

Bernhard Middendorf, Ekkehard Fehling

**Dauerhafte und wärmedämmende
Wandelemente aus
Fertigteil-Hybriden aus
Ultrahochleistungsbeton (UHPC)
und chemisch aufgetriebenen,
lufthärtendem, mineralischen
Schaumbeton**

F 3128

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0378-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Dauerhafte und wärmedämmende Wandelemente aus Fertigteil-Hybriden aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC) und chemisch aufgetriebenen, lufthärtendem, mineralischen Schaumbeton

Endbericht

Forschungsprogramm

Forschungsinitiative „ZukunftBau“, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat

Projektlaufzeit

01. Juli 2015 bis 31. Dezember 2017

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

(Aktenzeichen: SWD - 10.08.18. 7 - 15.20)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor

bearbeitet von

Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf, Universität Kassel, FB 14 – Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen, FG Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie, Kassel.

Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling, Universität Kassel, FB 14 – Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen, FG Massivbau, Kassel

Folgender Bericht beschreibt das Forschungsvorhaben „Dauerhafte und Wärmedämmende Wandelemente aus Fertigteil-Hybriden aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC) und chemisch aufgetriebene lufthärtendem mineralischem Schaumbeton (CLMS)

Der Bericht gliedert sich in die folgenden fünf Teile:

ERSTER TEIL: Materialentwicklung

ZWEITER TEIL: Bemessung der Wandelemente und Validierung

DRITTER TEIL: Bau und Monitoring des Demonstrators

VIERTER TEIL: Lebenszykluskostenvergleich UHPC-CLMS mit marktüblichen Wandkonstruktionen

FÜNFTER TEIL: Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel des Forschungsvorhabens

Für die Entwicklung eines vollständig mineralischen, tragenden und gleichzeitig wärmedämmenden Wandbauteiles sollen außenliegende ultrahochfeste Beton (UHPC)-Schalen und ein innenliegender Schaum auf UHPC-Basis zu einer Sandwichwandplatte kombiniert werden. Dabei wird ein mineralischer, chemisch aufgetriebener, lufthärtender Schaum (CLM-Schaum) auf Basis einer UHPC-Feinkornmischung genutzt, der im Gegensatz zu Porenbeton luft-erhärtend ist und keine energieintensive Autoklavierung benötigt.

Der CLM-Schaumkern soll als multifunktionaler Baustoff zum einen lastabtragende und zum anderen wärmedämmende Funktionen übernehmen. Der erste Schwerpunkt dieser Arbeit - und Abgrenzung zu den vorhandenen hybriden UHPC-Bauteilen - liegt daher auf der Optimierung der Gefügestruktur des CLM-Schaumes, um eine möglichst hohe Festigkeit bei gleichzeitig hohen Wärmedämmeigenschaften zu erhalten. Dies soll unter anderem mit Leichtzuschlägen, die beispielsweise im Bereich des Konstruktionsleichtbetons eingesetzt werden, erzielt werden.

Um einen nachhaltigen Verbund zwischen CLM-Schaum und UHPC ohne zusätzliche Klebstoffe und Trennschichten zu erzielen, sollen unterschiedliche Betonierreihenfolgen untersucht werden. Die relative Verformungsänderung infolge unterschiedlicher Schwindeigenschaften von UHPC und CLM-Schaum soll dafür auf ein Minimum reduziert werden.

Nach Anpassung und Optimierung des UHPC und der CLM-Schäume an das oben aufgestellte Ziel soll ein geeignetes Herstellverfahren entwickelt werden. Hierzu gehören auch technologische Fragestellungen: Anschlagmittel im Schaum, Fugenausbildung und Konstruktionsablauf.

In Bauteilversuchen an kleinformatischen und wandhohen Versuchskörpern werden deren Eigenschaften hinsichtlich des Verbundes zwischen Betonschalen und CLM-Schaum, ihres Trag- und Verformungsverhaltens und der Wärmeleitfähigkeit des Außenwandsystems untersucht. Die Ergebnisse sollen in einen Bemessungsvorschlag für hybride Wandelemente aus Betonschalen und CLM-Schaum fließen. Exemplarisch soll ein Demonstratorgebäude die prinzipielle Anwendbarkeit gezeigt werden. Ein langfristiges Monitoring dokumentiert das Verhalten der hybriden Wandelemente aus Betonschalen und CLM-Schaum in bauphysikalischer Richtung. Die Untersuchungen werden

durch eine Lebenszykluskostenberechnung und Ökobilanzierung begleitet. Abbildung 1-1 zeigt einen Ausschnitt des Wandelements und eine mögliche Bauausführung.

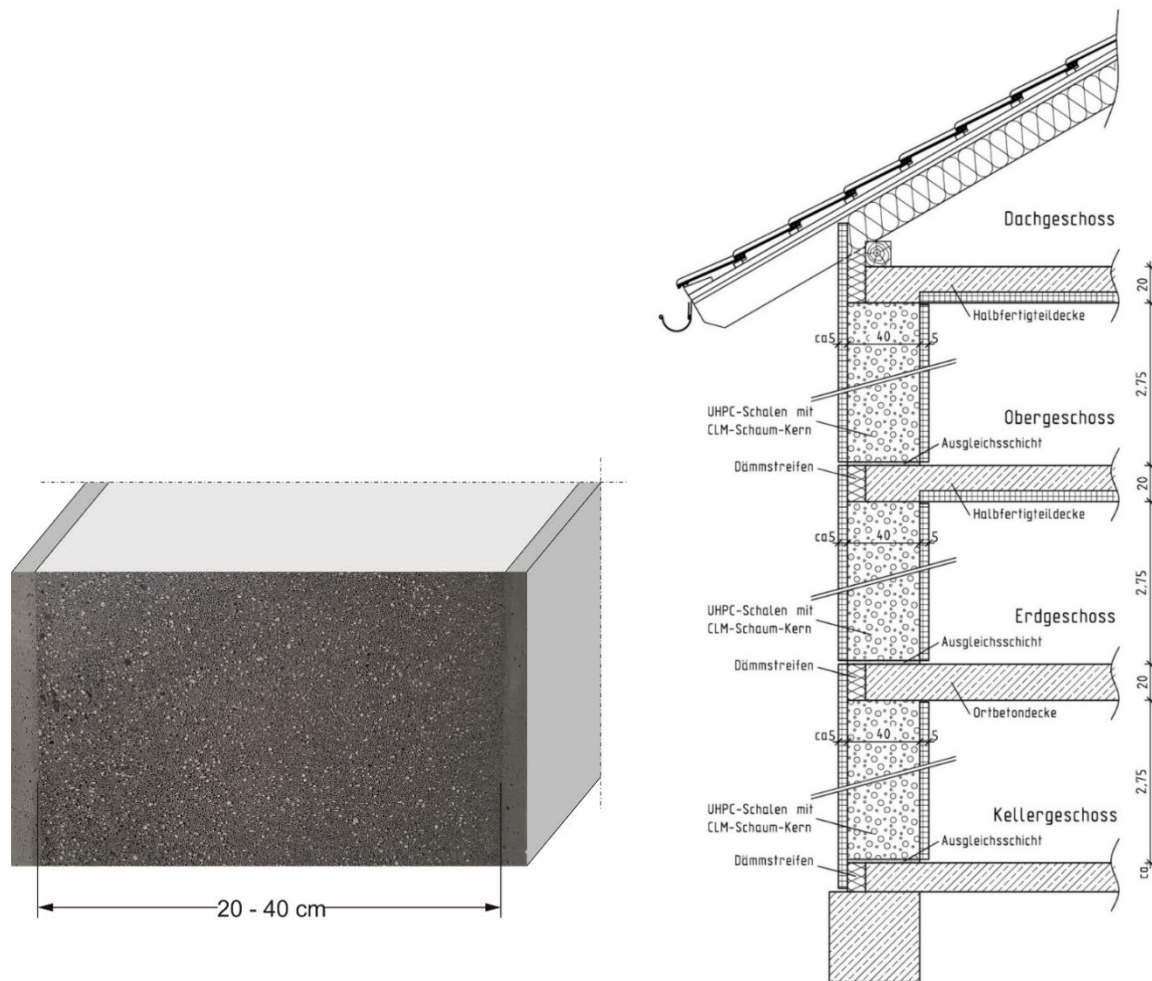


Abbildung 1-1: Ausschnitt eines Wandelements (links) und mögliche Bauausführung (rechts).

