

Fakultät Architektur | Fakultät Bauingenieurwesen

## Holzleichtbeton als Material für die Sanierung von Außenwänden

Roland Krippner | Thomas Freimann



Antragsteller, Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner  
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm  
Fakultät Architektur  
Lehrgebiet Konstruktion und Technik  
Keßlerplatz 12, 90489 Nürnberg  
Telefon: 0911 / 5880-1885, Telefax: 0911 / 5880-5195  
roland.krippner@th-nuernberg.de  
<https://www.th-nuernberg.de/fakultaeten/ar/>

Mitarbeiter

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Rothenberger

Markus Thoma (B.A.), Benjamin Schillinger (B.A.), Carola Berger,  
Christina Götz

Kooperations-Partner

Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann  
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Lehrgebiet Baustofftechnologie, Straßenbau  
Leiter Labor für Baustofftechnologie  
Kesslerplatz 12, 90489 Nürnberg  
Telefon: 0911 / 5880-1413, Telefax: 0911 / 5880-5164  
thomas.freimann@th-nuernberg.de  
<http://www.baustoffOHM.de>

Mitarbeiter

Florian Johnscher (B.Eng.), Dipl.-Ing.(FH) Thomas Killing

Fa. L. u. H. Keilholz GmbH  
Geschäftsführer: Georg Keilholz  
Lachfelderstraße 1, 90427 Nürnberg  
Telefon: 0911 / 37768-0, Telefax: 0911 / 37768-20  
info@holzbau-keilholz.de  
<http://www.holzbau-keilholz.de>

Holzleichtbeton für  
Sanierung von  
Außenwänden

Bearbeiter

Die Bearbeiter bedanken sich bei der  
Stiftung Bayerisches Baugewerbe und ihrem  
Geschäftsführer Herrn Ernst Treitz  
für Förderung und finanzielle Unterstützung  
der Projektarbeiten

Nürnberg, November 2017

# Inhalt

1	Ziele des Vorhabens	3	Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden
1.1	Ausgangslage	3	
1.2	Innovation	3	
1.3	Projektziele	4	Inhalt
2	Untersuchungen an Holzleichtbeton	5	
2.1	Einleitung	5	
2.2	Versuchsprogramm	6	
2.3	Betonzusammensetzung	6	
2.4	Mechanisch-physikalische Eigenschaften	7	
	- Rohdichte	7	
	- Festigkeiten	7	
	- Wärmeleitfähigkeit	9	
	- Porosität und Wasseraufnahme	10	
	- Frostwiderstand	10	
	- Verformungsverhalten	11	
	- Maschinelle Bearbeitung	11	
	- Praxisversuch im Transportbetonwerk	12	
	- Rezyklierung von HLB (rHLB)	12	
3	Anwendungsmöglichkeiten im Fassadenbereich	13	
3.1	Zur Marktsituation von Fassadenplatten/-paneelen	15	
3.2	Plattengrößen und -formate	15	
3.3	Anordnung, Befestigung und Fugenausbildung	18	
4	Praktische Untersuchungen / Demo-Projekte	20	
4.1	Ausführungs- und Detailplanung Fassadenstand	20	
4.2	Demonstrationsprojekte	25	
4.3	Ergänzende Experimente	27	
5	Zur Ökologischen Bewertung von Holzleichtbeton	30	
6	Zusammenfassung und Ausblick	32	
7	Anhang	33	
7.1	Literaturverzeichnis	33	
7.2	Eigene Veröffentlichungen	34	
7.3	Abbildungsverzeichnis	34	

# 1 Ziele des Vorhabens

## 1.1 Ausgangslage

Durch Neubewertung von Energie- und Stoffströmen, des Primärenergiegehalts baulicher Systeme und des Energiehaushalts von Gebäuden, gewinnen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Holz in unterschiedlicher Zusammensetzung wieder an Bedeutung. Neben Fragen von Ressourcen- und Energieeffizienz spielt bei der Auswahl von Baumaterialien die Wertschätzung von Materialien mit funktionalen und ästhetisch hochwertigen Oberflächen bei Architekten und Designern eine zunehmend stärkere Rolle. Gerade Holz und Holzverbundwerkstoffe weisen für den Einsatz im Innenraum und im Bereich der Gebäudefassaden eine Vielzahl von positiven Eigenschaften auf.

Ein für den sichtbaren Einsatz im Hochbau innovatives Material<sup>1</sup> stellt in diesem Zusammenhang der Holzleichtbeton dar. Dieser Verbundwerkstoff setzt sich aus Zement, Sägespänen und Wasser zusammen. Das organische Zuschlagsmaterial bilden Abfälle aus der Holzverarbeitung; Reststoffe von regionalen Holzarten sind im Vergleich zu vielen technischen Materialien bei der Leichtbetonherstellung ein kostengünstiger Roh- und Zuschlagsstoff. Gute Verarbeitungs- und variierbare Festigkeitseigenschaften kennzeichnen das Komposit-Material. Auch zeigte sich während der Abschluss-Präsentation der Projektarbeiten zu "Holzleichtbeton im Hochbau"<sup>2</sup> im Rahmen der BAU 2009 eine starke Nachfrage von Holzleichtbeton als Bekleidungsmaterial. (Abb. 1)

In einer Reihe von Forschungsarbeiten konn-

te aufgezeigt werden, dass die Kombination von Zement mit Holz ein interessantes und breites Entwicklungs- und Einsatzpotential aufweist.<sup>3</sup>

Anknüpfend an diese Arbeiten wurde an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule im Rahmen des Projektes "Holzleichtbeton mit Textilbewehrung" an verbesserten Materialeigenschaften und der Erweiterung des Einsatzspektrums gearbeitet.<sup>4</sup> Ziel war die Optimierung von Holzleichtbeton als Material für plattenförmige Bauteile im Bereich der Innenwand- (Abb. 2) und Deckenbekleidung. Damit konnten zum einen fakultätsübergreifend diese experimentellen Arbeiten an dem Holzverbundwerkstoff an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule erprobt und etabliert werden, bilden zum anderen die Ergebnisse eine gute Basis für eine Fortsetzung der Arbeiten mit dem Schwerpunkt Außenwand und energetische Sanierung.

## 1.2 Innovation

Das Kompositmaterial stellt eine Art 'Low Tech'-Ansatz im Bauwesen dar: Einsatz von Reststoffen bei energie- und ressourcensparsamen Herstellungsprozessen. Erste Anwendungen in Demonstrationsprojekten bestätigten die positiven Einschätzungen von Holzleichtbeton. Das Material ist neben Anwendungen im Innenausbau aufgrund der guten Witterungsbeständigkeit ebenfalls für den Einsatz im Außenbereich, z.B. bei der Sanierung von Außenwänden / Fassaden geeignet.<sup>5</sup>

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Ziele des Vorhabens

1 Deutscher Holzbaupreis 2005: Engere Wahl "Innovative Bauprodukte"

2 Stand "Holzbau der Zukunft" auf der BAU 2009 in München im Januar 2009

3 Krippner, 2004; Heinz/Urbonas, 2008; Krippner et al., 2008

4 Krippner/Freimann, 2011

5 Untersuchungen zur Frost-Tau-Wechselbeständigkeit zeigten eine besondere 'Zähigkeit' des Gefüges von Holz-Zement-Wasser-Mischungen, die trotz offener Oberflächen Abplatzungen verhindert. Vgl.

Gerade für die energetische Ertüchtigung des Gebäudebestandes fehlen in der Breite 'nachhaltige', gleichermaßen ökologische wie architektonische Alternativen zu gängigen Lösungen im sogenannten "Vollwärmeschutz" mit Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS). Hier versprechen plattenförmige Bauteile aus Holzleichtbeton durch funktionale wie konstruktive Leistungsmerkmale und gestalterisch anspruchsvolle Oberflächen neue Einsatzpotentiale für Holzverbundwerkstoffe; auch können diese das Spektrum an Fassadenlösungen mit Holz und Holzwerkstoffen im Bauwesen erweitern.<sup>6</sup>

Holzleichtbeton eröffnet für das Bayerische Zimmererhandwerk die Erschließung neuer Arbeitsbereiche (stoffliche Nutzung von Abfällen der Holzverarbeitung) und Anwendungsfelder (Plattenwerkstoff in der energetischen Sanierung).

### 1.3 Projektziele

Für den geplanten Einsatzbereich von Holzleichtbeton-Bauteilen bestehen eine Reihe von Fragen bzgl. der Optimierung der Mischungsverhältnisse für den bewitterten Einsatz. Auch sind Aspekte von Herstellung, Montage, Fügung noch nicht hinreichend untersucht. Ferner fehlen besonders unter dem Gesichtspunkt der Ressourcen- und Energieeffizienz fundierte Einschätzungen zu den Potentialen des Recyclings von Holzleichtbeton und der Wiederverwendung als Zuschlagsstoff.

Neben materialtechnologischen Untersuchungen und experimentellen Arbeiten zu Fertigung und bauseitigen Einbau sollen zur Evaluierung der konzeptionellen Ansätze anwendungsbezogene praxisnahe Unter-



Abb. 1 Fassaden-Stand; Musterplatten aus Holzleichtbeton (München, Bau 2009)

suchungen durchgeführt und insbesondere Grundprinzipien für den Einsatz im Fassadenbereich als vorgehängte, hinterlüftete Wandplatten erarbeitet werden (Plattenaufbauten, Schichtenfolgen, Kantenausbildung, Unterkonstruktion, Befestigung). Im Rahmen von Fallstudien sollen Funktionsfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Holzverbundwerkstoffs aufgezeigt werden.

Das erwartete Ergebnis ist eine erweiterte Kenndatenlage zu den Potentialen von Holzleichtbeton als Material für den Einsatz im Bereich der Sanierung von Außenwänden sowie die Dokumentation einschlägiger Entwurfs- und Konstruktionsparameter als Basis für nachfolgende Umsetzungen im Demonstrationsprojekten.



Abb. 2 Demonstrationswand Arbeitsraum B46 Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg (Mai 2011)

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Ziele des Vorhabens

Krippner, 2004, S. 119-121  
6 Krippner/Kress, 2012

## 2 Untersuchungen an Holzleichtbeton

### 2.1 Einleitung

Unter dem Begriff Holzbeton oder Holzleichtbeton (HLB) werden Betone zusammengefasst, die aus einem mineralischen Bindemittel wie z.B. Zement und Holzspänen bzw. Holzresten unter Wasserzugabe hergestellt werden. Aufgrund des erhärtungsstörenden Einflusses des Holzzuckers war allerdings in den bisher bekannten Anwendungen eine Neutralisation bzw. Mineralisierung der Späne vor dem eigentlichen Mischprozess erforderlich. In den hier beschriebenen Untersuchungen wurde keine vorherige Mineralisierung der Holzspäne vorgenommen, um einen möglichst einfachen Mischprozess zu erhalten.

Folgende Ziele wurden verfolgt:

- Entwicklung eines einfach herzustellenden Holzleichtbetons ohne vorherige Spanbehandlung für plattenförmige Fassadenbauteile. Durch den einfachen Mischprozess soll der HLB auch außerhalb einer aufwändigen Fertigteilverfertigung hergestellt werden können.
- Die Festbetonrohddichten sollen 0,80 bis 0,90 kg/dm<sup>3</sup> nicht überschreiten, der Beton aber gleichzeitig eine hinreichende Festigkeit für den Einsatz als Fassadenplatte besitzen.
- Untersuchung wesentlicher mechanisch-physikalischer Eigenschaften des Holzleichtbetons (z.B. Festigkeit, Dichte, Frostwiderstand, Verformungen, Wärmeleitfähigkeit, Fertigungsstreuung).
- Rezyklierung von Holzleichtbetonen
- Praktische Anwendung im Transportbetonwerk.
- Eignung von Verbindungs- / Montagesystemen als Unterbaukonstruktion.
- Marktpotential der entwickelten Betone.



Abb. 3 HLB-Oberfläche, glatt geschalt (links) und angeschliffen (rechts)

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Untersuchungen an Holzleichtbeton

Der Werkstoff Holzleichtbeton beinhaltet mit zugesetzten Holzspänen einen nachwachsenden Rohstoff, der neben seinen ökologischen Vorteilen eine hohe Akzeptanz und Wertschätzung bei Bauherren und Planenden besitzt. In der Kombination mit dem Bindemittel Zement lassen sich die Formenvielfalt und zahlreichen Gestaltungsmöglichkeiten des Betons mit diesem ökologischen Aspekt verbinden.

Holzleichtbeton verbindet die Vorteile eines duktilen Faserbaustoffes mit der Dauerhaftigkeit und Formbarkeit des Betons. Holzleichtbetonoberflächen weisen eine ausgesprochen angenehme Haptik mit „gefühlte“ warmen Oberflächen auf. Daneben können diese mit einfachen Mitteln bearbeitet, geschliffen gesägt oder gefräst sowie in der Textur verändert werden. (Abb. 3)

## 2.2 Versuchsprogramm

Im Rahmen der Projektarbeiten wurden in kleinen Versuchsserien sehr unterschiedliche Fragestellungen behandelt. Im Einzelnen sind folgende physikalisch-mechanische Eigenschaften untersucht worden:

- Druck- und Biegezugfestigkeit
- Rohdichten
- Schwindverhalten und Formänderungen der Plattengeometrie (Stichmaße beim Aufschüsseln, Einfluss der Nachbehandlung auf Verkrümmungen)
- Porosität und kapillare Wasseraufnahme
- Wärmeleitfähigkeit
- Frostwiderstand
- Praxisversuch in einer Werksmischanlage (Machbarkeit)
- Rezyklierung bzw. Wiederverwertung von HLB
- Farb- und Texturveränderung der Plattenoberfläche bei langen Bewitterungszeiten: Einrichtung von Fassadenversuchsständen

## 2.3 Betonzusammensetzung

Holzleichtbeton besteht aus Zement, Holzspänen und Wasser sowie ggf. Fließmitteln. Die Holzspäne stammen als Sägespäne aus der Holzverarbeitenden Industrie. Dort werden sie i.d.R. zu Pellets für Holzheizungen weiterverarbeitet. Für die nachfolgenden Untersuchungen sind ausschließlich nicht vorbehandelte oder neutralisierte Fichtenholzspäne verwendet worden, die zur Homogenisierung auf einem Sieb mit der Maschenweite von 8 mm abgeseibt wurden. Die Absiebung wurde in den Untersuchungen eingesetzt, um vereinzelte größere Späne zu vermeiden (Abb. 4).

