EINGEGANGEN
-7. AUG. 2008
Erled. F-2008/23

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR
HOLZFORSCHUNG e.V.
Bayerstrasse 57-59 · D-80335 München
Telefon 089 / 51 61 70-0 · Fax 53 16 57

HOLZBAU DER ZUKUNFT

TP 17
Holzleichtbeton im Hochbau

TU München
Lehrstuhl für
Baustoffkunde und
Baukonstruktion
Univ. Prof. Florian Musso

Roland Krippner
Dagmar Niebler
Holger Issig

Kurzfassung

Im Rahmen des Teilprojektes bildete die Identifizierung und Untersuchung von Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton in verschiedenen Einbausituationen den Arbeitsschwerpunkt. Im Vordergrund standen verbesserte funktionale Eigenschaften in Verbindung mit gestalterischen Potentialen bei sichtbaren Oberflächen. Anhand exemplarisch ausgewählter Einsatzbereiche im Innenraum und im Bereich der Gebäudefassade, wurden materialspezifische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt und mit dem Bau von Modellen sowie der Planung und Ausführung von Testprojekten einer anwendungsbezogenen und praxisnahen Überprüfung unterzogen. Das Ziel war eine möglichst weitreichende Darstellung des Leistungsspektrums von Bauteilen bzw. Bauelementen aus Holzleichtbeton und (in Teilbereichen) eine Beurteilung der Marktfähigkeit (auch gegenüber Konkurrenzprodukten).

Um die Leistungsfähigkeit von Holzleichtbeton in den jeweiligen Anwendungsbereichen beurteilen zu können, waren ergänzende materialspezifische Untersuchungen v.a. hinsichtlich bauphysikalischer Eigenschaften notwendig. Prüfungen der Schallabsorption ergaben, das Bauteile aus Holzleichtbeton mittlere Schallabsorptionsgrade von $\alpha w = 0{,}10$-$0{,}65$ aufweisen, bei Rohdichten, die zwischen Holzfaserzement- (Duripanel ca. 1300kg/m³) und Holzwolleleichtbauplatte (Fibrolith ca. 400kg/m³) liegen. Wie die Ergebnisse zeigten, können Bauteile aus Holzleichtbeton als akustische Decken- bzw. Wandabsorber die Nachhallzeiten reduzieren und die raumakustische Situation verbessern.
Im Bereich des Brandschutzes erreichten Mischungen mit einem Holzmasseanteil bis ca. 20% die Baustoffklasse A2. Insbesondere für Innenräume ergeben sich dadurch auch Einsatzmöglichkeiten für den baulichen Brandschutz.
Im Bereich von Gebäudefassaden nimmt aufgrund energetischer Aspekte der Wärmeschutz eine zentrale Rolle ein. Hier erreichte der Holzleichbeton λ-Werte von 0,14-0,28 W/mK bei Rohdichten zwischen 540 und 700 kg/m³. Damit liegt der Baustoff bzgl. der Wärmeleitfähigkeit im Bereich von Porenbeton.

Anhand experimenteller Untersuchungen zu ausgewählten Anwendungsbereichen im Innenraum und im Bereich von Gebäudefassaden konnten erste Einschätzungen zur Leistungsfähigkeit von Bauteilen bzw. Bauelementen (im natürlichen Maßstab) gewonnen werden.
Für den Innenraum erfolgten Untersuchungen von Platten aus Holzleichtbeton als Decklage von Unterdecken und als Wandbekleidung von Vorsatzschalen (mit primär raumakustischer Funktion). Mit den geplanten und durchgeführtern Demonstrationsprojekten konnten bauphysikalische, konstruktive und gestalterische Aspekte evaluiert werden. Messungen und Testbetonagen zeigten ausreichende Festigkeiten und Kantenstabilität, die sich durch verbesserte Rezepturen hinsichtlich Schallabsorption und mechanischem Verhalten noch optimieren lassen.
Für den Bereich der Gebäudehülle sind verschiedene Aufbauten mit Holzleichtbeton im Außen- und Innenbereich konzipiert und (vorab-)untersucht worden. Dabei konnten erste Einschätzungen zu tragenden Außenwandelementen aus Holzleichtbeton im Verbund mit Massivholz und Normalbeton erarbeitet werden. Darüber hinaus erfolgten Testreihen hinsichtlich der Eignung als Material für Elementwände und Fassadenplatten für hinterlüftete Konstruktionen.
Bei den Versuchen zum Schichtenaufbau von Holzleichtbeton im Verbund mit Massivholz als tragende Außenwand zeigten in Kurzzeitscher- und Windsogversuchen Kerve und Schubverbinder deutlich Vorteile als Verbindungsmittel. Wärme- und feuchteschutztechnische Nachweise belegten die Funktionstüchtigkeit derartiger Konstruktionen.
In Zusammenarbeit mit einem Betonfertigteilunternehmen konnten bei der Realisierung eines Demonstrationsprojektes (im Rahmen der Landesgartenschau in

Neu-Ulm) Erkenntnisse zu fertigungstechnischen Abläufen beim Verbund von Holzleichtbeton mit Normalbeton gewonnen werden.
Erste Tests zu Elementwänden mit Holzleichtbeton als raumseitig angeordnete Schicht belegten prinzipiell auch eine Eignung für derartige Wandaufbauten. Mischungen mit Rohdichten zwischen 850 und 1050 kg/m³ zeigten ausreichende Auszugsfestigkeiten der Gitterträger als Grundlage für weiterführende Versuche.
Im Rahmen eines studentischen Baustoffkundeseminars konnte die Machbarkeit auch von komplexen Geomentrien und plastisch strukturierter Oberflächen aufgezeigt werden. Fassadenbekleidungen aus Holzleichtbeton sind frostbeständig und eröffnen auch als nichtbrennbarer Baustoff (Klasse A2 nach DIN 4102) somit neue Einsatzbereiche, funktional und gestalterisch.

Weiterhin sind im Rahmen der Projektarbeiten Vorversuche zu unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren (Pumpen, Pressen, Strangpressen) von Holzleichtbeton vorgenommen worden, die zur Klärung von Randbedingungen für spätere industrielle Herstellungsprozesse und für alternative Anwendungsbereiche (z.B. als Wand-/Deckenputz, Estrichbelag) von Bedeutung sind. Dabei waren beim Pressen von Platten mit ausgewählten Mischungen keine Probleme festzustellen. Hinsichtlich des Pumpens und Strangpressens zeigten sich Schwierigkeiten bei den Frischbeton-Eigenschaften: u.a. zu schnelles Abbinden, größerer Einfluss der Holzfeuchte auf die Verarbeitung. Es wurde deutlich, dass derartige experimentelle Untersuchungen eine enge Kooperation mit Baufirmen (Know-How und Maschinentechnik) erfordern. Da es sich um ergänzende (über die Projektinhalte hinausgehende) Arbeitsschritte handelt und aufgrund von terminlichen Engpässen erfolgten im Rahmen des Projektes keine weiteren Tests.

Holzleichtbeton ist ein Baustoff für sichtbare Anwendungen, der sich primär für Wand- und Deckenoberflächen sehr gut eignet; alternative Innenraumanwendungen, z.B. als Bodenbelag, sind ebenfalls denkbar. Das feinkörnige, organische Zuschlagsmaterial ermöglicht gestalterisch hochwertige Oberflächen, die mit weiteren Zusätzen noch verfeinert und akzentuiert werden können. Für einen sichtbaren Einsatz des Materials ist in der Regel jedoch eine nachträgliche Oberflächenbearbeitung erforderlich (bestimmt die Ablesbarkeit des Zuschlagsmaterials und die Tiefe der Strukturen), für den Einsatz im Außenbereich ggf. zusätzlich eine Beschichtung.
Zur Klärung geeigneter Bearbeitungstechniken wurden verschiedene Verfahren an Holzleichtbeton-Proben und Musterflächen durchgeführt. Für eine maschinelle Bearbeitung eignen sich Schleifen (z.B. mit Bandschleifer) oder Sägen (z.B. mit Steinsäge), beide sind für eine großmaßstäbliche Fertigung jedoch sehr arbeitsaufwändig. Insgesamt zeigten sich Vorteile beim Strahlen, gleichermaßen bei der Oberflächenqualität und durch eine einfachere Handhabung, was auch bei der Fertigteilherstellung von Nutzen ist.

Im Rahmen der Projektarbeiten erfolgten eine Reihe über die ursprüngliche Antragstellung hinausgehende Untersuchungen, für die partiell auch Kooperationspartner aus der Bauwirtschaft gewonnen werden konnten. Damit hat sich das Bearbeitungsspektrum deutlich erweitert mit der Folge, dass einige Aspekte nicht hinreichend geklärt und neu aufkommende Fragestellungen nicht weiter untersucht werden konnten. Trotz der durchweg positiven und ermutigenden Ergebnisse besteht weiterer Forschungsbedarf z.B. hinsichtlich Optimierung von Mischungen für die untersuchten Anwendungsbereiche, Materialtests zu Witterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit. Darüber hinaus fehlen noch eingehendere Erfahrungen aus der Implementierung und der Handhabung von Holzleichtbeton in industriellen Fertigungsabläufen.
Mit den durchgeführten materialspezifischen Untersuchungen und der Realisierung von Demonstrationsprojekten ist es gelungen, die Grundlagen zu den

stofflichen Eigenschaften von Holzleichtbeton deutlich zu erweitern und die Leistungsfähigkeit in exemplarischen Anwendungsbereichen aufzuzeigen. Es hat sich gezeigt, dass Holzleichtbeton hinsichtlich des funktionalen und konstruktiven Verhaltens eine Marktfähigkeit gegenüber Konkurrenzprodukten aufweist, mit ästhetischen Vorteilen bei hochwertigen Oberflächen.
Die vorliegenden Ergebnisse belegen, dass Holzleichtbeton über vielversprechende Potentiale als Material für Bauteile und Bauelemente sowohl in der Gebäudefassade wie auch im Innenausbau verfügt. Durch die Variationsmöglichkeiten bei den einzelnen Baustoffkomponenten kann das Kompositmaterial mit unterschiedlichen mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften hergestellt und somit gut auf den jeweiligen Einsatzbereich funktional und gestalterisch angepasst werden.

Summary

Within the scope of the sub-project, the identification and study of possible applications of wood-lightweight-concrete in various construction situations constituted the key activity. Of main interest were improved functional specifications in combination with the creative potentials in visible surfaces. On the basis of exemplarily selected areas of application in the interior and the area of building facades, material-specific and experimental research was carried out and was then subject to an applied and practical analysis with the construction of models and the planning and implementation of test projects. The goal was to provide a wide presentation of the performance spectrum of structural elements made of wood-lightweight-concrete and an assessment of marketability (also compared to competitive products).

In order to be able to assess the performance of wood-lightweight-concrete in respective areas of application, complementary material-specific studies regarding construction-physical specifications were necessary. Tests of acoustical absorption showed that the structural elements made of wood-lightweight-concrete feature medium acoustical absorption coefficients of α_w = 0.10-0.65, with a bulk density which lies between wood fiber cement- (Duripanel approx. 1300kg/m³) and lightweight wood-wool building boards (Fibrolith approx. 400kg/m³). As the results show, structural elements made of wood-lightweight-concrete can reduce the reverberation period as acoustic covers or wall absorbers and improve the acoustic situation. The compositions reach a construction material category of A2 in the area of fire protection with a wood mass fraction of up to approx. 20%. Especially for interior spaces, possible applications for the structural fire protection thus unfold.
Thermal protection plays a central roll in scope of building facades due to energy aspects. Here, the wood-lightweight-concrete reaches λ-values of 0.14 - 0.28 W/mK for bulk densities between 540 and 700 kg/m³. Thus the building material lies in the range of porous concrete regarding the thermal conductivity.

Based on experimental studies in selected areas of application in the interior and in building facades, first estimations on the performance of structural elements (in natural scale) were obtained. Structural and creative studies of plates made of wood-lightweight-concrete and used as top layer of ceilings and as paneling of facings (with primary acoustic functions) took place for the interior. Construction-physical, structural and creative aspects could be evaluated by planning and implementing demonstration projects. Measurements and test-concreting show sufficient solidness and edge stability, which can be further optimized by improved compositions regarding acoustical absorption and mechanical behavior.

For the area of the building envelope, various superstructures with wood-lightweight-concrete have been conceived for the exterior and the interior and have been (preliminarily) studied. First results on bearing exterior wall elements made of wood-lightweight-concrete in combination with solid wood and normal concrete could be developed. Furthermore, series of tests were conducted regarding the suitability as a material for element walls and facade plates for rear ventilated facade constructions.
In the trials for clarification of structural and construction-physical aspects of layer construction of wood-lightweight-concrete in combination with solid wood as supporting exterior wall, it was necessary to clarify the question of appropriate binding materials. Saw kerf and shear connectors exhibit clear advantages in trials. Evidences for thermal and moisture protection proof the operational efficiency of such constructions. In cooperation with a company producing precast concrete, knowledge on production operations with wood-lightweight-concrete in combination with normal concrete could be gained and a demonstration project was realized (part of the garden festival Neu-Ulm).
First tests on component walls with wood-lightweight-concrete as room-side oriented layer also proof in principle the suitability for such wall superstructures. Compositions with bulk densities between 850 and 1050 kg/m3 show sufficient Pull-out resistance of the lattice grider and are a basis for continuing trials. Within the scope of a materials science student seminar, complementary experimental trials on wood-lightweight-concrete as a material for structural elements for non-bearing rear ventilated facades took place. The feasibility of complex geometries and plastic-structured surfaces could be shown in these tests.

Furthermore, within the scope of the project, preliminary tests on different processing procedures (Pumps, Presses, Extruders) of wood-lightweight-concrete were carried out, which were of importance for the clarification of required general conditions for later industrial production processes and for alternative fields of application (e.g. as wall-/ceiling plaster, floor pavement covering). No problems were detected in pressing of plates with selected compositions. With regard to pumps and extruders, difficulties in the fresh concrete properties appeared: among others, to quick hardening, and greater influence of timber moisture on the process. It was clear that such experimental studies require a close cooperation with construction companies (Know-How and machine technology). As this area of study was complementary (beyond the project contents) and due to limited timeline, no further tests were carried out within the scope of the project.

The wood-lightweight-concrete is a construction material for visible applications, which is primarily well suited for wall- and ceiling surfaces; possible alternative interior applications, e.g. as floor coverings, are also conceivable. The organic, fine-granulated aggregate facilitates creative quality surfaces, which can be further refined and accentuated with additional measures. For a visible use of the material, however, a subsequent surface processing is normally required (defines the clearness of display of the aggregate and the depth of the structure), for use in exterior, if required, an additional coating. For clarification of the appropriate processing technology, various procedures on wood-lightweight-concrete tests and models were carried out. For a machine-processing grinding (e.g. with belt grinder) or sawing (e.g. with stone saw) are suitable, both are, however, very labor-intensive for a large-scale production. In total, advantages appear in blasting, due to surface quality as well as an easy handling, which is also useful in precast production.

Within the project, a series of studies beyond the original project application were conducted, for which also cooperation partners from the construction in-

dustry could be aquired. Thus, the work schedule was expanded with the consequence that a few aspects could not be fully clarified and new emerging questions could not be studied further. In spite of positive and encouraging results, there is a need for further research e.g. regarding the optimization of compositions for the studied fields of application, material tests for weatherability and durability. In addition, detailed experiences from the implementation and handling of wood-lightweight-concrete in industrial production processes are still missing.

The project managed to clearly expand the fundamental knowlegde of material spefiications and properties of lightweight timber concrete with the accomplished material-specific studies and the realization of demonstration projects and also pointed out the performance of this material in exemplary fields of application. It appeared that wood-lightweight-concrete, regarding the functional and structural behavior, features a marketability compared to competitive products, with clear advantages in aesthetical high-quality surfaces.

The results prove that wood-lightweight-concrete possesses promising potentials as material for structural elements in the building facades as well as in the interior. Due to the variation possibilities of the material components used for a composition, a composite material with different mechanical and construction-physical specifications and properties can be produced and therefore, can be functionally and in design adjusted to the respective fields of application.

1.	**Hintergrund und Zielsetzung**	**3**
1.1.	Forschungsansatz	3
1.2.	Ziele des Forschungsprojektes	3
1.3.	Änderungen zum Forschungsantrag	4
2.	**Stand der Forschung**	**6**
2.1.	Holzverbundwerkstoffe	6
2.2.	Forschungsprojekte zum Holzleichtbeton	7
2.3.	Ausgangssituation	8
3.	**Materialspezifische Untersuchungen**	**9**
3.1.	Kenndaten von Ausgangsrezepturen	9
3.2.	Schallschutz und Raumakustik	10
3.2.1.	Raumakustik	10
3.2.2.	Holzleichtbeton als poröser Schallabsorber	12
3.2.3.	Ausgangsrezepturen	12
3.2.4.	Prüfverfahren	14
3.2.5.	Ergebnisse	14
3.2.6.	Holzleichtbeton als akustischer Absorber in Räumen	17
3.2.7.	Flächenbelegung im Raum	18
3.2.8.	Zusammenfassung	19
3.3.	Brandschutz	19
3.3.1.	Bisherige Untersuchungen	20
3.3.2.	Prüfverfahren	20
3.3.3.	Ausgangsrezepturen	20
3.3.4.	Brennwertermittlung nach EN ISO 1716	21
3.3.5.	Ergebnisse	21
3.3.6.	Prüfung zum Brandverhalten nach EN 13823	22
3.3.7.	Ergebnisse	23
3.3.8.	Zusammenfassung	23
3.4.	Wärmeschutz	25
3.4.1.	Wärmeleitfähigkeit und Holzleichtbeton	25
3.4.2.	Bisherige Untersuchungen	25
3.4.3.	Ausgangsrezepturen	25
3.4.4.	Ergebnisse	26
3.5.	Holzleichtbeton und PCM	28
3.5.1.	Das Material	29
3.5.2.	Ausgangsrezepturen	31
3.5.3.	Ergebnisse	31
3.5.4.	Zusammenfassung	33
3.6.	Lichttechnische Untersuchung von Holzleichtbetonproben	33
3.6.1.	Ausgangsrezepturen	34
3.6.2.	Messverfahren	34
3.6.3.	Ergebnisse	35
4.	**Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton in der Gebäudehülle**	**37**
4.1.	Anwendungsbereiche im Hochbau	37
4.2.	Holzleichtbeton im Fassadenbereich	38
4.3.	Verbund mit Massivholz als tragende Außenwand	40
4.3.1.	Zu Holzverbundkonstruktionen	40
4.3.2.	Mögliche Aussenwand-Aufbauten	42
4.3.3.	Verbindungsmittel	43
4.3.4.	Zu den Versuchsaufbauten	45
4.3.5.	Betonage und Tests	47
4.3.6.	Kurzzeitscherversuche	50

4.3.7. Ergebnisse 50
4.3.8. Winddruck und Windsogversuche 53
4.3.9. Ergebnisse 54
4.3.10. Außenwandmodell 56
4.4. Holzleichtbeton und Elementwände 57
4.4.1. Vorbereitung von Versuchsarbeiten 59
4.4.2. Auszugsversuche 60
4.4.3. Ergebnisse 60
4.5. Weitere Einsatzmöglichkeiten im Fassadenbereich 62

5. Holzleichtbeton im Innenraum 64
5.1. Holzleichtbeton als Bauteil für Decklagen 64
5.1.1. Zu Unterdecken 64
5.1.2. Auswahl eines Deckensystems 66
5.1.3. Betonage von Deckenplatten 66
5.1.4. Herstellung von Musterdecken 68
5.1.5. Optimierung der Decklagenbauteile 69
5.1.6. Materialkombinationen 71
5.2. Mechanische Untersuchungen 71
5.2.1. Prüfung von Biegefestigkeit und E-Modul nach EN 310 72
5.2.2. Untersuchung zur Stabilität und Festigkeit von Decklagen 73
5.2.3. Ermittlung der Tragfähigkeit von Holzschrauben 75
5.3. Demonstrationsprojekte 78
5.3.1. Seminarraum in Rosenheim 78
5.3.2. Büroraum in München 79
5.3.3. Einschätzung des akustischen Verbesserungspotentials 81

6. Herstellung und Bearbeitung von Holzleichtbeton 83
6.1. Holzleichtbetonplatten im Innenraum 83
6.2. Holzleichtbetonelemente im Fassadenbereich 85
6.2.1. Fertigteilwand mit Musterfläche 86
6.3. Versuche zu weiteren Herstellungsverfahren 89
6.3.1. Pressen von Platten 89
6.3.2. Strangpressen von Holzleichtbeton 91
6.3.3. Pumpversuche 92
6.4. Material und Oberfläche 94
6.4.1. Bearbeitung von Holzleichtbetonproben 95
6.4.2. Holzleichtbetonplatten für Decklagen 95
6.4.3. Ergänzende Versuche 97
6.4.4. Bearbeitung der Außenwandmusterfläche 97
6.4.5. Dauerhaftigkeit und Beständigkeit 100

7. Zusammenfassung und Ausblick 104

8. Anhang 107
8.1. Übersicht der verwendeten Holzleichtbeton-Mischungen 107
8.2. Literaturverzeichnis 108
8.3. Verzeichnis der verwendeten Normen 110
8.4. Veröffentlichungen und Vorträge 111
8.5. Messen und Symposien 112
8.6. Abbildungsverzeichnis 112
8.7. Kooperationspartner 113
8.8. Bearbeiter 115

1. Hintergrund und Zielsetzung

Der nachwachsende Baustoff Holz war über Jahrhunderte wesentlicher Bestandteil der Primärkonstruktion von Bauten. Erst im Zuge der Entwicklung moderner Materialien in der 2. Hälfte des 19.Jhs., insbesondere Stahlbeton, wurde das Material zeitweise in den Hintergrund gedrängt. Im Vergleich zu heute wurde um 1900 in Mitteleuropa etwa die 10-fache Menge an Massivholz in der Baukonstruktion eingesetzt. Durch Neubewertung von Energie- und Stoffströmen im Primärenergiehaushalt baulicher Systeme und im Energiehaushalt von Gebäuden, insbesondere vor dem Hintergrund der aktuellen Klimasituation, gewinnen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Holz in unterschiedlicher Zusammensetzung wieder an Bedeutung.

Im Rahmen des Verbundprojektes „Holzbau der Zukunft" ist in unterschiedlichen Teilprojekten der Einsatz von Holz bei der Sanierung von Bestandbauten, in der Primärkonstruktion mehrgeschossiger Bauten, im Innenausbau und in der Entwicklung von neuen Bauteilen und Werkstoffen untersucht und vergleichend bewertet worden. Innerhalb des Verbundprojektes erfolgte eine Gliederung in unterschiedliche Themenbereiche. Das Teilprojekt 17 „Holzleichtbeton im Hochbau" war zusammen mit den Teilprojekten 9, 14, 15 und 16 Teil der Themengruppe „Neue Bauteile, neue Werkstoffe". Innerhalb der Themengruppe Bestand eine inhaltliche und organisatorische Kooperation mit dem Teilprojekt 16 „Holzbeton".

Die Antragstellung für das Forschungsprojekt erfolgte am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog mit dem Titel „Holzleichtbeton im Fassadenbereich". Aufgrund der Emeritierung von Prof. Herzog übernahm die Leitung und Durchführung des Forschungsprojektes bei Projektbeginn (Oktober 2005) der Lehrstuhl für Baukonstruktion und Baustoffkunde von Prof. Florian Musso. Die Bearbeitungszeit betrug 30 Monate.

1.1. Forschungsansatz

Holzleichtbeton ist ein leistungsfähiger Verbundwerkstoff, der sich aus Zement, Sägespänen bzw. -mehl, Wasser und Additiven zusammensetzt. Aufgrund seiner Rohdichte zählt er zu den Leichtbetonen. Ausgehend von Untersuchungen innerhalb einer Dissertation am Lehrstuhl von Prof. Herzog zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden und bereits abgeschlossenen FuE-Arbeiten lagen erste materialspezifische Einschätzungen vor, die ein interessantes Entwicklungspotential erkennen ließen und eine weitergehende Forschung hinsichtlich der Klärung und Verfeinerung materialspezifischer Grundlagen, der Untersuchung von Anwendungsbereichen und der Klärung herstellungs- und fertigungstechnischer Randbedingungen vielversprechend erscheinen lassen.

1.2. Ziele des Forschungsprojektes

Im Rahmen des Teilprojektes bildeten die Untersuchungen neuer Anwendungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Einbausituationen den Schwerpunkt der Arbeiten. Dabei stand die Verknüpfung von verbesserten mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften mit den gestalterischen Potentialen von sichtbaren Oberflächen im Vordergrund. Anhand ausgewählter Anwendungsbereiche wurden stellvertretend materialspezifische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Mit dem Bau von Modellen und Mustern in unterschiedlichen Maßstäben sowie der Erstanwendung in Demonstrationsprojekten sind praxisrelevante Anforderungen getestet worden. Das Ziel war die Doku-

mentation des Leistungsspektrums von Holzleichtbeton-Bauteilen bzw. -Bauelementen und eine Beurteilung der Marktfähigkeit (auch gegenüber Konkurrenzprodukten).

1.3. Änderungen zum Forschungsantrag

Aufgrund der engen Kooperation mit dem TP 16 „Holzbeton" wurden einige Änderungen in der Vorgehensweise und Anpassungen der Arbeitspakete gegenüber der ursprünglichen Antragstellung vorgenommen. Die Optimierung der Mischungen hinsichtlich Art und Einsatz von Bindemitteln und des Zuschlagsstoffes Holz sowie die Durchführung entsprechender materialspezifischer Tests erfolgte am Centrum für Baustoffe und Materialprüfung der TUM. Dies umfasste ebenfalls die Untersuchungen zur Kombination von Holzleichtbeton mit mikroverkapselten Latentwärmespeichermaterialien.
Die Forschungsinhalte im Teilprojekt 17 konzentrierten sich auf die Untersuchung von Anwendungsbereichen in der Gebäudehülle und als Erweiterung im Innenraum. Im Einzelnen umfasst dies die bereits genannten ausgewählten Arbeitsinhalte (Abb. 1.1). Daraus folgte die Änderung des Projekttitels in „Holzleichtbeton im Hochbau".

Abschließend noch einige Bemerkungen zu den verwendeten Materialbezeichnungen "Holzbeton" (TP 16) und "Holzleichtbeton" (TP 17). Die Entwicklungsgeschichte der Kombination von organischen Füllstoffen mit anorganischen Bindemitteln ist begleitet vom Gebrauch unterschiedlichster Bezeichnungen. Dabei spielen einerseits der Herstellungsprozess und die hierzu verwendeten Ausgangsmaterialien eine wichtige Rolle, andererseits werden eingeführte Produktnamen, mitunter als eingetragenes Warenzeichen und/oder tradierter Markenname, synonym verwendet.
Unter Holzbeton fasst Charisius einen "Leichtbeton aus Zement und Säge- oder Hobelspänen beziehungsweise Holzwolle" zusammen. Diese aus den Ausgangsmaterialien Holz und Zement resultierende Begriffsbestimmung enthält jedoch bereits zwei daraus hervorgehende, unterschiedliche Produktentwicklungen: die Holzwolle-Leichtbauplatte und den Holz(span)beton. Zement gebundene Holzspäne in Form von leichten, gepressten Platten gelten zwar als 'klassischer' Vorläufer des Holzbetons, sind die Leichtbauplatten aus Holzwolle auch in "gewissem Grade stofflich zum Holzbeton zu zählen"[1], gleichwohl un-

1 Vgl. Charisius, 1947, S. 6

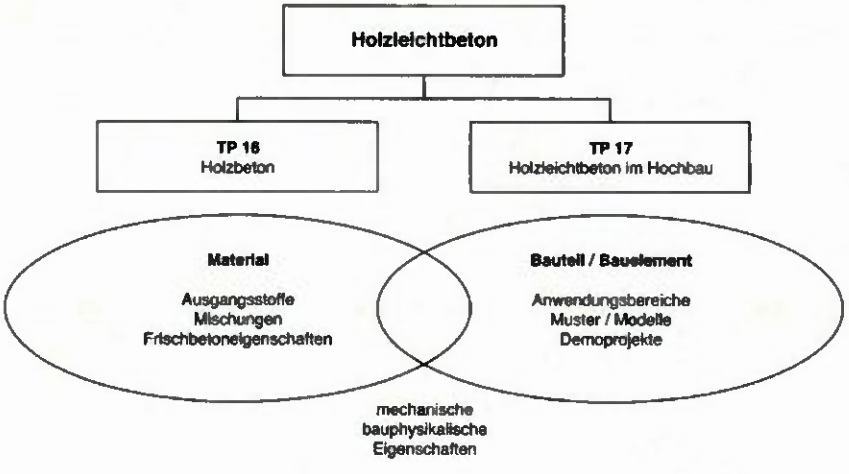


Abb.: 1.1 Zusammenarbeit, Arbeitsinhalte TP16/TP17

terscheidet sich die Holzwolle-Leichtbauplatte sowohl hinsichtlich des stofflichen Gefüges, der Oberflächenstruktur als auch von den Anwendungspotenzialen her deutlich vom Holzbeton.
Neben den Ausgangsmaterialien bildet die Rohdichte eine wichtige Kenngröße zur Klassifizierung von Materialien. Bereits Charisius zählt den Holzbeton (mit Rohdichten zwischen 500 und 1500 kg/m³) explizit zu den Leichtbetonen. Eine Klassifikationen allein hinsichtlich der Rohdichte vorzunehmen ist indes schwierig, da auch der Holz(span)beton Rohdichten im Bereich von 400 bis 600 kg/m³ aufweist. Vor diesem Hintergrund erscheint, auch als Abgrenzung zu den kleinformatigen Holzbeton-Mantelsteinen und mit Zielrichtung auf die Entwicklung und Etablierung eines leistungsfähigen Leicht-Baustoffs für eine industrielle Herstellung von Fertigteilen, die Kombination von "Holz" und "Beton" mit dem Adjektiv "leicht" zu "Holzleichtbeton" gleichermaßen sachlich begründet und auch als Produktname prägnant und identifizierbar. Erstmals hat Prof. Natterer den Terminus "Holzleichtbeton" [2] für einen Leichtbeton mit Holz als organischen Zuschlagsstoff verwendet.[3]

2 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 11ff.
3 Vgl. Krippner, 2004, S. 19f.

2. Stand der Forschung

Die Kombination von mineralischen Bindemitteln mit organischem Reststoffen aus der Holzverarbeitung reicht bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts zurück. Seit dieser Zeit gibt es Forschungsaktivitäten im Bereich der Betontechnologie (Mischungsoptimierung und Verträglichkeit von mineralischen Bindemitteln mit organischen Zuschlägen) und zur Entwicklung von mineralisch gebundenen Holzwerkstoffen.
Im Abschlussbericht des Teilprojektes 16 „Holzbeton" wird der betontechnologische Stand der Forschung ausführlich dokumentiert. Für die Untersuchung potentieller Anwendungsbereiche für Holzleichtbeton ist die Darstellung der historischen Entwicklung von mineralisch gebundenen Holzwerkstoffen von Interesse. Gleichzeitig ist eine Sichtung aktueller Marktprodukte und FuE-Arbeiten von Bedeutung. Beides dient zur Vervollständigung der Ausgangslage und bildet die Grundlage für das Forschungsprojekt.

2.1. Holzverbundwerkstoffe

Verbundwerksstoffe aus mineralischen Bindemitteln und organischen Zuschlagstoffen sind bereits seit vielen Jahrzehnten auf dem Baumarkt verfügbar. In den 1920er Jahren wurden sogenannte „Steinholzestriche" als Fußbodenbeläge verwendet. Steinholz besteht aus Magnesiamörtel und Sägemehl.[1] Als Vorteile gelten Dauerhaftigkeit, Feuersicherheit, elastische und wärmedämmende Eigenschaften. Nach Scherer verbindet das Material die Vorteile von Steinböden (hart und glänzend) und Holzböden (elastisch und warm), es sei angenehm zu begehen und wirke schalldämpfend.[2] Nachteilig wird die erhöhte Rissbildung durch das Schwind- und Quellverhalten und die nicht geklärte Witterungsbeständigkeit des Materials, für das auch der Terminus „Holzbeton" verwendet wird, angeführt. Nach 1945 führt auch der Verlust der Magnesiavorkommen in Schlesien zu einem Rückgang der Verwendung von Steinholzestrichen, da durch die Rohstoffverknappung das Bindemittel Magnesium sich verteuerte.

Nach dem Zweiten Weltkrieg experimentierte man in Deutschland aufgrund von Rohstoffmangel wieder mit Holzbetonen. Als Bindemittel wurde Zement verwendet. Füllstoffe waren verschiedene organische Zuschlagsstoffe wie Sägemehl und Sägespäne, aber auch Stroh und Schilf. Allerdings wurde schon zu diesem Zeitpunkt eine Vorbehandlung des Holzes in Form einer Mineralisierung durchgeführt, um die Oberflächenbindung zwischen Zementleim und Holz zu verbessern und das Schwind- und Quellverhalten zu verringern.[3]

Ende der 1960er Jahre griff man auch in der Deutschen Demokratischen Republik Forschungsaktivitäten zu diesem Thema auf. Es wurden Bauprodukte aus Holzbeton in verschiedenen Formen und Abmessungen für einen kostengünstigen Kleinwohnungsbau hergestellt. So fanden Holzbetonplatten für verschiedene Bautypen als tragende Außen- und Innenwände in eingeschossigen Bauten und nichttragende Außen- und Innenwände Einsatz. Aufgrund des geringen Materialgewichtes waren die Handmontage und die einfache Bearbeitung auf der Baustelle (sägen, bohren,nageln) von Vorteil.[4]

Anfang der 1930er Jahre werden mit der Patentierung von einschlägigen Verfahren die Grundlagen zur Herstellung von „Holzspanbeton" geschaffen, der sich vor allem in Österreich unter dem Produktnamen „Holzspanmantelstein"

1 Vgl. Fasse, 1921, zit. n. Krippner, 2004, S.31f.
2 Vgl. Scherer, 1907, zit. n. Krippner, 2004, S.32
3 Vgl. Charius, 1947, zit. n. Krippner, 2004, S. 33f.
4 Vgl. Krippner, 2004, S.35f.

und „Holzspanmantelbetonplatte" am Baumarkt etabliert.[5] Als Füllmaterial wurden Rest- und Abfallstoffe aus der Forstwirtschaft mechanisch bearbeitet und mineralisiert, um einen festen Verbund zwischen Bindemittel und Zuschlag zu gewährleisten. Die Mischungen mit einer erdfeuchten Konsistenz wurden in Formen gepresst. Es gibt eine Vielzahl von Standard- und Sonderanfertigungen, die für den Wohnungsbau als tragende und nichttragende Innen- und Aussenwände und als Lärmschutzwände verwendet wurden. Kombiniert mit einer Betonfüllung und einer zusätzlichen Dämmstoffplatte innen lassen sich Lastabtragung und U-Werte bis 0,20 W/m²K erreichen. Der Holzspanbeton hat eine Reihe von positiven Materialeigenschaften.[6] Die Rohdichten liegen zwischen 550-700 kg/m³ bei Druckfestigkeiten bis 3,5 N/mm². Das Material ist diffusionsoffen und hat eine hohe Witterungsbeständigkeit. Es wird nach ÖNORM als schwer entflammbar eingestuft und weist ein hohes Schalldämmmass von $R'_w = 47$ dB auf. Bauprodukte findet man in Österreich unter dem Namen „Durisol" und „Isospan".

Bei den mineralisch gebundenen Holzplattenwerkstoffen sind die zementgebundenen Holzspanplatten und die Holzwolleleichtbauplatten zu unterscheiden. Die Holzspanplatte besteht aus Zement und vorbehandelten Holzspänen, die zu Platten verschiedener Formate gepresst werden. Die Platten haben ein hohes Eigenwicht (Rohdichte zwischen 1150-1450 kg/m³). Der Holzanteil liegt bei 52-63 Vol.-%, der Bindemittelanteil ist mit 25-38 Vol.-% sehr hoch.[7] Aufgrund der guten mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften und der kostengünstigen Herstellung werden die Platten für den Innenausbau, Fußboden- und Fassadenbau verwendet. In Europa findet man die zementgebundene Spanplatte unter dem Produktnamen Duripanel (Eternit), Cetris Basic (Cetris) und Amroc-Panel (Amroc Baustoffe).

Die Holzwolleleichtbauplatte besteht aus speziell hergestellter Holzwolle und mineralischen Bindemitteln (Zement und Magnesit). Die Holzwolle wird durch Chloride vorbehandelt und mit dem Bindemittel zu Platten gepresst. Aufgrund geringer Rohdichte (400 kg/m³) und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,18-0,35 W/mK wird der Baustoff hauptsächlich als Dämmstoff und Putzträger eingesetzt. Mit Schallabsorptionswerten von NRC 0,4-0,45 findet die Holzwolleleichtbauplatte zunehmend Einsatz bei raumakustischen und schalltechnischen Maßnahmen.[8] Von Vorteil sind auch die einfache Montage und Bearbeitbarkeit auf der Baustelle. Hersteller sind die Firmen Heraklith und Fibrolith.

2.2. Forschungsprojekte zum Holzleichtbeton

Mitte der 1990er Jahre finden am Lehrstuhl für Holzkonstruktionen an der EPF-Lausanne/I-Bois Untersuchungen zu betontechnologischen Aspekten von Holzleichtbeton statt. Es werden neue Rezepturreihen hinsichtlich verschiedener Parameter wie Korngrößen des Restholzes, Zementart, Holzgehalt und Wasser-Zement-Wert untersucht.[9] Ergänzt werden die Arbeiten durch Ermittlung baukonstruktiver und bauphysikalischer Eigenschaften und durch die Skizzierung potentieller Anwendungsbereiche.
Anknüpfend an diese durchgeführten Forschungsarbeiten finden in den Jahren 2000-2004 am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie an der TU-München „Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden" statt.[10] Den Schwerpunkt der materialspezifischen Untersuchungen bildet dabei die Kombination von Holzleichtbeton mit organischen

5 Vgl. Beraus, 2001, zit. n. Krippner, 2004, S.38f.
6 Vgl. Abschlussbericht TP16, Tab. 2.1
7 Vgl. Abschlussbericht TP16, Tab. 2.1
8 Vgl. Abschlussbericht TP16, Tab. 2.1
9 Vgl. Gliniorz/ Natterer, 2000
10 Vgl. Krippner, 2004

Latentwärmespeichermaterialien. Im Bereich der Außenwand erfolgte die Erarbeitung erster Konzepte und der Bau von Modellen zu unterschiedlichen Wandaufbauten von Holzleichtbeton im Verbund mit Massivholz.

2.3. Ausgangssituation

Die bisherigen Forschungsergebnisse und Bauproduktentwicklungen zeigen, dass Verbundwerkstoffe aus mineralischen Bindemitteln und organischen Füllstoffen vielversprechende Potentiale v. a. im Bereich des ressourcenschonenden Bauens aufweisen. Bei den aktuell am Markt verfügbaren Produkten handelt es sich um mineralisch gebundene Holzzementmischungen, die durch Pressen verdichtet werden. Die Holzspäne bzw. -partikel werden in unterschiedlichen Verfahren vorbehandelt. Kennzeichnend für alle Holzverbundwerkstoffe ist ein hoher Bindemitteleinsatz. In der Regel handelt es sich um nicht sichtbare Oberflächen, die entweder beschichtet, gestrichen oder verputzt werden.
Entwicklungspotentiale bestehen zum einen hinsichtlich materialspezifischer Aspekte, wie z. B. Verbesserung der Verträglichkeit von unbehandeltem Restholz und mineralischen Bindemitteln, Optimierung von Holz als Zuschlagsstoff in mineralischen gebundenen Kompositmaterialen.

Das vorrangige Ziel ist u. a. die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Holzleichtbeton wie z. B. die Druck- und Biegezugfestigkeit und die Verringerung des oft festgestellten hohen Schwind- und Quellverhaltens, was die Maßhaltigkeit von Bauteilen und –elementen beeinflusst und auch zu Rissbildungen führen kann. Darüber hinaus fehlen eingehende Untersuchungen zur Eignung von Holzleichtbeton als Schallabsorber. Ebenso ist zu klären, in wie weit das Material einen ausreichenden Brandschutz sicherstellen kann (sowohl hinsichtlich der Baustoffklasse als auch der Feuerwiderstandsdauer).
Die materialspezifischen Untersuchungen bilden eine wichtige Grundlage zur Beurteilung der funktionalen und konstruktiven Leistungsfähigkeit von Bauteilen und –elementen aus Holzleichtbeton im Innenraum und in der Gebäudehülle. Bisher bestehen lediglich konzeptionelle Überlegungen zu Aufbauten und Schichtenfolgen, die teilweise anhand von Mustern und Modellen in unterschiedlichem Maßstab überprüft wurden.
Schwerpunkt der Arbeiten innerhalb des Teilprojektes ist die Untersuchung möglichst unterschiedlicher Anwendungsbereiche im Hochbau, um die Potentiale von Holzleichtbeton und ggf. auch Grenzen des Kompositmaterials darstellen zu können. Dies soll sich auf bekannte Formen wie Wand- oder Fassadenplatten bzw. Unterdecken erstrecken, aber ebenso die Ermittlung neuer Einsatzgebiete beinhalten. Dies beinhaltet einerseits die Suche nach Alternativen zu am Markt gängigen 'Standard'-Bauprodukten (Produktsubstitution), andererseits neuartige Anwendungen für einen Leichtbaustoff zu identifizieren.

Holzleichtbeton ist ein Material, das sich durch seine Eigenfarbigkeit und vielfältigen Möglichkeiten der Gestaltung für die sichtbare Anwendung in ästhetisch hochwertigen Oberflächen eignet. Insbesondere für den Einsatz im Fassadenbereich fehlen zur Klärung der Witterungsbeständigkeit (Langzeit-)Untersuchungen.
Da in den vorangegangenen FuE-Arbeiten ein vielversprechendes Leistungsprofil von Holzleichtbeton bilanziert wurde und im Hochbau Materialien mit 'funktionalen' Oberflächen für Architekten und Designer von besonderem Interesse und auch von einer breiteren Öffentlichkeit nachgefragt sind (wie verschiedene Fachmessen und Anwenderforen zeigen), galt es den Schritt vom Betonlabor hin zum Bauprodukt zu beschreiten (und zu verkürzen). Daher wurde von Beginn an die Zusammenarbeit mit der Bauwirtschaft und Architekten-Kollegen aus der Praxis gesucht, was sich auch in Kooperationen (in unterschiedlichem Umfang) mit 15 Firmen widerspiegelt.

3. Materialspezifische Untersuchungen

3.1. Kenndaten von Ausgangsrezepturen

In den Forschungsarbeiten von Natterer/Glinorz[1] und Krippner[2] sind Ergebnisse und erste Einschätzungen zu mechanischen und bauphysikalischen Kenndaten unterschiedlicher Holzleichtbeton-Mischungen dokumentiert.
Im Teilprojekt 16 erfolgten daran anknüpfend weitere Untersuchungen zu unterschiedlichen Bindemitteln, um eine bessere Verträglichkeit zwischen Zement und Holz sicherzustellen. Ferner wurden Holzpartikelgröße und -form variiert, um die Leistungsfähigkeit von Holz als Zuschlagstoff zu optimieren, und verschiedene Konsistenzbereiche (plastisch und erdfeucht) hergestellt.
Hinsichtlich der Verträglichkeit von Holz und Bindemittel zeigten die Mischungen mit einem Schnellzement die besten Ergebnisse, da der Schnellzement die geringste Empfindlichkeit gegenüber den Holzinhaltsstoffen aufwies. Mit dieser Materialkombination verringerten sich die Erstarrungszeiten auf ca. 30 Minuten, so dass die Proben nach ca. 2 Stunden ausgeformt werden konnten, was für die Herstellung von Betonfertigteilen vorteilhaft ist. Damit wäre eine Vorbehandlung der Holzspäne nicht mehr erforderlich und der Herstellungsprozess könnte vereinfacht werden. Gleichzeitig hatten die Mischungen mit dem Schnellzement die höchsten Festigkeiten bzw. das beste Festigkeits-/ Rohdichteverhältnis.
Grundlage für die materialspezifischen und experimentellen Untersuchungen der ausgewählten Anwendungsbereiche bildeten drei Standardmischungen mit

1 Vgl.Natterer,Gliniorz, 2000
2 Vgl.Krippner, 2004

Mischungen Teilprojekt 16			
Mischung	S-E-H20[5]	S-E-H06[5]	S-P-H06[5]
Rohdichte trocken [kg/m³]	590	630	690
Zementart	Schnellzement	Schnellzement	Schnellzement
Zementgehalt [kg/m³]	350	365	450
Wassergehalt [kg/m³]	330	343	400
Holzgehalt [kg/m³]	152	160	115
Holz/Zement (kg/kg)/(m³/m³)	0,44/3,4	0,44/3,4	0,26/2,0
Körnung Zuschlag Nadelholz	grob (<15mm)	fein (<6mm)	fein (<6mm)
Additive/Zusatzstoffe	-	-	-
W/Z-Wert gesamt	0,94	0,94	0,89
W/Z-Wert effektiv[1)]	0,4	0,4	0,58
Konsistenz[2)]	erdfeucht	erdfeucht	weich,plastisch
Luftporengehalt (%)[3)]	-	-	38
Druckfestigkeit [N/mm²]	1,7	1,0	3,7
Biegezugfestigkeit [N/mm²]	0,5	0,4	1,6
Trocknungsschwinden (mm/m)[4)]	0,65	0,75	0,5

Abb.: 3.1 Mischungen aus dem Teilprojekt 16 (siehe AB TP16)

1 w/zeff - Gesamtwassergehalt abzüglich Wasser für die Sättigung des Holzes (angenommen 55 M.-% bezogen auf Feuchtholz)
2 Ausbreitmaß von ca. 13 - 14 cm wurde hier mit dem Hägermann Konus ermittelt, was etwa der weichen Konsistenz des Betons (F3) entspricht
3 aus Veränderung der Rohdichte berechnet
4 das Schwinden während der Absenkung der rel. Luftfeuchtigkeit von 65 auf 35 %, gemessen an Prismen 4x4x16 cm³
5 S = Schnellzement, E = erdfeuchteKonsistenz, P = plastische Konsistenz, H06 = Holzspäne <6mm, H20 = Holzspäne < 20mm

unterschiedlichen Holz/Zementverhältnissen bzw. Holzspangrössen und dem Schnellzement als Bindemittel (Abb. 3.1). Die Mischung S-P-H06 wies einen hohen Luftporengehalt auf, da während des Mischens mit Nadelholzspänen reichlich Luft eingebracht wurde.[3] Weiterhin verfügte diese Mischung über höhere Festigkeiten und ein geringeres Schwindverhalten als S-E-H06 und S-E-H20, die ein höheres Holz/Zementverhältnis hatten. Die Mischungen mit erdfeuchter Konsistenz wurden durch stampfen verdichtet. Die Mischung S-E-H20 mit groben Spänen zeigte höhere Festigkeiten und ein geringeres Schwindverhalten als die Mischung S-E-H06.

3.2. Schallschutz und Raumakustik

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Schallschutz, d. h. schalldämmenden Maßnahmen in Gebäuden als Schutz gegen Lärm, und Raumakustik, d. h. der Gewährleistung von guten Hörbedingungen in Räumen.
Die DIN 4109 definiert Mindestanforderungen an den Schallschutz im Hochbau und unterscheidet zwischen Luftschall, Körperschall und Trittschall. Unter dem Begriff Luftschall versteht man die Ausbreitung von Schallwellen in der Luft, durch die Bauteile in Schwingung versetzt werden. Bei Körperschall handelt es sich um die Ausbreitung von Schallwellen in festen Stoffen, die dadurch angeregt werden. Trittschall ist eine spezielle Form des Körperschalls, d. h. die direkte mechanische Anregung von Bauteilen wie Decken, Treppen etc.[4] Die Ausbreitung von Schallwellen innerhalb von festen Stoffen ist abhängig von den Stoffeigenschaften und von der Temperatur. Je elastischer ein Stoff ist und je geringer die Dichte, desto langsamer breitet sich der Schall aus.

In bisherigen materialspezifischen Untersuchungen (EPF-Lausanne /I-Bois) sind erste theoretische Näherungen in Form von rechnerischen Einschätzungen und Vergleiche mit Angaben aus der DIN 4109 vorgenommen worden.[5]
Hinsichtlich des Körperschalls zeigte sich, dass Holzleichtbeton aufgrund einer Schallgeschwindigkeit von 1250 m/s bei 20°C (Normalbeton 3800 m/s) ein schlechter direkter Schalleiter ist und somit vielversprechende Potentiale in Verbindung mit einer Verbesserung des Trittschalls im Bereich von Bodenbelägen bestehen. Bei der Abschätzung der Luftschalldämm-Maße nach DIN 4109 von einschaligen gemauerten Wänden aus Holzleichtbeton wurde ersichtlich, dass der Baustoff in derartigen Konstruktionen nur im Bereich schalltechnisch nachrangiger Räume eingesetzt werden darf. So wurde z.B. bei einer 24,0 cm dicken Wand (Rohdichte 800 kg/m³) beidseitig mit Kalkzementputz 15 mm verputzt ein Schalldämmmaß von $R'_{w,R} = 47$ dB errechnet. Der Mindestschallschutz nach DIN 4109 liegt bei Wohnungstrennwänden bei $R'_w = 53$ dB. Anknüpfend an diese Untersuchungen stellt sich die Aufgabe die bisherigen theoretischen Einschätzungen durch Labormessungen an 1:1-Mustern zu überprüfen. Dabei sind vorab materialspezifische und baukonstruktive Randbedingungen für den jeweiligen Anwendungsbereich zu klären.

3.2.1. Raumakustik

Die akustische Qualität eines Raumes ist neben den planerischen Vorgaben auch von den Materialeigenschaften der raumumschließenden Flächen abhängig. Neben herkömmlichen Baumaterialien können auch viele andere Materialien akustisch wirksam gestaltet werden und somit die raumakustischen Anforderungen verbessern bei gleichzeitig individuellem Erscheinungsbild des

3 Vgl. Abschlussbericht TP16 zu den chem. und physik. Prozessen der Luftporenbildung
4 Vgl. Fasold, Veres, 2003, S.220
5 Vgl. Gliniorz, Natterer, 2000, S. 79f.

Innenraumes.[6] Daher unterscheidet man bei schallabsorbierenden Materialien poröse Absorber (mittlere und hohe Frequenzen) und Resonanzabsorber (tiefer Frequenzbereich).

„Schallabsorption durch poröse Stoffe beruht auf der Umwandlung der Schallenergie in Wärmeenergie, verursacht durch Reibung der sich in den Poren mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegenden Luftteilchen (Dissipation, Dämpfung)".[7] Vorraussetzung für eine wirksame Absorption ist die Existenz von offenen, tiefen und engen Poren, damit Schallenergie in den Stoff eindringen und ein Reibungsvorgang entstehen kann. Die Porösität ϑ definiert sich aus dem Quotienten Luftvolumen V_L als Anteil am Gesamtvolumen und dem Gesamtvolumen eines Stoffes. Materialien mit Porositäten von 50% Luftanteil ermöglichen gute schallabsorbierende Wirkung. Mineralische Faserdämmstoffe und organische Dämmstoffe (HWL-Platten) weisen Porösitäten zwischen 0,9 und 1,0 auf. Eine weitere wichtige Kenngröße ist der Strukturfaktor S der aus dem Quotienten V_L und dem am Absorptionsvorgang tatsächlich wirksamen porösen Volumen V_W gebildet wird. Bei üblichen Dämmstoffen liegt dieser Wert zwischen 1,0 und 2,0.
Entscheidene Materialeigenschaft zur Kennzeichnung der Absorptionswirkung von porösen Stoffen ist jedoch der spezifische Strömungswiderstand. Bei zu engen und kleinen Luftkanälen ist der spezifischer Strömungswiderstand zu groß, d. h. der auftreffende Schall kann nicht genügend in das Material eindringen und er wird weitgehend reflektiert. Bei zu weiten Luftkanälen durchdringt der Schall die Dämmschicht und wird von einer dahinter liegenden Fläche möglicherweise reflektiert. Zwischen diesen beiden Extremen liegt der für die Schallabsorption optimale spezifische Strömungswiderstand R_S (Quotient aus dem Verhältnis der Druckdifferenz vor und hinter dem Material Δp [Pa] zur Geschwindigkeit der durchstömenden Luft μ [m/s]). Der spezifische Strömungswiderstand wächst mit zunehmender Schichtdicke. Daher wird die Materialkenngröße mit Bezug auf die Schichtdicke in Durchströmungsrichtung t [m] als längenbezogenener Strömungswiderstand r angegeben; r ist abhängig vom spezifischen Gewicht und erhöht sich mit zunehmender Dichte.
In der Praxis haben Dämmstoffe einen längenbezogene Strömungswiderstand von 0,5-500 kPa s/m². Die HWL-Platte mit einer Rohdichte von 350-500 kg/m³ hat eine längenbezogenen Strömungswiderstand von 0,5-2 kPa s/m², Bimsbeton ca.17% Haufwerksporigkeit: 575kg/m³ und r = 5 kPa s/m².[8]

Neben Stoffeigenschaften und Dicke der Dämmschicht beeinflusst der Anbringungsort im Raum die Schallabsorption. Für Frequenzen zwischen 100 und 500 HZ bewirkt eine Anordnung des Dämmstoffes mit Abstand von 17-85 cm zu einer reflektierenden Fläche eine Verbesserung der Schallabsorption (vor allem bei Unterdecken von Bedeutung). Statt einer großen Fläche ist es sinnvoll, mehrere kleine Flächen mit schallabsorbierenden Materialien zu belegen. Viele freie Kantenlängen erzeugen eine Vergrößerung der wirksamen Absorberfläche, z. B. schachbrettartige Anordnung und offene Fugen.
Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Raumakustik besteht in der Montage von porösen Dämmstoffen hinter einer Bekleidung, die als Trägermaterial dient und eine optisch ansprechende Gestaltung der Absorber ermöglicht. Die Bekleidung ist akustisch transparent und besteht aus gelochten bzw. geschlitzten Platten. Hier sind dünne Platten mit großem Lochflächenverhältnis geeignet, die die Schalltransmission in den Dämmstoff wenig behindern. Die Kombination von dünnen Platten (Resonanzabsorber) und porösen Absorbern bewirkt die Absorption von hohen und tiefen Frequenzbereichen. Eine besondere Form poröser oder kombinierter Schallabsorber stellen Absorberkassetten oder soge-

6 vgl. Hilz, 3/2006, S.71
7 Vgl. Fasold, Veres, 2003, S.70f.
8 Vgl. Fasold, Veres, 2003, S.70f.

nannte Baffles dar, die nicht parallel sondern stehend zur Decke befestigt werden. Dabei ermöglicht eine dichte Montage größere äquivalente Schallabsorberflächen, als bei üblichen wandparallelen Flächenbelegungen. Die Anordnung sollte senkrecht zur Schallhauptausbreitungsrichtung erfolgen.[9]

3.2.2. Holzleichtbeton als poröser Schallabsorber

Bei Betonen mit plastischer Konsistenz entstehen beim Mischen von Nadelholzspänen mit Schnellzement und Wasser Luftporen, die zu einem sichtbaren, porösen Materialgefüge im erstarrten Holzleichtbeton führen. Der Anteil der Luftporen kann durch die Mischdauer variiert werden. Bei den Betonen mit erdfeuchter Konsistenz wird die Porösität durch den Holzanteil, der Form und Größe der Holzpartikel beeinflusst.[10] Diese Materialeigenschaft lassen die Eignung als poröser Absorber zur Verbesserung der Raumakustik im Innenraum vermuten.
Zur akustischen Wirksamkeit von Holzleichtbeton fehlen in den bisherigen Forschungsarbeiten jedoch einschlägige belastbare Ergebnisse. Für Abschätzungen sind daher weiterführende materialspezifische Untersuchungen erforderlich.

