht hergestellt. Anstelle von drei Teilen wird bei dem längeren Flügel auf eine vertikale Fuge verzichtet. Daraus resultieren Probeflügel, die stumpf aneinanderstoßen; dabei steht der schmale Flügel auf dem langen Flügel auf.

Aufgrund der Anforderung einer maximalen Dicke der Probekörper von 154 mm, wird die Tragschicht auf 50 mm reduziert ausgeführt. Da das Bauteil als geschlossen betrachtet wird, sind zur Vereinfachung der Herstellung der Probekörper als Kerndämmung ausschließlich Alphacore Pure-Platten (d = 20 mm) verwendet worden (l x b x t):

- 1.000 x 1.500 x 150 mm
- 495 x 1.500 x 150 mm

Nach der Konditionierung der Probekörper<sup>107</sup> werden diese mit „einem nicht-hinterlüfteten Luftspalt zwischen Trägerplatte und Abschlussplatte“ eingebaut.<sup>108</sup>

Stellt man die Versuchsergebnisse den generellen Anforderungen an Bauprodukte nach DIN EN 13501-1:2019-05 gegenüber kann „abgeleitet werden, dass das Fassaden-Sandwichelement (Mehrschichtbauteil) mit hochwärmedämmendem Kern ein ähnliches Brandverhalten zeigt wie ein Bauprodukt, das die Anforderungen an die Brandverhaltensklasse A1 erfüllt.“<sup>109</sup> (Tab. 11)

107 Abweichend von DIN EN 13238:2010-06

108 MFPA Leipzig, 17. September 2025b, S. 2

109 MFPA Leipzig, 17. September 2025b, Anlage 3, S. 3

## 4 Ökologische Bewertungen

II. Eingehende Darstellung

### 4.1 Ökologische Abschätzung Lösungsprinzip I.b

Ökologische Bewertungen

Die Ökobilanzierung im Bauwesen erfolgt gemäß den Normen DIN EN 15804, DIN EN 15978 sowie DIN EN ISO 14025 und unterteilt den Lebenszyklus eines Bauwerks in die vier Hauptmodule (Lebenswegphasen) A, B, C und D (Abb. 71). Diese Einteilung gewährleistet eine strukturierte und vergleichbare Bilanzierung der Umweltwirkungen von z. B. Bauteilen bzw. Gebäuden über ihren gesamten Lebensweg hinweg.

- Modul A (Herstellungs- und Errichtungsphase, Produktionsstadium) umfasst die Prozesse von der Rohstoffgewinnung, dem Transport und der Herstellung bis zum Transport zur Baustelle und Bau des Gebäudes.
- Modul B (Nutzungsstadium) beinhaltet alle Umweltwirkungen während der Nutzung des Gebäudes, einschließlich Instandhaltung, Reparatur, Ersatz, Renovierung, Betrieb (Energie- und Wasserverbrauch) und ggf. Modernisierung.
- Modul C (Rückbau- und Entsorgungsstadium, End-of-Life) beschäftigt sich mit dem Rückbau, dem Transport zum Entsorgungsort sowie der Verwertung und Entsorgung der Bauteile.
- Modul D (Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze) bildet eventuelle Vorteile ab, die durch Wiederverwendung, Recycling und Energierückgewinnung entstehen und liegt außerhalb der Systemgrenzen der eigentlichen Lebenszyklusbilanz und wird separat ausgewiesen.

Die einzelnen Umweltauswirkungen aus den Modulen A, B und C werden primär summiert, während Modul D als Nutzen (Gutschrift) in die Endbewertung einfließt, etwa durch ange-rechnete vermiedene Umweltbelastungen aufgrund von Recycling, d. h. Vor- und Nachteile der Wiederverwendung dürfen nicht mit den Ergebnissen aus den Modulen A bis C zusammen-gerechnet werden, sondern sind getrennt auszuweisen. Die einzelnen Module beschreiben die spezifische Prozessschritte näher und bestehen wiederum aus Unterkategorien (z. B. A1 bis A5, B1 bis B7, C1 bis C4). Die Bilanzierung bildet dabei die Grundlage für Umwelt-produktdeklarationen (EPD) und zahlreiche Nachhaltigkeitszertifizierungen im Bausektor.

Umweltwirkungen in der Ökobilanzierung umfassen jene negativen und positiven Einflüsse auf Luft, Wasser, Boden und biologische Systeme, die in jeder Lebensphase eines Produkts systematisch erfasst und nach standardisierten Methoden ausgewertet werden, um fundierte Entscheidungen für mehr Nachhaltigkeit zu ermöglichen. Die wichtigsten Umweltwirkungen sind:

- Ressourcenverbrauch (z. B. Primärenergiebedarf PE): Erfassung und Bewertung des Einsatzes von Ressourcen
- Treibhauspotential (GWP): Misst den Beitrag zum Klimawandel durch Emissionen wie CO<sub>2</sub>
- Ozonschichtabbaupotential (ODP): Bewertet die Wirkung von chemischen Substanzen auf die Ozonschicht.
- Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP): Misst die Bildung von bodennahem Ozon bzw. Sommersmog.
- Versauerungspotential (AP): Bewertet die Auswirkungen auf Böden und Gewässer durch saure Emissionen, z. B. Schwefeldioxid.
- Überdüngungspotential (EP): Analysiert die Überdüngung von Gewässern und Böden durch Stickstoff- und Phosphoreinträge.

Weitere berücksichtigte Umweltauswirkungen sind der Energieverbrauch und die Emissionen von Abfällen und Schadstoffen, der Einfluss auf Boden, Luft und Wasserqualität, Naturraumbeanspruchung (Flächeninanspruchnahme und deren Einfluss auf Biodiversität und Landschaftsbild) sowie die Humantoxizität und Ökotoxizität (Giftigkeit von Stoffen für Menschen und Ökosysteme).

Es erfolgt in einem ersten Schritt eine erste ökologische Abschätzung des mehrschichtigen Fassaden-Sandwichelement (FSE) für das Lösungsprinzip I.b. (Abb. 29)

Die Bewertung findet zunächst nur für die Herstellungsphase A1 bis A3 („cradle to gate“ – von der Wiege bis zum Werkstor) auf Basis der ÖKOBAUDAT-Datenbank<sup>110</sup> und Veröffentlichungen in Form von Umwelt-Produktdeklarationen (EPD) des Instituts für Bauen und Umwelt<sup>111</sup> statt. Die Lebenswegphase „cradle to gate“ bezieht sich hierbei auf die Betrachtung der Rohstoffbeschaffung („cradle“) bis zum Verlassen des Werkstors („gate“). Dies beinhaltet die Gewinnung von Rohstoffen und deren Verarbeitung (A1), den Transport zum Herstellungsort (A2) sowie die Produktion (A3) und alle damit verbundenen Umweltauswir-

110 Vgl. BMWBS: <https://oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html> <28.10.2025>

111 Vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/> <28.10.2025>

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium								Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze	
Rohestoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für den Betrieb des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-	Rückgewinnungs- oder Recyclingpotential	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D		

**II. Eingehende Darstellung**  
**Ökologische Bewertungen**

Abb. 71 Einteilung der Lebenszyklusinformationen in Module nach DIN EN 15804 (OHM-MB\_VS-ieg)

kungen. Hierzu werden in einem ersten Schritt die Bilanzgrößen nicht-erneuerbarer bzw. erneuerbarer Primärenergiebedarf (PEne, PEE) sowie das Treibhauspotential (GWP) als CO<sub>2</sub>-Äquivalent untersucht.

Als Leichtbeton wird auf einen Holzleichtbeton aus einem früheren Forschungsvorhaben<sup>112</sup>, bestehend aus Fichtenholz (11 Masse-%), Zement CEM II/D (46 Masse-%) sowie Wasser (43 Masse-%), zurückgegriffen. Eine zusätzlich in beiden Deckschichten vorgesehene textile Bewehrung der Firma Solidian (Typ Grid, Glasfaserbewehrung)<sup>113</sup> wird ebenso mitbilanziert.

Aufgrund fehlender Umwelt-Produktdeklarationen für die Produkte AlphaCore und OPTIM-R werden für den mineralischen Dämmstoff auf Basis von synthetischer amorpher Kieselsäure Angaben für den Vorgänger Brand, Calostat von Evonik<sup>114</sup> und für das Vakuum-Isolationspaneel das Produkt Vacupor NT-B2-S der Firma Porextherm Dämmstoffe GmbH<sup>115</sup> berücksichtigt.

Zur Beurteilung der Lebenswegphase A2 werden die jeweiligen eingesetzten Materialien je nach Bezugsort angerechnet. Die Bewertung der Lebenswegphase A3 erfolgt dabei mit Hilfe der EPD für das Produkt großformatige Elementwände aus Leichtbeton des Bundesverbandes für Leichtbeton e.V.<sup>116</sup>.

Als Vergleich dienen drei ‚konventionelle‘ Wandaufbauten (Aufbau jeweils von innen nach außen)<sup>117</sup>

- Ziegelwand:
  - Kalkputz (20 mm), Poroton- Ziegel (365 mm), Kalkputz (20 mm)
  - Gesamt-Wandstärke: 405 mm
  - Flächengewicht: 285 kg/m<sup>2</sup>
  - U-Wert: 0,21 W/m<sup>2</sup>K
- Kalksandsteinwand:
  - Kalkputz (20 mm), Kalksandstein (175 mm), Steinwolle (160 mm), Kalkputz (20 mm)
  - Gesamt-Wandstärke: 380 mm
  - Flächengewicht: 437 kg/m<sup>2</sup>
  - U-Wert: 0,20 W/m<sup>2</sup>K
- Holzrahmenbauwand:
  - Gipsfaserplatte (12,5 mm), GFK-Platte (15 mm), Hinterlüftung (40 mm), OSB (15 mm), Zellulosefaser Dämmstoff (180 mm), Holzständer (60 x 180 mm), Holzfaserdämmplatte (40 mm), Putz (20 mm)
  - Gesamt-Wandstärke: 323 mm
  - Flächengewicht: 100 kg/m<sup>2</sup>
  - U-Wert: 0,20 W/m<sup>2</sup>K

Dabei zeigt sich, dass das Lösungsprinzip I.b einen deutlich höheren Gesamt-Primärenergiebedarf im Vergleich zu den marktüblichen Wandaufbauten aufweist (37,4 % bis 71,2 %) (Abb. 72). Durch den Einsatz regenerativer Baustoffe ergibt sich ein fast identischer erneuerbarer Primärenergiebedarf gegenüber der Holzrahmenbauwand. Das Treibhauspotential ist ähnlich groß wie bei der Ziegelwand, besser gegenüber der Kalksandsteinwand und wesent-

112 Vgl. Mischung M2, in: Krippner/Freimann, 2017, S. 6

113 Vgl. ift Rosenheim GmbH, 2022, S. 17

114 Vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 2021, S. 7

115 Vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 2020, S. 8

116 Vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 2019, S. 7

117 Vgl. kbp, 2022, S. 2-30

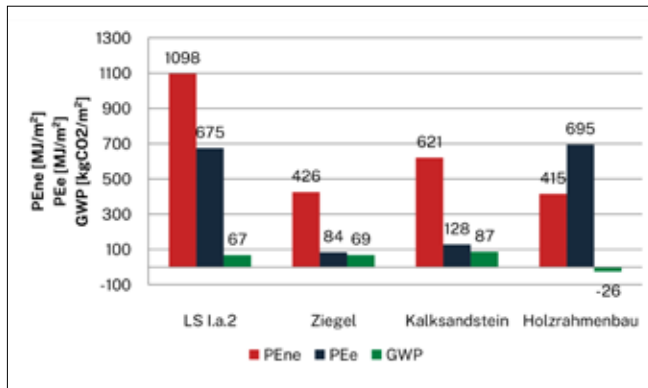


Abb. 72

FSE Lösungsprinzip I.b: Primärenergiebedarf (nicht-erneuerbar, erneuerbar), Treibhauspotential für Module A1 bis A3 pro Quadratmeter Wandaufbau im Vergleich zu konventionellen Wandkonstruktionen (OHM-MB\_VS-ieg)

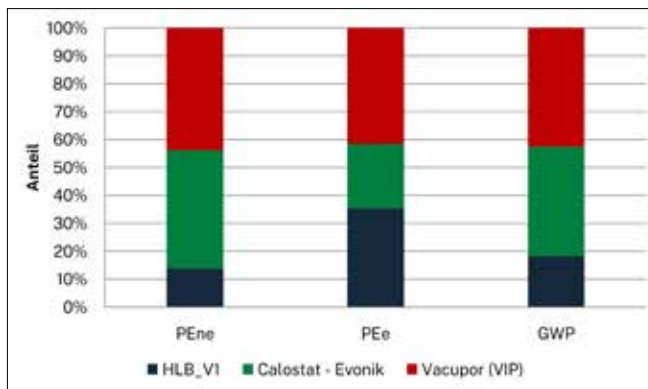


Abb. 73

FSE Lösungsprinzip I.b: Prozentuale Anteile der eingesetzten Materialien hinsichtlich Primärenergiebedarf (nicht-erneuerbar, erneuerbar), Treibhauspotential für Module A1 bis A3 pro Quadratmeter Wandaufbau (OHM-MB\_VS-ieg)

lich schlechter im Vergleich zur Holzrahmenbauwand. Jedoch ist dieses Lösungsprinzip mit einer Bauteildicke von 180 mm deutlich schlanker und weist mit ca. 171 kg/m<sup>2</sup> ein merklich geringeres spezifisches Gewicht gegenüber der Ziegel- und Kalksandsteinvariante auf.

Betrachtet man die prozentualen Anteile der Materialien im Fassaden-Sandwichelement am Gesamtergebnis zeigt sich hinsichtlich des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs und des Treibhauspotentials, dass auf Calostat (42 % bzw. 39 %) und VIP (44 % bzw. 43 %) die größten Anteile entfallen. Diese Werte sind herstellenspezifisch und auch abhängig von den zugrunde gelegten länderabhängigen Kennwerten (z. B. Strommix). (Abb. 73)

#### 4.2 Ökologische Bewertung Lignin-Aerogel-Dämmstoff

Für den Lignin-Aerogel-Dämmstoff erfolgt eine ökologische Bewertung für die Lebenswegphasen von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen („cradle to gate with options“). Dies beinhaltet sowohl die Gewinnung von Rohstoffen und deren Verarbeitung (A1), den Transport zum Herstellungsort (A2) sowie die Produktion (A3), das sogenannte „Produktionsstadium“, als auch die Abfallbehandlung (C3) und Deponierung (C4), das sogenannte „Ende des Lebenswegs“. Als ergänzende zusätzliche Information wird das mögliche Wiederverwertungs-, Rückgewinnungs- und Recyclingpotential (D) bei einer sortenreinen Trennung betrachtet. Die Bilanzierung erfolgt dabei für folgende Indikatoren (Ressourceneinsatz, Umweltwirkung):

- Primärenergiebedarf – nicht-erneuerbar, erneuerbar, gesamt (PEne, PEe, PEges)
- Treibhauspotential (GWP)
- Ozonschichtabbaupotential (ODP)
- Ozonbildungspotential (POCP)
- Versauerungspotential (AP)
- Überdüngungspotential (EP)

Ein Vergleich erfolgt mit den Ergebnissen für vier marktübliche Hochleistungsdämmstoffe:

- Calostat (Evonik), mineralischer Dämmstoff auf Basis synthetisch amorpher Kieselsäure
- Vacupor NT-B2-S (Porextherm Dämmstoffe), Vakuum-Isolationspaneel
- Kooltherm K20 (Kingspan), Hochleistungsdämmstoff aus Resol-Hartschaum<sup>118</sup>

118 Vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 2023, S. 4-5

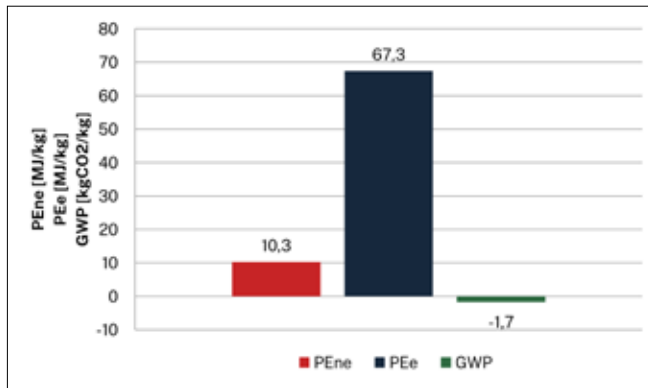


Abb. 74 Primärenergiebedarf (erneuerbar, nicht-erneuerbar), Treibhauspotential pro Kilogramm Lignin für die Module A1 bis A3 (Produktion) (OHM-MB-VS-ieg)

II. Eingehende Darstellung  
Ökologische Bewertungen

System	PEne [MJ/m <sup>3</sup> ]	PEe [MJ/m <sup>3</sup> ]	GWP [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	ODP [kgCFC <sub>11</sub> /m <sup>3</sup> ]	POCP [kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> ]	AP [kgSO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	EP [kgPO <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> ]
A1 – A3, C3, C4	7.817	58.881	605	4,0E-05	1,238	10,432	4,3E+00
D	-804	-241	-66	-2,2E-09	-0,010	-0,121	-1,6E-02

Tab. 12 Indikatoren (Ressourceneinsatz, Umweltwirkung) für das Lignin-Aerogel in Plattenform für die Module A1 bis A3 (Produktion) inkl. C3 und C4 (Entsorgung) sowie D (Potentiale) pro Kubikmeter (OHM-MB-VS-ieg)

- Aero A2 Board (Agitec), hoch wärmedämmendes Aerogel mit Glasfaservlies<sup>119</sup>

Zunächst wird der Grundstoff Lignin (Produkt Protobind 2400 Soda Lignin der Firma Tanovis AG aus der Schweiz) und anschließend das Lignin-Aerogel in Form von gepressten Platten bewertet.

Nach Angaben der Firma Tanovis AG werden für die Herstellung von einem Kilogramm Lignin (Rohdichte: 500 kg/m<sup>3</sup>) die Produkte Stroh (0,82 kg), Sarkanda-Gras (0,82 kg), Kühl- bzw. Prozesswasser (11,9 kg) und diverse (unbekannte) Chemikalien (0,75 kg) verwendet. Weiterhin werden hierzu Strom (0,65 kWh) und Wärme (Dampf) aus Biomasse (9,01 kWh) benötigt. Die Transportwege sind mit durchschnittlich 200 km pro eingesetzten Stoff berücksichtigt.

Betrachtet man die ermittelten Kennwerte für die Lebenswegphase A1 bis A3 pro Kilogramm Lignin für den nicht-erneuerbaren (PEne) sowie den erneuerbaren (PEe) Primärenergiebedarf und für das Treibhauspotential (GWP) zeigt sich, dass der Einsatz von Stroh bzw. Sarkanda-Gras zu negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen (-1,7 kgCO<sub>2</sub>/kg) führt. Dies ist auf das durch das Stroh bzw. das Gras aufgenommene CO<sub>2</sub> zurückzuführen. Dies gilt auch für den relativ hohen erneuerbaren Primärenergiebedarf (67,3 MJ/kg); hier spielt auch der Einsatz von Wärme aus Biomasse im Herstellungsprozess eine Rolle (Abb. 74).

Für die Produktion von einem Liter Lignin-Aerogel-Partikel (Rohdichte: 100 kg/m<sup>3</sup>) werden Lignin (hier: 64 g, möglich wären auch 8 g oder 32 g), Zellulose (0,018 kg), 5 %ige Calciumchlorid-Lösung (1,05 kg), entionisiertes Wasser (6,0 kg) sowie (Bio-) Ethanol (2,54 kg) eingesetzt. Hierbei ist schon das recycelte Ethanol (4,72 kg) berücksichtigt. Zur Herstellung wird weiterhin Strom (Autoklave, CO<sub>2</sub>-Kompressor, Mahlen, Pressen: 1,05 kWh) benötigt. Dessen Anteil wird zu 100 % regenerativ, z. B. aus Photovoltaik vor Ort, bezogen. Die Transportwege sind mit durchschnittlich 200 km pro eingesetzten Stoff berücksichtigt. Eine Ausnahme bildet das Lignin, welches aus der Schweiz nach Hamburg (830 km) transportiert wird.

Der Vergleich des Ressourceneinsatzes sowie der einzelnen Umweltwirkungen mit den marktüblichen Hochleistungsdämmstoffen erfolgt pro Kubikmeter, um den Einfluss der Dichte und der Wärmeleitfähigkeit mit in Betracht zu ziehen.

#### Lebenswegphase A1 bis A3, C3 und C4

Die Lignin-Aerogel-Platte zeigt im Vergleich für die betrachteten Lebenswegphasen A1 bis C4 einen wesentlich größeren Gesamt-Primärenergiebedarf gegenüber den Vergleichs-Dämmstoffen, jedoch ist hierbei der Anteil an regenerativer Primärenergie mit etwa 87,2 % sehr hoch. Betrachtet man nur den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf weist lediglich der Dämmstoff Kooltherm K20 einen geringeren Bedarf auf. Hinsichtlich des Treibhauspotentials (GWP) zeigt die Lignin-Aerogel-Platte ein sehr gutes Ergebnis gegenüber den meisten Vergleichs-Dämmstoffen, Ausnahme ist hier nur der Dämmstoff Kooltherm K20, der mit Ab-

119 Vgl. Renuables, 2015, S. 13-15, aufgrund einer fehlenden aktuellen EPD, wurde diese verwendet

stand das beste Ergebnis liefert. Beim Ozonschichtabbaupotential weist das Aero A2 Board mit großem Abstand das schlechteste Ergebnis vor der Lignin-Aerogel-Platte auf. Beim Ozonbildungs-, Versauerungs- und Überdüngungspotential liefert die Lignin-Aerogel-Platte das schlechteste Ergebnis. (vgl. Abb. A100 im Appendix und Tab. 12)

Die teils schlechteren Werte sind im Wesentlichen auf den zur Herstellung des Lignin-Aerogel in relativ großen Mengen benötigten Bioethanol sowie auf den relativen hohen Energiebedarf (Strom) zur Herstellung zurückzuführen.

