

**Kurzbericht: Hochwärmedämmende, monolithische Sichtbetonaußenteile
aus Architekturleichtbeton**

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit,

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, Technische Universität Kaiserslautern

Sachbearbeiter:

Dr. rer. nat. Joachim Schulze, Dipl.-Ing. Christian Heese, Dipl.-Ing. Bianca Bund

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, Technische Universität Kaiserslautern

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des
Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-10.24 / II3 – F20-10-1-032

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

1. Ziel der Forschungsaufgabe

Die Kombination der physikalischen Eigenschaften eines hochwärmedämmenden Leichtbetons mit den optischen Eigenschaften eines sogenannten Architekturbetons ermöglicht die Gestaltung von Bauteilen, bei denen der bewusst betonte Ausdruck des Baustoffs Beton mit den aktuellen und zukünftig absehbaren energetischen Anforderungen an die Eigenschaften von Außenbauteilen vereint werden kann. Gegenüber der üblichen mehrschaligen Außenwand bietet eine Ausführung als homogene, massive Architekturbetonwand aus Leichtbeton Vorteile im Hinblick auf Gestaltungsmöglichkeiten, Vermeidung von Fugen, Bauzeit, Wärmespeichervermögen und Wiederverwertbarkeit der Baustoffe. Durch Optimierung der Materialeigenschaften des Architekturleichtbetons soll eine monolithische Wand (Wandstärke ca. 50 cm) entsprechend den Kriterien der ENEC 2009 realisiert werden können, die darüber hinaus hohe Ansprüche an optische sowie bauphysikalische Anforderungen erfüllt.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung von hochwärmedämmenden, monolithischen Leichtbetonaußenbauteilen aus Sichtbeton, die vor dem Hintergrund des "nachhaltigen Bauens" als einem Forschungsschwerpunkt an der TU Kaiserslautern, aus recycelbaren Baustoffen (Blähglas, etc.) sowie einem Zement mit optimierter Ökobilanz hergestellt werden sollten.

Monolithische Außenbauteile aus wärmedämmendem Leichtbeton sind aufgrund ihrer geringen Dichte und porigen Struktur empfindlich gegen Wasser/Feuchtigkeit und sonstige eindringende korrosionsfördernde Medien. Des Weiteren mussten die gestellten Forderungen hinsichtlich Frischbetoneigenschaften und mechanischen Anforderungen zielsicher erreicht werden. Das Erzielen von ausreichenden Materialeigenschaften ist somit von einer möglichst geschlossenen und homogenen Oberfläche abhängig, die gleichzeitig eine hohe Sichtbetonqualität ermöglicht. Das monolithische Bauteil sollte ohne zusätzliche Dämmung die Anforderungen der ENEC 2009 (U-Wert von $0,28 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$) erfüllen und mit Kerndämmung einen U-Wert von $0,2 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$ erreichen. Hierzu sollten geeignete Kerndämmmaterialien eingesetzt werden, die insbesondere die Aspekte des nachhaltigen Bauens berücksichtigen und die Recycelfähigkeit der Gesamtkonstruktion möglich machen. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte die Entwicklung eines Architekturleichtbetons mit folgendem Anforderungsprofil realisiert werden:

- hohe Sichtbetonqualität mit möglichst gefügedichter Oberfläche
- Wandkonstruktion erfüllt die Anforderungen der ENEC 2009
- Ausgangsstoffe erfüllen Nachhaltigkeitsanforderungen
- Frischbeton: leichte Verdichtbarkeit, Mischungsstabilität
- Festbeton: Druckfestigkeit LC 8/9, Rohdichte $< 750 \text{ kg}/\text{m}^3$
- ausreichender Widerstand gegen eindringende Gase (Luftpermeabilität, Wind) und Wasser
- Optimierung der Schwindeigenschaften

Das rechnerische Bemessungsverfahren für die monolithische Konstruktion aus dem neu entwickelten Architekturleichtbeton erfolgte im Fachgebiet „Massivbau und Baukonstruktion“ der Technischen Universität Kaiserslautern (Prof. Dr.-Ing. J. Schnell).