3.2.3. Ausgangsrezepturen

Es erfolgte die Herstellung unterschiedlicher Rezepturen und Materialproben, um die Einflüsse verschiedener Parameter auf die akustische Wirksam-

9 Vgl. Fasold, Veres, 2003, S.69f.
10 Vgl. AB, TP16

Abb.: 3.2 Probe S-P-H06-A-2 (o.M.)

Abb.: 3.3 Probe S-E-H20-A-2 (o.M.)

Abb.: 3.4 Probe S-E-H06-A-2 (o.M.)

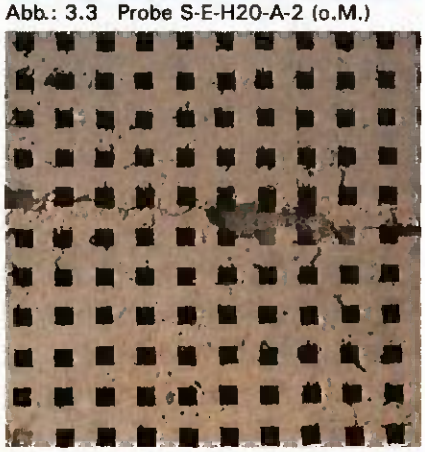


Abb.: 3.5 Probe S-EP-H06-A-1 (o.M.)

keit beurteilen zu können. Dazu wurden Musterplatten mit den Abmessungen 29x29x3,5 cm auf Basis der Standardmischungen hergestellt (Abb. 3.6-3.8). Zusätzlich wurde eine „Sandwich"-Probe mit einer gelochten Schicht aus der HLB-Mischung S-P-H06 als Trägermaterial und der gestampften HLB-Mischung S-E-H20 als Absorbermaterial gefertigt. Es handelte sich insgesamt um 13 Materialproben (Abb. 3.2-3.5).

Um die Einflüsse verschiedener Herstellungs- und Verarbeitungsaspekte auf die akustische Wirksamkeit zu prüfen, wurden die Proben S-P-H06-A-1-6 hinsichtlich Mischdauer und w/z-Wert variiert, um unterschiedliche Luftporengehalte und Rohdichten zu erzeugen. Ferner sollte der Einfluss unterschiedlicher Oberflächenbearbeitung (Sägen, Schleifen) untersucht werden. Die Proben S-E-H06-A-1-3 und S-E-H20-A-1-3 variieren hinsichtlich der Verdichtung und der Holzpartikelgröße. Die Proben S-E-H06-A-2 und S-E-H20-A-2 sind mit einer Hy-

Mischung S-P-H06-A	1	2	3	4	5	6
Holz/Zementwert (kg/kg)	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Wasser/Zementwert (kg/kg)	0,89	0,89	0,89	0,79	0,79	0,89
Mischdauer/ Intensität (min)	5 - s [2]	5 - s [2]	3 - l [2]	3min/s [2]	3 - s [2]	2 - l [2]
Ausbreitmass (cm)	15,0	15,0	13,5	13,0	13,0	12,8
F.betonrohdichte (kg/m³)	730	730	990	1100	1100	1290
Luftporenanteil (Vol.-%)	58	58	38	29	29	20
Verdichtung	gegossen	gegossen	gegossen	gegossen	gegossen	gegossen
Oberflächenbehandlung	geschliffen	gesägt	geschliffen	geschliffen	gesägt	geschliffen
Rohdichte trocken (kg/m³)	543	552	687	750	770	900
Biegezugfestigkeit (N/mm²)	0,7 [1]	0,7 [1]	1,7	2,1 [4]	2,1 [4]	3,4
Druckfestigkeit (N/mm²)	1,2 [1]	1,2 [1]	3,9	5,2 [4]	5,2 [4]	8,7

Abb.: 3.6 Kenndaten der Mischungen S-P-H06-A-1-6

Mischung S-E-H06-A	1	2	3
Holz/Zementwert (kg/kg)	0,44	0,63	0,44
Wasser/Zementwert (kg/kg)	0,94	0,65	0,94
Mischdauer/ Intensität (min)	3 - l [2]	n.b.	3 - l [2]
Ausbreitmass (cm)	n.m. [5]	n.m.	n.m.
F.betonrohdichte (kg/m³)	n.b. [6]	n.b.	n.b.
Luftporenanteil (Vol.-%)	n.b.	n.b.	n.b.
Verdichtung	gestampft	gepresst	gestampft [7]
Oberflächenbehandlung	keine	keine	keine
Rohdichte trocken (kg/m³)	687	682	580
Biegezugfestigkeit (N/mm²)	n.b.	n.b.	n.b.
Druckfestigkeit (N/mm²)	n.b.	n.b.	n.b.

Abb.: 3.7 Kenndaten der Mischungen S-E-H06-A-1-3

Mischung S-E-H20-A	1	2	3	S-EP-H06-A
Holz/Zementwert (kg/kg)	0,44	0,83	0,44	n.b.
Wasser/Zementwert (kg/kg)	0,94	0,44	0,94	n.b.
Mischdauer/ Intensität (min)	3 - l [2]	n.b.	3 - l [2]	n.b.
Ausbreitmass (cm)	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
F.betonrohdichte (kg/m³)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Luftporenanteil (Vol.-%)	n.b	n.b.	n.b.	n.b
Verdichtung	gestampft	gepresst	gestampft [7]	gestam./gegoss.
Oberflächenbehandlung	keine	keine	keine	keine
Rohdichte trocken (kg/m³)	697	598	650	n.b.
Biegezugfestigkeit (N/mm²)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Druckfestigkeit (N/mm²)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Abb.: 3.8 Kenndaten der Mischungen S-E-H20-A-1-3

1 Trockenrohdichte Prismen 4x4x16cm3 für die Festigkeitsmessung betrug 584 kg/m³
2 s-schnell, l-langsam
4 Trockenrohdichte der Prismen 4x4x16cm³ für Festigkeitsmessung betrug 746 kg/m³
5 nicht messbar
6 nicht bestimmt
7 die Proben S-E-H06-A-3 und S-E-H20-A-3 wurden im Vergleich mit den Proben S-E-H06-A-1 und S-E-H20-A-1 mit einer geringeren Auflast gestampft

draulikpresse in eine Schalung gepresst worden. Die übrigen Proben wurden mit unterschiedlicher Stampftechnik und unterschiedlicher Auflast verdichtet.

3.2.4. Prüfverfahren

Im April 2007 sind orientierende Messungen im Impendanzrohr nach DIN EN ISO 10534-2:2001-10 für Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall α(0) durchgeführt worden (Abb. 3.9).[11]
Die aus den Platten hergestellten runden Prüfkörper wurden im Impendanzrohr in zwei unterschiedlichen Prüfsituationen unmittelbar vor dem schallharten Abschluss und mit einem Abstand von 200 mm zum schallharten Abschluss angeordnet (Abb. 3.10+3.11). In der Praxis werden Schallabsorber oft mit Abstand zur Wand montiert, da dadurch normalerweise die akustische Wirkung in allen Frequenzbereichen verbessert wird. Die Schalungsseite (ebene, glatte Oberfläche) befand sich auf der dem Schalleinfall abgewandten Seite.

3.2.5. Ergebnisse

Zunächst fällt auf, dass die Ergebnisse der einzelnen Proben sehr unterschiedlich ausfallen (Abb. 3.12). Grundsätzlich kann jedoch festgestellt werden, dass die Absorptionsfähigkeit abnimmt, wenn das Material und/oder die Oberfläche nicht mehr über eine ausreichende Porösität verfügt. Die Mischungen S-P-H06-A-1/A-6 erreichten mit 200 mm Abstand mittlere Schallabsorptionsgrade α_0 von 3-26%. Die Werte der Mischungen S-E-H06-A-1/A-3 und S-E-H20-A-1/A-3 lagen mit 200 mm Abstand bei 30-62%. Der höhere Holzanteil bei den Mischungen mit erdfeuchter Konistenz führte zu einer offenporigeren Materialstruktur und damit zur Verbesserung der Schallabsorption.[12]

11 Vgl. Mommertz, 2007/ 1
12 Vgl. Mommertz, 2007/ 1

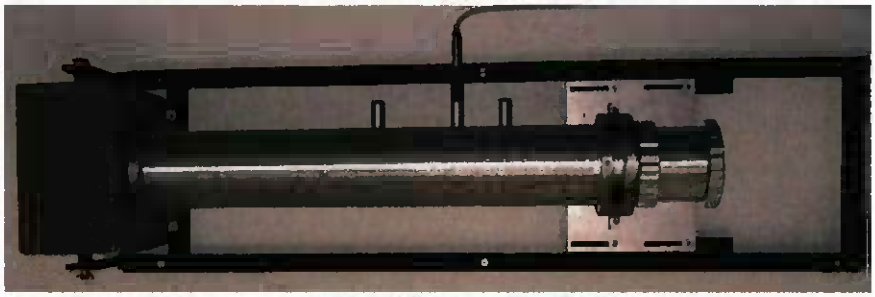


Abb.: 3.9 Impendanzrohr mit Probenhalter rechts und Lautsprecher links

Abb.: 3.10 Probe S-P-H06-A-2 (o.M.)

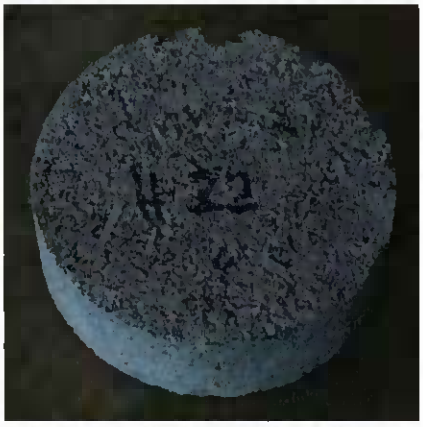


Abb.: 3.11 Probe S-E-H20-A-1 (o.M.)

Bei den Mischungen mit plastischer Konistenz kann festgestellt werden, dass die Absorption wie erwartet mit zunehmender Rohdichte und abnehmenden Luftporengehalt abnimmt. Um den Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die Schallabsorption zu beurteilen, wurden die Proben S-P-H06-A-4 und S-P-H06-A-5 verglichen. Die Probe mit geschliffener Oberfläche wies um Faktor 4 bessere Absorptionswerte auf bei fast gleicher Rohdichte. Im Gegensatz dazu lag jedoch die Probe S-P-H06-A-1 mit einer geschliffenen Oberfläche um 5% unter dem Absorptionswert der Probe 2 mit gesägter Oberfläche bei ebenfalls fast gleicher Rohdichte. Nach den vorliegenden Ergebnissen hat somit die Art der Oberflächenbearbeitung keinen Einfluss auf die schalltechnischen Eigenschaften. Vermutlich ist die Gleichmäßigkeit der Materialdichte für die Absorptionsfähigkeit hier mehr von Bedeutung als die Oberflächenbearbeitung.

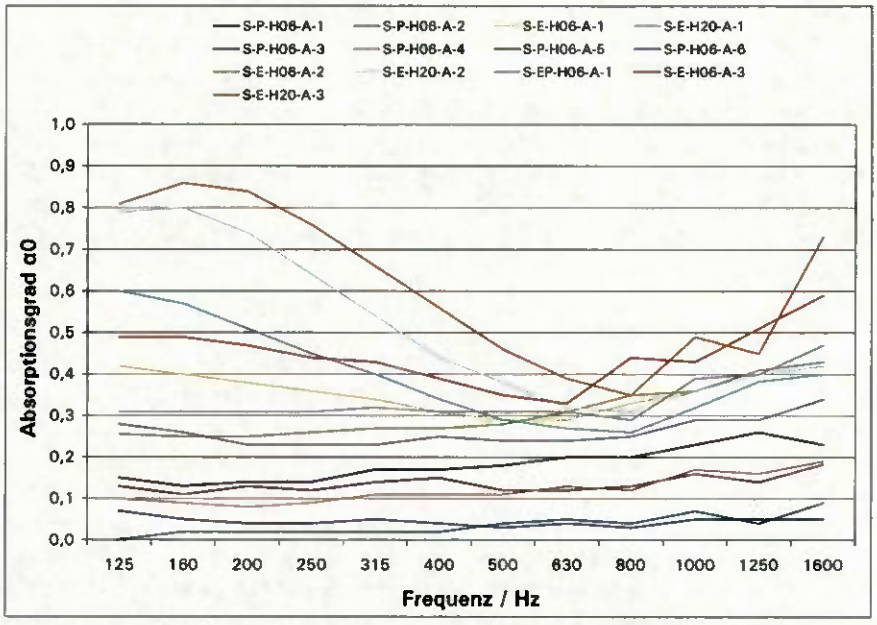


Abb.: 3.12 Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall mit 200mm Abstand

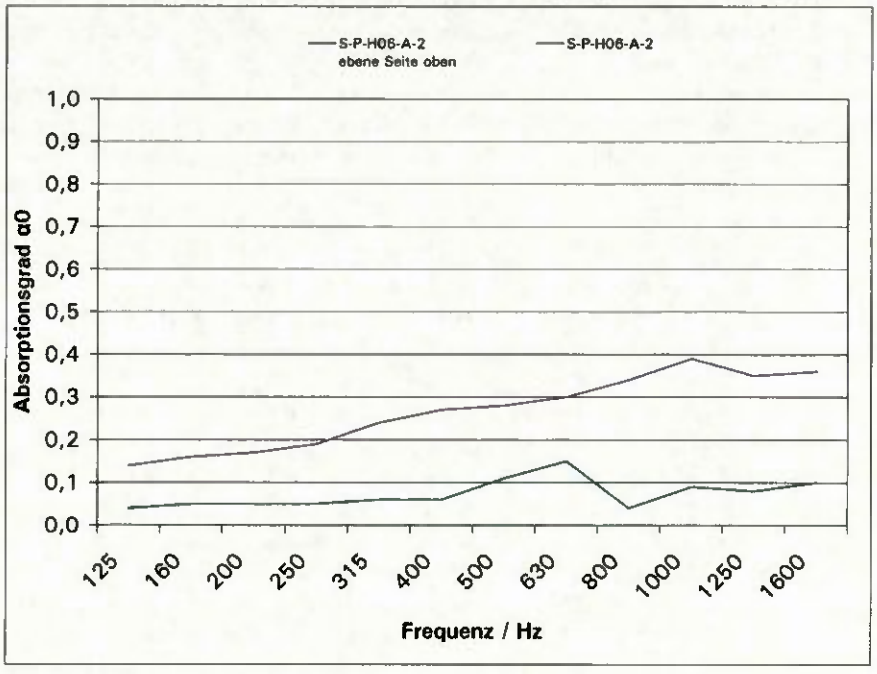


Abb.: 3.13 Messwerte der Probe 2 mit unterschiedlichen Oberflächen ohne Abstand

Um den Einfluss der Verarbeitung auf die Absorptionsfähigkeit zu untersuchen wurden bei der Probe S-P-h06-A-2 an der glatten Schalungsseite und an der abgezogenen oberen Seite exemplarisch Messungen durchgeführt (Abb. 3.13). Dabei zeigte sich, dass die abgezogene obere Seite der Probe einen um Faktor 3,5 höheren Absorptionsgrad aufwies als die ebene, glatte Schalungsseite. Die Ablagerung von Feinstanteilen des Zementes führen zu einer geschlosseneren Oberfläche und könnten mit einer höheren Verdichtung in diesem Bereich die Ursache sein. Mit mittleren Absorptionsgraden von 26% war dies jedoch die einzige plastische Mischung, bei der eine nennenswerte akustische Wirksamkeit bei gleichzeitig attraktiver Oberfläche erreicht wurde. Optimierungspotential besteht in kürzeren Abbindezeiten, um den Setzungsprozess des Zement/Holzgemisches beim Abbinden zu verhindern und ein gleichmäßiges homogenes Materialgefüge zu erreichen. Um die Schwankungsbreiten hinsichtlich der Absorptionswirkung zu reduzieren, wäre die Reproduzierbarkeit in weiteren Versuchen mit gleichen Materialzusammensetzungen zu überprüfen.

Die Proben S-E-H06-A-2 und S-E-H20-A-2 mit erdfeuchter Konsistenz lassen sich leider nicht direkt mit den Proben S-E-H06-A-1/3 und S-E-H20-A-1/3 vergleichen, da der h/z-Wert, aufgrund einer anderen Ausgangsholzfeuchte, zu den gestampften Proben differiert und dementsprechend die Trockenrohdichten und damit auch die Absorptionswerte nicht vergleichbar waren. Beim w/z-Wert der gepressten Platten wurde außerdem der Wassergehalt des Holzes nicht berücksichtigt.

Die Messwerte der Proben mit Abstand zeigten eine hohe Absorptionsfähigkeit im tiefen Frequenzbereich und einen Abfall zum mittleren Frequenzbereich. Dies ist insofern untypisch für poröse Absorber, da die Absorptionswerte mit Abstand gleichbleibend höher liegen sollten als ohne Abstand. Ursache könnte hier die ungleichmäßige Dichte des Materials sein. Vergleicht man die Proben S-E-H06-A-1 mit S-E-H06-A-3 und die Proben S-E-H20-A-1 mit S-E-H20-A-3, konnte festgestellt werden, dass die mit geringer Auflast gestampften Proben geringere Rohdichten kombiniert mit einem wahrscheinlich höheren Luftporengehalt aufweisen und damit die Absorptionsfähigkeit sich verbesserte (Abb. 3.12). Insofern ist anzunehmen, dass die Pressung von Platten zu einer schlechteren Schallabsorptionsfähigkeit führt als die Verdichtung in Form von Stampfen. Gepresste Platten haben jedoch höhere Biege- und Druckfestigkeiten.[13] Das Problem der gestampften Platten ist die geringe Kantenstabilität und die geringe Festigkeit, was sie als Plattenmaterial nicht geeignet erscheinen lässt. Hier besteht noch Optimierungsbedarf. Bei den gepressten Platten könnte evtl. die Schallabsorptionsfähigkeit durch Erhöhung des Holzanteils verbessert werden.
Beim Vergleich des Einflusses der Holzpartikelgröße auf die Schallabsorption (S-E-H20-A1/3 und S-E-H06-A1/3) zeigte sich, dass die Zugabe von gröberen Spänen höhere Werte erzielten. Grobe Späne führen anscheinend im Materialgefüge zu größeren schallabsorptionswirksamen Lufteinschlüssen und zu einer erhöhten Haufwerksporigkeit.

Bei der Sandwichprobe S-EP-H06-A-1 wurde versucht, die höhere Festigkeit und die variabel formbare Oberflächenstruktur der Mischung S-P-H06 zu nutzen und diese als Tragstruktur für die als poröser Absorber dienende Mischung S-E-H06 einzusetzen. Bei der Messung erreichte diese Kombiplatte mittlere Absorptionswerte von 28-33% und positionierte sich somit zwischen den Proben mit plastischer Konsistenz und mit erdfeuchter Konsistenz. Von Nachteil ist hier der relativ hohe Herstellungsaufwand. Für Sonderlösungen (Foyers) sind diese Platten aufgrund der individuellen und anspruchsvollen Gestaltung der Oberflä-

13 Vgl. Tröger, 2007/123

chen jedoch durchaus denkbar.
Insgesamt lassen sich mit dem Holzleichtbeton mittlere Schallabsorptionsgrade α_0 von max. 62% erreichen. Damit erreicht das Material um Faktor 40 höhere Werte als eine Sichtbetonoberfläche (mittlerer Schallabsorptionswert von $\alpha_w = 1{,}5\%$)[14].
Es zeigte sich, dass die akustische Wirksamkeit hauptsächlich von der Dichte, dem Luftporengehalt, der Homogenität des Materialgefüges und vom Holz/Zementanteil abhängig ist. Bei allen Mischungen besteht daher Optimierungsbedarf, was die gleichmäßige Verteilung der Luftporen und die Herstellung eines homogenen Gefüges betrifft. Bei den Mischungen mit erdfeuchter Konsistenz sind durch Pressen die Festigkeiten zu erhöhen, um als Plattenmaterial geeignet zu sein. Auch sind im Rahmen von industriellen Fertigungsabläufen und der damit möglichen Optimierung der Verarbeitung Verbesserungen zu erwarten.

Der Vergleich von Proben gleicher Mischungen aus den Messungen der Firma OWA[15], die zu einem früheren Zeitpunkt ebenfalls im Impendanzrohr durchgeführt wurden, mit den Messdaten von Müller BBM zeigten bei den Mischungen S-P-H06-A-OWA-1 und S-P-H06-A-3, sowie bei den Mischungen S-E-H20-OWA-1 und S-E-H20-A-3 nahezu gleiche Absorptionswerte in allen Frequenzbereichen (Abb. 3.14). Die Mischung S-E-H06-A-OWA-1 mit erdfeuchter Konsistenz und einer Rohdichte von 630 kg/m³ lag im tiefen Frequenzbereich zwischen 125 und 350 Hz deutlich niedriger und im höheren Frequenzbereich von 400-1100 Hz deutlich höher als die Mischung S-E-H06-A-3 mit 580kg/m³. Ursache könnte eine durch manuelles Stampfen ungleichmäßige Verteilung von Luftporen sein, was jedoch im Zuge einer industriellen Herstellung verbessert werden könnte.
Insgesamt kann festgestellt werden, dass die untersuchten Proben ähnliche Verläufe der Schallabsorptionskurven aufweisen. Dies läßt bei den Mischungen auf eine relativ problemlose Reproduzierbarkeit und eine hohe Konstanz der Materialproben schließen.

14 Vgl. www.hebel.de/downloads/deu/manuel/Kap5.pdf
15 Vgl. Uygun, 2006

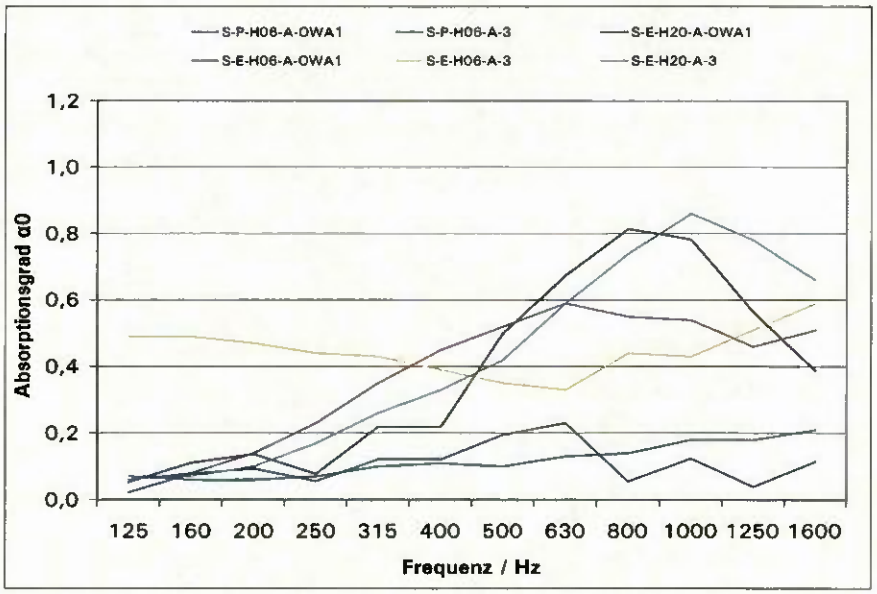


Abb.: 3.14 Vergleich ausgewählter Messwerte o. Abst. (Müller BBM und Fa. OWA)

3.2.6. Holzleichtbeton als akustischer Absorber in Räumen

Die Messungen im Impendanzrohr geben erste Einschätzungen zur akustischen Wirksamkeit des Materials Holzleichtbeton. Es handelt sich um die Messung einer Materialeigenschaft. Daher sind die vorliegenden Messergebnisse nicht unmittelbar geeignet um Abschätzungen über erforderliche Absorberflächen in Räumen zu treffen. Das angewendete Verfahren liefert nur den Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall; in Räumen fällt jedoch der Schall aus allen Richtungen ein.

Um eine derartige Einschätzung vornehmen zu können, gibt es ein Umrechnungsverfahren, mit dem der diffuse Schalleinfall ermittelt werden kann.[16] Allerdings weisen diese Werte Genauigkeiten von +/- 20% auf und können daher Messungen im Hallraum nach ISO 354 nicht ersetzen. Trotzdem lassen sich mit diesen Werten brauchbare, praxisnahe Orientierungswerte erzielen. Für die geprüften Holzleichtbetonproben vor reflektierendem Abschluss wurden die Absorptionsgrade für allseitigen Schalleinfall abgeschätzt und für Oktavintervalle gemittelt (Abb. 3.15), sowie Erwartungswerte für den bewerteten Schallabsorptionsgrad (Einzelwert nach ISO 11654) angegeben.
Die Probe S-P-H06-A-2 mit plastischer Konsistenz und die Proben S-E-H06-A-1/3 und S-E-H20-A-1/3 mit erdfeuchter Konsistenz weisen in der Praxis brauchbare bewertete Schallabsorptionsgrade von α_w = ca. 0,5 - 0,65 auf.
Damit lassen sich mit Holzleichtbeton Kennwerte erreichen, die im Bereich von gängigen Marktprodukten liegen (Abb. 3.16).

3.2.7. Flächenbelegung im Raum

In einem nächsten Schritt wurden die ermittelten Kennwerte hinsichtlich der erforderlichen schallabsorbierenden Flächen im Raum abgeschätzt. Dazu gibt die DIN 18041 "Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen" Anhaltswerte für ausgewählte Raumarten.[17]
In der DIN sind die einzubringenden schallabsorbierenden Flächen in Abhängig-

16 Vgl. Mommertz, 2007/2
17 Vgl. Mommertz, 2007/2

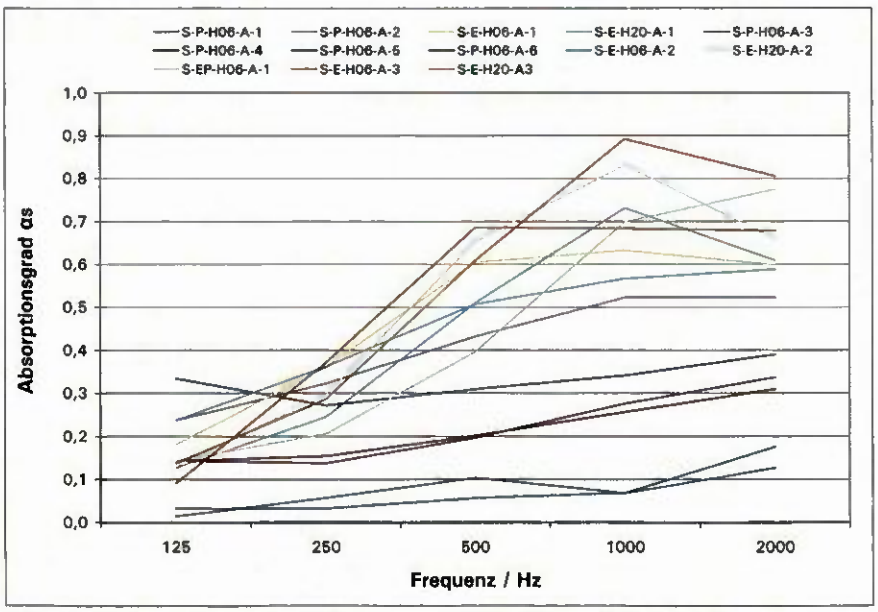
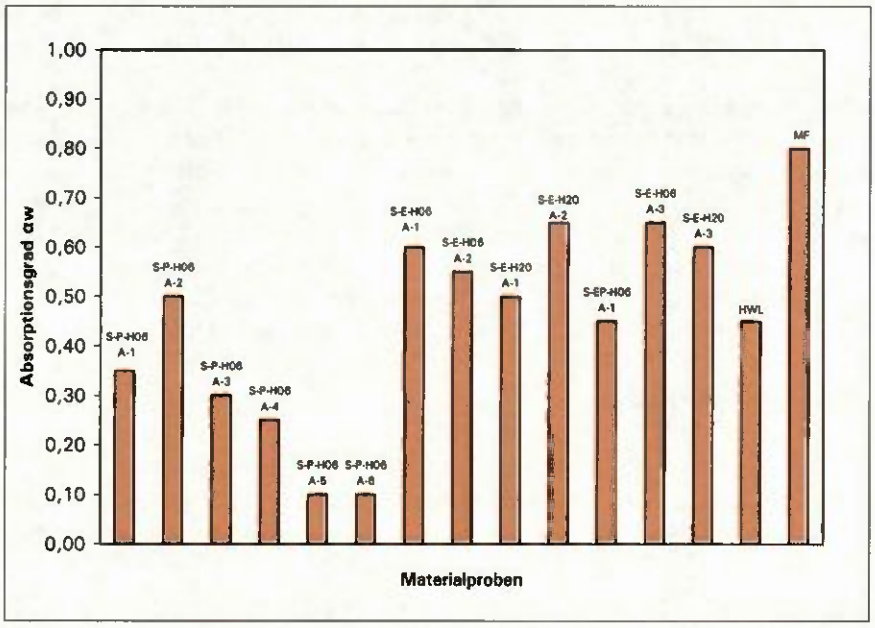


Abb.: 3.15 Absorptionsgrade (Näherungswerte) für diffusen Schalleinfall

keit vom Raumvolumen und vom bewerteten Schallabsorptionsgrad der einzubringenden Absorber bis 250 m³ aufgeführt. Für ein Raumvolumen von ca.150 m³ (entspricht einem mittelgroßem Raum) würde sich nach der in Tab. 3 in der Norm genannten Gleichung bei einem bewerteten Absorptionsgrad α_w = 0,5 eine erforderliche Einbaufläche von ca. 48 m² aus Holzleichtbetonplatten ergeben.
Um die erforderlichen schallabsorbierenden Flächen für Büroräume zu quantifizieren, kann ebenfalls auf die DIN 18041 zurückgegriffen werden. Hier werden Orientierungswerte für mit Schallabsorbern zu bekleidende freie Decken- bzw. Wandflächen als Vielfaches der Raumgrundfläche angegeben.
Bei einem bewerteten Schallabsorptionsgrad α_w von 0,5 benötigt man z. B. für Einzelbüros die gesamte Deckenfläche bzw. für Foyers 40% der Decken- bzw. Wandfläche, um die Empfehlungen der DIN 18041 zu erreichen.
Prinzipiell zeigten die Ergebnisse das Decken- und Wandplatten aus Holzleichtbeton für die Anwendung als Absorber in Räumen grundsätzlich geeignet sind. Während bei α_w-Werten von ≥ 0,5 in Büros bei entsprechender Flächenbelegung die Empfehlungen der Norm erreicht werden, lassen sich mit α_w-Werten von ca. 0,3 eine Verbesserung der akustischen Situation in Foyers und Treppenhäusern erreichen.

3.2.8. Zusammenfassung

Bei den durchgeführten Messungen handelt es sich um erste Einschätzungen zur akustischen Wirksamkeit von Holzleichtbeton. Im nächsten Schritt sind durch Messungen im Hallraum nach ISO 354 die abgeschätzten Absorptionswerte für diffusen Schalleinfall und die abgeschätzten Flächen im Raum zu überprüfen. Diese Prüfung ist auch Bestandteil der EN 13964 für die Zulassung von Bauteilen als Decklage für Unterdecken. Erst dann lässt sich eine abschließende Bewertung über die Verwendung von Holzleichtbeton als poröser Absorber in Räumen vornehmen. Parallel sind in weiteren materialspezifischen Untersuchungen die bauphysikalischen und die mechanischen Eigenschaften zu optimieren.



Tab.: 3.16 bewerteter Schallabsorptionswert αw im Vergleich zu HWL und Mineralfaser (vgl. Fasold, Veres, 2003, S.79)

3.3. Brandschutz

Für den Einsatz im Innenraum stellt die Beurteilung eines Materials hinsichtlich seines Brandverhaltens eine wichtige Grundlage dar. Eine Vielzahl von Aufgaben des baulichen Brandschutzes wird durch ausgewählte Konstruktionen und Materialien im Innenausbau übernommen.
Bisher liegen zum Brandverhalten von Holzleichtbeton nur wenige Einschätzungen vor. Daher erfolgten im Zusammenhang mit dessen Einsatz als Material für die Decklage von Unterdecken ergänzende Untersuchungen.

3.3.1. Bisherige Untersuchungen

Holzleichtbeton besteht aus Zementstein (nicht brennbarer Baustoff, F90-A) und Holz (brennbarer Baustoff, F30-B, feuerhemmend). Nach Erkenntnissen und Einschätzungen einschlägiger Forschungsarbeiten wird bei der Herstellung von einer Mineralisierung des Holzpartikels ausgegangen. Dieses wird vom Zementleim eingeschlossen und es setzt eine schrittweise Versteinerung ein, die das Brandverhalten der Holzpartikel stark unterdrückt.
An der EPF-Lausanne/I-Bois wurden theoretische Abschätzungen zum Brandverhalten von Holzleichtbeton durchgeführt. Nach Einschätzung von Natterer/ Gliniorz wird eine ausreichende Mineralisierung nur bei einem bestimmten Mischungsverhältnis erreicht. Um die Baustoffklasse A2 (nicht brennbar nach DIN 4102) zu erreichen, darf ein Holzmasseanteil von $<15\%$ nicht überschritten und ein Zementanteil von $\geq 300 kg/m^3$ nicht unterschritten werden.[18]

Weitere Untersuchungen im Kleinbrandofen und im Brandschacht (DIN 4102-1) wurden mit Mischungen aus Holzleichbeton und organischem Latentwärmespeichermaterial durchgeführt. Aufgrund der zu hohen Rauchgastemperatur und Rauchgasentwicklung konnte bei dieser Materialkombination nur eine Einstufung in die Baustoffklasse B1 als brennbarer, aber schwer entflammbarer Baustoff erreicht werden.[19]
Nachdem in den genannten Untersuchungen Holzanteil, Zusatzstoffe und Bindemittel im Vergleich zum aktuellen Forschungsprojekt variieren, waren Untersuchungen zu neuen Mischungen erforderlich. Gleichzeitig bestand die Möglichkeit die vorliegenden bereits sieben Jahre alten Ergebnisse zu überprüfen.

3.3.2. Prüfverfahren

Die Anforderungen für das Verhalten im Brandfall der im Bauwesen verwendeten Baustoffe und Bauteile sind in der deutschen Norm DIN 4102-1 und in der europäischen Norm DIN EN 13501-1 geregelt. Das Testverfahren erfolgte nach der europäischen Norm. Um die Baustoffklasse A (nicht brennbar) zu erreichen, ist die Prüfung im Kalorimeter nach EN ISO 1716, die Grenzwerte für die zu erreichende max. Verbrennungswärme vorgibt, durchzuführen. Zusätzlich ist für die Klassifizierung in Baustoffklasse A1 der Ofentest nach EN ISO 1182a erforderlich, für die Klassifizierung A2 das SBI-Prüfverfahren nach EN 13823.

3.3.3. Ausgangsrezepturen

Insgesamt wurden vier Proben auf Basis der Standardrezepturen mit unterschiedl. Holzmasseanteilen (trocken) von 15, 20, 25 und 30 M.-% in der Mischung Zement-Holzspäne hergestellt und anschließend 28 Tage in der Klima-

18 Vgl.Natterer,Gliniorz, 2000, S.75
19 Vgl.Krippner, 2004, S.121f.

kammer bei Normbedingungen gelagert.[20] Die Massenanteile des Holzes im Festbeton sind von der Feuchte und Wasserbindung des Zementes abhängig.

3.3.4. Brennwertermittlung nach EN ISO 1716

In der Prüfung wird die Verbrennungswärme eines Baustoffes gemessen. Dazu wird der PCS-Wert, d. h. die Brutto-Verbrennungswärme einer Substanz unter festgelegten Bedingungen, in MJ/kg in einem Kalorimetergerät bestimmt.[21] Für die Versuche sind die Prüfkörper nach Norm vorbereitet (gemahlen) und nach DIN EN 13238: 2001 konditioniert worden (Abb. 3.17, 3.18). Danach erhielten die Proben nachfolgend aufgeführte Prüfnummern (die letzte Zahl der Mischungsbezeichnung definiert den Holzmasseanteil in %):

- Nr.7126: S-P-H06-B-15
- Nr.7127: S-P-H06-B-20
- Nr.7128: S-P-H06-B-25
- Nr.7129: S-E-H06-B-30

3.3.5. Ergebnisse

Die Mischung S-P-H06-B-15 lag mit einem PCS-Wert von 1,722 MJ/kg unter dem Grenzwert von 2,0 MJ/Kg für die Baustoffklasse A1. Nach Einschätzung der Prüfer ist jedoch das Bestehen der zugehörigen Prüfung nach EN ISO 1182 (Ofentest) mit dem Kriterium „keine anhaltende Entflammung" nicht sehr wahrscheinlich, die Einstufung in die Baustoffklasse A2 bei bestandender Prüfung nach EN 18323 (SBI-Test) jedoch realistisch.
Die Mischung S-P-H06-B-20 könnte die gleiche Klassifizierung A2 erreichen. Der PCS-Wert lag bei 2,763 MJ/kg (Grenzwert 3,0MJ/kg). Voraussetzung ist hier wie schon erwähnt das Bestehen der Ofenprüfung nach EN ISO 1182 und die SBI-Prüfung nach EN 13823.
Wie erwartet steigt mit zunehmendem Holzanteil die Verbrennungswärme, so dass die Proben S-P-H06-B-25 und S-E-H06-B-30 mit 3,917 bzw. 4,331 MJ/kg den zulässigen Grenzwert (3,0 MJ/kg) für eine Klassifizierung in A2 überschritten. Für diese könnte mit den Prüfungen nach EN 18323 (SBI-Test) und nach EN 11925-2 (Kleinbrenner) eine Einschätzung vorgenommen werden, ob eine Einstufung in die Klassifizierung B oder C möglich ist (Abb. 3.19).

20 Annahme: Zement nahezu vollständig hydratisiert und Wasserbindung liegt bei etwa 0,2H2O/g Zement. Daraus ergeben sich folgende Holzgehalte in den trockenen Holzleichtbetonen 13M.-%, 17M.-%, 22M.-% und 26M.-%.
21 Vgl. Häberle, 2007

Abb.: 3.17 Probe eingehängt

Abb.: 3.18 Proben gemahlen

Mit der Prüfung konnte die Aussage von Natterer/Gliniorz (max. Holzmasseanteil von 15% für die Einstufung A2) zunächst bestätigt werden. Es zeigte sich jedoch, dass auch bei einem Holzmasseanteil von 20% das Erreichen der Baustoffklasse A2 möglich wäre. Für den Anwendungsbereich Innenraum ist ab einem Holzmasseanteil von ca. 20% eine akustische Wirksamkeit in Abhängigkeit des Herstellungsprozesses nachweisbar. Eine Einstufung als nichtbrennbarer Baustoff wäre demzufolge von Vorteil, da sich dadurch der Einsatzbereich von Holzleichtbeton auch gegenüber Konkurrenzprodukten für den Innenraum erweitern würde. Für den Anwendungsbereich Außenwand tragen nicht brennbare Holzleichtbetonschichten auf der Außen- und Rauminnenseite zum Schutz der tragenden Holzkonstruktion bei.
Um diese ersten Einschätzungen hinsichtlich der Baustoffklasse bestätigen zu können, wurde die Mischung S-P-H06-B-20 (20% Holzmasseanteil) als Ausgangsrezeptur für die Herstellung von Platten für eine SBI-Prüfung ausgewählt.

3.3.6. Prüfung zum Brandverhalten nach EN 13823

Die SBI-Prüfung (single burning item) misst die thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand.[22] Dabei wird in einem festgelegten Versuchsaufbau das Brandverhalten eines Bauproduktes über einen Zeitraum von 20 min beurteilt. Der Einbau der Bauprodukte erfolgt wie in der praktischen Anwendung. Als definierte Parameter werden Wärmefreisetzung (THR600s: Total Heat Release nach 600s), Rauchentwicklung (TSP600s: Total Smoke Produktion nach 600s) , Rauchwachstumsrate (SMOGRA: Smoke growth rate), Feuerwachstumsrate (FIGRA: Fire growth rate) und brennendes Abfallen bzw. Abtropfen gemessen und beurteilt.
Insgesamt sind für den Versuchsaufbau 6 Platten mit den Abmessungen 1200x500x30 mm hergestellt und für den Probeneinbau entsprechend DIN EN 13239: 2001 konditioniert und eingebaut worden.[23] Der Versuchskörper bestand aus zwei vertikal stehenden Probeflügeln, die eine rechtwinklige Ecke bildeten (Abb. 3.20). Der Brenner war in der Ecke am Boden angeordnet (Abb. 3.21). Die Holzleichtbetonplatten wurden auf 10mm starke Holzspanplatten ohne Fugen mit Kreuzschlitzschrauben befestigt. Die abgezogene raue Beton-

22 Vgl. EN 13823
23 Vgl. Häberle, 2008

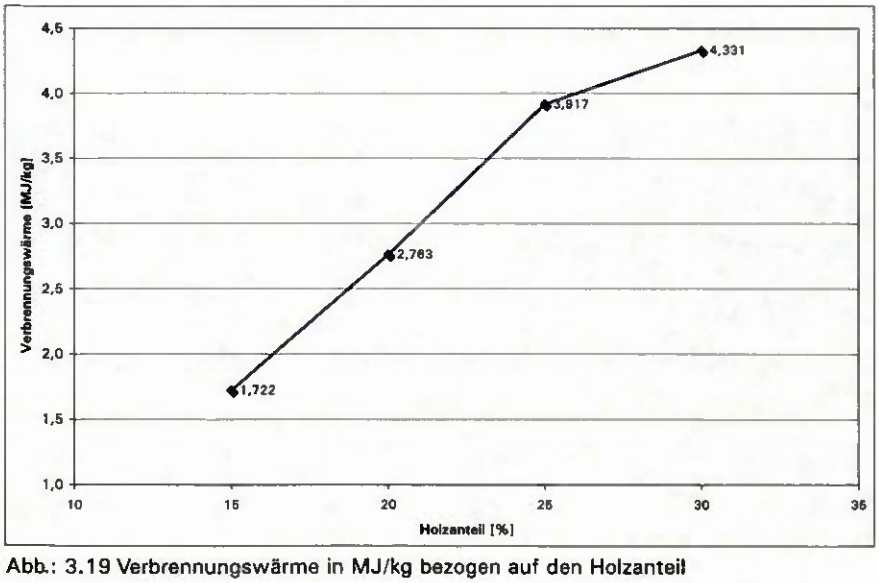


Abb.: 3.19 Verbrennungswärme in MJ/kg bezogen auf den Holzanteil

fläche bildete die Oberfläche der Platten. Als Abschlussplatte wurde eine Kalziumsilikatplatte verwendet.

3.3.7. Ergebnisse

Das Material lag mit einem FIGRA von 0,0 W/s und einem THR600s von 0,52 MJ in der Baustoffklasse A2 (Abb. 3.24). Der Grenzwert liegt bei ≤7,5 MJ für THR 600 s und bei FIGRA≤120 W/s. Der Wert für die Rauchentwicklung SMOGRA betrug 0,0 m²/s und der TSP600s 10,28 m² (Abb. 3.25). Damit wurde die Klasse s1 erreicht. Der Grenzwert liegt bei einem SMOGRA von ≤30 m²/s und einem TSP600s von ≤50 m². Innerhalb von 600s kam es zu keinem Abtropfen bzw. Abfallen, d. h. hier konnte die Klasse d0 erreicht werden. Insgesamt ergab sich damit eine Baustoffklasse von A2-s1, d0. Die gemessenen Werte für die Wärmefreisetzung und Rauchfreisetzung lagen weit unter den geforderten Grenzwerten.

3.3.8. Zusammenfassung

Die Prüfung diente als erste Orientierung zum Brandverhalten einer ausgewählten Holzleichtbetonmischung für den Anwendungsbereich Innenraum. Die endgültige Klassifizierung kann nur nach Durchführung von mind. 3 Versuchen sowie den Versuchen nach EN ISO 1716 (Brennwertermittlung) desselben Materials aus einer Produktion erfolgen. Der SBI-Test hat jedoch die Ergebnisse aus der Brennwertermittlung bei der Mischung mit 20% Holzmasseanteil bestätigt.

Abb.: 3.20 Probenaufbau

Abb.: 3.21 prinzipieller Versuchsablauf

Abb.: 3.22 Flügel nach Versuchsende

Abb.: 3.23 Detail nach Versuchsende

Für eine bauaufsichtliche Zulassung ist dieser Versuch für den jeweiligen Anwendungsbereich (abgehängte Decke bzw. Wandbekleidung) nach den erforderlichen Anforderungen aus den Normen zu wiederholen. Dabei ist anzunehmen, dass die gemessenen Werte sich in Abhängigkeit vom Material der Unterkonstruktion und dem gewählten Fugenbild verändern werden. Zu den Grenzwerten für A2 besteht jedoch ausreichend Abstand, so dass auch hier eine Kassifizierung in die Baustoffklasse A2 zu erwarten ist. Problematisch einzustufen sind eher die Ergebnisse aus der Kalorimeterprüfung, da hier der gemessene Brennwert mit 2,7 MJ/kg nur 0,3 MJ/kg unter dem geforderten Grenzwert von 3,0 MJ/kg lag.
Insgesamt ist für die Beurteilung des Brandverhaltens von Holzleichtbeton auch die zweite Anforderung der Bauprodukt-Richtlinie hinsichtlich der Ausbreitung von Feuer und Rauch und der Tragfähigkeit der Konstruktion nach DIN 4102-2 bzw. DIN EN 13501-2 (Entwurf) von Bedeutung.

Die Novelierung der Musterordnung (MBO) eröffnet neue Potentiale für den Einsatzbereich der Holzbauweise, denn mit der Einführung der neuen Gebäudeklasse 4 (für Gebäude mittlerer Höhe) sind bis zu fünf Vollgeschosse möglich. Die Verwendung von Holz in der Tragkonstruktionen ist dann zulässig, wenn brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungen verwendet werden, die das so genannte "Kapselkriterium" erfüllen. [Diese ist gegeben, wenn "die Temperaturen auf der brandabgewandten Seite der Platte eine Temperaturerhöhung von 250 K (im Mittel) und 270 K (an einer Stelle) gegenüber der Ausgangstemperatur von ca. 20 °C" nicht erreichen[24] , d. h. wenn an der Holzkonstruktion wäh-

24 e-mail René Stein, Holzforschung München, 09.06.2008

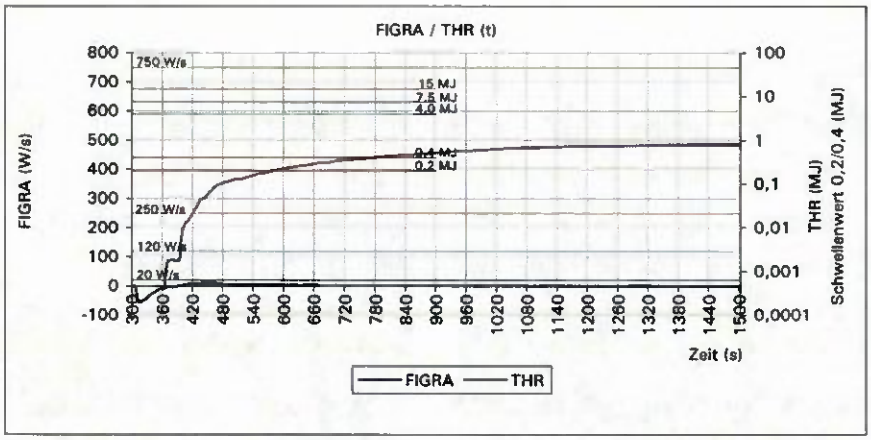


Abb.: 3.24 Wärmefreisetzung THR und Feuerwachstumsrate FIGRA

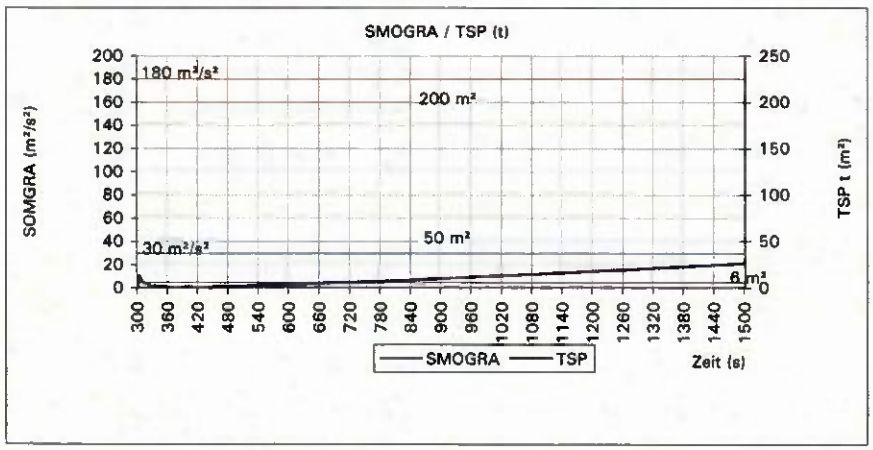


Abb.: 3.25 Rauchentwicklung TSP und Rauchwachstumsrate SMOGRA

rend der relevanten Branddauer von 60 Minuten die Entzündungstemperatur von 300°C" nicht entsteht.[25]

Nach einem Test im einem Kleinbrandofen[26] werden von Holzleichtbetonplatten der Mischung S-P-H06 "ca. 60 Minuten erreicht". Damit würde das Material die zur Zeit baurechtlich geforderte brandschutztechnische Wirksamkeit erfüllen. Allerdings muss "noch das Schwinden der Platte berücksichtigt werden. D.h. das Versagen in Bezug auf das Temperaturkriterium tritt wahrscheinlich schon zu einem früheren Zeitpunkt durch Zwängungen auf. Die Zwängungen werden durch die Befestigung der Platten mit der Unterkonstruktion hervorgerufen."[27] Sollte sich die erste Einschätzung in nachfolgenden Versuchen bestätigen, eröffnen sich für Wand- und Deckenbekleidungen aus Holzleichtbeton vielefältige Einsatzbereiche in mehrgeschossigen Bauten.

3.4. Wärmeschutz

Für den Einsatzbereich von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden stellen die bauphsyikalischen Eigenschaften von Außenwandbauteilen hinsichtlich des Wärmeschutzes eine wichtige Einflußgröße dar. Vorrangig sind Mindestanforderungen an den Wärmeschutz der Außenwandkonstruktion zu erfüllen. In der ENEV 2007 ist ein max. Wärmedurchgangskoeffizient von 0,45W/m²K für Neubauten definiert. Um Passivhausstandard zu erreichen sind diese Werte um ca. 70% zu unterschreiten.

3.4.1. Wärmeleitfähigkeit und Holzleichtbeton

Der für den Baubereich wichtigste Wärmetransportmechanismus ist der Wärmedurchgang, der sich zusammen setzt aus Wärmeleitung und Wärmeübertragung. Die Stoffkenngröße der Wärmeleitung ist die Wärmeleitfähigkeit λ eines Materials, die von verschiedenen Eigenschaften eines Stoffes abhängig ist. Die Wärmeleitfähigkeit von Holzleichtbeton hängt vor allem vom Porengehalt, der Porenart, dem Holz/Zementanteil und vom Feuchtegehalt ab. Der Zuschlagsstoff Holz führt beim Mischen zur Bildung von Luftporen, so dass das Materialgefüge, abhängig vom Holzanteil und Mischvorgang, durch zahlreiche Lufteinschlüsse und Poren charakterisiert wird. Die hierbei eingeschlossenen Luft bestimmt maßgeblich die Wärmedämmeigenschaften des Materials.