#### Lebenswegphase D

Hier weisen für fast alle Indikatoren der Calostat-Dämmstoff und die Vakuum-Isolationspaneele das größte Wiederverwertbarkeitspotential auf. Zumindest zeigt die Lignin-Aerogel-Platte eine höherer Wiederverwertbarkeit gegenüber der Kooltherm-Dämmung und dem Aerogel-Board für sämtliche Indikatoren auf.

II. Eingehende  
Darstellung  
Ökologische  
Bewertungen

### 4.3 Ökologische Bewertung Funktionsmodelle

Es erfolgt eine ökologische Bewertung der in den jeweiligen Lösungsstrategien eingesetzten Leichtbetonrezepturen (Tab. A37 + A38 im Appendix)

- Lösungsstrategie I – Außen-/ Vorsatzschicht ( $\rho$ : 1.388 kg/m<sup>3</sup>) (Tab. A26 im Appendix)
- Lösungsstrategie I – Innen-/ Tragschicht ( $\rho$ : 1.792 kg/m<sup>3</sup>) (Tab. A25 im Appendix)
- Lösungsstrategie II – Außen-/ Vorsatzschicht ( $\rho$ : 1.409 kg/m<sup>3</sup>) (Tab. A28 im Appendix)
- Lösungsstrategie II – Innen-/ Tragschicht ( $\rho$ : 1.616 kg/m<sup>3</sup>) (Tab. A27 im Appendix)

für die Lebenswegphasen von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen („cradle to gate with options“). Dabei werden hinsichtlich der Abfallbehandlung (C3) Verluste durch die Aufbereitung von 3 % berücksichtigt. Die Bilanzierung erfolgt dabei wiederum für die folgenden maßgeblichen Indikatoren (Ressourceneinsatz, Umweltwirkung):

- Primärenergiebedarf – nicht-erneuerbar, erneuerbar, gesamt (PEne, PEE, PEges)
- Treibhauspotential (GWP)
- Ozonschichtabbaupotential (ODP)
- Ozonbildungspotential (POCP)
- Versauerungspotential (AP)
- Überdüngungspotential (EP)

Die Ergebnisse werden im Anschluss mit den Ergebnissen für zwei ‚konventionelle‘ Leichtbetonrezepturen<sup>120</sup> verglichen, ein gefügedichter Leichtbeton LC12/13 ( $\rho$ : 1.190 kg/m<sup>3</sup>) sowie ein Infraleichtbeton ( $\rho$ : 650 kg/m<sup>3</sup>). Dabei werden die Transportwege (A2) je nach eingesetztem Material und dessen Bezugsort berücksichtigt. Für die Produktion der Leichtbetonschichten der jeweiligen Lösungsstrategie sowie für die konventionellen Leichtbetonmischungen erfolgt die ökologische Bewertung für die Lebenswegphase A3 weiterhin mit Hilfe der EPD für das Produkt großformatige Elementwände aus Leichtbeton des Bundesverbandes für Leichtbeton e. V.. (Abb. 75)

#### Lebenswegphase A1 bis A3, C3 und C4

Der Gesamt-Primärenergiebedarf der vier Leichtbeton-Rezepturen liegt zwischen dem des Leichtbetons LC12/13 und des Infraleichtbetons (PEges: -27,9 % bis -44,7 % gegenüber LC12/13 bzw. +32,5 % bis +73,0 % gegenüber Infraleichtbeton). Je höher der Anteil der eingesetzten regenerativen Materialien oder Energie, desto höher der Anteil an erneuerbarer Primärenergie am Gesamt-Primärenergiebedarf. Die Ergebnisse für das Treibhaus-, Ozonbildungs- und Versauerungspotential (GWP: -13,6 % bis -49,6 % gegenüber LC12/13 bzw. +6,3 % bis +82,3 % gegenüber Infraleichtbeton, POCP: -19,0 % bis -51,6 % gegenüber LC12/13 bzw. +40,7 % bis +135,5 % gegenüber Infraleichtbeton, AP: -26,3 % bis -58,1 % gegenüber LC12/13 bzw. +57,4 % bis +177,1 % gegenüber Infraleichtbeton) verhalten sich ähnlich. Das Ozonschichtabbaupotential ist für alle vier Leichtbeton-Rezepturen, bis auf die Innenschicht der LS II zum Teil deutlich größer als das der beiden Referenz-Leichtbetone (ODP: -0,4 % bis +21,5 % gegenüber LC12/13 bzw. +1.039,9 % bis +1.290,6 % gegenüber Infraleichtbeton). Das Überdüngungspotential der Innenschicht der LS I sowie die Außenschicht der LS II ist jeweils größer als das der Referenz-Leichtbetone. Hingegen befinden sich die beiden anderen Leichtbetone der Lösungsstrategien zwischen den Referenz-Leichtbetonen (EP: -22,8 % bis +16,5 % gegenüber LC12/13 bzw. +147,9 % bis +274,4 % gegenüber Infraleichtbeton). (Abb. 75 + A100 sowie Tab. A37 im Appendix)

120 Vgl. Kapitel A4.2.2, S. 64 und A4.2.3, S. 65 im Appendix

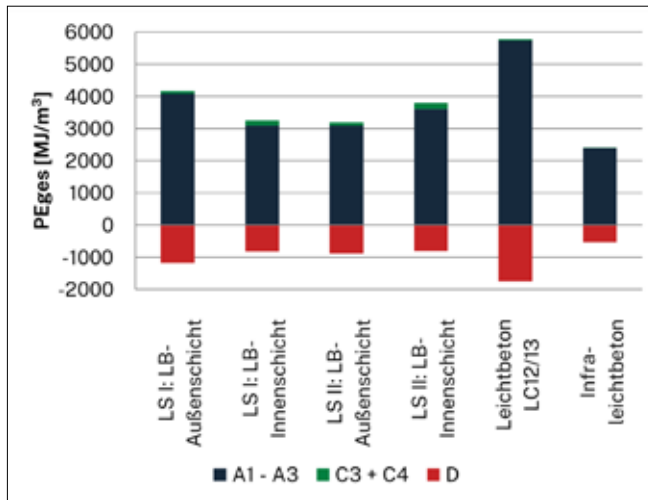


Abb. 75 Primärenergiebedarf gesamt für die Leichtbeton-Außen- und Innenschicht der Lösungsstrategien I und II für die Module A1 bis A3 sowie C3 + C4 und D (Produktion, Ende Lebensweg, Potentiale) pro Kubikmeter im Vergleich zu zwei marktüblichen Leichtbetonen (OHM-MB-VS-ieg)

II. Eingehende Darstellung  
Ökologische Bewertungen

### Lebenswegphase D

Das mögliche Recycling- und Wiederverwertungspotential (Modul D) der vier Leichtbetonrezepturen bei sortenreiner Trennung liegt für alle Indikatoren zwischen den Referenz-Leichtbetonen. Kleiner gegenüber dem Leichtbeton LC12/13 und größer gegenüber dem Infraleichtbeton (PEges: -32,2 % bis +121,4 %, GWP: -33,3 % bis +223,8 %, ODP: -72,1 % bis +117,9 %, POCP: -67,7 % bis +120,2 %, AP: -72,0 % bis +115,6 %, EP: -69,8 % bis +124,4 %).

Es ist erkennbar, dass Pflanzenkohle als Inhaltsstoff der Innenschicht der jeweiligen Lösungsstrategie einen positiven Effekt auf die einzelnen Bewertungskriterien hat. (Abb. 75 + A100 sowie Tab. A38 im Appendix)

Betrachtet man die prozentualen Anteile der eingesetzten Materialien für die Lebenswegphasen A1 bis A3, C3 + C4 sowie D für die Leichtbeton-Außen- bzw. Innenschicht für Lösungsstrategie I und II, so kann folgendes festgestellt werden. In der Herstellungsphase (A1 bis A3) ist jeweils deutlich der Einfluss des Zements, der Liapor-Schüttungen bzw. des Liapor-Sandes auf nahezu alle Kategorien der Wirkungsabschätzung erkennbar. Hinsichtlich des Ozonschichtabbaupotentials spielt lediglich der Zement in beiden Schichten eine Rolle. Der Transport zur Produktionsstätte (A2) sowie die eigentliche Produktion im Werk spielen lediglich eine untergeordnete Rolle. Am Ende des Lebensweges (C3 + C4) nehmen dann auch der Brechsand, das Kalksteinmehl, der Kalksplitt sowie die Pflanzenkohle unterschiedlichen große Anteile an den Aufwendungen bei der Abfallbehandlung und Deponierung ein. Betrachtet man das mögliche Wiederverwertungspotential (D) bei einer sortenreinen Trennung, so spielen hier der Zement, die Liapor-Schüttungen bzw. der Liapor-Sand sowie die Pflanzenkohle eine unterschiedliche große Rolle je nach Indikator und Lebenswegphase. (Abb. A101 + A102 im Appendix)

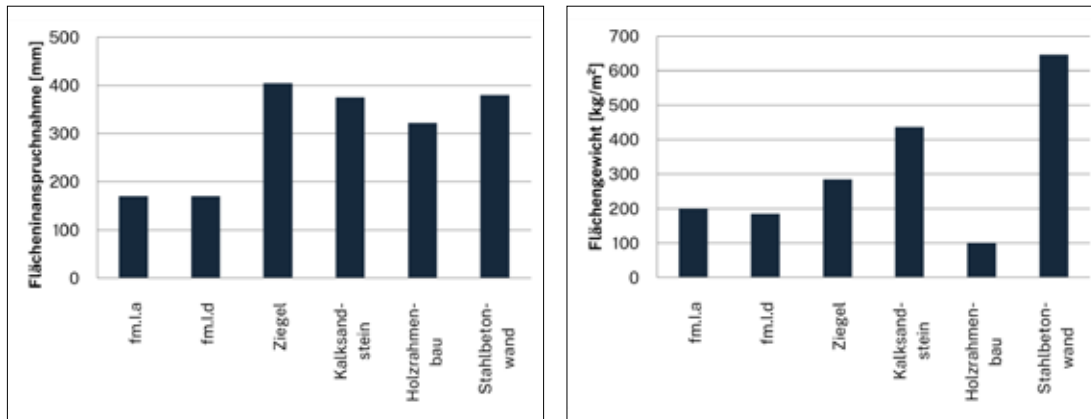
Generell ist zu sagen, dass sich erneuerbare Inhaltsstoffe wie etwa Pflanzenkohle positiv auf die Ökobilanz auswirken können. Dabei gilt je höher der Massenanteil an der Rezepturen, desto positiver der Effekt.

In einem weiteren Schritt werden nun die beiden Funktionsmodelle fm.I.a (Abb. A53 im Appendix) und fm.I.d (Abb. A56 im Appendix) ökologisch beurteilt und mit vier marktüblichen Wandaufbauten verglichen.

Der Unterschied zwischen Funktionsmodell fm.I.a und fm.I.d besteht in der unterschiedlichen Randdämmung zu Fixierung und Schutz der Vakuum-Isolationspaneele. Im Zuge der Weiterentwicklung der Funktionsmodelle wurde der Dämmstoff Kooltherm K20 (Funktionsmodell fm.I.a) durch den Dämmstoff Aero A2 Board (Funktionsmodell fm.I.d), aufgrund der besseren brandschutztechnischen Eigenschaften und wegen einer einfacheren Verarbeitung, ersetzt.

Das mehrschichtige Fassaden-Sandwichelement mit einer Gesamt-Bauteilstärke von 170 mm hat nachstehenden Schichtaufbau:

- Außenschicht (Vorsatzschicht / Fassade): Leichtbeton-Rezeptur Rd 1.4, LS I inkl. Glasfaserbewehrung (Typ Grid, Firma Solidian), 30 mm
- Kerndämmung: AlphaCore (Calostat) / Kooltherm K20 bzw. Aero A2 Board, 20 mm, Anteil Kerndämmung / Randdämmung: 91 % / 9 %
- Kerndämmung: VIP OPTIM-R® (Vacupor VIP) / Kooltherm K20 bzw. Aero A2 Board, 20 mm (fm.I.a) bzw. 30 mm (fm.I.d), Anteil Kerndämmung / Randdämmung: 91 % / 9 %
- Kerndämmung: AlphaCore (Calostat) / Kooltherm K20 bzw. Aero A2 Board, 20 mm, Anteil



II. Eingehende Darstellung  
Ökologische Bewertungen

Abb. 76 Flächeninanspruchnahme (links) und Flächengewicht rechts für die Funktionsmodelle fm.l.a und fm.l.d im Vergleich zu den vier marktüblichen Wandaufbauten (OHM-MB-VS-ieg)

Kerndämmung / Randdämmung: 91 % / 9 %

- Innenschicht (Tragschicht): Leichtbeton-Rezeptur Rd 1.8, LS I inkl. Glasfaserbewehrung (Typ Grid, Firma Solidian), 80 mm (fm.l.a) bzw. 70 mm (fm.l.d)

Eine zusätzlich in beiden Leichtbeton-Schichten vorgesehene Bewehrung aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) der Firma Solidian (Typ Grid) wird mitbilanziert.

Daraus ergibt sich ein Flächengewicht von ca. 202 kg/m² für das Funktionsmodell fm.l.a und von etwa 185 kg/m² für das Funktionsmodell fm.l.d.

Aufgrund fehlender Umwelt-Produktdeklarationen für die Produkte AlphaCore und OPTIM-R der Firma Kingspan werden wie bereits beschrieben für den mineralischen Dämmstoff auf Basis von synthetischer amorpher Kieselsäure das Vorgängerprodukt Calostat der Firma Evonik und für das Vakuum-Isolations-Paneel das Produkt Vacupor NT-B2-S der Firma Porotherm Dämmstoffe GmbH berücksichtigt.<sup>121</sup>

Zur ökologischen Beurteilung werden die genannten Bewertungskriterien für die Lebenswegphasen A1 bis A3 (Produktionsstadium), C3 und C4 (Entsorgungsstadium) sowie D (Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze) für die beiden Funktionsmodelle mit den in Kapitel 4.1 auf Seite 60 beschriebenen drei marktüblichen Wandaufbauten pro Quadratmeter Wandfläche verglichen. Zu diesen bereits betrachteten Varianten wird zusätzlich noch ein weiterer Wandaufbau (Stahlbeton-Sandwichelement, Aufbau von innen nach außen) betrachtet:

- Stahlbeton (80 mm), Steinwolle (160 mm), Stahlbeton (140 mm)
- Gesamt-Wandstärke: 380 mm
- Flächengewicht: 647 kg/m²
- U-Wert: 0,21 W/m²K

Durch den Einsatz des Dämmstoffes Aero A2 Board sowie aufgrund der stärkeren VIP-Dämmschicht verschlechtern sich alle Indikatoren für das Funktionsmodell fm.l.d für die Module A1 bis A3 sowie C3 und C4 (PEges: +30,7 %, GWP: +23,5 %, ODP: +206,1 %, POCP: +3,9 %, AP: +27,9 %, EP: +29,1 %) bei gleichzeitiger Steigerung des möglichen Recyclingpotentials (D): PEges: +30,0 %, GWP: +23,3 %, ODP: -6,4 %, POCP: +6,4 %, AP: +17,8 %, EP: +19,9 %. Gegenüber den Vergleichswandaufbauten zeigt das Funktionsmodell fm.l.d für fast alle Indikatoren eine schlechtere Ökobilanz gegenüber der Kalkstein-, Ziegel- und Holzrahmenbauwand auf. Ausnahme bildet lediglich das Überdüngungspotential (EP) gegenüber der Ziegelwand. Gegenüber der Stahlbetonwand liefert das Funktionsmodell nur für die Indikatoren Ozonschichtabbaupotential (ODP) und Überdüngungspotential (EP) eine schlechtere Ökobilanz. (Abb. A103 und Tab. A39 + A40 im Appendix)

Die beiden Funktionsmodelle sind jedoch mit einer Bauteildicke von jeweils 170 mm erheblich schlanker als alle untersuchten Wandaufbauten (47,3 % bis 58,0 %) und weisen mit ca. 202 kg/m² (fm.l.a) bzw. 185 kg/m² (fm.l.d) ein wesentlich geringeres Flächengewicht auf, lediglich bei der Holzrahmenbauwand fällt dies geringer aus.

In der Herstellungsphase zeigen die beiden mineralische Dämmschichten Calostat und die Vakuum-Isolationspaneel-Schicht (VIP) für beide Funktionsmodelle den größten Einfluss auf das Ergebnis, vor allem hinsichtlich des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs

<sup>121</sup> Es wurde seitens der Firma Kingspan zwar angekündigt, dass Umwelt-Produktdeklarationen im Juni 2024 veröffentlicht werden sollten, sind bis jedoch bis zum Zeitpunkt der Berichterstellung nicht erschienen.

System	Bruttofläche bei gleicher NGF (BGF als Referenzwert) [m <sup>2</sup> ]	Nettofläche bei gleicher BGF (NGF als Referenzwert) [m <sup>2</sup> ]	Reduzierung BGF bei gleicher NGF	Zunahme NGF bei gleicher BGF
Funktionsmodell fm.I.d gegenüber Ziegelwand	930,83 (974,21)	869,51 (829,60)	4,5 %	4,8 %
Funktionsmodell fm.I.d gegenüber Kalksandsteinwand	930,83 (968,33)	864,30 (829,60)	3,9 %	4,2 %
Funktionsmodell fm.I.d gegenüber Holzrahmenbauwand	930,83 (958,88)	855,53 (829,60)	2,9 %	3,1 %
Funktionsmodell fm.I.d gegenüber Stahlbetonwand	930,83 (968,33)	864,30 (829,60)	3,9 %	4,2 %

 II. Eingehende Darstellung  
 Ökologische Bewertungen

Tab. 13 Veränderung der Brutto- (BGF) bzw. Nettogrundfläche (NGF) durch Einsatz des Funktionsmodells fm.I.d als Außenwand gegenüber den vier marktüblichen Wandaufbauten bei gleicher Netto- bzw. Bruttogrundfläche (OHM-MB-VS-ieg)

(Calostat – fm.I.a: 33,8 %, fm.I.d: 25,4 %, VIP – fm.I.a: 42,1 %, fm.I.d: 47,3 %) und des Treibhauspotentials (Calostat – fm.I.a: 26,0 %, fm.I.d: 20,9 %, VIP – fm.I.a: 34,3 %, fm.I.d: 41,1 %). Hinsichtlich des Ozonschichtabbaupotentials (ODP) spielt noch die Randdämmung Aero A2 Board im Funktionsmodell fm.I.d eine wesentliche Rolle. In der Entsorgungsphase weisen im Wesentlichen die beiden Leichtbetonschichten sowie die Vakuum-Isolationspaneele den größten Einfluss auf die Ökobilanz auf. Das größtmögliche Recyclingpotential ist, je nach Indikator, bei den Haupt-Dämmstoffen (Calostat, VIP) sowie den Leichtbetonschichten zu finden. (Abb. A103 im Appendix)

Ausgehend vom Funktionsmodell fm.I.d werden nun die beiden Calostat-Dämmschichten durch Lignin-Aerogel-Platten ersetzt (Funktionsmodell fm.I.e). Die Lignin-Aerogel-Platten enthalten hierbei 64 g Soda Lignin Pb2400 und werden zu 100 % mit regenerativem Strom erzeugt.

#### Lebenswegphase A1 bis A3, C3 und C4

Es wird ersichtlich, dass durch den Einsatz der Lignin-Aerogel-Platten die Werte aller Indikatoren, mit Ausnahme des Treibhauspotentials (Ersparnis: 0,9 %), ansteigen. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass sich der Großteil des Gesamt-Primärenergiebedarfs für das Lignin-Aerogel aus dem erneuerbaren Primärenergiebedarf (87,2 %) zusammensetzt, der nicht-erneuerbare Anteil des Primärenergiebedarfs (-7,2 %) ist gegenüber der substituierten Variante mit Calostat geringer.

Die Ursache für die schlechteren Werte liegt, wie bereits erwähnt, vor allem am zur Herstellung des Lignin-Aerogel benötigten Bioethanols, welcher für alle Indikatoren einen hohen Einfluss zeigt sowie am relativen hohen Energiebedarf (Strom) zur Produktion. Dennoch sind einige dieser Werte weiterhin in etwa gleich (AP) oder geringer (GWP, POCP) als die entsprechenden Werte der Stahlbetonwand. Um die Ökobilanz weiter zu verbessern, könnte der Anteil regenerativer Inhaltsstoffe, wie in diesem Fall das zur Lignin-Herstellung benötigte Sarkanda-Gras, erhöht werden. (Abb. A105 im Appendix)

#### Lebenswegphase D

Durch das Ersetzen der Calostat-Dämmung durch die Lignin-Aerogel-Dämmung reduziert sich für alle Indikatoren des Wiederverwertungspotential geringfügig. (Abb. A105 im Appendix)

### 4.4 Beurteilung zum Einsatz der prototypischen Lösung im Bauprojekt

In einem nächsten Schritt wird das Funktionsmodell fm.I.d als Außenwand in einem beispielhaften zweigeschossigen Neubau eines Büro- und Verwaltungsgebäudes (Abb. A112) im Vergleich zu den bereits definierten vier konventionellen Wandaufbauten Ziegel-, Kalksandstein-, Holzrahmenbau- und Stahlbetonwand ökologisch beurteilt. Hierbei werden nun auch die anderen Bauteile der thermischen Hülle, wie z. B. Fenster, Zwischendecken etc. mitbilanziert. Der Betrachtungszeitraum beläuft sich auf 50 Jahre und als Bezugsgröße für die spezifischen Werte wird die jeweilige Nettogrundfläche (NGF) berücksichtigt. Dabei wird

zusätzlich auch die Lebenswegphase B4 (Austausch während der Nutzungsphase) bei einer Lebensdauer des Bauteils kleiner dem Betrachtungszeitraum bewertet. Das Gebäude ist nach dem Baustandard (Effizienzklasse) GebäudeEnergieGesetz von 2024 (GEG 2024) ausgeführt.