ERSTER TEIL

Anpassung des UHPC auf Basis etablierter Mischungen

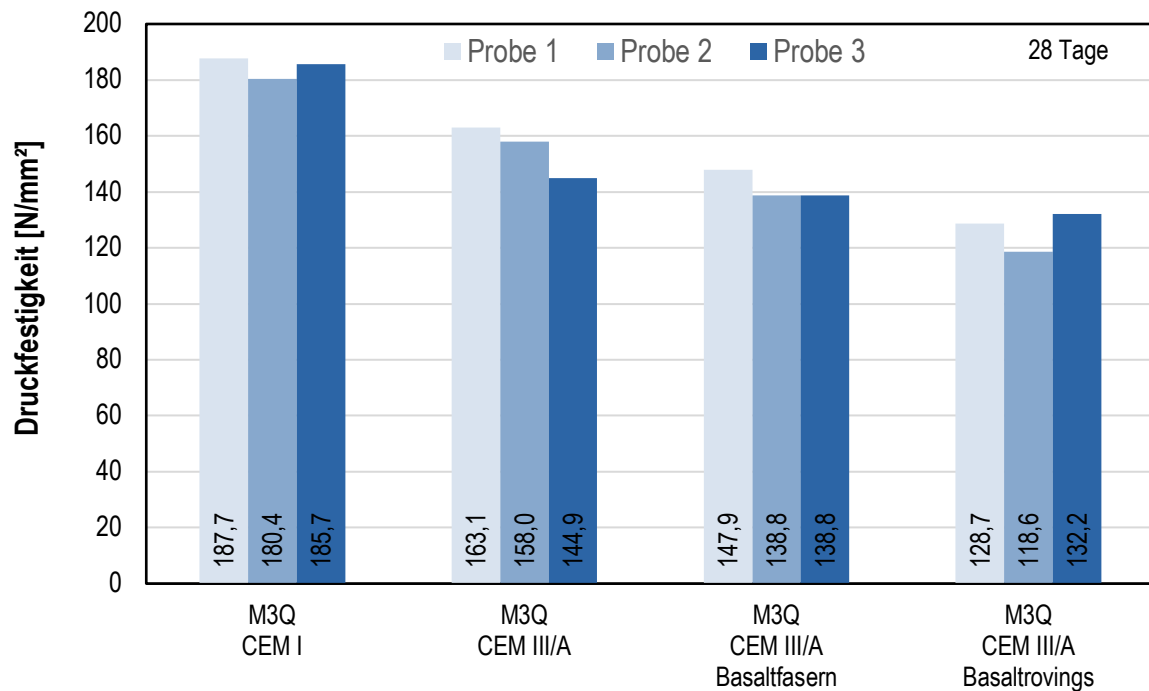
Der UHPC für die Schalenelemente wurde auf Basis der Mischungsrezeptur M3Q mit einem Wasser/Bindemittel-Wert von 0,21 entwickelt. Diese Feinkornmischung mit einem Größtkorn von 0,5 mm wurde schon in anderen Forschungsprojekten an der Universität Kassel verwendet und war auch Bestandteil des DFG-Schwerpunktprogramms 1182 [1]. Die M3Q besteht aus den Rohstoffen Zement, Silikastaub, Quarzmehl und Quarzsand (Tabelle 1-1). Um bei dem niedrigen Wasser/Bindemittel-Wert eine fließfähige Betonmischung zu erhalten, wird der Mischung ein Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether hinzugegeben. Für eine höhere Nachhaltigkeit wurde ein Hochofenzement (CEM III/A) verwendet.

Stahlfasern machen den Beton zu einem Kompositwerkstoff, der nicht mehr rein mineralisch ist, und damit beim Recycling besonders behandelt werden muss. Daher wurde der Einsatz von Basaltfasern und Basaltrovings als Ersatz für die üblicherweise eingesetzten Stahlfasern getestet.

Tabelle 1-1: Mischungsrezeptur für den verwendeten UHPC

Ausgangsstoff	Masse [kg/m³]
CEM I 52,5 R HS/SR3 (Holcim Sulfo) CEM III/A 42,5 N-NA (Holcim Duo4)	790
Sika Silikoll P unkompaktiert	167
Quarzwerke Quarzmehl W12	197
Quarzwerke Quarzsand G32	956
(Basaltfasern)	(27)
w/b-Wert [-]	0,21
Fließmittelwirkstoff/Bindemittel [%]	1,0

Zunächst wurden Mischungen mit CEM I (Holcim Sulfo 5 R) und CEM III/A (Holcim Duo 4 N-NA) ohne Fasern sowie mit einem Basaltfasergehalt von 1,0 % betrachtet (Abbildung 1-2). Durch den Einsatz von dem Hochofenzement CEM III/A wurde die Druckfestigkeit nach 28 Tagen an Würfeln der Kantenlänge 100 mm von 184,6 N/mm² auf 155,3 N/mm² reduziert. Dies ist auf den Hüttensandanteil von 36-65% im Zement zurückzuführen. Hüttensand reagiert deutlich langsamer als Portlandzement was zu geringeren Endfestigkeiten nach 28 Tagen führt. Durch die Basaltfasern versteifte die Mischung stark, sodass das Setzfließmaß um etwa 35% auf 652,5 mm reduziert wurde. Auch die Druckfestigkeit sank auf 141,8 N/mm². Mit Basaltrovings wurde die Konsistenz nur geringfügig beeinflusst (Setzfließmaß 902,5 mm); jedoch sank die Druckfestigkeit von 155,3 N/mm² ohne Fasern auf 126,5 N/mm². Dies entspricht einer Reduzierung von 18,5%.



SFM [mm]	1000/1005	1000/1008	665/640	890/915
-------------	-----------	-----------	---------	---------

Abbildung 1-2: Druckfestigkeiten von UHPC mit unterschiedlichen Zementen (CEM I und CEM III/A) und Fasern (Basaltfasern und -rovings je 1 %) und Setzfließmaß (SFM) nach Mischende.

Den Einfluss von unterschiedlichen Fasern auf die Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen an Prismen (160 mm x 40 mm x 40 mm) aus UHPC ist in Abbildung 1-3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch den Einsatz von Basaltfasern ein sprödes Bruchverhalten nicht verhindert werden kann. Jedoch erhöht sich die Biegezugfestigkeit von 6,2 N/mm² auf 9,1 N/mm². Zum Vergleich ist eine M3Q Mischung mit 1% Stahlfasern mit aufgetragen. Ein so duktiles Bruchverhalten mit einer Laststeigerung im gerissenen Zustand konnte mit den verwendeten Basaltfasern nicht erzielt werden.

Werden Basaltrovings verwendet kann ein etwas duktileres Bauteilverhalten erzielt werden. Hierbei kann nach dem Erstriss keine weitere Laststeigerung beobachtet werden, wie bei der Verwendung mit Stahlfasern.