2. Durchführung der Forschungsaufgabe

2.1 Optimierung der Betonzusammensetzung

2.1.1 Allgemeines

Aufgrund der angestrebten Eigenschaften, z. B. gute Wärmedämmeigenschaften des Architekturleichtbetons bei hoher Dichtigkeit gegen eindringende Feuchtigkeit und Gase trotz geringer Rohdichte und geschäumter Zementmatrix, waren spezielle Anforderungen an die ausgewählten Ausgangsstoffe zu stellen.

2.1.2 Zement

Wegen der erforderlichen sehr geringen Wärmeleitfähigkeit wurde im Frischbeton die entstehende Hydratationswärme sehr langsam abgeführt. Die zu Beginn der Betonentwicklung verwendeten Zemente (CEM II/A-S 42,5 N, Weißzement CEM I 42,5 R) führten bei größeren Versuchskörpern (ca. 400 dm³) zu Frischbetontemperaturen von über 100 °C. Der Einsatz eines speziellen CEM III/B 32,5 N, der laut Hersteller eine extrem langsame Hydratationswärmeentwicklung aufweist, führte zu einer deutlichen Absenkung der erreichten Maximaltemperatur, die allerdings immer noch zu einer Erwärmung des Probekörpers auf ca. 70 °C nach 40 Stunden führte (Abbildung 1).

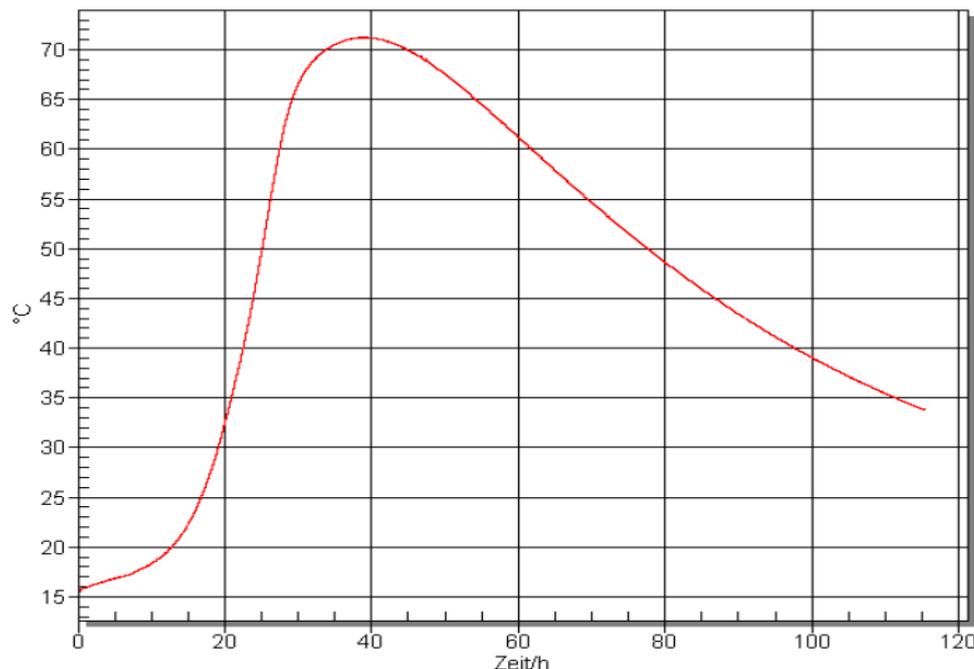


Abbildung 1: Hydratationswärmeentwicklung des Architekturleichtbetons mit CEM III/B 32,5N

2.1.3 Gesteinskörnung

Basierend auf den Ergebnissen der umfangreichen Vorversuche konnten verschiedene leichte Gesteinskörnungen, wie z. B. Blähton und Bims, als geeignete Gesteinskörnung für Architekturleichtbeton ausgeschlossen werden. Die angestrebten Eigenschaften hinsichtlich Wasseraufnahme und Wärmeleitfähigkeit konnten nur mit einer leichten Gesteinskörnung aus industriell gefertigtem Recyclingblähglas realisiert werden, das sich durch eine geringe Kornrohichte sowie geringe Wasseraufnahme bei ausreichender Druckfestigkeit auszeichnete. Um eine stetige Sieblinie zu erhalten, kamen die in Abbildung 2 gezeigten Kornfraktionen zum Einsatz.