3.4.2. Bisherige Untersuchungen

Zur Wärmeleitfähigkeit von Holzleichbeton lagen Einschätzungen und Ergebnisse vor, die auf verschiedene FuE-Projekte zurückgehen[28].
Aufgrund der unterschiedlichen Rohdichten der beiden Ausgangsstoffe Zement und Holz (ca. Faktor 7-8) und der linearen Abhängigkeit von Gewicht und Wärmeleitfähigkeit sank mit zunehmenden Holzanteil der λ-Wert. Auf Basis unterschiedlicher Ausgangsrezepturen und Rohdichten wurden Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 0,15 W/mK bei einer Rohdichte von 600 kg/m³ bis 0,75 W/mK bei einer Rohdichte von 1720 kg/m³ gemessen.
Aufgrund von Modifikationen in der Mischungszusammensetzung, u. a. Erhöhung des Luftporengehaltes und Verringerung des Rohdichtebereiches (550-800 kg/m³) erfolgten weitere Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.

25 Vgl. Peter, 2006, S. 2
26 Durchführung des Tests an der MFPA Leipzig GmbH, Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen, Leipzig
27 e-mail René Stein, Holzforschung München, 09.06.2008
28 Vgl. Natterer/Gliniorz, 2000, S 83f. und Krippner, 2004, S. 49f.

3.4.3. Ausgangsrezepturen

Als Probekörper für die Messung dienten Reststücke aus der Schallabsorptionsprüfung. Es wurden drei Mischungen mit unterschiedlichen Holzzementverhältnissen und Rohdichten zwischen 540 und 700 kg/m³ (Abb. 3.26) ausgewählt. Um Aussagen über den Einfluss des Luftporengehalts auf die Wärmeleitfähigkeit treffen zu können, wurden zwei unterschiedliche Varianten der Mischung S-P-H06-W ausgewählt. Neben der bereits bekannten Mischung mit einer Rohdichte von 690 kg/m³ (Probe 2) wurde eine weitere Mischung mit identischem H/Z-Wert, aber deutlich höherem Luftporenanteil von 58 Vol.-% und einer Rohdichte von 543 kg/m³ untersucht (Probe 1). Dieser erhöhte Luftporenanteil ist durch die Verwendung eines Intensivmischers mit 40 l Fassungsvermögen bei der Herstellung des Musters erreicht worden. Die Probe 3 der Mischung S-E-H20-W wurde in einem zusätzlichen Arbeitsschritt durch Stampfen verdichtet. Trotz wesentlich höherem Holzanteil erreichte diese nahezu die gleiche Rohdichte wie Probe 2.
Aus jeder Mischung wurden 4 quaderförmige Probekörper mit den Abmessungen 100x40x20 mm hergestellt. Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte anhand der dynamischen Hitzdrahtmethode.[29]

3.4.4. Ergebnisse

Erwartungsgemäß lag die Wärmeleitfähigkeit der Probe 1 mit 0,14 W/mK aufgrund der geringeren Rohdichte und dem hohen Luftporengehalt unter dem Wert der Probe 2 (0,28 W/mK) (Abb. 3.27). Somit kann durch den Porenanteil der λ-Wert deutlich gesenkt werden. Der Vergleich der Ergebnisse der Proben 2 und 3 zeigte, dass bei nahezu gleicher Rohdichte mit steigendem Holzanteil

29 Vgl. Vidi, 2007

Mischung	S-P-H06-W-1	S-P-H06-W-2	S-E-H20-W-3
Holz/Zementwert (kg/kg)	0,26	0,26	0,44
Wasser/Zementwert (kg/kg)	0,89	0,67	0,94
Holzpartikel (fein < 6mm, grob < 15mm)	fein	fein	grob
Mischdauer /Intensität (min)	5 min/s	n.b.	3min/l
Luftporenanteil (Vol.-%)	58	n.b.	n.b
Verdichtung	gegossen	gegossen	gestampft
Oberflächenbehandlung	geschliffen	-	keine
Rohdichte trocken kg/m³	543	690	697
Biegezugfestigkeit N/mm²	0,7	n.b.	n.b.
Druckfestigkeit N/mm²	1,2	n.b.	n.b.

Abb.: 3.26 Kenndaten der Ausgangsrezepturen

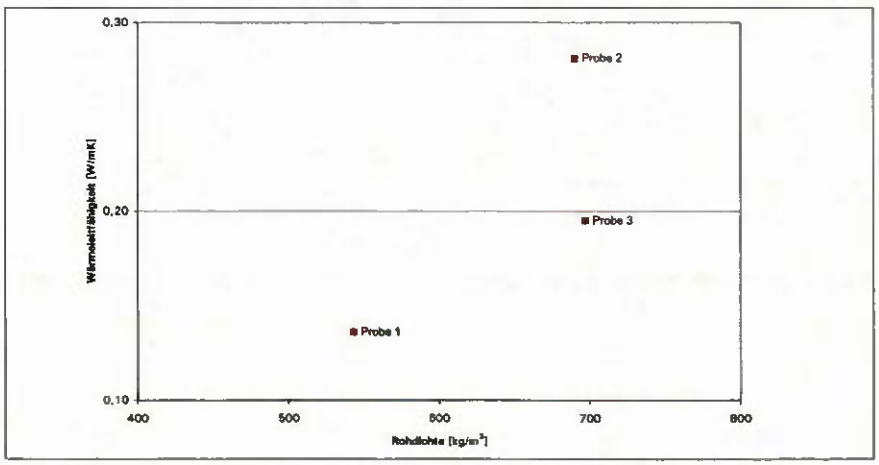


Abb.: 3.27 Wärmeleitfähigkeit der Proben in Abhängigkeit zur Rohdichte

die Wärmeleitfähigkeit von 0,28 W/mk auf 0,2 W/mK sank (Abb. 3.28). Demnach sank die Wärmeleitfähigkeit nur um 30% bei einer Zunahme des Holzanteils um 40%.
Vergleicht man die gemessenen Werte mit denen der früher durchgeführten Vermessung von Holzleichtbeton und von Holzleichtbeton mit PCM, ist eine weitgehend identische Entwicklung festzustellen: Mit steigender Rohdichte nimmt auch die Wärmeleitfähigkeit zu.
Allerdings zeigte sich, dass trotz bis zu 10 % niedrigerer Rohdichte (gegenüber ZAE Bayern 2000) mit 0,136 W/mK ein Minimum des λ-Wertes wohl erreicht ist. Es überraschte, dass die beiden Proben mit Rohdichten von 690 bzw. 697 kg/m³ eine derart starke Streubreite (fast 30 %) aufweisen und Probe 2 mit 0,281 W/mK im Bereich deutlich schwerer Mischungen (900 bis 950 kg/m³ / ZAE Bayern 2000) lag. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass nur jeweils ein Probenkörper untersucht wurde und somit Inhomogenitäten des Materialsgefüges einen wesentlichen Einfluss darstellen (Abb. 3.29).
Mit den Wärmeleitfähigkeiteswerten von 0,14-0,28 W/mK bei Rohdichten zwischen 540 und 700 kg/m³ liegt der Holzleichtbeton im Bereich von Porenbeton (Abb. 3.30).

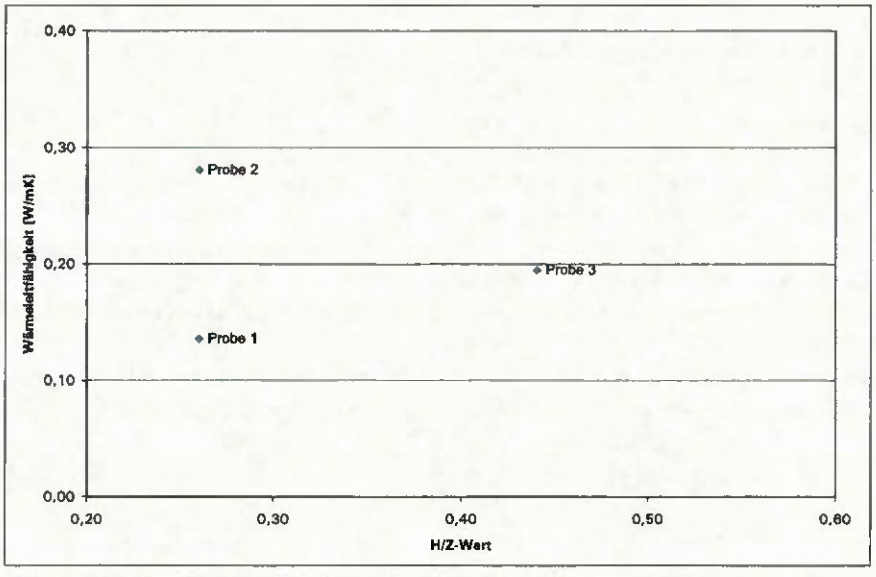


Abb.: 3.28 Wärmeleitfähigkeit der Proben in Abhängigkeit zum H/Z-Wert

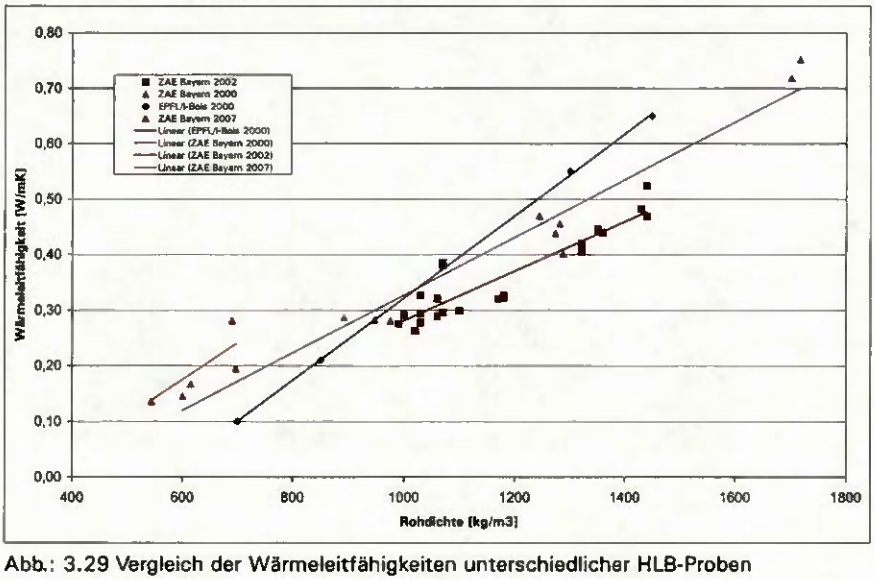


Abb.: 3.29 Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten unterschiedlicher HLB-Proben

Auf Basis der ermittelten λ-Werte kann eine überschlägige Abschätzung verschiedener Wandaufbauten vorgenommen werden. Zwei wichtige Randbedingungen sind dabei zu erfüllen: mit Außenwandstärken von ≤ 30 cm die Mindestanforderungen des Wärmeschutzes, das heißt U-Werte ≤ 0,45 W/m²K zu unterschreiten. Dabei zeigt sich, dass mehrschichtige Aufbauten mit Massivholz (Brettstapel) sowie mit Massivholz und zusätzlicher Dämmschicht (Climate Chips) U-Werte zwischen 0,43 und 0,28 W/m²K aufweisen.
In Anlehnung an die Ergebnisse einer Potentialabschätzung[30] läßt sich bilanzieren, dass Holzleichtbeton-Außenwände mit einer Wandstärke von ≤ 30 cm mindestens den Standard von konventioneller Massivbauweise erreichen und partiell der Heizwärmebedarf bis 20 % reduziert werden kann. Werte im Bereich der Niedrigenergiebauweise sind mit den bisher konzipierten Wandaufbauten und den neuen Mischungen jedoch (noch) nicht zu erzielen.

Als Material in Verbundkonstruktionen für Außenwandaufbauten sind Mindestfestigkeiten erforderlich, um das Eigengewicht sowie horizontale Lasten aus Winddruck und –sog aufnehmen zu können. Hier muß sich in künftigen Versuchsreihen zeigen, inwieweit durch Senkung des Zementanteils und Erhöhung von Holzanteil und Luftporengehalt die Wärmeleitfähigkeit von Holzleichtbeton noch reduziert werden kann, unter Beibehaltung ausreichender Festigkeiten.

3.5. Holzleichtbeton und PCM

Insbesondere bei Leichtbauten bestehen aufgrund fehlender Speichermassen Probleme mit der Überhitzung und mit der Auskühlung. Diese Lastunterschiede können zu starken Beeinträchtigungen des Komforts führen und – aufgrund der zur Kompensation zusätzlich aufgewendeten Kühlung oder Heizung – zu erhöhtem Energieverbrauch. Die Aufgabe, überschüssige Wärme zwischenzuspeichern und zu einem späteren Zeitpunkt an den Raum wieder abzugeben, erfordert Materialien mit hohen Speichervermögen. In diesem Zusammenhang stellen Latentwärmespeichermaterialien, die für einen bestimmten Temperaturbereich große Wärmemengen speichern können, äußerst viel versprechende neue Baustoffe dar.

30 Vgl. Krippner, 2004, S.54-58

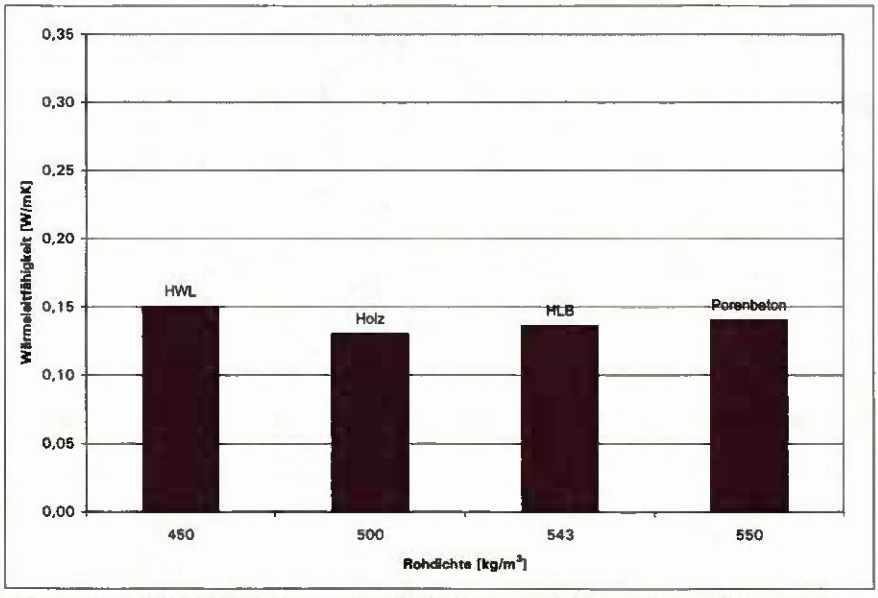


Abb.: 3.30 Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Baustoffe (vgl. Scholz, Hiese, 2003, S.755, hebel-bauphysik: www.hebel.de/downloads/deu/manuel/Kap5.pdf)

Im Rahmen von Forschungsprojekten wurde erstmals die Kombination von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien (PCM) untersucht.[31] Diese Arbeiten umfassten sowohl materialspezifische als auch experimentelle Versuche, die Durchführung von Potentialabschätzungen und den Bau von Funktionsmodellen in unterschiedlichen Maßstäben. Mischungen mit Rohdichten zwischen 1000 und 1450 kg/m³ zeigen Druckfestigkeiten bis 20 N/mm² und Wärmeleitfähigkeitswerte zwischen 0,28 und 0,50 W/mK. In einer thermischen Gebäudesimulation (südorientierter Büroraum mit Trennwänden unterschiedlicher thermischer Masse, neben einem Referenzfall, HLB und HLB+PCM) zeigte sich, dass die Erhöhung der thermischen Speicherfähigkeit von Holzleichtbeton mit PCM zu einer Reduktion der sommerlichen Überhitzung führt (unter Berücksichtigung externer Verschattung und ausreichender Nachtluftwechselrate). Kompositmaterialien aus Holz und hydraulischen Bindemitteln im Verbund mit PCM weisen funktionale und baukonstruktive Vorteile auf, wie die Ausbildung von leichteren und dünneren Wandelementen bei gleichzeitig thermodynamisch besseren Stoffeigenschaften.[32]

Trotz positiver Ergebnisse und Einschätzungen zum Verbund von Holzleichtbeton und PCM bestehen für den Einsatz von gebundenem, d. h. nicht gekapseltem PCM als Zuschlagsstoff in einem offenporigen Material wie Holzleichtbeton eine Reihe von bautechnischen Schwierigkeiten. So kann es durchaus passieren, dass nachdem das PCM bei Raumtemperatur den Phasenwechsel von fest nach flüssig vollzogen hat, es bei einem weiteren Temperaturanstieg kondensiert und aufgrund des Dampfdruckausgleichs durch die vorhandenen, herstellungsbedingten kapillaren Öffnungen in dem Granulat ausdiffundiert. Dabei spielt die Art der Einbringung des PCM (Mischung/Tränkung) keine Rolle; in beiden Fällen muss mit einem Verdunstungseffekt gerechnet werden.

Mittlerweile sind auf dem Markt auch mikroverkapselte PCM-Materialien mit Schmelzpunkten unter 28 °C erhältlich. Diese sind hinsichtlich ihrer Eigenschaften erprobt. Da für die Verarbeitung in zementgebundenen Werkstoffen keine Probleme zu erwarten sind, eröffnen diese PCM auch neue Optionen für den Verbund mit Holzleichtbeton.

Anknüpfend an diese Voruntersuchungen soll im Rahmen der Projektarbeiten Micronal® PCM[33] in Kombination mit den neuartigen Holzleichtbetonmischungen getestet werden. Zielsetzungen der Versuchsarbeiten sind:

- Überprüfung des Einflusses des PCM auf das Holz-Wasser-Zementgemisch
- Ermittlung der (Druck- und Biegezug-)Festigkeiten
- Abschätzung erforderlicher Zuschlagsmengen für ein thermisch wirksames Bauteil (für Montagedecken)

Dabei handelt es sich keineswegs um einen neuartigen Ansatz, der die Kombination von Baustoffen auf Basis des Holz-Wasser-Zement-Gemisches mit PCM-Materialien weiterführt. Neben den genannten Arbeiten bestehen auch Patentansprüche. So hat sich die Fa. Heraklit in Ergänzung ihrer Holzwolle-Bauproduktpalette den Verbund mit "mindestens einen, im Strukturkörper verteilten, gekapselten Latentwärmespeicher" schützen lassen.[34]
Die Zusammensetzung des Kompositmaterials und die Form der verwendeten Holzpartikel als Zuschlagsstoff unterscheiden sich jedoch deutlich, so dass es sinnvoll erscheint, auch die Kombination von Holzleichtbeton und Latentwärmespeichermaterialien weiter zu verfolgen.

31 Vgl. Krippner, 2004, S. 79-142
32 Vgl. Krippner, 3/2005, S. 173-180
33 Produkt der Fa. BASF, PCM (engl.: phase change material) steht dabei für phase change microcapsules
34 Vgl. DE 103 38 327 B3 vom 27.01.2005

3.5.1. Das Material

Micronal®[35] ist organisches PCM, das aus "mikroskopisch kleinen Kunststoffkapseln besteht, die einen Kern aus Wachs enthalten. Das Wachs wurde so gewählt, dass es einen Phasenübergang von fest nach flüssig an der sogenannten Schalttemperatur aufweist. Steigt die Temperatur des Bauteils über die Schalttemperatur des Micronal an, verflüssigt sich das Wachs im Inneren der Mikrokapseln und absorbiert dabei Wärme. Fällt sie hingegen unter diese Temperatur, verfestigt sich das Wachs und die Kapseln geben Wärme ab. Die periodischen Temperaturunterschiede im Laufe eines Tages führen zu einer Abfolge von Schmelz- und Erstarrprozessen.[36] Das "formaldehydfreie" PCM-Material ist als wässrige Dispersion oder als Pulver lieferbar und wird bereits in verschiedenen Bauprodukten, wie Gipskartonplatten, Putze, Spachtelmassen oder Spanplatten eingebracht. Für bauseitige Anwendungen ist es in zwei Lieferformen erhältlich:

- Flüssigkeit (Micronal® DS 5000 und Micronal® DS 5007)
- Pulver (Micronal® DS 5001 und Micronal® DS 5008)

jeweils für die Schmelztemperaturbereiche 26 °C und 23 °C. Die spezifische Wärmekapazität bei Schalttemperatur beträgt bei der Flüssigkeit ca. 46 kJ/kg und beim Pulver ca. 110 kJ/kg.[37]

Für die experimentellen Versuche wurde Micronal®DS 5008 X mit einem Schmelztemperaturbereich von 23 °C verwendet. Zum einen lassen sich bei der Trockenmasse die Rezepturen (insbesondere im Zusammenhang mit dem Zugabewasser) besser aufeinander abstimmen, zum anderen ist für Anwendungen im Innenraum (Pufferung von Temperaturspitzen) eine möglichst niedrige Schmelztemperatur ein wichtiger Parameter. Praktische Erfahrung legen es nahe, dass bei einem Deckenelement von einem PCM-Masse-Anteil von 3 kg/m² (bei Flächengewichten von Platten für Montagedecken zwischen 12 und 15 kg/m²) ausgegangen werden sollte. Dabei gilt es, ein Optimum zwischen thermischen Speichervermögen, Festigkeiten und letztlich Bauteilkosten zu finden.

Im Gegensatz zu Speichergranulaten, bei denen das reine PCM-Material nur etwa 1/3 des Gesamtgewichtes ausmacht, besteht bei den Mikrokapseln eine deutlich bessere Relation zwischen Hüllmaterial und PCM. Da es sich um sehr winzige Partikel handelt, die in großer Menge eingelagert werden können, führen diese auch zu einer gewünschten Vergrößerung der Oberfläche und damit

35 Vgl. Micronal® PCM - Intelligentes Temperaturmanagement für Gebäude. http://www.functionalpolymers.basf.com <08.03.2006>
36 http://de.wikipedia.org/wiki/Micronal <08.03.2006>
37 Kenndaten, s. "Rohstoffsortiment Micronal® PCM" http://www.functionalpolymers.basf.com <08.03.2006>

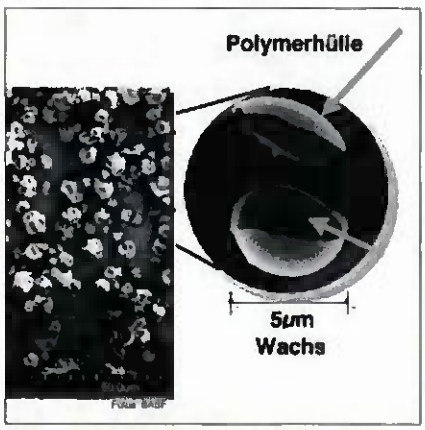


Abb.: 3.31 Mikrokapseln = dichte Verpackung

Abb.: 3.32 Micronal®DS 5008 X

zu einem besseren Wärmeaustausch. Der Masseanteil des Hüllmaterials beträgt nur etwa 15 %. Der Anteil an mikroverkapselten PCM verändert die Gefügestruktur im Holzleichtbeton. Da die Mikro-Kapseln, mit Durchmesser etwa zwischen 0,005 und 0,2 mm, sich inert verhalten, d.h. sie gehen keine Reaktion mit dem Zement ein und lagern sich in den Poren zwischen den Zementkristallen ein, sind etwaige negative Auswirkungen durch die Folien-Wandung auf den Verbund nicht zu erwarten.

3.5.2. Ausgangsrezepturen

Auf Basis der Ausgangsmischungen erfolgten drei verschiedene Testmischungen. Dabei wurden Trockenrohdichten zwischen 810 und 980 kg/m³ erreicht. Damit zeigte sich, dass die Verwendung von mikroverkapselten PCM-Materialien zu einer Gewichtreduktion zwischen 20 und 30 % gegenüber der Kombination mit Speichergranulaten führt. Allerdings sind neben den unterschiedlichen Ausgangskenndaten des PCM-Materials auch die abweichenden Rezepturen zu beachten, besonders bei den Zement- und PCM-Anteilen (410 – 600 kg/m³ bzw. 116 – 432 kg/m³).[38] (Tab. 3.33)
Berücksichtigt man den beim Speichergranulat deutlich geringeren reinen PCM-Anteil, sind jedoch vergleichbare Speicherdichten zu erwarten (B3 ≈ 136 kg/m³ gegenüber RVIII ≈ 144 kg/m³) bei fast um 1/3 leichterem Baustoffgewicht.

3.5.3. Ergebnisse

Beim Vergleich der Festigkeiten von Holzleichtbeton mit mikroverkapseltem PCM fällt auf, dass mit Zunahme von Zement- (+ 14%) und PCM-Gehalt (+390%) das Latentwärmespeichermaterial zusätzlich eine Verbesserung der Druckfestigkeit (+150%) bewirkt. Dieser durch die eingelagerten Mikrokapseln bewirkte Einfluss wurde bei den Biegezugfestigkeiten nicht wirksam. (Abb. 3.34)

38 Vgl. Krippner, 2004, S. 139

HLB mit PCM	B1	B2	B3
Zement (kg/m²)	474	514	540
Holz (wassergesättigt) (kg/m²)	311	286	253
PCM (kg/m³)	41	102	160
Wasser (kg/m³)	315	334	341
Ausbreitmaß* (cm)	13,1	13,3	13
Frischbetonrohdichte (kg/m³)	1145	1238	1296
Trockenrohdichte (kg/m³)	810	890	980
Druckfestigkeit (N/mm²)¹	B1	B2	B3
WB2	5,5	6,2	7,4
2 d3	3,6	4,3	5,6
7 d3	5	6,2	7,4
28 d3	5,4	7,1	8,5
Biegezugfestigkeit (N/mm²)¹	B1	B2	B3
WB2	2,2	2,3	2,5
2 d3	1,5	1,7	2,3
7 d3	2,1	2,4	2,5
28 d3	2,3	2,7	2,8

Abb.: 3.33 Zusammensetzung und Eigenschaften

* Hägermann Ausbreittisch
1 FestigkeitenanPrismen4x4x16cm
2 24h Wärmebehandlung bei 50 °C (Trockenshrank), Vorlagerung 1d bei 20 °C und r.F. >95 %
3 Feuchtlagerung bei 20 °C und r.F. > 95 %

Stellte man die Werte der Festigkeitsentwicklung über 2, 7 und 28 Tage denen einer Wärmebehandlung (24 h Wärmebehandlung bei 50 °C (Trockenschrank, Vorlagerung 1d bei 20 °C und r.F. >95 %) gegenüber, wurde ein positiver Effekt bei der Mischung mit geringem PCM-Anteil deutlich (B1). Bereits nach zwei Tagen wurden nur Endfestigkeitswerte wie nach 28 Tagen erreicht. Demgegenüber konnte bei den Mischungen B2 und B3 dieser Einfluss nicht nachgewiesen werden, die Werte waren nahezu deckungsgleich mit der Festigkeitsentwicklung nach 7 Tagen (bzw. unterschreiten diese leicht B2 / Biegezugfestigkeit). Hier scheint sich die Masse des organischen PCM bei einer Wärmebehandlung (die um den Faktor 2 über der Schmelztemperatur des Materials liegt) eher nachteilig auszuwirken, denn auch die Endfestigkeiten blieben etwa um 15 % unter den Resultaten der ‚normalen' Festigkeitsentwicklung.

Beim Vergleich der Festigkeiten von Holzleichtbeton mit mikroverkapseltem PCM und mit PCM-Speichergranulat zeigte sich, dass das Kapselmaterial Tonerde mit Zunahme des PCM-Masseanteils deutlich höhere Druckfestigkeiten be-

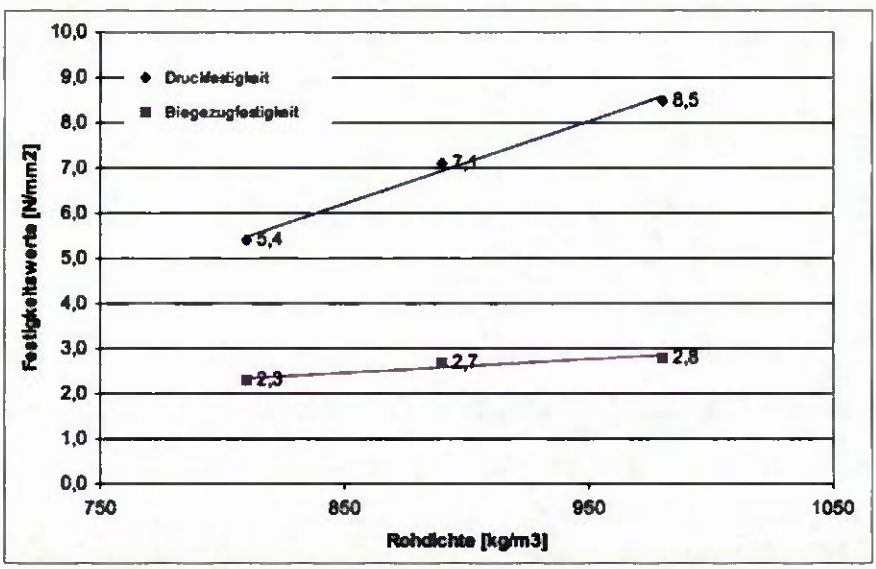


Abb.: 3.34 Festigkeiten von Holzleichtbeton mit mikroverkapseltem PCM (cbm 2006)

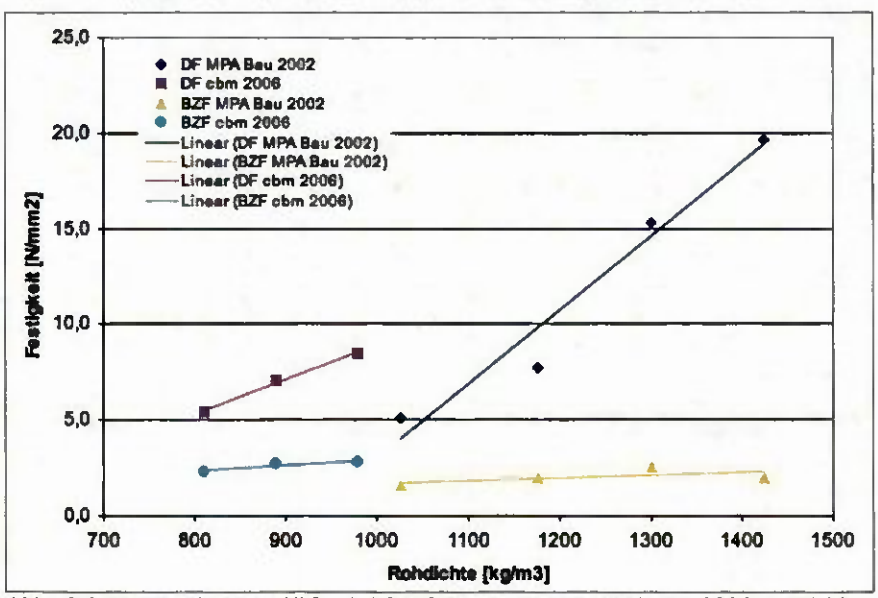


Abb.: 3.35 Festigkeitswerte HLB mit PCM-Speichergranulat (MPA Bau 2002) und HLB mit mikroverkapseltem PCM (cbm 2006)

wirkt (19,7 N/mm² bei Rohdichte 1425 kg/m³). Eine derartige Steigerung war mit den mikroverkapseltem PCM nicht möglich. Allerdings wurden für die anvisierten Anwendungsbereiche Innenraum und Gebäudefassaden ausreichend gute Druckfestigkeitswerte erzielt. Mit diesem Speichermaterial waren bei der Biegezugfestigkeit leicht höhere Festigkeitswerte bei reduziertem Bauteilgewicht festzustellen. (Abb. 3.35)

3.5.4. Zusammenfassung

Insgesamt zeigte sich nach diesen ersten Versuchen zur Kombination von Holzleichtbeton mit mikroverkapseltem PCM, dass hinsichtlich der Materialverträglichkeit keine nennenswerte Probleme auftraten. Bei der Beobachtung und Ermittlung der Verarbeitungs- und Frischbetoneigenschaften konnten keine negativen Einflüsse, z. B. vom PCM-Hüllmaterial auf das Holz-Wasser-Zementgemisch, insbesondere die Hydratation, festgestellt werden. Allerdings wären künftig in umfangreicheren Versuchsreihen u. a. Beeinflussungen auf die Fließfähigkeit des Frischbetons zu klären, was möglicherweise das Einbringen in eine Strukturschalung erschwert. Etwaige Verzögerungen bei der Hydratation könnten jedoch durch den Einsatz von Calciumchlorid unterbunden werden.[39]
Mit diesem innovativen Latentwärmespeichermaterial lassen sich jedoch deutlich reduzierte Rohdichten bei etwa gleichem PCM-Anteil erzielen bzw. besteht die Option den PCM-Anteil bei gleichen Rohdichten weiter zu erhöhen.
Das Maß der thermischen Speicherfähigkeit wird nachhaltig durch den PCM-Anteil bestimmt. Dabei scheinen Masse-Anteile bis 40 % reines PCM-Material eine herstellungstechnisch machbare Zielgröße, die auch in diesen Versuchsreihen noch nicht ausgeschöpft wurde (B3 etwa 25%). Platten für Montagedecken aus der Mischung B3 weisen Flächengewichte von etwa 15 kg/m² (d = 15 mm) auf, mit einem reinen PCM-Anteil von etwas mehr als 2 kg/m²; dieser Wert liegt für eine thermische Wirksamkeit (noch) an der Untergrenze.

Gleichwohl kann mit diesen vorläufigen Einschätzungen davon auszugangen werden, das Holzleichtbeton mit mikroverkapseltem PCM einen spürbaren Beitrag zur Erhöhung der thermischen Speicherfähigkeit und damit zu einer Reduktion der sommerlichen Überhitzung leisten kann (unter Berücksichtigung der eingangs genannten Randbedingungen), wie dies vergleichbare Potenzialabschätzungen gezeigt haben.[40]
Die vielfach diskutierten Zielgrößen für leistungsfähige Kühlungsstrategien mit Belegungsdichten von > 10 bis 20 kg/m²,[41] sind in dieser Form auch mit mikroverkapseltem PCM wohl nicht realisierbar. Allerdings darf es bei Material - und Bauproduktentwicklungen nicht nur um eine Teiloptimierung gehen. Die Einsatzmöglichkeiten von Baumaterialien im Bereich von Gebäudefassaden und Innenräumen werden über leistungsfähige funktionale und konstruktive Merkmale hinaus auch stark von ästhetischen Parametern bestimmt. Gerade in dieser Kombination von Eigenschaften weist der Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien gute Potentiale auf.

3.6. Lichttechnische Untersuchung von Holzleichtbetonproben

Das Lichtlabor Bartenbach hat in Untersuchungen interessante Zusammenhänge zur Modulation von Licht durch Materialoberflächen festgestellt.[42] Das Material moduliert das auftreffende Licht nicht nur in seiner Helligkeitswirkung, sondern auch in seiner farblichen Zusammensetzung. Jedes Licht verfügt über

39 Telefonat mit Dipl.-Ing. (FH) Herrn Marco Schmidt, BASF Aktiengesellschaft , v. 07.03.2006
40 Vgl. Krippner, 2004, S. 128-136
41 Vgl. SOBIC Seminar, 03.12.2003
42 Vgl. Danler, 2004

ein bestimmtes Spektrum an Wellenlängen und eine bestimmte Farbtemperatur. Tageslicht hat ein kontinuierliches Spektrum und eine hohe Farbtemperatur (≤ 5000°K), warmweißes Licht hat ebenfalls ein kontinuierliches Spektrum mit hohem Rotanteil und eine niedrige Farbtemperatur (≥ 3000°K). Kontinuierliche Spektren zeichnen sich durch eine gute Farbwiedergabeeigenschaft aus. Der Mensch empfindet natürliches Tageslicht mit hohen Beleuchtungsstärken als behaglich. Sinkt hingegen die Beleuchtungsstärke (Dämmerung) bei gleicher Farbtemperatur so wird das eher als unbehaglich empfunden. Beim Warmtonlicht werden geringe Lichtintensitäten mit niedriger Farbtemperatur als behaglich empfunden. Holzoberflächen reduzieren die Farbtemperatur und bewirken dadurch eine Behaglichkeitssteigerung bei geringen Beleuchtungsstärken.

3.6.1. Ausgangsrezepturen

Ausgangsrezepturen waren die Mischungen S-P-H06-L und SON-P-H06-L[43] und zwei Mischungen mit PCM[44] (Abb. 3.36). Die unterschiedliche Rohdichten resultierten aus dem jeweiligen Holz/Zementverhältnis und dem Speichergranulatanteil. Bei den PCM-Mischungen waren die Oberflächen glatt und das PCM-Material bildete sich zusammen mit dem Holz- und Zementleim als hellbraune Partikel sichtbar an der Oberfläche ab. Die oberflächennahen Feinstanteile der reinen Holzleichtbetonmischungen wurden bei der Mischung SON-P-H06-L durch Sandstrahlen entfernt, um die Holzpartikel an der Oberfläche sichtbar zu machen (Abb. 3.38).

3.6.2. Messverfahren

Anknüpfend an die Ergebnisse wurde die Messung des spektralen Reflexionsverlaufes an fünf unterschiedlichen HLB-Oberflächen durchgeführt.[45] Im Spektrometer wird der Reflexionsgrad für jede einzelne Wellenlänge im sichtbaren Bereich (380nm-780nm) gemessen. Ergebnis ist die sogenannte Remissionskurve auf deren Basis rechnerisch Farbort des reflektierten Lichtes, Farbtem-

43 Vgl. TP16, 2008
44 Vgl. Krippner, 2004, S. 173ff
45 Vgl. Danler, 2006

Mischung	S-P-H06-L (Nr.45)	SON-P-H06-L (Nr.46)	PL-P-H04-PCM-L-1 (RI)	PL-P-H04-PCM-L-2 (RVIII)
Rohdichte trocken [kg/m³]	690	780	1025	1425
Zementart	Schnellzem.	Sonderbindem.	Portl.zement CEM1	Portl.zement CEM1
Zementgehalt [kg/m³]	450	530	410	600
Wassergehalt [kg/m³]	400	429	320	360
Holzgehalt (trocken) [kg/m³]	115	116	175	95
Körnung Zuschlag Nadelholz	fein (<6mm)	fein (<6mm)	4mm	4mm
Additive/Zusatzstoffe	-	-	GR 41 (Paraffingehalt 116kg/m³)	GR 54 (Paraffingehalt 432kg/m³)
W/Z-Wert gesamt	0,89	0,81	0,78	0,6
W/Z-Wert effektiv	0,58	0,54	n.b.	n.b.
Konsistenz	weich (F3)	weich (F3)	C3/F3	C3/F3
Luftporengehalt (%)	38	23	n.b.	n.b.
Druckfestigkeit [N/mm²]	3,7	3,2	6,1	19,7
Biegezugfestigkeit [N/mm²]	1,6	1,2	1,6	2
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	n. b.	n. b.	0,285	0,492
Spez. Wärmekapazität [J/gK, 0°C]	n. b.	n. b.	1,34	1,2
Farbwiedergabeindex [Ra]	98	98	98	99
Reflexionsgrad [%]	37,3	42	35	31,6
Reduktion der Farbtemperatur [%][10]	26	18	26	26

Abb.: 3.36 Kenndaten der Materialproben

peratur, diffuser Reflektionsgrad der Oberfläche und Farbwiedergabeindex bestimmt werden. Die Proben wurden mit den Primärspektren Normlichtart D65 (Tageslicht) und Normlichtart A (Warmton) bewertet.
Zum Vergleich dienten vorhandene Messungen von nachfolgend aufgeführten zusätzlichen Materialien als Referenzen:
Sichtbeton grau, Buche natur, Kiefer natur, Zirbe natur, Farbe cremeweiss (Le Corbusier) LC 32.001 (ähnlich RAL 9001), Farbe gelb LC 43.20 (ähnlich RAL 1023), Farbe braunrot LC 43.04 (ähnlich RAL 8012).

3.6.3. Ergebnisse

Anhand des Farbwiedergabeindex (RA) lässt sich die Güte der Farbwiedergabeeigenschaft der Lichtquelle ablesen. Betrachtet man die verschiedenen Holzleichtbeton-Proben hinsichtlich ihrer Farbwiedergabe, so war ersichtlich, dass alle Proben sehr gute Farbwiedergabeindizes (RA > = 80 Farbwiedergabestufe 1) aufwiesen (Abb. 3.41). Die Farbwiedergabeeigenschaften des reflektierten Lichtes entsprechen nahezu denen des auftreffenden (primären) Lichtes. Die Holzleichtbeton-Oberflächen sind daher sehr gut als Reflektor für die Raumbeleuchtung insbesondere bei Tageslicht geeignet.
Die Reflexionsgrade der Holzleichtbeton-Proben entsprechen mit ca. 30-40% denen von Naturholz und von normalem grauen Sichtbeton. Sofern die Oberflächen des Raumes über die Reflexion nicht das Licht für die Beleuchtung des Raumes liefern müssen, sind diese Reflexionsgrade durchaus üblich und visuell angenehm.
Betrachtet man nun die Eigenschaften der Proben hinsichtlich der Reduktion der Farbtemperatur, so zeigt sich, dass Holzleichtbeton bei Tageslicht D65 (6.500 K) die Farbtemperatur des reflektierten Lichtes um ca. 1.700 K redu-

Abb.: 3.37 S-P-H06-L (M 1:1)

Abb.: 3.38 SON-P-H06-L (M1:1)

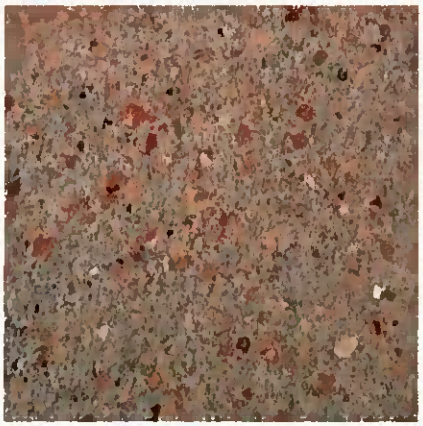


Abb.: 3.39 PL-P-H04-PCM-L-1 (M1:1)

Abb.: 3.40 PL-P-H04-PCM-L-2 (M1:1)

ziert. Dadurch bewegt sich das reflektierte Licht bei T= ca. 4.800 K. Zwischen den einzelnen Proben gibt es leichte Unterschiede. Die Probe SON-P-H06-L führte mit einer Farbtemperatur von 5.339 K zu verminderter Reduktion und lag sehr nahe an „normalem", grauem Sichtbeton (Abb. 3.42). Ursache könnte hier die sehr rauhe sandgestrahlte Oberfläche sein. Die anderen Holzleichtbeton-Proben wiesen trotz unterschiedlicher Zusammensetzungen kaum Differenzen in der reflektierten Farbtemperatur auf.
Insgesamt lässt sich sagen, dass HLB-Oberflächen durch die Reduktion der Farbtemperatur eine Steigerung der visuellen Behaglichkeit bei geringen Beleuchtungsstärken leisten. Dieser Effekt kann auch energetisch wirksam werden, da das Zuschalten von Kunstlicht verspätet erforderlich ist und somit der Strombedarf reduziert werden kann.
Für den Anwendungsbereich Innenraum kann festgestellt werden, dass Holzleichtbetonoberflächen sowohl im Bereich von abgehängten Decken wie auch als Wandbekleidung die Beleuchtungsqualitäten und die Raumstimmung physikalisch und psychologisch positiv beeinflussen. Bei der Reduktion der Farbtemperatur liegen die Oberflächen zwischen Sichtbeton und Naturholzoberflächen. Die gemessenen Reflexionsgrade von 30-40% sind vor allem an Wänden vorteilhaft, da z. B. Bilder gegenüber einem dunkleren Hintergrund visuell besser zur Geltung kommen. Bei Verwendung von Holzleichtbetonplatten im Bereich von abgehängten Decken ist die Raumbeleuchtung so zu planen, dass die Decke nicht als Reflektor dient.

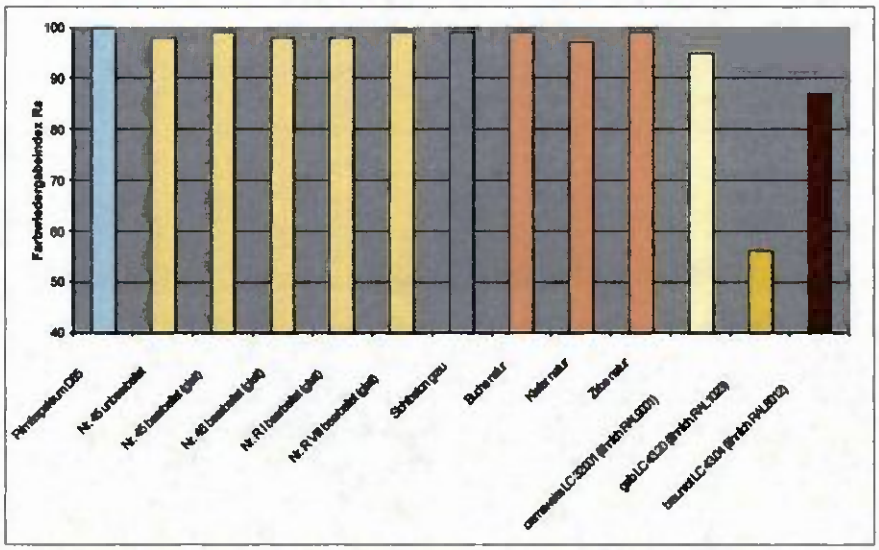


Abb.: 3.41 Farbwiedergabeindize Ra bei Beleuchtung mit Normlicht D65(6500K)

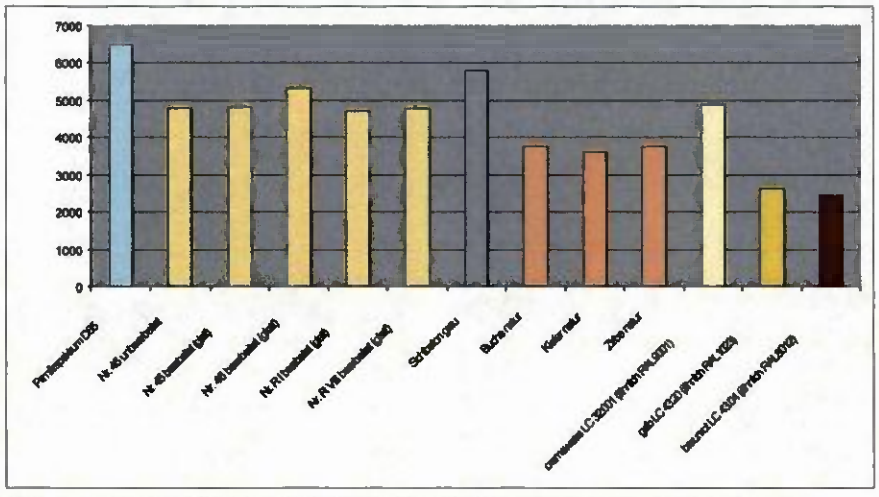


Abb.: 3.42 reflektierte Farbtemperatur bei Beleuchtung mit Normlicht D65(6500K)

4. Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton in der Gebäudehülle

4.1. Anwendungsbereiche im Hochbau

Zur Klärung der Untersuchungsschwerpunkte und um die Potentiale von Holzleichtbeton als Material für Bauprodukte im Hochbau hinsichtlich der funktionalen, konstruktiven und gestalterischen Anforderungen zu bestimmen, sind zunächst prinzipielle Einsatzmöglichkeiten analysiert worden.

Bei Gebäuden bestehen grundsätzlich Anwendungen in der Hülle und im Innenraum. Lärmschutzwände, in die Holz(leicht)beton als Material im Außenbereich sich als praxistauglich und marktreif bereits zeigt,[1] werden an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.
Bei der Gebäudehülle sind ausschließlich Fassadenkonstruktionen behandelt worden; typologisch wesentlich sind dabei einschalige und zweischalige Aufbauten, im Bereich des Innenraums sind dies Boden, Decke und (Innen-)Wand.
In einer weiteren Betrachtungsebene ist eine Klassifikation in
- Bauteil
- Bauelement

vorgenommen worden. (Abb. 4.1)
Unterscheidungsmerkmale sind Größe, Konstruktion, Herstellungs- und Montageprozess. Diese Einordnung ist zunächst unabhängig vom Anwendungsbereich. Unter Bauteil sind hier kleinformatige, flächige Teile zu verstehen, mit einer Größe bis 0,12 qm, die zur (Primär-)Konstruktion vorgehängt und hinterlüftet bzw. abgehängt angeordnet sind. Demgegenüber bezeichnet (in diesem Ansatz) Bauelement mittel bis großformatige Elemente, bis zu einer Größe von (1 bis) 14 qm, die nicht (bzw. selbst-)tragend ausgeführt sind, und weitgehend Schutzfunktionen wie Wärme-, Feuchte-, Schallschutz aufnehmen und/oder als Wärmespeicher fungieren.

Prinzipiell besteht beim Holzleichtbeton, wie bei anderen mineralisch gebundenen Baustoffen, aufgrund der guten Anpassungsmöglichkeiten der Mischungen, ein breites Anwendungsspektrum. Der ersten Auswahl von Einsatzmöglichkeiten aus den o. g. Bereichen liegen Erfahrungen und Ergebnisse aus vorangegangenen FuE-Projekten und (Vorab-)Schätzungen zu möglichst hohen und erfolgversprechenden Potentiale zugrunde.

1 Vgl. http://www.holzbeton.com <13.02.2008>

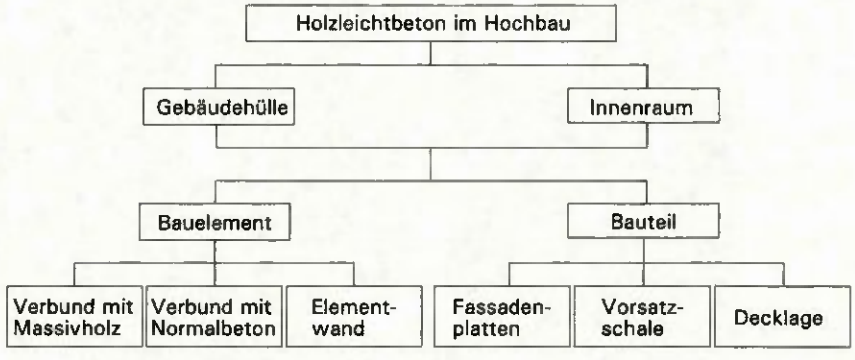


Abb.: 4.1 Anwendungsbereiche und Klassifikation von Holzleichtbetonprodukten

4.2. Holzleichtbeton im Fassadenbereich

Das Thema der Hülle der Gebäude hat in der architektonischen Praxis und in der öffentlichen Wahrnehmung in den vergangenen Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Dabei liegt auf den Fassaden – zwischen Schutzhülle, Wärme-/Stromlieferant und Medienscreen – ein besonderer Schwerpunkt. Dieses bauliche Subsystem ist der maßgebliche Faktor für Nutzerkomfort und Energiebilanz der Gebäude und bestimmt in entscheidender Weise deren Erscheinungsbild. Bei der Planung von Fassaden stellt die Materialwahl ein wichtiges Konstruktions- und Gestaltungsmittel dar. Hier erweitert Holzleichtbeton ein reichhaltiges architektonisches Repertoire. (Abb. 4.2)

Außenwandbekleidungen müssen primär den Schutz vor Feuchte (besonders Schlagregen), Temperatureinwirkungen, Solarstrahlung und Wind leisten und dauerhaft sicherstellen. Mit dem Baustoff Holzleichtbeton besteht die Möglichkeit, die positiven Eigenschaften von Holz als Fassadenmaterial (wie gute Bearbeitungsmöglichkeiten, hoher Wärmedurchlasswiderstand sowie hygroskopisches Verhalten, das auf der Fassadeninnenseite den Feuchteausgleich fördert) zu ergänzen. (Abb. 4.3) Zum einen haben Untersuchungen gezeigt, dass Holzleichtbeton eine gute mechanische Dauerhaftigkeit aufweist und so zum Einsatz ohne Beschichtung für die Außenanwendung (prinzipiell) geeignet ist.[2] Zum anderen eröffnet der Holzleichtbeton als gieß- und damit leicht formbares Material eine Vielzahl von plastischen Formgebungsmöglichkeiten in der Oberfläche, sowohl funktional als auch gestalterisch.
Im Bausektor ist ein regelrechter Boom bei Materialneuentwicklungen zu verzeichnen.[3] Neben der Suche nach neuen oder verbesserten Funktionalitäten liegt für Architekten und Bauherren auch ein besonderes Augenmerk bei außergewöhnlichen und hochwertigen Materialoberflächen (z.B. Entwicklungen wie "Light Transmitting Concrete (lichtdurchlässiger Beton)"[4]). Man spricht vom „Fest der Sinne"[5] und im Zusammenhang mit dem Wohnen vom „Gemütlichkeitsfaktor"[6]. Für das Wohlbefinden (Behaglichkeit) in der Arbeits- und Wohnwelt sind die Materialien ein maßgeblicher Faktor.