Im Vergleich zu den marktüblichen Wandaufbauten (Ziegel-, Kalksandstein-, Holzrahmenbau-, Stahlbetonwand) resultiert aufgrund der im Vergleich wesentlich geringeren Wandstärke des Funktionsmodells fm.l.d eine Reduzierung der Bruttogrundfläche (BGF) bei gleicher Nettogrundfläche um etwa 2,9 % bis 4,5 %. Es ist auch eine Zunahme der Nettogrundfläche bei gleicher Bruttogrundfläche um ca. 3,1 % bis 4,8 % gegenüber den betrachteten marktüblichen Vergleichs-Wandaufbauten möglich (Tab. 13).

#### Lebenswegphase A1 bis A3, B4, C3 und C4

Es zeigt sich, dass das Funktionsmodell lediglich gegenüber der Ziegel- bzw. Kalksandsteinwand für das Treibhaus- (GWP) und das Überdüngungspotential (EP) geringere Werte aufweist. Im Vergleich zur Stahlbetonwand schneidet das Funktionsmodell für den Gesamt-Primärenergiebedarf (PEges), für das Treibhaus- (GWP), das Ozonbildungs- (POCP) und das Versauerungspotential (AP) besser ab. (Tab. A47 und Abb. A113 im Appendix)

#### Lebenswegphase D

Dagegen wird beim Funktionsmodell fm.l.d für fast alle Indikatoren, mit Ausnahme des Ozonbildungspotentials (POCP) gegenüber der Stahlbetonwand, ein höheres mögliches Wiederverwertungspotential bei sortenreiner Trennung deutlich. (Tab. A48 und Abb. A114 im Appendix)

### **4.5 Umweltproduktdeklaration (EPD, Environmental Product Declaration)**

Eine Umweltproduktdeklaration (EPD, Environmental Product Declaration) zeigt quantifizierte Informationen über die Umweltauswirkungen eines Produkts für dessen gesamten Lebenszyklus auf. Sie basiert auf einer Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14025, DIN EN ISO 14040 sowie DIN EN 15804. Die EPD enthält Indikatoren zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes, der Emissionen sowie den Beitrag des Produkts zu Umweltauswirkungen wie z. B. Treibhauseffekt, Versauerung, Überdüngung, Ozonschichtabbau und Ozonbildung. Sie dienen als wichtige Grundlage für die Gebäudezertifizierungen (z. B. BNB<sup>122</sup>, QNG<sup>123</sup>) und ermöglichen den Vergleich von Produkten gleicher Funktion hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen. Zusätzlich zu Umweltinformationen enthalten Umweltproduktdeklarationen technische und funktionale Produktangaben, wie z. B. zum Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert), zur Lebensdauer oder Festigkeitskennwerten.

Die in diesem Forschungsprojekt erstellte Umweltproduktdeklaration für das Funktionsmodell fm.l.d deckt hierbei den Produktlebenszyklus von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen („cradle to gate with options“) ab. Dies beinhaltet die Gewinnung von Rohstoffen und deren Verarbeitung (A1), den Transport zum Herstellungsort (A2) sowie die Produktion (A3), die Abfallbehandlung (C3) und Beseitigung (C4). Als ergänzende Information wird das mögliche Wiederverwertungs-, Rückgewinnungs- und Recyclingpotential (D) angegeben. Es werden hierbei verschiedene Indikatoren, wie Umweltwirkungen (z. B. Treibhauspotential etc.), Ressourceneinsatz (z. B. Gesamt-Primärenergiebedarf etc.), anfallende Abfälle (z. B. radioaktiver Abfall etc.) sowie Stoff- und Energieflüsse (z. B. Stoffe zum Recycling etc.) bewertet.

Die Umweltproduktdeklaration soll helfen, die Nachhaltigkeit des Fassaden-Sandwichelements des Funktionsmodells fm.l.d in diesem Projekt zu bewerten.<sup>124</sup> Diese ist allerdings nicht durch eine unabhängige externe Stelle verifiziert worden und stellt kein offizielles Dokument dar.

### **4.6 Ökozertifizierung eines Musterbauvorhabens (BNB / Funktionsmodell fm.l.d)**

In einem letzten Schritt erfolgt die Ökozertifizierung nach dem Bewertungssystem für nachhaltiges Bauen (BNB) am bereits genannten Neubau eines Büro- und Verwaltungsgebäudes (Abb. A112) auf Basis aller verbauten Materialien und benötigten Energiemengen. Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), entwickelt vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, verfolgt das Ziel, die nachhaltige Qualität von Gebäuden und baulichen Anlagen in ihrer gesamten Komplexität zu erfassen und zu bewerten. Die Zertifizierung enthält die fünf Kriterien: ökologische, ökonomische, soziokulturelle und funktionale, technische sowie Prozessqualität. Die ökologische Qualität beurteilt hierbei die Wirkung auf die Umwelt sowie den aufzuwendenden Primärenergiebedarf (nicht-erneuerbar, erneuerbar).

II. Eingehende Darstellung  
Ökologische Bewertungen

<sup>122</sup> Vgl. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen

<sup>123</sup> Vgl. Qualitätssiegel Nachhaltige Gebäude

<sup>124</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A4.6, S. 74ff.

Zusätzlich zu den bereits betrachteten Lebenswegphasen in den vorangegangenen Kapiteln wird nun zusätzlich noch eine weitere Lebenswegphase mitbilanziert B6 (Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes während der Nutzungsphase):

- B6.1 (betriebsbedingter und regulierter Anteil für die Technische Gebäudeausrüstung)
- B6.2 (betriebsbedingter und nicht regulierter Anteil für Schwachstromanlagen, Videoüberwachung)
- B6.3 (nutzer- und nutzungsbedingter Anteil für den Nutzerstrom)

Die Wärmeversorgung des Gebäudes mittels Heizkörper sowie die Trinkwarmwasserbereitstellung erfolgt über eine Luft-Wasser-Wärmepumpe inklusive Pufferspeicher. Zusätzlich wird der Besprechungsraum im Erdgeschoss maschinell über eine Kompressions-Kälteanlage gekühlt. Die WCs verfügen jeweils über eine Abluft-Anlage und die Büroräume über eine Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Auf dem Dach ist eine Photovoltaik-Anlage zur regenerativen Stromerzeugung vorgesehen, dabei wird der erzeugte und selbst genutzte Strom der Bilanz gutgeschrieben. Die entsprechenden End- und Hilfsenergiemengen werden hierbei nach DIN V 18599 ermittelt.

Als wichtigste Nachhaltigkeitskriterien nach BNB gelten der Gesamt-Primärenergiebedarf und das Treibhauspotential, die Indikatoren Ozonschichtabbau-, Ozonbildungs-, Versauerungs- sowie Überdüngungspotential spielen eine nicht ganz so gewichtige Rolle.

Es zeigt sich, dass sich durch den Einsatz des Funktionsmodell fm.l.d als Außenwand der spezifische Gesamt-Primärenergiebedarf (PEges) sowie das Treibhaus- (GWP), Versauerungs- (AP) und Überdüngungspotential (EP) gegenüber den Varianten Ziegelwand, Kalksandsteinwand sowie Stahlbetonwand verringert. Im Vergleich zur Stahlbetonwand ist auch das Ozonbildungspotential (POCP) geringer. Nur das Ozonschichtabbaupotential (ODP) ist größer. (Abb. A116 und Tab. A49 + A50 im Appendix)

Zur Einordnung der Ökozertifizierung nach BNB wird ein Bewertungsmaßstab herangezogen. Dieser dient dazu, die Ergebnisse in einen übergeordneten Zusammenhang einzuordnen. Für die Beurteilung werden Ziel-, Referenz- und Grenzwerte festgelegt, an denen sich die Qualität eines Gebäudes orientiert.

#### Lebenswegphase A1 bis A3, B4, B6, C3 und C4

Nach diesem Bewertungsmaßstab erfüllen alle Indikatoren für die Umweltwirkung (GWP, ODP, POCP, AP und EP) für den Einsatz des Funktionsmodells fm.l.d als Außenwand den Zielwert nach BNB. Lediglich hinsichtlich des Ressourceneinsatzes (PEges, PEne und prozentualer Anteil PEE) wird der Referenzwert erreicht, dies gilt auch für die anderen untersuchten Außenwandaufbauten mit Ausnahme der Holzrahmenbauwand, welche hinsichtlich des Einsatzes des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs den Zielwert erfüllen kann. Weiterhin verfehlen die Ziegel-, Kalksandstein- sowie die Stahlbetonwand nur knapp den Zielwert hinsichtlich des Treibhauspotentials. (Abb. A116 und Tab. A49 im Appendix)

#### Lebenswegphase D

Das mögliche Recyclingpotential des kompletten Gebäudes inklusive des Funktionsmodells fm.l.d als Außenwand ist für alle Indikatoren im Vergleich mit allen untersuchten marktüblichen Außenwandaufbauten, mit Ausnahme des Ozonbildungspotentials gegenüber der Stahlbetonwand, am größten. Für das Potential gibt es keinen Bewertungsmaßstab, dieses Werte werden lediglich als ergänzende Informationen aufgeführt. (Abb. A116 und Tab. A50 im Appendix)

### **4.7 Zusammenfassung**

Die ökologischen Vorteile der in diesem Projekt untersuchten Fassaden-Sandwichelemente auf Basis von Leichtbeton mit nano- und mikrostrukturierten Hochleistungsdämmstoffen ergeben sich vor allem durch eine erhöhte Flächen- und Ressourceneffizienz. Die Fassaden-Sandwichelemente (Schichtdicke: 17 cm) können bei einem in etwa gleich großen Wärmedurchgangskoeffizienten um 15 cm (gegenüber Holzrahmenbauwand) und um 24 cm (gegenüber Ziegelwand) schlanker ausgeführt werden. Dabei kann bei gleichbleibender Bruttogrundfläche des im Projekt betrachteten Beispiel-Bürogebäudes eine Nettogrundfläche von bis zu 4,8 % gegenüber einer Ziegelwand hinzugewonnen werden. Bei einer gleichbleibenden Nettogrundfläche kann hingegen die Bruttogrundfläche um bis zu 4,5 %, ebenfalls im Vergleich zur Ziegelwand, reduziert werden. Dies bedeutet folglich auch eine Verringerung des Ressourceneinsatzes (Primärenergiebedarf) und der Auswirkungen auf die Umwelt (Treibhaus-, Ozonschichtabbau-, Ozonbildungs-, Versauerungs-, Überdüngungspotential).

In Zahlen bedeutet dies eine Reduzierung des Gesamt-Primärenergiebedarfs gegenüber einer Stahlbetonwand um ca. 4,4 %. Auch gegenüber der Ziegel- und Kalksandsteinwand lassen sich etwa 0,6 % bzw. 0,8 % einsparen. Lediglich gegenüber der Holzrahmenbauwand kommt es zu einem 8,8 % höherem Gesamt-Primärenergiebedarf. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich gegenüber den meisten in diesem Projekt untersuchten Wandaufbauten reduzieren

(Ziegel: -2,9 %, Kalksandstein: -2,6 %, Stahlbeton: -4,0 %), hingegen zeigt die Holzrahmenbauwand leicht geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Funktionsmodell fm.I.d (-0,5 %). Bis auf das Ozonschichtabbaupotential können auch die restlichen Umweltwirkungen (Ozonbildung, Versauerung, Überdüngung) gegenüber den marktüblichen Wandaufbauten (Ausnahme: Holzrahmenbauwand) reduziert werden.

Durch einen höheren Anteil an regenerativen (z. B. Pflanzenkohle, Hanf, Holz, Kork etc.) oder wiederverwerteten Materialien, vor allem als Ersatz für den Zement und den Blähton-Zuschlagstoffen (z. B. SysCompound als Ersatz) im Leichtbeton, können der Ressourceneinsatz und die Auswirkungen auf die Umwelt weiter gesenkt werden. Dies bestätigen auch die Ergebnisse mit alternativen Rezepturen aus den Materialexperimenten.

Der in der Bilanzierung verwendete mineralische Hochleistungs-Dämmstoff Calostat und die Vakuum-Isolationspaneel Vacupor weisen momentan noch aufgrund der eingesetzten Materialien und des relativ hohen Energieeinsatzes zur Herstellung eine nicht ausreichend gute Ökobilanz auf. Hier könnte das Lignin-Aerogel durch eine regenerativere Rezeptur (z. B. durch einen höheren Anteil an Gras / Stroh) und einem geringeren sowie regenerativen Energieeinsatz die Ökobilanz verbessern. Auch könnten neuere Umweltproduktdeklarationen für die beiden Kerndämmstoffe Calostat und VIP das Gesamtergebnis entscheidend beeinflussen.

Hingegen zeigt das Funktionsmodell fm.I.d gegenüber allen betrachteten marktüblichen Wandaufbauten ein höheres mögliches Recycling- und Wiederverwertbarkeitspotential falls eine sortenreine Trennung durchführbar ist. Sowohl die Leichtbetonschichten, als auch der Hochleistungsdämmstoff und die Vakuum-Isolationspaneel weisen hierbei, vor allem durch die vermiedene Produktion von Primärmaterial, ein hohes Wiederverwertbarkeitspotential auf.

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung unter Berücksichtigung von Lignin-Aerogel (Funktionsmodell fm.I.e) ergeben sich hinsichtlich des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs und des Treibhauspotentials deutlich größere Werte, das liegt an mehreren Gründen:

- die Leichtbetonrezepturen in der Wirkungsabschätzung enthalten zu 100 % Zement und es wird nur die Lebenswegphase A1 (Rohstoffversorgung) betrachtet
- das Lignin-Aerogel in der Wirkungsabschätzung enthält zu 100 % Holz und in einer deutlich höheren Menge (125 kg pro m<sup>3</sup> Lignin), es wird ebenso nur die Lebenswegphase A1 (Rohstoffversorgung) betrachtet
- für das Vakuum-Isolationspaneel (Fa. Porextherm GmbH) wurden noch ältere Kennwerte, welche mittlerweile durch neuere ersetzt wurden, verwendet. Die älteren Werte sind tendenziell besser hinsichtlich ihrer Ökobilanz
- für das Dämmmaterial Calostat (Fa. Evonik Operations GmbH) wurden noch ältere Kennwerte, welche mittlerweile durch neuere ersetzt wurden, verwendet. Die älteren Werte sind tendenziell besser hinsichtlich ihrer Ökobilanz

II. Eingehende  
Darstellung  
Ökologische  
Bewertungen

## 5 Optimierungen zu 'prototypischem' Fassadenbauteil

II. Eingehende Darstellung

### 5.1 Untersuchungen zur Eignung der Lösungsstrategien im baulichen Kontext

Optimierungen Fassadenbauteil

Darüber hinaus wird die Bauteilentwicklung insbesondere mit Blick auf praktikable Einsatzmöglichkeiten, Montageabläufe auf der Baustelle, Gestaltungsmöglichkeiten und einfacher, kostengünstiger Konstruktion beleuchtet. Dies auch in Bezug auf Materialwahl und Fügung.

Bei der Randausbildung soll ein leichter Austausch von Elementen wenn möglich Priorität haben. Damit wären Konzepte mit einer Art Nut und Feder-Fügung/ Befestigung zunächst nachgeordnet zu betrachten. Wichtig im Bereich der Randausbildung ist die kraftschlüssige Verbindung der beiden Deckschichten aus (Holz-)Leichtbeton.

Bei den Fugendichtungen ist der Einsatz von speziellen Profilen und Dichtungsmassen denkbar. Eine mineralische Ausbildung (z. B. LB-Mörtel) wird möglicherweise zu Rissbildungen führen. Grundsätzliche Fügungsmöglichkeiten horizontal und vertikal werden untersucht. Zu unterscheiden ist u. a. zwischen geradem Stoß und versetzter Fügung. Bei einem Versatz muss insbesondere die Stabilität der Dämmung und der möglichen textilen Randbewehrung geprüft werden. (Abb. 78) Es wird aktuell davon ausgegangen, dass für Transport und Montage Platten zum Schutz erforderlich sind.

Des Weiteren werden Prinzipien der Eckausbildung (A123 + A124 im Appendix) sowie Integrationsmöglichkeiten von weiteren Bauteilen untersucht. Ergänzend erfolgen erste Überlegungen zur Randausbildung mit Einbindung von Fensterelementen (Horizontalschnitt 1:5); besondere Prüfung erfahren auch hierbei FSE mit einem Versatz bezüglich der offenen Dämmung. (Abb. 77 + 79 und A122 im Appendix)

Im Bürobau ist der Anteil der Fensterflächen meist größer als 1/3 der dem Raum zugeordneten Fassadenfläche. Dies ist auch im Wohnungsbau – bezogen auf einzelne Räume – oftmals vorauszusetzen. Daraus ergibt sich für einen zweckmäßigen Einsatz der Fassaden-Sandwichenelemente folgendes:

- Für Lüftungs- und Klimageräte gibt es in Kombination mit Fensterelementen zahlreiche Möglichkeiten auf dem Markt.
- Wesentlich flexibler muss bei der Positionierung von Elektro- und Datendosen geplant werden können. Dies lässt sich mit Bodentanks (Bürobau) und vertikalen Installations-säulen umsetzen. Für letztere Variante wurden Konzepte in Kombination mit der Bauteilfügung erarbeitet. (Abb. 80 + 81) Je schmaler die FSE sind, umso flexibler kann dies eingesetzt werden.
- Werden Fenster mit Brüstung eingesetzt, ist es konstruktiv besser und auch wirtschaftlicher, die geschoßhohen FSE mit Brüstung vorzufertigen und im Brüstungsbereich z. B. dezentrale Lüftungsgeräte und Elektroinstallation zu integrieren.

Neben dem grundsätzlichen Aufbau des Fassaden-Sandwichenelementes (Abb. 19) werden vier Varianten der geometrischen Positionen der FSE zum Tragwerk aufgezeigt, als Grundlage für die baukonstruktive Vertiefung: (Abb. 20)

- eingestellt (Abb. 77, 1. Zeile mitte und rechts)
- davor durchlaufend (Abb. 77, 1. Zeile links)
- Deckenblende (integriert)
- Deckenblende (additiv) (Abb. 77, 1. Zeile mitte)

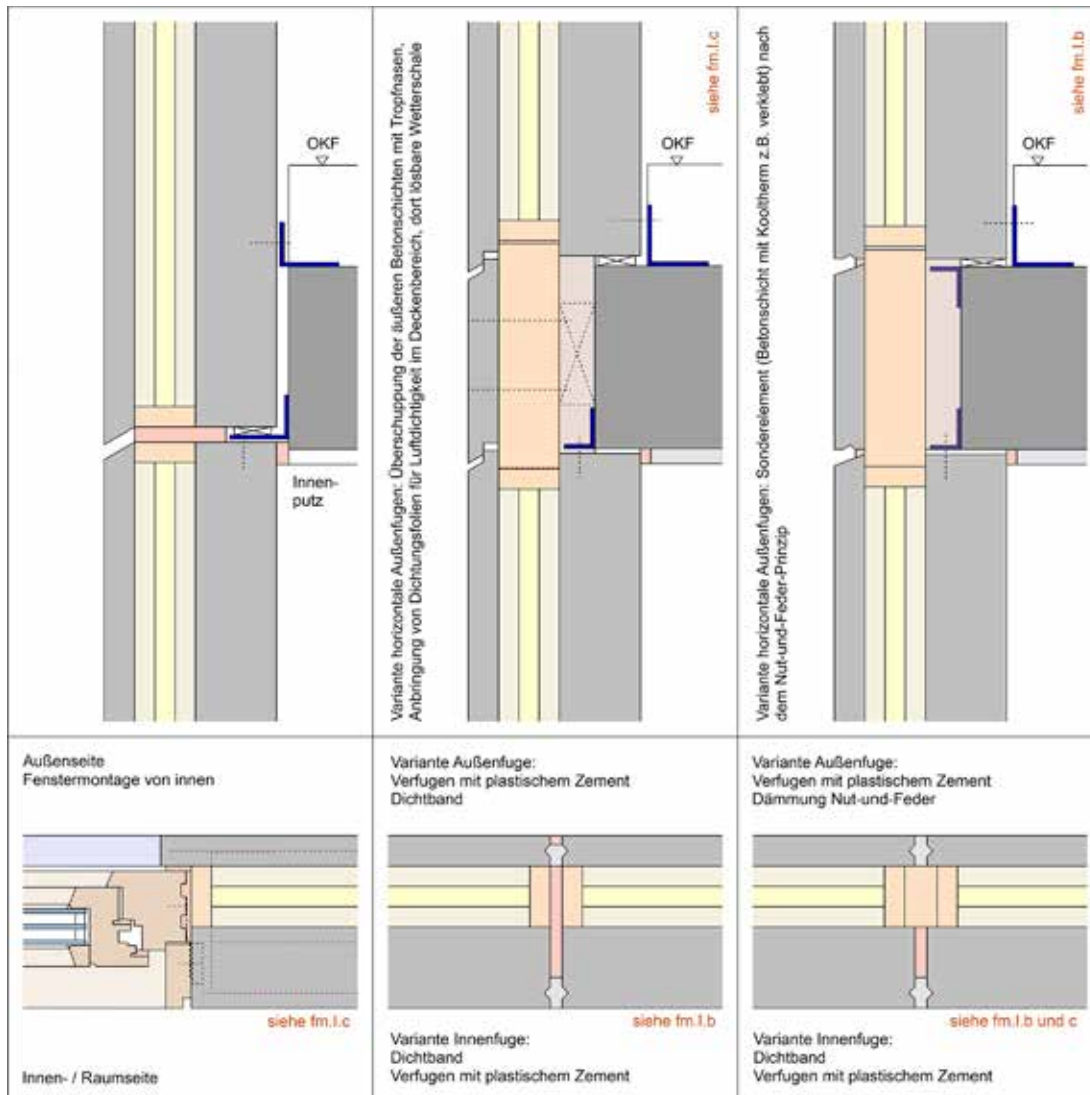
Die Lage zum Tragwerk berührt konstruktive, bauphysikalische und gestalterische Anforderungen. Zentral ist die Handhabung des Wärmeschutzes im Bereich der Geschossdecken bzw. der tragenden Wände in Schottenbauweise.