Abbildung 2: Leichte Gesteinskörnungen für Architekturleichtbeton

2.1.4 Zusatzmittel

Die gewünschten Produkteigenschaften des Architekturleichtbetons waren nur durch einen ausgefeilten „Zusatzmittelcocktail“ erreichbar. Zum Erreichen der selbstverdichtenden Fließeigenschaften war ein hochwirksames PCE-Fließmittel erforderlich. Um Entmischungerscheinungen entgegen zu wirken wurde ein Stabilisator zugesetzt. Die angestrebte geringe Trockenrohddichte ließ sich nicht allein durch den Einsatz von Blähglas realisieren, sondern erforderte die Anwendung eines Schaumbildners zum Aufschäumen der Zementmatrix. Dieser hohe Porenanteil barg die Gefahr einer verstärkten Wasseraufnahme, welche durch den Einsatz eines hydrophobierenden Zusatzmittels reduziert werden konnte. Die Gefahr einer verstärkten Rissbildung infolge des Trocknungsschwindens wurde durch den Einsatz eines sogenannten Schwindreduzierers verringert. Zur erfolgreichen Optimierung der Betoneigenschaften war somit die Zugabe von insgesamt fünf Zusatzmitteln erforderlich.

2.1.5 Ergebnis der Betonoptimierung

Die Betonoptimierung musste widersprüchliche Anforderungen, wie z. B. ausreichende Druckfestigkeit bei möglichst geringer Rohddichte sowie geringe Wasseraufnahme trotz aufgeschäumter Zementmatrix erfüllen. Die durchgeführten Untersuchungen führten zu der in Tabelle 1 dargestellten Zusammensetzung des Architekturleichtbetons. Dieser für den Bau des Forschungsgebäudes verwendete Architekturleichtbeton wies eine Frischbetonrohddichte von 720 - 740 kg/m³ auf. Die als Zielgröße formulierte Frischbetonrohddichte von höchstens 750 kg/m³ wurde somit unterschritten (Trockenrohddichte ca. 650 - 700 kg/m³).

Tabelle 1: Zusammensetzung Architekturleichtbeton

Material	kg/m ³	Material	kg/m ³
Blähglas 0,25/0,5	74,1	Fließmittel	5,8
Blähglas 1/2	74,1	Stabilisator	0,5
Blähglas 4/8	61,6	Hydrophobierung	1,3
Zement CEM III/B 32,5 N	370,3	Schwindreduzierer	9,2
Wasser	135,8	Schaumbildner	7,4

2.2 Eigenschaften des Architekturleichtbetons

2.2.1 Konsistenz

Aufgrund der extrem leichten Gesteinsfraktionen aus industriell gefertigten Blähglas war eine selbstverdichtende Konsistenz des Architekturleichtbetons erforderlich, da eine intensive Zufuhr von Verdichtungsenergie zu Entmischungserscheinungen führt und die leichten Körnungen aufschwimmen lässt. Die Optimierung der Betonzusammensetzung führte zu einem Architekturleichtbeton, der ein Setzfließmaß von 680 - 700 mm aufwies (Abbildung 3). Wie Abbildung 3 zeigt, neigte der entwickelte Leichtbeton nicht zum Absondern von Wasser.