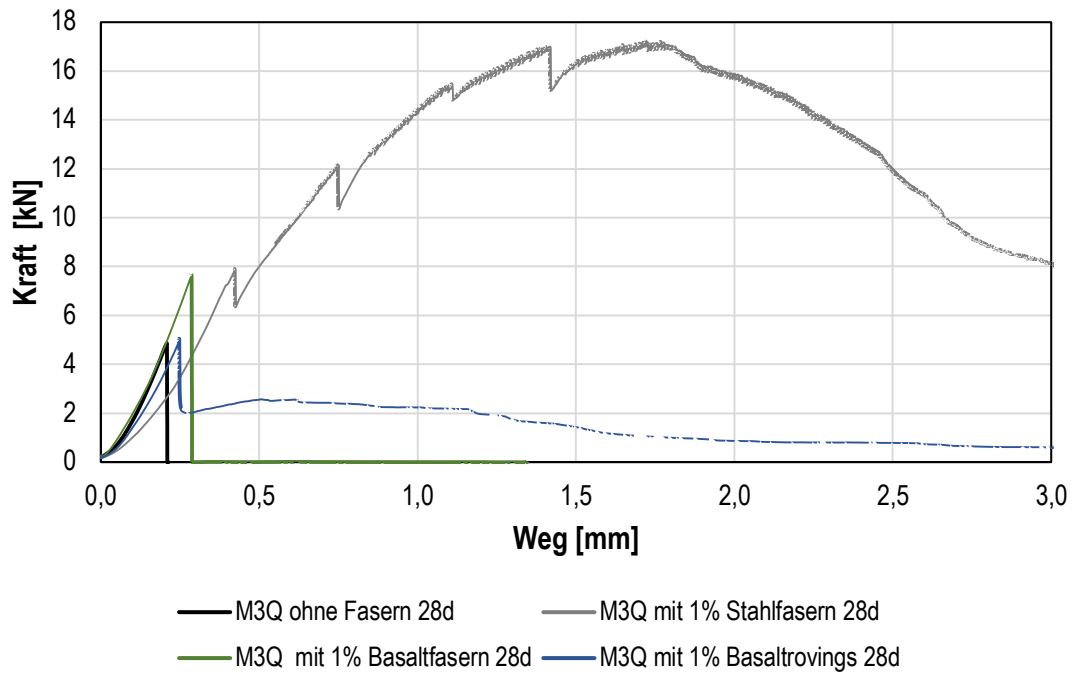


Abbildung 1-3: Kraft/Weg-Diagramm für Biegezugversuche an Prismen mit unterschiedlichen Fasern.

Das autogene Schwinden von zwei verschiedenen Rezepturen wurde in Schwindrinnen der Firma Schleibinger überprüft (Abbildung 1-4). Hierbei wurde an der Mischung mit Basaltfasern mit 0,54 mm/m ein leicht höheres Schwindmaß in den ersten 18 Stunden gemessen als bei der Mischung ohne Fasern (0,48 mm/m). Da das Messprinzip und die Rohstoffe Schwankungen unterliegen, wurde diese Differenz als nicht maßgebend definiert. Sodass kein Einfluss auf das Schwindmaß durch die Basaltfasern ausgeübt wird.

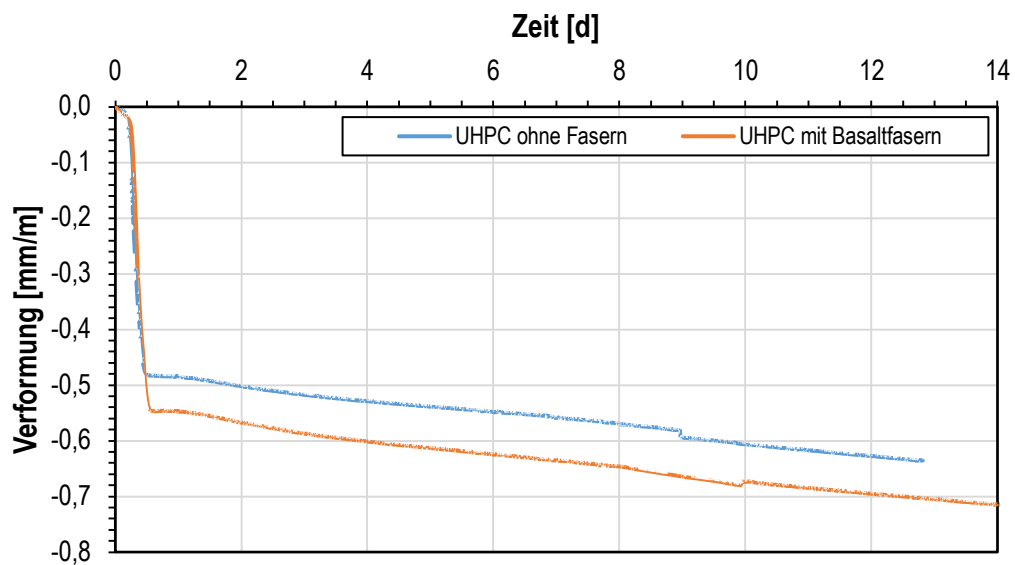


Abbildung 1-4: Schwinden von UHPC mit und ohne Basaltfasern

Optimierung der CLM-Schaum-Rezeptur auf Basis etablierter UHPC-Mischungen

Der CLM-Schaum wurde auf Grundlage der auch für den UHPC verwendenden M3Q entwickelt. Da zum chemischen Auftreiben eine sehr fließfähige Konsistenz benötigt wird, wurde der Wasser/Bindemittel-Wert zunächst auf 0,28 erhöht und zur Stabilisation Basaltfasern zugegeben. Zur weiteren Reduktion der Dichte wurden die Quarzkomponenten durch den Leichtzuschlag Perlit ersetzt. Hierbei kamen diverse Kornbänder zum Einsatz, um das Kornband des Quarzsandes weitgehend abzugleichen.

Die Druckfestigkeiten von CLM-Schäumen reduzieren sich bei abnehmender Rohdichte. Jedoch kann auch ohne Autoklavierung oder Wärmebehandlung eine höhere Druckfestigkeit als für Schaumbeton üblich erreicht werden (Abbildung 1-5). Für die Mischung aus Perlit und Basaltfasern wurde zusätzlich eine Biegezugfestigkeit von 1,5 N/mm² gemessen. Dies entspricht 25 % der Druckfestigkeit.