Gerade in diesem Kontext ermöglicht Holzleichtbeton durch seine Grundfarbigkeit sowie die vielfältigen Möglichkeiten stofflicher und farblicher Zusätze ästhetisch äußerst attraktive Oberflächen. Dies spiegeln und bestätigen

2 Vgl. Krippner, 2004, S. 152
3 Vgl. Kalweit et al., 2004
4 http://www.litracon.hu/ <04.05.2008>
5 Vgl. VDI Nachrichten, Nr. 16, 21.04.2006, S. 26
6 Vgl. Süddeutsche Zeitung, Nr. 295, 22.12.2006, S. V2/13

Abb.: 4.2 Betonfassade (Wolfsburg)

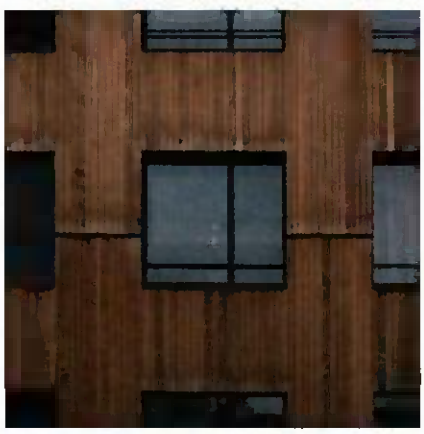


Abb.: 4.3 Holzfassade (Steinhausen/CH)

besonders durchgängig positive Reaktionen im Rahmen der Präsentation von Plattenmustern während der Bau 2007. Neben den gestalterischen und funktionalen Aspekten bestehen ebenfalls baukonstruktive Vorteile für den Einsatz von Holzleichtbeton im Fassadenbereich. Das Kompositmaterial eignet sich als zusätzliche Funktionsschicht bei Wandaufbauten, gleichermaßen als (äußere) Wetterhaut und/oder als raumseitig angeordnetes Oberflächenmaterial (z.B. gegenüber den physiologisch häufig als problematisch empfundenen Sichtbetonflächen in Innenräumen[7]).

Im Zuge weit reichender Arbeiten zu Systemen im Baubereich fanden auch Entwicklungen zu Leichtfassaden im mehrgeschossigen Wohnungsbau statt. Gerade in der Kombination von massivem Tragwerk (meist Stahlbeton) und leichter Fassadenkonstruktion aus Holz bestehen neben bauphysikalischen Aspekten auch Vorteile hinsichtlich Veränderbarkeit und leichterem Austausch. Allerdings stellen für den Holzbau besonders brandschutztechnische Anforderungen häufig ein großes Hemmnis dar.
Durch die großen bautechnischen Herausforderungen bei der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes sind derartige Konzepte und Konstruktionen (wieder) von höchster Aktualität. Allerdings stellt sich die Frage, inwieweit die Anforderung „geringes Gewicht" und „thermisch schwer" auch von Fassadenelementen erfüllt werden können: d. h. unterschiedliche Funktionsschichten aus mineralischen Baustoffen (zur Wärmespeicherung, Pufferung von Temperaturspitzen und Stabilisierung des Raumklimas) und aus Holz bzw. Holzwerkstoffen (hohe Festigkeit bei geringem Gewicht und hohem Vorfertigungsgrad), zur Lastabtragung, gleichermaßen im Wohnungs- und Verwaltungsbau. Hier lassen z. B. die Kombination von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien und Verbundkonstruktionen mit Massivholz neuartige Optionen erwarten.

Gleichwohl bestehen eine Reihe offener Fragen hinsichtlich der Eignung von Holzleichtbeton im Fassadenbereich. Über die unterschiedlichen Einsatzbereiche hinaus ist dies v.a. die Dauerhaftigkeit der nicht behandelten, bewitterten Oberfläche. Im Unterschied zum Sichtbeton (Zielsetzung: äußerst gefügedichte Oberflächen), weist der Holzleichtbeton je nach Mischungsverhältnis (Holzmasseanteil, Luftporengehalt etc.) eine offenporige Struktur auf. Auch wenn höhere Zementanteile geschlossenere Oberflächen ermöglichen, sind auch bei sehr niedrigem Luftporengehalt ganz geschlossene, gefügedichte Strukturen nicht zu erzielen. Daraus resultiert in erster Linie kein mechanisches, sondern ein gestalterisches Problem: Unbehandelte Holzleichtbeton-Oberflächen können sich durch Bewitterung 'unkontrolliert' verändern. Bei der Exposition der Flächen (Himmelsrichtung und Neigung) sind unter Umständen hinsichtlich deren Erscheinungsbild Besonderheiten und baukonstruktive Schutzmaßnahmen zu beachten. (Womit allerdings bzgl. Dauerhaftigkeit und Witterungsschutz keine nennenswerte Vorteile gegenüber Holzbekleidungen mehr bestünden.)
Die offenporige Oberflächenstruktur führt beim Holzleichtbeton durch seine elasto-mechanischen Eigenschaften zwar nicht zu Abpatzungen bei Frost-Tauwechsel, aber es besteht die Möglichkeit, das sich tierische und/oder pflanzliche Organismen in den Hohlräumen ansiedeln, die unter Sonnenstrahlung und Schlagregenbeanspruchung Verfärbungen verursachen.

Die Wahl der Außenwandbekleidung beeinflusst maßgeblich die gestalterische Wirkung der Fassade. Aus dem Baustoff Holzleichtbeton stehen neben kleinteiligen Formaten (z.B. Fassadenplatten) je nach 'Konfektionierung' mittel- bis großformatige Tafelbekleidungen zur Verfügung. Um verlässliche Aussagen hinsichtlich einer auch ästhetischen Dauerhaftigkeit treffen zu können, sind langjährige Bewitterungstest erforderlich. Vorarbeiten und erste Tests erfolgten im Rahmen der Projektarbeiten auf zwei verschiedenen Ebenen:

7 Vgl. Krippner, 2004, S. 124f.

- Musterplatten (TP 16)
- Fertigteilwand (Landesgartenschau Neu-Ulm/Fa. Hieber)

Nachfolgend wird die Untersuchung potentieller Anwendungsmöglichkeiten von Holzleichtbeton für den ersten Betrachtungsausschnitt, die Außenwand, dargestellt.
Die Arbeiten umfassen drei Bereiche:
- Verbundkonstruktionen mit Massivholz und mit Normalbeton als tragender Schicht
- vorgehängte, hinterlüftete Fassadenplatte
- Einbindung in Elementwände

Diese Bereiche unterscheiden sich jeweils hinsichtlich
- Schichtenfolgen mit entsprechenden funktionalen, bauphysikalischen Anforderungen
- fertigungstechnischen Randbedingungen, einschließlich Herstellungsaufwand und Bauteilabmessungen

4.3. Verbund mit Massivholz als tragende Außenwand

Zielsetzung der Projekt-Arbeiten sind, im Vergleich zu Normalbeton, leichtere Außenwandkonstruktionen bei verbesserten funktionalen und konstruktiven Eigenschaften. Bei den Arbeiten handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Holzbetonverbund-Bauweise mit den Schwerpunkten
- Außenwandkonstruktion
- Holzleichtbeton als ‚Deckschicht'

Die Arbeiten umfassten dabei neben Fragen zur Verbindungsart auch Untersuchungen zur Modifikation der (Massiv-)Holzschicht, um Aussagen zu leistungsfähigen, geschosshohen Außenwandbauteilen treffen zu können.

4.3.1. Zu Holzverbundkonstruktionen

Der innovative Holzbau wird bestimmt von dem verstärkten Einsatz in mehrgeschossigen Gebäuden und in städtischen Bebauungen. Dabei ist eine fast paradigmatische Neuausrichtung des industrialisierten Holzbaus zu verzeichnen, von stabförmigen Elementen zu scheibenförmigen Bauteilen.[8] Gerade in mehrgeschossigen öffentlichen wie privaten Wohn- und Verwaltungsbauten bestehen zahlreiche Möglichkeiten, (Massiv-)Holz und/oder Holzverbundwerkstoffe in großen Mengen in der Primärkonstruktion einzusetzen.
Die Kombination von Holz und Holzwerkstoffen mit hydraulischen Funktionsschichten ist eine Bauweise, die im Hochbau bereits eine "sehr lange Entwicklungsgeschichte"[9] aufweist. Holzverbundkonstruktionen (HBV) werden als wirtschaftliche und zeitsparende Bauweisen betrachtet und vor allem im Deckenbereich eingesetzt. Dabei werden in der Regel Holzträger mit einer relativ dünnen Betonschicht (Aufbauhöhen ≥ 6 cm) schubfest verbunden, d.h. der Beton bzw. die Betonplatte wird in der Druckzone und das Holz, in Form von Balken oder als Massivkonstruktion, in der Zugzone angeordnet. Zielsetzung derartiger Konstruktionen ist die Reduzierung der Durchbiegung und Erhöhung der Traglast von Holzdecken.[10]
Die HBV-Decken zeichnen sich durch gute Systemeigenschaften in den Bereichen Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit aus.[11]
Zur Ausbildung von HBV-Deckensystemen bestehen am Markt unterschiedliche Konstruktionen, sowohl für den Neubaubereich als auch für die Sanierung. (Abb. 4.4, 4.5) Dabei wird in der Regel in Verbindung mit Holzbalken- oder Mas-

8 Vgl. Seidel, 8/2003, S. 26-29
9 Vgl. Rautenstrauch, 2004, S. 1
10 Vgl. Guggenberger/Ronach, 10/2003, S. 633-634
11 Vgl. Bathon et al., 10/2004, S. 54-57

sivholzdecken die Betonschicht jeweils (auf der Baustelle) aufgebracht. Holzverbundkonstruktionen sind eine Bauweise, bei der für einen weiterreichenden Einsatz im Hochbau v. a. Fragen zu Verbindungsmitteln und Verbundaufbauten bzw. -elementen noch zu klären sind.

Vergleicht man aktuelle Forschungs-Arbeiten[12] im Bereich der Holz-Beton-Verbundkonstruktionen bzw. Holz-Beton-Fertigteile[13] sind eine Reihe von Arbeitsschwerpunkten festzustellen:
- Verwendung im Deckenbereich
- 'Deckschicht' aus 'Normal'-Beton (C 25/30)[14]
- Einsatz von Stahlbewehrung[15]

Darüber hinaus besteht ein großes Weiterentwicklungspotential in der Kombination mit Leichtbetonen, z. B. Holzleichtbeton, und der Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten auf den (Außen-)Wandbereich. Diese Form der Holzverbundbauweise verknüpft baukonstruktive und bauphysikalische Vorteile mit einem hohen Grad an Vorfertigung und verspricht eine gute Bilanz hinsichtlich der Stoff- und Energieströme:
- Geringere Bauteilgewichte
- Bauklimatische Vorteile im Bereich der raumumschließenden Flächen
- Gestalterische Alternative zu fertigen Holz- oder Sichtbetonoberflächen
- 'Trockenbauweise' mit kürzeren Bauzeiten
- wirtschaftliches Konstruktionselement durch Einsatz von Reststoffen[16]
- geringere Transportaufwendungen durch Gewichtsreduktion der Bauteile

Die Arbeitschritte sind auf eine Herstellung der Elemente in Fertigteilwerken angelegt, da in der werkseitigen Fertigung eine Reihe von Vorteile bestehen:
- Gute Kontrolle der Materialflüsse, Mischungsverhältnisse, Materialeigenschaften, insbesondere z. B. der Holzfeuchte des Zuschlagsstoffes
- Gewährleistung hoher Qualitätsanforderungen bei der Herstellung

Allgemein lässt ein höherer Vorfertigungsgrad eine Vereinfachung in der Bauwerks-Herstellung und einen schnelleren Bauablauf erwarten.

12 Vgl. Kuhlmann/Schänzlin (Hg.), 2006, S. 43-82
13 Vgl. Schönborn, 2006, S. 43-50
14 Vgl. Schönborn, 2006, S. 43
15 Bei den Versuchen an der Universität Innsbruck/Prof. Flach wurde die "Betonschicht ... mit einer Baustahlmatte mittig bewehrt, um die Schwindrisse zu verteilen." Der Einsatz von Faserbwehrungen wird z.Zt. untersucht. Vgl. Schönborn, 2006, S. 43
16 Reststoffe von (regionalen) Holzarten sind im Vergleich zu vielen technischen Materialien (bei der Leichtbetonherstellung) sowohl ein kostengünstiger Roh- als auch Zuschlagsstoff

Abb.: 4.4 HBV-Deckensystem Optiholz

Abb.: 4.5 HBV-Decke Joensuu-Metla(SF)

4.3.2. Mögliche Außenwand-Aufbauten

Im Rahmen der Projektarbeiten wurde auf erste konzeptionelle Überlegungen zu Aufbauten und Schichtenfolgen von Außenwandkonstruktionen in der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise[17] zurückgegriffen.
Im Bereich der Außenwand (in HBV-Bauweise) kann Holzleichtbeton als Material für
- thermisch passive Bauteile und
- thermisch aktive Bauteile

eingesetzt werden. Möglich ist die Kombination mit Latentwärmespeichermaterialien (PCM), insbesondere bei raumseitig angeordneten Schichten. Diese prinzipiellen Anwendungsformen lassen sich in verschiedenen Aufbauten mit unterschiedlichen Schichtenfolgen 'realisieren'.[18]
Bei den untersuchten Wandaufbauten wird eine funktionale Trennung zwischen Lastabtragung und Wärmedämmung sowie Wärmespeicherung vorgenommen (Abb. 4.6). Bei Holzleichtbeton als statisch beanspruchbares Bauteil ($\rho > 1500$ kg/m³) beträgt der Holzmasseanteil weit unter 10 %. Mit der erhöhten Rohdichte steigt die Wärmeleitfähigkeit und nimmt der Wärmeschutz deutlich ab. Daher ist zur Lasttragung eine massive Holzschicht – Brettstapel- bzw. KLH-Elemente – vorgesehen. (Abb. 4.6) Hierbei werden die Vorteile der Massivholzbauweise, hohe Traglasten unter vertikaler und horizontaler Beanspruchung aufnehmen zu können, genutzt.
In den mehrschichtigen Wandaufbauten übernimmt der Holzleichtbeton als passives Bauteil wärmedämmende und wärmespeichernde Funktionen. Im Vordergrund der Überlegungen stehen eine sichtbare Verwendung des Holzleichtbetons, sowohl außen wie auch raumseitig. (Abb. 4.7, 4.8)

Zwei wichtige Randbedingungen sind von den Wandaufbauten zu erfüllen: Mit Außenwandstärken $\leq$ 30 cm sollen die Mindestanforderungen des Wärmeschutzes (nach EnEV 2007) erreicht werden. Bei der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise sind gerade bei der Betrachtung von Wärmebrückenverlusten und der Luftdichtheit von Gebäudehüllen weitere Vorteile zu erwarten. So lassen sich stoffbedingte Wärmebrücken durch homogene Baustoffschichten leicht vermeiden. Im Bereich der Anschluß-/Fügungspunkte, ausführungsbedingten Wärmebrücken und Luftdichtheit, bestehen durch entsprechende geometrische (maßgenaue) Randausbildung und ggf. nachträgliches Vermörteln ebenfalls Vorteile. Insgesamt ist jedoch zu berücksichtigen, dass sichtbar belassene Wandoberflächen immer hohe konstruktive und gestalterische Anfor-

17 Vgl. Krippner, 2004, S. 128-136, 156-161
18 Ferner bestehen Möglichkeiten des Einsatzes im Zusammenhang mit Luftkollektoren und Hypokaustensystemen. Vgl. Pfeiffer, 11/2002, S. 37-39

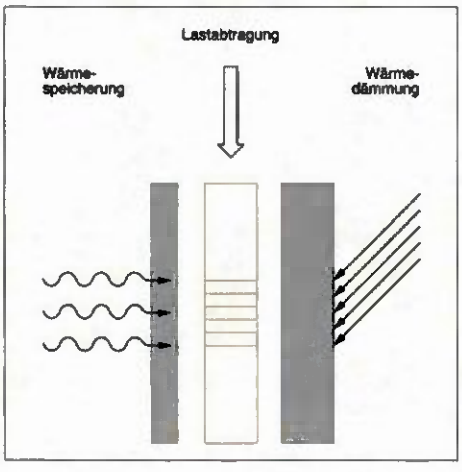


Abb.: 4.6 Funktions-Schichten der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise:
- Brettstapel (BS), Lastabtragung
- Holzleichtbeton (HLB), Wärmedämmung und -speicherung

derungen an die Ausbildung der Fügung stellen. Hierzu steht indes ein breites Produkt- und Systemspektrum zur Verfügung.

Im Rahmen des Projektarbeiten erfolgt die Überprüfung der funktionalen und konstruktiven Machbarkeit der skizzierten Aufbauten und Schichtenfolgen. Die Arbeiten umfassten
- Verbindungsart / -mittel der Schichten
- Varianten des Massivholzaufbaus
- erste Tests zum Verbundverhalten (Kurzeit-Scher-/Windsogversuche)

4.3.3. Verbindungsmittel

Die Leistungsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit von HBV-Konstruktionen sind stark abhängig von der "Art, Anordnung und Ausführung der Verbindungsmittel", die das Zusammenwirken der beiden Bauteilschichten gewährleisten. Neben dem Einfluss der Verbundfugen-Ausbildung auf Tragfähigkeit und Steifigkeit bestimmen die Kosten für das Verbindungsmittel und der Aufwand für deren Einbau maßgeblich den Preis von HBV-Konstruktionen. Ein weiterer maßgeblicher Einfluss ist die Spannweite; insbesondere bei Elementgrößen > 5 m steigen die Beanspruchungen.[19]
Zur Herstellung der Verbundwirkung zwischen den Bauteilschichten bestehen verschiedene Methoden. Zum einen über Vertiefungen in der Holzschicht, die nachträglich ausbetoniert werden, oder dem Einsatz von Dübelleisten[20], d. h. Verfahren die weitgehend das Ausgangs-Material verwenden, zum anderen der Einsatz von metallischen Verbindungsmitteln.
Hinsichtlich der Verbindungsmittel sind linienförmige und punktförmige Konnektoren zu unterscheiden. Dabei lassen sich unter den linienförmigen sowohl 'geometrische' Konnektoren wie auch additive Elemente subsumieren. Die Art des Verbindungsmittels hat Einfluss auf die Anzahl.
Darüber können die Verbindungsmittel hinsichtlich der Art ihrer Befestigung unterschieden werden: eingeschlagen, eingeschraubt, vermörtelt, geklebt. Bei allen Verbindungsarten erfolgt der kraftschlüssige Verbund durch die anschließende Betonage.

Lineare Konnektoren
- 'Brettlamellen': Versetzt angeordnete Brettlammellen bei Brettstapelelementen. Im Regelfall rechtwinklige Vertiefungen, die über die gesamte Elementbreite verlaufen. Der Verbund erfolgt durch Ausbetonieren. (Abb. 4.9)

19 Vgl. Schönborn et al., 2005, S. 1251
20 Vgl. Richter/Winter, 2006, S. 54-56

Abb.: 4.7 Mehrschichtige Aufbauten

Abb.: 4.8 in HLB-MH-Verbundbauweise

- Kerven: Etwa 2 cm tiefe und 20 cm breite Vertiefungen im Holz, die über das gesamte Element angeordnet sind. Zur besseren Krafteinleitung können deren Flanken positiv bzw. negativ ausgebildet werden.
- Metallplatte (MP): Flachstahl (z.B. 5 x 50 mm) wird in den Sägeschnitt in der Holzschicht über die gesamte Elementbreite, quer zur Längsrichtung der Träger, eingeschlagen. 10° geneigt um ein herausziehen zu verhindern.
- Eingeklebte Lochbleche: In vorbereitete Sägeschnitte (t = 3 mm), die mit Spezialkleber gefüllt sind, werden Lochbleche (500 x 40 x 2 mm) eingesetzt. Es können auch Streckmetalle verwendet werden.

Punktförmige Konnektoren

- Bohrungen[21]: Unterschiedliche Anzahl von zylindrischen Ausnehmungen in der Holzschicht, mit ø 50 und 100 mm, Tiefe 45 mm.
- Stahlanker: z.B. aus quadratischen Hohlprofilen (t = 5, b = 75 mm) eingesetzt in eine Aussparung im Holz (100 x 100 mm). Anschließend mit einem Vergussmörtel verfüllt.
- Schrauben: Holzschrauben (z.B. 12 x 160 mm) werden bis zum Gewindeansatz (z.B. 80 mm), linear angeordnet, in die Holzschicht eingedreht. Dabei besteht die Möglichkeit, die Schrauben schräg, z. B. im Winkel von 45° einzubringen.[22] (Abb. 4.10)

Für die Beurteilung von Verbindungsmittel sind einerseits technische (Lastverhalten, Handling) und wirtschaftliche (Anzahl der Konnektoren) Aspekte von Bedeutung.[23] Ein wichtiges Kriterium ist auch die Steifigkeit des Verbindungsmittels. Versuche von Schönborn haben gezeigt, dass die Kerve sowohl höhere Traglasten ermöglicht als auch eine größere Steifigkeit aufweist, d. h. die Kerve stellt sich als leistungsfähiges Verbindungsmittel heraus:[24]

- mechanische Vorteile (v. a. leistungsfähig bei den Abscherversuchen)
- einfache Herstellung
- günstiger Verbundmittelpreis

Die Verbundmittel Metallplatte und eingeklebtes Lochblech weisen ebenfalls hohe Steifigkeiten auf, v. a. beim "Lochgitter" besteht indes nur eine verminderte Lastaufnahme pro Verbindungsmittel, was eine höhere Anzahl an Konnektoren erfordert. Bei Stahlrohr und Schrauben fallen die "Steifigkeitswerte

21 Vgl. Heiduschke/Haller, 2006, S. 69
22 Je nach Lastfall um diese auf Zug zu beanspruchen, was bei stehenden Konstruktionen, d.h. Fassadenelementen von Vorteil sein könnte
23 Zur "technischen" Beurteilung von Verbundkonstruktionen sind Fragen zum bauphysikalischen Verhalten, wie Schallübertragung etc., ebenso relevant wie Fragen zur Umweltverträglichkeit. Beide Aspekte stehen jedoch nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Verbindungsmittel. Vgl. Schönborn et al., 2005, S. 1252
24 Vgl. Schönborn et al., 2005, S. 1251-1254

Abb.: 4.9 HBV, versetzte Brettlamellen

Abb.: 4.10 HBV, Stahlschrauben

und Widerstände" derart gering aus, dass für einen wirtschaftlichen Einsatz Modifikationen als notwendig erachtet werden.

4.3.4. Zu den Versuchsaufbauten

Neben der Auswahl von geeigneten Massivholzkonstruktionen (Abb. 4.11) ist das Verbindungsmittel zwischen den beiden Materialschichten wichtig. Hierbei ist auch zu klären, inwieweit die Erfahrungen mit Deckenelementen auf die Wand zu übertragen sind.[25]
Grundsätzlich sind im Bereich der Außenwand andere
- Lasten und Lastfälle
- bauphysikalische Anforderungen
- Elementgrößen

gegeben als im Deckenbereich.

Massivholzkonstruktionen
Hinsichtlich der Auswahl für die Massivholzschicht sind am Markt unterschiedliche Systeme erhältliche
- Brettstapel (BS): Kostengünstiges System, ohne Verleimung, Verwendung auch von 'Schwachholz'; allerdings Problem des Querschwindens
- Kreuzlagenholz (KLH): Im Vergleich zu BS weisen KLH-Platten eine höhere Steifigkeit auf. Allerdings in der Herstellung (damit in der Primärenergiebilanz) ungünstiger
- Lignotrend-Elemente: Vorteile durch kreuzweise verleimte Brettlammellen-Lagen, Kammerstruktur ermöglicht Aufnahme von Dämmstoffen zur Verbesserung des Wärmeschutzes; spezifisches Herstellerprodukt

Die ersten Versuchsmodelle werden mit Brettstapel- und Kreuzlagenholz-Elementen hergestellt, da zunächst das geeignete Verbindungsmittel für den Verbund getestet werden soll.

25 Arbeitstreffen an Universität Innsbruck. Herr Prof. Michael Flach, Herr Florian Schönborn, Herr Dieter Fleck, 27.04.2006

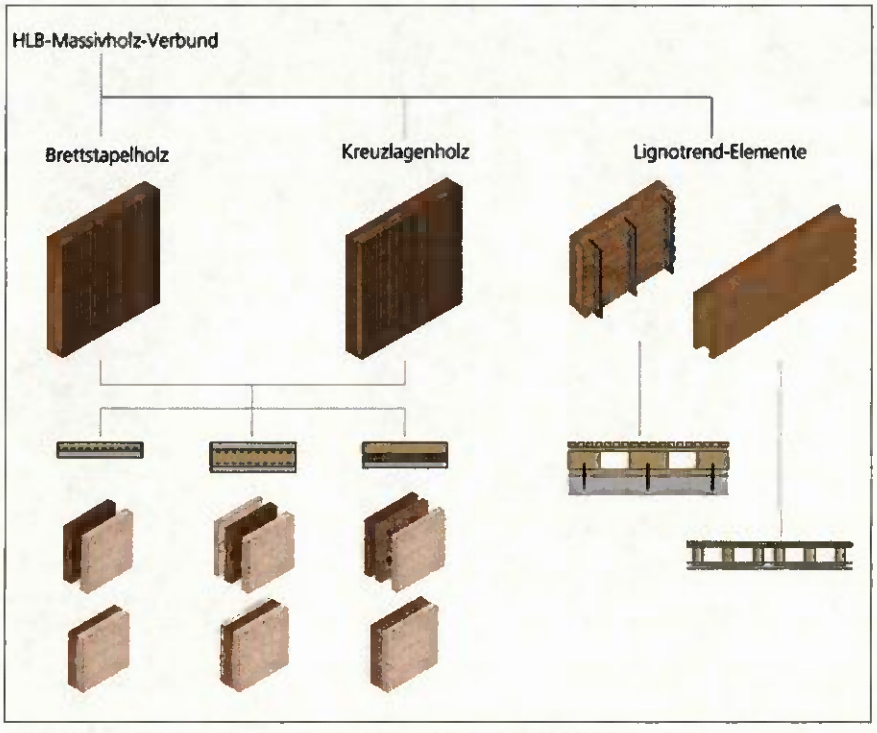


Abb.: 4.11 Varianten der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise

Verbindungsart/Verbindungsmittel

Vorteile der Schubkerve als Verbindungsmittel für die Holz-Beton-Verbundbauweise:[26]

- verläuft die Schubkerve über die gesamte Trägerbreite, besteht eine hohe Steifigkeit des Elements
- Trotz relativ geringer Anzahl werden hohe Traglasten erreicht
- Kerven lassen sich gut maschinell und preisgünstig herstellen

Hinsichtlich der Schubkerve liegen zu einer Reihe von geometrischen Parametern (erste) Einschätzungen vor.[27] (Abb. 4.12):

- Länge: < 10 cm besteht möglicherweise das Problem, dass dies für den Verbund zu gering ist; bei > als 20 cm ist kein Effekt festzustellen
- Tiefe: 2 bis 2,5 cm sind ausreichend
- Flankenwinkel: bei der Hinter- bzw. Überschneidung sind im Bereich zwischen 90° und -20°/+20° wahrscheinlich nur kleinere Optimierung zu erwarten; ggf. auch abhängig vom Fräskopf

Eine wesentliche Frage stellt sich im Zusammenhang der Wahl des geeigneten Verbindungsmittels, inwieweit gerade für Wandelemente eine zusätzliche Zugverankerung mittels Schrauben-Konnektoren (ø 6 - 8 mm, l = 60 mm, halb in Holz-, halb in Betonschicht) erforderlich ist. Im Rahmen von Versuchen an der Universität Innsbruck konnte "ein statisches Mitwirken der Schraube auf Zug nicht bestätigt" werden. Allerdings können Verbundschrauben ein Ablösen der Betonschicht aus der Schwindverformung des Betons begrenzen.[28]

Über die dargestellten Verbindungsmittel sind z. B. weitere Modellaufbauten denkbar, wie Ankerdübel von Wärmedämmverputzsystemen als punktuelle Konnektoren. Für die Versuchsmodelle wird eine repräsentative Auswahl (und teilweise Kombination) aus den vorgenannten Verbindungsmitteln gewählt, wobei der Schwerpunkt in der Untersuchung des Verbundverhaltens von Kerve (mit und ohne (Holz-)Schraube) und Schubverbinder liegt.

26 Vgl. Schönborn, 2006, S. 44
27 Tel. mit Herrn Schönborn, 31.05.2006; vgl. Flach/Schönborn, 2005
28 Vgl. Schönborn, 2006, S. 44

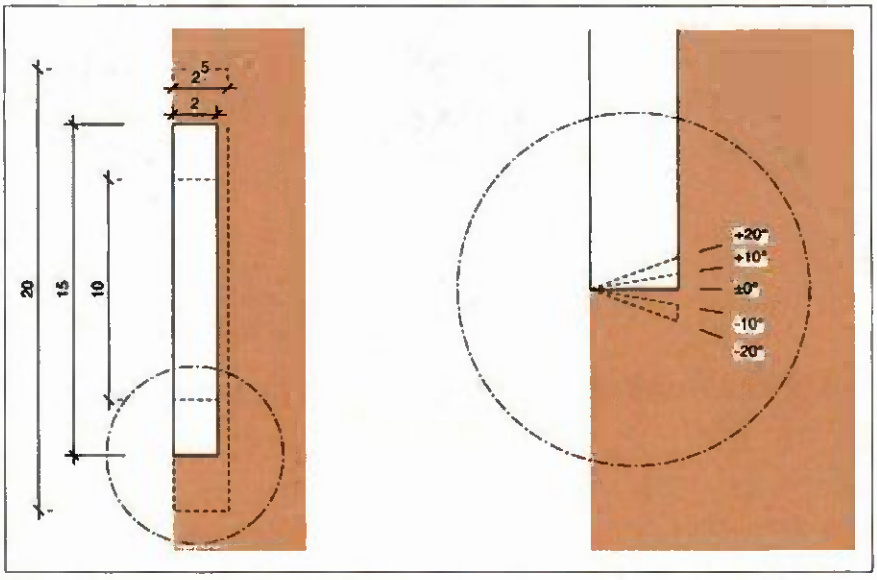


Abb.: 4.12 Varianten der Kervenausbildung

4.3.5. Betonage und Tests

Zur Untersuchung der Verbundwirkung und des Trag-Verformungsverhaltens[29] einer aufbetonierten Schicht aus Holzleichtbeton wurden zunächst sechs symetrische Versuchskörper hergestellt. (Abb. 4.13) Diese setzten sich jeweils zusammen aus einer mittleren Schicht aus Massivholz (Brettstapel bzw. Kreuzlagenholz) und beidseitig aufbetonierten Holzleichtbetondeckschichten. Variiert wurde die Verbindungsart bzw. das -mittel.
Diese Untersuchungen an wenigen Versuchskörpern (d. h. pro Versuchsaufbau stehen zunächst drei Versuchskörper zur Verfügung) sollten Einschätzungen, insbesondere zur Verbundmitteltragfägigkeit bzw. des Trag-Verformungsverhaltens von Holzleichtbeton, liefern.
Als Verbindungsmittel bildete die Schubkerve die Ausgangsbasis. Aufgrund der vertikalen Anordnung der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundelemente wurden die Versuche mit negativ eingeschnitten Kerven durchgeführt. Die Frage nach einer Zugverankerung durch stiftförmige Verbindungsmittel führte zu der zweiten Versuchsvariante. Bei dieser Variante war auch eine Verringerung der Kriechverformungen zu erwarten.[30]
Da bisher keine Versuche zum Verhalten von Holzleichtbeton in HBV-Konstruktionen vorliegen, wurden ergänzend zwei Varianten mit stiftförmigen Verbindungsmitteln vorgesehen.
Im Bereich der HBV-Deckenkonstruktionen stellen die sogenannten Schubverbinder leistungsfähige lineare Konnektoren dar. Eine strukturierte, gelochte Oberfläche des Stahlblechs sorgt für eine Art Verdübelung mit dem Beton.[31] Auch hier galt es erstmals dieses lineare Verbindungsmittel im Zusammenhang mit stehenden Elementen und mit Holzleichtbetondeckschichten einzusetzen.
Da keine Erfahrungen hinsichtlich der geeigneten Anordnung des Schubverbinders vorliegen, d. h. inwieweit auch beim Holzleichtbeton eine Art 'Verdübelung' beim Streckmetallformteil mit dem Beton sich einstellt, wurden zwei Versuchsvarianten: parallel bzw. quer[32] zur Brettlamellenlage, hergestellt.

Für Versuche zum Test des Versagenverhaltens bei Abscheren (von Holzleichtbeton auf Massivholzschichten) erscheinen Versuche in kleinerem Maßstab zunächst als ausreichend aussagekräftig. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Einflüsse aus der Lage und Anordnung von Verbindungsmitteln in solchen kleinmaßstäblichen Versuchen nicht erfasst werden können.[33]
Die Versuchskörper wurden in den Abmessungen 30 x 30 cm hergestellt, da diese Größe zusätzlich Vorteile hinsichtlich der Handhabung und der Auswahl der Prüfmaschine aufweist.
Ferner stellte sich die Frage nach den Aufbauhöhen der einzelnen Schichten. Im Bereich der Brettstapel-Beton-Verbunddecken wird das "optimale Verhältnis" von Brettstapelhöhe und Aufbeton mit 3:2 angegeben.[34] Die Aufbauhöhe variert je nach Brettstapelkern (72 [Variante I-IV] bzw. 128 mm [Variante V + VI]) zwischen 190 (1,2:1) und 248 mm (2:1).

Muster:
- Variante I: Massivholzschicht: Brettstapel, Kerve 150x15 mm, Flanke 10°
- Variante II: wie Variante I, plus stiftförmiges Verbindungsmittel (Maschinenschraube M 8 x 100 mm) (Abb. 4.14)
- Variante III: Massivholzschicht: Brettstapel, stiftförmiges Verbindungsmittel (Maschinenschraube M 8 x 100 mm)
- Variante IV: Massivholzschicht: Brettstapel, stiftförmiges Verbindungsmittel

29 Vgl. Heiduschke/Haller, 2006, S. 68
30 Vgl. Döhrer, 2006, S. 61
31 Vgl. http://www.hbv-systeme.de/Baustoffe.htm <02.08.2006>
32 Quer zur Beanspruchung bei Holzbalkendecken mit Stahlfaserbeton. Vgl. aaton - Selbstverdichtende und leicht verdichtbare Readymix Betone bei der Sanierung von Holzbalkendecken. Produktinfo. CEMEX Deutschland AG, 9/2005
33 Vgl. Schönborn, 2006, S. 44
34 Vgl. Michelfelder, 2006, S. 75

(WDV-Befestigungsteller Fischer Thermofix 6H-100)
- Variante V: Massivholzschicht: Kreuzlagenholz, lineares Verbindungsmittel (HBV-Schubverbinder); parallel zur Brettlamellenlage (Abb. 4.15)
- Variante VI: Massivholzschicht: Kreuzlagenholz, lineares Verbindungsmittel (HBV-Schubverbinder); quer zur Brettlamellenlage

Die beiden Bauteilschichten wurden in unterschiedlichen Höhen ausgeführt, damit eine Verschiebung unter Lastaufbringung erfolgen kann.[35] Daher befand sich in Verlängerung der Massivholzschicht zusätzlich ein Block aus blauem, extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoff ("Styrodur C"[36]).
Darüber hinaus mussten weitere Anpassungen vorgenommen werden, was die Abmessungen und die untere Auflagerausbildung betrifft. (Abb. 4.16) Mit zwei U-Profilen aus Aluminium sollten an den Holzleichtbetonschichten und durch zusätzliche 'Backen' aus Holz deren Ablösen sowie auftretende Reibung am Fußpunkt während des Versuchsablaufs verhindert werden.
Bei der Auswahl der Mischungen galt als Zielsetzung eine möglichst geringe Rohdichte und ausreichende Druckfestigkeit. Für die Untersuchungen werden Holzleichtbetone mit 20 M.-% Nadelholzspänen (trocken, bez. auf Holz + Zement) mit einer plastischen Konsistenz (w/z-Wert gesamt 0,87) in einem trag-

35 Vgl. DIN EN 26891, Juli 1991, S. 3
36 Das Material hat eine gute Druckfestigkeit und die Oberfläche besteht aus einer glatten, geschlossenen, wasserabweisenden Schicht; auch hinsichtlich der Kantenausbildung eignet es sich gut als Schalungs-Ergänzungsmaterial.

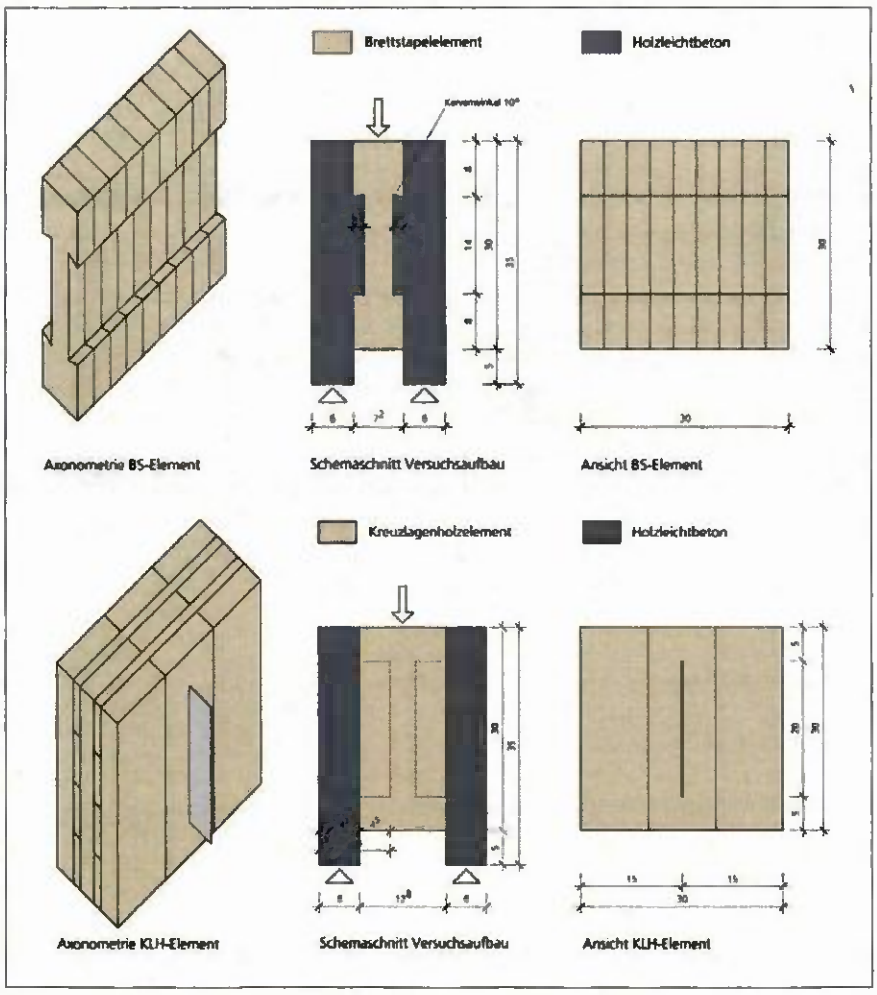


Abb.: 4.13 Versuchsaufbau anhand der Muster aus Reihe I und V

baren Betonmischer hergestellt und auf die Holzkonstruktion aufgetragen.
Die Holzleichtbeton-Mischung S-P-H06 erreichte bei einer Trockenrohdichte von 690 kg/m³ (Zementgehalt von 450 kg/m³ und Holzgehalt von 115 kg/m³) Druckfestigkeitswerte bis 3,7 N/mm² mit Luftporengehalt von 38 Vol.-%.[37]
Für die beiden Holzleichtbetonschichten der ersten Versuchsreihen wurden jeweils diese Mischung eingesetzt. Nach der Betonage der ersten Holzleichtbeton-Schicht wurde einige Stunden gewartet (um eine sichere Handhabung der Muster zu gewährleisten), dann erfolgte nach dem Drehen der Versuchskörper um 180° die Betonage der zweiten Holzleichtbeton-Schicht. Anschließend wurden die Versuchskörper stehend gelagert; die ersten sieben Tage mit Folie abgedeckt, danach in der Klimakammer bei Normklima (20 °C/65 % r.F.).
Nach 28 d Lagerungsdauer wurden Abscherversuche durchgeführt. Aus unbeschädigten Betonteilen wurden Betonwürfel mit Abmessungen von ca. 6x6x6 cm³ herausgesägt und die Rohdichte, Restfeuchte und Druckfestigkeit ermittelt. Es wurde festgestellt, dass die Proben I bis III (erste Betonage) mit ca. 5,4 MPa etwas höhere Festigkeiten aufweisen gegenüber den Proben IV bis VI (zweite Betonage) mit ca. 4,1 MPa. Auch die Trockenrohdichten lagen bei den Proben I bis III mit ca. 720 kg/m³ höher als die der Proben IV bis VI mit 690 kg/m³. Die Restfeuchten der Muster betrugen nach der Prüfung im Durchschnitt 14,8 M.-% für die Holzleichtbetone I bis III und 12,9 M.-% für IV bis VI.

Das Belastungsverfahren erfolgte in Anlehnung DIN EN 26891. Dabei ist die geschätzte Höchstlast (F_{est}) zunächst bis auf 40 % aufzubringen und 30 s konstant zu halten. Nach der Verringerung auf 10 % und weiteren 30 s Stillstand wird die Last soweit gesteigert, bis die Bruchlast oder eine Verschiebung von

37 Vgl. Heinz/Urbonas, 2006, S. 8

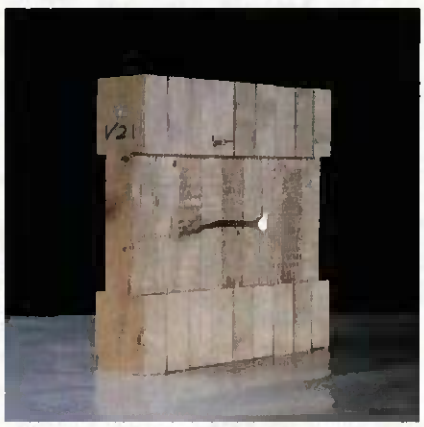


Abb.: 4.14 Muster 2.1

Abb.: 4.15 Muster 5.2 mit Schalung

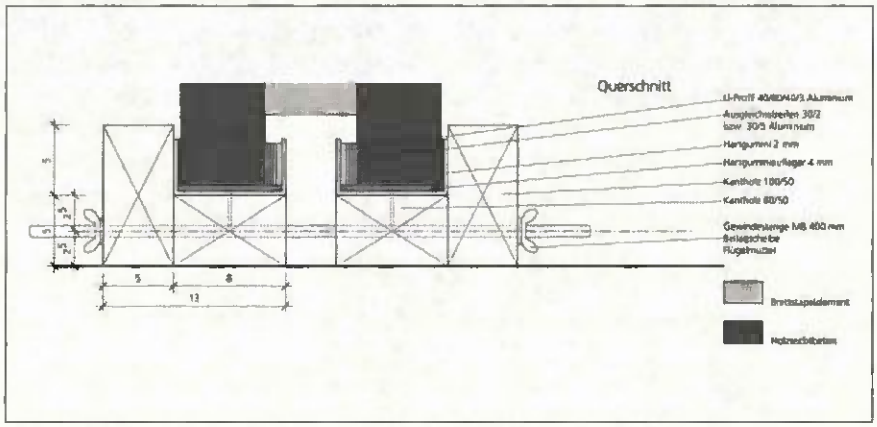


Abb.: 4.16 Speziell angefertigtes Auflager für die Muster der Kurzzeitscherversuche

15 mm erreicht ist.[38] Als F_{est} sind zunächst 50 kN angenommen worden. Mittels eines IPE-Stahlprofils sollte sichergestellt werden, dass die 'Punktlast' der Prüfmaschine gleichmäßig über die Fläche des Musterelements aufgebracht wird. Auf die Messung der Vertikalverschiebung wurde im Rahmen dieser ersten Untersuchungen verzichtet und somit nur das Standard-Protokoll des Kraft-Maschinen-Weges aufgezeichnet.

4.3.6. Kurzzeitscherversuche

Bei der gewählten Verbindungsart Kerve (Variante I) verhält sich die Ausnehmung im Holz ähnlich einer zimmermannsmäßigen Versatzverbindung, während die erweiterte Betonschicht sich ähnlich einer Konsole verhält.
Bei experimentellen Versuchen zu HBV-Deckenkonstruktionen von Michelfelder zeigte sich, dass im Bereich des Holzes ein Versagen auftrat durch "Abscheren des Vorholzes sowie durch Überschreitung der Druckfestigkeit im Bereich der druckbeanspruchten Kervenflanke". Dagegen konnte bei der nicht bewehrten Betonschicht als Versagensmechanismus das "Druck- und Schubversagen der Betonnocke" festgestellt werden.[39]
Bei den Holzleichtbeton-Massivholz-Elementen war jedoch zu erwarten, dass ein Abscheren des Vorholzes bei den Kerven-Mustern angesichts der geringen Druckfestigkeit des Holzleichtbetons wohl nicht erfolgt. Im Gegenteil ist davon auszugehen, dass als Versagensmechanismus das Druck- und Schubversagen der Betonnocke wahrscheinlich ist.
Im Rahmen von Vorversuchen am cbm (Teilprojekt 16)[40] zeigte sich, dass es bei der angenommenen Last F_{est} nicht zum Versagensfall kam, daher Festlegung der Ausgangslast F_{est} auf 50 kN. Ein weiterer Parameter für den Versuchsablauf ist der Kraftabfall. Nach Tests wurde festgelegt: die maximale Bruchlast ist erreicht, wenn die Prüfmaschine 50 % Kraftabfall registriert.
Desweiteren ist der Flächenverbund der beiden Bauteilschichten zu berücksichtigen. Da bereits vor Versuchsdurchführung bei den Mustern die Ablösung der Betonschicht um etwa 1-2 mm, aufgrund von Schwindverhalten, festzustellen war, kann von der direkten Belastung der 'Beton-Nocke' ausgegangen werden.

4.3.7. Ergebnisse[41]

Der Verlauf der Belastungsversuche (Abb. 4.17) mit den Mustern I (Kerve) zeigte zweierlei: Die Aufbauten mit Brettstapel erreichten einen Abscherwiderstand von etwa 46 kN (1.1) bzw. knapp über 50 kN (1.2); der Verlauf ist bei beiden Mustern nahezu identisch[42]. Demgegenüber ein deutlich anderes Bild bei dem KLH-Element (1.3). Bei gleichen Ausgangsbedingungen[43] wurde nur ein Wert von etwa 26 kN (mit dem die Verschiebung kontinuierlich bis zum Versagensfall fortschreitet) erreicht. Hier zeigte sich ein Problem in der Auswahl der Kreuzlagenholzschichten, denn die Kerve befindet sich im 'Weichholz', wird somit quer zur Faser beansprucht. D. h. Versagen des Vorholzes anstatt Druck- und Schubversagen der Leichtbetonnocke wie bei den vorhergehenden Proben. (Abb. 4.18)
Bei der Versuchsreihe II war der erwartete positive Effekt der Verbindung von Kerve und Schraube erkennbar.[44] Während das Brettstapelelement einen Ab-

38 Vgl. DIN EN 26891, Juli 1991, S. 3
39 Vgl. Michelfelder, 2006, S. 76
40 cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TU München,10.10.2006
41 Versuchsdurchführung cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TU München. Muster I bis III 11.10.2006, Muster IV bis VI 25.10.2006
42 Der Messvorgang wurde zu spät gestartet, daher versetzte Kraft-Zeit-Kurve
43 Lastgeschwindigkeit 10 kN/min, 0,167 kN/sec
44 Allerdings liegt nur das Ergebnis der Probe 2.1 vor, da aufgrund eines Programmfehlers der Versuch 2.2 abgebrochen werden mußte.

scher-Widerstand von etwa 58 kN (2.1) aufwies, trat bei Muster 2.3 (KLH) der vorbeschriebene negative Effekt auf (mit einem Max.-Wert von etwa 38 kN nach 15 mm Verschiebung[45]). Gegenüber Versuchreihe I war festzustellen, dass die Schraube das Versagen deutlich abbremst, d. h. der Lastabfall bis zur Verschiebung von 15 mm betrugt bei Muster 1.1 etwa 75 %, bei Muster 2.1 nur etwas mehr als 20 %.

Bei den Versuchsreihen III und IV wurden erwartungsgemäß deutlich niedrigere Ergebnisse erreicht.[46] Die Werte für die Schraube lagen zwischen 10 und 11 kN; auch hier fiel der Abscher-Widerstand beim KLH-Element mit knapp 8 kN (bei 18 mm Verschiebung) niedriger aus.

Insgesamt zeigte sich bei den Versuchen, dass der aufwändige Versuchaufbau eine gute Durchführung ermöglichte, denn bei den Mustern waren durchweg saubere Kanten durch Auflager und keine Abplatzungen etc. feststellbar.

Die Versuche mit dem WDVS-Anker spiegelten bei ähnlichem Verlauf gegenüber Versuch III ein deutlich ausgeprägteres Verhalten wider. Die Maximallast erreichte Werte von 15 bis 16 kN, allerdings beim KLH-Element (4.3) nur 6 kN. Bei den Mustern 4.1 und 4.2[47] war nach der Lastspitze ein abrupter Abfall um 75 % festzustellen (Muster 3.1 und 3.2 nur etwa 30 %). Beim Versuch 4.2 war nach einer Verschiebung von 5,5 mm ein deutliches 'Knackgeräusch' zu vernehmen; bei der anschließenden Trennung der Bauteilschichten bestätigte sich die Vermutung, dass der schlanke WDVS-Anker die Holzlamelle des Brettstapels, in die er eingeschraubt war, aufgespalten hatte. Da bei Versuch 4.3

45 Abbruch nach etwa 20 mm Verschiebung bei etwa 42 kN
46 Beim Versuch 3.1 eine zu schnelle Krafterhöhung festgestellt, mit evtl. negativer Beeinflussung der Maximallast, daher 3.2 und 3.3 mit 2 kN/min, 0,0333 kN/sec Laufweg durchgeführt
47 Muster war vorgenässt

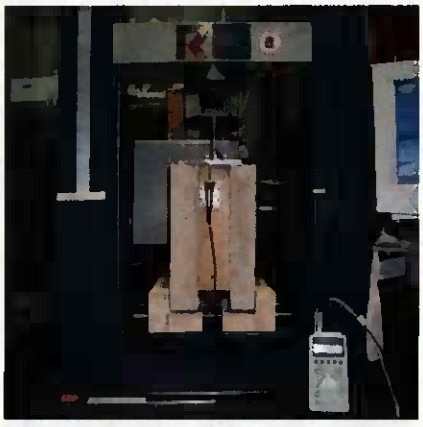


Abb.: 4.17 Versuchsaufbau cbm TUM

Abb.: 4.18 Abscheren der HLB-Nocken

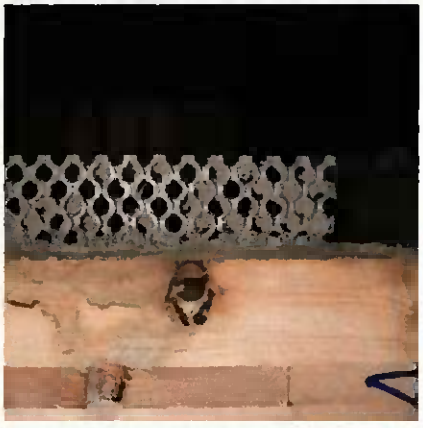


Abb.: 4.19 Schubverbinder parallel

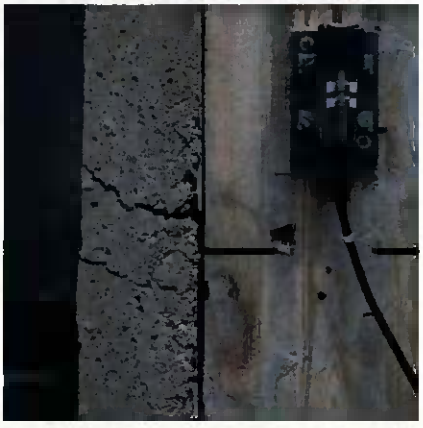


Abb.: 4.20 Schubverbinder quer zum MH

bereits bei 4 kN ein erster Lastabfall einsetzte, lag die Vermutung eines Versagens des Oberflächenverbunds Beton - WDVS-Ankerkopf nahe. Die anschließende Öffnung der Holzleichbetonschicht zeigte jedoch einen sehr guten Verbund, allerdings saß der Anker sehr schief, da beim KLH-Element die Belastung quer zur Faser erfolgt, was analog den Versuchen 1.3 und 2.3 Ursache für die niedrige Gesamtbelastungsfähigkeit war.
Die Versuche mit dem Schubverbinder erfolgten zunächst parallel zur Lastaufbringung. Dabei zeigten die Ergebnisse einen guten Verbund zwischen Schubverbinder und HLB(-Nocken), trotz der kleinteiligen Geometrie des Schubverbinders.[48] (Abb. 4.19) Die Werte lagen bei 16,5 (5.3) und 21,5 kN (5.1[49]).
Die Versuchsreihe VI (Schubverbinder quer zur Lastaufbringung) zeigte einen anderen Versuchsablauf. Der Abscher-Widerstand lag zwischen etwa 21 kN (6.3[50]) und 27 kN (6.1[51]). Insgesamt war eine relativ flach ansteigender Kurvenverlauf festzustellen. Bereits geringe Lastzunahme verursachte eine große Verschiebungen der beiden Schichten, mit der Folge, dass die max. zulässige Verschiebung schnell erreicht wurde. Allerdings blieb ein schlagartiges Versagen des Verbunds aus, da eine plastische Verbiegung des HBV-Schubverbinders bei kontinuierlicher Lastzunahme erfolgte. (Abb. 4.20)

Die durchgeführten Versuche zeigten viel versprechende Ergebnisse. (Abb. 4.21) Erwartungsgemäß wurden höhere Abscher-Widerstände bei den flächigen und linearen Konnektoren erreicht. Die positiven Werte des Verbundes mittels Kerve zeigten, dass (in eingeschränkten Maße) die Einschätzungen und Ergebnisse zu Arbeiten mit HBV-Deckenkonstruktionen übertragbar sind. Mit der Kerve steht auch für Wandelemente auf Basis der Holzleichtbeton-Massivholzverbundbauweise ein leistungsfähiges und kostengünstiges Verbindungsmittel zur Verfügung. Allerdings stellten die Ablösungsprozesse zwischen den Bauteilschichten durch das Schwindverhalten von Holzleichtbeton baukonstruktiv noch ein Problem dar.
Aus den vorliegenden Kennwerten der Kurzzeit-Scherversuche lassen sich jedoch noch keine direkten Aussagen zu konkreten Anwendungbereichen ablei-

48 Versuch 5.1 wurde zunächst mit einer Maximallast 10 kN gefahren, angesichts des positiven Verlaufs 5.2 und 5.3 mit Maximallast 20 kN; allerdings ist festzustellen, dass der Abscher-Widerstand damit niedriger aus fällt.
49 Durch einseitige Ablösung einer Holzleichtbeton-Schicht war ein 'Durchrutschen' des KLH-Elements nach Maximallast festzustellen.
50 Versagensfall beidseitig
51 'Knack'-Geräusch bei 8 bis 10 kN, Schubverbinder z.T. aus (Leim-)Fuge gezogen

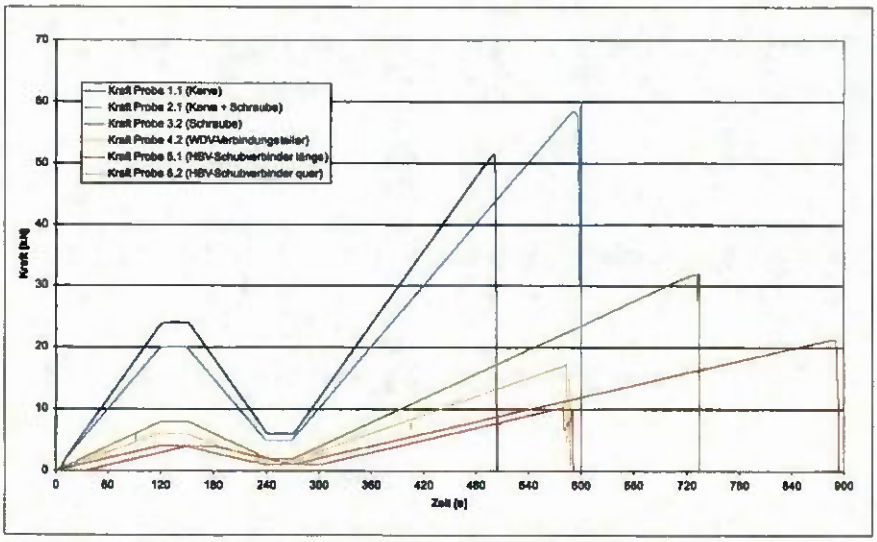


Abb.: 4.21 Versuchsablauf nach DIN EN 26891. Darstellung der maximal erreichten Last jeder Versuchsreihe vor dem Versagensfall

ten.[52] Daher wurden neben der rechnerischen Ermittlung des Eigengewichts (der jeweiligen Aufbauten) und der Abschätzung der vertikalen Beanspruchung[53] in einem weiteren Schritt die Lasten aus Winddruck und Windsog untersucht.