Abbildung 3: Setzfließmaß der optimierten Architekturleichtbetonrezeptur

2.2.2 Mechanische Kennwerte des Architekturleichtbetons

Als niedrigste genormte Festigkeitsklasse der DIN EN 206-1 [1] wird der Leichtbeton LC 8/9 aufgeführt. Diese genormten Leichtbetone weisen jedoch eine Rohdichte (ofentrocken) von mindestens 800 kg/m^3 auf. Aufgrund der geringeren Rohdichte lag die Druckfestigkeit des Architekturleichtbetons erwartungsgemäß unter der Druckfestigkeitsklasse LC 8/9 (nach 28 d bei 6,0 MPa bis 6,5 MPa).

Tabelle 2: Mittelwerte der Druckfestigkeit an Würfeln (150 mm) aus Architekturleichtbeton

Probenalter [d]	3	7	14	28	56	90	180
Druckfestigkeit [MPa]	2,6	3,7	5,4	6,3	8,7	9,2	9,2

Entsprechend den geringen Druckfestigkeiten des Architekturleichtbetons lagen die Biegezugfestigkeiten, ermittelt an Prismen nach 28 Tagen, bei ca. 1,3 MPa. Zur Beurteilung der zeitlichen Entwicklung der Zugfestigkeit wurde die Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 [2] zu verschiedenen Zeitpunkten (28 d: 0,9 MPa; 56 d: 1,1 MPa) bestimmt.

Der Elastizitätsmodul des Architekturleichtbetons, bestimmt an Zylindern mit einer Höhe von 300 mm und einem Durchmesser von 150 mm nach 28 Tagen, wies im Mittel etwa 3,5 GPa

auf und erreichte nach 180 Tagen einen Mittelwert von ca. 4,0 GPa. Trotz des im Vergleich zu Normalbetonen relativ geringen Elastizitätsmoduls ist der erreichte Wert des Architekturleichtbetons mit 3,5 GPa im Vergleich zu Baustoffen mit ähnlicher Rohdichte (Bsp.: Porenbeton) als relativ hoch zu bezeichnen.

2.2.3 Widerstand gegen eindringendes Wasser und Gase

Der nach DIN EN ISO 15148 [3] ermittelte Wasseraufnahmekoeffizient zeigte mit Werten unter $0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ (Einstufung: Klasse II, wasserabweisend) die sehr geringe kapillare Wasseraufnahmefähigkeit des neu entwickelten Architekturleichtbetons. Dieser Wert unterschritt die Wasseraufnahme eines Normalbetons (C25/30), der in der Regel einen Wasseraufnahmekoeffizient von ca. $0,7 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ aufweist, deutlich. Für die angestrebten Wärmedämmeigenschaften der monolithischen Außenbauteile aus Architekturleichtbeton war die Einstufung als wasserabweisender Beton von entscheidender Bedeutung, da durchfeuchtete Bauteile mit hohen Wassergehalten deutlich schlechtere Eigenschaften hinsichtlich des Wärmedurchgangs aufweisen. Die geringe Wasseraufnahme war auf den Einsatz des hydrophobierenden Zusatzmittels zurückzuführen.

Die Prüfung der Wassereindringtiefe unter Druck erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12390-8 [4], allerdings unter einem reduzierten Wasserdruck von 100 kPa (1 bar, entsprechend 10 m Wassersäule). Nach 72 h bei einem Wasserdruck von 100 kPa lagen die maximalen Wassereindringtiefen in einem Bereich von ca. 10 mm bis 15 mm.

Mittels der Gaspermeabilitätsmessung gemäß DAfStb-Heft 422 [5] wurde die Gefügedichtigkeit des Betons bestimmt, die entscheidend ist für den Transport von Flüssigkeiten und Gasen. Übliche Betone weisen Permeabilitätskoeffizienten von 10^{-14} m^2 bis 10^{-19} m^2 auf. Die ermittelten Permeabilitätskoeffizienten von $0,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ bis $3,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ belegten, dass der Architekturleichtbeton eine Gaspermeabilität erreichte, die vergleichbar mit Normalbetonen mit hohem w/z-Wert (ca. 0,7) ist.