Für Holzleichtbetone sind nur Zemente mit sehr schneller Festigkeitsentwicklung geeignet, die trotz der verzögernden Wirkung des Holzzuckers zu einer ausreichenden Betonfestigkeit führen. Im Versuchsprogramm wurden unterschiedliche Normzemente der Festigkeitsklasse 52,5 eingesetzt, die mit Blaine-Werten von ca. 6500 bis 8000 cm<sup>2</sup>/g sehr fein aufgemahlen waren. Üblicherweise werden diese Zemente z.B. für Reparaturfelder im Betonstraßenbau verwendet. Aufgrund der großen Wasseraufnahme der Holzspäne sind hohe Wasserzementwerte erforderlich, um eine geeignete Konsistenz des Frischbetons zu erzielen. Die w/z-Werte liegen je nach Verhältnis Holz zu Zement h/z bei ca. 0,80 bis 0,95. Für einen guten Zusammenhalt des HLB bei Festbetonrohrichten von etwa 800 kg/m<sup>3</sup> hat sich ein h/z-Wert von 0,24 als günstig erwiesen. Zwei beispielhafte Mischungszusammensetzungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Eigenfeuchtigkeit der Holzspäne lässt sich beispielsweise nach Kalibrierung mit einer Feuchtesonde bestimmen. Verwendet wurde die Sonde HD2 von IMKO<sup>1</sup>. Anschließend kann die Zugabewassermenge entsprechend angepasst werden. HLB zeigen einen hohen Frischbetonluftgehalt von rund 27 bis 30 %, wobei die Messung durch den hohen Kapillarporenanteil des Holzes beeinflusst wird und daher wenig aussagekräftig ist.

Im Mischprozess hat sich folgende Reihenfolge als günstig erwiesen:

- Zement und Holzspäne trocken mit langsamer Drehzahl des Mixers mischen; danach innerhalb von 20 Sekunden die

1 IMKO GmbH, Ettlingen

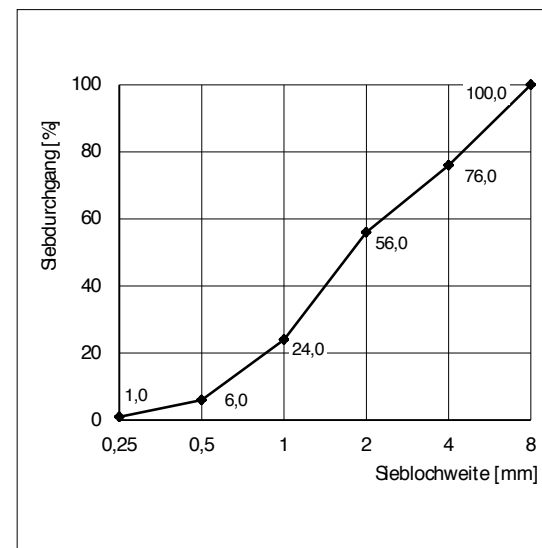


Abb. 4 Sieblinie von Fichtenholzspäne (Rohspäne aus dem Sägewerk)

Ausgangsstoff	M1	M2	Rohdichte trocken
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Zement z [kg/m <sup>3</sup> ]	419	389	3100
Holzspäne h [kg/m <sup>3</sup> ]	100	93	420
Wasser w [l/m <sup>3</sup> ]	356	358	
h/z	0,24	0,24	
w/z	0,85	0,92	
Frischbetonluftgehalt [Vol.-%]	27	30	

Tab. 1 Betonzusammensetzung HLB (Festbetonrohrichte etwa 800 kg/m<sup>3</sup>)

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Untersuchungen an Holzleichtbeton

Wasserzugabe bei langsamer Drehzahl des Mixers vornehmen; 80 Sekunden mischen bei langsamer Drehzahl, anschließend 60 Sekunden bei schneller Drehzahl. 20 Sekunden Mischerstopp, um an der Mischerwandung anhaftende Bestandteile zu entfernen, anschließend weitere 60 Sekunden mit schneller Drehzahl mischen.

In den hier beschriebenen Untersuchungen sind vorrangig ca. 20 – 30 mm dicke Platten mit Abmessungen von 600 x 600 x 20 mm (lxbxh) in liegender und stehender Schalung gefertigt worden. Einzelne Plattenlängen wurden hierbei bis zu einer Länge von l = 3000 mm bei einer Dicke von d = 30 mm hergestellt. Biegeversuche sind u.a. an gesägten Plattenstreifen von 500 x 100 x 20 mm (lxbxh) vorgenommen worden.

Der fertig gemischte Holzleichtbeton sollte zügig eingebaut und mit einem Rütteltisch für plattenartige Bauteile oder bei dicken Bauteilen mit dem Innenrüttler verdichtet werden. Horizontale Oberflächen des faserverstärkten Betons lassen sich gut mit einem Kompaktier- bzw. Flexiroller nachverdichten und glätten. Die Betone steifen schnell an und haben nur ein kurzes Verarbeitungsfenster.

## 2.4 Mechanisch-physikalische Eigenschaften

### 2.4.1 Rohdichte

Die entwickelten Holzleichtbetone sollten bei ausreichender Druck- und Biegezugfestigkeit für eine plattenartige Verwendung eine möglichst niedrige Festbetonrohndichte erzielen.

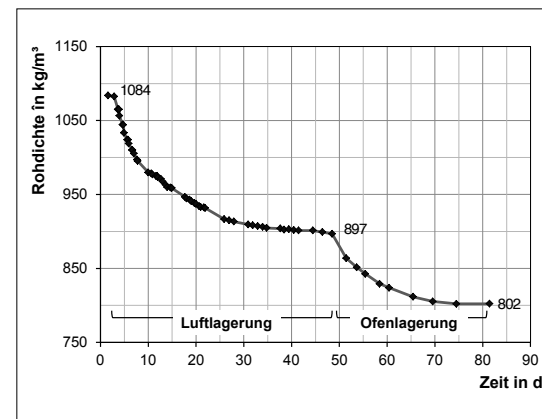
Optimierte Mischungen mit Druckfestigkeiten über 10 N/mm<sup>2</sup> und weicher Einbaukonsistenz wiesen nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte an der Luft eine Festbetonrohndichte von etwa  $\rho = 850$  bis 900 kg/m<sup>3</sup> auf. Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Trocknungsprozess bei Luft- (20 °C) oder Ofenlagerung (105 °C). Die Ausgleichsfeuchte für einen Betonbalken 400/100/100 mm wird bei Luftlagerung etwa nach 1,5 Monaten erreicht.

### 2.4.2 Festigkeiten

Die plattenförmigen Bauteile aus HLB erforderten für das angezielte Tragverhalten eine Druckfestigkeit von mindestens 10 N/mm<sup>2</sup>. Diese Zielgröße ließ sich mit den optimierten Mischungszusammensetzungen sicher erreichen. Je nach Wasserzementwert in Kombination mit Fließmittelzugabe stiegen die Druckfestigkeiten bis auf 18 N/mm<sup>2</sup> (Tab. 2). Durchschnittliche Druckfestigkeiten betragen 11 -14 N/mm<sup>2</sup>.

Abb. 5 Abnahme der Rohdichte während Luft- und Ofenlagerungen bei einem HLB-Balken der Abmessung 400x100x100 mm (lxbxh) (oben)

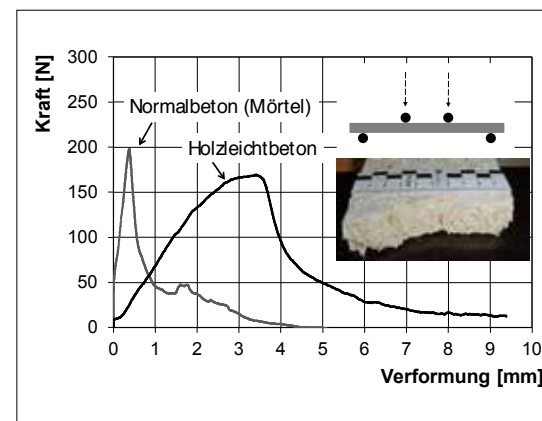
Abb. 6 Biegezugversuch an unbewehrten Plattenstreifen der Abmessungen L/B/D = 500x100x20 mm (lxbxh) (unten)



### Eigenschaft

Eigenschaft	nach 28d N/mm <sup>2</sup>
Druckfestigkeit	8 – 18
Biegezugfestigkeit	2,8 – 6,1
Elastizitätsmodul	1400 - 1700

Tab. 2 Festigkeiten und Elastizitätsmodul von Holzleichtbetonen



Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Untersuchungen an Holzleichtbeton



HLB zeigten durch den hohen Anteil an Spänen ein deutlich verbessertes duktileres Verhalten gegenüber Normalbetonen. Trotz der geringen Rohdichte wiesen HLB-Plattenstreifen im Biegeversuch ähnliche Bruchlasten wie Probekörper aus Normalbeton auf (Abb. 6 und 7). Im Vergleich zu Normalbetonen nimmt das Verhältnis Biegezug- zu Druckfestigkeit von ca. 1 : 10 (Normalbeton) auf etwa 1 : 2,5 (HLB) zu (Abb. 8 und 9).

Der Elastizitätsmodul von HLB ist mit  $E = 1400$  bis  $1700 \text{ N/mm}^2$  erwartungsgemäß niedrig. Der Baustoff besitzt jedoch aufgrund des hohen Faseranteils eine geringe Rissempfindlichkeit.

Die Erhärtung des HLB ist sehr vom Holzzuckereinfluss der Späne abhängig. Lösliche Anteile der Glukose beeinflussen die Hydratation und das Erstarren. Dieser sogenannte inhibitorische bzw. hemmende Einfluss ist wesentlich von der Holzart und dem Spanalter bestimmt. Übliche Zemente mit normaler Anfangsfestigkeit können in der Regel überhaupt nicht verwendet werden. Nur Zemente mit hohen Festigkeitsklassen und möglichst schneller Anfangserhärtung können den verzögernden und erhärtungsstörenden Einfluss ohne vorherige Neutralisation bzw. Mineralisierung des Holzes teilweise kompensieren. Die Kompatibilität eines Zements kann nach Jorge et al., 2004 mit dem Verhältnis der freigesetzten Wärme eines Holz-Zement-Gemisches zu der eines reinen Zementleimes mit dem CA-Faktor (Tab. 3) angegeben werden.

Die in den Projektarbeiten verwendeten Fichtenholzspäne können in Kombination mit dem ausgesuchten Zement 52,5 R mit einem CA-Faktor von 94 % als verträglich eingestuft werden. Verschiedene Normzemente 52,5 R

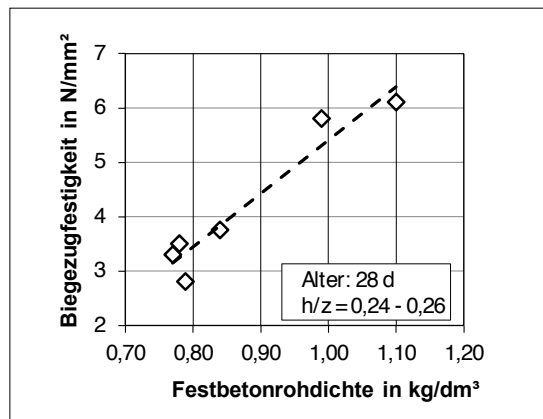


Abb. 7 Einfluss der Rohdichte auf die Biegezugfestigkeit von Prismen 160x40x40 mm (lxbxh)

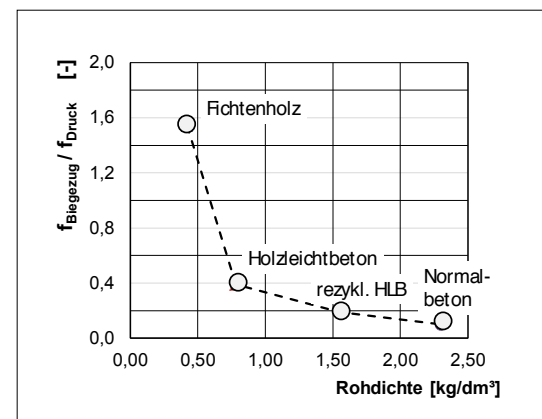


Abb. 8 Verhältnis der Biegezug- / Druckfestigkeit bei unterschiedlichen Werkstoffen

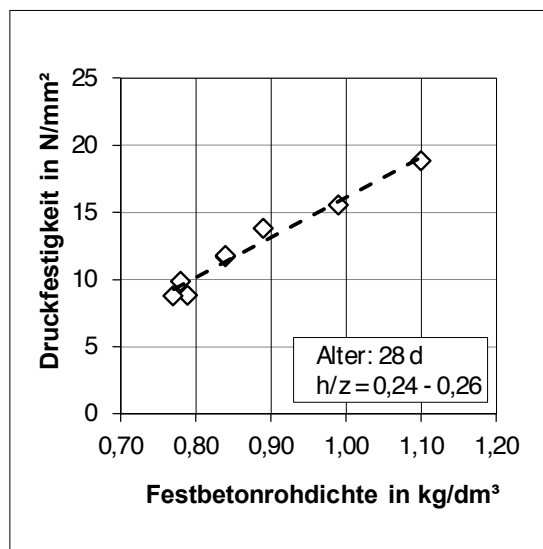


Abb. 9 Einfluss der Rohdichte auf die Druckfestigkeit von Prismen 160x40x40 mm (lxbxh)

Größe $C_A$ -Faktor	Verträglichkeit in %
$C_A > 68$	verträglich
$C_A > 28$ bis $C_A \leq 68$	bedingt verträglich
$C_A < 28$	nicht verträglich

Tab. 3 Klassifizierung der Zement-Holz-Kompatibilität mittels CA-Faktor

CA-factor: "defined as the ratio of the amount of heat released from a wood-cement mixture, and the heat released from a cement paste without interferences" [Jorge et al., 5/2004, S. 370]

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Untersuchungen an Holzleichtbeton

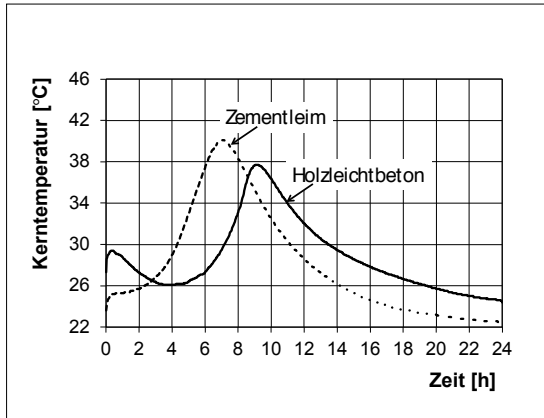


Abb. 10 Einfluss von Fichtenholzspänen auf die Kerntemperaturen infolge Hydratation

mit ähnlichen Mahlfeinheiten wurden im Vorfeld beurteilt und konnten alle grundsätzlich als geeignet angesehen werden. In Abbildung 10 ist die Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme für unterschiedliche Betone dargestellt. Beim HLB ist der Beginn der Erhärtungsreaktion um mehr als zwei Stunden gegenüber Mischungen ohne Holzspäne verzögert.