Bei der Abschätzung des Lastfalls „Eigengewicht" der Holzleichtbeton-Schale bei Wandelementen 300 x 120 x 10 cm besteht bei nur einem Verbindungsmittel (Kerve bzw. Schubverbinder) bereits pro Element eine um Faktor 8-10 höhere Belastbarkeit. Unberücksichtigt bleibt hierbei allerdings die Tatsache, dass in der Realität die Lasteinleitung in das Verbindungsmittel schräg erfolgt, da die Holzleichtbetondeckschicht in der Regel nur einseitig aufbetoniert wird. Bei den Versuchen ist durch die symmetrische Anordnung eine nahezu parallel zum Holzleichtbeton verlaufende Kraftrichtung gegeben. Der Einfluß dieser geometrischen Abweichung muss in weiteren Versuchen ermittelt und entsprechende Korrekturen bei o.g. Belastungsfaktoren durchgeführt werden.

4.3.8. Winddruck und Windsogversuche

Diese ergänzenden Versuche erfolgten ebenfalls anhand von Mustern mit den Abmessungen 30 x 30 cm. Exemplarisch wurden aus den vorgenannten sechs Versuchsreihen nachfolgende Aufbauten (jeweils drei Muster) ausgewählt[54]

- Versuch III "Schraube" (Probe 1.2 und 1.3)
- Versuch VI "Schubverbinder / quer zur Faser" (Probe 2.1a und 2.2 a)

Die vorgesehenen 4-Punkt-Versuche am 1:1-Modell zum Lastfall Winddruck

52 Besprechung mit Peter Mesteck, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, 21.03.2007
53 Unter Berücksichtigung erhöhter Sicherheitsbeiwerte (Holzbau 2) von 2,5 oder 3
54 Die Messung erfolgten bei der MPA Bau, der TU München, 11. und 13.06.2007

Abb.: 4.22 Windsog-Versuche

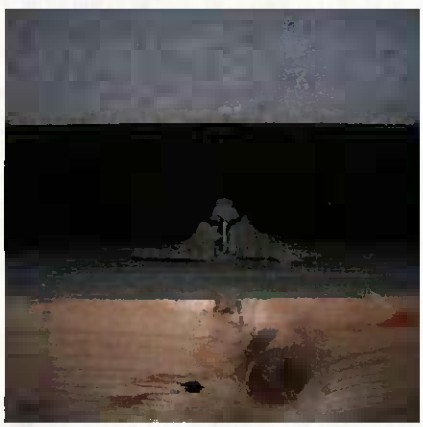


Abb.: 4.23 Versuchsreihe III „Schraube"

Abb.: 4.24 Schubverbinder und....

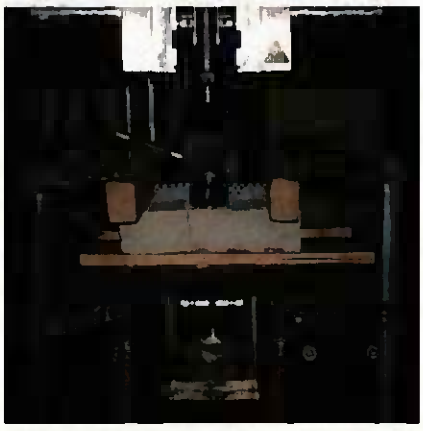


Abb.: 4.25 modifizierter Versuchsaufbau

konnten im Rahmen der Projektarbeiten nicht mehr durchgeführt werden.
Bei der Vorbereitung der Versuchsmuster waren eine Reihe von Besonderheiten zu beachten. Auf die Brettstapelmuster (60x60 cm) wurde eine Fläche von 30x30 cm (die Größe der Kurzzeitscherversuchsmuster) asymmetrisch aufbetoniert (Holzleichtbetonmischung wie oben). Während des Versuchsablaufs musste sichergestellt sein, dass das Prüfmuster fest eingespannt ist, damit die Kraft ausschließlich an der Holzleichtbetonschicht und damit an dem Verbindungsmittels angreift. Zur Aufnahme der Last wurde eine Stahlplatte (300x300x20 mm) auf die Holzleichtbetonoberfläche aufgeklebt[55].
Das Belastungsverfahren erfolgte wie bei den Kurzzeitscherversuchen in Anlehnung an DIN EN 26891. Nach den Erfahrungen aus den Scherversuchen wurde als F_{est} zunächst 10 kN angenommen. Insgesamt wurden 11 Versuche durchgeführt.

4.3.9. Ergebnisse

Bei den Versuchsreihen zeigten sich in Abhängigkeit des gewählten Verbindungsmittels zwei völlig unterschiedliche Abläufe. Während es bei der Lasteinleitung bei der Schraube erwartungsgemäß zur Ablösung der Holzleichtbetonschicht kam, wird beim HBV-Schubverbinder der Holzleichtbeton einschließlich Verbindungsmittel herausgezogen, d.h. die Verklebung im Massivholz stellte die 'Schwachstelle' dar.
Beim Versuchsablauf mit den Mustern „Verbindungsmittel Schraube" (Probe 1.2 bzw. 1.3) zeigten die Brettstapelelemente ein relativ elastisches Verhalten. Im Befestigungspunkt der Schraube traten durch die punktuelle Belastung große Verformungen im Brettstapelverbund auf, die durch eine geänderte Einspannung der Prüfkörper minimiert werden mussten. Da der Versagensfall dennoch wie erwartet durch die Ablösung der Holzleichtbetonschicht eintrat, dürfte der Wölbungseffekt beim Brettstapelelement letztlich keine Auswirkungen auf die ermittelten Lasten haben.
Betrachtet man sich die Versuchsmuster "Schraube" nach der Prüfung genauer, war festzustellen, dass um die Schraube in einem Bereich von etwa der Hälfte der Holzleichtbetonschicht (ø etwa 10 bis 15 cm) einen Kegel (etwa 30°

55 Zwei-Komponenten-Kleber MC-Dur 1280 4:1

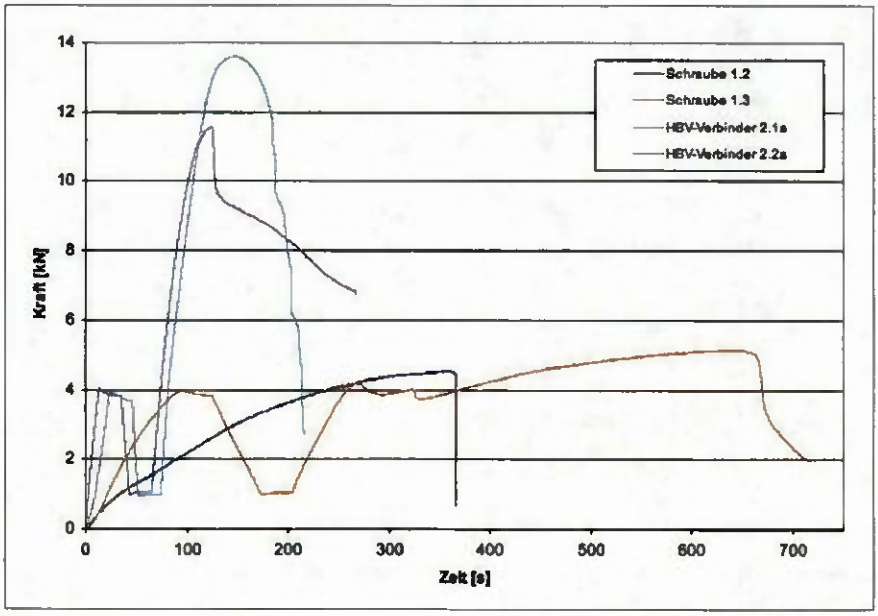


Abb.: 4.26 Ergebnisse Windsog-Versuche, Versuchsablauf nach DIN EN 26891

bis Unterkante Schraubenkopf) gebildet hat. (Abb. 4.23) Insgesamt zeigte sich, dass die Schraube als punktförmiger Konnektor mit Werten um 4 kN bei Windsog-Belastung nur eingeschränkt wirksam ist.
Demgegenüber bestätigte sich bei den HBV-Schubverbindern – auch bei geändertem Lastfall –, dass zwischen Schubverbinder und Holzleichtbeton, trotz der relativ kleinteiligen Geometrie des Schubverbinders ein guter Verbund bestand. Der Versagensfall trat hier erst bei etwa 10 bis 13 kN auf. Wie oben bereits erwähnt, lag dabei das Versagen jedoch im Klebeverbund Schubverbinder – Massivholz (Abb. 4.24) und nicht zwischen Schubverbinder und Holzleichtbetonschicht, was für diese Verbindung noch höhere Lastwerte erwarten läßt.

Deshalb wurden in Ergänzung zu den o.g. Versuchen abschließend noch Testläufe zum Auszugswiderstand der Holzleichtbetonschicht gegenüber dem Schubverbinder durchgeführt (Proben 2.1a bzw. 2.2a). Dazu wurde der Schubverbinder eingespannt und der Lastangriff über die aufgeklebte Stahlplatte auf den Holzleichtbeton gebracht. Da Probleme mit der Einspannung auftreten, wurde der Versuchsaufbau nochmal geändert und der Holzleichtbeton arretiert und die Last am Schubverbinder angesetzt.
Hierbei zeigten sich bei einer Lasteinleitung von ca. 11,5 bzw. 13,5 kN an den Schubverbindern Bruchstellen im Bereich der aufgebrachten Last, die letztlich auch durch auftretende Biegekräfte verursacht sein könnten. (Abb. 4.25) Letzlich ließ sich also auch bei dieser Versuchsanordnung der Versagensfall „Herauslösen des Schubverbinders aus der Holzleichtbetonschicht" nicht erreichen. Die ermittelten Lasten stellten somit lediglich Minimalwerte für diesen Versagensfall dar, die im Praxisfall höher ausfallen dürften. (Abb. 4.26)

Die Windsogversuche zeigten insgesamt erwartungsgemäß deutlich niedrige-

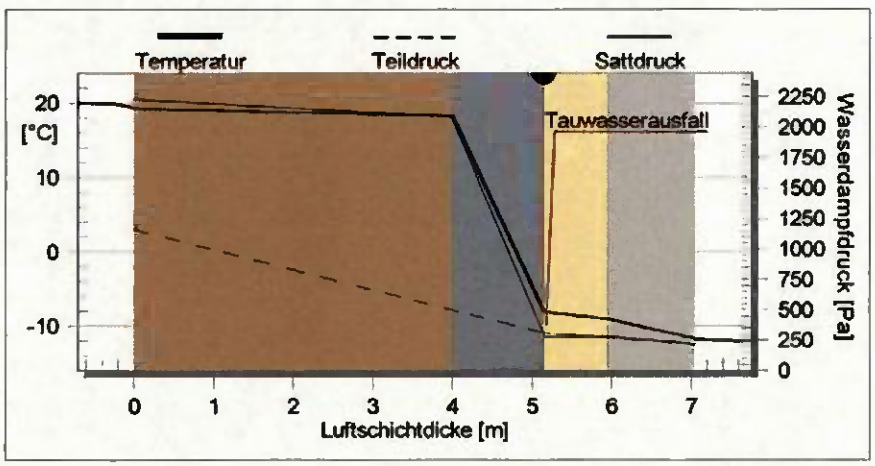


Abb.: 4.27 Feuchteschutznachweis zu Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundkonstruktion

	R-Wert [mK/W]	Winter t [°C]	Winter phi [%]	Sommer t [°C]	Sommer phi [%]		Dauer [h]
Innen	0,13	20,0	50	12,0	70	Tauperiode	1440
Aussen	0,04	-12,0	100	12,0	70	Verdunstungsp.	2160

	Baustoffe	Dicke [mm]	Lambda [W/mK]	R-Lambda [m²K/W]	tin [°C]	tAu [°C]	p [Pa]	pSatt [Pa]	Sd [m]
1	OSB-Platte	20,0	0,130	0,154	19,2	18,2	1169	2223	4,00
2	WD 055 Climate Chips	230,0	0,055	4,182	18,2	-8,1	500	2092	1,15
3	Fichte,Kiefer,Tanne	20,0	0,130	0,154	-8,1	-9,1	307	307	0,80
4	Holzleichtbeton 700	85,0	0,200	0,425	-9,1	-11,7	269	282	1,11

U-Wert	0,20 W/m²K	Tauwassermenge	0,12 kg/m²
		Verdunstungswassermenge	0,44 kg/m²

Abb.: 4.28 Kennwerte zu Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundkonstruktion

re Werte gegenüber den Kurzzeitabscherversuchen (beim HBV-Schubverbinder etwa um 50 %, bei der Schraube um etwa 75 %). Bei einem überschlägigen Vergleich mit der Abschätzung des Lastfalls Windsog einer Holzleichtbeton-Schale bei Wandelementen 300 x 120 x 10 cm nach DIN 1055 Teil 4 besteht bei nur einem Verbindungsmittel Schubverbinder pro Element indes immer noch eine um Faktor 4-5 höhere Belastbarkeit.

In Ergänzung zu diesen mechanischen Untersuchungen von Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundkonstruktionen erfolgte eine Abschätzung zum bauphysikalischen Verhalten dieser Außenwandaufbauten. Dabei zeigte sich bei der Betrachtung des Temperatur-/Dampfdruckverlauf, dass die Anforderungen nach DIN 4108-3 erfüllt werden: (Abb. 4.27, 4.28)

- Tauwassermenge $< 0{,}50$ kg/m²
- Tauwassermenge < Verdunstungswassermenge
- Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehalts der Holzschichten $< 5\%$ (hier 0,94%)

4.3.10. Außenwandmodell

Auf Basis der positiven Ergebnisse des Verbundverhaltens von Holzleichtbetondeckschichten mit Massivholz wird als Demonstrationsobjekt ein Außenwandmodell im Maßstab 1:1 angefertigt.
An dem Modell, in den Elementabmessungen von ca. 90x270 cm, das zur Abschlussveranstaltung des Verbundvorhabens auf der Bau 2009 präsentiert wer-

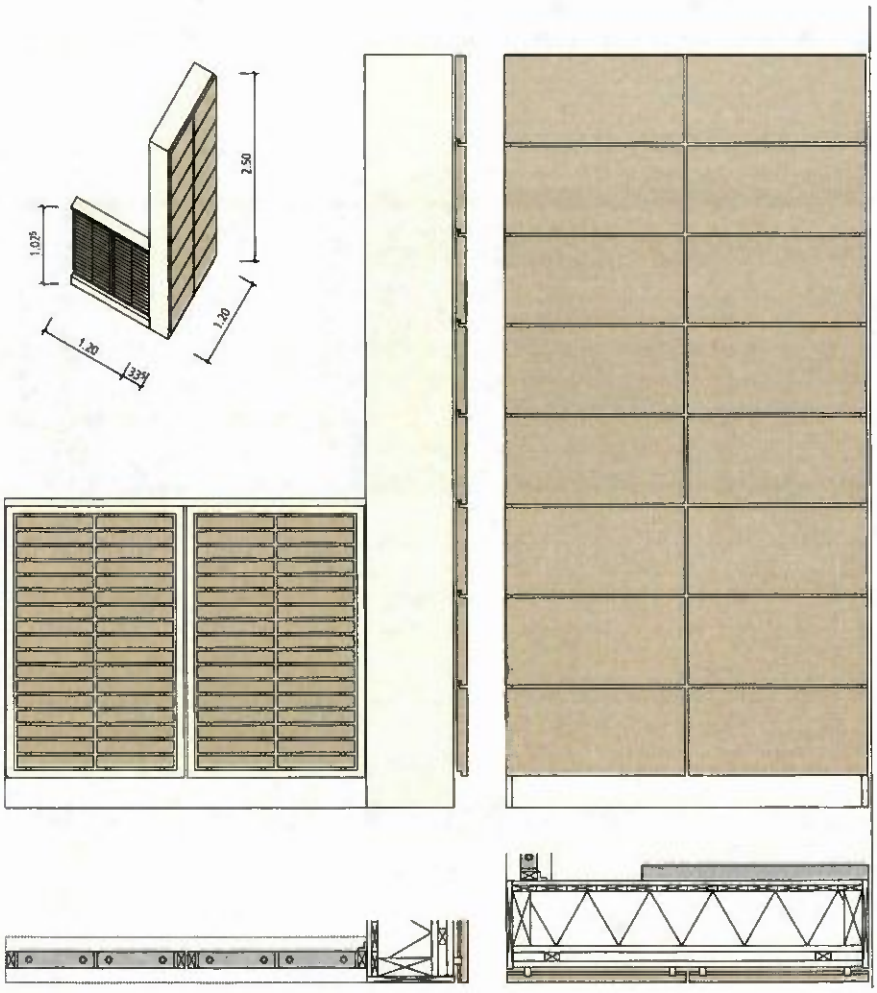


Abb.: 4.29 Außenwandmodell (M 1:25)

den soll, werden mehrere Einsatzmöglichkeiten von Holzbeton im Bereich der Gebäudefassade aufgezeigt. Das Außenwandmodell ist zweiteilig aufgebaut: (Abb. 4.29)

- Muster 1: geschosshohes Element, Brettstapel als Tragschicht, raumseitig Holzleichtbeton in Verbundbauweise (Verbindungsmittel: Kerve), Außenbekleidung mittelformatige Platten, hinterlüftet
- Muster 2: Brüstungselement, semitransparent (Holzleichtbeton-Steine im Massivholzrahmen); kann für permeable Außenwandaufbauten (Parkhäuser, Lagerhallen etc.), die eine permanente Durchlüftung bei gleichzeitigem Sonnenschutz gewährleisten müssen, eingesetzt werden, ebenso als Innenraumteiler mit schallabsorbierender Wirkung denkbar. (Abb. 4.30, 4.31)

Im Zusammenhang mit der Herstellung der Holzleichtbeton-Steine sollen ergänzend Versuche für eine Optimierung des Herstellungsverfahrens durchgeführt werden. Es ist vorgesehen, die linearen Blöcke aus den vorhandenen Plattenmustern herauszusägen. Der erwartete Vorteil besteht in der Verbindung von Bauteilkonfektionierung und Oberflächenbearbeitung.

4.4. Holzleichtbeton und Elementwände

In einem weiteren Arbeitsschritt wird für den Bereich der Außenwand der Einsatz von Holzleichtbeton in Elementwänden untersucht. Im Bereich des Stahlbeton-Fertigteilbaus stellen Elementwände[56] ein innovatives und erfolgreiches Segment zum Bauen mit 'Teilsystemen' dar. Insbesondere bei Kellerwänden ist dieses System im Wohnungsbau weit verbreitet. Darüber hinaus findet es im Bereich der Außenwände oder bei Massivdach-Konstruktionen[57] Anwendung.

Elementwände bestehen aus dünnen geschosshohen Stahlbetonschalen, die durch Gitterträger unverschiebbar miteinander verbunden sind. Zusätzliche Bewehrungen (z.B. zur Bildung von biegesteifen Eckverbindungen) dienen zur statisch notwendigen Stabilisierung. (Abb. 4.32) Die beiden Schalen sind in der Regel mindestens 5 cm dick (seltener auch 4 cm[58]); das Maß wird bestimmt durch die erforderliche äußere Betondeckung entsprechend der jeweiligen Expositionsklasse.
Verbesserter Wärmeschutz läßt sich durch zusätzliche Funktionsschichten aus

56 Neben der Elementwand (verwendet in bauaufsichtlichen Zulassungen und in der WU-Richtlinie) finden sich eine Reihe zusätzlicher Bezeichnungen im Umlauf, die teils regional unterschiedlich gehandhabt werden: Doppel- oder Dreifachwand, auch Hohl- oder Mantelbetonwand. (Vgl. Alfes, 2006, S. 19) Im nachfolgenden wird von Elementwänden gesprochen.
57 Vgl. Außergewöhnliches Massivdach aus Doppelwandelementen (17.04.2007) http://www.beton.org <19.02.2008>
58 Vgl. Alfes, 2006, S. 19

Abb.: 4.30 Semitransparente Fassade

Abb.: 4.31 aus Holzleichtbeton-Steinen

Dämmstoffen (zwischen 40 und 160mm, meist zur Außenschale hin angeordnet) erreichen. Notwendige Aussparungen (Installationsschächte, Elektrodosen etc.) sowie Fenster- und Türöffnungen werden werkseitig mit eingebaut.
Standarddicken sind 20cm, 24cm, 30cm, 36,5cm, 40cm. Neben Standardbreiten[59] können auch Sonderformate geliefert werden, um entsprechende Wandlängen (ca. 12m) herstellen zu können. Die Höhe der Elementwände, üblicherweise an der Geschosshöhe orientiert, beträgt in der Regel ca. 3 m.
Elementwände lassen sich mit einem Gewicht von etwa 280 kg/m² von konventionellen Hebezeugen (Bau- oder Autokränen) auf der Baustelle montieren.
Nach der Montage wird der Zwischenraum mit Normal-Beton vergossen. Es können auch Selbstverdichtender Beton (SVB) und leichtverdichtbare Betone (LVB) verwendet werden, die jedoch den Schalungsdruck auf die beiden Schalen erhöhen. Der notwendige Verbund zwischen Kernbeton und Fertigteilschalen wird durch die Rauhigkeit der Innenflächen hergestellt.
Hinsichtlich der geometrischen Ausbildung der Wandfläche sind individuelle Anpassungen und Ausführungen möglich.[60]
Vorteile der Elementwände sind:
- Nahezu überall einsetzbar,
- hohe Maßgenauigkeit,
- geringes Montagegewicht
- geschosshohe Elemente
- glatte, poren- und rissarme Oberfläche
- hohe Oberflächenqualität auf den Innenseiten
- keine Schalungsarbeiten erforderlich
- massiver Aufbau ermöglicht guten Wärme-, Schall- und Brandschutz.

Insgesamt wird dadurch „erhebliche Kosten- und Zeitersparnis" von den Anbietern reklamiert. Allerdings gelten insbesondere die raumseitig angeordneten Sichtbetonflächen häufig physiologisch als problematisch,[61] weshalb Elementwände vornehmlich in Kellergeschossen eingesetzt werden. (Abb. 4.33)
Elementwände mit einer (raumseitig angeordneten) Schale aus Leichtbeton sind bisher am Markt nicht verfügbar. Es wurden vereinzelt Versuche durchgeführt, die jedoch bisher nicht über den Stand von Testreihen (Maßstab 1:1) hinausgingen. Als Hemmnisse gelten eine schwierige Einbettung in den Produktionsablauf, ebenso hohe Anforderungen an die jeweiligen Mischungs-'Behältnisse',

59 in der Regel (h x l = Geschosshöhe x Wandabschnittslänge) ≤ 3 m x 7 m; die Maximal-Länge ist produktionsbedingt auf etwa 12 m begrenzt; ferner sollten Wandabschnitte auf ein l/h-Verhältnis von 2 bis 4 begrenzt werden.
60 "Gestaltungswünschen [sind] keine Grenzen gesetzt" http://www.romey.de <19.02.2008>
61 Vgl. Krippner, 4/2004, S. 124f.

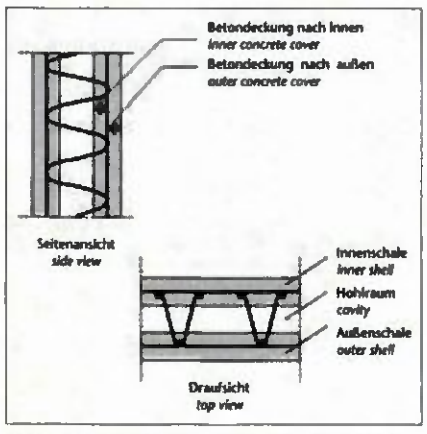


Abb.: 4.32 Seitenansicht und Draufsicht

Abb.: 4.33 Elementwand Kellergeschoss

um Verunreinigungen zwischen Normalbeton und Leichtbeton zu vermeiden.[62] Welchen Einfluss z. B. die Zusammensetzung des Ortbetonkerns hinsichtlich der entstehenden Hydratationswärme (Verursachung von Zwängungen) gerade bei solchen Mischkonstruktionen spielt, ist ebenfalls noch nicht untersucht worden.
Darüber hinaus können gewiss auch betriebswirtschaftliche Gründe angeführt werden. Viele Betonfertigteil-Firmen verfügen über eine gute wirtschaftliche Grundauslastung und sehen, auch durch teils relativ 'eingefahrene' Produktions-Abläufe, z. Zt. keine Notwendigkeit für eine Erweiterung der Produktpalette. Auch lässt sich in diesem Zusammenhang, unabhängig von der Betriebsgröße, auf eine nicht sonderlich ausgeprägte Experimentierfreude und -neugier schließen.[63]

Im Rahmen der Projektarbeiten zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden erfolgten vorbereitende Untersuchungen, um erste Einschätzungen zur Kombination von Normalbeton- und Holzleichtbetonschalen in Elementwänden zu gewinnen.
Erwartete Vorteile:
- Leichtere Wandkonstruktionen
- Bessere Wärme- und Schalldämmung
- Hochwertige Oberflächen und höhere Nutzerakzeptanz (z. B. gegenüber den als problematisch empfundenen Sichtbetonflächen in Innenräumen).

(Zu lösende) Fragen:
- Flächenstabilität der Holzleichtbetonschicht
  - bei der Montage
  - beim Transport
  - beim Verfüllen des Zwischenraumes mit Normalbeton
- Auszugsfestigkeit der Gitterträger, besonders bei der Herstellung im Werk (Handling beim Wenden bei der Palettenfertigung etc.)

4.4.1. Vorbereitung von Versuchsarbeiten

Ein wesentliches Merkmal der Elementwände ist, dass die Gitterträger mit den Betonstahlmatten in den jeweiligen Wandschalen ein Bewehrungselement bilden, das insbesondere den Schalungsdruck beim Ausbetonieren des Zwischenraumes sicher aufnehmen muss. Der Betonierdruck ist im untersten Bereich der Wand am größten und nimmt nach oben hin ab. Gegenmaßnahmen können verringerte Gitterträgerabstände oder der Einbau zusätzlicher Bauteile sein.
Neben dem Abstand der Gitterträger sind auch Betoniergeschwindigkeit und Verdichtungsmaßnahmen (um ein Entmischen des Betons zu verhindern) wichtige Parameter. Ferner von Einfluss ist die Konsistenzklasse: je weicher die Konsistenz, desto höher der Schalungsdruck.[64]
In der Regel werden Elementwände, die vertikale (Primärkonstruktion und Verkehrslasten) und horizontale Lasten (Wind oder Erddruck, Aussteifung) aufnehmen müssen, als einheitlicher Querschnitt bemessen. Bei 'asymmetrischen' Aufbauten ist dies sowohl bei Herstellung, Transport als auch Montage zu berücksichtigen.

4.4.2. Auszugsversuche[65]

Als wesentliche Orientierungsgröße für erste Einschätzungen wird die Auszugsfestigkeit der Gitterträger ausgewählt. Diese Untersuchung erfolgt anhand

62 Gespräch mit Herrn Dr.-Ing. L. Halser, Qualitätsgemeinschaft Doppelwand Bayern und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Loders, BetonBauteile Bayern, München 18.09.2006
63 In den 60er Jahren wurde v.a. im Kontext von Bausystemen die mangelnde Kooperationsbereitschaft von Unternehmen von zahlreichen planenden Akteure beklagt.
64 Vgl. Alfes, 2006, S. 25
65 Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA Bau) der TU München, 16.02.2007

von Musterplatten (60x60x6 cm), hergestellt aus drei verschiedenen Holzleichtbetonmischungen:

- Muster 1: Rohdichte 1055 kg/m³
- Muster 2: Rohdichte 814 kg/m³
- Muster 3: Rohdichte 696 kg/m³ (gestampft)

Der Gitterträger (l = 50cm) wurde in Plattenmitte positioniert und mit dem breiteren Gurt in Mittellage einbetoniert. Auf etwaige zusätzliche Bewehrung in Plattenebene ist verzichtet worden.
Die Holzleichtbetonmuster wurden in einem Bereich von etwa 10 cm zum Gitterträger mit Kanthölzer fixiert, um den Einfluß von Biegekräften auf die Platte zu minimieren. Allerdings bereitet die Anbringung des Lastangriffs am schmäleren Gurt Probleme: einerseits ist der Gitterträger nicht exakt lotrecht einbetoniert, andererseits variiert die Lage der Bügel leicht, was zusätzlich zu Abweichungen in den Messergebnissen führen kann.
Die Auszugsversuche erfolgten anhand eines Standardkraft/Standardweg-Programm. Für den Versagensfall wird festgelegt, dass der maximale Widerstand erreicht ist, wenn die Prüfmaschine 50 % Kraftabfall registriert. (Abb. 4.38)

4.4.3. Ergebnisse

Wie zu erwarten erreichte die schwere Holzleichtbetonmischung (Druckfestigkeit: 12,07 N/mm², Biegezugfestigkeit: 2,3 N/mm²) mit dem höchsten Bindemittelanteil mit 17 kN den vielversprechendsten Wert. (Abb. 4.38) Die Messung zeigt einen linearen Verlauf, bis 6 kN steiler, danach bis zum abrupten Bruch etwas flacher, aber kontinuierlich verlaufend. Beim Bruchbild war eine

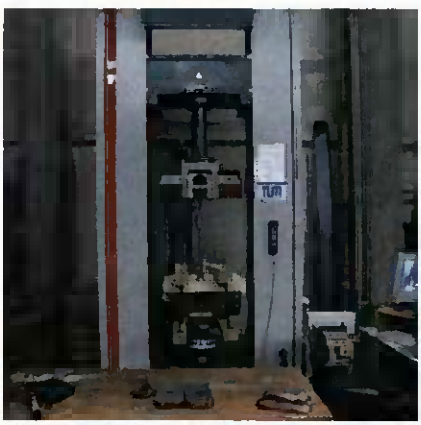


Abb.: 4.34 Aufbau der Auszugsversuche

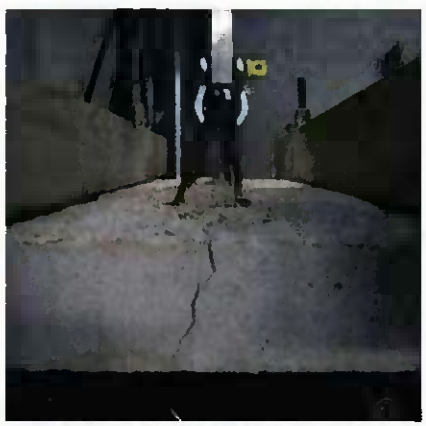


Abb.: 4.35 Bruchbild Muster 1

Abb.: 4.36 Bruchbild Muster 2

Abb.: 4.37 Bruchbild Muster 3

durchgehende Rissbildung erkenbar, die einseitig entlang des Gitterträgers und durch die gesamte Platte verläuft.
Mit dem Muster 2 (deutlich niedrigere Rohdichte (-23%), bei höherer Biegezugfestigkeit: 3,28 N/mm²) ist in der Anfangsphase der o. g. Verlauf nahezu identisch. Allerdings trat bereits bei 7 kN ein erstes Versagen ein, die Auszugsfestigkeit sackte leicht ab. Nach wenigen Zehntel Millimetern führt ein zweites Versagen zum einem deutlichen Lastabfall. Bei etwa 4,5 kN kam es zu einer Art 'Stillstand' – wohl durch die elastomechanischen Eigenschaften des Holzleichtbetons; nach 6 mm Standardweg wurde der Versuch abgebrochen. Bruchbild und Rissbildung waren ähnlich dem von Versuch 1. (Abb. 4.35)
Das Muster 3 wies neben der niedrigen Rohdichte (-35% gegenüber Muster 1; Biegezugfestigkeit: 3,14 N/mm² im Bereich von Muster 2) durch den Herstellungsprozess (stampfen) einen anderen Gefügeaufbau auf. Beim Versuchsverlauf führte der Lastangriff bereits bei knapp 4 kN zu ersten Rissbildungen. Dennoch erhöhte sich der Auszugswiderstand im weiteren Verlauf leicht auf 6 kN, bevor es letztlich auf einer Plattenseite bis zur vollständigen Herauslösung des Gitterträgers aus dem Plattenverbund kommt. (Abb. 4.38)

Das Holzleichtbeton-Muster 1 erreichte bei einer Rohdichte von 1055 kg/m³ mit einem Auszugswiderstand von etwa 17 kN einen guten Wert, der Optionen für weitergehende Versuche eröffnet. Für eine "Betondeckung nach innen von mindestens 17 mm beträgt die zulässige Ausreißfestigkeit in den Zulassungen 18,4 kN/m." [66]Übertragen auf das Muster 1 wären dies bei einer Überdeckung von etwa 20-25 mm etwa 34 kN/m, ein Wert, bei dem noch entsprechende Sicherheitsfaktoren von 2 bzw. 3 einzurechnen sind. Darüber hinaus ist zu beachten, dass beim Versuchsaufbau die Feldbreite der Gitterträger zu knapp bemessen wurde (in der Regel zwischen 30 und 67 cm), was sich auf das Ergebnis positiv auswirkt. Aus dem Messwert von Muster 2 resultiert eindeutig die Erfordernis einer zusätzliche Bewehrung. Die Ergebnisse der Vorversuche ermöglichen nun die Herstellung von Elementwänden im Maßstab 1:1 um die Handhabung bei der Fertigung in der Werkhalle überprüfen. Darüber hinaus sind weitere umfangreiche Auszugsversuche erforderlich, insbesondere um Aussagen hinsichtlich der Beanspruchung der Holzleichtbetonschale auf Biegebruch beim Verfüllen treffen zu können.[67]

66 Vgl. Alfes, 2004, S. 3
67 Tel. Rücksprache mit Dr.-Ing. Christoph Alfes, CEMEX Deutschland AG, 20.05.2008

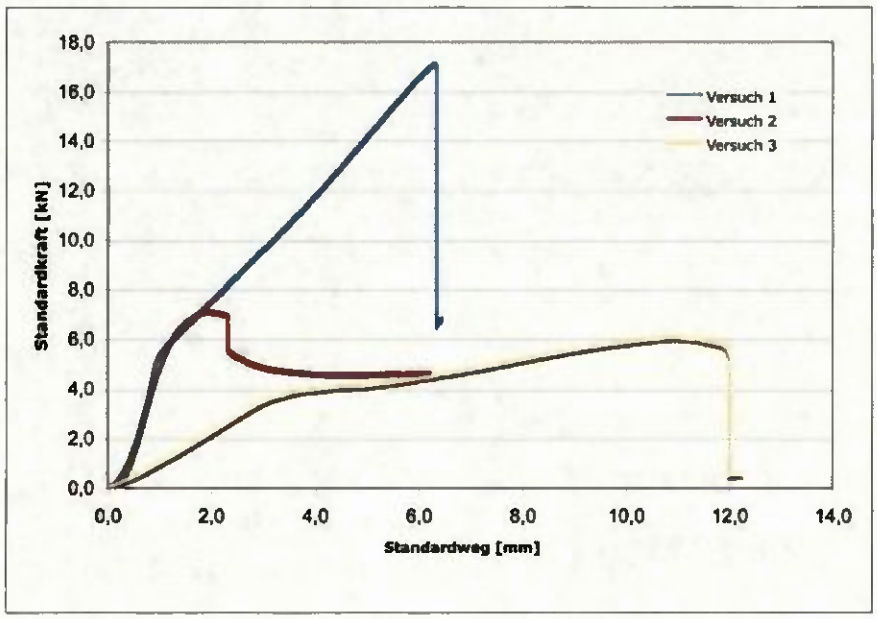


Abb.: 4.38 Auszugsfestigkeitswerte von Gittertägern in Holzleichtbetonschalen

Von jeder Mischung standen nur jeweils eine Musterplatte für die Testreihe zur Verfügung, somit können die o. g. Werte nur den Charakter einer ersten Annäherung darstellen. Da es sich um zusätzlich unternommene Versuche handelte, die über geplanten Arbeitsinhalte im Verlauf des Projektes hinausgehende, und für einen 1:1-Test kein Firmenpartner akquiriert werden konnte, wurde auf weitergehende Prüfungen und Versuche zur Eignung von Holzleichtbeton als Material für Elementwände verzichtet.

4.5. Weitere Einsatzmöglichkeiten im Fassadenbereich

Im Rahmen eines Seminars mit dem Titel „Materialexperimente mit Holzleichtbeton"[68] wurden weitere Anwendungsbereiche von Holzleichtbeton im Hochbau sowohl für den Fassadenbereich als auch den Innenraum[69] untersucht. Dabei soll neben Herstellungs- und Verarbeitungsvorgängen, v. a. die Gestaltung von Oberflächen im Vordergrund stehen. In Zusammenarbeit mit dem cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München wird die Materialmischung spezifiziert und anhand von Prototypen am jeweiligen Einsatzbereich getestet. Bauteilmuster und eine visuelle Simulation, die die Anwendung im baulichen Kontext darstellt, veranschaulichen das Konzept.

In Anknüpfung an die ArGeTon-Fassadenplatte sollte untersucht werden, inwieweit derartige Bauprodukte für vorgehängte, hinterlüftete Fassadenkonstrukti-

68 Wintersemester 2006/07, betreut von Dr.-Ing. Roland Krippner, Dipl.-Ing. Dagmar Niebler, Dipl.-Ing. (FH) Konstanze Elbel; TU München, Lehrstuhl für Baukonstruktion und Baustoffkunde, Prof. Florian Musso

69 Akustikplatten aus Holzleichtbeton (Christina Aigner, Martin Förtsch) und Treppenstufen aus Holzleichtbeton (Anna Rank, Franziska Wieselsberger)

Abb.: 4.39 Fassadenplatten und

Abb.: 4.40 ... Fugendetail

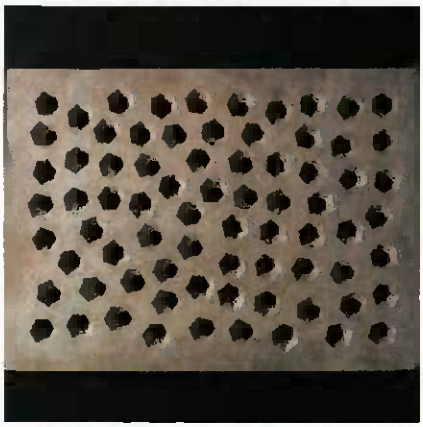


Abb.: 4.41 Sonnenschutzelement und

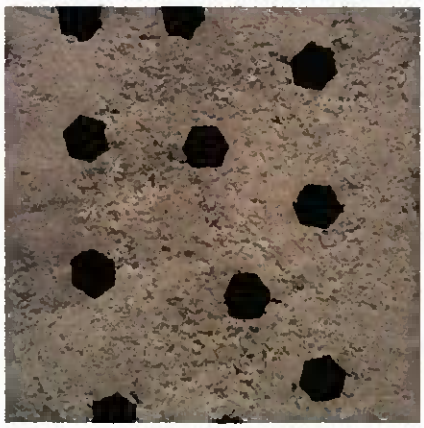


Abb.: 4.42 ... Rückseite Detail

onen auch aus Holzleichtbeton hergestellt werden können.[70] Die Machbarkeit wird an zwei gewellten und einer flachen, farbigen Fassadenplatte untersucht. Als Unterkonstruktion dient das Schienensystem der Fa. ArGeTon. Plattengröße und -stärke sind auf dieses System abgestimmt. Verändert wird nur die Fugenausbildung: die vertikalen Fugen werden nicht, wie bei den ArGeTon-Platten, über eine Metallschiene geschlossen, sondern die der Falz wird zur Befestigung auch seitlich weitergeführt, so dass sich die einzelnen Platten überlappen und das Regenwasser nach unten abgeleitet werden kann.
Beim Entschalen treten keine Schwierigkeiten auf, die schmalen Fugen werden exakt ausgebildet. Die Trockenrohdichte dieser Mischung beträgt ca. 760 kg/m³, das Plattengewicht beträgt somit, je nach Form, etwa 3,4-5 kg (im Vergleich zu Normalbeton, je nach Form 9-18,9 kg, etwa um den Faktor 3-4 leichter). Indes zeigt sich, dass die seitliche Falzausbildung (neben Einschränkungen bei Montage und Remontage) hohe Anforderungen an die Kantenstabiliträt stellt. So können vereinzelte Inhomogenitäten in der Mischung (zu hoher Holzanteil) zu Abplatzungen führen. Eine Verbesserung könnte ein zweischichtiger Aufbau der Platte sein, also Holzleichtbetonmischungen mit unterschiedlichem Holzanteil. Aufgrund der einfachen Form der Grundplatte kann die Oberflächengestaltung vielfältig variiert werden. Neben plastischer Formgebung und farblicher Zusätze sind auch andere Gestaltungen denkbar, etwa Strukturenbildung in der Platte durch nachträgliches Fräsen, Schleifen etc.. (Abb. 4.39, 4.40)

Eine andere Arbeit beschäftigte sich mit additiven Elementen (für Sonnenschutz) in der Gebäudehülle.[71] Vorteile bei einer Sonnenschutzplatte aus Holzleichtbeton sind das geringe Gewicht, im Vergleich zu Normalbeton (Holzleichtbeton ca. 850kg/m³) und vielfältige Formgebungsmöglichkeiten. Im Unterschied zu Holzpaneelen sind bei der Herstellung von Holzleichtbetonelementen monolithische Platten mit großen Bautiefen möglich. Bei Besonnung verschattet sich das Paneel durch seine Bautiefe von 35 mm selbst und gewährleistet so optimalen Blend- und Sonnenschutz trotz perforierter Oberfläche. Gestalterisch bestehen Grenzen beim Öffnungsgrad, der trotz textiler Bewehrung nicht über 40% liegen sollte.
Die Schalung aus 16 mm MDF Platten ist mit XPS Platzhaltern für die späteren Öffnungen beklebt. Zur besseren Verarbeitung wird der Frischbetonmischung Zitronensäure als Verzögerer beigegeben. Die Verdichtung des in die Schalungen gefüllten frischen Holzleichtbetons erfolgt auf einer Rüttelplatte.
Im Versuch wurden drei gleich große Platten (595 x 840 x 35mm) mit verschiedenen Öffnungsanteilen und Öffnungsarten hergestellt:

- Platte 1: Öffnungsanteil ca. 20%, ca. 12 kg, Oberfläche: geschliffen
- Platte 2: Öffnungsanteil ca. 40%, ca. 9 kg, textile Bewehrung zu Verstärkung, Oberfläche: geölt
- Platte 3: Öffnungsanteil ca. 35%, ca. 9,5 kg, abgeschrägte Waben, Oberflächenbehandlung: unbehandelt

Sonnenschutzpaneele aus geschaltem Holzleichtbeton beanspruchen einen hohe Aufwand bei der Herstellung, was das Potential zum Serienprodukt einschränkt, und weisen gegenüber konventionelle Sonnenschutzsystemen (z. B. aus Leichtmetall) ein höheres Bauteilgewicht auf, was u. a. den Einsatz von massiven Beschlägen notwendig macht.
Dennoch erweitern derartige Systeme aus Holzleichtbeton als Paneel mit ornamentalen Strukturen bei guter Funktionalität die Gestaltungspoteniale bei additiven Elementen in der Fassade. (Abb. 4.41, 4.42)

70 Fassadenplatten aus Holzleichtbeton (Bettina Bauer, Barbara Geißel)
71 Sonnenschutzplatten aus Holzleichtbeton (Tobias Dorfmeister, Urs Fridrich)

5. Holzleichtbeton im Innenraum

Aufgrund seiner ausgeprägten Eigenfarbigkeit und der plastisch-räumlichen Oberflächengestaltung eröffnet der Holzleichtbeton vielfältige Optionen zum Einsatz als sichtbar eingebauter Plattenwerkstoff für den Innenraum. In Verbindung mit den bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften, insbesondere hinsichtlich Schallabsorption und Gewicht, erscheint der Baustoff als akustisch wirksames Bauteil sowohl für Montagedecken wie auch als Wandbekleidung geeignet.
Im Rahmen der Projektarbeit sind zunächst die baukonstruktiven und gestalterischen Randbedingungen in experimentellen Versuchen untersucht worden. Ergänzend erfolgte die Planung und Ausführung von Demonstrationsvorhaben, um die Leistungsfähigkeit des Materials unter praxisnahen Bedingungen in unterschiedlichen Raumsituationen zu testen. Zielsetzung ist es, erste Einschätzungen zu Holzleichtbeton als Plattenwerkstoff für ausgewählte Anwendungsbereiche im Innenraum vornehmen zu können.

5.1. Holzleichtbeton als Bauteil für Decklagen

Montagedecken sind nichtragende Bauteile, die industriell vorgefertigt und auf der Baustelle montiert werden. Der Begriff beinhaltet leichte Deckenbekleidungen und Unterdecken, die jeweils aus Unterkonstruktion und raumabschließender Bekleidung bestehen und an tragenden Bauteilen (Decke) befestigt sind. Im Unterschied zur Unterdecke wird die Deckenbekleidung mittels einer Unterkonstruktion aus Holz oder Metall direkt an der Rohdecke befestigt. Neben technischen und bauphysikalischen Anforderungen übernehmen Montagedecken auch gestalterische Funktionen. In den Deckenhohlräumen können Installationen geführt und Dämmstoffe für unterschiedliche bauphysikalische Anforderungen eingelegt werden. Gleichzeitig bestehen über Form- und Oberflächenausbildung der Decklagen eine Vielzahl von gestalterischen Möglichkeiten, die die Raumwirkung maßgeblich bestimmen (Abb. 5.1, 5.2).
Da Montagedecken eine größere Anzahl von Anwendungsmöglichkeiten bieten, wurde der Holzleichtbeton zunächst als Bauteil für die Decklage von Unterdecken untersucht.

5.1.1. Zu Unterdecken

Als Unterdecke wird ein Bauteil definiert, das durch Abhänger oder eine unmittelbar am tragenden Bauteil (Boden, Dach, Balken, Wänden) befestigte Unterkonstruktion bzw. Randauflager mit einem Abstand zu dem darüber liegenden

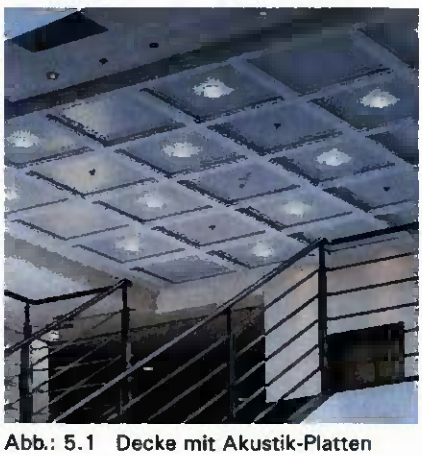


Abb.: 5.1 Decke mit Akustik-Platten

Abb.: 5.2 Deckensegel aus Gipskarton

Boden oder Dach verbunden ist. Unterdecken bestehen i. d. R. aus tragendem Bauteil, oberer Halterung, Abhänger, Grundprofil, Decklagenelement und Randauflager.

Man unterscheidet offene Deckenunterseiten und fugenlose, gerasterte Deckensysteme bei geschlossenen Deckenunterseiten. Für die Decklage werden häufig Mineralfaser- und Gipsbauplatten, Holzwerkstoffe und Metallpaneele verwendet. Die Oberflächen lassen sich abhängig vom Material glatt, strukturiert, gelocht oder geschlitzt ausführen. Die Decklagenbauteile werden entweder mit der Unterkonstruktion verschraubt, verklemmt oder in die Halteprofile eingelegt. Die Unterkonstruktion kann sichtbar, halb verdeckt und verdeckt ausgeführt werden. Bei Systemen mit gerasterter Deckenfläche werden die Decklagenbauteile einbaufertig hergestellt. Die Wahl eines geeigneten Deckensystems hängt von technischen, bauphysikalischen und gestalterischen Anforderungen ab. Man unterscheidet Z-Systeme, T-Systeme, Bandrasterdecken, Wabendecken und Lamellendecken.[1] Der Vorteil der Lamellen- und Wabendecke besteht in einer Vergrößerung der schallabsorbierende Fläche durch beidseitige Nutzung der Oberflächen. Höhe und Abstand der Platten lassen sich variieren bei frei zugänglichen Installationen.

Aufgrund seines geringeren Flächengewichtes gegenüber z. B. Sichtbeton und dem natürlichen Zuschlagsstoff Holz könnte der Holzleichtbeton in dem Zusammenhang neben seinen funktionalen Potentialen auch eine gestalterische Alternative zu herkömmlichen Decklagenmaterialien darstellen (Abb. 5.3).
Die Anforderungen an Materialien für die Decklage von Unterdecken sind in der EN 13964 festgelegt. Im Unterschied zur DIN 18168 regelt die europäische Norm Deckensysteme in Ihrer Gesamtheit, d. h. von der Abhängung über die Unterkonstruktion bis hin zur Decklage. Für Decklagen aus Holzleichtbeton sind konstruktive Parameter wie z. B. Grenzabmaße bei der Herstellung, Durchbiegungsklassen von Decklagen und Unterkonstruktionen sowie bauphysikalische Eigenschaften wie Brandschutz, Schallschutz, Dauerhaftigkeit von Bedeutung.