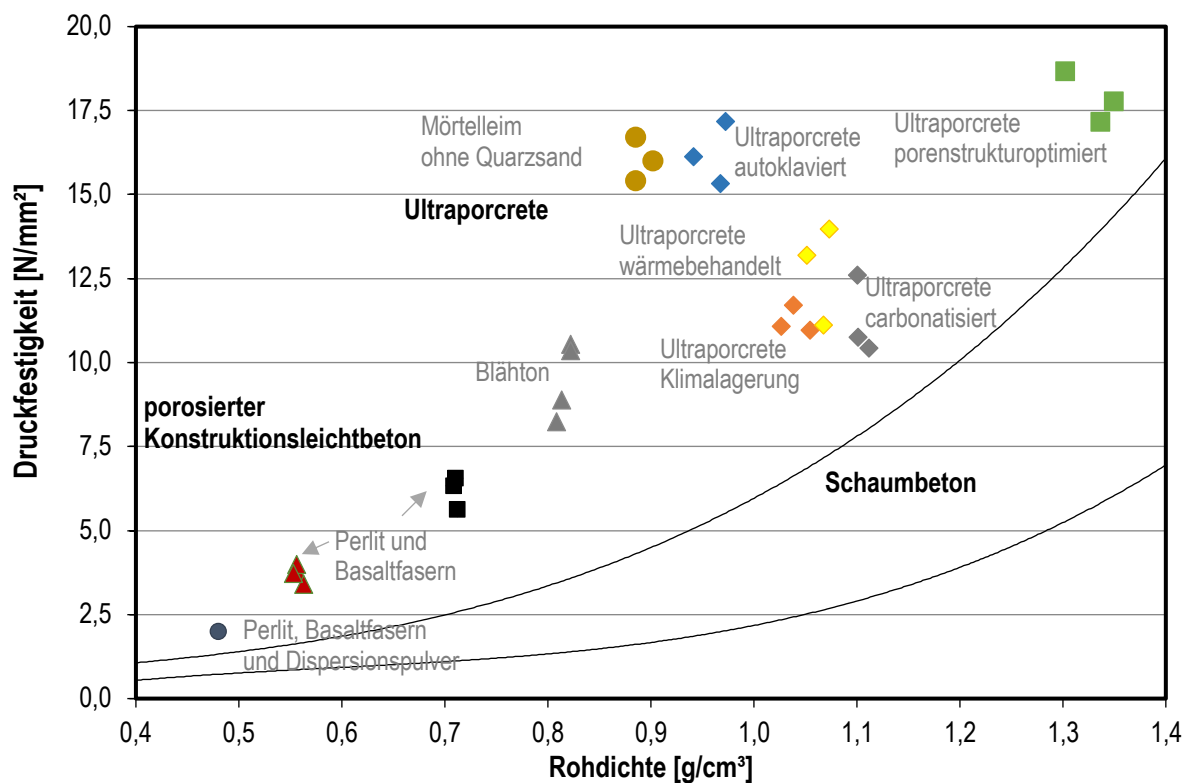


Abbildung 1-5: Druckfestigkeit/Rohdichte-Diagramm von unterschiedlichen Schäumen.

Das Schwinden vom CLM-Schaum wurde an Schwindprismen nach DIN 52450 gemessen (Abbildung 1-6). Anders als beim UHPC war hier das Schwindmaß des CLM-Schaums mit Basaltfasern um 0,5 mm/m geringer.

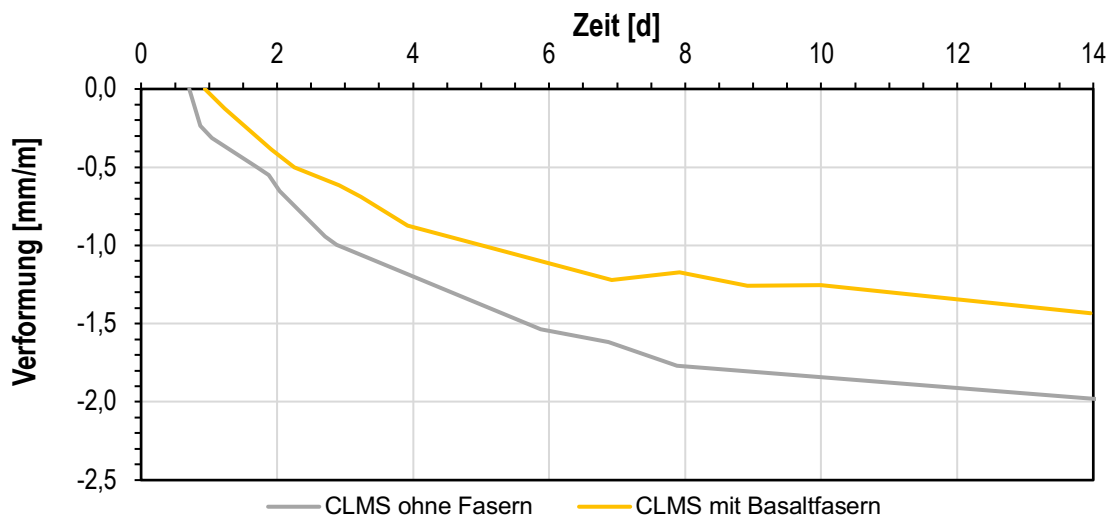


Abbildung 1-6: Schwinden von CLM-Schaum

Um die Poren im Schaumbeton analysieren zu können wurden zunächst Proben zersägt und die Schnittflächen mit fotooptischen Verfahren analysiert. Diese zeigen jedoch immer nur eine 2D-Ebene. Daher wurden die Proben zusätzlich in einem hochauflösenden Computertomographen (μ -CT) gescannt (Abbildung 1-7). Damit kann die Porenstruktur in 3D dargestellt, modelliert und analysiert werden.

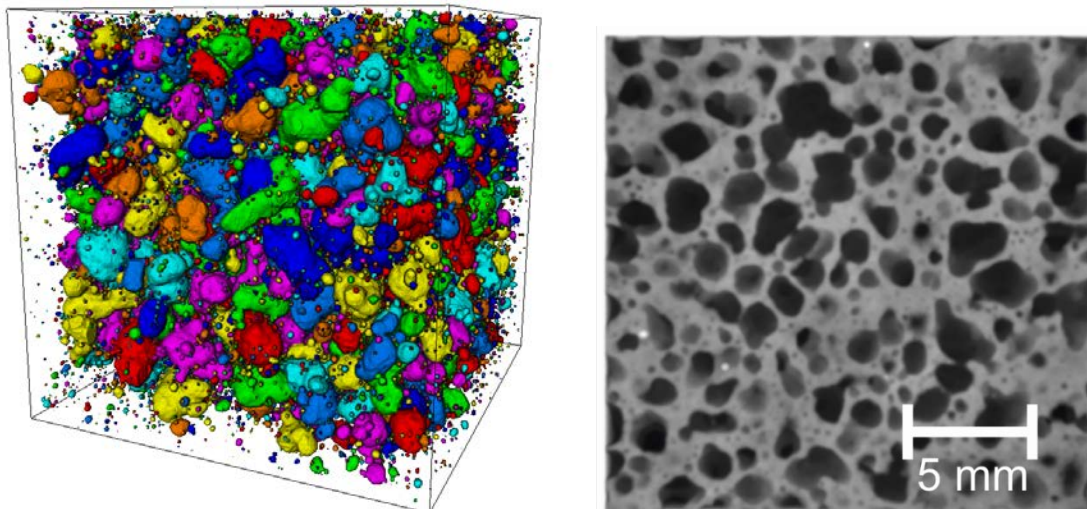


Abbildung 1-7: 3D-Model der Porenstruktur eines CLM-Schaums (links) entwickelt aus einer μ -CT-Aufnahme und 2D-Rekonstruktionen (rechts) derselben Probe.

Die Analyse dieser Porenbereiche hat gezeigt, dass anders als bei der Schnittflächenanalyse kein direkter Zusammenhang zwischen der Sphärizität der Poren und deren Größe besteht. Jedoch kann in den meisten Proben eine mittlere Sphärizität von 0,7 erreicht werden. Die Sphärizität ist das Verhältnis der Oberfläche einer Kugel gleichen Volumens zu der Oberfläche des betrachteten Körpers. Somit entspricht eine Sphärizität von 1,0 einer Kugel.

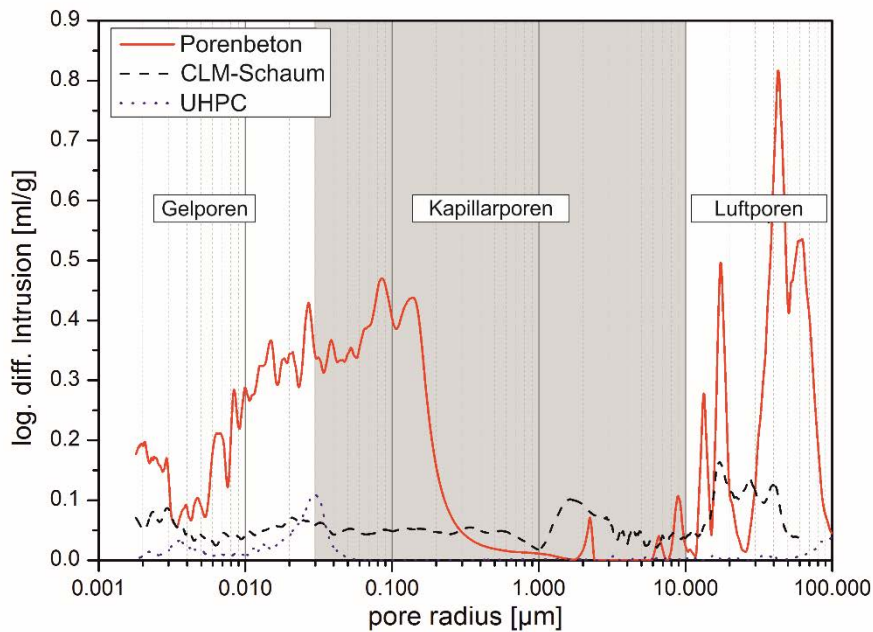


Abbildung 1-8: Porenradienverteilung von CLM-Schaum und handelsüblichen Porenbeton.