Die Erhärtungsreaktion war bei den untersuchten HLB-Platten nach etwa 4 –7 Tagen zu mehr als 90 % abgeschlossen. Eine Wärmebehandlung führte zu keiner Festigkeitssteigerung. Ebenso haben sich Zemente auf Sulfoaluminat-Basis für Holzleichtbetone als ungeeignet erwiesen.

### 2.4.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  wurde mit Hilfe der Plattenmethode an Probekörpern mit den Abmessungen 100 x 100 x 30 mm (lxbxh) bestimmt. Der Einfluss des Wasserzementwerts auf die Rohdichte und damit auf die Wärmeleitfähigkeit ist in Abbildung 11 aufgeführt. Die Korrelation der Wärmeleitfähigkeit mit der Porosität bzw. der Rohdichte ist für Betone bekannt und in der Abbildung 12 für einige Baustoffbeispiele dargestellt. HLB zeigte mit  $\lambda < 0,200$  W/(mK) etwas niedrigere Werte als nach der Rohdichte von 800 kg/m<sup>3</sup> zu erwarten war.

Die Wärmeleitfähigkeit des HLB kann näherungsweise mit der von Porenleichtbeton verglichen werden. Der Werkstoff besitzt aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit fast den Charakter eines Dämmstoffs. Dies erklärt auch die angenehme Haptik mit einer „gefühlte“ warme Oberfläche.

Durch die Kapselung der Späne im Zementstein ist der Werkstoff zudem nicht entflammbar und eignet sich daher möglicherweise auch für die Verwendung als Brandschutzbekleidung. Hierzu sind im Rahmen dieser Projektarbeiten keine Untersuchungen durchgeführt worden.

Bei einem Holzmasseanteil bis ca. 20 % wird die Baustoffklasse A2 erreicht und ein Test im Kleinbrandofen an der Technischen Universität München lässt erwarten, dass Holzleichtbetonplatten das so genannte „Kapselkriterium“ der Musterordnung (MBO) erfüllen können.<sup>1</sup>

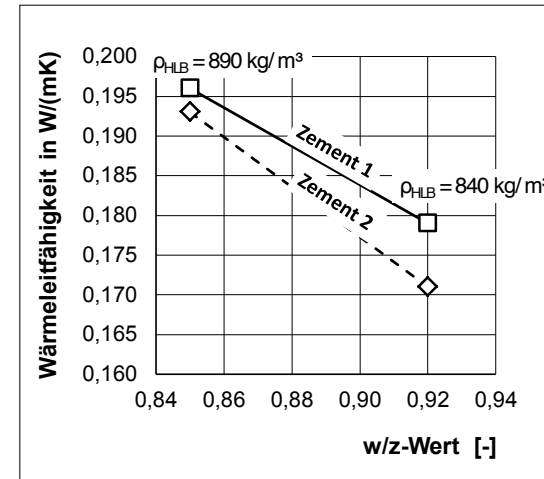


Abb. 11 Wärmeleitfähigkeit von HLB bei unterschiedlichen w/z-Werten

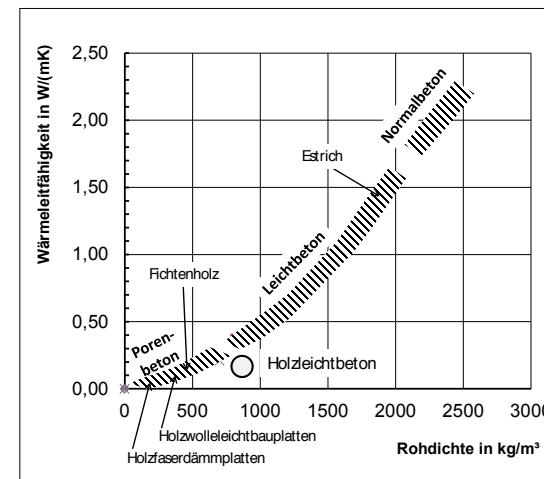


Abb. 12 Einfluss der Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Baustoffe

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Untersuchungen an Holzleichtbeton

1 Krippner et al., 2008, S. 32f.

## 2.4.4 Porosität und Wasseraufnahme

Die wasseraufnehmbare Porosität wurde nach 3 Monaten Luftlagerung an Balken mit 400 x 100 x 100 mm (lxbxh) ermittelt und liegt durchschnittlich bei 33 Vol.-%. Das kapillare Saugen an Prismen ist in Abbildung 13 im Vergleich zu anderen Baustoffen dargestellt. Die Kurve folgt – typisch für Betone – keinem Wurzel-Zeit-Verlauf, sondern nähert sich aufgrund des Gelporenanteils im Zementstein einem Grenzwert an. Dies liegt an den sehr hohen Zementgehalten von ca. 400 kg/m<sup>3</sup>. Das anfänglich starke Saugen durch die hohe Porosität und Holzkapillaren der Späne wird durch die verzögert einsetzende Quellwirkung der Gelporen des Zementsteins abgeschwächt. Insofern zeigt der Werkstoff ein ähnliches Verhalten wie beim Prozess der Selbstabdichtung von wasserundurchlässigem Beton, obwohl die Gesamtmenge des aufgenommenen Wassers deutlich höher ist.

## 2.4.5 Frostwiderstand

Frostuntersuchungen wurden in Anlehnung an den CIF-Test an gesägten Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm durchgeführt. Die Proben besaßen bereits ein Alter von 350 Tagen. Trotz der hohen Wasseraufnahme von HLB blieben die Frostabwitterungen nach 28 Zyklen mit ca. 30 g/m<sup>2</sup> eher gering (Abb. 14). Der Grenzwert für Bauteile aus Beton nach DIN EN 206-1 mit der Expositionsklasse XC4 liegt bei 1.500 g/m<sup>2</sup> Materialabtrag nach 28 Frost-Tau-Wechseln. Die geringe Abwitterung ist vermutlich auf die hohe Duktilität des Werkstoffs zurückzuführen (Abb. 15). Die Holzfasern können wahrscheinlich einen großen Teil des Sprengdrucks beim Gefrieren des Porenwassers abbauen und verringern auf diese Weise die Zugbeanspruchung des Zementsteingefüges.

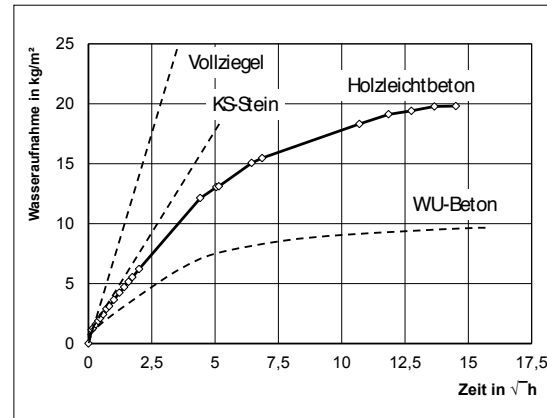


Abb. 13 Kapillare Wasseraufnahme unterschiedlicher Baustoffe

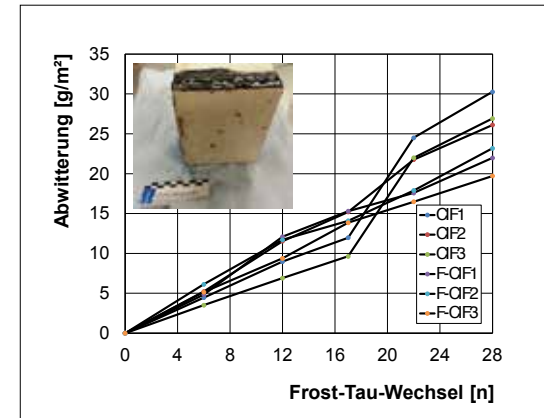


Abb. 14 Abwitterung nach Frost-Tauwechselversuchen



Abb. 15 Prüffläche nach 28 FT-Wechseln

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Untersuchungen an Holzleichtbeton

## 2.4.6 Verformungsverhalten

Das Schwindverhalten von Holzleichtbetonen liegt erwartungsgemäß zwischen dem von Beton und Holz. Das langfristige Trocknungsschwinden führt zu einer Dehnung von bis zu  $\epsilon_{ds} = -8\text{‰}$  und liegt damit sehr viel höher als bei vergleichbaren Normalbetonen. Die große Verkürzung beim langfristigen Austrocknen stellt vor allem bei plattenförmigen Bauteilen eine große Herausforderung dar. In liegender Schalung hergestellte Platten tendieren zu einer deutlichen Verkrümmung, da die verschiedenen Rauigkeiten der beiden Seiten (Unterseite glatt geschalt; Oberseite abgerieben) zu unterschiedlichen Verdunstungsmengen führten. Hierdurch kam es zum Aufschüsseln der Platte, das allein durch einen Wechsel der Lagerungsbedingung nicht vollständig vermieden werden konnte. Die Verkrümmung wurde als Stichmaß  $s$  in mm an Plattenstreifen der Abmessungen  $700 \times 150 \times 20$  mm ( $l \times b \times h$ ) bestimmt.

In stehender Schalung hergestellte Platten zeigten keine signifikanten Verkrümmungen infolge ungleichmäßiger Austrocknung. Mit dieser Herstellungsmethode konnte eine hinreichende Maßhaltigkeit der Platten gewährleistet werden. (Abb. 16) In einer weiteren Variante wurden die Verformungen infolge Austrocknung von gesägten Platten beurteilt. Durch die gleichmäßige beidseitige Feuchteabgabe blieben hier die Verkrümmungen (Aufschüsseln) im Durchschnitt sehr klein unter  $s = 1$  mm.

## 2.4.7 Maschinelle Bearbeitung

Das Kleben von HLB-Platten ist ebenso wie die maschinelle Bearbeitung sehr einfach. Die mineralische Oberfläche erlaubt den Einsatz handelsüblicher Betonklebesysteme.

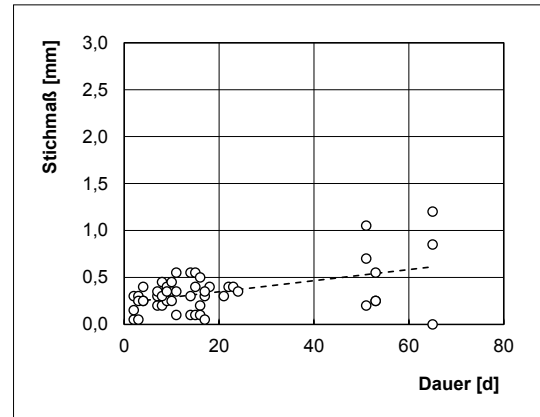


Abb. 16 Verformungen von Plattenstreifen bei Senkrechtbetonage – maximale mittige Stichmaße

Die Zugfestigkeiten der Kleber sind höher als diejenigen des Holzleichtbetons, so dass HLB-Platten bis zur Grenze der Eigenfestigkeit miteinander verbunden werden können. Ein großer Vorteil der moderaten Druckfestigkeit von Holzleichtbetonen ist die leichte maschinelle Bearbeitbarkeit. HLB-Platten können sehr einfach mit handelsüblichen Sägen oder Oberfräsen bearbeitet werden (Abb. 17). Somit lassen sich Befestigungen, Bohrungen oder geometrische Anpassungen leicht vornehmen.

Abb. 17 Bearbeitung von Holzleichtbeton mit Säge (oben)

Abb. 18 Herstellung von HLB im Transportbetonwerk / Ausbreitmass (mitte)

Abb. 19 Herstellung von HLB im Transportbetonwerk / Betonage stehende Schalung (unten)



Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Untersuchungen an Holzleichtbeton



Trotz der Faserstruktur des Holzes sind Schnitte und Bohrungen exakt möglich, da die Fasern im Zementstein gut verankert sind und nicht durch das Schneidwerkzeug herausgerissen werden.

#### 2.4.8 Praxisversuch im Transportbetonwerk

Im Rahmen eines Feldversuchs in einem Transportbetonwerk im Februar 2014 konnte nachgewiesen werden, dass sich Holzleichtbeton auch in üblichen Werksmischanlagen unproblematisch herstellen lässt. (Abb. 18+19, Seite 11).

Der Versuch sollte zeigen, ob HLB im normalen Mischbetrieb mit einem etwa 2,5 m<sup>3</sup> großen Zwangsmischer eines TB-Werks produziert werden kann. In der Anlage konnte etwa ein Kubikmeter Holzleichtbeton gleichmäßig und ohne Entmischungserscheinungen hergestellt werden.

Während des Mischvorganges im TB-Werk wurde weniger Luft in den Frischbeton eingebracht als in den bisherigen Laborversuchen. Die Konsistenz des Betons war hierdurch und durch die niedrige Frischbetontemperatur von 13,8 °C sehr fließfähig. Trotz der fließfähigen Konsistenz war die Mischung im Einbau stabil. Die Verdichtung erfolgte mit einem üblichen Innenrüttler.