Die Ausführung der Befestigung des Fassaden-Sandwichenelements am Tragwerk (Geschossdecken) soll mit marktüblichen Systemen erfolgen. Zur Reduzierung von Wärmebrücken sind thermisch optimierte Befestigungen (Thermoanker) einzusetzen.

Darauf aufbauend werden Renderings des Fassaden-Sandwichenelements – auch gerade im Einsatzbereich Gebäudesanierung und Neubau – erarbeitet. (Abb. 91 + 93, Seite 85 + 87 und Abb. A129 + A130 im Appendix)

Die Bezüge und Schnittstellen der Fassadenelemente untereinander und zur Primärkonstruktion des Gebäudes mit z. B. seinen tragenden Deckenplatten werden näher betrachtet, um vor allem Einflüsse auf die Ausbildung der Ränder bzw. Flanken der Fassadenelemente besser zu verstehen. Dies ist auch im Vorfeld einer experimentellen Umsetzung in Form von Funktionsmodelle geboten. Dazu bietet der Stand der Technik im Montagebau eine Fülle von Lösungen an. (Abb. 77)

Für eine typische Einbausituation werden Fallbeispiele in verschiedenen Maßstäben zeichnerisch dargestellt und mit kurzen Texten diskutiert. Als Standardsituation dient ein Geschossbau mit Stahlbetondecken und einer Geschosshöhe von gut drei Metern. Die



II. Eingehende Darstellung  
Optimierungen Fassadebauteil

Abb. 77 Fassadenbauteil: Lösungsstrategie I – Varianten zu Randausbildung / Fügung im baulichen Kontext als Beispiele / Funktionsmodell (Lösungsstrategie I / fm.I.a und fm.I.b) Vertikal- und Horizontalschnitt Maßstab 1:5 / verkleinert (Auswahl) (OHM-AR / Peter Bonfig)

Ableitung der vertikalen Lasten des Gebäudes, ob mit Stützen und / oder tragenden Wandscheiben, wird dabei nicht aufgezeigt oder variiert, da dies für die Beantwortung der entscheidenden Fragen nur eine untergeordnete Rolle spielt. (Abb. A131 – A140 im Appendix)

*Untersuchungen Schnittstellen / Fügungen zu Lösungsstrategie I und II*

Was die Lage zur Primärkonstruktion angeht, können die Fassadenelemente entweder komplett vor der Deckenkonstruktion liegen oder sie werden ganz oder teilweise auf die Deckenplatte aufgesetzt, was den Montagevorgang erleichtern kann. (Abb. 77) Im ersten Fall kann sich (muss aber nicht) das Element über die ganze Geschoßhöhe erstrecken, womit es nur eine horizontale Fuge pro Geschoss gibt. Im zweiten Fall ergibt sich in der Regel eine Unterbrechung mit einem Sonderelement auf Höhe des Deckenaufbaus, mit Vorteilen beim Schallschutz zwischen den beiden Geschossen. In beiden Fällen lassen sich Befestigungen der inneren tragenden Leichtbetonschicht auf der Oberseite der Stahlbetondecke im Bodenaufbau integrieren bzw. „verstecken“. Weitere Befestigungen sind an den Stirnseiten der Stahlbetondecken z. B. mittels Stahlwinkel möglich.

Der Ausgleich von Toleranzen und Bewegungen ist mit den üblichen Lösungen wie Langlöcher in den Befestigungsteilen, Klötze zum Unterlegen etc. möglich; hier gibt es viele Lösungen und entsprechende Produkte mit Justierungsmöglichkeiten in allen drei Dimensionen auf dem Markt. Die bevorzugt sichtbaren Oberflächen von der raumseitigen Tragschicht schränken die Befestigungsmöglichkeiten an der Unterseite der Deckenplatte ein, und das umso mehr, wenn auch die Unterseiten der Stahlbetondecken unverputzt oder unbekleidet vorgesehen sind.

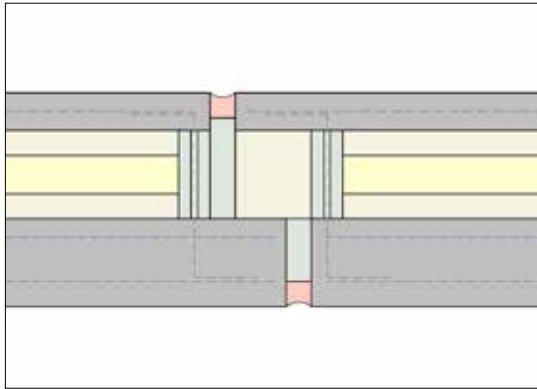


Abb. 78 Fassaden-Sandwichelemente (FSE), Bauteilstoß / Vertikale Fuge (kbp)

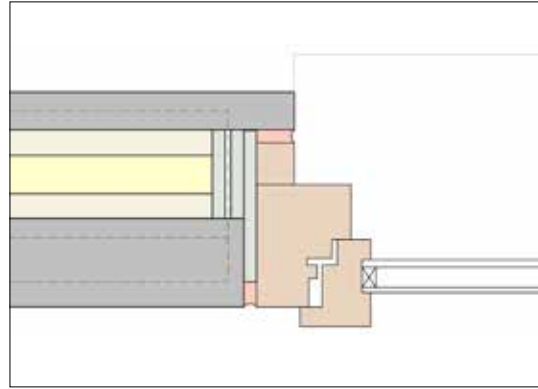


Abb. 79 Fassaden-Sandwichelemente (FSE), Einbindung Fenster (kbp)

II. Eingehende Darstellung  
Optimierungen  
Fassadenbauteil

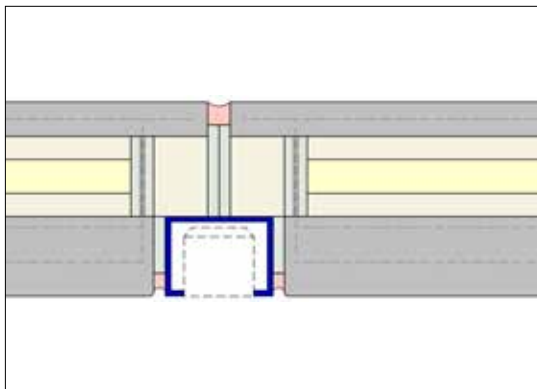


Abb. 80 Fassaden-Sandwichelemente (FSE), Einbindung Elektro (kbp)

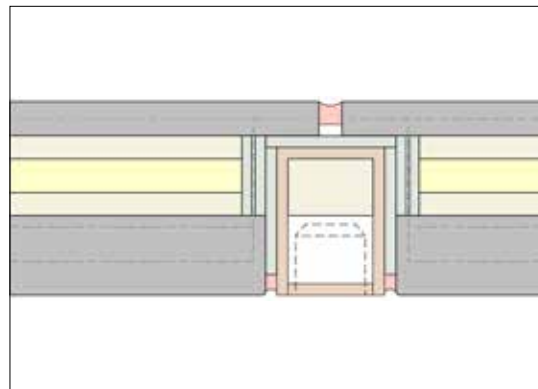


Abb. 81 Fassaden-Sandwichelemente (FSE), Einbindung Elektro (kbp)

Bei den Fallbeispielen werden stets die wichtigsten Lagebeziehungen und Fügungen der Fassadenelemente untereinander, zur Primärkonstruktion und zu ebenfalls raumhohen Fensterelementen behandelt.

Sonderelemente für Innen- und Außenecken können dabei ausgeklammert werden, weil ihre Ausführung nachrangig zu den vorläufigen Festlegungen gesehen werden kann. Auch wenn hier Fensterelemente in Holzbauweise gezeigt werden, sind die geometrischen Lagebeziehungen und Fügungen grundsätzlich mit kleinen Abweichungen auch auf andere Fensterausführungen mit anderen Materialien bzw. Werkstoffen übertragbar. Die Darstellungen sind für die verfolgten Zwecke schematisch gehalten und haben nicht den Anspruch einer Ausführungsplanung.

## 5.2 ,Praxisbeispiel‘ „Kompaktes Hofhaus“

Vorteilhafte Merkmale der entwickelten schlanken Fassadenbauteile werden nachfolgend an einem Fallbeispiel eines sog. „kompakten Hofhauses“ im Sinne eines Ausblicks aufgezeigt und erläutert. Das „kompakte Hofhaus“ wurde als neuartiger Hofhaustyp an der Hochschule für Technik Stuttgart (HFT) entwickelt, untersucht und umfangreich publiziert.<sup>125</sup>

Zu Quartieren addiert stellt er den Bewohnern bei geringem Landverbrauch urbane Lebensräume zur Verfügung und kann hohe Dichte, Diversität von Nutzung sowie ein hohes Maß an Privatheit und Wohnqualität in Innen- wie Außenräumen miteinander vereinigen, in Neubau- wie in Bestandsituationen.

Definitionsgemäß wird dies dadurch erreicht, dass nicht einsehbare Höfe / Außenräume als ausschließlich private Nutzflächen in die Gebäudestruktur integriert werden (anstelle von exponierten „Abstandsflächen“ mit geringerem Nutzwert außerhalb des Gebäudes) und über diese Bereiche auch die Belichtung und Belüftung erfolgen kann. Innen- und Außenräume können so zu einem geschützten und eng miteinander verzahnten Lebensraum verschmelzen.

Die erarbeitete Typologie besteht aus drei- bis fünfgeschossigen flächenoptimierten Grundtypen, die variiert werden. Ihre baukonstruktive Umsetzung wird gemäß Nachhaltigkeitsprinzipien vorzugsweise in Holzbauweisen gesehen. Alle relevanten Flächenbauteile wurden an der HFT Stuttgart konkret mit einem angestrebten U-Wert von ca. 0,18 W/(m<sup>2</sup>K) untersucht.

Das nachfolgende Beispiel (Abb. 82 + 83) zeigt ein dreigeschossiges, nicht unterkellertes Gebäude, das als „Einfamilienhaus“ auf eigenem Grund funktioniert. Es verfügt über einen zentralen, nicht einsehbaren Hof, der im ersten Obergeschoss beginnt und sich abgestaffelt im zweiten Obergeschoss fortsetzt.

An drei Seiten schließen weitere kompakte Hofhäuser (nicht dargestellt) an die geschlossenen Brandwandersatzwände an. Die Stirnseite (in der Abbildung links mit Balkon) öffnet sich z. B. zu einem öffentlichen Raum, von dem das Wohnhaus auch erschlossen wird. In der Variante wird eine Holzmassivbauweise dargestellt, bei der die massiven Flächenbauteile aus Vollholz (wo erforderlich) mit Holzfaserdämmstoffen ergänzt sind. Diese können als Wärmedämmverbundsystem gehalten oder mit einer hinterlüfteten Bekleidung versehen werden.

Die Vorteile von schlanken Fassadenbauteilen aus Leichtbeton mit Hochleistungsdämmstoffen werden in einem Vergleich mit zwei Varianten des Grundrisses des zweiten Obergeschosses veranschaulicht. In der unteren werden die gedämmten Holzmassivbauwände durch die im HLBhybrid-Projekt entwickelten Leichtbetonwände mit einem Dämmkern aus VIPs und AlphaCore (nach Funktionsmuster fm.I.b, hier leuchtend grün dargestellt) ersetzt. Dies betrifft die Fassaden zum Innenhof wie zum öffentlichen Raum. Neben einer Erhöhung der Wohnfläche (Flächengewinn ca. 1,1 m<sup>2</sup> im 2. OG) sind ein sehr guter Witterungsschutz bei gleichzeitiger Nichtbrennbarkeit der Leichtbetonschichten als Vorteile zu nennen. Durch die Optimierung der Nutzflächen lassen sich Mehrkosten für sehr schlanke Leichtbetonfertigteile gegenüber üblichen Aufbauten aus dem Holzbau zu einem Teil kompensieren.

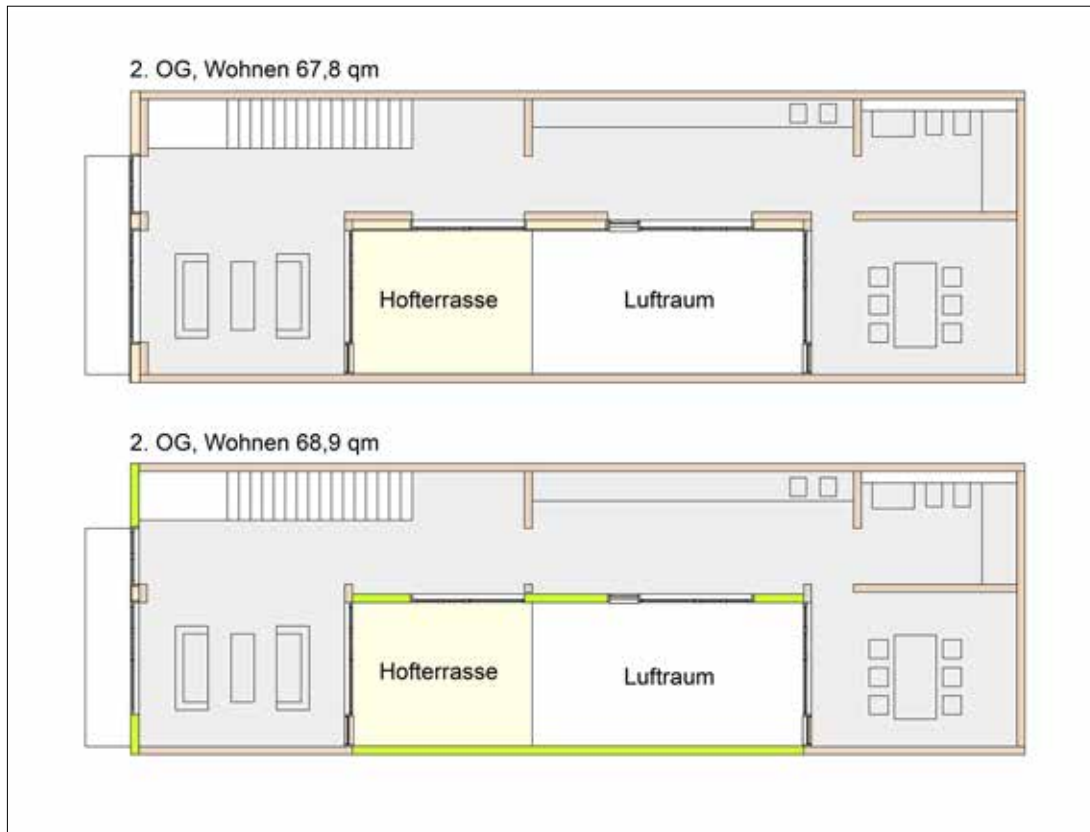
Grundsätzlich können bei kompakten Hofhäusern nichttragende wie tragende Fassadenbauteile in Holzmassiv- oder in Holzrahmenbauweise (Abb. A147 im Appendix) durch flächenoptimierte HLBhybrid-Fassadenelemente ersetzt werden, womit die Flächeneffizienz kompakter Hofhäuser weiter erhöht wird. Mit lignin-basierten Aerogelen im Aufbau lässt sich z. B. gegenüber Vakuumdämmungen der ökologische Fußabdruck verbessern.

Dabei können nichttragende Aufbauten gemäß Funktionsmuster beider Strategien I und II (z. B. fm.II.d und fm.II.e in Abb. A60 + A61 im Appendix), herangezogen werden. Auch sind tragende Bauteile nach Strategie II mit lignin-basiertem Aerogel und Silikaaerogel-Blankets als Dämmstoffe vorstellbar (Abb. A148 im Appendix), womit der Einsatz noch universeller wird.

So ist auch ein tragendes Fassadenbauteil mit einer Bauteilstärke von 190 mm und einem U-Wert von ca. 0,2 W / (m<sup>2</sup>K) denkbar. Wie bei einer Holzrahmenbauweise üblich übernehmen die Holzpfeiler die Vertikalkräfte, die ausgedünnten Holzleichtbetonlagen in Sichtqualität (LBI und LBA) wirken wie aussteifende Bepunktungen und ersetzen z. B. Holzwerkstoffplatten oder Holzschalungen mit dem enormen Vorteil hoher Witterungsbeständigkeit bei gleichzeitiger Nichtbrennbarkeit.

Stellt man diese tragenden Fassadenelemente mit Aerogelen nach Strategie II maßstabsgerecht bei gleichem U-Wert in eine Reihe mit anderen tragenden Außenwandkonstruktionen (Abb. A142 im Appendix), so wird die Flächen- bzw. Raumeffizienz im Vergleich gut sichtbar.

II. Eingehende  
Darstellung  
Optimierungen  
Fassadenbauteil



II. Eingehende Darstellung  
Optimierungen  
Fassadenbauteil

Abb. 82 Kompaktes Hofhaus Typ 121-K1-3-1-2.8. Grundriss 2. OG und Querschnitt in zwei Varianten (OHM-AR / Peter Bonfig)

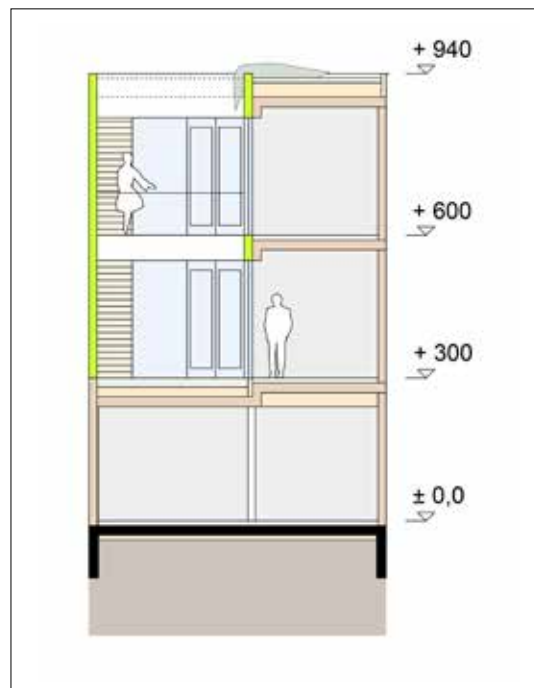
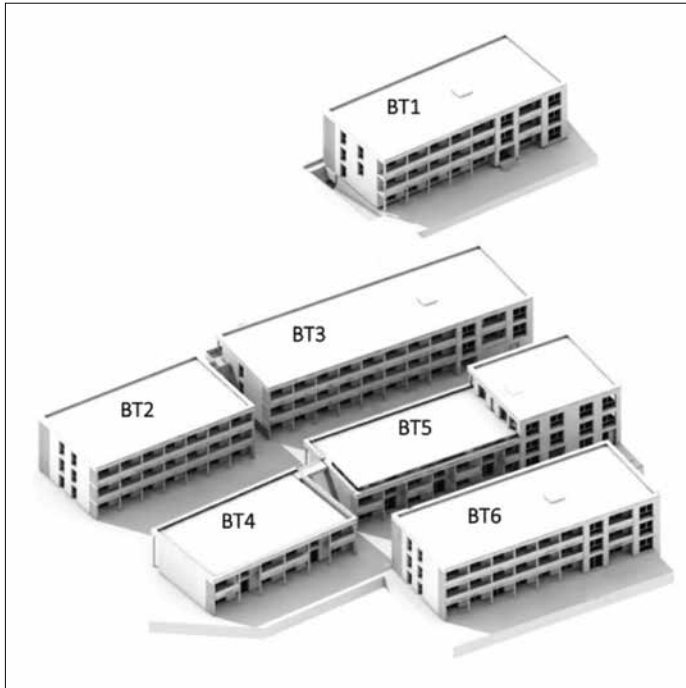


Abb. 83 Querschnitt- und Aufsicht eines schlanken und gleichzeitig tragenden Fassadenbauteils in Rahmenbauweise (Strategie II) mit lignin-basierten Aerogelen als Schüttung (in der Länge mittels Wabengitterstrukturen stabilisiert) und Silika-Aerogel-Blankets. Der abgeschätzte U-Wert liegt bei etwa  $0,2 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$ . (OHM-AR / Peter Bonfig)

Ergänzend zu bereits festgelegten Schichtdicken des betrachteten Bauteils werden die Dämmstoffarten und -stärken nach den erforderlichen U-Werten für das jeweilige Bauteil nach KfW-Standard 55 ermittelt, für die Außenwandbauteile sind das einheitlich ca.  $0,18 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$ .