Im Bereich der Matrix wurde eine Porenanalyse mittels Quecksilberdruckporosimetrie (MIP) durchgeführt und die Ergebnisse mit einem handelsüblichen Porenbeton verglichen (Abbildung 1-8). Es ist deutlich zu erkennen, dass der auf UHPC-basierte CLM-Schaum eine niedrigere Porosität aufweist. Vor allem die niedrige Kapillarporosität ist für die Dauerhaftigkeit des Betons von Vorteil.

Die Wärmeleitfähigkeit wurde bislang nur an zwei verschiedenen Rezepturen gemessen (Abbildung 1-9). Dabei erzielte ein CLM-Schaum mit Leichtzuschlägen bei einer vergleichbaren Dichte mit 0,144 W/(mK) eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit als ein vergleichbarer Porenbeton (0,21 W/(mK)) erzielen.

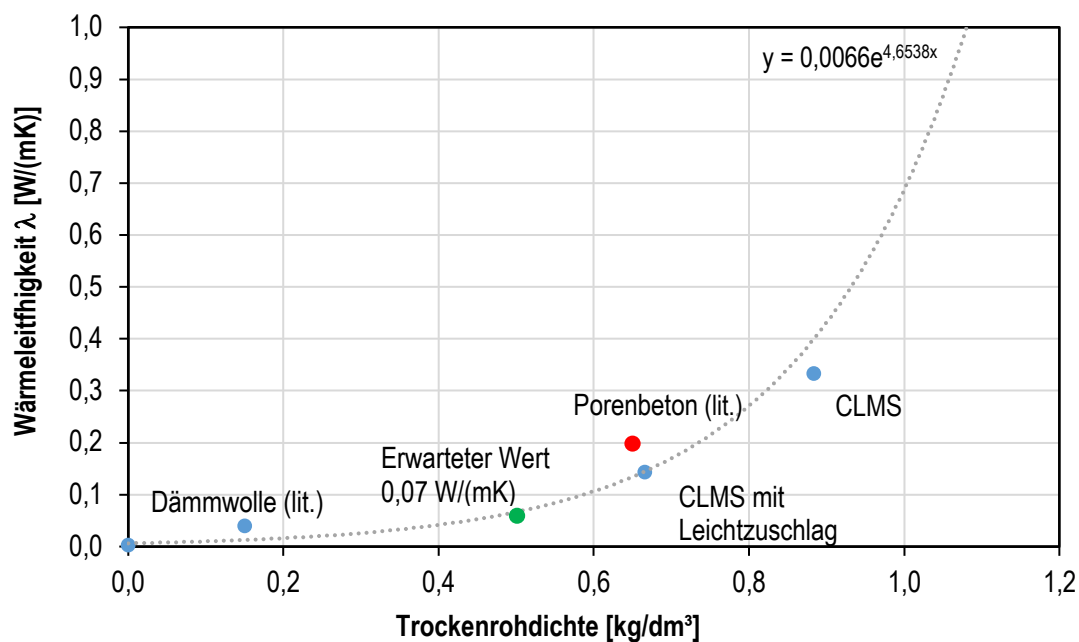


Abbildung 1-9: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Dichte von unterschiedlichen CLM-Schäumen im Vergleich mit handelsüblichem Porenbeton und Dämmwolle

Im ersten Werksversuch bei dem Kooperationspartner Fa. Hentschke Bau im Werk Bautzen im Oktober 2015 wurde an einem Eirichmischer der Bauart R11 gemischt. Hierbei ergaben sich zwei Problemstellungen. Zum einen reagierte das verwendete Aluminiumpulver zu schnell und zum anderen war das Auftreibmaß nicht mit dem im Labor vergleichbar (Abbildung 1-10).



Abbildung 1-10: Werksversuch Oktober 2015. Eirich-Intensivmischer R11 (links), verfrühtes Auftreiben des CLM-Schaums in der Transportschütte sichtbar durch Erhöhte Blasenbildung an der Betonoberfläche (mittig) und dem entsprechend geringen Auftreiben (rechts).

Aus Gründen der Arbeitssicherheit wurde statt Aluminiumpulver eine Aluminiumpaste verwendet. Aluminiumpulver kann eine Staubexplosion verursachen und Verbrennungen sowie Atemwegsbeschwerden hervorrufen. Bei Aluminiumpaste ist dies ausgeschlossen und sie ist daher für Werksanwendungen besser geeignet. Zudem konnte mit der Aluminiumpaste eine bessere und schnellere Dispergierung erzielt werden.

Da für die Herstellung von CLM-Schaum im Fertigteilwerk Zeit zwischen Fertigstellung der Mischung und Aufschäumreaktion benötigt wird, wurden verschiedene verzögerte Aluminiumpasten getestet (Tabelle 1-2). Hierfür wurde in einem 1000 ml Messbecher 4,0 g Calciumhydroxid mit 200 ml Wasser und 4,0 g Aluminiumpulver oder –paste vermischt. Die Zeit bis zur Reaktion (Aufschäumen) wurde als Reaktionszeit gemessen.

Tabelle 1-2: Reaktionszeiten und Eigenschaften der verschiedenen Aluminiumarten

Art/Name/Hersteller	Aktiver Aluminiumgehalt	Mittlerer Teilchendurchmesser	Reaktionszeit
Aluminiumpaste/ DEG 19506/ Schlenk	$70 \pm 2 \%$	ca. $12 \mu\text{m}$	165 Sekunden
Aluminiumpaste/ Aqua- porVP/13380/75/ Schlenk	$75 \pm 2 \%$	ca. $12 \mu\text{m}$	390 Sekunden
Aluminiumpaste/ Aquapor 7009/75/ Schlenk	$75 \pm 2 \%$	ca. $17 \mu\text{m}$	265 Sekunden
Aluminiumpulver/ 8610/ Schlenk	min. 92 %	ca. $30 \mu\text{m}$	220 Sekunden
Aluminiumpulver/ 7009/ Schlenk	min. 92 %	ca. $145 \mu\text{m}$	60 Sekunden

Um ein gleiches Auftreibmaß auch in größeren Mischvolumen zu gewährleisten, wurden Versuche mit Mischansätzen von 3 bis 100 Litern gefahren. Hierfür wurden Betonmischer der Firma Eirich (Intensivmischer) der Bauart RV01 und R09 verwendet. Dabei stellte sich heraus, dass der Mischprozess für größere Mischvolumen angepasst werden muss. Bei gleicher Werkzeug und Topfgeschwindigkeit wurde die Mischung bei größeren Mischvolumen zu steif und das Aluminium wurde nicht vollständig untergemischt. Daher wurden die Drehgeschwindigkeiten angepasst und das Aluminium während des Mischvorgangs zugegeben. Dafür wurde die Untermischzeit um die Zugabe verlängert.

In zwei weiteren Werksversuchen wurde die Mischung auf die Bedingungen im Werk angepasst. Im ersten wurde der Fließmittelgehalt variiert. Dies führte nicht zum gewünschten Erfolg. Daher wurde in einem weiteren Werksversuch der Wassergehalt variiert. Danach wurde ein Auftreibmaß von über etwa 80 -100% erreicht (Abbildung 1-11). Die endgültige Betonzusammensetzung ist in Tabelle 1-3 dargestellt.