#### 2.4.9 Rezyklierung von HLB (rHLB)

Im Sinne einer nachhaltigen Verwendung von Baustoffen wurde die Rezyklierung von Holzleichtbetonen untersucht. Es wurde der Frage nachgegangen, ob eine Wiederverwendung bzw. Beimischung z.B. von ausgehärteten Reststücken oder Altbeton zum HLB möglich ist. Die orientierenden Versuche haben gezeigt, dass rezyklierter Holzleichtbeton (rHLB) (Abb. 20) unproblematisch hergestellt



Abb. 20 Rezyklierung von Holzleichtbeton (rHLB)

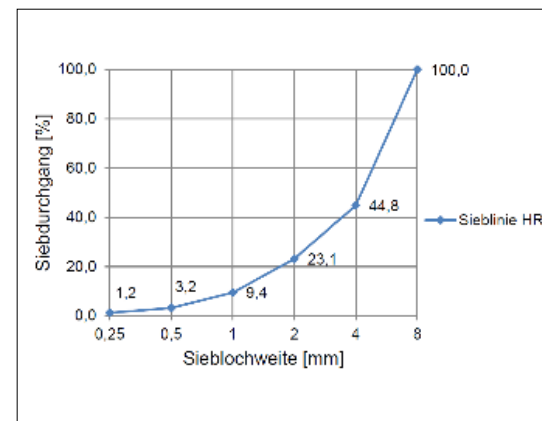


Abb. 21 Sieblinie des rHLB

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Untersuchungen an Holzleichtbeton

Kennung	Anteil (rez. HLB)*	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit	w/z	Korngröße (rez. HLB)
	[Vol.-%]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[mm]
Rezeptur 1	100/0	1,55	5,3	26,2	0,55	2 – 8
Rezeptur 2	100/0	1,55	5,4	29,8	0,5	2 – 8
Rezeptur 3	100/0	1,58	5,3	29,3	0,55	0,5 – 8
Rezeptur 4	100/0	1,59	5,6	33	0,5	0,5 – 8
Rezeptur 5	50/50	1,35	5,5	19	0,6	0,5 – 8

\* frische Späne

Tab. 4 Ergebnisse der Untersuchungen mit rezyklisiertem Holzleichtbeton (rHLB)

werden kann. Da die Holzspäne bereits durch Herstellung des Holzleichtbetons mineralisiert worden sind, konnten beim rezyklierten HLB geringere w/z-Werte und handelsübliche Normzemente verwendet werden, um eine vergleichbare Frischbetonkonsistenz einzustellen. Die Rohdichte stieg auf ca. 1,5 kg/dm<sup>3</sup> an. Mit Festigkeiten von 26 bis 33 N/mm<sup>2</sup> wur-

den beim rHLB deutlich höhere Werte gegenüber dem Holzleichtbeton erzielt. Die Sieblinie der rHLB-Gesteinskörnung ähnelt dabei dem Verlauf einer A8 Sieblinie (Abb. 21), wobei der k-Wert bzw. der Wasseranspruch mit k = 4,23 vergleichsweise hoch ausfällt. (Tab. 4)

### 3 Anwendungsmöglichkeiten im Fassadenbereich

Obwohl organische Zuschläge wie Holzspäne kaum als Leichtzuschlag in Beton Anwendung finden, sind in den vergangenen Jahren verschiedentlich neuere Forschungsarbeiten zu Holz-Zement-Mischungen veröffentlicht worden.

Unter der Bezeichnung „Holzbeton“<sup>1</sup> wird sich seit Ende der 1990er Jahre aufgrund von Ressourcenverknappung (Sand, Kies) wieder eingehender mit dem Kompositmaterial im Bauen beschäftigt; Zielsetzungen sind u.a. Gewichtsersparnis bei Wand- und Deckenkonstruktionen. Darüber hinaus gewinnt das Material durch eine weitreichende Recyclingkette im Zuge der Neubewertung von Energie- und Stoffströmen an Bedeutung.

Unter Leitung von Prof. Walter Stamm-Teske wurde in Weimar an der Bauhaus-Universität das green:house etabliert, das sich in Fortführung von Forschungs- und baupraktischen Arbeiten aus den 1960er und 1970er Jahren mit Holzbeton als Baustoff für Außenwandkonstruktionen beschäftigt. Dabei erfüllt das diffusionsoffene Kompositmaterial statisch-aussteifende Anforderungen eines massiven Baustoffs bei guten Wärmedämm- und akustische Eigenschaften.

Verwendung findet ein Holzbeton, bei dem Holzhäcksel einer relativ groben Siebfraction mit Zement als Bindemittel und Wasser zu 8 cm starken Bauplatten (1,25 x 1,25 m) verarbeitet werden. Die Tragstruktur bildet eine ausgedämmte Holzrahmenkonstruktion, die beidseits mit den Holzbetonplatten bekleidet ist und sowohl im Außenbereich als auch raumseitig als Putzträgerschicht dient. In einem realisierten kubischen Experimental-

gebäude, mit regelmäßigen hochformatigen Öffnungen in einem klaren Raster, ist dieser „alte und doch neue Baustoff“ jedoch weder im Innenraum noch in der Fassade ablesbar.<sup>2</sup>

Einen weiteren äußerst spannenden Ansatz im Bereich der Materialexperimente mit Holz-Zement-Mischungen zeigt ein Forschungsprojekt, bei „dem großformatige Bauteile durch Extrusion von Holzleichtbeton additiv hergestellt werden“. Dabei fertigt ein Industrieroboter mit speziellem Extruder schichtweise und schalungsfrei geschosshohe monolithische Außenwandelemente mit Hohlkammern (1,00 m x 0,275 m [L x B]). Die Oberflächen charakterisieren die horizontal aufgetragenen Raupen (etwa 25 mm breit und 10 mm hoch). Inwieweit die aus dem Herstellungsprozess resultierende reliefartige Struktur bereits finale Oberflächen-Qualitäten aufweist oder diese erst durch Nachbearbeitungsschritte objektspezifisch erfolgen, ist noch offen.<sup>3</sup>

Holzleichtbeton eignet sich aufgrund seiner bauphysikalischen Eigenschaften und ästhetischen Qualitäten, spezielle Eigenfarbigkeit und vielfältige Möglichkeiten der Oberflächengestaltung, besonders zur Verwendung im nicht lasttragenden und vor allem sichtoffenen Bereich.

Bei den Einsatzmöglichkeiten im Innenraum wurde in den vergangenen 17 Jahren an der Technischen Universität München und an der Technischen Hochschule Nürnberg vor allem die Eignung für Decklagen von Unterdecken und als Wandbekleidung von Vorsatzschalen bisher getestet. Ferner erfolgten ergänzend erste Versuche als Material für Bauteile in vorgehängten hinterlüfteten Fassaden. Mittlerweile liegen – nach insgesamt vier Phasen

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Anwendungen im Fassadenbereich

1 Zur Begrifflichkeit bei Holz-Zement-Mischungen vgl. u.a. Krippner, 2004, S. 19f., Krippner, März/2012, S. 19 und Krippner, 4/2017, S. 42f.

2 Stamm-Teske, 12/2011, S. 38–43

3 Winter et al., 2016

entsprechender experimenteller Arbeiten – umfangreiche Materialkennwerte vor:

- Holzleichtbeton und Holzleichtbeton mit PCM (2000-2004)<sup>4</sup>
- Holzbeton. Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 16 (2005-2007)<sup>5</sup>
- Holzleichtbeton. Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 17 (2005-2007)<sup>6</sup>
- Holzleichtbeton mit Textilbewehrung (2009-2011)<sup>7</sup>

Bei diesen (Labor-)Experimenten konnte die Machbarkeit auch komplexer Geometrien und plastisch strukturierter Oberflächen aufgezeigt werden. Auch bzgl. des Anwendungsbereichs sind in diesem Zeitraum unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton untersucht worden:

- Außenwand: Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise<sup>8</sup> und
- Beton-Holzleichtbeton-Verbund<sup>9</sup> (Abb. 22)
- VH-Fassadenplatte (Abb. 23)
- Innenausbau: Wandbekleidung (Abb. 24) und (Unter-)Decke<sup>10</sup>

Anknüpfend an diese Vorarbeiten galt es nun für den Bereich Fassadenplatte/Fassadenpaneel Randbedingungen für Ausführungsvarianten insbesondere mit Bezug zur energetischen Sanierung zu untersuchen.

Bei Sanierungsmaßnahmen im Bereich der Gebäudehülle fällt weiterhin auf, dass allzu häufig auf vermeintliche 'Standardlösungen' wie die Außenwanddämmung mit herkömm-

lichen Wärmedämmverbundsystemen zurückgegriffen wird. Alternative Lösungsansätze wie zum Beispiel der Einsatz von Holz und Holzwerk- sowie Holzverbundwerkstoffen in hinterlüfteten Fassadenkonstruktionen sind demgegenüber wenig aufzufinden. Gerade im Kleinwohnungsbau sind diese im Bereich der energetischen Sanierung nicht hinreichend genutzt. Dabei ist diese Sanierungsmaßnahmen erprobt und zur Erarbeitung von Konzepten einer gleichermaßen zielgerichteten und nachhaltigen Bestandssanierung liegen u.a. 'Sanierungsleitfaden'<sup>11</sup> vor. Bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (VHF)<sup>12</sup> wird in der Regel ein Aufbau gewählt, bei der Unterkonstruktion (Holz/Leichtmetall), Dämmstoff (Holzfaserdämmstoffe, Mineralwolle) und/oder Bekleidungsmaterial aus Holz beziehungsweise Holzwerk- und Holzverbundwerkstoffen bestehen können.<sup>13</sup>

Für dieses Arbeitsfeld weist Holzleichtbeton als Material für plattenförmige Bauteile eine Reihe von Vorteilen auf:

- ausreichende Festigkeiten, bei geringem Bauteilgewicht

<sup>11</sup> Hoppe, 2008

<sup>12</sup> DIN 18516-1 (Juni 2010)

<sup>13</sup> Vgl. Krippner/Kress, 2012, S. 9

Abb. 22 Fertigteilwand mit HLB-Flächen. Landeshortensschau Neu-Ulm 2008 (oben)

Abb. 23 HLB-Fassadenplatten. Studentisches Projekt, Ergänzungsfach "Baustoffkunde" / Seminar, TU München, WS 2006/07 (mitte)

Abb. 24 Demonstrationswand Arbeitsraum B46 an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg (Ausschnitt, 05/2011) (unten)



Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Anwendungen im Fassadenbereich



<sup>4</sup> Krippner, 2004, S. 43-60 und 79-142

<sup>5</sup> Heinz/Urbonas, 2008

<sup>6</sup> Krippner et al., 2008, S. 9-36

<sup>7</sup> Krippner, Freimann, 2011, S. 10-49

<sup>8</sup> Krippner, 2004, S. 143-162

<sup>9</sup> Krippner et al., 2008, S. 37-82

<sup>10</sup> Krippner, Freimann, 2011, S. 60-84

- gute Handhabung, leichte Bearbeitung mit gängigen Holzverarbeitungswerkzeugen
- plastisch-räumliche Oberflächengestaltung
- ausgeprägte Eigenfarbigkeit und Einfärbungsmöglichkeiten

Im Fassadenbereich eröffnet Holzleichtbeton durch unterschiedliche Konfektionierungen sowie vielfältigen Oberflächenbehandlungen ein weitreichendes Repertoire an Gestaltungsmöglichkeiten. Die einzelnen Bauteile können von kleinteiligen ‚Schindeln‘ über mittelgroße Platten bis zu großformatigen Fassadenelementen reichen.

### 3.1 Zur Marktsituation von Fassadenplatten/Fassadenpaneelen

Im Bereich der Bekleidung von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (VHF) sind zunächst lineare und plattenförmige Bauteile zu unterscheiden.

Weit verbreitet (im Holzbau) sind Brettschalungen, mit einer Breite  $\leq 30$  cm und einem Unterstützungsabstand durch die Unterkonstruktion  $\leq 80$  cm (in horizontaler, vertikaler, diagonaler Anordnung), sowie Rhombusleisten mit unterschiedlicher Fugenausbildung, in der Regel aus Nadelhölzern, wie Lärche (Abb. 25) oder Douglasie. Diese brettformigen Elemente werden allgemein nach anerkannten und bewährten Handwerksregeln verbaut.<sup>14</sup>

Allerdings finden sich mittlerweile auch lineare Bauteile aus Faserzement, glasfaserverstärktem Beton, Keramik und Metall am Markt, die allerdings nach Bauart der VHF verarbeitet werden.<sup>15</sup>

Bei den plattenförmigen Werkstoffen für den Außenbereich finden neben Metallen, Kunststoffen auch verschiedene Holz(verbund)werkstoffe Anwendung. Dabei bestimmen die verwendete Holzart und -qualität sowie Bindemittel und Verleimung deren Eignung:<sup>16</sup>

- Zementgebundene Spanplatten
- Mehrschichtige Schnittholzplatten
- Fassadensperrholz (Abb. 26)
- Furnierschichtholz
- HPL-Platten (Abb. 27)

In Teilbereichen (bedingt geeignet) können ebenfalls

- Hochdichte Faserplatten
- OSB-Platten
- Spanstreifenholz
- Zementgebundene Holzwolleplatten

eingesetzt werden.<sup>17</sup>

### 3.2 Plattengrößen und -formate

Bei den verbauten Größen wird zwischen Klein-, Mittel- und Großformat unterschieden. Dabei weisen kleinformatige Bauteile Vorteile hinsichtlich der bauseitigen Anpassung (Öffnungen und Ränder) auf, mit dem ‚Nachteil‘ handwerklichen Arbeitsaufwands und hohem Fugenteil.

<sup>16</sup> Vgl. Hegger et al., 2005, S. 109

<sup>17</sup> Vgl. Cerliani/Baggenstos, 2000, S. 56

Abb. 25 Lärche, Schnittholz (oben)

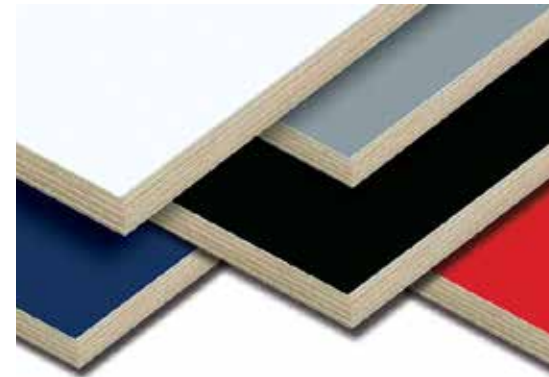
Abb. 26 Birkensperrholzplatte / MetsäWood FLEX (mitte)

Abb. 27 High Pressure Laminate (HPL) Platten / Trespa® Meteon® (unten)



Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Anwendungen im Fassadenbereich



<sup>14</sup> Vgl. Fachregeln des Zimmererhandwerks 01, August/2006

<sup>15</sup> Vgl. DIN 18516-1, Juni/2010



	KBZ	Rohdichte *	Materialstärke		Breite	Länge	Flächengewicht (trocken)	
			min	max			min	max
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]
Lärche, Fassadenbrett [1]	LA	540 – 620	8	40	140	5000	4,60	23,20
Schnittholzplatten, dreischichtig [1]		400 – 500	12	75	3000	6000	5,40	33,75
Schnittholzplatten, fünfschichtig [1]		400 – 500	12	75	3000	6000	5,40	33,75
Schnittholzplatten, mehrschichtig [2]			24	140	2170	7200	10,80	63,00
Bau-Furniersperrholz [1]	BFU	600 – 800	10	40	1850	3050	7,00	28,00
Bau-Furniersperrholz / D [3]	BFU		5	60	3000	5200	3,50	42,00
OSB Platte [1]	OSB	600 – 660	6	40	2620	5000	3,80	25,20
Zementgebundene Spanplatten B1 [4]		≥ 1250	8	40	1250	3100	10,00	50,00
Zementgebundene Spanplatten A2 [4]		≥ 1350	10	32	1250	3100	13,50	43,20
Argeton [Tonziegel] [5]		2000 - 2200	24	30	150	1500	33,00	42,00
Schichtpressstoffplatten / Meteor [6]	HPL	≥ 1350	6	13	2130	4270	8,10	17,55
ROCKPANEL Woods/Durable [7]		1050	6	8	1250	3050	6,30	8,40
fibreC [Glasfaserbeton] [8]		≥ 2000	8	13	1200	3600	26,00	32,00
Holzleichtbetonplatten	HLB	800	20	30	600	600	16,00	24,00
Holzleichtbetonplatten [9]	HLB	800	25	55	450	700	20,00	44,00

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Anwendungen im Fassadenbereich

Tab. 5 Herstellungsmaße ausgewählter Hölzer und Plattenwerkstoffe

Nach DIN 18 516 dürfen die Platten maximal 0,4 m<sup>2</sup> groß sein und maximal 5 kg wiegen, um ohne eigenen Nachweis eingesetzt werden zu können.<sup>18</sup>

Betrachtet man sich unter anderem Einreichungen beim Deutschen Fassadenpreis für vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF)<sup>19</sup>,

bestätigt sich indessen die Tendenz zu mittel- und insbesondere großformatige Platten. Diese ermöglichen Fassadengestaltungen mit reduziertem Fugenanteil, was auch – bei entsprechender Zuschnittoptimierung – kostengünstigere Lösungen ermöglicht.