1 Vgl. Becker et al., 2004, S. 281f.

Abb.: 5.3 Raumsimulation mit Holzleichtbetonlamellen

5.1.2. Auswahl eines Deckensystems

Da eine serielle Vorfertigung und sichtbare Oberflächen angestrebt wurden, lag der Schwerpunkt der Untersuchung auf der Entwicklung von montagefertigen Decklagen aus Holzleichtbeton, die in eine von der Rohdecke abgehängte Konstruktion eingelegt bzw. als offenes Deckensysten (Lamellen) direkt von der Rohdecke abgehängt werden.
Die in der EN 13964 genannten Modulmaße lassen Plattenabmessungen mit einem Vielfachen von 25 mm zu, wobei es sinnvoll ist die modularen Vorgaben marktüblicher Unterkonstruktionen zu berücksichtigen. Standardformate sind sogenannte Kassetten mit einem Rastermaß von 30x30 cm (31,25x31,25 cm), 60x60 cm (62,5x62,5 cm), Platten mit 30x60 cm (31,25x62,5 cm), 60x120 cm (62,5x125 cm), und Paneele mit 30x120 cm bis 30x250 cm sowie 40x120 cm bis 40x250 cm. Standarddicken liegen bei 15-20 mm bzw. 25 mm für verdeckte Systeme.

Aufgrund einer einfachen und schnellen Montage wurde im ersten Versuch ein T-System mit einer sichtbaren Konstruktion und dem Rastermaß 60x60 cm ausgewählt. Dieses System ermöglicht die Verwendung von Holzleichtbetondecklagen mit unbehandelten, scharfkantigen oder rechtwinklig gefalzten Kantenformen (Abb. 5.4). Die Konstruktion bleibt sichtbar oder tritt in Form einer Schattenfuge zurück. Das Gewicht der Decklagen darf die zulässige Tragfähigkeit handelsüblicher Unterkonstruktionen nicht überschreiten. Als Orientierung für die Bauteilentwicklung wird an dieser Stelle auf die DIN 18168 zurückgegriffen, die drei Tragfähigkeitsklassen von Abhängern unterscheidet:
Klasse 1: zul. F = 0,15 KN
Klasse 2: zul. F = 0,25 KN
Klasse 3: zul. F = 0,40 KN
Das Eigengewicht von Holzleichtbetondecklagen liegt bei ca. 14 kg/m² (d = 2 cm). Dazu kommt die Unterkonstruktion aus Aluminiumgrund- und tragprofilen von ca. 2 kg/m². Somit können Abhänger der Tragfähigkeitsklasse 2 für Holzleichtbetonplatten verwendet werden. Die durchschnittlichen Eigenlasten von Decklagen aus Gipskarton (12,5-25 mm) liegen bei 13-28 kg/m², aus Mineralfaser bei 6-10 kg/m².

5.1.3. Betonage von Deckenplatten

Um erste Einschätzungen hinsichtlich der Stabilität, Kantensteifigkeit und der gestalterischen Möglichkeiten (Formbarkeit, Farbe und Qualität größerer Oberflächen) von Holzleichtbeton für die Decklage treffen zu können, erfolgte die Betonage verschiedener Platten im Maßstab 1:1 und die Herstellung von Musterdecken. Ergänzend dazu wurden Studien zu Materialkombinationen und Simulationen durchgeführt, um den Einfluss auf die räumliche Gestaltung zu untersuchen.
In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt 16 wurden quadratische dickwandige

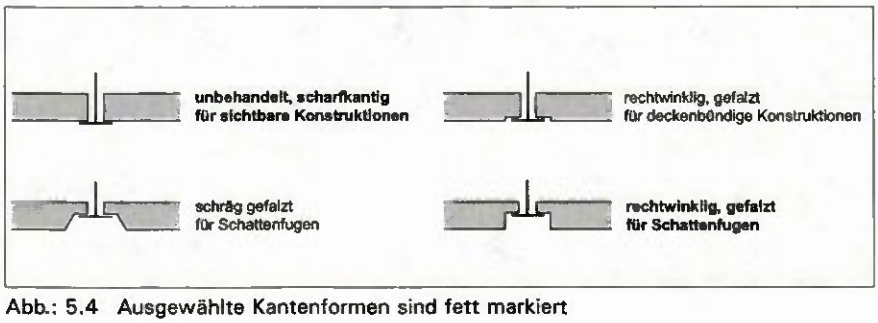


Abb.: 5.4 Ausgewählte Kantenformen sind fett markiert

Decklagenbauteile (595x595 mm) mit unterschiedlichen Stärken (15-30 mm) und Oberflächen hergestellt. Ausgangsrezepturen waren die Standardmischungen mit Trockenrohdichten zwischen 600-790 kg/m³. Der Holzmasseanteil lag im Bereich von ca. 20%-40% bei Druckfestigkeiten von 1-3,7 N/mm² und Biegezugfestigkeiten von 0,4-1,6 N/mm².
Die Mischungen wurden in die Schalung gegossen bzw. gefüllt und durch rütteln bzw. stampfen verdichtet. Es erfolgte eine Lagerung der Versuchskörper bei Normtemperatur von 28 Tagen. Aufgrund des Schnellzementes hätte man nach 2 Stunden ausschalen können. Um das Risiko von Beschädigungen zu vermeiden, wurde jedoch erst nach 1-2 Tagen ausgeformt.
Die Platten der Mischung S-P-H06 mit Plattenstärken von 15-30 mm waren ausreichend stabil (Abb. 5.6). Da die Holzpartikel an der Oberfläche vom Zementstein überdeckt wurden, war bei diesen Mischungen eine Oberflächenbearbeitung notwendig.[2] Durch die Luftporenbildung beim Mischvorgang entstand eine poröse Oberfläche mit Hohlräumen. Teilweise zeigten sich dunkle Flecken, was auf Rinden- und Borkenanteile zurückzuführen ist. Daher erfordern hochwertige Deckenuntersichten ein vorheriges Aussieben solcher Bestandteile. Die Oberflächen der Platten wiesen keine ausreichende Abriebfestigkeit auf. Aus Gründen der Dauerhaftigkeit und Reinigung ist hier eine Oberflächenbehandlung in Form einer transparenten oder opaken Beschichtung notwendig.[3]
Die Platten der Mischungen S-E-H06 und S-E-H20 zeigten keine ausreichende Festigkeit (Abb. 5.5). Bereits beim Transport kam es zu Abplatzungen von Kanten. Aufgrund des Holzanteils war eine nachträgliche Bearbeitung der Oberflächen nicht zwingend erforderlich. Hinsichtlich der Oberflächenqualität sind

2 Vgl. Kapitel 6
3 Vgl. Kapitel 6

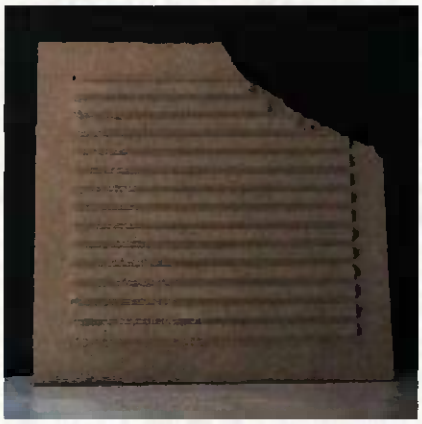


Abb.: 5.5 Platte 60/60/2: S-E-H06

Abb.: 5.6 Platte 60/60/1,5 : S-P-H06

Abb.: 5.7 gefalzte Kante (S-P-H06)

Abb.: 5.8 scharfkantiger Rand (S-P-H06)

diese Platten mit einer zementgebundenen Spanplatte (feine Späne) bzw. Holzwolleleichtbauplatte (grobe Späne) vergleichbar. Eine maschinelle Verdichtung mit Hilfe einer Presse lässt höhere Festigkeiten erwarten. Eine Überprüfung der nach der Norm geforderten Grenzabmaße erfolgte erst an den größeren Platten 120/50/3 cm für die Testprojektbetonage. Bei den 60/60 cm Platten waren jedoch augenscheinlich keine größeren Verformungen zu erkennen.
Um das Einlegen der Platten in handelsübliche Unterkonstruktionen und die Eignung in verschiedenen Deckensystemen mit unterschiedlichen Kantenformen zu testen, wurden die Plattenkanten mit der Stein- bzw. Bandsäge bearbeitet (gefalzt, genutet). Die Platten der Mischung S-P-H06 zeigten eine ausreichende Kantenfestigkeit (Abb. 5.7, 5.8).

5.1.4. Herstellung von Musterdecken

Material, Format, Oberfläche der Platten und das Fugenbild bestimmen den visuellen Eindruck der Unterdecke und tragen zur Raumgestaltung bei. Die Beurteilung und Bewertung der räumlichen Wirkung der hergestellten Holzleichtbetonplatten in einer abgehängten Decke wurde anhand von Musterdecken vorgenommen.

Abb.: 5.9 Raumsimulation mit Decklagen (60/60/3cm)

Abb.: 5.10 Musterdecke mit verschiedenen Decklagen (60/60/1,5-3cm)

Dazu erfolgte das Einlegen der Platten in vorbereitete 60/60 cm Deckenfelder einer Aluminium-Unterkonstruktion. Abb. 5.9 zeigt eine Raumsimulation mit Holzleichtbetonplatten der Abmessungen 594/594/30 mm mit rechtwinklig gefalzter Kante zur Erzeugung einer Schattenfuge. Die Platten konnten aufgrund des Gewichts von ca. 8 kg per Hand eingelegt werden. Die Oberflächen blieben unbehandelt und zeigten aufgrund der Luftporenbildung eine poröse Struktur. Die stark hervortretenden Profile der Unterkonstruktion erzeugten eine starke Rasterung. Um eine optisch zusammenhängende Unterdecke zu erhalten, ist eine verdeckte Konstruktion besser geeignet. Hinzu kommt, dass die weißen Profile in Kombination mit den Holzleichtbetonplatten zu einem starken Kontrast führten. Abb. 5.10 zeigt eine Musterdecke mit Decklagen der drei Standardmischungen mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur und Farbigkeit. Die Profile der Unterkonstruktion sind silber beschichtet worden. Die Platten der Mischungen S-E-H06 und S-E-H20 erscheinen aufgrund des höheren Holzanteils wesentlich dunkler.

5.1.5. Optimierung der Decklagenbauteile

Die Untersuchungen aus der Schallabsorptionsprüfung belegten für Proben mit hohem Holzanteil einen mittleren Schallabsorptionwert von 40-55%. Allerdings zeigte sich, dass die Kantenfestigkeit aufgrund der Druck- und Biegezugfestigkeit (1-1,7 N/mm² bzw. 0,4-0,5 N/mm²) nicht ausreicht, um eine für Unterdecken erforderliche Stabilität zu ermöglichen. Die Mischungen mit plastischer Konsistenz wiesen zwar eine ausreichende Stabilität auf, erreichten jedoch noch nicht die gewünschte akustische Wirksamkeit.
In einem nächten Schritt wurde eine Sandwichplatte aus zwei verschiedenen Mischungen S-E-H06 und S-P-H06 (höherer Holzanteil zur Rauminnenseite)

Abb.: 5.11 Sandwichplatte 60/60/1,5cm

Abb.: 5.12 Kanten der Sandwichplatte

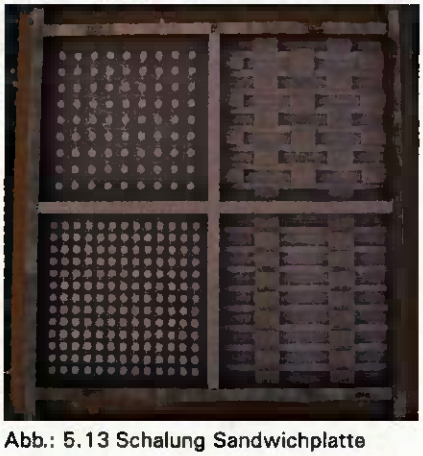


Abb.: 5.13 Schalung Sandwichplatte

Abb.: 5.14 Detail Strukturschalung

hergestellt, um die Möglichkeit einer Frisch-in-Frisch-Betonage und die Verbundwirkung beider Mischungen zu testen (Abb. 5.11). Die Mischung S-E-H06 wurde mittels stampfen verdichtet. Im Anschluss erfolgte das Einfüllen von Mischung S-P-H06. Bei der Herstellung und der Verbundwirkung waren keinerlei Probleme festzustellen.

Um jedoch eine gleichermaßen gestalterisch hochwertige Oberfläche und gute akustische Wirksamkeit zu erreichen, wurde mit einer sogenannte `umgekehrten Sandwichplatte` experimentiert. In diesem Aufbau diente die Mischung mit dem höherem Zementanteil als Tragstruktur, die Mischung mit höherem Holzanteil als schallabsorbierend wirksame Schicht. Zur Rauminnenseite läßt sich somit eine frei modellierbare plastische Tragstruktur mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur herstellen, die funktional die erforderliche Biegezugfestigkeit und Kantenstabilität aufweist, um verdeckte und sichtbare Deckensysteme zu ermöglichen. Zur raumabgewandten Seite wurde die schallabsorbierende Mischung angeordnet. Darüber hinaus kann über Oberflächenstrukur und Lochanteil der tragenden Schicht die akustische Wirksamkeit angepasst werden.
Insgesamt sind vier Schalungen mit verschiedenen Oberflächenstrukturen und unterschiedlichem Öffnungsanteilen aus MDF-Platten hergestellt worden. Um das Einlegen in herkömmliche Unterkonstruktionen und die Ausführung von verdeckten Deckensystemen zu ermöglichen, wurde die Tragstruktur auf ca. 15 mm und die schallabsorbierende Schicht auf ca. 20 mm festgelegt (Abb. 5.13, 5.14). Als Ausgangsrezeptur diente eine Kombination aus S-P-H06 für die Tragstruktur und S-E-H06 bzw. S-E-H20 für die schallabsorbierende Schicht.

Die Betonage erwies sich als problematisch, da die Mischung mit erdfeuchter Konsistenz über der Tragschicht lag. Zuerst wurde die Mischung S-P-H06 eingefüllt und verdichtet. Um eine Verbundwirkung zwischen beiden Mischungen zu erreichen erfolgte nach Abbinden des Frischbetons am nächsten Tag die Betonage einer 2-3 mm Schicht der gleichen Mischung und darüber die Betonage der Mischung S-E-H06 bzw. S-E-H20 manuell verdichtet. Beim Ausschalen kam es zum Auseinanderbrechen der Proben, da sich das MDF-Schalungsmaterial mit Wasser vollgesaugt hatte und gequollen war. Dies führte zum Bruch der filigranen Holzstäbchen, die teilweise im Beton stecken blieben (Abb. 5.15). Ein Lösungsansatz besteht hier in der Verwendung von glatten, nicht saugenden Kunststoffmaterialien (EPS) als Schalungsmaterial.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Herstellung der Platten sehr aufwendig ist. Demgegenüber steht ein bewerteter Schallabsorptiongrad von ca. 40-50%[4] und ein hohes gestalterisches Potential durch zusätzliche

4 Vgl. Kapitel 3

Abb.: 5.15 Schalung und Muster

Abb.: 5.16 Sandwichplatte

Möglichkeiten frei modulierbarer Oberflächen (Abb. 5.16). Optimierungsbedarf besteht bei der Auswahl des geeigneten Schalungsmaterials und beim Betonagevorgang. Als Einsatzbereiche sind Foyers oder Sonderbereiche denkbar, wo die „Sandwichplatte" als absorbierende Wandbekleidung eine Verbesserung der akustische Situation und gleichzeitig gestalterisch anspruchsvolle Raumwirkungen ermöglichen könnte.

5.1.6. Materialkombinationen

Bei der Anwendung im Innenraum ist davon auszugehen, dass Bauteile aus Holzleichtbeton sowohl an der Decke wie auch im Wand- und Bodenbereich stets mit anderen Materialien kombiniert werden. Um das gestalterische Zusammenwirken mit verschiedenen Materialien zu überprüfen, erfolgten eine Reihe von Materialstudien.
Dabei zeigte sich, dass in Kombination mit verschiedenen Holzarten durch Wahl und Menge des Holzzuschlages eine farbliche Annäherung, wie auch eine nuancierte Kontrastierung, erzielt werden kann (Abb. 5.17). Im Vergleich mit Sichtbetonflächen wird deutlich, dass der Holzleichtbeton insgesamt einen wärmeren Grundton aufweist (Abb. 5.18). Die exemplarisch durchgeführten Studien belegen das gestalterische Potential von Holzleichtbeton in der Kombination mit konventionellen Baustoffen.

5.2. Mechanische Untersuchungen

Zur Klärung wichtiger Randbedingungen bei der Montage von Holzleichtbetonplatten wurden eine Reihe von Prüfungen zur Ermittlung mechanischer Kenndaten durchgeführt. Ferner erfolgten Versuche zum Nachweis der Stabilität und Durchbiegung von Decklagen nach EN 13964.

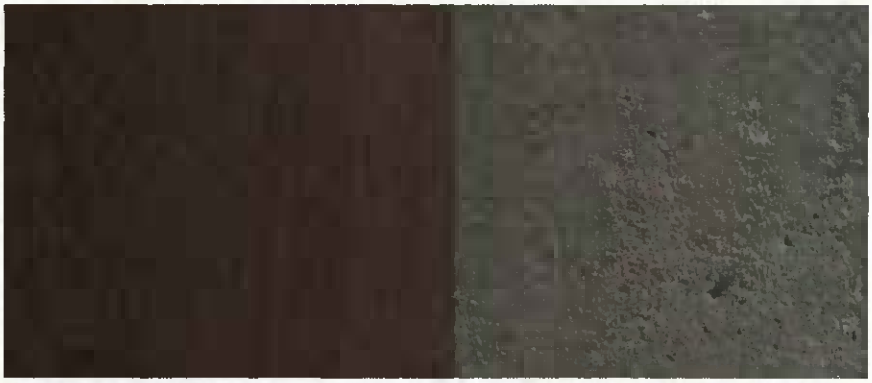


Abb.: 5.17 Materialkombination Buche / Holzleichtbeton

Abb.: 5.18 Materialkombination Sichtbeton / Holzleichtbeton

5.2.1. Prüfung von Biegefestigkeit und E-Modul nach EN 310

Zunächst wurden vier Platten (100/50/3 cm) mit der Ausgangsrezeptur S-P-H06-A-2 hergestellt, die von den Mischungen mit plastischer Konsistenz die besten Schallabsorptionswerte aufwies. Um einen hohen Luftporengehalt (ca. 58%) zu erreichen, erfolgte die Herstellung in einem Eirich Intensivmischer mit 40l Mischvolumen. Weiterhin wurden vier Platten mit den gleichen Abmessungen der Mischung S-E-H06-VPr mit einer Holzpresse betoniert (Abb 5.19).[5] Mit drei Platten jeder Mischung wurde die Stabilitäts - und Festigkeitsprüfung durchgeführt.
Das Maß der Platten ergab sich zum einen aus der EN 13964 zum anderen aus einer max. Größenbeschränkung der Holzpresse. Die Plattenstärken wurden für eine sichtbare Konstruktion bemessen, um eine rechtwinklig gefalzte Kantenform mit Schattenfuge herzustellen, die ein Auflager von mind. 15 mm erfordert. Mit dieser Stärke lassen sich auch verdeckte Konstruktionen mit einer genuteten Kantenausbildung realisieren.

Zur Bestimmung der mechanischen Kenndaten wurden jeweils zwei Platten jeder Mischung in 9 Proben mit den Abmessungen 550/50/25 mm gesägt.[6] Anschließend erfolgte die Lagerung im Klima bei 23°C und 50% relativer Luftfeuchte bis zur Massenkonstanz (Abb. 5.19). Durch die Pressung resultierte eine höhere Rohdichte der Platte 2 (590 kg/m³). Die gemessenen mittleren Biegefestigkeiten bewegten sich in einem Bereich von 0,8 N/mm² (Platte 1) und 3,1 N/mm² (Platte 2), die mittleren Biege-E-Moduli zwischen 833 N/mm² (Plat-

5 Betonage erfolgte in der Holzforschung München, November 2007
6 Vgl. Tröger, 2007/128

Eigenschaften	Platte 1 S-P-H06-A-2	Platte 2 S-E-H06-VPr
Holzzementwert kg/kg	0,26	0,44
Wasserzementwert kg/kg	0,89	0,94
Holzpartikel (fein < 6mm, grob < 15mm)	fein	fein
Mischdauer / Intensität (min)	5 min/s	3min/l
Luftporenanteil (Vol.-%)	58	n.b
Verdichtung	gegossen	gepresst
Oberflächenbehandlung	keine	keine
mittlere Rohdichte trocken (kg/m³)	575	937
mittlere Biegefestigkeit (N/mm²)	0,8	3,1
mittleres Biege-E-Modul (N/mm²)	833	2160

Abb.: 5.19 Kenndaten von Ausgangsrezepturen

Tab.: 5.20 Versuchsaufbau

Tab.: 5.21 Bruchbild der Probe S-E-H06

te 1) und 2160 N/mm² (Platte 2). Die Festigkeiten der Platte 1 lagen deutlich unter den Werten der Platte 2. Starke Unregelmässigkeiten und Abplatzungen an der Ober- und Unterseite der geprüften Platte könnten dies verursacht haben. Daher lassen qualitativ besseren Platten höhere Festigkeiten erwarten.

Erwartungsgemäß hatten die gepressten Platten eine deutlich höhere Festigkeit als die manuell durch Stampfen verdichteten Proben. Allerdings führte das Pressen zu einer höheren Verdichtung und damit auch zu einer Zunahme der Rohdichte um bis zu 60%. Das Gewicht der Platte betrug somit ca. 13 kg (Platte 1 ca. 7,2 kg), was die manuelle Handhabung auf der Baustelle erschwert. Ein Vergleich mit herkömmlichen Holzwerkstoffplatten zeigte, dass die Holzleichtbeton-Platte mit einer Stärke von ca. 26 mm um 50% unter der Biegefestigkeit einer Holzwolleleichtbauplatte mit einer Rohdichte von 430 kg/m³ und einer Stärke von 25 mm liegt. Die gepresste Platte weist um Faktor 2 höhere Biegefestigkeiten auf als die HWL-Platte, erreicht jedoch nur ca. 33% der zementgebundenen Pressspanplatte fast gleicher Rohdichte (Abb. 5.22).

5.2.2. Untersuchung zur Stabilität und Festigkeit von Decklagen

In der EN 13964 wird die Anforderung an die Biegezugfestigkeit von Decklagen definiert. Diese müssen eine ausreichende Festigkeit haben, um Ihr Eigengewicht zu tragen. Als Mindestanforderung gilt: die Decklage darf nicht herausfallen und muss eine ausreichende Steifigkeit aufweisen, um die ästhetischen Eigenschaften wie Ebenheit und Krümmung zu gewährleisten. Das Prüfergebnis wird als eine der Durchbiegungsklassen 1-3 in der Beanspruchungsklasse und der aufgebrachten Last angegeben. Ein weiterer geforderter Nachweis ist die Sicherheitsprüfung gegen Versagen. Decklagen sind ausreichend tragfähig, wenn Sie das 2,5-fache ihres Eigengewichtes aufnehmen können.

Um eine erste Einschätzung zu erhalten, wurde die Durchbiegung und Tragfähigkeit der Decklage ohne Zusatzlast ermittelt. Der Versuchsaufbau orientierte sich an der in der EN 13964 Anhang F beschriebenen Prüfung. Als Bean-

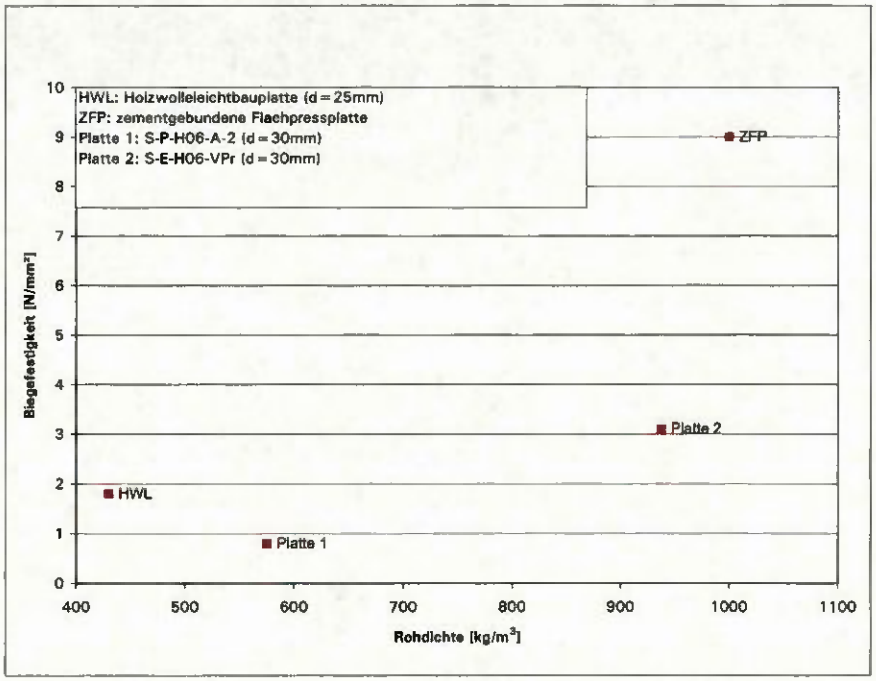


Abb.: 5.22 Biegefestigkeit im Vergleich zu ausgewählten Holzwerkstoffen (vgl. Scholz, Hiese, 2003, S.831, www.heraklith.at)

spruchungsklasse wurde die Klasse A gewählt.[7] Der Versuch erfolgte im dafür ausgelegten Klimaraum. Die Platten wurden im Klima unter den Randbedingungen für die Beanspruchungsklasse konditioniert. Nach zwei aufeinanderfolgende Wägungen, die 24 h auseinanderliegen, durfte die Gewichtsdifferenz höchstens 1% betragen. Danach wurden die Platten in den Prüfrahmen gelegt und die Anfangsdurchbiegung bestimmt (Abb. 5.23). Der Messpunkt befindet sich in Feldmitte. Die Durchbiegung ist in festgelegten Zeitabschnitten zu messen (1d, 3d, 7d, 14d,...), bis eine gleichmäßige, stabile Durchbiegung bzw. Verdrehung erreicht wird. Die Durchbiegung ist als stabil zu bezeichnen, wenn die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen höchstens 10% der gesamten gemessenen Durchbiegung/Verdrehung beträgt. Gleichzeitig sind Verformungen zu protokollieren. Die Prüfung wurde über einen Zeitraum von 14 Tagen durchgeführt.[8]

Die Platten der Mischung S-P-H06-A-2 wiesen eine mittlere Durchbiegung von 0,94 mm auf (Höchtwert von 1,14 mm Platte 2[9]). Die Platten mit der Mischung S-E-H06-VPr zeigten eine mittlere Durchbiegung von 0,47 mm, wiesen jedoch am Anfang der Messung Verformungen auf, was auf eine nicht ausreichende

7 Bauteile, die schwankender relativer Luftfeuchte bis 70% und schwankender Temperatur bis 25°C, jedoch keinen korrosiven Verunreinigungen ausgesetzt sind.
8 Prüfung erfolgte an der MPA, TU-München, Oktober-November 2007
9 Was auf Mängel bei der Herstellung bzw. auf eine geringere Festigkeit zurückzuführen ist.

Abb.: 5.23 Versuchsaufbau Durchbiegung

Abb.: 5.24 Sicherheit gegen Versagen

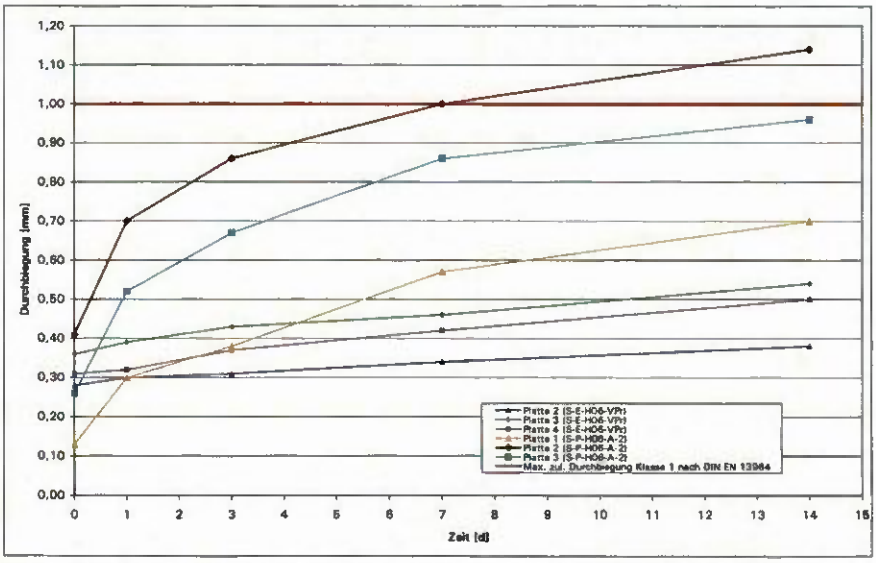


Abb.: 5.25 Messergebnisse der Platten mit der Mischung S-P-H06-A-2/ S-E-H06-VPr

Trocknung und eine mangelnde Konditionierung hindeutete (Abb. 5.25).
Die max. Plattendurchbiegung aus den Anforderungen der Durchbiegungsklasse 1 von max. 1mm bei einer Stützweite von 500 mm wurde somit erreicht. Aus dem Prüfergebniss resultiert die Bezeichnung zur Biegezugfestigkeit: Klasse 1/A/ohne Belastung.

Ergänzend wurde im Anschluss mit den Platten die Prüfung zur Sicherheit gegen Versagen durchgeführt. Über einen Zeitraum von 24 h wurde eine Flächenlast in Form von ca. 2,5-3-kg-Sandsäcken (Abb. 5.24) auf die Platten aufgebracht. Bei den Platten der Mischung S-P-H06-A-2 erreichte die Belastung das 3,6-3,7-fache Eigengewicht, bei den Platten der Mischung S-E-H06-VPr das 2,5-2,6-fache Eigengewicht. Alle Platten haben die Prüfung bestanden.

Die gepressten Platten wiesen eine sehr gute Stabilität auf, hatten jedoch ein verhältnissmäßig hohes Flächengewicht, was die Handhabung bei der Montage als Decklage für den Innenraum eher schwierig gestaltet. Die Oberfläche erforderte keine nachträgliche Bearbeitung, entspricht vom Erscheinungsbild jedoch eher herkömmlichen gepressten Spanplatten. Hier ist eine farbliche Beschichtung und eine Optimierung hinsichtlich eines höheren h/z-Wertes zu überprüfen, um die Rohdichte zu verringern. Durch eine Oberflächenstrukturierung und/oder farbliche Zusatzstoffe bestehen weitreichende gestalterische Potentiale. Bei den gegossenen Platten besteht Optimierungsbedarf in der Stabilisierung der akustischen Wirksamkeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Biegefestigkeit. Die Kantenausbildung war noch nicht ausreichend stabil, um eine schadensfreie Montage in herkömmliche Decken- und Wandsysteme zu gewährleisten.

5.2.3. Ermittlung der Tragfähigkeit von Holzschrauben

Um Holzleichtbetonplatten auf einer Holzunterkonstruktion an Wand und Decke befestigen zu können, ist es notwendig das Tragverhalten von Holzschrauben im Holzleichtbeton zu untersuchen. Mit den ermittelten Festigkeiten und Steifigkeiten können Bemessungswerte errechnet werden, die die notwendige Anzahl und Dimensionierung von Holzschrauben für die Befestigung einer Holzleichtbetonplatte angeben.[10]
Es wurden Proben von zwei unterschiedlichen Holzleichtbetonmischungen ausgewählt (S-P-H06-A-2 und S-E-H20-A-2), die beide aufgrund guter akustischen Wirksamkeit ein vielversprechendes Potential für eine Innenraumanwendung aufwiesen (Abb. 5.26). Die mittlere Rohdichte (bei einer Konditionierung der

10 Vgl. Kelletshofer, 2008

Eigenschaften	Material A S-P-H06-A-2	Material B S-E-H20-A-2
Holzzementwert (kg/kg)	0,26	0,83
Wasserzementwert (kg/kg)	0,89	0,44
Holzpartikel (fein < 6mm, grob < 15mm)	fein	grob
Mischdauer / Intensität (min)	5 min/s	3min/l
Luftporenanteil (Vol.-%)	58	n.b.
Verdichtung	gegossen	gepresst
Oberflächenbehandlung	gesägt	keine
mittlere Rohdichte trocken (kg/m³)	552	598
mittlere Biegefestigkeit (N/mm²)	0,7	n.b.
mittleres Biege-E-Modul (N/mm²)	1,2	n.b.

Abb.: 5.26 Kenndaten von ausgewählten HLB-Proben

Prüfkörper im Normalklima 20°C/65% rel. Luftfeuchte) betrug für beide Materialien zusammengefasst etwa 570 kg/m³.
Bei den Holzschrauben wurden Senkkopf SPAX-Schrauben gemäß Zulassung Z-9.1-235 mit zwei unterschiedlichen Nenn-Durchmessern sowie mit Teil- und Vollgewinde verwendet. Hinsichtlich des Tragverhaltens der Holz-Schrauben in Holzleichtbeton sind nachfolgend aufgeführte Festigkeitsparameter für die Decken- und Wandmontage untersucht worden:
- Herausziehen Schrauben-Gewinde
- Kopfdurchdrücken
- Abscheren Schrauben-Schaft

Die Anordnung der Schrauben innerhalb des Prüfkörpers sowie die Verwendung der beiden unterschiedlichen Schrauben-Nenn-Durchmesser waren wie folgt gegeben:
- Ecknahe Anordnung mit Durchmesser 3,5 mm (Teilgewinde)
- Mittige Anordnung mit Durchmesser 5,0 mm (Vollgewinde)

Insgesamt ergaben sich durch die Kombination der Parameter vier Prüfserien je Holzleichtbetonprobe. Für die Wandmontage maßgeblich war der Lastfall Abscheren wobei eine evtl. Montage von zusätzlichen Lasten (z. B. Bilder) auf der Holzleichtbetonplatte berücksichtigt wurde (Lastfall Abscheren 2). Für die Deckenmontage waren es die Parameter Herausziehen und Kopfdurchziehen (Abb. 5.29). Abhängig vom Lastfall erfolgte das Einbringen der Holzschrauben in vorgebohrte Löcher. Um eine ausreichende Materialstreuung zu berücksichtigen, wurde jeder Versuch an den Holzleichtbetonproben dreimal durchgeführt.

Die Tragfähigekeitsprüfungen wurden als statische Kurzzeit-Versuche durchge-

Abb.: 5.27 Kopfdurchdrücken Material A

Abb.: 5.28 Bruchverhalten Material A

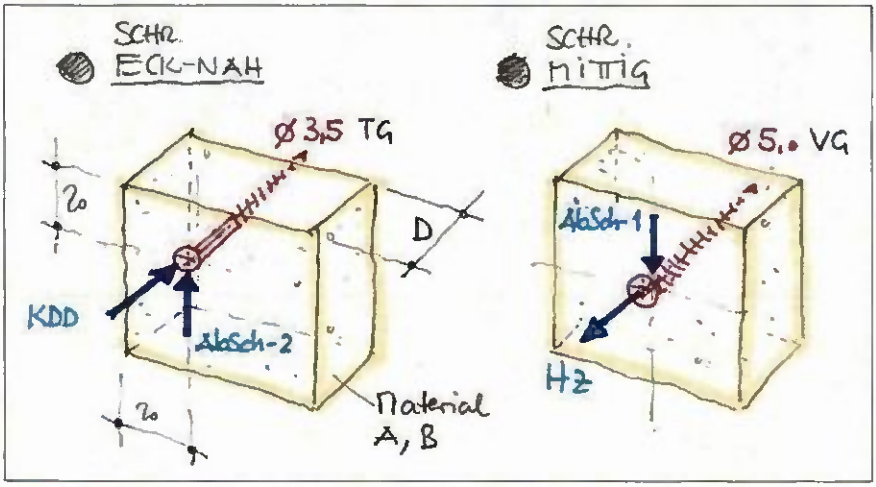


Abb.: 5.29 Belastungsanordnung (Skizze Kelletshofer)

führt, die Belastung erfolgte bis zum Bruch bzw. bis zum Erreichen der Höchstlast (Abb. 5.27, 5.28). Dabei wurde anhand eines Last-Verschiebungs-Diagramms die Belastungskraft und die vertikale Relativ-Verschiebung zwischen der Schraube und dem Prüfkörper kontinuierlich gemessen. Aus den aufgezeichneten Last-Verschiebungs-Diagramm konnte die Verschiebe-Steifigkeit (N/mm) ermittelt werden. Hierbei ist die Anfangs-Verschiebe-Steifigkeit ki* (Auswertung vom Null-Punkt bis zum 50% Last-Niveau) für eine Beurteilung des Steifigkeitsverhaltens maßgebend.[11]

Die Prüfergebnisse zum Tragverhalten sind, unter Angabe des charakteristischen Festigkeitswertes bzw. Bemessungswertes, mit statistischer Auswertung für die unterschiedlichen Belastungsarten ermittelt worden.[12] Die wesentliche Bruchart bei den unterschiedlichen Belastungen wurde ebenfalls kurz beschrieben. Das Material B (Holzleichtbetonmischung mit erdfeuchter Konsistenz) wies, vermutlich aufgrund des höheren Holzanteils, für alle Lastfälle höhere Festigkeits-Werte und damit höhere Traglasten auf, als das Material A (Holzleichtbetonmischung mit plastischer Konsistenz) (Abb. 5.30). Bei den

11 Vgl. Kellethofer, 2008, S. 4
12 Die Statistische Auswertung erfolgte unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung (logNV) der vorliegenden Prüfungen (Höchstlasten). Die Berechnung der 5%-Fraktile erfolgte für eine Aussagewahrscheinlichkeit von 75% und einem Beiwert kn = 3,0 für die Serien-Größe von 3PK. Prüfergebnisse der einzelnen Prüfserien.

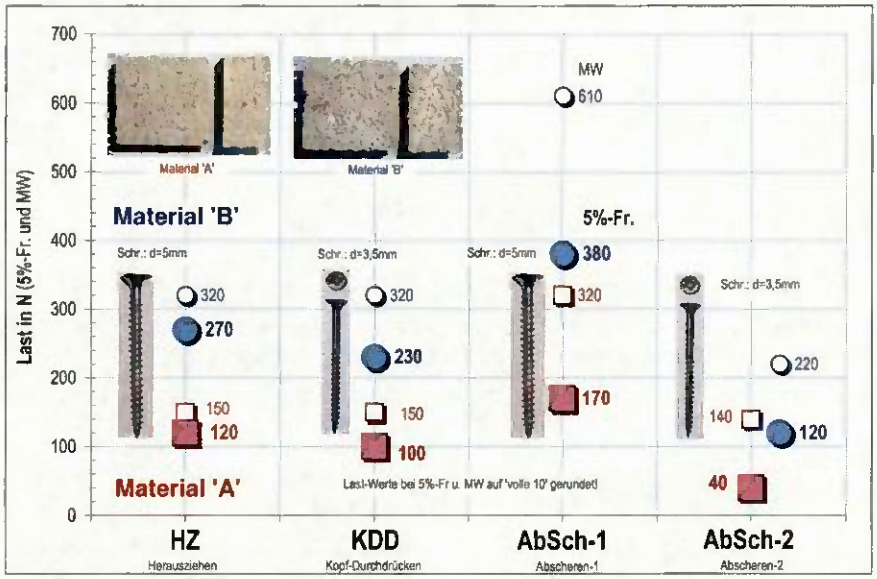


Abb.: 5.30 Statistische Auswertung der Traglasten

Abb.: 5.31 Senkk./Kreuz (verzinkt)

Abb.: 5.32 Senkk./Kreuz (Messing)

Abb.: 5.33 Senkk./Stern (Edelstahl)

Abb.: 5.34 Halbrundk./Kreuz (Edelstahl)

Steifigkeits-Werten zeigte das Material A eine höhere Anfangs-Verschiebe-Steifigkeit bei den Lastfällen Herausziehen und Kopfdurchdrücken (4330 N/mm, 210 N/mm) als das Material B (1030 N/mm, 180 N/mm). [13]
Für eine bauaufsichtliche Zulassung sind jedoch weitere Versuchsreihen erforderlich.

Ergänzend zu den Tragfähigkeitsprüfungen erfolgten Studien zur Kombination Holzleichtbeton/Holzschraube. Dazu sind Proben der Mischung S-P-H06 mit ausgewählten SPAX-Holzschrauben, die in Material und Schraubenkopfausbildung variieren, bestückt worden (Abb. 5.31-5.34). Es zeigte sich, dass Edelstahl bzw. Stahl verzinkt aufgrund der Materialstruktur und Farbigkeit besser mit Holzleichtbeton harmoniert als Messing. Bei der Verwendung von Senkkopfschrauben tritt die Befestigung als gestalterisches Element eher in den Hintergrund. Halbrundköpfe bewirken eine Akzentuierung.
Vor der Montage ist eine Planung zu Anzahl, Anordnung, Materialität und Form der Schrauben anzufertigen, um den gestalterischen Einfluss auf das gesamte Erscheinungsbild von Decken- bzw. Wandbekleidungen zu klären.

5.3. Demonstrationsprojekte

Im Rahmen von Demoprojekten sollten die Ergebnisse aus den baukonstruktiven und materialspezifischen Untersuchungen unter praxisnahen Bedingungen getestet und überprüft werden. Für den Einsatz von Holzleichtbeton im Innenraum bestand die Möglichkeit, zwei unterschiedliche Anwendungen (Wandbekleidung und Lamellendecke) zu realisieren. In Abstimmung mit den Bauherrn erfolgten Entwurfs- und Ausführungsplanungen im Maßstab 1:100 bis 1:5 für die Anordnung, Herstellung und Montage von Decken- und Wandplatten. Zusätzlich wurden exemplarisch Abschätzungen zur akustischen Situation vor und nach der Maßnahme vorgenommen.

5.3.1. Seminarraum in Rosenheim

In Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Rosenheim ergab sich die Möglichkeit einen Deckenbereich in einem neugebauten Seminarraum mit abgehängten Senkrechtlamellen aus Holzleichtbeton auszustatten (Abb. 5.35, 5.37). Neben

13 Vgl. Kellethofer, 2008 , Anlage A S.3

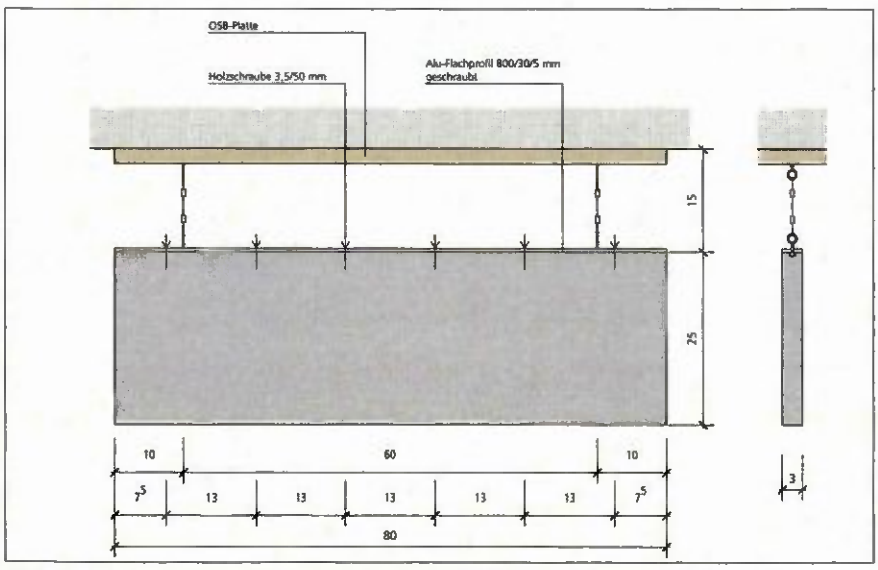


Abb.: 5.35 Detail zur Befestigung der HLB-Lamelle an der Rohdecke

der akustischen Wirksamkeit bestand bei diesem Projekt die Möglichkeit die Holzleichtbeton-Lamelle als neues innovatives Bauteil zu präsentieren, da der Raum für Studenten als Showroom für Innenausbaumaterialien genutzt werden sollte.
Der Seminarraum hat eine Grundfläche von ca. 110 m² und eine Raumhöhe von ca. 3,07 m. Im Fensterbereich steht ein ca. 1,2 m breiter und ca. 9,0 m langer Bereich für die Montage zur Verfügung. Der Abstand der Lamellen ergab sich aus den Anforderungen einer max. akustischen Wirksamkeit, bestehend aus Verhältnis Höhe der Lamelle zu Abstand der Lamelle 1:1. Auf der Grundlage eines Deckenspiegels konnten 30 Holzleichtbetonlamellen (80/25/3 cm) mit einem Abstand von ca. 30 cm und einer akustisch wirksamen Fläche von ca. 15 m² eingebaut werden.
Die Abhängung von der Rohdecke erfolgte punktuell mittels einer Seilkonstruktion, bestehend aus jeweils zwei Schlaufen und Haken, die an der Unterkonstruktion der Rohdecke (OSB-Platte) und an der Lamelle befestigt waren. Auf die Lamellen wurde ein Alu-Flachprofil (800/30/5 mm) zur Anbringung der Haken für die Seilabhängung geschraubt (Abb. 5.37). Für die Befestigung einer Akustiklamelle mit einem Gewicht von ca. 4 kg = 40 N wäre bezogen auf den Lastfall Herausziehen unter Berücksichtigung des 2,4-fachen Sicherheitsfaktors ein zulässiges Gewicht von 50 N pro Schraube möglich. Insgesamt wäre somit nur eine Spax-Schraube der Dimension d = 5 mm, Vollgewinde notwendig, um das Alu-Profil auf der Kante der HLB-Platte zu befestigen. Aus Sicherheitsgründen wurden jedoch 4 Schrauben verwendet.
Durch Verzögerungen im Bauablauf bei der Fertigstellung des Raumes an der FH Rosenheim kann das Ergebnis der Montage der Holzleichtbeton-Lamellen im Abschlußbericht nicht mehr dokumentiert werden.

5.3.2. Büroraum in München

In einem Architekturbüro bestand die Möglichkeit, die akustische Situation durch den Einbau von Holzleichtbeton-Platten zu verbessern. Fehlende schallabsorbierende Oberflächen, eine ungünstige Raumgeometrie und ein grosses Raumvolumen führten zu einer erhöhten Halligkeit, die die Sprachverständlichkeit beeinträchtigte und einen hohen Geräuschpegel erzeugte. Da die Decke bereits aus abgehängten Gipskartonplatten auf einer Unterkonstruktion bestand und keine zusätzlichen Lasten mehr aufnehmen konnte, wurden Wandabsorber aus Holzleichtbeton-Platten geplant.

Es handelt sich um ein Mehrpersonenbüro mit einer Grundfläche von ca. 115 m² und einer Raumhöhe von 3,2 m. Das akustisch wirksame Raumvolumen beträgt ca. 370 m³. Der Raum ist mit 8 Arbeitsplätzen eingerichtet und ver-

Abb.: 5.36 Seminarraum im Rohbau

Abb.: 5.37 HLB-Lamelle mit Befestigung

fügt über eine übliche Büroausstattung. Schallabsorbierende Bekleidungen sind nicht vorhanden. Über einen Vorhang kann eine Besprechungsecke abgetrennt werden.

Für die Montage von Holzleichtbetonplatten als Wandabsorber standen insgesamt 3 Wände mit ca. 32 m² zur Verfügung (Abb. 5.38). Die Festlegung der Plattenabmessung (120/50/3 cm) und Fugeneinteilung wurde auf vorhandene Wandgeometrien bzw. Proportionen und Möblierungen abgestimmt. Bei der Planung ist auf einen ausreichenden Abstand zu den begrenzenden Wandflächen geachtet worden, um die Platten als vorgehängtes gestalterisches Element sichtbar zu lassen. Die Wandbekleidung wurde als sogenannte Vorsatzschale ausgeführt.[14] Diese werden häufig im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen ausgeführt und tragen neben der Verbesserung der bauphysikalischen Situation auch zur gestalterischen Aufwertung vorhandener Wände und damit zum Erscheinungsbild des Raumes bei.

Um eine nicht sichtbare Befestigung der HLB-Platten zu erreichen, wurde das System der Haltekralle[15] als Verbindungsmittel gewählt. Dazu ist das Einfräsen einer Nut in den oberen und unteren Plattenrand erforderlich (Abb. 5.40, 5.41). Die Haltekrallen sind auf einer Holzunterkonstruktion 30/80mm mit geeigneten Holzschrauben zu befestigen, insgesamt jeweils 4 Krallen pro Platte. Die Fugenbreite beträgt 5 mm (Abb. 5.39).

Rissbildungen und erhöhtes Schwindverhalten bei der Herstellung[16] führten zu einer großen Anzahl verformter und beschädigter Platten. Damit war die Umsetzung des gesamten Wandabsorbers nicht möglich, eine Teilbestückung wur-

14 Vorsatzschalen sind einseitig beplankte Einfachständerwände mit Metall- bzw. Holzunterkonstruktion, die vor einem rückseitigen Bauteil aufgestellt werden..
15 Heradesign (Fa. Heraklith)
16 Vgl. Kapitel 6

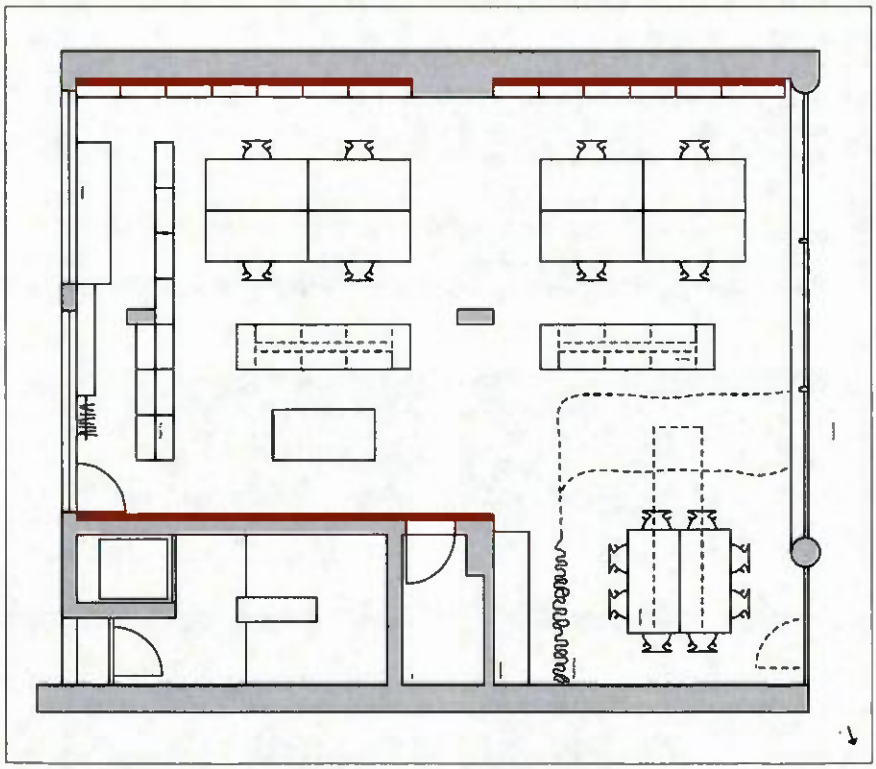


Abb.: 5.38 Grundriss Büroraum mit zur Verfügung stehenden Wandflächen (Rot gekennzeichnet), ohne Maßstab

de von Seiten des Bauherrn abgelehnt, was zum Stopp des Demonstrationsprojektes führte.

5.3.3. Einschätzung des akustischen Verbesserungspotentials

Um jedoch eine Einschätzung des akustischen Verbesserungspotentials nach Montage der Holzleichtbeton-Platten zu erhalten, wurden entsprechende Messungen und Abschätzungen vorgenommen.
Im Rahmen einer Bestandsmessung ist die akustische Situation beurteilt worden[17]. Orientierungswerte für die Berechnung der erforderlichen schallabsorbierenden Flächen finden sich in der DIN 18041 (Abschnitt 6) und in der VDI 2569. Die Messung der Nachhallzeit wurde nach DIN EN ISO 3382 durchgeführt. Während der Messung war der Raum unbesetzt, die Besprechungsecke war nicht abgetrennt.
Es zeigte sich, dass die Nachhallzeiten deutlich über den anzustrebenden Werten liegen. Die VDI 2569 empfiehlt eine max. Nachhallzeit von T=0,5-0,55 s. Nach DIN 18041 ergibt die Berechnung der anzubringenden schallabsorbieren-

17 Vgl. Mommertz, 2008

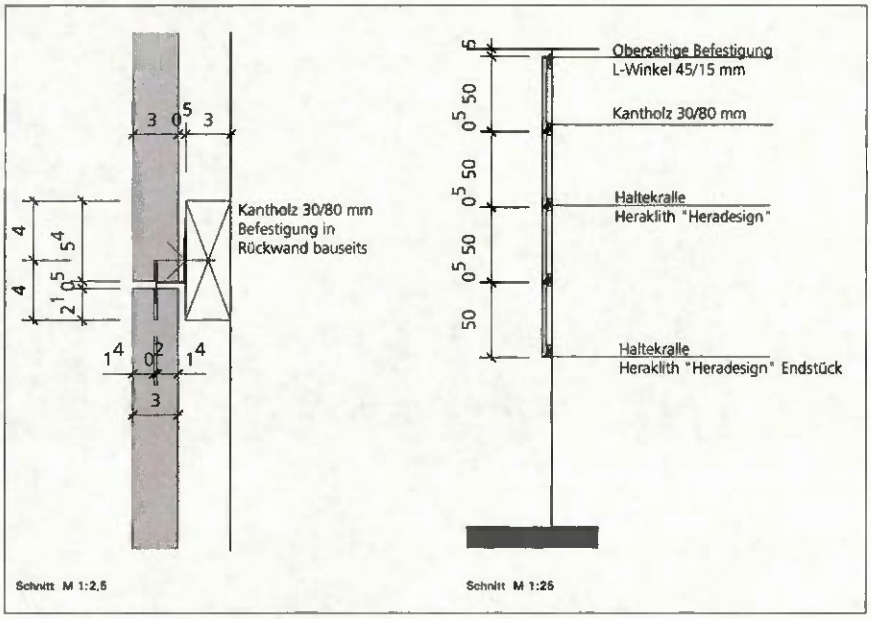


Abb.: 5.39 Detail für Befestigung der HLB-Platten an der Wand

Abb.: 5.40 Detail Haltekralle mit geschlitzter Plattenkante

Abb.: 5.41 Haltekralle in Platte eingeschoben

den Flächen unter Berücksichtigung des Schallabsorptionsgrades α_w =0,5 der verwendeten Mischung (S-P-H06-A-2)[18], eine Fläche von ca. 140 m². Nach Angaben der VDI 2567 beträgt die zu bekleidende Fläche ca. 90 m². Die vorgesehenen Flächen entsprechen mit 32 m² etwa einem 1/3 bis1/4 der Empfehlungen (Abb. 5.38 + 5.42). Eine Prognose lässt jedoch erwarten, dass die geplanten Maßnahmen die Nachhallzeit um etwa 20% auf 0,7 s reduzieren (Abb. 5.43).
Damit werden die empfohlenen Richtwerte zwar nicht erreicht, jedoch ist eine Reduzierung bereits deutlich erkennbar und lässt eine Verbesserung der raumakustischen Situation erwarten. Um eine zusätzliche Aufwertung zu erreichen ist die schallabsorbierende Fläche zu erhöhen bzw. die Absorptionswirkung der eingesetzten Materialien zu verbessern.