Tabelle 1-3: CLMS-Rezeptur

Ausgangsstoff	Masse kg/m ³
CEM I 52,5 R HS/SR3 (Holcim Sulfo)	703,5
Sika Silikoll P unkompaktiert	149,0
Perlitepulver	10,4
Perlite 0/3	50,5
Dispersionspulver MP2100	12,0
Basaltfasern	2,7
w/b-Wert [-]	0,31
Fließmittelwirkstoff/Bindemittel [%]	0,6
Aluminiumgehalt [% bwoc.]	0,21
Calciumhydroxid [kg/m ³]	1,0



Abbildung 1-11: Aufgeschäumter CLMS im Werksversuch bei Fa. Hentschke Bau

Optimierung und Prüfung von Verbundkörpern

Die Entwicklung mehrschaliger hybrider Wandbauteile aus UHPC-Schalen und CLM-Schaum als statisch wirksame Elemente hängt entscheidend von den Verbundeigenschaften der verschiedenen Bauteilschalen ab. Daher wurden die Verbundeigenschaften zwischen UHPC-Schale und CLM-Schaum für unterschiedliche Konstellationen von Herstellungsabläufen und Nachbehandlungsansätzen experimentell untersucht. Ausgeführt wurden Haftzugversuche an Bohrkernen und Druckversuche an kleinformatischen Wandversuchskörpern.

Haftzugversuche an zweischaligen Probekörpern

Zur Gewinnung der Haftzugproben wurden zunächst dreischalige Probekörper mit den Gesamtabmessungen 150 mm x 150 mm x 150 mm in unterschiedlicher Betonierreihenfolge hergestellt. Für die Herstellreihenfolge gibt es prinzipiell zwei Ansätze: Herstellen des CLM-Schaums gegen zuvor hergestellte UHPC-Schalen oder Betonieren

der UHPC-Schalen gegen den bereits hergestellten CLM-Schaum. Die Stärke der Schalen betrug bei diesen Versuchen 10 mm, sodass der Schaumkern eine Dicke von 130 mm aufwies. Pro Würfelseite konnte je eine Haftzugprüfung nach DIN 1048-2 durchgeführt werden: für jede Herstellkonfiguration konnten also 2 Haftzugversuche durchgeführt werden. Dafür wurde eine Nut mit einem Durchmesser von 50 mm bis in den CLM-Schaum gebohrt, ein Stahlstempel mit dem gleichen Durchmesser auf die UHPC-Schale geklebt und anschließend am Stahlstempel mit einer Geschwindigkeit von 100 N/s gezogen. Das Versuchsergebnis liefert einen Wert für die Haftzugfestigkeit und eine Aussage über das Bruchversagen. Das gewünschte Ergebnis der Haftzugprüfung sollte im Versagen des CLM-Schaums und nicht im Versagen der Verbundzone liegen (Abbildung 1-12).

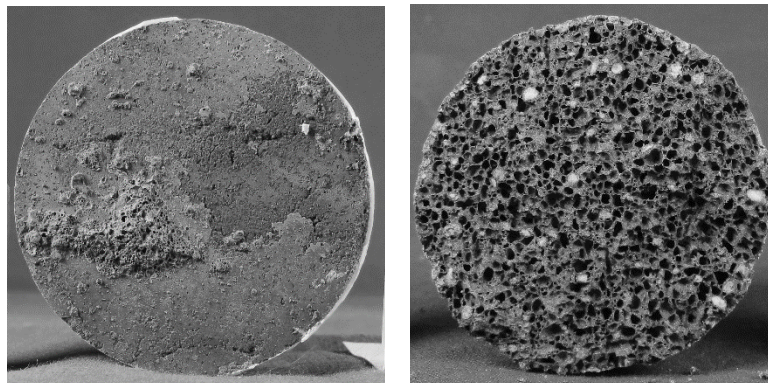


Abbildung 1-12: Haftzugstempel (Ø= 50 mm). Versagen in der Verbundzone (links) und Versagen im CLM-Schaum (rechts)

Getestet wurden folgende Herstellvarianten

- CLM-Schaum gegen eine mit einer Matrix profilierten UHPC Platte betoniert (UHPC Matrix)
- CLM-Schaum gegen die Schalseite einer UHPC Platte betoniert (UHPC Schalseite)
- CLM-Schaum gegen die Luftseite einer UHPC Platte betoniert (UHPC Luftseite)
- CLM-Schaum gegen eine leicht angeraute (Stahlbürste) UHPC Platte betoniert (UHPC angeraut)
- UHPC an den mit einer Matrix profilierten CLM-Schaum betoniert (CLMS Matrix)
- UHPC an die Schalseite des CLM-Schaums betoniert (CLMS Schalseite)
- UHPC an die gesägte Seite des CLM-Schaums betoniert (CLMS gesägt)

Die Matrix war eine rechteckförmige Struktur (Abbildung 1-13), die auch zur Texturierung von Betonfertigwaren verwendet wird. Im Schaumbeton wird die Oberfläche, vor allem im Bereich der auftritt, sehr spröde. Im UHPC lässt sich die Struktur dagegen sehr gut abbilden.

Die Ergebnisse der Haftzugversuche zeigt Abbildung 1-14. Zunächst werden die Haftzugversuche an den Proben bei denen der CLM-Schaum gegen bereits hergestellte UHPC-Schalen betoniert wurde betrachtet. Dabei ist zu erkennen, dass nur der Versuch „UHPC Matrix“ ein Versagen im CLM-Schaum zeigte. Bei den anderen Versuchen dieser Herstellreihe wurde ein Versagen der Verbundzone beobachtet. Die mittlere Haftzugfestigkeit dieser Herstellreihe lag in einem Bereich von 0,65 bis 0,68 N/mm².

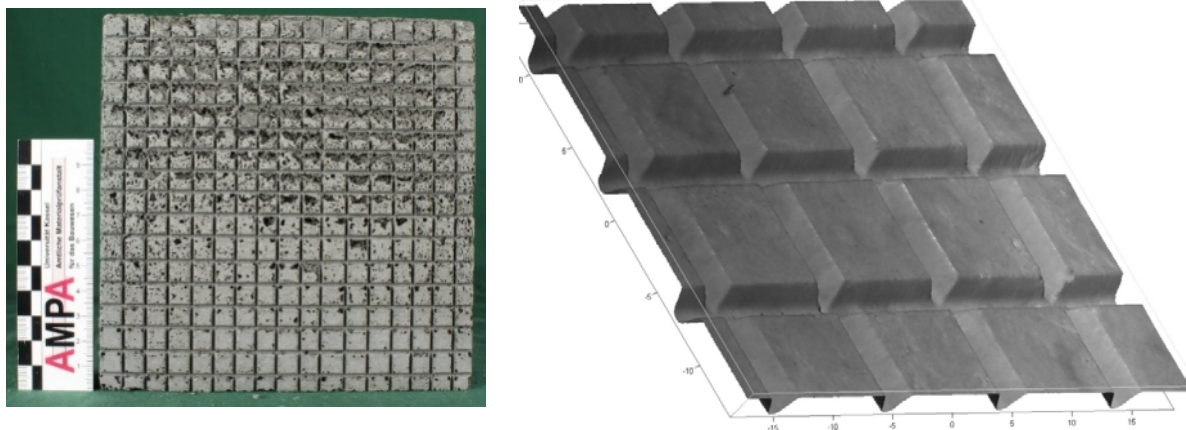


Abbildung 1-13: Struktur der Matrix im CLM-Schaum (links) und im UHPC (Ausschnitt 30 x 35mm).