Im Gegensatz zu den Holzbauvarianten mit Holzfaserdämmung ist der Aufbau Wat-M-290-B eine Stahlbetonwand mit Wärmedämmverbundsystem und entsprechenden Hartschaumplatten und der Aufbau Wat-R-200-B, ein HLBhybrid-Aufbau ähnlich Abb. 30, jedoch mit einer 110 mm dicken Schüttung aus lignin-basiertem Aerogel, um den angestrebten U-Wert zu erreichen. (Abb. A141 im Appendix)



II. Eingehende Darstellung  
Optimierungen Fassadebauteil

Abb. 84 Beispiel für Kostenvergleich. Projekt Kleiberweg in München-Lochhausen der Genossenschaft raum-FAIR (2026) (GEA GmbH, 28.07.2023 , S. 7)

### 5.3 Wirtschaftlichkeit – Überschlägige Abschätzung von Kosten

Auf Grundlage einer Gebäudeplanung aus der Praxis wird eine Gegenüberstellung von Holzrahmenbau-Außenwänden mit dem Lösungsansatz der schlanken Fassaden-Sandwich-elemente aus dem HLBhybrid-Projekt insbesondere in Bezug auf Raumgewinn berechnet. Als Vergleich dient ein Wohnungsbau in München-Lochhausen der Genossenschaft raum-FAIR (2026).<sup>126</sup> (Abb. 84) Um bezüglich des Wärmedurchgangskoeffizienten vergleichbare Werte (U-Wert 0,20 W/m<sup>2</sup>K) zu erhalten, muss das Ständerwerk der Holzrahmenbauwand mit der Dämmstärke von 30 cm auf 23 cm reduziert werden.<sup>127</sup> Beim Vergleich (Abb. 85)

- Holzrahmenbauweise d = 400 mm (Referenz) = 310 €/m<sup>2</sup>
- Fassaden-Sandwichelement d = 190 mm / ca. 200 kg/m<sup>2</sup> = 500 €/m<sup>2</sup>
- Fassaden-Sandwichelement d = 180 mm / ca. 190 kg/m<sup>2</sup> = 550 €/m<sup>2</sup>

zeigen sich bauteilbezogene Mehrkosten für das Fassaden-Sandwichelement von über 60 % bzw. knapp 80 %. (Tab. 14)

Bei diesem Modell ist zu berücksichtigen, dass ohne vorliegende praktische Erfahrungen in Herstellung (Fabrikhalle) wie auch Handhabung (Baustelle) bei der Kalkulation des Fassaden-Sandwichelements, aufgrund etlicher Unwägbarkeiten, noch große Sicherheiten enthalten sind. Geht man von erprobten Abläufen in den Prozessen aus und reduziert die o. g. Werte um beispielsweise 20 %, reduzieren sich die bauteilbezogenen Mehrkosten für das Fassaden-Sandwichelement im Vergleich zur Holzrahmenbauweise bereits auf 30 % bzw. 40 %. (Tab. 14)

Betrachtet man demgegenüber den Flächengewinn bei den o. g. Wohnungsbau von etwa 326 m<sup>2</sup> (FSE 180 mm) bzw. 309 m<sup>2</sup> (FSE 190 mm) wird deutlich, dass pro Gebäude eine Wohnung mehr entstehen könnte. Darüber hinaus bestehen deutliche Kostenvorteile beim durchschnittlichen Kaufpreis.

Die Preise für Neubauwohnungen in München-Lochhausen liegen bei ca. 7.000 €/m<sup>2</sup> (Netto/ Wohnfläche).<sup>128</sup> Bei einem Flächenplus von 326 m<sup>2</sup> ergibt das einen zusätzlichen Betrag von 2.282.000 €. Selbst bei einem durchschnittlichen Kaufpreis in Deutschland gerundet von 4.400 €/m<sup>2</sup> (Netto/ Wohnfläche)<sup>129</sup> beläuft sich ein zusätzlicher Verkaufserlös auf 1.434.400 €. Damit ist zu erwarten, dass die Mehrkosten bei dem o. g. Praxisbeispiel selbst bei hoch angesetzten Bauteilkosten für das Fassaden-Sandwichelement über den Flächengewinn amortisierbar sind. Auf angespannten und hochpreisigen Wohnungsmärkten wie München, sind sogar deutliche wirtschaftliche Vorteile möglich.<sup>130</sup> (Tab. 15)

<sup>126</sup> Vgl. GEA GmbH, 28.07.2023

<sup>127</sup> Vgl. Gump & Maier, 24.11.2023

<sup>128</sup> Vgl. Immoportal GmbH, Burgthann

<sup>129</sup> Vgl. JLL München Real Estate, München

<sup>130</sup> Allerdings kann diese Abschätzung nur eine erste Annäherung darstellen. In der Baupraxis beeinflussen sehr viele Faktoren eine Kostenkalkulation.



## 5.4 Materialexperimente ((Holz-)Leichtbeton)

Anknüpfend an die Arbeiten „Materialentwicklung (Holzleichtbeton)“<sup>131</sup> konnten parallel zu den Projektarbeiten umfangreiche Materialexperimente zu nachhaltigen Sonderbetonen im Rahmen von zwei Lehrveranstaltungen im Masterstudium<sup>132</sup> sowie einer Masterabschlussarbeit<sup>133</sup> durchgeführt werden.

Bei dem Fassaden-Sandwichelement / Lösungsprinzip I werden aufgrund der beschriebenen materialspezifischen Einschränkungen bei Holzleichtbeton für die innere und äußere Deckschicht vielfältige Varianten von Leichtbetonmischungen verfolgt und untersucht. Mit Lösungsprinzip II, in Verbindung mit einem anderen Herstellungsprozess, eröffnen sich nun wieder größere Spielräume des Einsatzes von Sonderbetonen mit der Verwendung von unterschiedlichsten Zusatzstoffen.

Hierbei werden für die Vorsatzschale nun Mischungen untersucht, die die mechanischen Anforderungen an einen Plattenwerkstoff erfüllen. Neben dem Einsatz in der Fassade sind diese Leichtbetone prinzipiell auch für Innenwandbekleidungen<sup>134</sup> und Unterdecken<sup>135</sup> geeignet.

Bzgl. der Festigkeitseigenschaften sind avisierte Mindestwerte:

- Biegezugfestigkeit nach 28d  $f_{ctm} > 2 - 3 \text{ N/mm}^2$
- Druckfestigkeit nach 28d  $f_{ctm} > 10 - 15 \text{ N/mm}^2$

Für die ökologischen Zielsetzung wird ein niedriger Zementgehalt von  $240 \text{ kg/m}^3$  angestrebt sowie der möglichst durchgängige Einsatz von Sekundärrohstoffen als Zementersatz oder Bindemittelergänzung.

### 5.4.1 Randbedingungen

Ein Schwerpunkt der Materialexperimente liegt auf dem Einsatz von

- Pflanzenkohle (bzw. Biokohle bzw. Pyrolysekohle) (Abb. A145 im Appendix)
- Tonmehl (thermisch aktivierte (calcinierte) Tone) (Abb. A146 im Appendix).

Beide Betonzusätze dienen dabei zusätzlich als Bindemittel und Füllstoff zur ‚Abmagerung‘ der Leichtbetone durch Substitution von Zement. Pflanzenkohle, die zusätzlich auch als CO<sub>2</sub>-Speicher im Beton fungiert, kann vor allem mechanische Eigenschaften wie Druckfestigkeit, aber auch die Biegefestigkeit und den Feuerwiderstand verbessern.<sup>136</sup> Dabei werden als Zementersatz durch Pflanzenkohle bisher teils eher sehr zurückhaltende 1–2 Masse-% Pflanzenkohle von der Gesamtbetonmasse vorgeschlagen, „um die Druck- und Biegefestigkeit zu verbessern“.<sup>137</sup> Aufgrund der niedrigen Dichte der Pflanzenkohle führen 2 Masse-% aber bereits zu einem Anteil von rund 15 Volumen-% in der Mischung.

Auch Tonmehl (calciniertes Ton) wird als „ein entscheidender Baustein bei der Dekarbonisierung der Zementindustrie“ betrachtet und wird zukünftig aufgrund der leichten Verfügbarkeit in Deutschland an Bedeutung gewinnen. Dabei setzt man neben „natürlich vorkommende(n) Tone(n), ... auch tonreiche Sekundärrohstoffe“ ein. Vorteile sind, aufgrund deutlich niedrigerer Temperaturen bei der Herstellung, „etwa (um) ein Viertel“ reduzierte CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber der Zementproduktion.<sup>138</sup>

Einen weiteren Schwerpunkt bilden organische Materialien als Alternative zu Gesteinskörnungen (Zuschlagsstoffe), wie:

- Hanfschäben bzw. -späne (Abb. 86)
- Holzpartikel (Sägespäne aus Fichtenholz) (Abb. 87)
- Korkreststoffe (Abb. A149 im Appendix).

An der Technischen Hochschule Nürnberg bestehen Erfahrungen mit Holzleichtbeton<sup>139</sup> sowie Hanffasern und -schäben in mineralisch gebundenen Baustoffen. Daran anknüpfend gilt es bisher identifizierte Nachteile wie insbesondere ein hoher Zementgehalt in Kombination mit Zementen mit hoher Frühfestigkeit durch neue nachhaltigere Mischungen mit CO<sub>2</sub>-reduzierten Zementen sowie Zementersatzstoffen zu kompensieren, um die mechanischen sowie gestalterischen Vorteile von Holz und Hanf in plattenförmigen Bauteilen aus Leichtbeton zu stärken. Neu hingegen sind die Arbeiten mit rezykliertem Korkgranulat.

131 Vgl. Kapitel 2.1, S. 30

132 Krippner /Freimann, Wintersemester 2024/2025; Krippner/Freimann, Wintersemester 2025/2026

133 Meyerhöfer, Februar 2025

134 Vgl. Krippner/Freimann, November 2011, S. 71-78

135 Vgl. Krippner et al., 2008, S. 64-71

136 <https://biochar-zero.com/de/bauindustrie/pflanzenkohle-in-beton/> <13.02.2026>

137 Lin, Xuqun et al., 20 September 2023

138 <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/mineralische-werkstoffe-baustoffrecycling/nachhaltige-bindemittel/calcinierte-tone.html> <13.02.2026>

139 Vgl. 4.1 Außenwand-/Fassadenbauteile aus Holz(leicht)beton (HLB/ HB), S. 13ff.



Abb. 86 Hanfschäben und -späne (Krippner/Freimann, Wintersemester 2025/2026) (Ohm-AR)



Abb. 87 Holzpartikel (Sägespäne aus Fichtenholz) (Krippner/Freimann, Wintersemester 2025/2026) (Ohm-AR)

II. Eingehende Darstellung  
Optimierungen Fassadebauteil

Insbesondere bei den Zement-Verbundwerkstoffen mit organischen Zusätzen wird neuerdings auch verstärkt mit einem alternativen puzzolanischen Bindemittel auf Basis von Braunkohlenflugasche gearbeitet. Das Produkt „SysCompound (Basic Z)“<sup>140</sup> (Abb. A150) weist bzgl. der CO<sub>2</sub>-Emissionen nur mehr etwa 45 kg CO<sub>2eq</sub> pro Tonne auf. Gegenüber einem Portlandklinker (CEM I) mit 665 kg CO<sub>2eq</sub> pro Tonne<sup>141</sup> ist das eine Reduktion um mehr als 90 %.<sup>142</sup> Darüber hinaus besteht die Erwartung, dass „SysCompound“ negative Einflüsse durch Hanf- und Holzinhaltstoffe auf den Hydrationsprozess vermindert oder gar unterbindet.

Des Weiteren wird als ‚Gesteinskörnung‘ bei den Mischungen ohne organische Zusätze Recyclingmaterial anstelle natürlicher Gesteinskörnungen verwendet.<sup>143</sup>

- RC-Brechsand 0/2 GS-1 (aus Gleisschotterproduktion)<sup>144</sup> (Abb. A147 im Appendix)
- RC-Sand 0/5 RC-2 (aus Bauschuttproduktion)<sup>145</sup> (Abb. A148 im Appendix)

Als Zement wird weitgehend ein CO<sub>2</sub>-reduzierter „CEM II/C-M (S-LL)“<sup>146</sup> (Abb. A149 im Appendix) eingesetzt.

### 5.4.2 Zu den Ergebnissen

Im Bereich der anorganischen Materialien konnten durchweg wie erwartet sehr positive Ergebnisse, gleichermaßen bzgl. der Verarbeitung und der Festigkeitswerte, erzielt werden.

Die Mischungen mit Tonmehl zeigen hohe (abgeschätzte) Rohdichtewerte, die mit etwa 2000 kg/m<sup>3</sup> an der Grenze zwischen Leichtbeton und Normalbeton liegen. Bei den Festigkeiten werden nach 28 Tagen Biegezugfestigkeiten (BZF) zwischen 3,2 N/mm<sup>2</sup> und 7,4 N/mm<sup>2</sup> und Druckfestigkeiten (DF) zwischen 19,0 N/mm<sup>2</sup> und 56,0 N/mm<sup>2</sup> erreicht. Dabei variieren die stofflichen Anteile teils stark. So konnte der Zementanteil zwischen BKW\_M1 und BKW\_M5 um ein Drittel auf 240 kg/m<sup>3</sup> reduziert werden, was sich deutlich in den mechanischen Eigenschaften widerspiegelt; trotzdem werden die avisierten Mindestfestigkeiten von BKW\_M5 erfüllt. Im Rahmen der Entwicklungsschritte wurde der Gesamtbindemittelgehalt verringert (Reduktion Tonmehlgehalt um 80 % auf 151 kg/m<sup>3</sup>) und der Anteil Gesteinskörnung erhöht (Erhöhung um 60 % auf 1.447 kg/m<sup>3</sup>).<sup>147</sup>

Die Mischungen mit Pflanzenkohle erreichen ebenfalls Rohdichtewerte um 2.000 kg/m<sup>3</sup>, bei allerdings reduzierten Festigkeitseigenschaften. Nach 28 Tagen zeigen sich Werte zwischen 2,65 N/mm<sup>2</sup> und 5,22 N/mm<sup>2</sup> (BZF) und zwischen 9,30 N/mm<sup>2</sup> und 27,21 N/mm<sup>2</sup> (DF). Dabei führen Anteile von Pflanzenkohle (bezogen auf den Zementgehalt) bis zu 16 Masse-% zu guten Ergebnissen. Bei dem Versuch in der Mischung SL\_M1, Zement bis auf 12,5 Masse-% durch SysCompound zu ersetzen, plus 2 Masse-% Pflanzenkohle, werden angezielten die Mindestfestigkeiten auch nach 35 Tagen nur gerade so erreicht.<sup>148</sup>

Die Herausforderungen im Bereich der organischen Zusätze sind vielfältiger. Diese bestehen nicht nur in Entwicklung einer adäquaten Zusammensetzung, sondern betreffen auch stark

140 Consulta GmbH, Viechtach

141 <https://oekobaudat.de>

142 Fiedler, 28.03.2024, S. 16

143 DURMIN Entsorgung und Logistik GmbH, Nürnberg

144 Vgl. LGA, 11.09.2024a

145 Vgl. LGA, 11.09.2024b

146 Portlandkompositzement mit den Hauptbestandteilen Portlandzementklinker, Hüttensand und Kalkstein, Festigkeitsklasse 42,5 N; Schwenk Baustoffgruppe

147 Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 147ff.

148 Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 137ff.



II. Eingehende Darstellung  
Optimierungen Fassadenbauteil

Abb. 88 Corkcrete: CEM II/B-M, 10% Pigment, 4-8 mm Granulat. Plattenmuster 10 x 10 cm (links); Detailaufnahme (rechts) (Meyerhöfer, Februar 2025) (Ohm-AR)

den Mischvorgang selbst. Gleichwohl werden hier ebenfalls eine ganze Reihe sehr vielversprechender Resultate erzielt.

Bei ersten frühen Versuchen mit Hanfschäben werden von Stefanie Fischer verschiedene Mischungen untersucht, bei denen die Gesteinskörnung (Normsand) in 25 %-Schritten Hanfschäben ersetzen. Der Zementanteil (ChronoCem [Portlandzement (CEM I) mit Festigkeitsklasse 52,5 R; HeidelbergCement/ Heidelberg Materials]) bleibt unverändert bei etwa 490 kg/m<sup>3</sup>. Dabei erreichten die Proben (100 und 50 Volumen-% Schäbenanteil) bei den Festigkeitseigenschaften nach 28 Tagen Werte zwischen 2,4 N/mm<sup>2</sup> und 6,0 N/mm<sup>2</sup> (BZF) und zwischen 6,5 N/mm<sup>2</sup> und 32,6 N/mm<sup>2</sup> (DF).<sup>149</sup>

Das Ziel der weiteren Materialexperimente ist es, den Anteil von CEM II/C-M (S-LL) zu reduzieren und eine Substitution durch SysCompound zu untersuchen. Dabei zeigt die Mischung HJSA\_M2 (einem Dreistoffgemisch mit um 80 % reduzierten Zementanteil) nur Werte von 3,50 N/mm<sup>2</sup> (BZF) und 5,50 N/mm<sup>2</sup> (DF). Daher wird bei EEH\_M2 bis M4 der Zementanteil wieder etwas erhöht (bei einem 50/50-Verhältnis mit SysCompound) und Gesteinskörnung (RC-Sand, Kies) (zwischen 500 kg/m<sup>3</sup> und 700 kg/m<sup>3</sup>) eingesetzt. Das führt zu höheren Rohdichten, von etwa 900 kg/m<sup>3</sup> (HJSA\_M1 + M2) zu 1.350 kg/m<sup>3</sup> (EEH\_M1 - M4).

Bei diesen Versuchsreihen zeigt sich der positive Einfluss der Vorbehandlung der organischen Zusätze. Erst durch mehrtägige alkalische Vornässung (Wasser mit geringem Zementanteil) der Hanfschäben und einer getrennten Zugabe von SysCompound und anschließend Zement, werden Biegezug- über 3,0 N/mm<sup>2</sup> und Druckfestigkeiten über 14,0 N/mm<sup>2</sup> erreicht. Mit der Vorbehandlung kann ebenso der Volumenanteil von 6 bis 9 % auf über 40 % erhöht werden. Damit belegen die Versuche die Eignung von Hanfschäben für Plattenwerkstoffe, auch bei halbierten Gehalten eines Portlandkompositzementes.<sup>150</sup>

Bei den Experimenten mit Holzpartikeln steht im Vordergrund den Einsatz von Sonderzementen zu vermeiden und die Gehalte des Bindemittels (zwischen 389 kg/m<sup>3</sup> und 419 kg/m<sup>3</sup>)<sup>151</sup> zu reduzieren. Dabei bestätigen sich die Erfahrungen mit den Hanfschäben. Bei 210 kg/m<sup>3</sup> Zement und SysCompound 210 kg/m<sup>3</sup> und Vornässung der Holzpartikel werden die gestellten Mindestanforderungen (knapp) erreicht, wobei gegenüber Hanf die Druckfestigkeitswerte mit über 9,0 N/mm<sup>2</sup> niedriger ausfallen. In Mischung BHK\_M4 werden beide organische Materialien (2/3 Holz, 1/3 Hanf) auch gemeinsam als Zusatz eingesetzt; mit 6 bis 9 Volumen-% fällt der Holzanteil in den Mischungen geringer aus. Auch hier führt, wie bei den Hanfschäben, der Einsatz von Gesteinskörnung (RC-Sand, Kies) (400 kg/m<sup>3</sup>) zu höheren Rohdichten.

Eine Besonderheit ist die Mischung FH\_M2. Hier wird zusätzlich Pflanzenkohle eingesetzt mit etwa gleichen Anteilen (33,3 Masse-%) zu den beiden Bindemitteln. Die Festigkeitswerte (nach 14 Tagen) liegen zwar im unteren Bereich, dennoch kann am Beispiel eines Plattenmusters (Abb. A154 im Appendix) erfolgreich erprobt werden, dass auch deutlich höhere Anteile von Pflanzenkohle bei nichttragenden Bauteilen eingesetzt werden könnten.<sup>152</sup>

Ein neues Arbeitsfeld eröffnet Lucas Meyerhöfer mit seinen Untersuchungen zur Kombination von rezyklierten Korkgranulaten mit Zement und alternativen Bindemitteln. Dabei werden verschiedene Granulatgrößen (0-4 mm bis 8-16 mm) und unterschiedliche Bindemittel für einen neuartigen Kork-Zement-Verbundwerkstoff getestet.<sup>153</sup> (Abb. 88) Bei Rohdichten zwischen 1.200 kg/m<sup>3</sup> und 1.400 kg/m<sup>3</sup> werden Druckfestigkeiten bereits nach 12 Tagen von 3,6 N/mm<sup>2</sup> bis 7,5 N/mm<sup>2</sup> erreicht. Bei der Biegefestigkeit variieren die Werte zwischen

<sup>149</sup> Fischer, 31. Juli 2015, S. 40-42

<sup>150</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 101ff.