Zementgebundene Spanplatten (Produktnamen u.a. Eternit: Duripanel) sind bei Dicken zwischen 8 und 40 mm und einer Breite von 1250 mm in Längen bis zu 2600 / 3100 mm

- [1] Hegger et al., 2005, S. 70, 72
- [2] Cerliani/Baggenstos, 2000, S. 51
- [3] Cerliani/Baggenstos, 2000, S. 46
- [4] Eternit "Duripanel", Firmenangaben (2013)
- [5] Wienerberger, Firmenangaben (o.J.)(mit Holzkammern)
- [6] Trespa, Firmenangaben (2012) und <http://www.wecobis.de>
- [7] <http://www.rockpanel.de>
- [8] <http://www.rieder.cc/at/de/main/produkte/product/1/>
- [9] HLB-Platten "Bau 2015"

\* Mittelwert angenommen

<sup>18</sup> Herzog et al., 2004, S. 86

<sup>19</sup> Vgl. FVHF e.V., Berlin (Hrsg.), 2013 und FVHF e.V., Berlin (Hrsg.), 2015

	KBZ	Rohdichte	Druckfestigkeit	Biegefestigkeit	E-Modul	Wärmeleitfähigkeit	Dampfdiffusionswiderstandszahl	Brennbarkeitsklasse [DIN 4102]
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[W/mk]		
Lärche, Fassadenbrett [1]	LA	540 – 620	41 - 81 *	64 - 132 **	10800-13000	0,11–0,13	302	
Schnittholzplatten, dreischichtig [1]		400 – 500	5,5 – 11 *	4,4 – 22 **		0,14	50/400	B2
Schnittholzplatten, fünfschichtig [1]		400 – 500	7,5 – 11 *	3,5 – 13 **		0,14	50/400	B2
Bau-Furniersperrholz [1]	BFU	600 – 800	4 – 8 *	13 **		0,15	50/400	B2
OSB Platte [1]	OSB	600 – 660	1 – 4,2 *	2,5 – 8 **		0,13	50/100	B2
Zementgebundene Spanplatten B1 [4]		≥ 1250	15	9	4.000 - 4.500	0,35	20/50	B1
Zementgebundene Spanplatten A2 [4]		≥ 1350	15	9	4.000 - 4.500	0,40	40/120	A2
Argeton [Tonziegel] [5]		2000 - 2200		12 - 20	2.500 – 5.000			A1
Schichtpressstoffplatten / Meteon [6]	HPL	≥ 1350		120	8 - 12.000	0,30		B1, B2
ROCKPANEL Woods/Durable [7]		1050		27	4015	0,35		
fibreC [Glasfaserbeton] [8]		≥ 2000		18	10000	2		A1
Holzleichtbetonplatten	HLB	800	8 – 18	2,8 – 6,1 ***	1.400 - 1.700	0,20		
Holzleichtbetonplatten [9]	HLB	800	8 – 18	2,8 – 6,1 ***	1.400 - 1.700	0,20		

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Anwendungen im Fassadenbereich

erhältlich.<sup>20</sup> Furniersperrholzplatten, in unterschiedlichen Holzarten und Oberflächenqualität angeboten, sind in Deutschland bei Dicken zwischen 5 und 60 mm und Breiten bis 2000 mm in Längen bis zu 3000 / 5200 mm verfügbar.<sup>21</sup> Mehrschichtige Schnittholzplatten in Fichte, Tanne und Lärche werden bei Dicken zwischen 24 und 140 mm und Breiten bis max. 2170 mm in Längen bis max 7200 mm angeboten. Ein großes Spektrum, basierend

auf weitgehend industriellen Produktionsabläufen.

Plattenförmige Bauteile aus Holzleichtbeton weisen gegenüber marktgängigen Produkten eine Reihe von Unterschieden auf, sowohl bei den mechanisch-physikalischen Kennwerten als auch den (bisherigen) Herstellungsbedingungen. (Tab. 5 und 6) Hinsichtlich der Rohdichte sind HLB-Platten schwerer als Vollholz- und die meisten Holzwerkstoffprodukte, allerdings (etwas) leichter gegenüber Faserzement (FZ) und Glasfaserbetonen.

Tab. 6 Mechanisch-physikalische Kennwerte ausgewählter Hölzer und Plattenwerkstoffe

- [1] Hegger et al., 2005, S. 70, 72  
 [4] Eternit "Duripanel", Firmenangaben (2013)  
 [5] Wienerberger, Firmenangaben (o.J.) (mit Holzkammern)  
 [6] Trespa, Firmenangaben (2012) und <http://www.wecobis.de>  
 [7] <http://www.rockpanel.de>  
 [8] <http://www.rieder.cc/at/de/main/produkte/product/1/>  
 [9] HLB-Platten "Bau 2015"

- \* zul. Druckfestigkeit in Plattenebene  
 \*\* zul. Biegespannung rechtwinklig zur Plattenebene  
 \*\*\* Biegezugfestigkeit

20 Cerliani/Baggenstos, 2000, S. 38  
 21 Cerliani/Baggenstos, 2000, S. 46

Bei der Materialstärke liegen die bisherigen Mindestdicken (> 20 mm) über den geringen Bauteilabmessungen von FZ- und Glasfaserbetonplatten.

Vergleicht man die Fertigungsmaße (zwischen 3.000 und 6.000 mm), bestehen (noch) herstellungsbedingte Einschränkungen.

Bei den Kennwerten werden Druck- und Biegezugfestigkeiten von Faserzementplatten nicht erreicht, bleibt der E-Modul deutlich darunter. Für den Einsatz als Bekleidungs-material sind die bisher erzielten Materialkennwerte jedoch mehr als ausreichend zu bezeichnen.

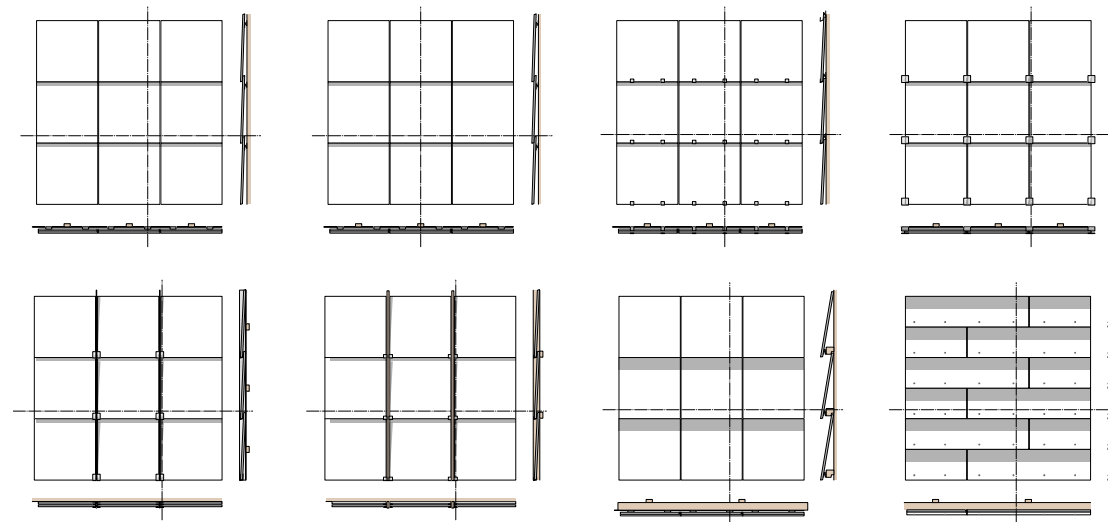
### 3.3 Anordnung, Befestigung und Fugenausbildung (Musterkästen)

Für das gestalterische Konzept und die konstruktive Ausbildung von vorgehängt hinterlüftet Fassaden stellen Aspekte der Flächen-gliederung, Art der Befestigung in Verbindung mit der Fugenausbildung wichtige Kriterien dar. Zusätzlich bestimmt die Anordnung in der Ebene (parallel oder geneigt zur tragenden Wand) maßgeblich das Erscheinungsbild (Licht- und Schattenwirkung). Daher wurden, auch als Vorbereitung der praxisnahen Tests von Bekleidungskonzepten im Maßstab 1:1, verschiedene Systematisierungsschritte durchgeführt:

- prinzipielle Planung und Anwendung, unterteilt in sichtbare/nicht sichtbare Befesti-

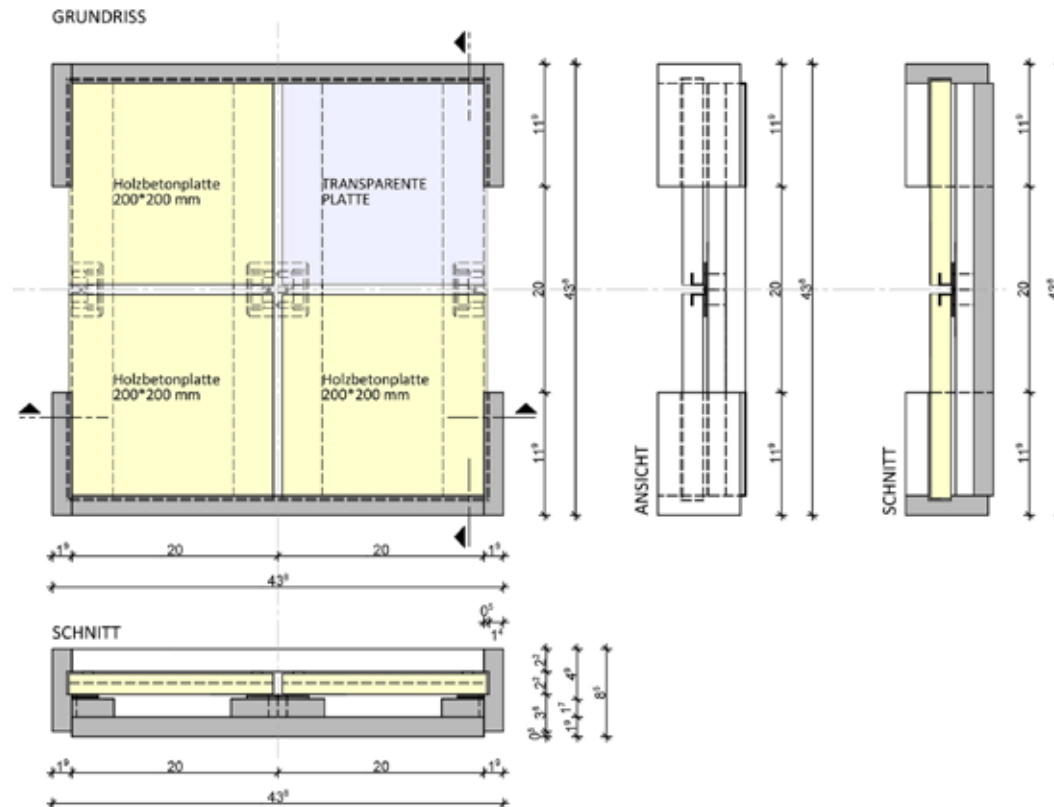
Abb. 28 Geschuppte Anordnung in unterschiedlicher Neigung, Befestigung sichtbar (im Fugenbereich bzw. Plattenfeld), nicht sichtbar

Abb. 29 Musterkasten (Variante1), nicht sichtbare Befestigung (BWM-Klammer)



Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Anwendungen im Fassadenbereich



- gung, offene/geschlossene Fugen, ebene/geschuppte Anordnung (Abb. 28)
- Bau von Musterkästen, zur Überprüfung der Kombination mit marktgängigen Befestigungssystemen und -elementen sowie von Farbigkeit und unterschiedliche Oberflächenstrukturen

Anhand von Musterkästen wurden über die gängige Unterkonstruktion (Grund- und Traglattung) aus Holz hinaus sichtbare und nicht sichtbare Befestigung in ebener und geschuppter Anordnung untersucht:

- BWM-Klammern ATK 100 KL (Abb. 29)
- BWM- Agraffenbefestigung ATK-130 P 20 (Abb. 33)
- H-Schienen aus Aluminium
- handelsübliche Edelstahl Rundkopfschraube mit Beilagscheibe (Abb. 30)
- Einsatz von Edelstahlwinkelschiene zur horizontalen Flächengliederung (Abb. 31)
- Befestigung nach Alphon Moeding Ziegelfassade (Aluminium)
- (objektspezifische) Halterungswinkel (Aluminium (Abb. 32) und Edelstahl)

Zusätzlich erfolgten weitere Tests mit abgestuften Einfärbungen mit roten, gelben und schwarzen Pigmenten. (Abb. 30 – 33)

Bei diesen Arbeiten zeigt sich durchgängig eine gute Anpassungsfähigkeit der HLB-Platten, allerdings sollten bei der Randausbildung (Falze und Schlitze) aufgrund der Gefahr von Abplatzungen Mindestdicken von  $\geq 10$  mm nicht unterschritten werden.

Die Musterkästen dienen nicht nur zur Vorbereitung und Vorauswahl für die 1:1-Tests im Fassadenstand, sondern haben sich mittlerweile auch als praktische Anschauungsobjekte in der Lehre bewährt. Dazu wurde jeweils die Platte rechts oben zusätzlich in Plexiglas ausgeführt.