In der Herstellreihe in der der CLM-Schaum zuerst hergestellt und die Oberfläche dann gesägt oder texturiert wurde, versagten alle Proben im CLM-Schaum. Es ergaben sich mittlere Haftzugfestigkeiten von 0,55 bzw. 0,65 N/mm². Im Versuch bei dem an die geschalte Seite des CLM-Schaums direkt betoniert wurde, konnte ein Versagen der Verbundzone beobachtet werden. Zudem wurde bei diesen Proben mit 0,28 N/mm² auch die geringste mittlere Haftzugfestigkeit gemessen.

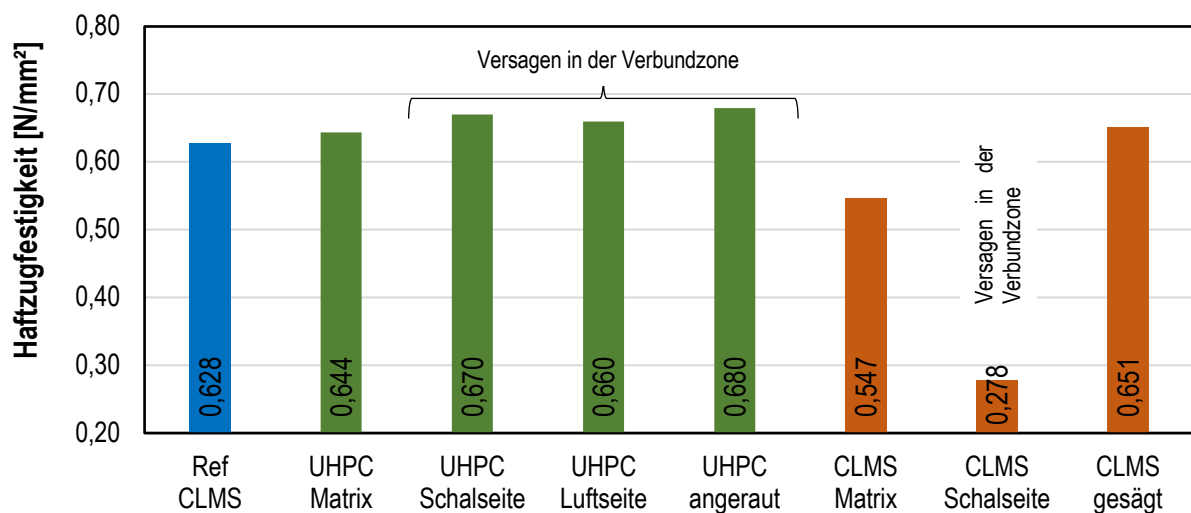


Abbildung 1-14: Haftzugprüfung an Verbundkörpern unterschiedlicher Herstellungsart (Einzelwerte).

Die Porenstruktur sowie die Verbundzone von ausgewählten Proben wurden in einem hochauflösenden Computertomografen Xradia 420 Versa der Firma Zeiss aufgenommen. Die Untersuchungen erfolgten an denselben Proben, die auch für die Haftzugprüfung verwendet wurden. Dafür wurden neben der Bohrung eine Teilprobe herausgesägt. In Abbildung 1-15 ist zum einen ein Porenmodell (links) abgebildet und zum anderen eine Projektionsebene (rechts) in der die Verbundzone zwischen CLM-Schaum und UHPC zu erkennen ist. Eine Verzahnung des UHPC mit dem zuvor hergestellten und gesägten CLM-Schaum ist über die ganze Aufnahme hinweg zu erkennen. Nur an einigen wenigen Stellen hat sich Luft in den Poren angereichert, welche den Verbund stört.

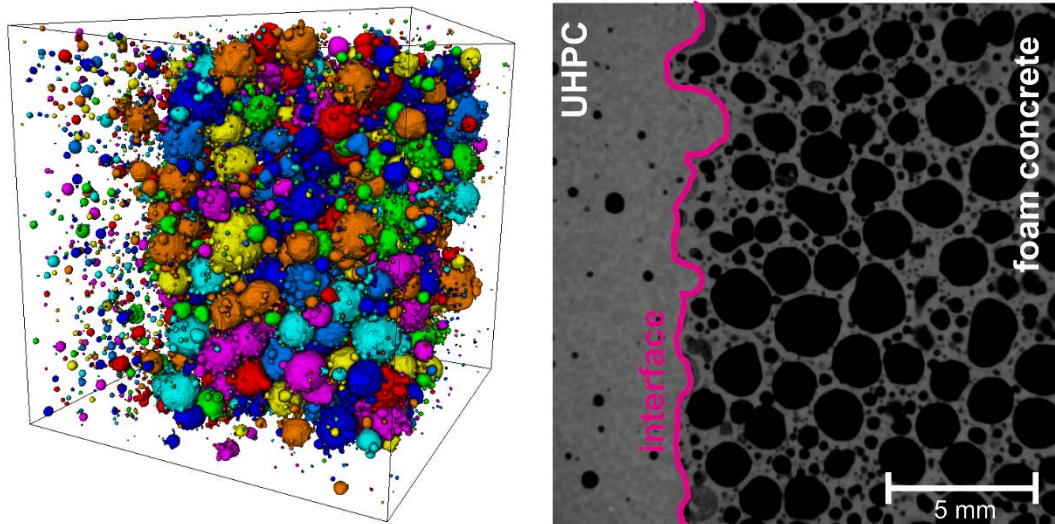


Abbildung 1-15: 3d-Porenmodell (links) entwickelt aus einer computertomografischen Aufnahme einer CLM-Schaumprobe mit nachträglich anbetonierten UHPC, 2d-Schnitt zeigt den Querschnitt beider Schichten (rechts).

Ausgehend von diesen Ergebnissen wird für alle folgenden Versuche und die Herstellung der Wandelemente für den Demonstrator zuerst der CLM-Schaum hergestellt, die Seitenflächen der Schaumkerne durch Sägen oder Schleifen zur Herstellung einer geöffneten Porenstruktur bearbeitet und anschließend die UHPC-Schalen betoniert.

Aus dieser Betonierreihenfolge ergeben sich Vorgaben, um die Spannungen infolge von unterschiedlichen Schwindverformungen zu minimieren. Dafür muss eine Zeitverzögerung für die Betonage der UHPC-Schalen von 4 Tagen eingehalten werden. Der langsamer schwindende CLMS kann sich in dieser Zeit um 0,9 mm/m verkürzen. Nach der Betonage schwinden beide Betone weiter und erreichen letztendlich vergleichbare Schwindmaße (Abbildung 1-16).