<sup>151</sup> Krippner/Freimann, 2017, S. 6

<sup>152</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 114

<sup>153</sup> Meyerhöfer, Februar 2025



Abb. 89 Plattenmuster (29,7 cm x 42,0 cm) Tonmehl (Liament ct) (GL\_M2) (Krippner/Freimann, Wintersemester 2024/2025) (Ohm-AR)

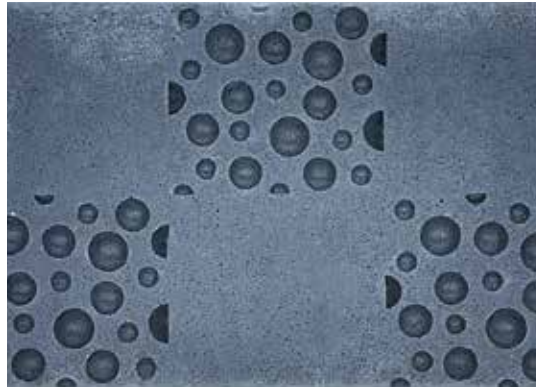


Abb. 90 Plattenmuster (45,0 cm x 70,0 cm) Pflanzkohle (BHS\_M4) (Krippner/Freimann, Wintersemester 2025/2026) (Ohm-AR)

II. Eingehende Darstellung  
Optimierungen Fassadenbauteil

1,6 N/mm<sup>2</sup> und 2,7 N/mm<sup>2</sup>. In den Versuchsreihen, insgesamt werden 23 Mischungen erprobt, zeigt sich, dass bei Verwendung von groben Granulatgrößen (8-16 mm; in gemischter Fraktion in LM-18 bis LM\_23) eine inhomogenere Matrixstruktur entsteht. Der Einsatz kleinerer Korkgranulate lässt hier Steigerungen der mechanischen Eigenschaften erwarten.<sup>154</sup>

Mit dem organischen Zuschlagsmaterial entstehen ästhetisch reizvolle Oberflächen insbesondere durch Nachbearbeitung, dass den Verbundwerkstoff prädestiniert für sichtoffene Anwendungen als Bekleidungsmaterial in Fassade und Innenraum. (Abb. 87) Allerdings sind die Zementanteile bei einigen der Mörtelmischungen mit 887 kg/m<sup>3</sup> noch deutlich zu hoch und auch den Einsatz des alternativen Bindemittels gilt es noch zu optimieren.<sup>155</sup>

Bei den Versuchen im Wintersemester 2025/2026 werden die Bindemittelgehalte bis auf 450 kg/m<sup>3</sup> reduziert und die Anteile von SysCompound variiert (von der Hälfte bis zu einem Drittel). Zusätzlich wird Gesteinskörnung (RC-Sand und Kies) eingesetzt. Mit Mischung BHK\_M3 lassen sich nach 35 Tagen Festigkeitswerte von 3,7 N/mm<sup>2</sup> (BZF) und um 11,0 N/mm<sup>2</sup> (DF) erreichen. Der Rohdichtebereich verändert sich durch die Variationen in der Zusammensetzung nicht.<sup>156</sup>

### 5.4.3 Fazit

Die Materialexperimente zeigen nicht nur vielversprechende mechanische Kenndaten von neuartigen Leichtbetonmischungen, sondern eröffnen durch den Einsatz auch von organischen Sekundärmaterialien neue nachhaltige Optionen für den Betonbau, insbesondere im Bereich von plattenförmigen Bauteilen.

Ergänzend zu den Versuchsreihen werden auch Plattenmuster hergestellt (29,7 cm x 42,0 cm<sup>157</sup> (Abb. 89) und 45,0 cm x 70,0 cm<sup>158</sup> (Abb. 90).<sup>159</sup> Dabei zeigen die Ergebnisse eine hohe Vielfalt an geometrischen Strukturen und natürlichen Formen, bei großer Varianz des verwendeten Schalhautmaterials. (Abb. A160 + A162 im Appendix)

Bestimmte Materialien, wie Tonmehl und Pflanzkohle, verändern auch deutlich die Eigenfärbigkeit der Betone. Je nach Masseanteilen führt das bei den Tonen zu rötlich braunen Oberflächen (Lineament) (Abb. 89) und beim Einsatz von Pflanzkohle zu anthrazitfarbenen Tönungen (Abb. 90), die in Helligkeitsgraden und Graustufungen sich unterscheiden. Bei einer Kombination beider Betonzusätze [BKW\_M2]<sup>160</sup> war der Anteil der Pflanzkohle (1 Masse-%) für eine gestalterische Akzentuierung zu gering. Diese ästhetische Bandbreite lässt sich noch durch verschiedene Behandlungen der Oberflächen und/ oder durch Zugabe von Farbpigmenten erweitern, wie das beispielhaft die „Corkrete“-Muster veranschaulichen. (Abb. 88 und A150 – A152 im Appendix)

Aufgrund höherer Rohdichten und des Einsatzes von Gesteinskörnung (RC-Sand und Kies) zeigen alle Beispielplatten aus den Versuchsreihen des Wintersemesters 2025/2026 sehr geschlossene Oberflächen, mit präziser Wiedergabe der Texturen des Schalhautmaterials.<sup>161</sup>

154 Meyerhöfer, Februar 2025, S. 77

155 Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 121ff.

156 Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 126f.

157 Krippner /Freimann, Wintersemester 2024/2025

158 Krippner/Freimann, Wintersemester 2025/2026; rückseitennah wird ein 2D-Gewebe aus AR-Glas eingebracht

159 Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 98f.

160 Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 151

161 Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 99

#### 5.4.4 Ökobilanzierung Materialeexperimente

Des Weiteren werden verschiedene Leichtbetonrezepturen aus Materialexperimenten hinsichtlich ihres Ressourceneinsatzes und Umweltwirkung für die Lebenswegphasen A1 bis A3, C3 und C4 sowie D im Vergleich mit den untersuchten Leichtbetonrezepturen für Lösungsstrategie II (LS II, Außen-, Innenschicht) beurteilt:

- Hanfschäben - HJSA\_M1 (SysCompound) (WS 2024/25)<sup>162</sup>
- Holzpartikel (Fichte) - ND\_M2 (SysCompound) (WS 2024/25)<sup>163</sup>
- Korkbeton - LM\_M18 (WS 2024/25)<sup>164</sup>
- Korkbeton - LM\_M19 (WS 2024/25)<sup>165</sup>
- Korkbeton - LM\_M20 (WS 2024/25)<sup>166</sup>
- Korkbeton - LM\_M22 (SysCompound) (WS 2024/25)<sup>167</sup>
- Korkbeton - LM\_M23 (SysCompound) (WS 2024/25)<sup>168</sup>
- Pflanzkohle - KK\_M2 (Recyclingsand) (WS 2024/25)<sup>169</sup>
- Tonmehl (calciniertes Ton) - GL\_M1 (Recyclingsand) (WS 2024/25)<sup>170</sup>

##### Lebenswegphase A1 bis A3, C3 und C4

Betrachtet man den Gesamt-Primärenergiebedarf (PEges) zeigt sich, dass die beiden Leichtbetonrezepturen aus Lösungsstrategie II zumindest gegenüber den Korkbeton-Varianten LM\_M18 bis LM\_M23 und gegenüber der Holzpartikelvariante ND\_M2 einen geringeren Ressourceneinsatz benötigen. Das Treibhauspotential (GWP) liefert ähnliche Ergebnisse, jedoch weist nun auch die Variante GL\_M1 (Recyclingsand, calciniertes Ton) ein höheres Treibhauspotential auf, dies gilt auch für das Ozonbildungspotential (POCP). Holz, Hanf, Pflanzkohle und auch Kork speichern das durch Photosynthese aufgenommene CO<sub>2</sub> im Material (Modul A1), das gespeicherte CO<sub>2</sub> wird anschließend in Modul C3 wieder ausgebucht (CO<sub>2</sub> Neutralität innerhalb des Produktsystems). Hinsichtlich des Ozonschichtabbau-potentials (ODP) ergeben die Werte beider Leichtbetonrezepturen der LS II ein geringeres oder ähnliches Potential gegenüber den Varianten HJSA\_M1 (Hanfschäben), LM\_M18 und LM\_M19. Betrachtet man das Versauerungspotential (AP), so erkennt man, dass die Rezeptur der Außenschicht der LS II das schlechteste Ergebnis liefert. Lediglich die Varianten LM\_M18 bis LM\_M20 ergeben ähnliche oder größere Werte als die Rezeptur der Innenschicht der LS II. Das Überdüngungspotential (EP) schließlich zeigt, dass nur Variante HJSA\_M1 ein größeres Potential gegenüber den beiden Leichtbetonrezepturen für LS II aufweist.

Insgesamt zeigt Variante KK\_M2 (Recyclingsand, Pflanzkohle) ein sehr gutes Ergebnis hinsichtlich des Ressourceneinsatzes und der Umweltwirkung. Zum einen kommt bei dieser Variante viel weniger Zement zum Einsatz und zum anderen hat recycelter Sand einen wesentlich geringeren Einfluss auf das Ergebnis. Auch zeigt Pflanzkohle im Vergleich zu Kork, Holz oder Hanf ein geringeres Treibhauspotential. Es zeigt sich weiterhin am Beispiel der Varianten LM\_M18 (ohne SysCompound) und LM\_M23 (mit SysCompound), dass sich durch das Ersetzen des Zements durch alternative Binder wie z. B. SysCompound auf Basis von Flugasche sämtliche Umweltwirkungen reduzieren und der Ressourceneinsatz senken lassen. (Abb. A380 im Appendix)

##### Lebenswegphase D

Bei sortenreiner Trennung erkennt man, dass die beiden Leichtbetonschichten hinsichtlich des Ozonschichtabbau-, Ozonbildungs- und Versauerungspotential die höchste Wiederverwertbarkeit aufweisen. Auch hinsichtlich des Gesamt-Primärenergiebedarfs, Treibhaus- und Überdüngungspotentials zeigen sie mit das größte Potential. Auch zeigen die Varianten mit Kork zumindest hinsichtlich des Gesamt-Primärenergiebedarfs und des Treibhauspotentials eine gute Wiederverwertbarkeit. (Abb. A380 im Appendix)

##### Weiterführende Untersuchungen zur Potentialabschätzung

In einem weiteren Schritt werden die Rezepturen für die beiden Leichtbetonrezepturen der Lösungsstrategie II (neue Varianten AS-2 und IS-2) sowie der Rezeptur LM\_M23 (neue Variante: LM\_M23-2) angepasst und mit den beiden Rezepturen GL\_M1 (Recyclingsand, calci-

<sup>162</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 100

<sup>163</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 111

<sup>164</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 120

<sup>165</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 121

<sup>166</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 122

<sup>167</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 123

<sup>168</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 124

<sup>169</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 137

<sup>170</sup> Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 146

nierter Ton) und KK\_M2 (Recyclingsand, Pflanzkohle) verglichen. Für die beiden Leichtbetonschichten wird recycelter Sand und recycelter Splitt anstelle von herkömmlichem Sand bzw. Splitt sowohl in der Rezeptur der Außen- als auch in der Innenschicht (LS II AS-2, LS II IS-2)“ vorgesehen. Zudem wird der Anteil an Pflanzkohle in der Rezeptur der Innenschicht (LS II IS-2) erhöht, während gleichzeitig eine entsprechende Reduktion des eingesetzten Zements erfolgt. Ziel ist, die Pflanzkohle in einer Größenordnung von 30 Masse-% des Zements einzusetzen. Dies ergibt nunmehr für die neue Rezeptur der Innenschicht (LS II IS-2) 309 kg Zement und 78 kg Pflanzkohle. Weiterhin wird das bisher verwendete Bindemittel SysCompound SVI in der Rezeptur LM\_23 durch das Bindemittel SysCompound Basic Z ersetzt (LM\_M23-2), welches zu 90 % aus Braunkohleflugasche, einem Nebenprodukt der Braunkohleverbrennung in Kraftwerken, besteht. (Abb. A144 im Appendix)

II. Eingehende  
Darstellung  
Optimierungen  
Fassadenbauteil

#### Lebenswegphase A1 bis A3, C3 und C4

Durch den Einsatz von Recycling-Materialien bei gleichzeitiger Erhöhung des Pflanzkohle-Masseanteils auf 4,8 % (gleichzeitige Reduzierung des Masseanteils von Zement auf 19,1 %) in der Rezeptur der Leichtbeton-Innenschicht kann das Treibhauspotential um etwa 44,4 %, bei gleichzeitigem Anstieg des Ressourcenbedarfs um ca. 67,8 % (Anteil des erneuerbaren Primärenergiebedarfs erhöht sich von etwa 44 % auf ca. 63 %), reduziert werden. Auch das Ozonschichtabbau- sowie das Überdüngungspotential können jeweils um etwa 10 % reduziert werden. Hingegen weisen sowohl das Ozonbildungs- (+18,4 %) als auch das Versauerungspotential (+2,5 %) eine Steigerung auf. Die Substitution des Sandes durch recycelten Sand in der Rezeptur der LB-Außenschicht zeigt nur geringe Reduzierungen bezogen auf den Ressourcenverbrauch und das Treibhauspotential. Dies bedeutet etwa 2,6 % weniger Gesamt-Primärenergiebedarf und ca. 1,4 % weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen. Das betrifft auch die restlichen Umweltindikatoren (AP, EP, ODP und POCP). Die Ursache hierfür liegt in dem ohnehin geringeren ökologischen Fußabdruck des Sandes begründet. Da vor allem Zement und die Blähtonzuschlagstoffe einen wesentlichen Einfluss auf den Ressourceneinsatz und die Umweltindikatoren haben, können diese durch eine entsprechende Reduzierung einen positiven Einfluss haben.

Man erkennt weiterhin, dass durch den Ersatz des Bindemittels SysCompound-SVI (54 % SysCompound Basic-Z, 44 % CEM I) durch SysCompound Basic-Z (90 % Braunkohleflugasche) in der Rezeptur LM\_M23 alle Umweltindikatoren und der Ressourceneinsatz gesenkt werden können. Durch diese Maßnahme können vor allem die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 61 % und der Gesamt-Primärenergiebedarf um ca. 32 % gesenkt werden.

Die Rezeptur KK\_M2 weist bis auf die Indikatoren Überdüngungs- (EP) und Ozonschichtabbaupotential (ÖDP) das jeweils beste Ergebnis auf. Für diese beiden Indikatoren liefert die Rezeptur LM\_M23-2 die besten Werte und es zeigt sich eine Verbesserung gegenüber der Ausgangsrezeptur LM\_M23. Die Rezeptur GL\_M1 hat hinsichtlich des Gesamt-Primärenergiebedarfs einen ähnlich guten Wert als Rezeptur KK\_M2. Die angepasste Rezeptur für die Leichtbeton-Außenschicht (LS II AS-2) liefert lediglich leichte Verbesserungen hinsichtlich sämtlicher Indikatoren. Hingegen weist die veränderte Rezeptur der Leichtbeton-Innenschicht (LS II IS-2) in Bezug auf das Treibhauspotential eine deutliche Verbesserung auf. Durch den Anstieg des erneuerbaren Primärenergiebedarfs durch den höheren Anteil an Pflanzkohle steigt dementsprechend auch der Gesamt-Primärenergiebedarf für diese Rezeptur an. (Abb. A115 im Appendix)“

#### Lebenswegphase D

Die neuen Rezepturen haben keinen wesentlichen Einfluss, sowohl im positiven wie auch im negativen Sinne, auf die einzelnen Wirkungsindikatoren hinsichtlich ihrer Wiederverwertungspotentiale. (Abb. A115 im Appendix)

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im HLBhybrid-Projekt ist ein neuer Ansatz im Bereich von schlanken, hochwärmege-dämmten Fassaden-Sandwichelementen erarbeitet worden. Anknüpfend an die Aufbauten/Schichtenfolgen aus dem Antrag (Abb. 20) werden erste grundlegende Entscheidungen für die Entwicklung des Fassadenbauteils getroffen und Konzepte zu Randausbildung, Befestigung, Fügungen etc. erarbeitet.

Das im Fassadenbau universell etablierte Sandwich-Prinzip, wonach die Dämmung im Kern von widerstandsfähigen Schichten auf der Innen- und Außenseite geschützt wird, bildet die grundlegende Basis für die bisherigen Projektarbeiten. Bei der Kopplung der inneren und äußeren LB-/ HLB-Schichten bieten sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Strategien an, die als Lösungsstrategie I (Abb. 26 – 28) und als Lösungsstrategie II (Abb. 30 + 31) bezeichnet werden. In der Folge ist das Ergebnis der Lösungsstrategie I ein Mehrschichtverbundsystem, während Lösungsstrategie II eher die Charakteristik einer Holzrahmenbauweise hat, nur dass die inneren und äußeren Schalen vornehmlich aus einem Betonwerkstoff (mit textiler Bewehrung und ggf. organischen Zuschlagsstoffen) und nicht aus einem Holzwerkstoff bestehen. Auf Basis dieser Entscheidung wird die Bandbreite an Aufbauten beider Lösungsstrategien aufgezeigt und diskutiert. Auch wenn nicht alle Ansätze auf den ersten Blick gleichermaßen vielsprechend sind, so tragen diese mindestens zum Verständnis bei und bergen darüber hinaus die Möglichkeit für innovative Aspekte.

Bei Meier Betonwerke werden Grundlagen zu Rezepturenentwicklungen erarbeitet. Ziel ist es, eine für den Einsatz in einem Fertigteilwerk brauchbare Holzleichtbeton-Rezepturen zu entwickeln; die Vorversuche geben Hinweise auf deren Verarbeitbarkeit. Über die Mischbarkeit, Verdichtungswilligkeit und das Abbindeverhalten kann direkt aus den Versuchen auf die Gebrauchstauglichkeit im Fertigteilwerk geschlossen werden.

Im Betonlabor werden 16 verschiedene HLB-Rezepturen untersucht. (Abb. 32 – 36) Ziele sind: Verarbeitbarkeit sicherzustellen und gleichzeitig auch den Zementanteil zu senken sowie Alternativen wie calcinierte Tone einzusetzen. Dies führt jedoch noch nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen, insbesondere unter den prozessualen Abläufen und Bedingungen im Fertigteilwerk. Die umfangreichen Vorversuche mit organischem Zuschlagsmaterial zeigen, dass die Verarbeitung von Holzpartikeln und Hanfschäben prinzipiell gut ist, aber bzgl. der Festigkeitsentwicklung sich mit den bisher eingesetzten Zementen noch keine adäquaten Rezepturen erzielen lassen. Daher werden für die beiden Deckschichten (Innen-(Tragschicht) und Außenschicht (Vorsatzschicht/ Fassade)) beim Bau der Funktionsmodelle optimierte Leichtbetone (LB) (ohne Holzzuschlagstoffe) erarbeitet und eingesetzt.

Anhand von Lösungsprinzip I erfolgen zunächst umfangreiche Abschätzungen und Berechnungen seitens der Tragwerkplaner zum Fassaden-Sandwichelement. Dabei wird vor allem auf die angesetzten Lasten und Weiterleitung der Lasten eingegangen. Aus den theoretischen Betrachtungen der Tragwerksplanung geht hervor, dass unter Annahme der getroffenen Ansätze für die Tragschicht ein schlankes Fassaden-Sandwichelement realisierbar ist. (Abb. 46 – 50 und 91)

Am Institut für Thermische Verfahrenstechnik (V-8) der Technischen Universität Hamburg etabliert man die vollständige Entwicklungskette für biobasierte Dämmmaterialien auf Grundlage von Lignin-Alginate-Hybrid-Aerogelen. (Abb. 37) Die wissenschaftlich-technischen Arbeiten gliedern sich in drei zentrale Arbeitspakete: Ligninauswahl und -screening, Entwicklung von Hybrid-Aerogelen, und Pressung der Aerogelpartikel zu Dämmplatten sowie Bewertung deren Leistungsfähigkeit. Die im Projekt identifizierte hohe Feuchteempfindlichkeit – das zentrale Hindernis für eine praktische Anwendung – wird durch zwei gezielte Minderungsstrategien adressiert. Die ligninbasierte In-situ-Beschichtungstechnologie verbessert die Feuchtigkeitsbeständigkeit – ein entscheidendes Kriterium für reale Gebäudeanwendungen – und erhöht damit die Wettbewerbsfähigkeit des Materials deutlich.

Gepresste Aerogelplatten weisen eine mechanische Stabilität und Wärmeleitfähigkeit auf, die mit anderen biobasierten Dämmmaterialien vergleichbar sind, wodurch sich Anwendungspotenziale im Bereich der Innendämmung, leichter Fassadensysteme, modularer Bauelemente und Verbundbaustoffe ergeben. (Abb. 41 + 42) Ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor ist die Optimierung der überkritischen CO<sub>2</sub>-Trocknung, durch die die Trocknungszeit „auf wenige Minuten“ reduziert werden konnte. Dies senkt die Betriebskosten erheblich und ermöglicht effizientere Produktionszyklen.