18 Die Werte beziehen sich auf ein Material, welches unmittelbar vor einer reflektierenden Fläche angebracht ist. Mit einem Hohlraum von ca. 30 mm verbessert sich die Absorption im unteren Frequenzbereich.

Abb.: 5.42 Raumsimulation (Platten 120/50/3 cm)

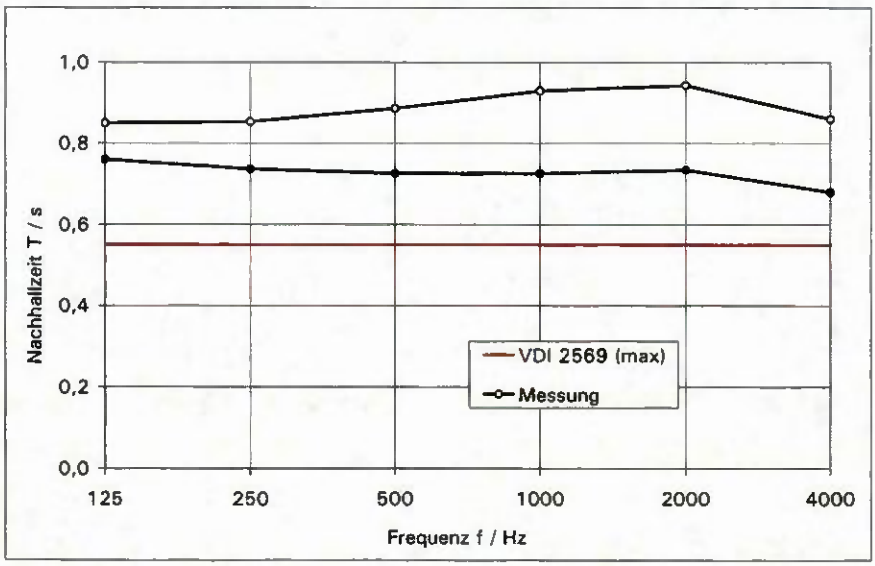


Abb.: 5.43 Nachhallzeiten im Büroraum. Empfehlung nach VDI (Maximalwert), Messung und Prognose bei Ausführung der geplanten Maßnahmen

6. Herstellung und Bearbeitung von Holzleichtbeton

Nachfolgend werden Ergebnisse und Einschätzungen von unterschiedlichen Aspekten der Herstellung und Bearbeitung von Holzleichtbeton dargestellt, die sowohl für die industrielle Fertigung von Bauteilen und Bauelementen, als auch für die Handhabung des Materials auf der Baustelle von Bedeutung sind. Dabei handelt es sich um experimentelle Untersuchungen im Betonlabor sowie um Erfahrungen aus der Durchführung von Demonstrationsprojekten. Angaben zu den einzelnen Mischungen und zur Betonage von Holzleichtbeton werden im Abschlussbericht vom Teilprojekt 16 ausführlich erläutert.

6.1. Holzleichtbetonplatten im Innenraum

Für die Ausführung der Demonstrationsprojekte in Rosenheim und München war die Herstellung von insgesamt ca. 80 Platten mit den Abmessungen 120/50/3,5 cm erforderlich.[1] Als Ausgangsrezeptur diente die Mischung S-P-H06, die durch einen Luftporengehalt von ca. 30-45% und einer Rohdichte von 600-700 kg/m³ gekennzeichnet ist. Aufgrund des begrenzten Mischvolumens (40 l) erfolgte die Betonage in Kleinserien, was zu sehr großen Qualitätsschwankungen bei den Platten führte.
Der Frischbeton wurde im Eirich Intensivmischer gemischt und anschließend in die vorbereitete Schalung eingebracht und geglättet, nicht verdichtet, um einen hohen Anteil an Luftporen zu gewährleisten. Lediglich die Kanten wurden mit der Kelle nachverdichtet, um eine höhere Stabilität zu erreichen.
Bei den ersten drei Serien (38 Platten) erfolgte kein Vorsieben der Späne, so dass durch die fehlende Sieblinie keine zufriedenstellende Oberflächenqualität und unsaubere Kanten entstanden. Weiterhin wiesen drei Platten ein anderes Materialgefüge auf (vergleichbar den gestampften Mischungen) als die übrigen Exemplare, was auf eine relativ große Streuung der Ausgangsparameter bei der Herstellung hindeutet. Eine durchgeführte Messung des Plattengewichtes und die anschließende Ermittlung der Rohdichten zeigte Werte zwischen 690 und 770 kg/m³ (Serie 1), zwischen 640 und 710 kg/m³ (Serie 2) sowie zwischen 580 bis 650 kg/m³ (Serie 3). 2
Die Platten dieser drei Serien sind nach ein bis zwei Tagen ausgeschalt und anschließend mit einer Plane abgedeckt sehr dicht stehend gelagert worden. Das führte bei den am Rand gelagerten Platten zu einer sehr starken Krümmung, vermutlich verursacht durch die unterschiedlichen Austrocknung der beiden

1 Betonage erfolgte in mehreren Abschnitten am cbm in Pasing, Jan. - März 2008
2 Messung an der TU-München, März 2008

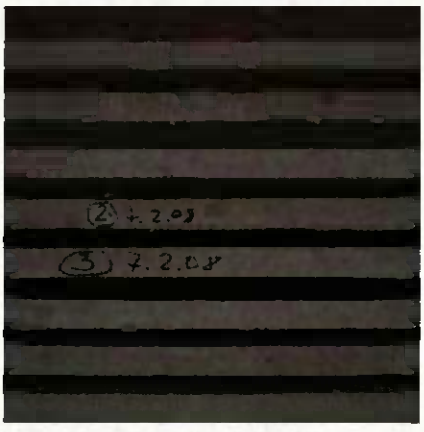


Abb.: 6.1 Krümmung der Platten

Abb.: 6.2 Messung Plattenkrümmung

Oberflächen (Abb. 6.1). Nach einem Zeitaum von 2-4 Wochen (je nach Betonagetermin) wurden die Platten der ersten Serie im normalen Raumklima waagerecht mit einem Zwischenraum von ca. 1,5 cm gelagert, was allseitigen Raumluftkontakt und damit eine gleichmäßigere Austrocknung sichergestellte. Dennoch wiesen eine Woche später die jeweils oben liegenden Platten Wölbungen von bis zu 5 mm in Plattenmitte auf (Abb. 6.2).

Dieses Phänomen war eine weitere Woche später auch bei zahlreichen Platten aus den mittleren Bereichen der Stapel erkennbar. Interessant scheint hierbei die Tatsache, dass ein Teil der Platten schalungsseitig eine konkave Durchbiegung zeigte, andere Platten eine konvexe, unabhängig von der Lagerungsseite. D. h. die Wölbung erfolgte in Plattenmitte teilweise nach oben, in anderen Fällen nach unten. Als Grund könnten hierfür evtl. große Differenzen in der Verdichtung des Materialgefüges an unterschiedlichen Stellen der Platten in Betracht kommen.
Auffällig war bei allen Platten der ersten drei Serien die schlechte Maßhaltigkeit, die sich in einer mittigen Verschlankung an beiden Längsseiten äußerte. Diese Verjüngung erreichte bei zwei Exemplaren einen Wert von 16 mm, was deutlich über den Anforderungen der EN 13964 liegt. In der Norm sind Grenzabmaße für die Herstellung von dickwandigen Decklagenbauteilen mit z. B. rechtwinkligen Kanten definiert, die Abweichungen von +/-1,5 mm bei Länge/Breite/Dicke, eine Abweichung von der Rechtwinkligkeit von 1/500 und eine positive bzw. negative Durchbiegung von 1/300 der gemessenen Länge zulassen.

Ein weiteres Problem der ersten drei Betonageserien trat erst zwei Wochen nach der Umlagerung der Platten in Raumklima auf. Eine große Anzahl der Platten wies deutlich sichtbare Risse von den Längsseiten in Richtung Plattenmitte auf, überwiegend in der Nähe der Auflagerpunkte (Abb. 6.3, 6.4). Bei der ersten Betonageserie waren nahezu alle Exemplare betroffen mit bis zu 3 Rissen pro Platte. Die Rissbreite betrug zunächst bis zu 1 mm, bei einer weiteren Messung zwei Wochen später max. 2 mm. Die Risslängen erreichten teilweise bis zu 100 mm. Auch hier wurde zwei Wochen später nochmals ein Vergrößerung um fast 50% festgestellt.
Bei den Platten der zweiten Serie waren nicht alle Exemplare betroffen; auch betrug hier die maximale Risslänge lediglich 70 mm. Die dritte Serie wies lediglich bei drei Platten drei kleine Haarrisse auf, welche sich im weiteren Zeitverlauf nicht vergrößerten. Trotz dieser Beeinträchtigungen zeigte ein Belastungsversuch nach DIN EN 13964 bei einer Platte der ersten Serie, dass die Tragfähigkeit im Rahmen der Vorgaben der Norm nach wie vor erfüllt ist.

Abb.: 6.3 Rissbildungen

Abb.: 6.4 Risslänge (M 1:2)

Ein erster Erklärungsansatz für die Rissbildung liegt in der vermutlich zu trockenen und zugigen Luft am letzten Lagerungsort, was zu einer zu schnellen Austrocknung der Platten an den Rändern im Vergleich zur Plattenmitte führte. Allerdings konnte dieses Phänomen bei früheren Betonagen und vergleichbaren Lagerungsbedingungen nicht festgestellt werden. Ferner war der Einfluß aus dem Sachverhalt, dass die Rissbildungen erst nach zwei Wochen auftreten, nicht eindeutig zu bewerten. Eine weitere Ursache der Risse könnte daher wiederum in den großen Unterschieden bei der Mischung der Rezepturen und Verdichtung der Betonagen sein. Bei Betrachtung der durchschnittlichen Trockenrohdichten der ersten drei Betonageserien zeigte sich ein Zusammenhang zwischen höherer Rohdichte und verstärkter Rissbildung.

Die aufgetretenen Probleme bei den ersten drei Betonagen führten zu einer Reihe von Veränderungen bei der Durchführung der folgenden vier Serien:
- Verwendung anderer Holzspäne
- Vorsieben der Späne (< 8 mm)
- Lagerung der Platten im Normklima (20°C, 65 % r.F.)

Diese Maßnahmen führten dazu, dass bei den letzten 4 Betonageserien eine wesentlich gleichmäßigere Oberflächenqualität entstand und eine Rissbildung (mit Ausnahme einiger kleinerer Haarrisse) weitestgehend ausblieb. Allerdings zeigten sich bei den Platten der sechsten und v. a. siebten Serie wiederum große Unebenheiten auf den Oberflächen wie auch Abplatzungen an den Kanten, was auf den zunehmenden Verschleiß der mehrfach verwendeten Schalungen zurückzuführen war.

Die in Kleinserien durchgeführten Betonagen zeigten, dass für die Herstellung von einer größeren Plattenanzahl das Mörtellabor nicht geeignet war. Es fehlten ausreichende Lagermöglichkeiten und letztlich konnten keine Qualitätskontrollen durchgeführt werden. Um einen reproduzierbaren Qualitätsanspruch zu gewährleisten, ist die Kooperation mit einer Baufirma erforderlich, die in einem seriellen Fertigungsverfahren über die entsprechenden Einrichtungen verfügt.
Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass die Ursache von Schwind- und evtl. Kriechverformungen, sowie die Rissbildung bei größeren Plattenformaten, in weiteren Versuchsreihen noch zu klären ist.
Der hohe Zeitaufwand für die folgende Oberflächenbearbeitung einerseits, wie auch die bei den Exemplaren der letzten Betonageserie nach wie vor vorhandene schlechte Maßhaltigkeit führte schließlich zur Beschränkung auf das Testprojekt Showroom der FH Rosenheim mit einem Deckenfeld aus HLB-Lamellen.

6.2. Holzleichtbetonelemente im Fassadenbereich

Für Anwendungen im Außenbereich stellt die Frage des Witterungsschutzes ein wichtiges Kriterium dar. Fassaden und Außenwandbekleidungen müssen ohne mechanische Schäden und ästhetische Beeinträchtigungen den Schutz vor Schlagregen, Temperatureinwirkung, Sonneneinstrahlung und Wind gewährleisten.

Bei der Landesgartenschau 2008 in Neu-Ulm bestand die Möglichkeit, im Rahmen des Themengarten "inside out – grün concret(e)" im Glacis Ost eine Musterfläche "Mauer Ost" zu präsentieren.[3] Mit diesen zusätzlich in die Projektarbeiten aufgenommenen experimentellen Untersuchungen sind nachfolgende Aspekte verbunden:

3 Planung: Schegk Landschaftsarchitekten BDLA, Haimhausen; unterstützt u.a. von der BetonBauteile Bayern im Bayerischen Industrieverband Steine und Erden e.V.

- Wie lässt sich die Arbeit mit Holzleichtbeton in die Abläufe der Betonfertigteilherstellung integrieren, welche Besonderheiten (Mischungen, Verarbeitungszeiten, etc.) sind zu beachten
- Verbund von Holzleichtbeton mit Trägerschicht aus Normalbeton (und entsprechende Herstellungsverfahren)
- Anforderungen an die Ausbildung der Ränder, Oberflächenbeschichtung und -behandlung
- Bewitterung einer größeren Holzleichtbeton-Fläche unter 'praxisnahen' Bedingungen

Bisher erfolgte die Herstellung der Proben und Muster ausschließlich im (kleinmaßstäblichen) Betonlabor. Daher fehlen Erfahrungen aus der Werkhalle. Für die Arbeiten konnte die Fa. Hieber[4] als Partner gewonnen werden, die zu den "führenden Unternehmen in der Fertigteilindustrie"[5] zählt.

6.2.1. Fertigteilwand mit Musterfläche

Die Arbeiten zur Fertigteilwand ermöglichten (Abb. 6.4) fertigungstechnische Randbedingungen bei Verbundkonstruktionen von Normal- mit Holzleichtbeton zu identifizieren und die Erprobung von Oberflächen-Bearbeitung im größeren Maßstab. Da auch zur Bewitterung bzw. Dauerhaftigkeit von Holzleichtbeton im Außenbereich weitere Untersuchungen folgen sollten, wurden hinsichtlich der Mischungen unterschiedliche Zusammensetzung gewählt.

Vorversuche[6] zielten auf eine besonders leichte Mischung (Frischbetonrohdichte 880 kg/m³ / Trockenrohdichte etwa 600 kg/m³). Hier zeigten sich eine Reihe von negativen Einflüssen durch das Bindemittel. Der relativ hohe Feuchtegehalt der Holzspäne hatte auf den Luftporenanteil kaum Einfluss.[7]

4 Fa. Hieber Betonfertigteilwerke GmbH, Wörleschwang
5 http://www.hieber-beton.de/unternehmen/ <16.04.2008>
6 Vorversuche fanden am cbm statt
7 Da die Erhärtung des HLB wesentlich von Ausgangstemperaturen der Mischung und der Umgebungstemperatur bei der Lagerung abhängig ist, wurde die Verwendung von Warmwasser erwogen.

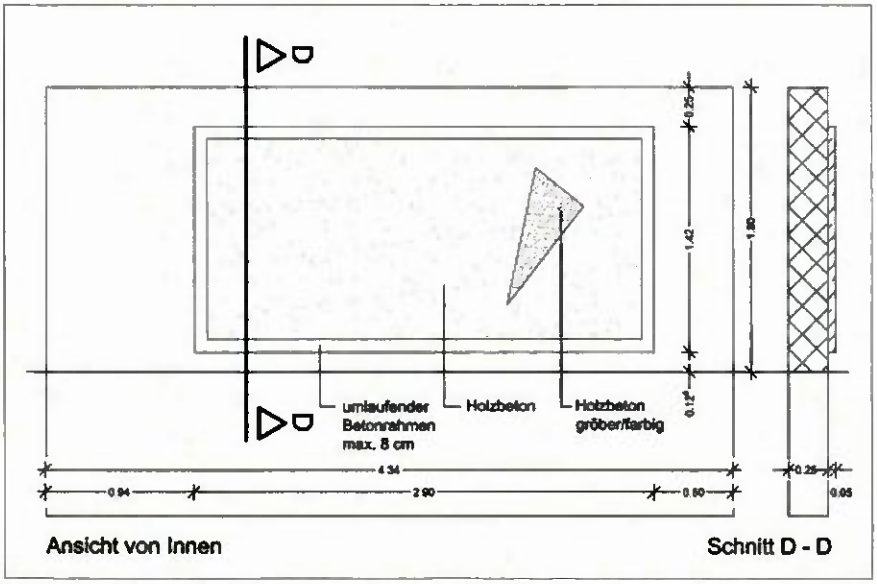


Abb.: 6.5 Musterfläche "Mauer Ost" (Planung: Schegk L. architekten BDLA)

Für die Herstellung[8] wurden frische Nadelholzspäne[9] eingesetzt. Für die Berechnung des w/z-Wertes erfolgte die Berechnung der Holzfeuchte mit dem Ultra-X-Gerät direkt vor der Betonherstellung. Ausgangsrezeptur war ein Holzleichtbeton mit 20 M.-% Holzspäne[10], als Bindemittel wurde der Schnellzement[11] verwendet. Es ist gelungen, mit dem Mischer der Fa. Hieber innerhalb von 3 min Mischdauer ausreichend Luftporen einzuführen, um eine plastische Konsistenz des Holzleichtbetons zu erhalten[12].
Die Rohdichte des Frischbetons lag bei 900 kg/m³. Nach der erfolgreichen Betonage der Musterproben erstarrte und erhärtete der Holzleichtbeton völlig unerwartet sehr langsam. Durch die weiteren Untersuchungen[13] wurde geklärt, dass die Ursache die Alterung des Zements in Verbindung mit niedrigen Temperaturen der Ausgangsstoffe und der Umgebung war. Für die zweite Betonage wurde ein frisch gelieferter Schnellzement eingesetzt und die Erstarrung verlief erwartungsgemäß auch bei niedrigen Temperaturen ab. Die Frischbetonrohdichte betrug 880 kg/m³.[14]

Demgegenüber, als formaler und farblicher Kontrast wurde für die Dreiecksfläche ein Holzleichtbeton mit dichterer Oberfläche eingesetzt, der zusätzlich in 'Körnung' und Farbigkeit als eine Art 'Fenster' abgesetzt ist (die Form lehnt sich an die Deckendurchbrüche des Themengarten Pavillons an). Das Farbpigment war ein synthetisches Eisenoxid[15], jeweils in der Zugabemenge variiert:
- Eisenoxidrot 110 M hell (3% bzw. 6 % v. Bindemittelmasseanteil)
- Eisenoxidrot 120 M (3% bzw. 9 % v. Bindemittelmasseanteil)

Nach der Betonage blieben die 4 Musterplatten fünf Tage mit Folie abgedeckt in der Schalung und wurden nach dem Ausformen anschließend in der Klimakammer (20° / 85% r.F.) zwischengelagert.
Bei allen Dreiecken zeigten sich auf der Schalungsseite Ausblühungen (in der Regel handelt es sich um „Abscheidungen von in Wasser schwer löslichen Kalziumkarbonat", die zu „weiße(n), schleierartige(n) bis fleckige(n) Beläge(n) auf betonoberflächen" führen)[16].

8 Herstellung bei Fa. Hieber 08.10.07 + 25.10.07 durch cbm (s. Abschlußbericht TP16)
9 Holzwerk Pröbstl GmbH
10 Berechnet im trockenen Zustand und bezogen auf Summe Holz und Zement
11 Betonage am 08.10.2007 mit Schnellzement, der 6 Monaten zuvor geliefert wurde
12 w/z-Wert 0,82
13 Untersuchungen fanden am cbm statt
14 Weitere Informationen über die Betonagen und Eigenschaften der hergestellten Holzleichtbetone sind dem AB TP16 zu entnehmen.
15 Vgl. http://www.kremer-pigmente.de <10.04.2008>
16 Vgl. Zement-Merkblatt Betontechnik, B27, 12.2003

Abb.: 6.6 Normalbeton C25/30

Abb.: 6.7 Holzleichtbeton (HLB)

Für die Fertigteilwand (4,34x3,00x0,25 m, bauseits in ein Köcherfundament aufgestellt) sollte ursprünglich die Holzleichtbetonfläche (d = 5 cm) aufbetoniert werden (Abb. 6.6). Da Vorsprünge (horizontale Rippen) zur Bildung von Staubnestern und stehendem Wasser führen können, wurden beide Oberflächen bündig ausgeführt.

Für die Ausführung der Fertigteilwand bestanden zwei Vorgehensweisen:
- Nass-in-Nass-Betonage
- Nachträgliche Verfüllung

Gearbeitet wurde zunächst mit der Nass-in-Nass-Betonage auf einem herkömmlichen Schaltisch (einer feststehenden Arbeitspalette).[17] Nach dem gesetztem Abschaler und der eingelegten Bewehrung erfolgte die Betonage der Tragschicht (d = 20 cm) mit einem C25/30-Beton. Anschließend wurde die Schalung für die Musterfläche aufgelegt und in Position gebracht. Parallel lief die Herstellung der Holzleichtbetonmischung. Die Überprüfung der Frischbetoneigenschaften zeigte keine Probleme, so dass auf eine Temperierung des Zugabewassers verzichtet werden konnte.

Bei der Betonage zeigten sich indes eine Reihe von Schwierigkeiten. Der verwendete Schnellzement führte zu einem raschen Einsetzen der Erstarrungsphase, was eine schnelle Durchführung der Arbeiten verlangte und besonders bei der räumlichen Trennung von Mischnanlage und Schalung im Fertigteilwerk zu zeitlichen Engpässen führt. Zusätzlich erschwerte dies die Arbeit an der aufwändigen Schalung. Insgesamt erwies sich die Nass-in-Nass-Betonage vom stofflichen Verbund der beiden Materialschichten als tauglich. Gleichwohl stell-

17 Fa. Hieber Betonfertigteilwerke GmbH, Wörleschwang, 06.11.2007

Abb.: 6.8 Schalungstisch

Abb.: 6.9 Einbringen von HLB

Abb.: 6.10 Verarbeiten von HLB

Abb.: 6.11 HLB-Musterfläche

ten sich im Bereich des Randes Normalbeton-Holzleichtbeton Problemstellen heraus. Hier kann es durch den anbetonierten Normalbeton mit gröberen und festeren Zuschlagsmaterial (Abb. 6.5, 6.6) zu Beschädigungen und Verunreinigungen kommen.

In einem zweiten Versuch (Nachträgliche Verfüllung) wurde das Verfahren umgestellt. Nach der Betonage der Fertigteilwand mit Aussparung für die Musterfläche erfolgte nach Abbinden des Normalbetons das Einbringen des Holzleichtbetons.[18] Die Verbundwirkung zwischen beiden Schichten gewährleistete eine Art 'Noppen-Baufolie'. Diese Herstellungsweise führte zu einem verbesserten Resultat.

- einfacheres Handling
- getrennte Handhabung der beiden Frischbetonchargen
- sauberes An- und Ausarbeiten des Randes

In beiden Fertigungsvarianten zeigte sich (exemplarisch), dass die Handhabung und die Einbettung von Holzleichtbeton im Bereich der Fertigteilherstellung (mit feststehender Arbeitspalette) gut zu integrieren ist. Hinsichtlich der Zuschlagsstoffe ist v. a. das Thema der Holzfeuchte und deren (exakte) Bestimmung für das Zugabewasser von Relevanz. Ferner ist bzgl. der Verarbeitungszeit die Art des Spezialbindemittels bzw. der zusätzliche Einsatz von Beton-Zusatzmittel (wenn für das Herstellungsverfahren notwendig z. B. Verzögerer) abzustimmen. Der Verbund zwischen beiden Betonschichten funktioniert bei beiden Vorgehensweisen. Je nach Anwendungsbereich (Gebäudefassade oder Lärmschutzwand) wären in kommenden Arbeitsschritten

- unterschiedliche Holzleichtbetonmischungen
- mehrschichtige Aufbauten
- Ausbildung von Fügungen (horizontal und vertikal)

noch eingehend zu untersuchen.

6.3. Versuche zu weiteren Herstellungsverfahren

Über die in Zusammenarbeit mit den Testprojekten durchgeführten konventionellen Herstellungsprozesse von Platten und Fertigteilen hinaus, wurden weitere Verfahren hinsichtlich Pressen, Pumpen und Strangpressen untersucht. Zum einen sollten für die Plattenherstellung Randbedingungen für eine serielle Produktion verbunden mit verbesserten mechanischen Eigenschaften geprüft werden und zum anderen galt es, neue Anwendungsmöglichkeiten von Holzleichtbeton als Putze oder Estriche zu sondieren.

6.3.1. Pressen von Platten

Bei dem "Druckumformverfahren erfolgt die Formerstellung durch Druckbeanspruchung".[19] Für die Verarbeitung von gießbaren Materialmassen wie Holzleichtbeton eignet sich das Pressformen. In einem taktweisen, diskontinuierlichen Vorgang werden in der Regel mittels Warm- oder Kaltpressen dreidimensionale Formteile hergestellt. Für plattenförmige Bauteile aus mineralisch gebundenen Werkstoffen kann auf eine Wärmezufuhr verzichtet werden. Auch wenn bei einfachen Geometrien die Werkzeugkosten niedrig sind, rechnet sich diese Fertigungsverfahren erst ab „mittleren Stückzahlen".[20]

Für Holzleichtbeton-Platten bietet dieser Herstellungsprozess die Möglichkeit einer seriellen Fertigung, das Erreichen höherer Festigkeiten und durch das Einlegen von einfachen Matrizen eine variable Oberflächengestaltung.

18 Fa. Hieber Betonfertigteilwerke GmbH, Wörleschwang, 46./47. KW 2007
19 Vgl. Kalweit et al., 2006, S. 387
20 Kalweit et al., 2006, S. 392

Bei Versuche mit Betonen einer erdfeuchten Konsistenz traten infolge des höheren Holz/Zementanteils und des manuellen Verdichtens geringe Festigkeiten auf. Dies führte auch zum Abrieb von Zement- und Holzpartikeln bei den Proben und insbesondere können bei größeren Platten (60/60/2 cm) Abplatzungen im Randbereich auftreten.

Um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern, wurde die Herstellung von Holzleichtbeton-Platten mit erdfeuchter Konsistenz in einer Plattenpresse für Holzwerkstoffe durchgeführt.[21] In der Pressanlage können Platten bis zu einem Format von 100x50 cm hergestellt werden. Die Ausgangsrezeptur S-E-H06 wurde auf die zu verarbeitende Menge und die Anforderungen der Presse (geringer Wasseranteil) modifiziert. Das Mischen erfolgte in einer Kunststoffwanne mit einem Handmixgerät, wobei zuerst die Holzspäne mit dem Schnellzement vermischt wurden und anschließend die Wasserzugabe erfolgte (Abb. 6.12). Die Mischdauer betrug 3 min. Danach wurde der Frischbeton in einen vorbereiteten Rahmen gefüllt (Einfüllhöhe ca. 5 cm) (Abb. 6.13). Die Verteilung des Pressdrucks erfolgte über eine in den Rahmen eingelegte Spanplatte. Der Pressvorgang dauerte insgesamt ca.15 min pro Platte. Während der Pressung war kein Wasseraustritt festzustellen (Abb. 6.15). Anschließend wurden die Platten mit einer PE-Folie luftdicht verschlossen und 28 Tage bei Raumtemperatur gelagert. Insgesamt sind 4 Platten (100x50x3 cm) hergestellt worden[22] (Abb. 6.14).

21 Betonage erfolgte in Zusammenarbeit mit der Holzforschung München und TP16

22 An 3 Platten erfolgte die Prüfung der Biegezugfestigkeit von Decklagen nach DIN EN 13964, an 1 Platte erfolgte die Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit nach DIN EN 310.

Abb.: 6.12 Mischvorgang

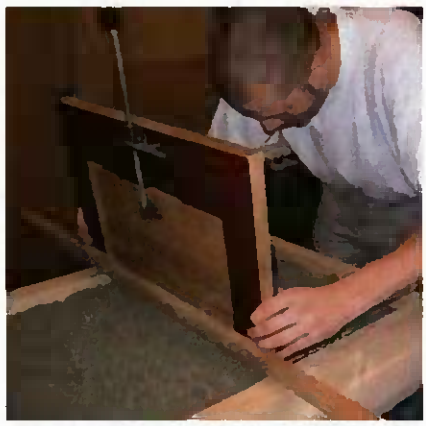


Abb.: 6.13 Abziehen der Mischung

Abb.: 6.14 gepresste Platte

Abb.: 6.15 Pressvorgang

Der durchgeführte Versuch hat gezeigt, dass sich Holzleichtbeton mit erdfeuchter Konsistenz ohne Probleme in einer Presse verdichten läßt. Diese Art der Herstellung bewirkt höhere Festigkeiten, was Prüfungen der Biegefestigkeit bestätigen.[23] Gleichzeitig erhöhen sich jedoch auch die Rohdichten. Hier könnte durch eine eine Optimierung des h/z-Wertes das Gewicht reduziert werden. Insgesamt wäre zu prüfen, inwieweit sich der Verdichtungsprozess auf die akustische Wirksamkeit auswirkt, da davon auszugehen ist, dass durch Druckbeanspruchung der Luftporenanteil sinkt.

6.3.2. Strangpressen von Holzleichtbeton

Bei dem Strangpressen wird das Material durch eine Matrize zu langen Strängen gepresst. Dieses kontinuierliche Verfahren ermöglicht durch eine entsprechende Formgebung der Matrize vielfältige Voll- und Hohlprofilgeometrien. Bei mineralisch gebundenen (und silikatkeramischen) Werkstoffen folgt dem Formgebungsprozess ein abschließender Erhärtungsvorgang (in der Regel durch Wärmebehandlung). Strangpressen stellt ein sehr wirtschaftliches Verfahren im Bereich der Massenfertigung dar und wird „fast ausschließlich im industriellen Bereich" eingesetzt.[24]

Parallel zum Pressen sollte die Eignung von Holzleichtbeton als Material für eine Strangpressverarbeitung getestet werden. Dieser Herstellungsprozess könnte für Holzleichtbeton, z. B. als Material für Fassadenplatten eine serielle Ferti-

23 Vgl. Kapitel 5, Prüfung der Biegefestigkeit
24 Vgl. Kalweit et al., 2006, S. 396

Betonage Rezeptur S-P-H06	**Gewicht Zuschlag trocken (Holzfeuchte 12 %)**	**Gewicht Zuschlag feucht (Holzfeuchte 52 %)**	**Betonage tatsächlich verwendet**
Zuschlagstoffe	kg/m³	kg/m³	kg/50ltr.
Schnellzement	450	450	22,50
Holz (fein<6mm)	115	195	9,70
Wasser	400	306	14,50
Zusatzstoffe (Farbe)	-	-	-
Zitronensäure	-	-	-
Luftporen			
Summe	965	951	-
Frischbetoneigenschaften			
Konsistenz (cm)	42		
W/Z Wert (gesamt/effektiv)	0,68 / 0,67		

Abb.: 6.16 Rezeptur S-P-H06-VST auf Basis S-P-H06

Abb.: 6.17 Konsistenzbestimmung

Abb.: 6.18 Strangpressen(Ölkernextruder)

gung ermöglichen. Im Vorversuch sollten diesbzgl. die Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften und die Randbedingungen für die Verarbeitung untersucht werden[25].
Im ersten Versuch wurde der Holzleichtbeton durch einen handbetriebenen Ölkernextruder[26] gepresst. Ausgangsrezeptur war die Mischung S-P-H06-VST (Abb. 6.16). Bei der Durchführung traten nachfolgend aufgeführte Probleme auf:
Der Schnellzement führte zu sehr kurzen Abbindezeiten. Durch einen evtl. zu starken Druck im Extruder kam es zu einer Entmischung von Wasser und der Holzzementmischung (Abb. 6.18). Aufgrund der schnellen Verarbeitung und der rasch einsetzenden Hydratation mussten die einzelnen Arbeitsschritte auf mind. zwei Personen aufgeteilt werden. Weitere Hemmnisse bestanden darin, dass der Versuch im Zusammenhang mit einer anderen Betonage durchgeführt werden musste, da der zur Verfügung stehende Mischer nur große Mengen (15 kg) verarbeiten kann. Im Rahmen der durchgeführten Versuchsarbeiten konnte kein stranggepresstes Formteil aus Holzleichtbeton hergestellt werden.

Bei der Durchführung künftiger Versuche sind vorab in Testreihen die geeigneten Frischbetoneigenschaften genau zu ermitteln. Es hat sich gezeigt, dass eine Übertragung von Mischungszusammensatzung und Konsistenz aus anderen Verarbeitungsprozessen nicht ohne weiteres möglich ist. So wäre denkbar, statt einem Spezialzement einen Portlandzement als Bindemittel zu verwenden, um die Abbindezeiten zu verlängern. Dies erfordert jedoch Testläufe zum Verhältnis zwischen Abbindezeiten und Formstabilität.

6.3.3. Pumpversuche

In einem weiteren Schritt sollte die maschinelle Verarbeitungsmöglichkeit von Holzleichtbeton als Mörtel für Estrich und Putzanwendungen untersucht werden. Für erste Versuche wurden die Anforderungen an Putzmörtel zugrunde gelegt. Aufgabe des Putzes ist die Gestaltung von Oberflächen und die Erfüllung von bauphysikalische Aufgaben. Als Orientierung dienten die in den Normen genannten Eigenschaften und Anforderungen an Festmörtel[27].

Die Durchführung der experimentellen Arbeiten erfolgte mittels einer marktüblichen Pumpmaschine (Abb. 6.20).[28] Wesentliche Ausgangsparameter waren Holzpartkelgröße der Holzleichtbetonmischung (<15 mm) und das Fassungsvermögen der Maschine. Auf Basis der Ausgangsrezeptur S-P-H06 wurde eine

25 Betonage erfolgte am Materialprüfamt der TUM in Zusammenarbeit mit TP16, 2007
26 Fleischwolf mit aufgesetzter Rechteck Matritze, Leihgabe von Franz Glinz, 2007
27 Vgl. EN 998-1, DIN EN 13914-1,2 und DIN V 18550
28 Versuche fanden am Materialprüfamt der TUM statt in Zusammenarbeit mit TP16 und Fa. Knauf PFT.

Rezeptur (Rohdichte ca.1000 kg/m3)	Ausgangs-mischung berechnet	Betonage berechnet	Betonage 1.	Betonage 2.	Betonage 3.[1]
Zuschlagstoffe	kg/m3	kg/80l	kg/40l	kg/40l	kg/20l
Schnellzement	842	67,335	33,668	33,668	16,834
Holz (<8mm, HF 48 M.-%)	280	19,404	9,702	9,702	4,851
Wasser	351	31,097			
Zitronensäure		0,404	0,202	0,27	
	1473				

Abb.: 6.19 Rezeptur S-P-H06-Vpu . [1] Bindemittel: Portlandzement, Holzspäne vorgesiebt

Rezeptur S-P-H06-Vpu erstellt (Abb. 6.19). Der Zementanteil wurde deutlich erhöht, da sich bei den Vorversuchen im Labor aufgrund der kurzen Mischdauer in der Pumpmaschine keine homogene pumpfähige Mischung zeigte. Um eine Verarbeitungsdauer von ca. 1 Std. zu gewährleisten, ist der Mischung Zitronensäure zugegeben worden, um die Hydratation des Frischbetons zu verzögern (Abb. 6.20).

Die vorgesiebten Holzspäne (bis 8 mm) und die Zementanteile wurden vorab gemischt und trocken in den Füllbehälter eingebracht. Durch die Wasserzugabe und dem Wasserdruck ließ sich die Konsistenz des Materials einstellen. Da eine Hydratisierung des Holz/Zementgemisches aufgrund der Holzfeuchte bereits beim Vormischen einsetzte, erstarrte der Mörtel teilweise schon im Pumpschlauch. Es bildeten sich Festanteile (einzelne Rundlinge), die die Transportfähigkeit zunächst erschwerten und nach kurzer Zeit völlig blockierten (Abb. 6.22). Ferner führten zu große Holzpartikel zu Verstopfungen von Schlauch und Düse.

Im zweiten Pumpversuch wurde das Vormischen auf 3 min begrenzt. Nach wenigen Minuten zeigten sich die gleichen Probleme bzgl. Abbindezeit und Holzpartikelgröße.

Im dritten Pumpversuch wurden die Parameter nochmals verändert:

- Volumenreduzierung auf 20 l
- Vorsieben der Holzspäne mit einem 4-mm-Sieb
- Bindemittel Portlandzement

Bereits im Zugabebehälter traten Probleme mit der Trockenmischung auf. Der Feuchtegehalt des Holzmaterials führte zu ersten Reaktionen mit dem Bindemittel innerhalb der Maschine (Abb. 6.23). Es zeigte sich, dass die Holzpartikel immer noch zu groß waren, mit der Folge einer raschen Verstopfung der Spritzdüse.

Abb.: 6.20 Pumpmaschine Fa. Knauf PFT

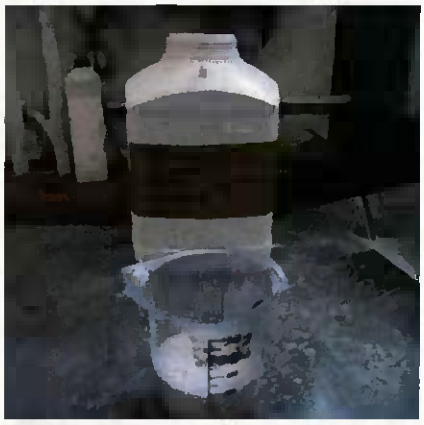


Abb.: 6.21 Zitronensäure

Abb.: 6.22 Gepumpter HLB-Frischbeton

Abb.: 6.23 Förderbehälter

Die Eigenschaften des Schnellzementes (geringe Abbindezeit) führten zu Problemen im Ablaufprozess. Zusätzlich beschleunigte die relativ hohe Holzfeuchte (42%) die Hydratationsphase des Frischbetons. Der Einsatz eines Verzögerers (Zitronensäure) führte hierbei zu keiner nennenswerten Verbesserung. Die Holzfeuchte beeinträchtigte bereits die Transportfähigkeit der Trockenmischung.
Ein weiterer wichtiger Parameter hinsichtlich der Verarbeitbarkeit von Holzleichtbeton als Material für Putz- und Estrichanwendungen besteht in der Partikelgröße des Zuschlagstoffes Holz. Die max. Größe darf (bei der eingesetzten Maschine) 4 mm nicht überschreiten. Beide vorgenannten Aspekte verursachten möglicherweise auch die Probleme bei Einsatz eines Portlandzementes.

Als Basis für weitere Testreihen resultiert daraus eine Reduktion der Holzfeuchte und der Holzpartikelgrösse und der Einsatz von Standardzements als Bindemittel. Da jedoch hinsichtlich der Verarbeitbarkeit zusätzlich eine Vielzahl von Parameter zu klären sind, was innerhalb der Arbeitsschwerpunkte nicht zu leisten war, erfolgten keine weiteren Versuche.

6.4. Material und Oberfläche

Für den Einsatz von Holzleichtbeton im Hochbau stellte die Oberflächenbearbeitung einen wichtigen Aspekt dar. Insbesondere in der aktuellen Architekturdiskussion gewinnen Materialien und ihre Oberflächen mit einer jeweils spezifischen Farbigkeit, den Texturen und Strukturen hinsichtlich der Wahrnehmung, Nutzung und Konstruktion an Bedeutung. Oberflächen übernehmen neben der

Abb.: 6.24 Gesägt mit Steinsäge (M 1:1)

Abb.: 6.25 Geschliffen (M 1:1)

Abb.: 6.26 Gebürstet mit Stahlb.(M1:1)

Abb.: 6.27 Sandgestrahlt (M1:1)

Eigenschaft als Raumhülle auch informative Aufgaben.[29]
Für einen sichtbaren Einsatz des Materials ist in der Regel jedoch eine nachträgliche Oberflächenbearbeitung erforderlich (bestimmt die Ablesbarkeit des Zuschlagsmaterials und die Tiefe der Strukturen). Im Rahmen der Projektarbeit erfolgte daher die Erprobung unterschiedlicher mechanischer und technischer Bearbeitungsverfahren.

6.4.1. Bearbeitung von Holzleichtbetonproben

Holzleichtbeton mit plastischer Konsistenz ist nach der Erhärtung durch eine homogene und monochrome Oberflächenschicht charakterisiert. Diese resultiert aus den Feinstanteilen des Zementleims, die sich dort ablagern. Um die besonderen Oberflächenqualitäten des Materials auch gestalterisch im Innenraum oder im Bereich der Fassade wirksam werden zu lassen, ist eine Nachbearbeitung erforderlich. Die Betone mit erdfeuchter Konsistenz erreichten durch den hohen Holzanteil (ca. 40% Holzmasseanteil) eine Oberfläche, die denen von Holzwerkstoffen, wie Span- oder Holzwolleleichtbauplatte ähnlich ist. Diese erforderten keine zusätzliche Bearbeitung nach dem Aushärten.

Anhand von Plattenmustern wurden verschiedene Oberflächenbearbeitungen durchgeführt (Abb. 6.24-6.27). Sägen (Steinsäge) und Schleifen (Körnung 40) erzeugten eine gleichmäßige Oberfläche, die die Holzpartikel im Zementstein und die Offenporigkeit des Materials sichtbar machten. Durch die manuelle Bearbeitung mit einer Bürste enstanden aufgrund der ungleichmässigen Handhabung eher unregelmäßige und löchrige Oberflächen, die in Ausnahmefällen auch erwünscht sein können. Ein ähnliches Ergebnis zeigten auch Versuche mit einem Sandstrahler. Die vorgenannten Bearbeitungsmethoden erfolgen in der industriellen Fertigung durch versierte Handwerker, so dass hinsichtlich der Qualität deutlich bessere Ergebnisse zu erwarten sind.
Hinsichtlich Zuschnitt und Konfektionierung mit der Band- bzw. Kreissäge zeigte sich, dass sich Holzleichtbeton mit herkömmlichen Holzwerkzeugen einfach bearbeiten ließ.

6.4.2. Holzleichtbetonplatten für Decklagen

Durch die manuelle Herstellung im Mörtellabor entstanden größere Unebenheiten in der Oberflächenstruktur und Maßhaltigkeit der Platten. Für die Anwendung als Deckenlamellen mit zweiseitigen Sichtflächen ist jedoch die Qualität der Oberflächen relevant.
Die liegende Betonage der Holzleichtbetonplatten führte zu zwei verschiedenen Oberflächen. Zum einen die Schalungsunterseite (Abb. 6.28), je nach verwendetem Material und eingesetzter Matrize glatt und die Oberseite rauh. Die Oberflächen auf der glatten Schalungsseite waren weniger porös. Die Ursache besteht im Absetzen der Zementfeinstanteile im Frischbeton, was dazu führte, dass die Luftporen geschlossen werden. Es gab vereinzelt Häufungen von Poren (i.d.R. < 3 mm) und glatte Flächen, sowie Verdichtungen von Feinstanteilen zu den Plattenrändern hin. Weiterhin waren starke Farbunterschiede zu beobachten, die auf eine evtl. Entmischung von Holz und Zement hindeuteten. Die Schalungsoberseite war durch das manuelle ‚Abziehen' unebener. Teilweise waren einzelne Rindenpartikel sichtbar, die zu Flecken und Verfärbungen führten (Abb. 6.29).

Die Oberflächenqualität ließ die Bearbeitung mit einem Handschleifgerät angesichts der hohen Anzahl der Platten als zu zeitintensiv erscheinen. Um eine möglichst rationelle Oberflächenbearbeitung der gesamten Betonage zu ge-

29 vgl. Sauer, 7/2006, S. 51

währleisten, sollten die Platten mit einem Plattenbandschleifer (Schleifpapier der Körnung 100) oberflächenbearbeitet werden.[30] Ziel sollte ein geringer und gleichmässiger Materialabtrag sein. Dazu wurde eine noch feuchte Testplatte bearbeitet. Die mechanische Bearbeitung der obersten Betonschicht (je nach Ebenheit bis max. 4mm[31]), führte zu einem einheitlichen und monochromen Erscheinungsbild (Abb. 6.30). Im Nahbereich wurden die unterschiedlichen Spangrößen des Holzzuschlages sichtbar, was einen durchaus gewollter Effekt sein kann. Der entstehende Schleifstaub verfüllte die Poren, der durch eine anschließende Luftdruckreinigung teilweise entfernt wurde. Helle Flecken ließen jedoch auf weitere Feinststaubanteile schließen. Insgesamt ist zwischen akustischer Wirksamkeit (offenporiges Gefüge) und Erscheinungsbild der Oberfläche (geschlossenes Gefüge) abzuwägen.[32]
Für das Testprojekt Rosenheim wurden daher aus den letzten vier Serien jeweils 30 Lamellen (80/25/3 cm) mittels einer Steinsäge herausgeschnitten und anschließend die Oberflächen mit einem Bandschleifgerät manuell (Schleifpapier Körnung 60) bearbeitet.

Durch die Wahl der Bearbeitungstechnik können Ablesbarkeit des Zuschlagsstoffes und Tiefe der Strukturen individuell bestimmt und somit gezielt unterschiedliche gestalterische Wirkungen eingestellt werden.
Um die akustische Wirksamkeit von Holzleichtbeton und eine sichtbare Anwen-

30 Vorversuche in der Schreinerei der TUM, 03.2008
31 vgl. DIN 18500
32 Die vorgesehene Bearbeitung mittels einer stationären Bandschleifmaschine ließ sich trotz eines ersten positiven Vorversuchs letztlich aufgrund extremer Staub- und teilweise Funkenentwicklung nicht umsetzen.

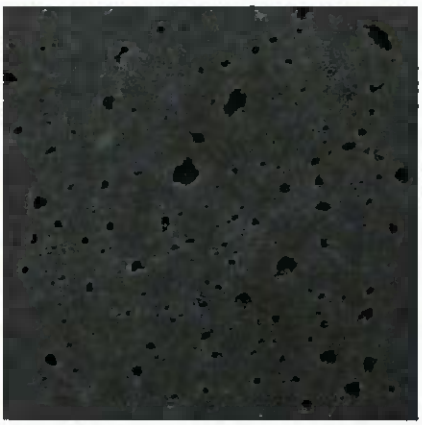


Abb.: 6.28 Schalungsseite glatt (M 1:1)

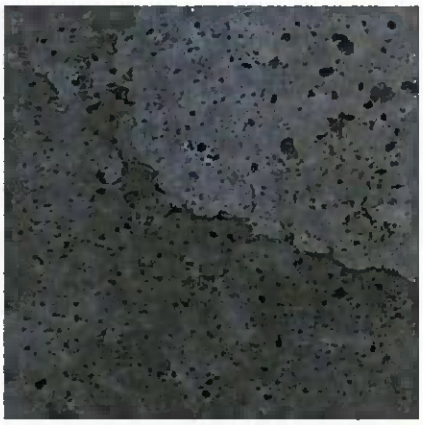


Abb.: 6.29 Schalungsseite rauh (M 1:1)

Abb.: 6.30 Geschliffen (M 1:1)

Abb.: 6.31 Luftdruck gereinigt (M 1:1)

dung zu realisieren, ist eine nachträgliche Oberflächenbearbeitung erforderlich. Die maschinelle Bearbeitung durch Sägen und Schleifen erwies sich unter den gegebenen Umständen als sehr arbeitsintensiv. Hinzu kommt die hohe Staubentwicklung durch das Abschleifen der Feinstanteile, die gesonderte Absauganlagen erforderlich macht. Daher sind für die Plattenherstellung alternative Bearbeitungsmethoden wie z.B. Sandstrahlen und/oder die Vorbehandlung der Schalung mit Verzögerer analog der Waschbetonherstellung zu untersuchen.

6.4.3. Ergänzende Versuche

Im Rahmen eines Seminars mit dem Titel „Materialexperimente mit Holzleichtbeton“[33] wurden Versuche zur plastischen Oberflächengestaltung von Holzleichtbeton durchgeführt.
Es wurden zwei Schalungen mit unterschiedlichen Strukturen in den Abmessungen 30/30/5cm aus beschichteten Spanplatten und EPS-Schaum hergestellt.[34] Ausgangsrezeptur war die Mischung S-E-H06.[35]
Die Probe mit abgetreppter Plattformstruktur wurde per Hand gestampft, woraus aufgrund der verhältnismäßig geringen Verdichtung sehr offenporige Oberflächen resultierten (Abb. 6.32). Diese Herstellung beeinträchtigt daher die Handhabung und Stabilität der Platte (Trockenrohdichte ca. 630 kg/m³). Die Probe mit Pyramidenstruktur wurde mit einer Presse (Druck ca. 7,7 bar) verdichtet, was zu einer gleichmäßigen Oberfläche und einer höheren Stabilität führte (Abb. 6.33). Bei einer Trockenrohdichte von ca. 680 kg/m³ beträgt das Plattengewicht ca. 34 kg/m². Insgesamt erwies sich der Holzleichtbeton als leicht formbar. Durch den Einsatz von Matrizen könnten so vielfältige Oberflächenstrukturen hergestellt werden.

6.4.4. Bearbeitung der Außenwandmusterfläche

Ein wesentliches Ziel beim Betonbau ist die Schaffung eines äußerst dichten Gefüges sowie einer geringen Porosität der Oberfläche, damit der Beton vor dem Eindringen insbesondere von Wasser geschützt ist. Daraus resultieren für den Einsatz von Beton im Außenbereich von Fassaden in der Regel sehr dich-

33 Wintersemester 2006/07, betreut von Dr.-Ing. Roland Krippner, Dipl.-Ing. Dagmar Niebler, Dipl.-Ing. (FH) Konstanze Elbel; TU München, Lehrstuhl für Baukonstruktion und Baustoffkunde, Prof. Florian Musso
34 Studentenarbeiten von Christina Aigner und Martin Förtsch
35 Betonage erfolgte im Materialprüfamt der TU-München in Zusammenarbeit mit dem TP16, Dezember 2006

Abb.: 6.32 „Abgetreppter Platformstruktur“ (30x30x5 cm), (o. M.)

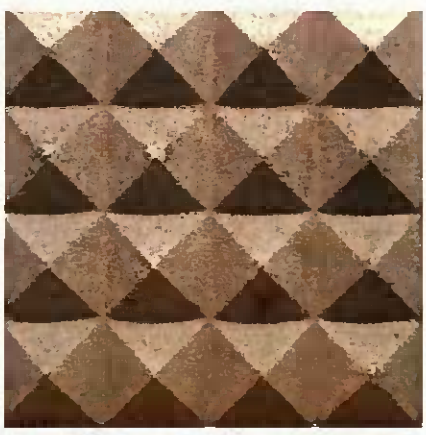


Abb.: 6.33 „Pyramidenstruktur“ (30x30x5 cm), (o.M.)

te Oberflächen für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit. Der Holzleichtbeton – vor allem die leichteren Mischungen – weist demgegenüber ein poröses Gefüge auf.
Anhand von Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen konnte jedoch eine sehr gute Dauerhaftigkeit und hohe Witterungsbeständigkeit von Holzleichtbeton festgestellt werden.[36] Einer der Gründe für diesen Frost-Tau-Widerstand scheint die besondere 'Zähigkeit' des Gefüges von Zement-Holz-Wasser-Mischungen zu sein, das trotz offenporiger Oberflächen Abplatzungen verhindert.
Allerdings werden mit derartigen Prüfungen nur mechanische Beschädigungen untersucht, d. h. eventuelle visuelle Beeinträchtigungen durch Ablagerung, Einnisten von pflanzlichen und/oder tierischen Organismen bleiben davon unberücksichtigt. Gerade bewitterte Oberflächen mit sehr porösem Gefüge können diesbzgl. in der Regel ein großes Problem darstellen.