2.2.4 Schwinden

An den untersuchten Probekörpern aus Architekturleichtbeton mit Schwindreduzierer wurde ein Schwindmaß von ca. 0,7 mm/m nach einem halben Jahr als Mittelwert gemessen, wobei mit einer geringfügigen weiteren Zunahme des Schwindens gerechnet werden sollte. Vergleichsmessungen ohne schwindreduzierende Zusatzmittel, bei ansonsten gleicher Zusammensetzung des Architekturleichtbetons, führten aufgrund des hohen Anteils an geschäumter Zementmatrix und des porösen Blähglaszuschlags mit einem sehr geringen Elastizitätsmodul, im gleichen Zeitraum zu Schwindmaßen von ca. 1,4 mm/m bis 1,6 mm/m. Das erreichte Schwindmaß mit schwindreduzierendem Zusatzmittel lag somit in einem Bereich, der erwartungsgemäß das Schwinden eines Normalbetons überstieg.

2.2.5 Wärmeleitfähigkeit

Der Wärmeleitfähigkeitswert (λ -Wert) des Architekturleichtbetons von ca. $0,15 \text{ W/(K}\cdot\text{m)}$ führt bei einer monolithischen Architekturleichtbetonwand mit einer Stärke von 50 cm zu einem Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $0,28 \text{ W/(K}\cdot\text{m}^2)$ und erfüllt somit die Anforderungen der ENEC 2009 hinsichtlich des Wärmedurchgangskoeffizienten eines Außenbauteils. Durch den Einbau von Mineralschaumdämmplatten mit einer Dicke von 8 cm als Kerndämmung erreicht man rechnerisch einen Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $0,20 \text{ W/(K}\cdot\text{m}^2)$ bei einer Gesamtwandstärke von 50 cm (Passivhausstandard).

2.3 Bau eines Forschungsgebäudes aus Architekturleichtbeton

Die im Labor gewonnenen Untersuchungsergebnisse wurden durch den Bau eines Forschungsgebäudes aus Architekturleichtbeton auf dem Campus der Technischen Universität Kaiserslautern auf ihre Reproduzierbarkeit und die Übertragungsmöglichkeiten auf Bauwerksverhältnisse überprüft. Das eingeschossige Forschungsgebäude aus Architektur-leichtbeton wurde mit einer Grundfläche von ca. 7 m x 5 m und einer Wandhöhe von nahezu 4 m errichtet. Die Seiten des Dachaufbaus wurden lichtdurchlässig ausgebildet, weswegen auf seitliche Fenster in den Wänden verzichtet werden konnte (Abbildung 4).



Abbildung 4: Experimentalgebäude aus Architekturleichtbeton nach den Betonarbeiten

Die Herstellung des Architekturleichtbetons für das Forschungsgebäude erfolgte im Transportbetonwerk, wobei die verschiedenen Blähglasfraktionen mittels „Bigbags“ direkt in die Mischfahrzeuge dosiert wurden. Nach Zugabe des separat hergestellten Zementleims wurde intensiv im Mischfahrzeug gemischt und der selbstverdichtende Architekturleichtbeton mit Kübeln ohne weitere Verdichtung eingebaut. Wände und Dachfläche wurden monolithisch mit einer Dicke von 50 cm hergestellt.

Die verwendete Bewehrung wurde vor dem Einbau verzinkt. Um die Feuchtigkeits- und Temperaturverläufe im Architekturleichtbeton unter natürlicher Bewetterung zu verfolgen, wurden zehn Multiringensorelektroden (MRSE) in Wände und Decke eingebaut, die ein dauerhaftes Monitoring der Außenbauteile ermöglichen.