Die ökologischen Vorteile der in diesem Projekt untersuchten Fassaden-Sandwichelemente auf Basis von Leichtbeton mit nano- und mikrostrukturierten Hochleistungsdämmstoffen ergeben sich vor allem durch eine erhöhte Flächen- und Ressourceneffizienz. Das Fassaden-Sandwichelement kann, bei gleichem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert), mit einer Wandstärke von 17 cm im Vergleich zu den untersuchten Wandaufbauten um mindestens 15 cm (Holzrahmenbauwand) bzw. maximal 24 cm (Ziegelwand) schlanker ausgeführt

II. Eingehende  
Darstellung

Zusammenfassung  
der Ergebnisse



Abb. 91 Fassaden-Sandwichelemente (FSE) in der Gebäudemodernisierung (Rendering kbp; Roland Krippner)

II. Eingehende Darstellung  
Zusammenfassung der Ergebnisse

werden. Dabei kann bei gleichbleibender Bruttogrundfläche des im Projekt betrachteten Beispiel-Bürogebäudes eine Nettogrundfläche von bis zu 4,8 % gegenüber einer Ziegelwand hinzugewonnen werden. Bei einer gleichbleibenden Nettogrundfläche kann hingegen die Bruttogrundfläche um bis zu 4,5 %, ebenfalls im Vergleich zur Ziegelwand, reduziert werden. (Abb. 76 + Tab. 13) Dies bedeutet folglich auch eine Verringerung des Ressourceneinsatzes (Primärenergiebedarf) und der Auswirkungen auf die Umwelt (Treibhaus-, Ozonschichtabbau-, Ozonbildungs-, Versauerungs-, Überdüngungspotential).

In Zahlen bedeutet dies eine Reduzierung des Gesamt-Primärenergiebedarfs gegenüber einer Stahlbetonwand um ca. 4,4 %. Auch gegenüber der Ziegel- und Kalksandsteinwand lassen sich etwa 0,6 % bzw. 0,8 % einsparen. Lediglich gegenüber der Holzrahmenbauwand kommt es zu einem 8,8 % höheren Gesamt-Primärenergiebedarf. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich gegenüber den meisten in diesem Projekt untersuchten Wandaufbauten reduzieren (Ziegel: -2,9 %, Kalksandstein: -2,6 %, Stahlbeton: -4,0 %), hingegen zeigt die Holzrahmenbauwand leicht geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Funktionsmodell fm.l.d (-0,5 %). Bis auf das Ozonschichtabbaupotential können auch die restlichen Umweltwirkungen (Ozonbildung, Versauerung, Überdüngung) gegenüber den marktüblichen Wandaufbauten (Ausnahme: Holzrahmenbauwand) reduziert werden.

Durch einen höheren Anteil an regenerativen (z. B. Pflanzenkohle, Hanf, Holz, Kork etc.) oder wiederverwerteten Materialien, vor allem als Ersatz für Zement (z. B. SysCompound) und Blähton-Zuschlagstoffe im Leichtbeton, können der Ressourceneinsatz und die Auswirkungen auf die Umwelt weiter gesenkt werden. Dies bestätigen auch die Ergebnisse mit alternativen Rezepturen aus den Materialexperimenten.

Der in der Bilanzierung verwendete mineralische Hochleistungs-Dämmstoff und die Vakuum-Isolationspaneele (VIP) weisen momentan noch aufgrund der eingesetzten Materialien und des relativ hohen Energieeinsatzes zur Herstellung eine nicht ausreichend gute Ökobilanz auf. Hier könnte das Lignin-Aerogel durch eine regenerativere Rezeptur (z. B. durch einen höheren Anteil an Gras / Stroh) und einem geringeren sowie regenerativen Energieeinsatz die Ökobilanz verbessern. Auch könnten neuere Umweltproduktdeklarationen für die beiden Kerndämmstoffe das Gesamtergebnis entscheidend beeinflussen.

Hingegen zeigt das Funktionsmodell gegenüber allen betrachteten marktüblichen Referenz-Wandaufbauten ein höheres mögliches Recycling- und Wiederverwertbarkeitspotential, falls eine sortenreine Trennung durchführbar ist. Sowohl die Leichtbetonschichten, als auch der mineralische Hochleistungsdämmstoff und die Vakuum-Isolationspaneele weisen hierbei, vor allem durch die vermiedene Produktion von Primärmaterial, ein hohes Wiederverwertbarkeitspotential auf.

Insgesamt werden drei Funktionsmodelle (zwei für Lösungsstrategie I und eines für Lösungsstrategie II) hergestellt, die jeweils das zugrundeliegende Konstruktionsprinzip abbilden. Fügungen zwischen den Fassaden-Sandwichelementen, dem Rohbau und anderen Bauteilen (z. B. Fenster) sind zunächst nicht berücksichtigt. Mit den Funktionsmodellen konnten im Labormaßstab die Produzierbarkeit des Fassaden-Sandwichelements erprobt

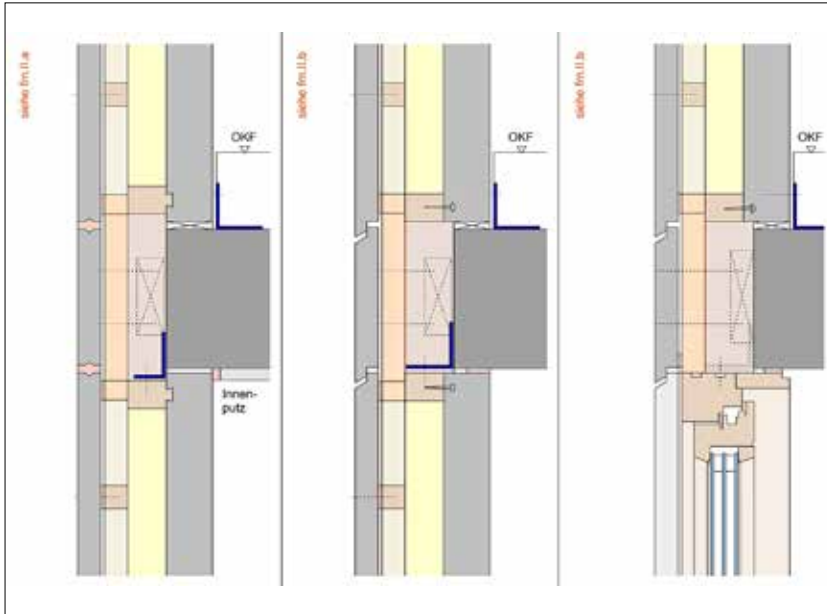


Abb. 92 Untersuchungen zur Eignung der Lösungsstrategien im baulichen Kontext – Lösungsstrategie II (OHM-AR / Peter Bonfig)

II. Eingehende Darstellung  
Zusammenfassung der Ergebnisse

werden. (Abb. 57) Die gewählte Größe erlaubt auch schalltechnische und wärmeschutztechnische Untersuchungen mit hinreichender Genauigkeit. Bei der Herstellung bereiten teilweise die C- bzw. L-förmigen GFK-Formteile Schwierigkeiten. (Abb. 54 + 56) Auch gibt es Probleme mit dem Einbringen der VIPs. Allerdings zeigen die Erfahrungen, dass eine Übertragbarkeit für eine industrielle Fertigung trotzdem gegeben ist, da dort durch größere Abmessungen die Verarbeitung von Bewehrung und Dämmung in der Regel einfacher ist.

Eine der wichtigsten Größen der Bauakustik ist das Schalldämmmaß  $R$ . (Abb. 58) Am Institut für Fenstertechnik, ift Rosenheim GmbH werden bauakustische Prüfungen durchgeführt, mit dem Prüfwert des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w = 45$  dB. Dieser Wert bestätigt das im Rahmen des Vorhabens gewählte Prognoseverfahren für die Schalldämmung der Konstruktionen. Vom Prüfstandswert  $R_w = 45$  dB ist für einen späteren Einsatz am Bau im Sinne der DIN 4109 eine Unsicherheit von 2 dB abzuziehen, weiterhin ist eine Korrektur anzusetzen, die die unterschiedliche Größe des Prüfobjekts im Prüfstand im Vergleich zur Größe, der im späteren Einsatz geplanten Fassadenelemente berücksichtigt (- 3 dB). Auch unter Berücksichtigung der Unsicherheit und der Größenkorrektur kann somit ein bewertetes Schalldämm-Maß  $R_w$  von mindestens 40 dB erwartet werden.

Für Lösungsstrategie II wird ebenfalls eine schalltechnische Bewertung vorgenommen, auch wenn kein detailliertes Berechnungsverfahren zur Verfügung steht. Dabei zeigt sich, dass die formalen Voraussetzungen gegeben sind, einen Erwartungswert des bewerteten Schalldämm-Maßes von  $R_w = 50$  dB zu erreichen, somit am Bau unter Berücksichtigung der genannten Unsicherheit und der Größenkorrektur:  $R_w = 45$  dB.

Abschließend erfolgen experimentelle Messungen des Körperschall-Abklingverhaltens der im Rahmen von Lösungsstrategie II hergestellten Funktionsmodelle (Vorsatzschale vor dünnen Tragschicht). (Abb. 63 + 64) Auf dieser Grundlage werden mithilfe der FEM-Software SOFiSTiK Simulationsmodelle erstellt, um die grundsätzliche Eignung der Konstruktion als schalltechnisch günstige biegeweiche Vorsatzschale zu untersuchen. (Abb. 65 + 66) Die ermittelten Kennwerte erlauben den Schluss, dass eine Verringerung des E-Moduls gegenüber den Funktionsmodellen von (im Mittel) ca. 4.800 N/mm<sup>2</sup> auf ca. 3.600 N/mm<sup>2</sup>, dies bei Erhalt der Materialdichte und bei gleichzeitiger Verringerung der Plattendicke von 30 mm auf 25 mm, die Herstellung von schalltechnisch biegeweichen Platten umsetzbar erscheinen lässt. Selbstverständlich sollte die aus diesen Vorgaben resultierende verfahrenstechnische und konstruktive Aufgabe nicht unterschätzt werden.

Beim Center for Applied Energy Research e.V. (CAE) in Würzburg wird eine Bestimmung des U-Werts (Funktionsmodell I, fm.I.a) durchgeführt. (Abb. 67 + 68) Die Messergebnisse zeigen, dass die durch den Probekörper fließende Leistung überraschenderweise fast doppelt so hoch ist wie bei der Kalibrationsprobe. Dementsprechend lag der U-Wert bei 0,46 W/(m<sup>2</sup> K). Ein für das avisierte Leistungsprofil des Fassadenelements viel zu hoher Wert. Zur Überprüfung werden thermische Simulationen durchgeführt, die deutlich den Einfluss der Randbewehrung aus CFK-Formteilen zeigen. (Abb. 69 + 70) Die hohe Wärmeleitfähigkeit



Abb. 93 Fassaden-Sandwichelemente (FSE) im Neubau (Rendering kbp)

II. Eingehende  
Darstellung  
Zusammenfassung  
der Ergebnisse

von Carbon längs zur Faser verursachten die deutliche Erhöhung des U-Wertes. Mit der Firma Solidian werden umfangreiche Kennwerte von CFK- und GFK-Gewebe zusammengestellt und vergleichende Abschätzungen durchgeführt, die die Ergebnisse bestätigen. In weiteren Schritten wird bei einem modifizierten Funktionsmodell (fm.l.d) die Materialstärke des VIP erhöht und als Bewehrung Gewebe und Formteile aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) eingesetzt. Der Gesamtaufbau bleibt bei 170 mm. Die erneute Vermessung ergibt sich einen Wärmedurchgangskoeffizient von  $0,23 \pm 0,02 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . Mit diesem Wert wird die Zielsetzung, schlankes Fassadenbauteil (180 mm) bei gutem Wärmeschutz ( $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ) mit reduziertem Aufbau beim Funktionsmodell (170 mm) (annähernd) erfüllt.

An der MFFPA Leipzig GmbH erfolgen drei Prüfungen zum Brandverhalten. In einem ersten Schritt werden die im Fassaden-Sandwichelement (Funktionsmodell I) eingesetzten Materialien zur Unterscheidung im baulichen Brandschutz zwischen brennbar und nicht-brennbar untersucht. Aufgrund einiger weniger fehlender Angaben für das gesamte Fassadenbauteil konnte keine exakte Kalkulation vorgenommen werden, aber die vorliegenden Werte der Brutto-Verbrennungswärme bestätigen vorliegende Einschätzungen. Bauteile aus Leichtbeton mit Carbon-Bewehrungsgittern erfüllen in der Regel mindestens die Anforderung „normalentflammbar“.

Im Anschluss an die Heizwertermittlung führt man eine Kleinbrenner-Prüfung nach DIN EN ISO 11925-2:2020-07 durch. Aus einem orientierenden Vergleich der Versuchsergebnisse mit den generellen Anforderungen an Bauprodukte nach DIN EN 13501-1:2019-05 (Tab. 4) kann abgeleitet werden, dass das Fassaden-Sandwichelement (Mehrschichtbauteil) mit hochwärmedämmendem Kern ein ähnliches Brandverhalten zeigt wie ein Bauprodukt, das die Anforderungen an die Brandverhaltensklasse B bis D erfüllt. (Tab. 9 + 10)

Nach der Charakterisierung der eingesetzten Materialien erfolgt abschließend eine Prüfung zum Brandverhalten des Fassaden-Sandwichelements (Funktionsmodell fm.l.b) mittels SBI-Verfahren nach DIN EN 13823:2023-04 im Rahmen von orientierenden Versuchen. Stellt man hier die Versuchsergebnisse den generellen Anforderungen an Bauprodukte nach DIN EN 13501-1:2019-05 gegenüber, kann abgeleitet werden, dass das Fassadenbauteil ein ähnliches Brandverhalten zeigt wie ein Bauprodukt, das die Anforderungen an die Brandverhaltensklasse A1 erfüllt. (Tab. 11)

Die Bauteilentwicklung wird ebenfalls mit Blick auf praktikable Einsatzmöglichkeiten, Montageabläufe auf der Baustelle, Gestaltungsmöglichkeiten und einfacher, kostengünstiger Konstruktion beleuchtet (Vertikal- und Horizontalschnitte M 1:5). Dies auch in Bezug auf Materialwahl und Fügung. (Abb. 77 – 79 und 93)

Bei der Randausbildung soll ein leichter Austausch von Elementen Priorität haben und bei den Fugendichtungen ist der Einsatz von speziellen Profilen und Dichtungsmassen denkbar. Grundsätzliche Fügungsmöglichkeiten horizontal und vertikal werden untersucht, auch im Hinblick auf eine ausreichende Flankenschalldämmung. Zu unterscheiden ist u. a. zwischen geradem Stoß und versetzter Fügung. Bei einem Versatz muss insbesondere die Stabilität

der Dämmung und der möglichen textilen Randbewehrung geprüft werden. Es wird aktuell davon ausgegangen, dass für Transport und Montage wiederverwendbare Holzwerkstoffplatten zum Schutz erforderlich sind.

Des Weiteren werden Prinzipien der Eckausbildung sowie Integrationsmöglichkeiten von weiteren Bauteilen untersucht. (Abb. 80 + 81) Ergänzend erfolgen erste Überlegungen zur Randausbildung mit Einbindung von Fensterelementen. Neben dem grundsätzlichen Aufbau des FSE werden vier Varianten der geometrischen Positionen zum Tragwerk aufgezeigt, als Grundlage für eine baukonstruktive Vertiefung. (Abb. 77 + 92) Bei den Fallbeispielen werden stets die wichtigsten Lagebeziehungen und hochpreisigen Fassadelemente untereinander, zur Primärkonstruktion und zu ebenfalls raumhohen Fensterelementen behandelt.

Auf Grundlage einer Gebäudeplanung aus der Praxis wird eine Gegenüberstellung von Holzrahmenbau-Außenwänden mit dem Lösungsansatz aus der Forschungsarbeit insbesondere in Bezug auf Raumgewinn berechnet. Als Referenz dient ein Wohnungsbau in München-Lochhausen (Abb. 84). Beim Vergleich der Bauteilkosten zeigen sich bauteilbezogene Mehrkosten für das Fassaden-Sandwichelement von über 60 % bzw. knapp 80 %. Betrachtet man demgegenüber den Flächengewinn von etwa 326 m<sup>2</sup>, ist bei einem durchschnittlichen Kaufpreis in Deutschland gerundet von 4.400 €/m<sup>2</sup> (Netto/ Wohnfläche) zu erwarten, dass die Mehrkosten auch bei hoch angesetzten Bauteilkosten für das FSE über den Flächengewinn amortisierbar sind. Auf angespannten und hochpreisigen Wohnungsmärkten wie München, sind sogar deutliche wirtschaftliche Vorteile möglich. (Tab. 15)

Vorteilhafte Merkmale der entwickelten schlanken Fassadenbauteile werden auch an einem Fallbeispiel eines sogenannten „kompakten Hofhauses“ aufgezeigt und erläutert. Zu Quartieren addiert stellt dieses den Bewohnern bei geringem Landverbrauch urbane Lebensräume zur Verfügung und kann hohe Dichte, Diversität von Nutzung sowie ein hohes Maß an Privatheit und Wohnqualität in Innen- wie Außenräumen miteinander vereinigen, in Neubau- wie in Bestandsituationen.<sup>171</sup> Der Vergleich wird mit zwei Varianten des Grundrisses des zweiten Obergeschosses aufgezeigt. (Abb. 82 + 83) In der unteren sind die gedämmten Holzmassivbauwände durch die im HLBhybrid-Projekt entwickelten Leichtbetonwände mit einem Dämmkern aus VIPs und AlphaCore ersetzt worden. Dies betrifft die Fassaden zum Innenhof wie zum öffentlichen Raum. Neben einer Erhöhung der Wohnfläche (Flächengewinn ca. 1,1 m<sup>2</sup> im 2. OG) sind ein sehr guter Witterungsschutz bei gleichzeitiger Nichtbrennbarkeit der Leichtbetonschichten als weitere Vorteile zu nennen.

Anknüpfend an die Arbeiten „Materialentwicklung (Holzleichtbeton)“ konnten parallel zu den Projektarbeiten umfangreiche Materialexperimente zu Sonderbetonen im Rahmen von Lehrveranstaltungen im Masterstudium durchgeführt werden. Mit Lösungsprinzip II, in Verbindung mit einem anderen Herstellungsprozess, eröffnen sich wieder größerer Spielräume des Einsatzes von Sonderbetonen mit der Verwendung von unterschiedlichsten Zuschlagstoffen. Daher werden für die Vorsatzschale Mischungen untersucht, die die mechanischen Anforderungen an einen Plattenwerkstoff erfüllen. Dabei wird mit Pflanzenkohle und Tonmehl (thermisch aktivierte (calcinierte) Tone) gearbeitet, die als Füllstoff und teils Bindemittel zur ‚Abmagerung‘ der Leichtbetone durch Substitution von Zement dienen. Pflanzenkohle fungiert zusätzlich auch als CO<sub>2</sub>-Speicher im Beton. Des Weiteren experimentierte man mit organischen Materialien als Zuschläge, wie Hanfschäben und -fasern, Holzpartikeln und -späne (Fichte) sowie Korkreststoffen (Abb. 86 + 87).

Die Materialexperimente zeigen nicht nur vielversprechende mechanische Kenndaten von neuartigen Leichtbetonmischungen, sondern eröffnen durch den Einsatz auch von organischen Sekundärmaterialien neue nachhaltige Optionen für den Betonbau, insbesondere im Bereich von plattenförmigen Bauteilen. Die ästhetische Bandbreite erweitern die organischen Materialien, wie das beispielhaft „Corkrete“-Muster veranschaulichen. (Abb. 88)

Für eine Auswahl wird ebenfalls eine Ökobilanzierung durchgeführt. Für die Lebenswegphasen A1 bis A3, C3 und C4 kann u. a. aufgezeigt werden, dass durch den Einsatz von Recycling-Materialien bei gleichzeitiger Erhöhung des Pflanzenkohle-Masseanteils auf 4,8 % (bei Reduzierung des Masse-Anteils von Zement auf 19,1 %) das Treibhauspotential um etwa 44,4 %, bei gleichzeitigem Anstieg des Ressourcenbedarfs um ca. 67,8 % (Anteil des erneuerbaren Primärenergiebedarfs erhöht sich von etwa 44 % auf ca. 63 %), reduziert werden kann. Auch das Ozonschichtabbau- sowie das Überdüngungspotential können jeweils um etwa 10 % reduziert werden. Man erkennt weiterhin, dass durch den Ersatz des Bindemittels SysCompound in der Rezeptur LM\_M23<sup>172</sup> alle Umweltindikatoren und der Ressourceneinsatz gesenkt werden können. Durch diese Maßnahme lassen sich v. a. die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 61 % und der Gesamt-Primärenergiebedarf um ca. 32 % senken.

171 Das „kompakte Hofhaus“ wurde als neuartiger Hofhaustyp an der Hochschule für Technik Stuttgart (HFT) entwickelt und untersucht.