Im Rahmen von vorbereitenden Untersuchungen zur Herstellung der Fertigteilwand erfolgte die Betonage eines Musterelements (1x1 m).[37] Dabei sollte zunächst die Verbundwirkung zwischen Normalbeton und Holzleichtbeton überprüft werden. Die Herstellung der beiden Schichten erfolgte im Nass-in-Nass-Verfahren. Bzgl. Festigkeit und Verbund konnten 'augenscheinlich' keine Probleme festgestellt werden[38].[39]

36 Vgl. Krippner, 2004, S. 119ff.
37 Fa. Hieber Betonfertigteilwerke GmbH, Wörleschwang, 42./43. KW 2007
38 Allerdings zeigten sich Probleme mit den Abbindezeiten bei einem hergestellten Probewürfel der äußerst vorsichtig entschalt werden mußte, so dass das Musterelement zunächst länger als erwartet in der Schalung verblieb.
39 Vgl. e-mail Herr Loders, BetonBauteile Bayern (09.10.2007)

Abb.: 6.34 Schleifen von Holzleichtbeton

Abb.: 6.35 Stocken von Holzleichtbeton

Abb.: 6.36 Sandstrahlen der Musterfläche

In einem weiteren Schritt wurde die Oberfläche in verschiedenen Bereichen bearbeitet:

- geschliffen, Rundschleifer (Schleifpapierstärke 80) (Abb. 6.34)
- gestockt, Handmaschine mit Vorsatz; Körnung (Abb. 6.35)
- gestrahlt, Schmelzkammergranulat aus Kohlekraftwerken (glasig, amorph); Körnung 0,25 bis 1,9 mm

Gerade beim Holzleichtbeton bestimmt die Oberflächenbearbeitung die Ablesbarkeit des Zuschlagsmaterials und die Tiefe der Strukturen. Die Verfahren unterscheiden sich im Abtrag der oberflächennahen Feinstanteile und verstärken somit die Porosität und damit die Rauhigkeit der Oberfläche.[40]

Allerdings sind gegenüber der Bearbeitung von Normalbeton-Oberflächen Unterschiede herauszustellen. Während beim Normalbeton das Zuschlagsmaterial in der Regel höhere Festigkeiten aufweist, verhält es sich beim Holzleichtbeton umgekehrt. Als organisches, 'weiches' Material lassen sich die Holzpartikel insbesondere bei handwerklichen und maschinellen Bearbeitungsverfahren nicht derart herausarbeiten.
Insgesamt zeigten sich beim Bearbeiten von Holzleichtbeton Vorteile beim Strahlen, mit einer gleichmäßigeren, keine Verschmierungen aufweisenden Oberfläche.
Im Zusammenhang mit der Fertigteilwand für die Landesgartenschau in Neu-Ulm erfolgten ergänzende Tests zur Oberflächenbearbeitung. Insgesamt wird bei der Fertigteilwand in der direkten Gegenüberstellung der 'wärmere' Grundfarbton des Holzleichtbetons im Vergleich zum Normalbeton gut sichtbar. Ausgehend von dem positiven Resultat und durch die einfachere Handhabung

40 Vgl. Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 64ff.

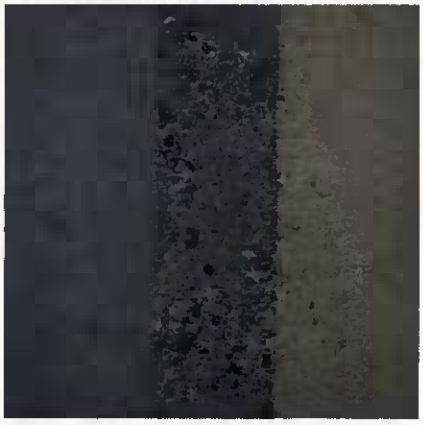


Abb.: 6.37 Übergang Holzleicht/ Beton

Abb.: 6.38 Farbiger Holzleichtbeton

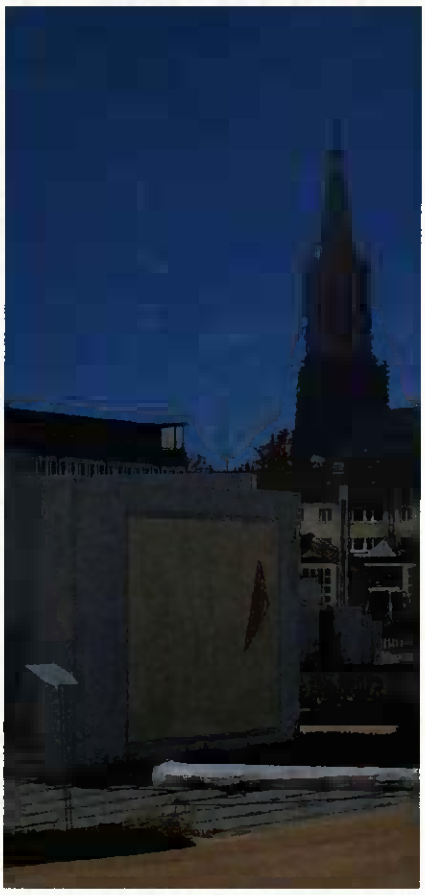


Abb.: 6.39 Fertigteilwand

wurde die Musterfläche gestrahlt.[41] (Abb. 6.35) Dagegen erschien für die Bearbeitung der Dreiecke schleifen geeignet, um angesichts des kleinen Formats und der teils spitz zulaufenden Ecken Abplatzungen zu vermeiden.

Bei beiden hergestellten Fertigteilwänden stellte der Übergang von Normalbeton zu Holzleichtbeton noch eine gewisse gestalterische Unschärfe dar. Für einen durchaus möglichen, 'akuraten' Flächenabschluß ist eine sorgfältige Betonage erforderlich. Darüber hinaus bestehen Optionen hinsichtlich einer
- geometrischen Ausbildung
- stofflichen Nachbehandlung

Die Ausbildung von (Schatten-)Fugen erhöht den Schalungsaufwand, kann jedoch scharfkantige Randabschlüsse gut sicherstellen. Bei der Nachbehandlung ist das Einfräsen von Kehlen ebenso denkbar, wie die Ausbildung von handwerklich oder maschinell bearbeiteten Randstreifen.

Für die Fertigteilwand wurde ein rahmender, gestockter Streifen, der die Holzleichtbetonmusterfläche begrenzt gewählt. Da es sich um eine Schauwand handelt, lassen sich in Relation zum Holzleichtbeton sowohl die 'reine' Sichtbetonfläche als auch der Normalbeton mit der 'freigelegten' Gesteinskörnung in dieser Weise gut zeigen. Das Zusammenspiel beider Betonarten eröffnet vielfältige und reizvolle Material-Kontraste. (Abb. 6.37)
Die Frage der unmittelbaren Randausbildung stellt sich bei der Fertigteilherstellung in der Regel derart nicht. Sicherlich wird man Materialwechsel stets im Zusammenhang von Elementabmessung und Bauteilfügung berücksichtigen, für die es ein großes Spektrum an Lösungsprinzipien gibt.[42]

Mit der Fertigteilwand, die gleichzeitig Demonstrationsprojekt und Experimentierfläche ist, konnte im M 1:1 neben Aspekten wie Handhabungsmöglichkeiten im Fertigungsprozess v. a. die für Gebäudefassaden wichtigen gestalterischen Optionen für eine Oberflächenbearbeitung (gleichermaßen in der Fern- und der Nahsicht) aufgezeigt werden (Abb. 6.38, 6.39).
Über die abzuwartenden Erkenntnisse aus der Bewitterung hinaus sind wichtige Grundlagen für die Anwendung von Holzleichtbeton im Außenbereich auch als Basis für weiterführende Arbeiten geleistet.

6.4.5. Dauerhaftigkeit und Beständigkeit

Mischungen mit hohem Bindemittelanteil neigen zu Ablösungen von Zementsteinpartikeln. Um eine robustere Oberfläche in Folge von taktiler und hap-

41 Fa. Hieber Betonfertigteilwerke GmbH, Wörleschwang, 21.11.2008
42 Vgl. Herzog et al., 2004, S. 32ff.

Abb.: 6.40 Probe (S-P-H06) (M 1:1)

Abb.: 6.41 Probe (S-E-H20) (M 1:1)

tischer Beanspruchung sowie eine Gebrauchstauglichkeit mit notwendiger Reinigungsmöglichkeit zu gewährleisten, kann eine Beschichtung von Holzleichtbetonoberflächen im Innenraum sinnvoll sein.
Um die Dauerhaftigkeit und Abriebfestigkeit zu verbessern, wurde bei zwei Mustern der Mischung S-E-H20 und S-P-H06 ein weißer Anstrich im Airlessverfahren aufgebracht (Abb. 6.40, 6.41).[43] Das poröse Materialgefüge blieb augenscheinlich erhalten, so dass die akustische Wirksamkeit wohl nicht beeinträchtigt wurde. Der Abrieb des Zementsteins verringerte sich, gleichzeitig wurde jedoch die reizvolle Eigenfarbigkeit des Holzleichtbetons überdeckt. In weiteren Testreihen ist eine farblose Grundierung zu untersuchen, um die Materialfarbe zu erhalten.

Unbeschichtete, bewitterte Oberflächen unterliegen hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Aussehen Veränderungen. Das Maß einer gewünschten Anpassung (Patinaschicht) bzw. gewollten Beständigkeit ist auch abhängig von einer Nachbehandlung, die bei Sichtbetonflächen[44] und bei Holzflächen unter Berücksichtigung des baulichen Holzschutzes in der Regel nicht erforderlich sind.
Bei einem Material wie dem Holzleichtbeton, das zwischen den Baustoffwelten angesiedelt ist, können Beschichtungen zur Reduzierung der Empfindichkeit, besonders bei stark witterungsexponierten Flächen, erforderlich sein.

Zur Beurteilung des Einflusses von Beschichtungsmaßnahmen auf die Dauerhaftigkeit und ggf. auf farbliche Veränderungen wurde die Oberfläche des o.g. Musters in fünf Bereiche unterteilt (jeweils etwa 150 bis 200 mm). Neben einer

43 Zusammenarbeit mit der Fa. Pinta
44 Vgl. Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 69ff.

Abb.: 6.42 Oberfläche vor....

Abb.: 6.43 und nach Beschichtung

Abb.: 6.44 Nach ca. 2 Wochen (M1 ≈ 20)

Abb.: 6.45 und 6 Monaten (M ≈ 1:20)

unbehandelten Referenzfläche sind dies vier unterschiedlichen Beschichtungssysteme als Oberflächenschutz (Abb. 6.41-6.44):[45]

- Remmers "Funcosil BI"[46]
- Nanobeschichtung "optinano [stone] premium A (Feuchtigkeitsschutz)"[47]
- "Ortolan 2000 HV" (Einkomponentige Schalholzversiegelung, 'Klarlack')[48]
- PCI-Siliconal W "Wetter-Schutzimprägnierung - für Fassaden"[49]

Um eventuelle mechanische und/oder visuelle Veränderungen zu überprüfen, wurde das Musterelement zunächst horizontal lagernd und danach vertikal aufgestellt der Bewitterung ausgesetzt.

Unabhängig von der Bearbeitungsmaßnahme sind je nach Beschichtungssystem deutliche Auswirkungen auf das Erscheinungsbild der Oberfläche erkennbar. Gegenüber der Referenzfläche (unbehandelt) führt insbesondere die Verwendung von 'Klarlack' zu einer Abdunkelung, die auch eine Intensivierung des 'Grundtons' bewirkt (Abb. 6.44, 6.45).
Bei den anderen drei Beschichtungen ist demgegenüber eine leichte Aufhellung festzustellen. Am stärksten tritt dieser Effekt bei der marktüblichen PCI-Siliconal W-Beschichtung auf. Zwischen dem eingesetzten, ebenfalls gebräuchlichen Remmers "Funcosil BI" und der Nanobeschichtung sind nur graduelle Unterschiede auszumachen.

45 Fa. Hieber Betonfertigteilwerke GmbH, Wörleschwang, 25./26.10.2007. Vgl. e-mail Herr Loders, BetonBauteile Bayern (29.10.2007); e-mail Herr Kurz, Hieber Betonfertigteilwerke GmbH, Wörleschwang (14.04.2008)
46 Vgl. http://www.remmers.de/html/de/s276.html <18.11.2007>
47 Vgl. Fa. Firma medcura; http://www.optinano.de/index.htm <19.11.2007>
48 Vgl. http://www.mc-bauchemie.de <19.11.2007>
49 Vgl. http://www.pci-augsburg.de <18.11.2007>

Abb.: 6.46 Klarlack (M≈1:2)

Abb.: 6.47 unbehandelt (M≈1:2)

Abb.: 6.48 unbehandelt, feucht (M≈1:4)

Abb.: 6.49 Nanobeschichtung (M≈1:4)

Nach knapp einem halben Jahr waren bzgl. der Oberflächen wenig Veränderungen wahrzunehmen. Selbst die unbehandelte Holzleichtbetonoberfläche wies bei den drei verschiedenen Bearbeitungsbereichen kaum Abweichungen auf. (Abb. 6.43, 6.44) Besonders die Beschichtungen »Remmers "Funcosil BI"« und »PCI-Siliconal W« zeigten eine nahezu unveränderte Oberflächengüte. Vereinzelt ist es beim unbehandelten Holzleichtbeton zu Abplatzungen gekommen (die wohl auf die anfänglich horizontale Lagerung, mit Schneebedeckung und Eisbildung, zurückzuführen sind).
Deutlich wurde allerdings eine Vergrauung der Holzpartikel, wodurch der farbliche Akzent zwischen Zementstein und organischem Zuschlagsmaterial ein stückweit verloren geht. Für eine derartige 'Konservierung' stellen Beschichtungen adäquate Nachbehandlungsmaßnahmen dar. (Abb. 6.46)
Die Wirkung der Beschichtung tritt augenscheinlich bei Befeuchtung zutage. Während bei der unbehandelten Holzleichtbetonoberfläche das Wasser in die Poren eindringt, und entsprechend die Fläche abdunkelt, (Abb. 6.48) fließt bzw. perlt (Nanobeschichtung) die Flüssigkeit an den beschichteten Flächen sofort ab. (Abb. 6.49)
Allerdings handelt es sich hier um einen momentanen Effekt, denn in dem offenporigen Gefüge kann die Feuchtigkeit problemlos entweichen und die Oberfläche schnell wieder abtrocknen. Inwieweit dies bei punktueller bzw. teilweiser Bewitterung zu visuellen Störungen führt, müssen ebenfalls erst Langzeitversuche zeigen.

Neben der Gewährleistung der Witterungsbeständigkeit und eines möglichst farbneutralen Auftrags spielen auch die Kosten für die (zusätzliche) Oberflächenbehandlung keine unwesentliche Rolle. Allerdings läßt sich zur Relation Oberflächenbeschichtung / Kosten feststellen, daß die beiden günstigsten Beschichtungsmaterialien ("Funcosil BI"« und »PCI-Siliconal W« etwa 10–15 €/m²) sowohl hinsichtlich der Farbveränderung und der Schutzwirkung gut funktionieren. Während die 'Klarlack'-Beschichtung "Ortolan 2000 HV" (15–20 €/m²) etwa 50 bis 100 % teurer ist, belaufen sich die Kosten für Nanobeschichtung erwartungsgemäß deutlich darüber und erhöhen sich um etwa Faktor 6 bis 7 (60–70 €/m²).[50]

Diese ersten Einschätzungen mit unterschiedlichen Oberflächenbeschichtungen stellen gewiss noch kein abschließend gesichertes Resultat dar, da insbesondere Langzeiterfahrungen fehlen. In diesem Zusammenhang werden über die Projektlaufzeit hinaus Erfahrungen sowohl bei den beschichteten Modell-Musterflächen wie auch bei der Fertigteilwand dokumentiert und ausgewertet.

50 Vgl. e-mail Herr Kurz, Hieber Betonfertigteilwerke GmbH, Wörleschwang (14.04.2008)

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten materialspezifischen und experimentellen Untersuchungen zum Holzleichtbeton ergänzen und bestätigen die viel versprechenden Potentiale im Hinblick auf den Einsatz dieses Verbundwerkstoffes für den Innenraum und im Bereich von Gebäudefassaden.
Die Ergebnisse aus der Schallabsorptionsprüfung zeigen, dass Bauteile aus Holzleichtbeton (rechnerisch ermittelte) mittlere Schallabsorptionsgrade von α_w = 0,10-0,65 aufweisen, dies bei Kenngrößen, die zwischen Holzzementplatte (Duripanel ca. 1300 kg/m³, α_w = 0,04) und Holzwolleleichtbauplatte (Fibrolith ca. 400 kg/m³, α_w = 0,45) liegen. Somit können Holzleichtbetonplatten die Nachhallzeiten reduzieren und die raumakustische Situation im Neubau und im Bestand verbessern.
Hinsichtlich des Brandschutzes wird bei einem Holzmasseanteil bis ca. 20% die Baustoffklasse A2 erreicht. Insbesondere für den Innenraum ergeben sich dadurch auch Einsatzmöglichkeiten für den baulichen Brandschutz. Auch werden von Holzleichtbetonplatten die Anforderungen an das Kapselkriterium (weitgehend) erfüllt, wie diese in der Novellierung der Musterbauordnung (MBO), z. B. der neuen Gebäudeklasse 4, gefordert sind.
Die raumumschließenden Oberflächen stellen einen wichtigen Einfluss auf die visuelle Behaglichkeit dar. Auch hier zeigt sich beim Holzleichtbeton, dass das organische Zuschlagsmaterial insgesamt zu einem 'wärmeren' Grundfarbton gegenüber konventionellen Sichtbetonflächen führt. Holz gilt insbesondere bei der Nutzung von Tageslicht als guter Lichtmodulator und hier erreichen die Holzleichtbetonoberflächen ein homogenes Farbspektrum, welches das Lichtmilieu im Raum positiv beeinflusst.

Im Bereich von Gebäudefassaden nimmt aufgrund energetischer Aspekte der Wärmeschutz eine zentrale Rolle ein. Hier erreicht Holzleichbeton λ-Werte von 0,14-0,28 W/mK bei Rohdichten zwischen 540 und 700 kg/m³. Damit liegt der Baustoff bzgl. der Wärmeleitfähigkeit im Bereich von Porenbeton.
Ein weiterer wichtiger Parameter bei Außenwandaufbauten besteht in der Verbesserung der Wärmespeicherfähigkeit, besonders bei Leichtbauten. Erste Abschätzungen zur Kombination von Holzleichtbeton mit mikroverkapseltem PCM zeigen, dass damit ein spürbarer Beitrag zur Erhöhung der thermischen Speicherfähigkeit möglich wird und Reduktionspotentiale gegenüber sommerlicher Überhitzung bestehen.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zu Holzleichtbeton für Decklagen von Unterdecken und als Wandbekleidung von Vorsatzschalen konnte gezeigt werden, dass bzgl. Kantenfestigkeit, Stabilität und Oberflächenstruktur der Holzleichtbeton als Material für Innenraumbauteile gut geeignet ist. Messungen von Platten (120/50/3 cm) ergaben mittlere Biegefestigkeiten von 0,8-3,1 N/mm² und mittlere Biege-E-Module von 833-2160 N/mm² bei Rohdichten von 550-950 kg/m³. Damit ist das Material mit Holzwolleleichtbauplatten (Biegezugfestigkeiten von 0,4-1 N/mm² bei Rohdichten von 400-450 kg/m³) vergleichbar. Auch liegen die Durchbiegungen von 0,94-0,47 mm von HLB-Platten innerhalb dem von der EN 13964 geforderten Bereich.
Für die direkte Montage von Holzleichtbetonplatten auf eine Holzunterkonstruktion bzw. eine Abhängung von der Rohdecke mit Hilfe von Holzverbindungsmitteln wurden charakteristische Festigkeitswerte für unterschiedliche Lastfälle ermittelt. Messungen und Testbetonagen zeigten ausreichende Festigkeiten und Kantenstabilität, die sich durch verbesserte Rezepturen hinsichtlich Schallabsorption und mechanischem Verhalten noch optimieren lassen.
Mit den geplanten und durchgeführten Demonstrationsprojekten ist es gelungen, bauphysikalische, konstruktive und gestalterische Aspekte zu evaluieren. In Rosenheim konnte die in einer Simulation gezeigte Lamellendecke realisiert

werden. Der Büroraum in München zeigte, dass im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen Holzleichtbeton auch als Wandabsorber akustische Verbesserungen und eine gestalterische Aufwertung von Raumsituationen ermöglicht.
Allerdings traten bei der Herstellung im Betonlabor fertigungstechnische Schwierigkeiten auf. Da jeweils nur die Durchführung von Kleinserien möglich war, gab es eine Reihe von Qualitätsschwankungen. Insbesondere bei der Betonage größerer Plattenformate zeigten sich erhöhte Schwindverformungen und Rissbildungen, deren Ursachen in weitergehenden Untersuchungen noch zu klären sind.

Für den Bereich der Gebäudehülle sind verschiedene Aufbauten mit Holzleichtbeton im Außen- und Innenbereich konzipiert und (vorab-)untersucht worden. Dabei konnten erste Einschätzungen zu tragenden Außenwandelementen aus Holzleichtbeton im Verbund mit Massivholz und Normalbeton erarbeitet werden. Darüber hinaus erfolgten Testreihen hinsichtlich der Eignung als Material für Elementwände und Fassadenplatten für hinterlüftete Konstruktionen.
Bei den Versuchen zur Klärung baukonstruktiver und bauphysikalischer Aspekte zum Schichtenaufbau von Holzleichtbeton im Verbund mit Massivholz als tragende Außenwand galt es zunächst, die Frage nach dem geeigneten Verbindungsmittel zu klären. Dabei zeigten in Kurzzeitscher- und Windsogversuchen Kerve und Schubverbinder deutlich Vorteile. Wärme- und feuchteschutztechnische Nachweise belegten die Funktionstüchtigkeit derartiger Konstruktionen.
In Zusammenarbeit mit einem Betonfertigteilunternehmen konnten bei der Realisierung eines Demonstrationsprojektes (im Rahmen der Landesgartenschau in Neu-Ulm in 2008) Erkenntnisse zu fertigungstechnischen Abläufen beim Verbund von Holzleichtbeton mit Normalbeton gewonnen werden. Zwei Betonagen zeigten insgesamt positive Ergebnisse, allerdings waren bzgl. der Verarbeitungsdauer von Holzleichtbeton in der Werkhalle Anpassungen erforderlich. Ergänzende Versuche zur Oberflächenbearbeitung und -beschichtung (von Musterplatten bis zur Fertigteilwand) führten ebenfalls zu guten Resultaten. Auch wenn es sich bei diesen Tests um nur wenige Versuchsreihen handelte, bestätigen die Ergebnisse die Leistungsfähigkeit von Holzleichtbeton als Material für Deckschichten in Verbundkonstruktionen.
Erste Tests zu Elementwänden mit Holzleichtbeton als raumseitig angeordnete Schicht belegten prinzipiell auch eine Eignung für derartige Wandaufbauten. Mischungen mit Rohdichten zwischen 850 und 1050 kg/m³ zeigten ausreichende Auszugsfestigkeiten der Gitterträger als Grundlage für weiterführende Versuche.
Im Rahmen eines studentischen Baustoffkundeseminars erfolgten ergänzende experimentelle Versuche zu Holzleichtbeton als Material für Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden. Dabei konnte die Machbarkeit auch komplexer Geometrien und plastisch strukturierter Oberflächen aufgezeigt werden. Fassadenbekleidungen aus Holzleichtbeton sind frostbeständig und eröffnen auch als nichtbrennbarer Baustoff (Klasse A2 nach DIN 4102) somit neue Einsatzbereiche, funktional und gestalterisch.

Weiterhin sind im Rahmen der Projektarbeiten Vorversuche zu unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren (Pumpen, Pressen, Strangpressen) von Holzleichtbeton vorgenommen worden, die zur Klärung von Randbedingungen für spätere industrielle Herstellungsprozesse und für alternative Anwendungsbereiche (z.B. als Wand-/Deckenputz, Estrichbelag) von Bedeutung sind. Dabei waren beim Pressen von Platten mit ausgewählten Mischungen keine Probleme festzustellen. Hinsichtlich des Pumpens und Strangpressens zeigten sich Schwierigkeiten bei den Frischbeton-Eigenschaften: u. a. zu schnelles Abbinden, größerer Einfluss der Holzfeuchte auf die Verarbeitung. Es wurde deutlich, dass derartige experimentelle Untersuchungen eine enge Kooperation mit Baufirmen (Know-How und Maschinentechnik) erfordern. Da es sich um ergänzende (über

die Projektinhalte hinausgehende) Arbeitsschritte handelt und aufgrund von terminlichen Engpäßen erfolgten im Rahmen des Projektes keine weiteren Tests.

Holzleichtbeton ist ein Baustoff für sichtbare Anwendungen, der sich primär für Wand- und Deckenoberflächen sehr gut eignet; alternative Innenraumanwendungen, z. B. als Bodenbelag, sind ebenfalls denkbar. Das feinkörnige, organische Zuschlagsmaterial ermöglicht gestalterisch hochwertige Oberflächen, die mit weiteren Zusätzen noch verfeinert und akzentuiert werden können. Für einen sichtbaren Einsatz des Materials ist in der Regel jedoch eine nachträgliche Oberflächenbearbeitung erforderlich (bestimmt die Ablesbarkeit des Zuschlagsmaterials und die Tiefe der Strukturen), für den Einsatz im Außenbereich ggf. zusätzlich eine Beschichtung.
Eine sehr gute Dauerhaftigkeit und hohe Witterungsbeständigkeit von Holzleichtbeton belegten Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen (Krippner 2004). Allerdings wurden mit derartigen Tests nur mechanische Beschädigungen untersucht, d. h. evtl. visuelle Beeinträchtigungen bleiben davon unberücksichtigt. Gerade bewitterte Oberflächen mit sehr porösem Gefüge können diesbzgl. in der Regel ein großes Problem darstellen. Zur Witterungsbeständigkeit im Außenbereich erfolgten verschiedene Tests in Kooperation mit Teilprojekt 16. Dabei lassen sowohl unbehandelte als auch beschichtete Oberflächen eine ausreichende Robustheit und Widerstandsfähigkeit erwarten. Allerdings fehlen noch Langzeitversuche, daher sind weitere materialspezifische Untersuchungen und Tests an 1:1-Mustern notwendig. Mischungen mit hohem Bindemittelanteil neigen zu Ablösungen von Zementsteinpartikeln. Um hier robustere Oberflächen zu erreichen, ist für Anwendungen im Innenraum mit starker taktiler und haptischer Beanspruchung ggf. eine Beschichtung sinnvoll.

Sowohl für die Außenwand wie auch im Innenraum sind Fragen zur Dauerhaftigkeit und Witterungsbeständigkeit noch nicht hinreichend untersucht und geklärt worden, wobei die Witterungsbeständigkeit ein wesentliches Kriterium für den Einsatz im Außenbereich darstellt.
Weitergehende Versuche zur Verbundkonstruktion von Holzleichtbeton mit Normalbeton bzgl. Aufbauten und Schichtenfolgen sind notwendig. Die aufgezeigten Potentiale für Holzleichtbeton als raumseitige Schicht in der Elementwand sind weiter zu untersuchen und zu prüfen.
Hinsichtlich der erforderlichen Nachbehandlung in Form der Oberflächenbearbeitung sind Optimierungen notwendig, um die Herstellung zu vereinfachen und Kosten zu reduzieren. Hier wäre zu prüfen, ob das Einstreichen der Schalung mit einem Verzögerer analog zu Waschbeton einen praktikablen Lösungsansatz darstellt.

Mit den durchgeführten materialspezifischen Untersuchungen und der Realisierung von Demonstrationsprojekten ist es gelungen, die Grundlagen zu den stofflichen Eigenschaften von Holzleichtbeton deutlich zu erweitern und die Leistungsfähigkeit in exemplarischen Anwendungsbereichen aufzuzeigen. Es hat sich gezeigt, dass Holzleichtbeton hinsichtlich des funktionalen und konstruktiven Verhaltens eine Marktfähigkeit gegenüber Konkurrenzprodukten aufweist, mit ästhetischen Vorteilen bei hochwertigen Oberflächen.
Die vorliegenden Ergebnisse belegen, dass Holzleichtbeton über vielversprechende Potentiale als Material für Bauteile und Bauelemente sowohl in der Gebäudefassade wie auch im Innenausbau verfügt. Durch die Variationsmöglichkeiten bei den einzelnen Baustoffkomponenten kann das Kompositmaterial mit unterschiedlichen mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften hergestellt und somit gut auf den jeweiligen Einsatzbereich funktional und gestalterisch angepasst werden.

8. Anhang

8.1. Übersicht der verwendeten Holzleichtbeton-Mischungen

Bezeichnung Forschungsbericht	Bezeichnung TP16/ Versuchsberichte
	Standardmischungen TP16
S-E-H06	S2-F1-ER
S-E-H20	S2-F2
S-P-H06	S2-F1-W
	Mischung Pressen
S-E-H06-VPr	S2-F1-ER
	Mischung Strangpressen
S-P-H06-VSt	S2-F1-W
	Mischung Pumpen
S-P-H06-Vpu	S2-F1-W (mehr Zement)
	Brandschutz
S-P-H06-B-15	15% Masseanteil Holz
S-P-H06-B-20	20% Masseanteil Holz
S-P-H06-B-25	25% Masseanteil Holz
S-E-H06-B-30	30% Masseanteil Holz
	Raumakustik
S-P-H06-A-1/A-6	S1-F1-W (p1,2,5,6,7,8)
S-E-H06-A-1/A-3	S2-F1-ER (p3,9,FL)
S-E-H20-A-1/A-3	S2-F2 (p4,p10,FB)
S-EP-H06-A-1	S2-F1-W/S2-F2
	Wärmeleitfähigkeit
S-P-H06-W-1/W-2	S2-F1-W (p1-2)
S-E-H20-W-1	S2-F2 (p4)
	Licht
S-P-H06-L	S2-F1-W (Probe MI Nr.45)
SON-P-H06-L	SON-F1-W (Probe MI Nr.46)
PL-P-H04-PCM-L-1	RI
PL-P-H04-PCM-L-2	RVIII

Schema Nomenklatur der Bezeichnungen im Forschungsbericht:
Zementart - Konsistenzbereich - Holzspangröße - Baupysik/Verarbeitung (bei Bedarf) - fortlaufende Nummerierung (bei Bedarf) - Zusatzinformation (bei Bedarf)

S	Schnellzement
PL	Portlandzement
SON	Sonderbindemittel
PCM	Latentwärmespeichermaterial
E	erdfeuchte Konsistenz
P	plastische Konistenz
H04	Holzspäne < 4mm
H06	Holzspäne < 6mm
H20	Holzspäne < 20mm

8.2. Literaturverzeichnis

Alfes, Christoph: Frischbetondruck von leichtverdichtbarem Beton und selbstverdichtendem Beton in Elementwänden. In: Sonderdruck 116 aus „Beton + Fertigteil-Technik", 11/2004

Alfes, Christoph: Weiße Wannen mit Elementwänden - Erfahrungsbericht mit ausgeführten Beispielen. In: Systembauteile in High-Tech: Bausysteme mit Gitterträgern. Hrsg.: Fachvereinigung Betonbauteile mit Gitterträgern e.V. Burgwedel 2006, S. 19-27.

Bathon, Leander; Bletz, Oliver; Kocher, Dominik: Neue Dimensionen beim Holz-Beton-Verbund. In: mikado. Unternehmermagazin für Holzbau und Ausbau, 12. Jg., 10/2004, S. 54-57

Becker Klausjürgen, Pfau Jochen, Tichelmann Karsten: Trockenbauatlas. Grundlagen, Einsatzbereiche, Konstruktionen, Details. 3. Auflage. Köln 2004

Beraus, Erich: Holzspanbeton. Naturbaustoff - ökologisch und wirtschaftlich. In: Beton + Fertigteil Jahrbuch 2001. Wiesbaden u.a. 2001, S. 103-109

Buchanan, Peter: Renzo Piano Building Workshop. Complete Works. Volume 1. London 1993

Buchanan, Peter: Renzo Piano Building Workshop. Sämtliche Projekte. Band 3. Stuttgart 1997

Charisius, Kurt: Über das Wesen, die Herstellung und Eigenschaften von Holzbeton. Berlin 1947

Danler, Andreas: Lichtmodulator Holz, Behaglichkeit durch Holz und Licht. In: Holz Innovativ 2005. Symposium mit Fachausstellung, Rosenheim, 06.-07.04.2005. Hrsg.: Bayern Innovativ GmbH. Nürnberg 2005, o.S.

Danler, Andreas: Lichttechnische Untersuchung von Holzleichtbetonproben. Interner Bericht der durchgeführten Messung im LichtLabor Bartenbach. Aldrans März 2006

Sauer, Christine: Neue Materialien. Experimentelle Oberflächen. In: Deutsches Architektenblatt, 7/2006, S. 51

Döhrer, Antje: Zur Anwendung der Holz-Beton-Verbundbauweise im Brückenbau. In: Kuhlmann, Ulrike; Schänzlin, Jörg (Hg.): Forschungskolloquium: Holzbau Forschung + Praxis. Stuttgart 2006, S. 61

Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Berlin 2003

Fasse, Richard: Das Steinholz. Über das Steinholzmaterial und seine praktische Anwendung. Leipzig 1921

Flach, Michael; Schönborn, Florian: Tiroler Holz-Beton Verbundplatte. Bericht zum Forschungsvorhaben 807602. Innsbruck 2005.

Gliniorz, Kai-Uwe: Holz als Zuschlagsstoff. In: Architektur & Technik, 24. Jg., 1/2001, S. 36-39

Gliniorz, Kai-Uwe: Holzleichtbeton auf dem Weg zum Markt. Von der Grundlagenforschung an der ETH in die Praxis. Publication IBOIS 00:20. Lausanne 2000, S. 2-3

Gliniorz, Kai-Uwe; Natterer, Julius: Formbauteile aus Holzleichtbeton. Abschlussbericht KTI-Projekt 3497.1. Lausanne 2000

Guggenberger, Andrea; Ronach, Dietmar; Wölflinger, Franz: Holzbetonverbundkonstruktion. Verstärkung einer Dippelbaumdecke . In: Beton- und Stahlbetonbau, 98. Jg., 10/2003, S. 633-634

Häberle, Jörg: Untersuchung des Brandverhaltens von Holzleichtbeton in Anlehnung an DIN EN ISO 1716. Prüfbericht Nr. B7170. Holzforschung München, Juli 2007

Häberle, Jörg: Untersuchung des Brandverhaltens von Holzleichtbeton in Anlehnung an DIN EN ISO 13823. Prüfbericht Nr. B8101. Holzforschung München, März 2008

Heiduschke, Andreas; Haller, Peer: Verbundsystem aus Stahlfaserbeton und Holz. In: Kuhlmann, Ulrike; Schänzlin, Jörg (Hg.): Forschungskolloquium: Holzbau Forschung + Praxis. Stuttgart 2006, S. 69

Heinz, Detlef; Urbonas, Liudvikas: Teilprojekt 16: Holzbeton. In: (Interner) Bericht zum Statusseminar "Holzbau der Zukunft". Centrum Baustoffe und Materialprüfung, München 2006

Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner: Fassaden Atlas. Edition Detail. München 2004

Hilz, Gerhard: Absorptiv - Die akustische Wirkung von Materialien im Innenraum. In: db Deutsche Bauzeitung, 3/2006, S.71

Jungwelter, Norbert: Trockenbaupraxis mit Mineralfaserdecken. Köln 1983

Kalweit, Andreas; Paul, Christof; Peters, Sascha; Wallbaum, Reiner (Hrsg.): Handbuch für Technisches Produktdesign. Material und Fertigung. Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. Berlin 2006

Kelletshofer, Werner: Ermittlung der Tragfähigkeit von Holzschrauben in Holzleichtbeton. Untersuchungsbericht Nr. 7600033/08-1. Technische Universität München, MPA Bau. Prüfstelle Holzbau, München, Mai 2008

Kind-Barkauskas, Friedbert; Kauhsen, Bruno; Polónyi, Stefan; Brandt, Jörg: Beton Atlas. Entwerfen mit Stahlbeton im Hochbau. München 1995

Krippner, Roland: Zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden. Dissertation. München: TU München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Mai 2004. http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/ar/2004/krippner.html <08.06.2008>

Krippner, Roland: Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien. In: Bauphysik, 27. Jg., 3/2005, S. 173-180

Kuhlmann, Ulrike; Schänzlin, Jörg (Hg.): Forschungskolloquium: Holzbau Forschung + Praxis. Tagungsband. Stuttgart, 23./24.02.2006. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2006, S. 43-82

Michelfelder, Birgit: Trag- und Verformungsverhalten von Kerven als Verbundmittel. In: Kuhlmann, Ulrike; Schänzlin, Jörg (Hg.): Forschungskolloquium: Holzbau Forschung + Praxis. Stuttgart 2006, S. 75

Mommertz, Eckhard: Schallabsorption von Materialproben aus Holzleichtbeton. Prüfbericht Nr. M68 925/1. Müller BBM, Planegg b. München, April 2007

Mommertz, Eckhard: Schallabsorption von Holzleichtbeton. Akustische Anwendungen in Räumen. Prüfbericht Nr. M68 925/2. Müller BBM, Planegg b. München, April 2007

Mommertz, Eckhard: Schallabsorption von Holzleichtbeton. Akustische Verbesserungen in einem exemplarischen Büroraum. Prüfbericht Nr. M68 925/3. Müller BBM, Planegg b. München, April 2008

Pawlowski, Robert: B01 Sicherheitskonzepte, Materialkennwerte. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Fachwissenschaften Bautechnik. [http://www.hb.bv.tum.de/LB/Fachwissenschaften/SF/Berechnungshilfen/B01_SiKo+MatKennw.pdf <21.03.2007>]

Peter, Mandy: Hoch Hinaus - Mehrgeschossiger Holzbau. Brandschutztechnische Aspekte und Konzepte für mehrgeschossige Holzhäuser. In: 1. Hessischen Baugipfel Holz. Tagungsband. Darmstadt, 02. November 2006 [http://www.hessischer-baugipfel.de <09.06.2008>]

Rautenstrauch, Karl: Entwicklung der Holz-Beton-Verbundbauweise. In: König, Gert; Holschemacher, Klaus; Dehn, Frank (Hrsg.): Holz-Beton-Verbund. Innovationen im Bauwesen - Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Berlin 2004, S. 1-21

Richter, Antje; Winter, Stefan: Vorstellung eines neuen Verbundmittels für Wand- und Deckenelementen aus Hochleistungsbetonen und flächigen Holzbauelementen aus Massivholz oder Hochleistungs-Holzwerkstoffen. In: Kuhlmann, Ulrike; Schänzlin, Jörg (Hg.): Forschungskolloquium: Holzbau Forschung + Praxis. Stuttgart 2006

Scherer, Robert: Die künstlichen Fußböden- und Wändebeläge. Wien u.a. 1907

Schönborn, Florian: Holz-Beton-Fertigteilelemente. In: Kuhlmann, Ulrike; Schänzlin, Jörg (Hg.): Forschungskolloquium: Holzbau Forschung + Praxis. Stuttgart 2006, S. 43-50

Schönborn, Florian; Flach, Michael; Barbu, Marius; Feix, Jürgen: Leistungsfähige Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. In: Holz-Zentralblatt. 131. Jg., Nr. 92, Dezember 2005, S. 1251-1254

Seidel, Arnim: Aus Stab ward' Platte. Holzbau im Wandel. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 51. Jg., 8/2003, S. 26-29

SOBIC-Seminar „Leichte Baustoffe - thermisch schwer". Freiburg, Fraunhofer-Solar Building Innovation Center SOBIC / Fraunhofer ISE, 03.12.2003

Tröger, Fritz: Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit nach DIN EN 310. Prüfbericht Nr. 123 LB07. Holzforschung München, Oktober 2007

Tröger, Fritz: Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit nach DIN EN 310. Prüfbericht Nr. 128 LB07. Holzforschung München, November 2007

Uygun, Abidin: Messung der Schallabsorption von Holzleichtbetonproben. Interner Bericht der durchgeführten Messung bei der Fa. OWA, Odenwald Faserplattenwerk GmbH in Amorbach, März 2006

Vidi, Stefan: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Holzleichtbetonproben. Prüfreport ZAE 2-1007-16 (2007). Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. Würzburg, Oktober 2007

Zement-Merkblatt Betontechnik B27. Ausblühungen – Entstehung, Vermeidung. Verein deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf, Dezember 2003

8.3. Verzeichnis der verwendeten Normen

DIN EN ISO 354, 2003-12: Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen (ISO 354:2003)

DIN EN 998-1, 2003-09: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 1: Putzmörtel

DIN 1048-1, 1991-06: Prüfverfahren für Beton; Frischbeton

DIN 1055-4, 2005-03: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten

DIN EN ISO 1182, 2002-07: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Nichtbrennbarkeitsprüfung (ISO 1182:2002)

DIN EN ISO 1716, 2002-07: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Bestimmung der Verbrennungswärme (ISO 1716:2002)

DIN EN ISO 3382, 2000-03: Akustik - Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter (ISO 3382:1997)

DIN 4102-1, 1998-05: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen

DIN 4109, 1989-11: Schallschutz im Hochbau; Anforderungen u. Nachweise

DIN EN ISO 10534-2, 2001-10: Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion

DIN EN ISO 11925-2, 2002-07: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Teil 2: Entzündbarkeit bei direkter Flammeneinwirkung (ISO 11925-2:2002)

DIN EN 13238, 2001-12: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Konditionierungsverfahren und allgemeine Regeln für die Auswahl von Trägerplatten

DIN EN 13501-1, 2007-05: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten

DIN EN 13501-2, 2008-01: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu

ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen
DIN EN 13823, 2002-06: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen
DIN EN 13914-1, 2005-06: Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen - Teil 1: Außenputz
DIN EN 13914-2, 2005-07: Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen - Teil 2: Planung und wesentliche Grundsätze für Innenputz
DIN EN 13964, 2007-02: Unterdecken - Anforderungen und Prüfverfahren
DIN 18041, 2004-05: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen
DIN V 18550 Vornorm, 2005-04: Putz und Putzsysteme – Ausführung
DIN EN 26891, 1991-07: Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983)
VDI 2569: Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro. Ausgabe: 1990
EnEV 2007: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung) vom 24.07.2007

8.4. Veröffentlichungen und Vorträge

Bildschön, strukturiert, ökologisch – Mauern und Wände mit besonderer Oberfläche. In: grün - concret(e). Ausstellungsbeitrag der süddeutschen Zement- und Betonhersteller auf der Landesgartenschau Neu-Ulm 2008. Ostfildern, 2008, S. 18, 21
[Niebler, Dagmar; Krippner, Roland; Urbonas, Liudvikas:] Neue Anwendungen für Holzbeton. Aktuelle Forschungsergebnisse zum "Holzbau der Zukunft". In: Baustofftechnik. Fachmagazin für mehr Baustoff-Fachwissen, 25. Jg., 12/2006, S. 22
Krippner, Roland: Lightweight wood particle concrete - properties and potential applications. In: Peck (Ed.): In: Concrete. Design, Construction, Examples. Detail Practice. Munich / Basel (u.a.), 2006, S. 38-43.
Krippner, Roland: Holzleichtbeton. In: Mit Holz bauen. BDZ Jahrbuch 2006. Innovationen, Trends, Projekte. Hrsg.: Bund Deutscher Zimmermeister. München, 2006, S. 78
Krippner, Roland: Potentiale mehrgeschossiger Hochbauten in Holz- und Holzverbundwerkstoffen. - In: 11. Internationales Holzbau-Forum. Holz wird zum Markenzeichen. Der Holz(haus)bau und seine vielen Gesichter, Garmisch Partenkirchen, 07.-09.12.2005. Hrsg.: Hochschule für Architektur, Bau und Holz. Biel/Stuttgart: Forum-holzbau/Fraunhofer IRB Verlag, 2005, o.S.
Krippner, Roland: Holzleichtbeton - Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten. In: Peck, Martin (Hg.): In: Baustoff Beton. Planung, Ausführung, Beispiele. Detail Praxis. München, 2005, S. 38-43.
Krippner, Roland: Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden. (Engere Wahl "Innovative Bauprodukte") In: Deutscher Holzbaupreis 2005. Informationsdienst Holz. Berlin/Düsseldorf, Mai 2005, S. 41

Niebler, Dagmar: Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton in Gebäuden. Vortrag im Rahmen der holzwissenschaftlichen Seminare an der Holzforschung München, 24.06. 2008
Krippner, Roland: Potentiale mehrgeschossiger Hochbauten in Holz- und Holzverbundwerkstoffen. 11. Internationales Holzbau-Forum "Holz wird zum Markenzeichen – Der Holz(haus)bau und seine vielen Gesichter". Garmisch Partenkirchen, Congress Centrum, 07.12.2005.

8.5. Messen und Symposien

BAU 2007. Architektur. Materialien. Systeme. München, 15.01. - 20.01.2007

Holz Innovativ 2007. Rosenheim, 18. - 19.04.2007

Dach und Holz International. Stuttgart, 05.03. - 08.03.2008

8.6. Abbildungsverzeichnis

Alfes, 2004, S. 3
Abb. 4.32
Alfes, 2006, S. 19
Abb. 4.33
Becker et. al.2004, S. 22
Abb. 5.1, 5.2
Braun, Florian, München
Abb. 5.42
Buchanan, 1993, S. 211
Abb. 4.31
Buchanan, 1997, S. 93
Abb. 4.30
Danler, 2006
Abb. 3.40, 3.41
Elbel, Konstanze, München
Abb. 6.17, 6.18
Hieber Betonfertigteilwerk GmbH, Wörleschwang
Abb. 6.34, 6.42
Issig, Holger, München
Abb. 3.4 - 3.7, 3.31, 3.36, 3.37, 4.15, 4.23 - 4.25, 5.5 - 5.8, 5.11 - 5.18, 5.23, 5.24, 5.31 - 5.34, 5.36, 5.40, 5.41
Kelletshofer, 2008
Abb. 5.27 - 5.30
Krippner, Roland , München
Abb. 3.30, 3.38, 3.39, 4.2, 4.3, 4.5 - 4.8, 4.14, 4.17 - 4.20, 4.34 - 4.37, 4.39 - 4.42, 5.3, 5.9, 5.10, 5.37, 6.3 - 6.11, 6.20 - 6.23, 6.28 - 6.31, 6.35, 6.36, 6.43 - 6.49
Mommertz, Eckard. Müller BBM, München
Abb. 3.8 - 3.11, 3.14, 4.22
Niebler, Dagmar, München
Abb. 6.12 - 6.16
proHolz Austria, Wien
Abb. 4.9, 4.10
Sägerei Sidler AG, Oberlunkhofen
Abb. 4.4
Holzforschung München, 2007
Abb. 3.16, 3.17, 3.19 - 3.24, 5.20, 5.21

Alle übrigen Abbildungen stammen von den Bearbeitern.

8.7. Kooperationspartner

A. Lehmann & Co. AG
Lettenweg 50, CH-4123 Allschwil
Telefon: +41 (0)61 / 4811188, Telefax: +41 (0)61 / 4818326
http://www.lehmann-farben.ch

ArGeTon GmbH
Oldenburger Allee 26, D-30659 Hannover
Telefon: +49 (0)511 / 61070820, Telefax: +49 (0)511 / 614403
http://www.argeton.com

Bartenbach LichtLabor GmbH
Andreas Danler
Rinner Straße 14, A-6071 Aldrans/Innsbruck
Telefon: +43 (0)512 / 3338-0, Telefax: +43 (0)512 / 3338-88
http://www.bartenbach.com

BASF SE
Kommunikation BASF-Gruppe, D-67056 Ludwigshafen
Telefon: +49 (0)621 / 60-0, Telefax: +49 (0)621 / 60-42525
http://www.basf.com

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern)
Dipl.-Phys. Stefan Vidi
Am Hubland, D-97074 Würzburg
Telefon: +49 (0)931 / 70564-0, Telefax: +49 (0)931 / 70564-60
http://www.zae-bayern.de

BetonBauteile Bayern
Bayerischer Industrieverband Steine und Erden e.V.
Dipl.-Ing. Thomas Loders
Postfach 150240, D-80042 München
Telefon: +49 (0)89 / 514031-81, Telefax: +49 (0)89 / 514031-83
http://www.betonbauteile-by.de

Bitburger Naturhäuser HSB Produktions- und Vertriebs GmbH
Europastraße E29/B257, D-54636 Wolsfeld bei Bitburg
Telefon +49 (0)6568 / 969966, Telefax +49 (0)6568 / 9699855
http://www.bitburger-naturhaeuser.de

cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung
an der Technischen Universität München
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
Dr. Liudvikas Urbonas
Baumbachstraße 7, D-81245 München
Telefon: +49 (0)89 / 289-27056, Telefax: +49 (0)89 / 289-27064

Fachhochschule Rosenheim, Fakultät Holztechnik
Professor Dr.-Ing. Benno Eierle
Hochschulstraße 1, D-83024 Rosenheim
Telefon: +49 (0)8031 / 805-319; Telefax: +49 (0) 8031 / 805-302
http://www.fh-rosenheim.de/holztechnik.html

Finnforest Deutschland GmbH
Louis-Krages-Straße 30, D-28237 Bremen
Telefon: +49 (0)421 / 6911-0, Telefax: +49 (0)421 / 6911-100
http://www.finnforest.de

Hieber Betonfertigteilwerk GmbH
Krautgartenweg 8, D-86441 Wörleschwang
Telefon +49 (0)8291 / 1883-0, Telefax +49 (0)8291 / 1883-40
http://www.hieber-beton.de

Holzforschung München
Technische Universität München
Dipl.-Ing (FH) Jörg Häberle
Dipl.-Holzwirt Fritz Tröger
Michael Tratzmiller
Winzererstraße 45, D-80797 München
Telefon: +49 (0)89 / 2180-6420, Telefax: +49 (089) / 2180-6429
http://www.holz.wzw.tum.de

Kautschuk- und Kunststoffteile GmbH
Auf der Schemscheid 18, D-57072 Siegen
Telefon: +49 (0)271 / 319923, Telefax: +49 (0)271 / 3199244
http://www.kkt-siegen.de

Knauf Insulation GmbH
Industriestraße 18, A-9586 Fürnitz
Telefon: +43 (0)4257 / 3370-0, Telefax: +43 (0)4257 / 3370-2057
http://www.heraklith.at

Knauf Insulation GmbH & Co. KG
Heraklithstraße 8, D-84359 Simbach am Inn
Telefon: +49 (0)8571 / 40-0, Telefax: +49 (0)8571 / 40-241
http://www.knaufinsulation.de

Knauf PFT GmbH & Co. KG
Rudolf Schmalzgruber
Einersheimer Straße 53, D-97346 Iphofen
Telefon: +49 (0)9323 / 31-760, Telefax: +49 (0)9323 / 31-770
http://www.pft.de

Müller-BBM GmbH
Dr. Eckard Mommertz
Robert-Koch-Straße 11, D-82152 Planegg
Telefon: +49 (0)89 / 85602-0, Telefax: +49 (0)89 / 85602-111
http://www.muellerbbm.de

Odenwald Faserplattenwerk GmbH
Dr.-F.-A.-Freundt-Straße 3, D-63916 Amorbach
Telefon: +49 (0)9373 / 201-0, Telefax: +49 (0)9373 / 201-130
http://www.owa.de

pinta acoustic GmbH
Otto-Hahn-Straße 7, D-82216 Maisach
Telefon: +49 (0)8141 / 8888-0, Telefax +49 (0)8141 / 8888-555
http://www.pinta-acoustic.de

Reckli-Chemiewerkstoff GmbH
Eschstraße 30, D-44629 Herne
Telefon: +49 (0)2323 / 1706-0, Telefax: +49 (0)2323 / 1706-50
http://www.reckli.de

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Dipl.-Ing. Peter Mestek
Dipl.-Ing. Rene Stein
Arcisstraße 21, D-80333 München
Telefon: +49 (0)89 / 289-22416, Telefax: +49 (0)89 / 289-23014
http://www.hb.bv.tum.de

Technische Universität München
Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA BAU)
Andreas Greubel
Walter Kelletshofer
Theresienstrasse 90, D-80333 München
Telefon: +49 (0)89 / 289-23000, Telefax: +49 (0)89 / 289-23057
http://www.mpa.bv.tum.de

8.8. Bearbeiter

Technische Universität München
Fakultät für Architektur, Institut für Entwerfen und Bautechnik
EBB - Lehrstuhl für Baukonstruktion und Baustoffkunde
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Florian Musso
D - 80290 München (Briefanschrift)
Tel +49.89.289-22355, Fax +49.89.289-22356
mail@ebb.ar.tum.de; www.ebb.ar.tum.de

Dagmar Niebler
Dipl.-Ing. Architektin, wiss. Assistentin (Projektleitung)
Holger Issig
Dipl.-Ing., wiss. Mitarbeiter

Roland Krippner
Dr.-Ing. Architekt (ab 01.10.2007)
Frundsbergstr. 18, D - 80634 München
Tel +49.89.139 98 493
r.krippner@arcor.de

Dr.-Ing., Architekt, wiss. Assistent
Lehrstuhl für Industrial Design (01.10.2006 bis 30.09.2007)
Univ.-Prof. Dipl. Des. Fritz Frenkler
(ehem.) Lehrstuhl für Gebäudetechnologie
Professor Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog (01.10.2005 bis 30.09.2006)
Technische Universität München
Fakultät für Architektur, Institut für Entwerfen und Bautechnik
D - 80290 München (Briefanschrift)