Abb. 30 MK\_2, Edelstahl Rundkopfschraube 5\*50 mm mit handelsüblicher Beilagscheibe



Abb. 32 MK\_7, Halterungswinkel (Aluminium)



Abb. 31 MK\_3, wie MK\_2 plus Edelstahlwinkelschiene, gekantet nach Maß



Abb. 33 MK\_4, BWM- Agraffenbefestigung ATK-130 P 20

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Anwendungen im Fassadenbereich

## 4 Praktische Untersuchungen und Demonstrationsprojekte



Holzleichtbeton für  
Sanierung von  
Außenwänden

Demonstrationsprojekte

Abb. 34 Fassadenteststand der Fa. Keilholz (Nürnberg-Kraftshof) mit drei HLB-Versuchsflächen, Variante 1 (links), 2 (zweite von links), 3 (rechts)

### 4.1 Ausführungs- und Detailplanung Fassadenstand

Im Rahmen des Projekts wurden drei Musterflächen (2,50 m x 1,10 m [L x B]) an einem südorientierten und frei bewitterten Fassadenteststand, im Norden der Stadt Nürnberg gelegen<sup>1</sup>, (Abb. 34) mit Holzleichtbetonplatten eingerichtet, um die Dauerhaftigkeit unter Bewitterung und eventuelle farbliche und strukturelle Veränderungen wie z.B. die Vergrauung des Holzes beurteilen zu können. Auf Grundlage der prinzipiellen Anordnungsvarianten in Verbindung mit den getesteten Befestigungssystemen und -elementen wurde für die Bestückung mit HLB-Platten eine repräsentative Auswahl getroffen. Die Aufbauarbeiten erfolgten im Juli 2013. (Abb. 35) Die Flächen unterliegen der Sonneneinstrah-



Abb. 35 Montage von HLB-Platten der Versuchsfläche, Variante 1

<sup>1</sup> Fa. L. u. H. Keilholz GmbH, Nürnberg

lung und Hauptniederschlagsrichtung (überwiegend aus Süd-West).

- Fassadenteststand – Feld 1  
nahezu quadratische Platten (60 x 53 cm) mit sichtbarer Befestigung (Edelstahlschrauben) und nicht sichtbarer Befestigung, Variante mit horizontaler Gliederung durch Edelstahlblech, teils mit schalungsglatte bzw. geschliffener Oberfläche (Abb. 36 - 39)
- Fassadenteststand – Feld 2  
querformatige Platten (120 x 53 cm), in unterschiedlicher Neigung geschuppt angeordnet, sichtbare (Edelstahlhalterungswinkel) und nicht sichtbare Befestigung (Abb. 40 - 42, S. 22)
- Fassadenteststand – Feld 3  
querformatige Platten (120 x 53 cm und 60



Abb. 36 Fassadenteststand (Fa. Keilholz) – Feld 1 (22.05.2014)

Holzleichtbeton für  
Sanierung von  
Außenwänden

Demonstrationsprojekte



Abb. 37 Fassadenteststand – Feld 1 (03.07.2013)



Abb. 38 Fassadenteststand – Feld 1 (22.05.2014)



Abb. 39 Fassadenteststand – Feld 1 (16.11.2016)

x 106 cm), Reckli Kunststoff-Schalungsmatrize mit Rippenstruktur (2/77 Tigris), horizontale und vertikale Anordnung, geschlossene Fugen, nicht sichtbare Befestigung (Abb. 43 - 45, S. 23)

Neben der Überprüfung von Handhabung (Montage, Plattengewicht, Anpassung vor Ort) und visueller Wirkung war es vor allem das Ziel Einschätzungen zur ästhetischen Dauerhaftigkeit, in der Fläche, im Bereich der Fugen, durch Vor- und Rücksprünge, plastische Oberflächenstrukturen, zu gewinnen. Über einen Zeitraum von mittlerweile viereinhalb Jahren (Mai 2013 bis Oktober 2017) sind die HLB-Platten im Fassadenteststand eingebaut und bestätigen die bisherigen Erkenntnisse, da praktisch kaum optische Auffälligkeiten wie Farbveränderungen oder Frostschäden an den Platten feststellbar sind. Bei der Versuchsfläche 2 (rechtes Feld) erscheinen bei den HLB-Platten mit geschliffener Oberfläche in einigen wenigen Bereichen allerdings Feinstanteile 'abgewaschen', was die Porigkeit leicht erhöht. (Abb. 41 + 42)

Bei der Versuchsfläche 3 wurde eine strukturierte Oberfläche mit feingliedriger Rippenstruktur gewählt, um bei der horizontalen und vertikalen Anordnung der Vertiefungen die Bildung von Staubnestern und den gleichmäßigen Wasserabfluss zu prüfen. Auch hier zeigen die HLB-Platten so gut wie keine negativen Einflüsse. (Abb. 44 + 45, Seite 23) Darüber hinaus sollte der Ansatz einer 'fugenlosen' Fassadenbekleidung mit eher kleinformatigen Platten getestet werden. Das Ergebnis spiegelt erfolgreich eine interessante Alternative insbesondere zu homogenen Putzoberflächen wider. Beim Einbau zeigten sich jedoch kleinere Ungenauigkeiten bei der Befestigung der Unterkonstruktion, wodurch



Abb. 40 Fassadenteststand (Fa. Keilholz) – Feld 2 (22.05.2014)



Abb. 41 Fassadenteststand – Feld 2 (22.05.2014)



Abb. 42 Fassadenteststand – Feld 2 (16.11.2016)

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Demonstrationsprojekte

sich in beiden Feldern Unebenheiten sowohl in der vertikalen als auch der horizontalen Fuge ablesen lassen. (Abb. 43)

Parallel zum Einbau in den Fassadenteststandflächen erfolgten in Nürnberg an der Fakultät Bauingenieurwesen weitere Bewitterungsversuche.

Diesmal wurden HLB-Platten im bodennahen Bereich mit glatter Oberfläche auf Trägermaterial (geklebt und geschraubt) an einer Stahlbetonwand befestigt und dauerhaft frei bewittert. (Abb. 46 + 47, S. 24)

Die Platten sind zum Teil mit roten und anthrazitfarbenen Pigmenten zusätzlich eingefärbt worden. Bei glatter Schalung ist die Oberfläche in der Regel nicht von einer gewöhnlichen Sichtbetonoberfläche zu unterscheiden. Bei Einbindung der Holzspäne im Zementleim treten nur geringe optische Veränderungen durch Verschmutzungen, Vergraugung oder Aufrauung der Textur auf. Die hohe kapillare Saugfähigkeit kann in Lagen mit Staunässe zu Verschmutzungen und einer größeren Oberflächenrauheit durch den höheren Frostangriff im Winter führen (Abb. 48 + 49, S. 24).

Horizontal bewitterte Platten werden durch Witterungseinflüsse stärker beeinflusst, weil die Porensättigung in den Wintermonaten über lange Zeiträume sehr hoch ist. Hieraus resultiert ein höherer Frostangriff, der eine Aufrauung der Plattenoberfläche zur Folge haben kann. Auch treten Verschmutzungen durch Wasserränder deutlicher auf.



Abb. 43 Fassadenteststand (Fa. Keilholz) – Feld 3 (22.05.2014)



Abb. 44 Fassadenteststand – Feld 3 (03.07.2013)



Abb. 45 Fassadenteststand – Feld 3 (16.11.2016)

Holzleichtbeton für  
Sanierung von  
Außenwänden

Demonstrationsprojekte





Abb. 46 Fassadenplattenteststand (TH Nürnberg/BI) – Fläche 1 (17.07.2013)



Abb. 47 Fassadenplattenteststand (TH Nürnberg/BI) – Fläche 1 (20.11.2013)

Holzleichtbeton für  
Sanierung von  
Außenwänden

Demonstrationsprojekte



Abb. 48 Fassadenplattenteststand (TH Nürnberg/BI) – Fläche 2 (17.07.2013)



Abb. 49 Fassadenplattenteststand (TH Nürnberg/BI) – Fläche 2 (20.11.2013)

## 4.2 Demonstrationsprojekte

Abschließend erfolgten konzeptionelle Untersuchungen mit mittelgroßen (Sanierung) und großflächigen HLB-Platten für zwei Demonstrationsprojekte.

- Siegburg, Niedrigenergiehaus (2011)  
Architekten Kauer - Brodmeier – Peter,  
Regensburg

Für den (Vor-)Entwurf des eingeschossigen Niedrigenergiehauses sollten HLB-Platten als vorgehängtes, hinterlüftetes Bekleidungsma-  
terial vollflächig eingesetzt werden. Ziel war ein moderater Mix an Formaten und Abmes-  
sungen mit maximalen Plattengrößen von 2,00 x 1,00 m. (Abb. 50)



Abb. 50 Siegburg, Niedrigenergiehaus (2011) / Nordfassade; Architekten Kauer - Brodmeier – Peter, Regensburg

Holzleichtbeton für  
Sanierung von  
Außenwänden

Demonstrationsprojekte



Abb. 51 Nürnberg-Neunhof, Reihen-Endhaus (1969) / Konzept Fassadensanierung "Querformatige Platten" (2012/2013)  
Schraffierte Flächen 'Standard'-Platten; weiße Flächen Anpassungen bzw. Sonderformate

Für eine Umsetzung – auch in Teilflächen – konnte letztlich kein regionaler Betonfertigteilerunternehmer als Partner gefunden werden.

- Nürnberg-Neunhof, Reihen-Endhaus (1969) / Fassadensanierung

Das zweigeschossige Reihen-Endhaus aus den 1960iger Jahren, mit einer noch nicht wärmegeämmten Außenwand (Westfassade, bauseits mit Faserzement-Platten auf Mauerwerk bekleidet), liegt im Norden der Stadt Nürnberg im Ortsteil Neunhof, und ist ein repräsentatives Beispiel für Sanierungsmaßnahmen im Kleinwohnungsbau: Schmale Fassadenbreiten mit hohem Öffnungsflächenanteil. Besonderheit ist die geschlossene Giebelwand, bei der für die Konzeptfindung der vorhandene Garagenanbau zunächst nicht berücksichtigt wurde.

Für die Entwurfsarbeit wurden verschiedene Ansätze mit linearen (betont querformatigen) und mittelformatigen Platten untersucht. Neben der (schwierigen) Anpassung des Fugenbildes an die Öffnungsränder spielten jeweils auch Aspekte minimierten Verschnitts bei möglichst wenigen Schalungsformen eine wichtige Rolle.

Dabei zeigte sich bei horizontal angeordneten Formaten ein schlüssiger Bezug auf die Öffnungen in der Vertikalen, während seitlich gute Anpassungsmöglichkeiten (Zuschnitt im Werk bzw. auf der Baustelle) bei den HLB-Platten bestehen. (Abb. 51, S. 25)

Bei dem Reihenendhaus wurde auch der Ansatz einer ‚fugenlosen‘ Plattenanordnung



Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Demonstrationsprojekte

Abb. 52 Nürnberg-Neunhof, Reihen-Endhaus (1969) / Konzept Fassadensanierung "Fugenlos" (2012/2013)

(auf Basis Fassadenteststand - Fläche 3) alternativ vorgeschlagen (Abb. 52, S. 26), da gerade im Kleinwohnungsbau viele Eigentümer zwar das System der vorgehängten hinterlüfteten Fassade aus bauphysikalischen Aspekten und aufgrund der hohen Gestaltungsvielfält positiv bewerten, aber mit Bezug auf die homogenen (WDVS-)Putzflächen selbst mit einem fein differenzierten Fugenbild ‚fremdeln‘. Hier ermöglichen Platten mit Rippenstruktur, sowohl horizontal als auch vertikal, und einer Randausbildung mit Falz eine nahezu einheitliche, geschlossene Flächenwirkung.

### 4.3 Ergänzende Experimente

Plattenförmige Bauteile aus Holzleichtbeton können als akustische Decken- bzw. Wandabsorber die Nachhallzeiten reduzieren und somit die raumakustische Situation verbessern. Für einen „Showroom“ an der Fachhochschule Rosenheim (2008) wurde erstmals eine HLB-Lamellendecke (Akustikbaffeln) realisiert.<sup>1</sup> Dabei gelang es, konstruktive, die für eine Abhängung von der Rohdecke erforderlichen Festigkeitswerte und das Tragverhalten von Holzschrauben im Holzleichtbeton, sowie gestalterische Aspekte unter praxisnahen Bedingungen erfolgreich zu überprüfen.

<sup>1</sup> Krippner et al., 5/2009, S. 17

Abb. 55 Mehrschichtige HLB-Platte, obere Lage HLB mit steifer Konsistenz mit deutlich poröser Oberfläche

Abb. 56 Mehrschichtige HLB-Platte, raumseitig HLB mit weicher Konsistenz

Abb. 57 HLB-Akustikplatte mit schlanker Gitterstruktur und mehrlagigen Hanfvliese als Absorberfläche



Abb. 53 Besprechungsraum BB.314, TH Nürnberg mit Muster einer Teilflächenbelegung an Wand (zwischen Fenstern) und Decke

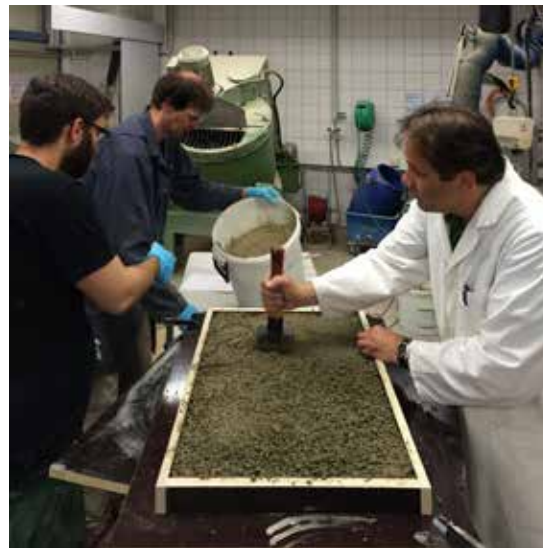
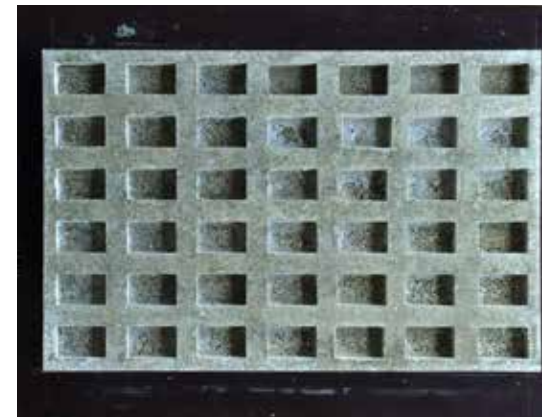


Abb. 54 Betonage eines mehrschichtigen HLB-Plattenmusters, obere Lage HLB mit steifer Konsistenz



Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Demonstrationsprojekte

Aktuell erfolgen an der Fakultät Architektur Versuche mit mehrschichtigen HLB-Platten sowie der Kombination von Holzleichtbeton und Hanfvliesen (jeweils 0,70 m x 0,45 m [L x B], d = 50 mm). Für den Besprechungsraum BB.314 (Abb. 53, S. 27) sollen Teilflächen in der Außenwand und als Unterdecke mit HLB-Platten nachgerüstet werden. Es ist geplant diese Maßnahme zur Verbesserung der Raumakustik auch durch Messungen zu begleiten.