172 Vgl. Appendix, Kapitel A5.3, S. 124

## 7 Anhang

Anhang

### 7.1 Literatur

- AGITEC, 23.04.2024 – AGITEC GmbH – Aero A2 board. Technisches Merkblatt. Stuttgart, 23.04.2024.
- Albus, Jutta; Hollmann-Schröter, Kirsten: Hybrid-Beton – Nachhaltigkeitspotentiale durch ganzheitliche Planungsstrategien für multifunktionale Systemkomponenten. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 69. Jg., 2/ 2021, S. 64–67.
- Annunziata, E., Frey, M., & Rizzi, F. (2013). Towards nearly zero-energy buildings: The state-of-art of national regulations in Europe. *Energy*, 57, 125-133.
- Barbero, Ever J.: *Introduction to Composite Materials Design*. Boca Raton: CRC Press, 3/2017 [o. S.]
- Berger, Richard: *Über die Schalldurchlässigkeit*. Dissertation. München, Technische Hochschule, 1911
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand*. Berlin, 2015.
- BMWSB – Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin. <https://oekobaudat.de/datenbank/suche.html> < 27.03.2024 / 27.02.2025>.
- Bursian, Gerolf; Pinternagel, Ernst-Karl: *Holzbeton. Produktion, Anwendung und Erfahrungen*. Schriftenreihen der Bauforschung: Reihe Baustoffe, Bd. 20. Berlin(Ost): Bauinformation DDR, 1973.
- Cremer, Lothar: *Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Schalleinfall*. In: *Akustische Zeitschrift*, 7/1942, S. 81.
- Cremer, Jan; Bonfig, Peter; Dehlinger, Christian; Offtermatt, David: *Kompakte Hofhäuser. Weitere Untersuchungen auf dem Weg in die Realisierung. Ergebnisse der Förderstufe 2*. Stuttgart: Hochschule für Technik, 2024. <https://doi.org/10.60663/HFTor-490>.
- Cremer, Jan; Bonfig, Peter; Offtermatt, David: *Kompakte Hofhäuser. Anleitung zu einem urbanen Gebäudetyp*. HFT Stuttgart (Hrsg.). Zürich: Triest Verlag, 2021.
- Cremer, Jan; Bonfig, Peter: *DFG-Projekt „Kompakte Hofhäuser für nachhaltige Siedlungen hoher Dichte“*. Abschlussbericht (Förderphasen 1 und 2. Stuttgart: Hochschule für Technik 2024. <https://doi.org/10.60663/HFTor-511>
- Debona, Carolin; Liegl, Rudolf: *Holzleichtbeton HLB als Material für die Sanierung von Außenwänden. Bewertetes Schalldämm-Maß Rw nach DIN 4109, Schallschutz im Hochbau*. Möhler + Partner Ingenieure AG - Beratende Ingenieure für Schallschutz und Bauphysik. Bericht [nicht veröffentlicht]. München, 11. März 2019.
- Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.: *DEGA-Empfehlung 101: Akustische Wellen und Felder*. Berlin, 2006
- Deutscher Holzbaupreis 2005. Informationsdienst Holz. Berlin/Düsseldorf, Mai/2005
- DGNB System – *Kriterienkatalog Gebäude Neubau. VERSION 2018*. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. Stuttgart, Mai 2018.
- Dias, O. A. T., Negrão, D. R., Gonçalves, D. F. C., Cesarino, I., & Leão, A. L. (2017). Recent approaches and future trends for lignin-based materials. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 655(1), 204-223.
- DIN 1053-1: *Mauerwerk - Teil 1: Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth Verlag, 11/1996.
- DIN 4108-10:2021-11, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe*. Berlin, 2021.
- DIN 4108-4:2020-11, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*. Berlin, 2020.
- DIN 4109-1: *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen*. Berlin: Beuth Verlag, 01/2018.
- DIN 4109-2: *Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerische Nachweise zur Einhaltung der Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag, 01/2018.
- DIN 4109-32, *Schallschutz im Hochbau - Teil 32: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Massivbau*. Berlin: Beuth Verlag, 07/2016.
- DIN 4109-34, *Schallschutz im Hochbau - Teil 34: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Vorsatzschalen vor massiven Bauteilen*. Berlin: Beuth Verlag, 07/2016.
- DIN 4109-5, *Schallschutz im Hochbau – Teil 5: Erhöhte Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag, 08/2020

- DIN EN 13501-1:2019-05, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1. Berlin, 2019.
- DIN EN 13823:2023-04 - Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen. Berlin: Beuth Verlag, 04/2023.
- DIN EN 14351-1: Fenster und Außentüren - Produktnorm, Leistungseigenschaften. Berlin: Beuth Verlag, 12/2016.
- DIN EN 15804:2022-03, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Berlin. 2022.
- DIN EN 15978:2012-10, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode. Berlin, 2012.
- DIN EN ISO 11925-2:2020-07 - Prüfungen zum Brandverhalten - Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung - Teil 2. Berlin: Beuth Verlag, 07/2020.
- DIN EN ISO 14025:2011-10, Bauteile – Umweltzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen – Grundsätze und Verfahren. Berlin, 2011.
- DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin, 2021.
- DIN EN ISO 1716:2010-11 - Prüfungen zum Brandverhalten von Produkten - Bestimmung der Verbrennungswärme (des Brennwertes). Berlin: Beuth Verlag, 11/2010.
- DIN EN ISO 6946:2018-03, Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren. Berlin, 2018.
- DIN EN ISO 8990: Wärmeschutz - Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand - Verfahren mit dem kalibrierten und dem geregelten Heizkasten. Berlin: Beuth Verlag, 09/1996
- DIN V 18599:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden. Berlin: Beuth Verlag, 09/2018.
- Dittrich, Sebastian: Ein Baustoff für die Zukunft - Alkalisch aktivierte Binder. Hrsg. v.: Fraunhofer- Institut für Bauphysik und funktionale Baustoffe. Faltblatt. Valley, 01/2017
- Draxel, Ellen: Stelzenhäuser machen Schule. In: Süddeutsche Zeitung, Nr. 74, 30. März 2022, S. R5.
- Ebert, H. P.: High-performance insulation materials. In Nearly zero energy building refurbishment. London: Springer, 2013, pp. 457-481.
- Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. Berlin: Huss-Medien, Verlag Bauwesen, 2/2003.
- Fiedler, Sebastian: Beratungskampagne zur Material- und Rohstoffeffizienz des Ressourceneffizienz-Zentrums Bayern (REZ) (10/2023 – 12/2023). Ergebnisbericht für die Consulta AG. Würzburg: WUQM Consulting GmbH, 28.03.2024.
- Fischer, Stefanie: Hanf als Baustoff. Untersuchungen an mineralisch gebundenen Werkstoffen aus Hanffasern und Schäben. Bachelorarbeit. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann, Prof. Dr.-Ing. René Conchon. Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Bauingenieurwesen. Nürnberg, Sommersemester 2015, 31. Juli 2015
- Freimann, Thomas: Mechanisch-physikalische Eigenschaften von Holz- leichtbetonen. In: Thomas Steinborn (Hrsg.): Festschrift Ludger Lohaus .... Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 12. Hannover: Selbstverlag, 2014, S. 1–14.
- GEA GmbH / Grassinger Emrich Architekten GmbH: Funktionale Leistungsbeschreibung für raumFAIR e.G. Projekt Kleiberweg/ Henschelstraße WA1 West (KLE). München, 28.07.2023
- Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (GebäudeEnergieGesetz - GEG). Berlin, 2024.
- Gösele, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut: Schall, Wärme, Feuchte. Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 10/1997.
- Greis, Benjamin: Entwicklung eines Werkzeugs zur ökologischen Bewertung von Gebäuden und Baustoffen am Beispiel eines Einfamilienhauses. Bachelorarbeit. Nürnberg, Technische Hochschule Nürnberg/Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, WS 2012/13
- Grimm, Roland: Aus der Forschung: Lignin-Aerogele, 06.12.2018. [https:// www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung\\_technik\\_trends/aus-der-forschung-lignin-aerogele/](https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung_technik_trends/aus-der-forschung-lignin-aerogele/) <14.04.2020>
- Gumpp & Maier GmbH: Auftrags- Leistungsverzeichnis für Projekt Kleiberweg/ Henschel-

- straße WA1 West (KLE). Binswangen, 24.11.2023
- Hauer, Bruno: Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau – Teilprojekt B. In Hauer Bruno et al.: Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011, S. 118, Tabelle 63
- Herzog, Thomas; Sieveke, Matthias: Im Dreitakt himmelwärts. In: Hochparterre, Beilage zur ..., 11/2002, S. 4–9
- Hessinger, Joachim; Trindorfer, Regina: Nachweis Luftschalldämmung von Wänden. Prüfbericht Nr. 24-004192-PR01 (PB A01-F02-04-de-01). Rosenheim: ift Rosenheim, 12.11.2024.
- Hülsmeier, Frank: vakutex. Vakuumgedämmte Fassadenelemente aus Textilbeton. Forschungsbericht / Abschlussbericht, F 2872. Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig HTWK Leipzig/ai:L Architektur-Institut Leipzig, Forschungsgruppe energie.design. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013
- IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH. Prüfbericht 1255 D016-PB0074-25. E-Modul-Prüfung. Weimar, 17.06.2025
- IBU – Institut Bauen und Umwelt e. V.: Bundesverband Leichtbeton e.V. – Umwelt-Produktdeklaration nach /ISO 14025 und /EN 15804 – Großformatige Elemente aus Leichtbeton. Berlin, 2019.
- IBU – Institut Bauen und Umwelt e. V.: Evonik Operations GmbH – Umwelt-Produktdeklaration nach /ISO 14025 und /EN 15804 – Calostat. Berlin, 2021.
- IBU – Institut Bauen und Umwelt e. V.: <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/>. Berlin, <27.02.2025>.
- IBU – Institut Bauen und Umwelt e. V.: Kingspan Insulation B.V. – Umwelt-Produktdeklaration nach /ISO 14025 und /EN 15804 – Kooltherm K20. Berlin, 2023.
- IBU – Institut Bauen und Umwelt e. V.: Porextherm Dämmstoffe GmbH – Umwelt-Produktdeklaration nach /ISO 14025 und /EN 15804 – Vacupor NT-B2-S / Vacuspeed und Vacupor XPS-B2-S / Vacuspeed XPS, Vacupor RP-B2-S / Vacuspeed RP, Vacupor TS-B2-S / Vacuspeed TS. Berlin, 2020.
- IBU – Institut für Bauen und Umwelt e. V.: Berlin. <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/> <27.03.2024>.
- IBU – Institut für Bauen und Umwelt e. V.: Bundesverband Leichtbeton e.V. – Umwelt-Produktdeklaration nach /ISO 14025 und /EN 15804 – Großformatige Elemente aus Leichtbeton. Berlin, 2019.
- IBU – Institut für Bauen und Umwelt e. V.: Evonik Operations GmbH – Umwelt-Produktdeklaration nach /ISO 14025 und /EN 15804 – Calostat. Berlin, 2021.
- ift Rosenheim GmbH. Produktkategorieregeln Teil A – Allgemeine Produktkategorieregeln für Umweltproduktdeklarationen nach EN ISO 14025 und EN 15804 gemäß dem Programmbetrieb zur Erstellung von Umweltproduktdeklarationen (EPD) des ift Rosenheim. Rosenheim, 2023.
- ift Rosenheim GmbH. Produktkategorieregeln Teil B – für Bauprodukte aus Beton und Betonelemente – Produktkategorieregeln für Umweltproduktdeklarationen nach EN ISO 14025 und EN 15804 gemäß dem Programmbetrieb zur Erstellung von Umweltproduktdeklarationen (EPD) des ift Rosenheim. Rosenheim, 2025.
- ift Rosenheim GmbH. Solidian GmbH – Umweltproduktdeklaration (EPD) – Bewehrungs- und Befestigungssysteme solidian GRID und solidian REBAR. Rosenheim, 2022.
- Immoportal GmbH, Burgthann. <https://www.immoportal.com/immobilienpreise/muenchen/lochhausen> <06.03.2026>
- JLL München Real Estate, München. <https://www.jll.com/de-de/insights/market-perspectives/germany-living> <06.03.2026>
- kbp – Kauer - Brodmeier - Peter Architekten & Ingenieure GmbH: Berechnungen zum Wärmeschutz, Feuchteschutz und Hitzeschutz [verschiedener Außenwandkonstruktionen]. Würzburg, 07.04.2022 (Interner Bericht)
- Krippner, Roland; Freimann Thomas: MA-3010 (Masterseminar) Baustoffwende – Neue Materialien für nachhaltige und CO<sub>2</sub>-reduzierte Betone. Technische Hochschule Nürnberg, Fakultäten Architektur und Bauingenieurwesen. Nürnberg, Wintersemester 2025/2026.
- Krippner, Roland; Freimann Thomas: MA-3020 (Masterseminar) Zukunft Beton – Nachhaltigkeitsstrategien mit alternativen Bindemitteln und neuartigen Rezepturen. Technische Hochschule Nürnberg, Fakultäten Architektur und Bauingenieurwesen. Nürnberg, Wintersemester 2024/2025.
- Krippner, Roland; Freimann, Thomas (Bearbeitung): Informationsbaustein Holzleichtbeton

- [BAU 2015]. BetonMarketing Deutschland GmbH / InformationsZentrum Beton GmbH (Hrsg.). Flyer. Erkrath, 2015.
- Krippner, Roland; Freimann, Thomas: Holzleichtbeton als Material für die Sanierung von Außenwänden (01/2012 – 03/2014). Stiftung Bayerisches Baugewerbe, München. Abschlussbericht: November 2017 (unveröffentlicht)
- Krippner, Roland; Freimann, Thomas: Holzleichtbeton mit Textilbewehrung – Verbundwerkstoff für plattenförmige Bauteile (10/2009 – 03/ 2011). Staedler Stiftung, Nürnberg. Abschlussbericht: November 2011 (unveröffentlicht)
- Krippner, Roland; Freimann, Thomas: Materialexperiment Holzleichtbeton. In: Baukultur. Zeitschrift des DAI, 37. Jg., 1/2015, S. 34–35.
- Krippner, Roland; Niebler, Dagmar; Issig, Holger: Holzleichtbeton im Hochbau. Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 17. Reihe Holzbauforschung, Band H 007/17. TU München, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Baukonstruktion, Prof. Florian Musso. Stuttgart 2008.
- Krippner, Roland; Niebler, Dagmar; Urbonas, Liudvikas; Heinz, Detlef: Schnell erhärtender Holzleichtbeton. Teil II: Mögliche Anwendungsgebiete. In: holztechnologie, 50. Jg., 5/2009, S. 19-23
- Krippner, Roland: Holzleichtbeton. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 50.Jg., 12/2002, S. 74-77.
- Krippner, Roland: Review: Holzleichtbeton. Zu Forschungsstand und Einsatzmöglichkeiten im Bereich von Innenausbau und Fassade. In: holztechnologie, 58. Jg., 4/2017, S. 42-49.
- Krippner, Roland: Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien. In: Bauphysik, 27. Jg., 3/2005, S. 173-180.
- Krippner, Roland: Zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden. Dissertation. München: TU München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Mai 2004. <https://mediatum.ub.tum.de/?id=601009> <15.04.2020>
- KS-Schallschutzrechner Version 8.03. Hannover: Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V., 2021
- LGA Bautechnik GmbH: Prüfbericht Nr. 24V40227/e [Korngemisch 0/5 mm]. Nürnberg, 11.09.2024
- LGA Bautechnik GmbH: Prüfbericht Nr. Nr. 24V40229/a [Edelbrechsand]. Nürnberg, 11.09.2024
- Manara, Jochen; Stark, Cornelia: Bestimmung des U-Werts eines Beton-VIP-Beton-Sandwichbauteils. Report CAE - 1224 - 10 (2024). Würzburg: Center for Applied Energy Research e.V., 09.01.2025.
- Manara, Jochen; Stark, Cornelia: Bestimmung des U-Werts eines Beton-VIP-Beton-Sandwichbauteils. Report CAE - 0525 - 05 (2025). Würzburg: Center for Applied Energy Research e.V., 28.07.2025.
- Maysenhölder, Waldemar: Schalldämmung mit Vakuumisulationspaneelen. Messung und rechnerische Modellierung. In: Bauphysik, 30. Jg., 6/2008, S. 366
- Maysenhölder, Waldemar: Untersuchung der schalltechnischen Eigenschaften und der Dröhneffekte von Doppelbodenplatten. IBP-Bericht B-BA 2/1993. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 1993.
- Meyerhöfer, Lucas: Corkrete – Kork als alternativer Zuschlagstoff für nachhaltigen Leichtbeton. Masteranschlussarbeit. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner, Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann. Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Fakultät Architektur. Nürnberg, Wintersemester 2024/2025, Februar 2025
- MFPA Leipzig GmbH: Bestimmung der Verbrennungswärme nach DIN EN ISO 1716:2010-11. Prüfbericht Nr. PB 3.1/24-296-1. Leipzig: Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH, 7. Mai 2025
- MFPA Leipzig GmbH: Prüfung zum Brandverhalten von Bauprodukten, Entzündbarkeit bei direkter Flammeneinwirkung nach DIN EN ISO 11925-2:2020-07. Prüfbericht Nr. PB 3.1/25-153-2. Leipzig: Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH, 17. September 2025a
- MFPA Leipzig GmbH: Prüfungen nach dem SBI-Verfahren (Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – ...) nach DIN EN 13823:2023-04. Prüfbericht Nr. PB 3.1/25-153-1. Leipzig: Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH, 17. September 2025b
- ÖKOBAUDAT. [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=87371640-546c-4d9c-84cc-c13b6be94146&version=00.02.000&stock=OB\\_D\\_2024\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=87371640-546c-4d9c-84cc-c13b6be94146&version=00.02.000&stock=OB_D_2024_I&lang=de)

- POLIGOM: Porous Lignous Organic Materials („Hochporöse Ligninmaterialien“) (2019 – 2022). Vgl. u. a. auch Altarabeen, Razan et al.: Lignin Polyurethane Aerogels. Influence of Solvent on Textural Properties. In: Gels 2024, 10(12), 827; <https://doi.org/10.3390/gels10120827>.
- Przybilla, Steve: Oben ist noch Platz. In: Süddeutsche Zeitung, Nr. 115, 18./19. Mai 2019, S. 49
- Quraishi, S. et al. (2015). Novel non-cytotoxic alginate–lignin hybrid aerogels as scaffolds for tissue engineering. The Journal of Supercritical Fluids, 105, 1-8.
- Reckter, Bettina: Runde Teilchen aus Aerogel Verfahrenstechnik. In: VDI Nachrichten, Nr. 39, 27.09.2019, S. 15.
- Renuables – Umweltproduktdeklaration (EPD) – Spaceloft Aerogel Dämmstoff. UK, 2015
- Sigmund, Bettina: Aktivierte Gebäudehülle. In: Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 58. Jg., 6/2018, S. 10–12.
- Smirnova, Irina: Stoffliche Nutzung von Lignin: Nanoporöse Materialien. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Thermische Verfahrenstechnik. Forschungsbericht / Abschlussbericht [Förderkennzeichen: 22018312]. Hamburg, 2018
- solidian GRID Q85-CCE-21 (F01R01). Technical Product Data Sheet. Version: 2407. Albstadt: solidian GmbH, 08.07.2024.
- solidian GRID Q95-CCE-38 (F01R01). Technical Product Data Sheet. Version: 2407. Albstadt: solidian GmbH, 08.07.2024.
- solidian GRID Q121-RRE-38 (F02R01). Technisches Produktdatenblatt. Version: 2411. Albstadt: solidian GmbH, 11.11.2024.
- solidian REBAR. Technisches Produktdatenblatt. Version: 2208. Albstadt: solidian GmbH, 08.08.2022.
- solidian. Carbon-Bewehrungsgitter solidian GRID zur Bewehrung von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung. abZ/ aBG. Nummer: Z-1.6-308. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 01.08.2024.
- Stamm-Teske, Walter: Experiment Holzbeton green:house, Weimar. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 59. Jg., 12/2011, S. 38–43.
- Stephan, Wolfram: HLB Aerogel Konstruktionen – Wirkungsabschätzung. Interner Bericht. Technische Hochschule Nürnberg, Institut für Energie und Gebäude - ieg. Nürnberg 25.07.2020
- Tichelmann, Karsten Ulrich et al.: Deutschland-Studie 2015. Wohnraumpotentiale durch Aufstockungen. Kurzfassung. Bearbeitung: Technische Universität Darmstadt; ISP Eduard Pestel Institut für Systemforschung e.V. Darmstadt, Stand 29. Februar 2016
- Tichelmann, Karsten Ulrich et al.: Deutschlandstudie 2019. Wohnraumpotentiale in urbanen Lagen. Aufstockung und Umnutzung von Nichtwohngebäuden. Bearbeitung: Technische Universität Darmstadt; ISP Eduard Pestel Institut für Systemforschung e.V.; VHT Institut für Leichtbau | Trockenbau | Holzbau. Darmstadt, Stand 13. Februar 2019
- Torgal, F. P., Mistretta, M., Kaklauskas, A., Granqvist, C. G., & Cabeza, L. F. (2013). Nearly zero energy building refurbishment. Nearly Zero Energy Build Refurb, 555-582.
- Ubakus-U-Wert-Rechner. u-wert.net GmbH, Kraichtal. <https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/> <31.03.2025>
- Universität Stuttgart, ILIAS für Lehre und Lernen. <https://ilias3.uni-stuttgart.de> <24.01.2026>
- Urbonas, Liudvikas; Heinz, Detlef; Krippner, Roland; Niebler, Dagmar: Schnell erhärtender Holzleichtbeton. Teil I: Hydratationsmechanismen und physikalisch-technische Eigenschaften der Holzbetone. In: holztechnologie, 50. Jg., 4/2009, S. S. 26-31
- VDI-Richtlinie 2719: Schallschutz von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen. Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 08/1987.
- Wang, C., Xiong, Y., Fan, B., Yao, Q., Wang, H., Jin, C., & Sun, Q. (2016). Cellulose as an adhesion agent for the synthesis of lignin aerogel with strong mechanical performance, Sound-absorption and thermal insulation. Scientific reports, 6(1), 1-9.
- Winter, Stefan; Henke, Klaudius; Talke, Daniel: Additive Fertigung freigeformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton. Forschungsbericht / Abschlussbericht, F 3002. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2016.
- Ziegelindustrie / Fachverband Nord e.V., Oldenburg. <https://www.ziegelindustrie.de/zweischaliges-mauerwerk/bauphysik/schallschutz> <24.01.2026>
- Zwycycki, Daia: Holzleichtbeton im Verbund mit Holz – ziemlich beste Freunde. Vortrag Universität der Bundeswehr. München 01.02.2016