Durch die eingebauten Multiringensorelektroden konnten die Zusammenhänge zwischen Wetterereignissen und Feuchteaufnahme der Außenbauteile dauerhaft aufgezeichnet und ausgewertet werden. Diesbezügliche Erkenntnisse sind entscheidend für die Beurteilung der wärmedämmenden Eigenschaften sowie der Dauerhaftigkeitsbetrachtungen, da durchfeuchtete Bauteile in beiderlei Hinsicht deutlich schlechtere Eigenschaften aufweisen. Die Untersuchungen der Feuchteverläufe haben gezeigt, dass trotz der porösen Zementmatrix und der leichten Blähglasfraktionen bei dem Baustoff Architekturleichtbeton, eine ausgeprägte Feuchtigkeitszunahme nur bis zu einem Bereich von ca. 20 mm Abstand von der Betonoberfläche auftrat. Die restlichen Bereiche der insgesamt 50 cm dicken Außenwand blieben von spontanen Niederschlagsereignissen nahezu unbeeinflusst und somit hinsichtlich der wärmedämmenden Eigenschaften voll funktionstüchtig.

3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten entwickelte Zusammensetzung des Architekturleichtbetons aus rezykliertem Blähglas und portlandzementklinkerarmem Hochofenzement (CEM III/B 32,5 N) musste hohe Anforderungen hinsichtlich Rohdichte, Dauerhaftigkeit und Wärmeleitfähigkeit erfüllen. Die gewünschten Frischbetoneigenschaften zum Erreichen von selbstverdichtenden Fließeigenschaften ohne Entmischung wurden durch den Einsatz eines PCE-Fließmittels in Kombination mit einem Stabilisator erreicht. Die angestrebte geringe Rohdichte ($< 750 \text{ kg/m}^3$) erforderte die Anwendung eines Schaumbildners zum Aufschäumen der Zementmatrix. Zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit wurden des Weiteren schwindreduzierende und hydrophobierende Zusatzmittel zugegeben.

Bei Trockenrohddichten deutlich unter 700 kg/m^3 wurde eine 28-Tage-Druckfestigkeit von 6,3 MPa (56 d: 8,7 MPa; 90 d: 9,2 MPa) und ein Elastizitätsmodul von etwa 3,5 GPa nach 28 Tagen ermittelt. Die Gaspermeabilität lag trotz der geschäumten Zementmatrix in der Größenordnung eines Normalbetons, wohingegen die kapillare Wasseraufnahme aufgrund des hydrophobierenden Zusatzmittels noch unterhalb eines durchschnittlichen Normalbetons lag.

Die wichtigste Anforderung an den zu entwickelnden Leichtbeton waren seine Eigenschaften hinsichtlich Wärmedämmung, wobei letztendlich ein Wärmeleitfähigkeitswert des Architekturleichtbetons von $\lambda = 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ erreicht werden konnte. Hieraus ergab sich ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $0,28 \text{ W/(K}\cdot\text{m}^2)$ bei den hier verwendeten Wandstärken von 50 cm. Der ermittelte U-Wert erfüllt somit die Anforderungen der ENEC 2009 hinsichtlich des Wärmedurchgangskoeffizienten eines Außenbauteils. Mit einer Mineralschaum-Kerndämmung, die in einer Wand des Experimentalgebäudes eingebaut wurde, konnte ein U-Wert von $0,20 \text{ W/(K}\cdot\text{m}^2)$ erreicht werden.

Die Übertragungsmöglichkeiten der im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse auf Bauwerksverhältnisse wurden durch den Bau eines ca. 7 m x 5 m x 4 m großen Forschungsgebäudes aus Architekturleichtbeton überprüft. Kontinuierliche Messungen mit den in Wänden und Decke eingebauten Multiringensensorelektroden (MRSE) geben Aufschluss über Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe, um eine abschließende Aussage über die tatsächlichen Wärmedämmeigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Architekturleichtbetons bei natürlicher Bewitterung treffen zu können.

Literatur

- [1] DIN EN 206-1:2001-07 Beton; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [2] DIN EN 12390-6:2010-09 Prüfung von Festbeton; Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern
- [3] DIN EN ISO 15148:2003-03 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen
- [4] DIN EN 12390-8:2009-07 Prüfung von Festbeton; Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck
- [5] DAfStb-Heft 422: 1991; Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048