Bei den nass-in-nass betonierten HLB-Platten (55 + 56, S. 27) werden zwei unterschiedliche Mischungen verwendet; raumseitig, aufgrund von Kantenstabilität und Schlankheit des Randes bzw. der Binnenstege, ein Holzleichtbeton mit einer Rohdichte  $\rho$  von etwa 900 kg/m<sup>3</sup>, mit weicher Konsistenz, auf der Rückseite, zur Erhöhung von Holzanteil und Porosität ein HLB mit einer Rohdichte  $\rho$  von etwa 600 kg/m<sup>3</sup>, der aufgrund seiner deutlich steiferen Konsistenz, stampfend verarbeitet wird. (Abb. 54, S. 27) Bei den HLB-Platten mit Hanf sind einer 20 mm dünnen, filigranen Gitterstruktur Vliesmatten mehrlagig hinterlegt, die auch zusätzlich einen farblichen Akzent bilden können. (Abb. 57, S. 27) Erste vereinfachte Abschätzungen zum längenbezogenen Strömungswiderstand zeigen das beide Aufbauten die erforderlichen Kennwerte erreichen, mit Vorteilen bei der mehrschichtigen Platte.<sup>2</sup>

Parallel zu den Planungen und Vorbereitungen der praktischen Untersuchungen (Fassadenteststand und Demonstrationsprojekte) wurden die Materialexperimente mit Holzleichtbeton auch in Lehrveranstaltungen (Schwerpunktfächer) der Fakultät Architektur eingebunden:

- WS 2014/2015 – MA-4092 “Sonderthemen / Lehrforschung”: Sichtbeton - Holzleichtbeton
- WS 2016/2017 – MA-4040 “Werkstoffe”: Bauen mit Sichtbeton / Sonderbetone (Holzleichtbeton)

Im Rahmen dieser studentischen Arbeiten sind die Überlegungen zur Oberflächengestaltung stets von großer Relevanz. Durch seine Eigenfarbigkeit, einem aufgrund des feinkörnigen, organischen Zuschlags deutlich wärmeren Grundton im Vergleich zu Normalbeton, ermöglicht das Material gestalterisch hochwertige Oberflächen. Durch weitere Zusätze können diese noch verfeinert und akzentuiert werden. Für einen sichtbaren Einsatz von Holzleichtbeton, mit Ablesbarkeit des Zuschlagsmaterials und Tiefe der Strukturen, ist in der Regel jedoch eine nachträgliche Oberflächenbearbeitung erforderlich. Dabei ist bei Anwendungen im Außenbereich ggf. zusätzlich eine Beschichtung vorzunehmen.

Die mannigfaltige Bandbreite an strukturellen, stofflichen und farblichen Gestaltungsmöglichkeiten, die das Kompositmaterial eröffnet, nachgerade als Alternative zu den vielfältig (beliebig) beschichteten Plattenwerkstoffen, konnte im Rahmen der Innovationsplattform Beton der BetonMarketing Deutschland auf der BAU 2015 gezeigt werden. (Abb. 58 + 59) Innerhalb eines Schwerpunktfaches (WS 2014/2015) erarbeiteten die Masterstudierenden neuartige Oberflächenwirkungen. Das Spektrum bei den mittelgroßen Platten (0,70 m x 0,45 m [L x B], d zwischen 20 und 55 mm) reichte von horizontalen, vertikalen und diagonalen Strukturen (Abb. 60 + 63, S. 29), deren Gliederungen und Reliefbildungen auch durch verschiedene natürliche Schalhautmaterialien wie Bambusstäbe erzeugt werden, über farbige Plattengitter als semi-



Abb. 58 Innovationsplattform Beton der BetonMarketing Deutschland ...



Abb. 59 ... auf der Messe BAU 2015 (19.01. bis 24.01.2015) in München

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Demonstrationsprojekte

<sup>2</sup> Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Sorge, Ingenieurbüro für Bauphysik GmbH & Co. KG, Nürnberg

transparente filigrane Raumteiler (Abb. 65) und Kombinationen mit einem mäandernden Lichtband aus hinterleuchteten, transparenten Acrylglas-Rundstäben (Abb. 62), bis zu sehr plastischen Ausarbeitungen in einer Art Hochrelief (gespaltene Holzscheite als Schalungsform) (Abb. 61).

Alle Konzepte spiegeln dabei ein hohes Maß an Exaktheit in Textur wie Kantenstabilität wider. Ein Plattenmuster mit diagonaler plastischer Grundstruktur bringt den organischen Zuschlagsstoff besonders zur Geltung; die als Zuschlag eingesetzten Holzpartikel (Siebfraktion  $\leq 4$  mm) werden zusätzlich auf der Schalung vollflächig ausgelegt. Gebunden durch den Frischbeton entsteht im Ergebnis eine raue Oberfläche in der das Holz als guter „Lichtmodulator“ durch die hohe Dichte dominiert, was zu reizvollen farblichen Effekten führt. (Abb. 64)

Die äußerst positiven Rückmeldungen seitens des Fachpublikums und der Endverbraucher während der Ausstellungswoche bestätigen die visuelle wie auch taktile Wirkung und hohe emotionale Akzeptanz von Holzleichtbeton als Plattenmaterial im Innenausbau.

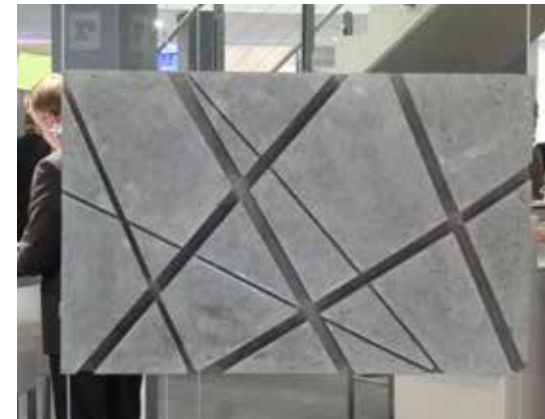


Abb. 60 HLB-Plattenmuster (BAU 2015) mit rechteckigen Vertiefungen

Abb. 61 ... mit gespaltene Holzscheite als Schalungsform

Abb. 62 ... mit Acrylglasrundstäben zur Hinterleuchtung

Abb. 63 ... mit diagonal verlaufenden unterschiedlichen Vertiefungen

Abb. 64 ... mit Schicht aus Holzspänen als Oberfläche

Abb. 65 ... mit polygonaler Gitterstruktur, grün eingefärbt



Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Demonstrationsprojekte

## 5 Zur ökologischen Bewertung von Holzleichtbeton

In einem weiteren Teil der Projektarbeiten werden erste überschlägige Betrachtungen hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs und der ökologischen Auswirkungen bei der Herstellung von Holzleichtbetonmischungen im Rahmen einer Bachelorarbeit vorgenommen.<sup>1</sup> Untersuchungsparameter sind analog der Ökobilanz im Bauwesen:

- nicht erneuerbarer Primärenergieverbrauch (PEne)
- erneuerbarer Primärenergieverbrauch (PEe)
- Treibhauspotenzial (GWP)
- Ozonabbaupotenzial (ODP)
- Versauerungspotenzial (AP)
- Eutrophierungspotenzial (EP)
- Photooxidantienpotenzial (POCP)

Um erste Einschätzungen treffen zu können, welche Ausgangsstoffe und in was für einer Größenordnung bei der Herstellung von Holzleichtbeton hinsichtlich einer ökologischen Bilanzierung relevant sind, werden die ermittelten Werte mit denen der Herstellung eines konventionellen Leichtbetons verglichen.

Bei der Holzleichtbetonherstellung erfolgt im Betonlabor die Realisierung mehrerer Mischungen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen, wobei der Zementhersteller in den einzelnen Mischungen (C35 und C36) variiert. Um etwaige Unterschiede bei der Zusammensetzung hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs sowie der ökologischen Auswirkungen identifizieren zu können, werden beide Mischungen parallel betrachtet. Zusammensetzung und Parameterermittlung

- Für Zement lag das Baustoffprofil eines Portlandzements CEM 1 zugrunde

- Bezüglich des Zugabewassers wurde das Profil für Trinkwasser aus der Datenbank "Gabi 4"<sup>2</sup> herangezogen und mit der jeweiligen Wassermenge der beiden Mischungen verrechnet.
- Die verwendeten Holzspäne stammen aus einem Sägewerk, bei dem diese als Abfallprodukt anfallen. Eine alternative Verwendungsmöglichkeit wäre die Pelletierung zu Brennstoff. Da nicht geklärt werden konnte, welchem Prozess der "Restwert" der Holzspäne zuzuordnen ist, werden für deren Herstellung in dieser Betrachtung keine Werte angesetzt.

Der Holzleichtbeton wird derzeit nur in kleinen Mengen im Labor verarbeitet. Zu berücksichtigende Parameter bezüglich einer industriellen Produktion und der damit einhergehenden Transportprozesse liegen demnach nicht vor. Daher werden diese Parameter aus der Umwelt-Produktdeklaration eines vergleichbaren Produkts ermittelt und in die Bewertung des Holzleichtbetons mit einbezogen. Als vergleichbares Bauprodukt sind großformatige Bauteile aus Leichtbeton ausgewählt worden, von deren Herstellung eine Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 des Typs "Wiege bis Werkstor" vorliegt.<sup>3</sup>

Die deklarierten Leichtbetonelemente werden aus Zement, Grubenbims, Bims-Waschsplitt und Wasser hergestellt. Deklariert wird die Herstellung eines Kubikmeters, wobei sich deren Rohdichte auf 900 kg/m<sup>3</sup> beläuft.

Bei den beiden Holzleichtbetonmischung zeigt sich, dass Mischung C35 in allen zu bewertenden Kategorien etwas höhere Werte aufweist, als Mischung C36. Dies ist auf den

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Ökologische Bewertung von Holzleichtbeton

<sup>1</sup> Greis, WS 2012/13, S. 68-78

<sup>2</sup> <http://www.gabi-software.com>

<sup>3</sup> Umwelt-Produktdeklaration, 25.04.2013

etwas höheren Zementanteil in Mischung C35 zurückzuführen. Mit der Erhöhung des Zementanteils, steigen unabhängig von allen anderen Faktoren, sowohl der Primärenergieverbrauch als auch die ökologischen Auswirkungen an, wobei diesbezüglich näherungsweise von einer direkten Proportionalität ausgegangen werden kann.

Für den Vergleich bilden die Werte der Herstellung der Leichtbetonelemente die Bezugsgröße mit 100 % und die ermittelten Werte bezüglich der Herstellung der Holzleichtbetonelemente werden dazu in Relation gesetzt.

Im Ergebnis wird ersichtlich, dass die Ökobilanzen der Herstellung von Holzleichtbetonelementen in sechs der sieben zu bewertenden Kategorien höhere Werte aufweisen als die der Herstellung gewöhnlicher Leichtbetonelemente (Abb. 66).

Der größte Unterschied lässt sich im Treibhauspotenzial erkennen, bei welchem der Wert des Holzleichtbetons (Mischung C 35) um 155 % erhöht ist. Am wenigsten weichen die Werte bei den Holzleichtbetonmischungen beim Verbrauch von nicht erneuerbarer Primärenergie gegenüber dem konventionellen Leichtbeton ab, dennoch liegen auch diese um 54 % (Mischung C 35) bzw. 50 % (Mischung C 36) über der Referenzgröße.

Bei der Bewertung des Ozonschichtabbaupotenzials verhält es sich umgekehrt. Hier erreichen beide Holzleichtbetone nur 57 % des konventionellen Leichtbetons, was auf den verwendeten CEM 1-Zement zurückgeführt werden kann.

Die Herstellung des Bindemittels bestimmt die errechneten Parameter maßgeblich. Dies zeigt sich am deutlichsten beim Treibhauspotenzial, woran die Bindemittelherstellung einen Anteil von 98 % hat. Das Ozonschichtabbaupotenzial wird hingegen nur zu

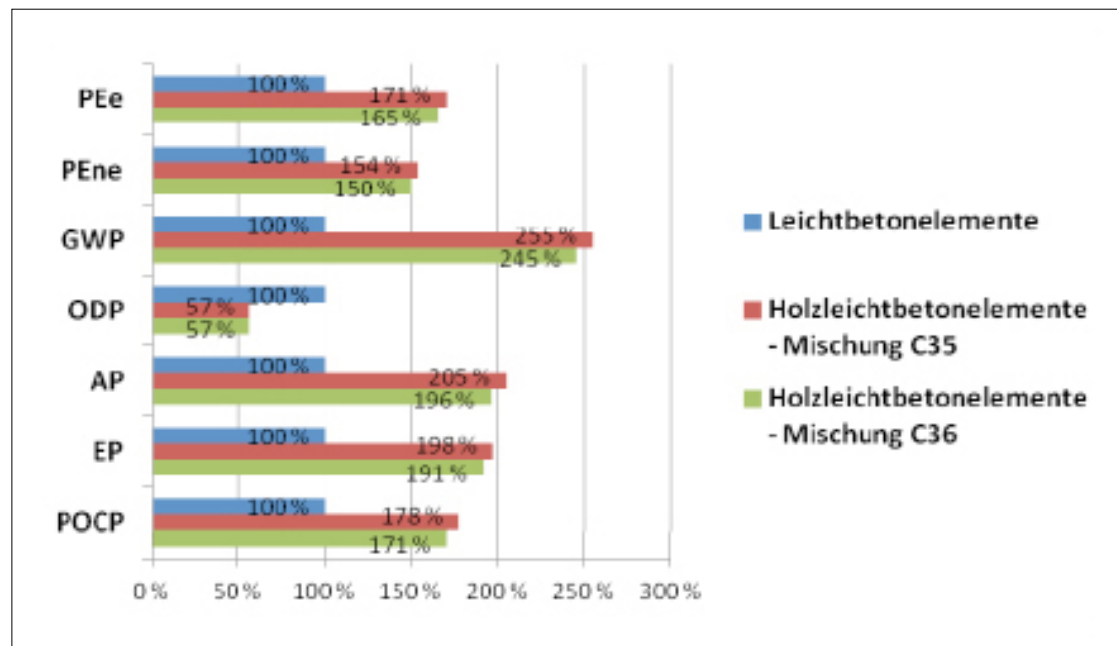


Abb. 66 Vergleich des Primärenergieverbrauchs und der ökologischen Auswirkungen bei der Herstellung von Leicht- und Holzleichtbetonbauteilen

33 % von der Bindemittelherstellung verursacht, wobei hier der angenommene Produktionsprozess mit 66 % als Hauptverursacher ausgemacht werden kann.

Die zugrunde gelegten Transporte spielen in allen Kategorien lediglich eine untergeordnete Rolle. Die mit dem Wasserverbrauch einhergehenden ökologischen Auswirkungen und der Primärenergieverbrauch sind praktisch zu vernachlässigen. Hier können lediglich Anteile von 0,007 % bezüglich des Versauerungspotenzials (AP), bis hin zu 0,8 % bezüglich des Überdüngungspotenzials (EP) festgestellt werden.

Diese ersten näherungsweisen Einschätzungen müssen jedoch in nächsten Schritten

mit 'professionellen' Programmen detailliert überprüft werden. Allerdings ist der maßgebliche Einfluss des Bindemittels auf die ökologische Bewertung von Holzleichtbeton offensichtlich geworden.

Hier gilt es künftig auch Alternativen zum Bindemittel Zement, zum Beispiel "alkalisch aktivierte Binder"<sup>4</sup>, für eine auch ökologische Optimierung von Holzleichtbeton in die Materialexperimente einzubeziehen.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Projektarbeiten, die gegenüber der Antragsstellung auch um etliche Inhalte erweitert wurden, konnte erfolgreich eine neue Datenlage bei den mechanisch physikalischen Kennwerten von Holzleichtbetonmischungen aufgezeigt werden. Auch wurden im Bereich der Sanierung von Außenwänden und als Alternative zu marktgängigen Fassadenbekleidungswerkstoffen weitere konzeptionelle und experimentelle Untersuchungen mit positiven Ergebnissen durchgeführt. Ferner hat sich gezeigt, dass die Materialeexperimente "Holzleichtbeton" sich hervorragend – auch fakultätsübergreifend – als Wissens- und Technologietransfer in die Lehre einbinden lassen. (Abb. 67)

Seit 2009 wird nun an den Fakultäten Architektur und Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Nürnberg an verbesserten Materialeigenschaften und der Erweiterung des Einsatzspektrums gearbeitet. Das Ziel der Optimierung von Holzleichtbetonen, die ohne aufwändige Vorbehandlung der Späne auf einfache Weise hergestellt werden können, als Material für plattenförmige Bauteile im Bereich der Innenwand- und Deckenbekleidung sowie der Fassadenbekleidung, ist in weiten Bereichen erreicht. Der Baustoff Holzleichtbeton befindet sich nach mehrjähriger Forschungsarbeit im Labormaßstab und ersten 1:1 Testversuchen an der Schwelle zur Praxisanwendung.

Die für plattenartige Bauteile verwendeten Holzleichtbetone besitzen eine Reihe von vielversprechenden Eigenschaften, bereiten aber auch noch einige Probleme vor allem hinsichtlich der langfristigen Formstabilität. HLB-Platten sind nach bisherigen Erkenntnissen für den Einsatz als Fassadenbauteile geeignet.

Darüber hinaus sind trotz erster Pilotvorhaben im Betonfertigteilm- sowie Transportbetonwerk



Abb. 67 HLB-Plattenmuster (WS 2016/2017) in Kombination mit Innenraum-/Fassadenbegrünung und -beleuchtung

noch offene Fragen insbesondere zu fertigungstechnischen Abläufen in Verbindung mit Demonstrationsprojekten zu klären. Unter anderem wie sich kleinere Chargen eines Sonderbetons bei standardisierten Prozessketten in der Werkhalle handhaben lassen, Einsatz von stehender Schalung um die bisherige taktweise liegende Betonage zu optimieren bis hin zur Herstellung großer gegossener Blöcke aus denen vergleichbar der Verarbeitung von Naturwerkstein mit speziellen Maschinen das Plattenmaterial herausgesägt wird. Derartige Fertigungsansätze könnten auch eine sinnvolle Schnittstelle zwischen Betonwerk (Plattenherstellung) und Zimmermannsbetrieb (Außenwandbekleidung) bilden.

Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden

Zusammenfassung und Ausblick

## 7.1 Literaturverzeichnis

- Cerliani, Christian; Baggenstos, Thomas: Holzplattenbau. Lignum, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz (Hrsg.). Zürich 2000.
- DIN 18516-1: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet, Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze <Juni 2010>. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- Dittrich, Sebastian: Ein Bautoff für die Zukunft - Alkalisch aktivierte Binder. Hrsg. v.: Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Standort Holzkirchen, Abteilung Bauchemie, Baubiologie und Hygiene / Gruppe Betontechnologie und funktionale Baustoffe. Faltblatt. Valley, 01/2017.
- Fachregeln des Zimmererhandwerks 01. Außenwandbekleidungen aus Holz- und Holzwerkstoffen. Hrsg. v.: Bund Deutscher Zimmermeister im ZDB. Berlin, August/2006.
- Fadai, Alireza; Winter, Wolfgang: Ressourceneffiziente Konstruktionen in Holzleichtbeton-Verbundbauweise. In: Bautechnik, 91. Jg., 10/2014, S. 753–763.
- FVHF e.V., Berlin (Hrsg.): Ausgezeichnete Architektur. Deutscher Fassadenpreis 2013 für vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF). München, September/2013.
- FVHF e.V., Berlin (Hrsg.): Ausgezeichnete Architektur. Deutscher Fassadenpreis 2015 für vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF). München, September/2015.
- Greis, Benjamin: Entwicklung eines Werkzeugs zur ökologischen Bewertung von Gebäuden und Baustoffen am Beispiel eines Einfamilienhauses. Bachelorarbeit. Nürnberg, WS 2012/13.
- Hegger, Manfred; Auch-Schwelk, Volker; Fuchs, Matthias; Rosenkranz, Thorsten: Baustoff Atlas. Edition Detail. München 2005
- Heinz, Detlef; Urbonas, Liudvikas: Holzbeton. Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 16. Stuttgart 2008.
- Heinz, Detlef: Holzbeton. Vermählung zweier Werkstoffe. In: Die Baustellen. Fachzeitschrift für Hoch-/Tief- und Spezialbau, 6. Jg., Sondernummer/2013, S. 16–18.
- Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner: Fassaden Atlas. Edition Detail. München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2004
- Hoppe, Michaela: Energetische Sanierung von Bestandsbauten in Holz- und Massivbauart unter Einsatz von Holz und Holzwerkstoffen. Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 10. Stuttgart 2008.
- Johnscher, Florian: Gebrauchstauglichkeit und Tragsystem von plattenförmigen Bauteilen aus Holzleichtbeton. Masterthesis. Nürnberg, Januar/2014.
- Jorge, F. C.; Pereira, C.; Ferreira, J.M.F.: Wood-cement composites: a review. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 62. Jg., 5/2004, S. 370–377.
- Krippner, Roland: Zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden. Dissertation. München, Mai 2004.
- Krippner, Roland: Holzleichtbeton. Potentiale von Holz-Zement-Mischungen. In: Zuschnitt. Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz, 12. Jg., Nr. 45, März/2012, S. 19.
- Krippner, Roland; Niebler, Dagmar; Issig, Holger: Holzleichtbeton im Hochbau. Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 17. Stuttgart 2008
- Krippner, Roland; Niebler, Dagmar; Urbonas, Liudvikas; Heinz, Detlef: Schnell erhärtender Holzleichtbeton. Teil II: Mögliche Anwendungsgebiete. In: holztechnologie, 50. Jg., 5/2009, S. 19–23.
- Krippner, Roland; Freimann, Thomas: Holzleichtbeton mit Textilbewehrung – Verbundwerkstoff für plattenförmige Bauteile. Forschungsprojekt (10/2009 - 03/2011). Gefördert durch die STA-EDTLER Stiftung Nürnberg. Abschlußbericht (unveröffentlicht). Nürnberg, November/2011.
- Krippner, Roland; Kress, Hubert: Vorstudie: Energetische Sanierung von Einfamilienhäusern in Erlangen. Forschungsprojekt (4/2009 - 01/2012). Abschlußbericht (unveröffentlicht). Nürnberg, Januar/2012.
- Holzleichtbeton für Sanierung von Außenwänden
- Anhang

[Stamm-Teske, Walter]: Experiment Holzbeton green:house, Weimar. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 59. Jg., 12/2011, S. 38–43.

Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804. Großformatige Elemente aus Leichtbeton [Gültig bis 24.04.2018]. Deklarationsinhaber: Bundesverband Leichtbeton e.V., Neuwied. Hrsg. v.: IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V. Königswinter, 25.04.2013.

Urbonas, Liudvikas; Heinz, Detlef; Krippner, Roland; Niebler, Dagmar: Schnell erhärtender Holzbeton. Teil I: Hydrationsmechanismen und physikalisch-technische Eigenschaften der Holzbetone. In: holztechnologie, 50. Jg., 4/2009, S. 16–21.

Weinmann, Michael: Baustofftechnologische Untersuchungen von Holzbeton. Masterthesis. Nürnberg, Juli/2011.

Winter, Stefan; Henke, Klaudius; Talke, Daniel: Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzbeton. Forschungsbericht / Abschlussbericht, F 3002. Stuttgart 2016.

## 7.2 Eigene Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes

### 7.2.1 Publikationen

Freimann, Thomas: Mechanisch-physikalische Eigenschaften von Holzbetonen. In: Thomas Steinborn (Hrsg.): Festschrift Ludger Lohaus zur Vollendung des sechzigsten Lebensjahres. Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 12. Hannover 2014, S. 1–14.

Holzbeton. Forschung. [Technische Hochschule] Nürnberg, Deutschland, Roland Krippner. In: beton:book. In: Christine Bärnthaler OFROOM GmbH (Hrsg.). Private Edition. Wien 2015, S. #44.

Krippner, Roland: Holzbeton. Was ist eigentlich Holzbeton? Antwort gibt ... von der TH Nürnberg. [Anlässlich Präsentation stu-

dentischer Arbeiten BAU 2015 / Stand Beton-Marketing Deutschland GmbH (19.01.2015)]. Internet-Video; Länge 01:31 min [https://www.youtube.com]. In: Beton-Newsletter, Nr. 114, April/2015, S. 1.

Krippner, Roland: (Telefon-)Interview - "Alternative Baumaterialien". Astrid Löffler: Holzbeton statt Umweltzeitbomben. In: Nürnberger Nachrichten / Sonderveröffentlichung - Rohstoff Geist, Nr. 43, 21.02.2015, S. 19 [WOM].

Krippner, Roland: Review: Holzbeton. Zu Forschungsstand und Einsatzmöglichkeiten im Bereich von Innenausbau und Fassade. In: holztechnologie, 58. Jg., 4/2017, S. 42–49.

Krippner, Roland; Freimann, Thomas: Materialexperiment Holzbeton. In: Baukultur. Zeitschrift des DAI, 1/2015, S. 34–35.

### 7.2.2 Vorträge

Krippner, Roland: Holzbeton. Zu Einsatzmöglichkeiten in Innenausbau und Fassade. Veranstaltung: Gesellschafterversammlung Qualitätsgemeinschaft Doppelwand Bayern. Saalfelden/A, Hotel Gut Brandlhof, 06.03.2015.

Krippner, Roland: Zum architektonischen Potenzial von Holzbeton. Forschungsstand und Einsatzmöglichkeiten im Bereich von Fassade und Innenausbau. Veranstaltung: HOLZ+ Symposium für Verbundtechnologien. Augsburg, Hotel am alten Park, 21.01.2016.

Krippner, Roland: Holzbeton - Innovative Low-Tech-Betontechnologie. Leistungsfähigkeit und Anwendungsmöglichkeiten. Veranstaltung: 1. Würzburger Bau-Forum. Würzburg, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, 07.04.2016.

Krippner, Roland: [in Vorbereitung] Holzbeton - Innovative Low-Tech-Betontechnologie. Leistungsfähigkeit und Anwendungsmöglichkeiten. Veranstaltung: 1. Rosenheimer Bau-Forum - Beton in der Architektur. Rosenheim, Hochschule Rosenheim, 10.10.2017.

### 7.2.3 Ausstellung(stellnahmen) "Holzbeton"

Sonderschau BETON. im Rahmen der Architect@Work. Fachevent für Architektinnen, Innenarchitektinnen und andere Planerinnen mit Schwerpunkt Produktinnovationen. 16.- 17. September 2015. Organisation: OFROOM GmbH, Christine Bärnthaler. Wien, Stadthalle, 2015.

Holzbeton. Musterplatten für Innenwandbekleidungen. BAU 2015 [Weltleitmesse für Architektur, Material und Systeme]. Innovationsplattform Beton der BetonMarketing Deutschland. 19.01.2015 bis 24.01.2015. Organisation: Roland Krippner, Thomas Freimann mit BetonMarketing Deutschland (Martin Peck). München, Messe München, 2015, Halle A2, Stand 328.

Bauen mit Holz. Holzbaupreis Bayern 2014 | Studentische Projekte. Materialexperimente [Holzbeton]. 13. bis 27. November 2015. Organisation: Roland Krippner. Nürnberg, Offenes Büro im Dienstleistungszentrum Bau der Stadt Nürnberg, 2015.

Sonderausstellung zum Thema Beton. im Rahmen der 3. com:bau. Messe für Architektur - Bauhandwerk - Energie - Immobilien. 04. - 06. März 2016. Organisation: OFROOM GmbH, Christine Bärnthaler. Dornbirn/A, Messe, Halle 4/5, 2016.

### 7.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 25 (S. 15)  
<http://mink.all.biz/de/> <28.08.2015>

Abb. 26 und 27 (S. 15)  
<http://www.holztusche.de> <28.08.2015>

Abb. 39, 42, 45  
 Thomas Kauer, Regensburg/ Würzburg

Holzbeton für Sanierung von Außenwänden

Anhang