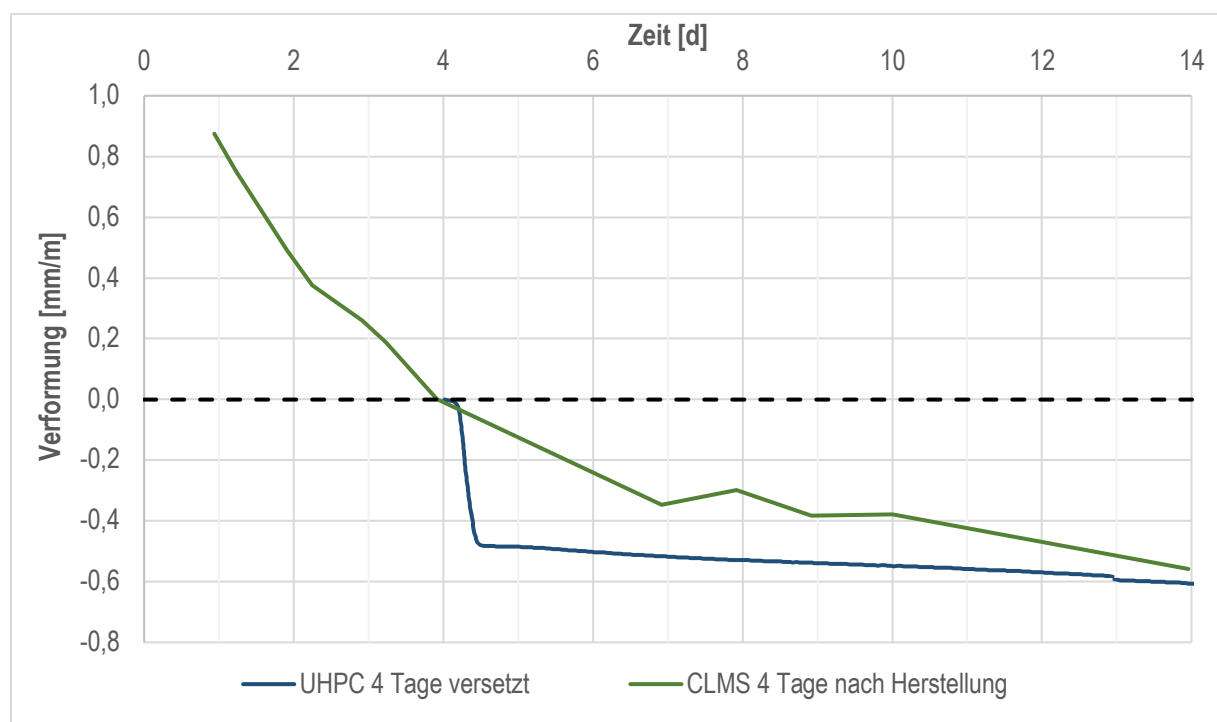


Abbildung 1-16: Zeitversetztes Betonieren der UHPC-Vorsatzschale zur Minimierung von Spannungen infolge Schwinden.

Laborversuche zum Verbundsystem UHPC-Schalen und CLM-Schaum

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen UHPC-Schalen und CLM-Schaumkern im Zusammenwirken als hybrides Wandelement wurden drei Versuche an Wandstummeln mit einer Gesamthöhe von 50 cm unternommen. Durch laborseitige Randbedingungen war der Wandaufbau definiert durch den CLM-Schaumkern mit einer Dicke von 20 cm und den UHPC-Schalen mit einer Dicke von jeweils rd. 1,5 cm, so dass sich eine Gesamtwanddicke von 23 cm ergab. Die Wandbreite betrug 25 cm.

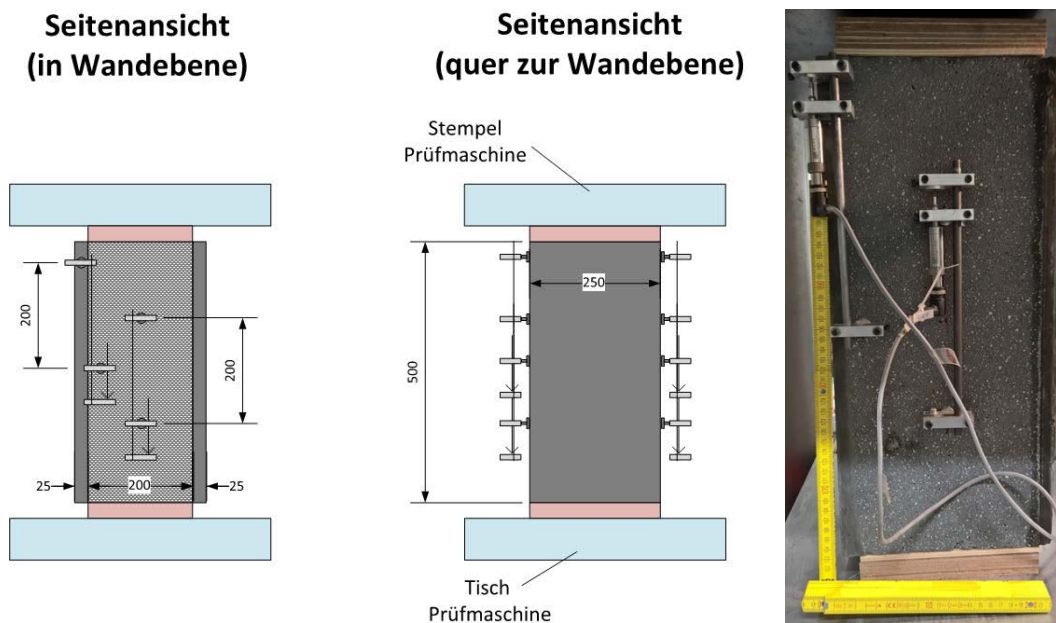


Abbildung 1-17: Versuchsaufbau des Verbundversuchs (links) und Foto des Probekörpers vor Versuchsbeginn (rechts).

Es wurde eine Dehnung in der Mitte des Probekörpers am CLM-Schaumkern gemessen und eine Relativverschiebung zwischen CLM-Schaumkern und UHPC-Schale für den oberen Eckbereich. Zusätzlich wurden Maschinenweg und -kraft aufgezeichnet. Die Lasteinleitung erfolgte nur auf den CLM-Schaumkernen (Abbildung 1-17).

Es hat sich gezeigt, dass das Wandsystem eine maximale Druckspannung von etwas über 5 N/mm² ertragen kann (bezogen auf die Lasteinleitungsfläche des CLM-Schaumkerns) und nach Erreichen der Höchstlast bei weiterer Verformung nicht spröde, sondern sehr duktil versagt (siehe Maschinenweg in Abbildung 1-18).

Im ansteigenden Belastungsast des Spannungs-Dehnungs-Diagramms zeigt das System ein annähernd lineares Verhalten. Eine Relativverschiebung zwischen UHPC-Schale und CLM-Schaumkern hat sich bei zwei der Proben erst oberhalb der halben Maximalast eingestellt. Im Lastbereich bis zur halben Maximallast waren diese annähernd null. Lediglich bei einer Probe hat sich eine Relativverschiebung oberhalb von ca. 20% der Maximallast eingestellt. Bei allen drei Proben hat dies zwar zu einer sehr leichten Steifigkeitsänderung geführt aber nicht zur Lösung der UHPC-Schale vom CLM-Schaumkern. Erst im Nachbruchbereich hatte sich eine optisch wahrnehmbare Ablösung ergeben.

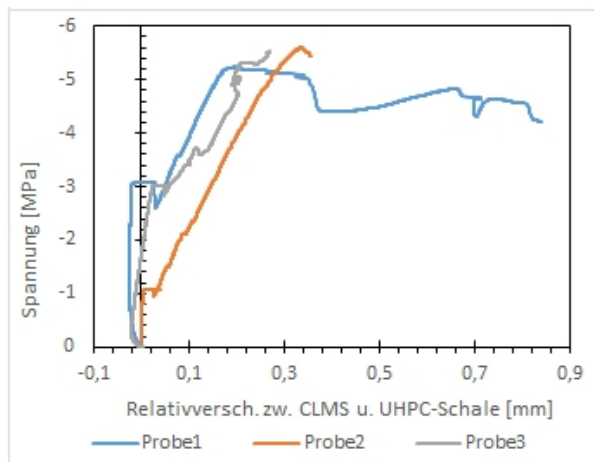
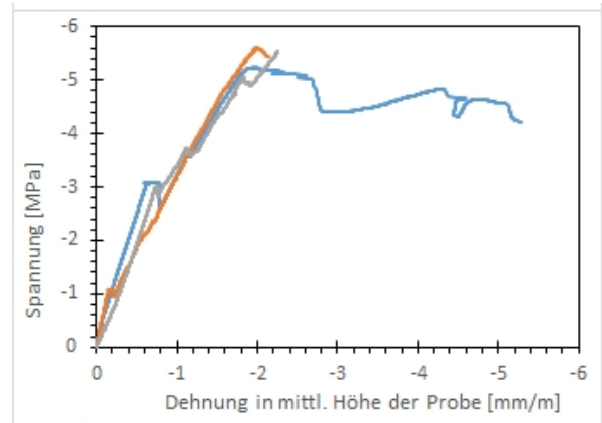
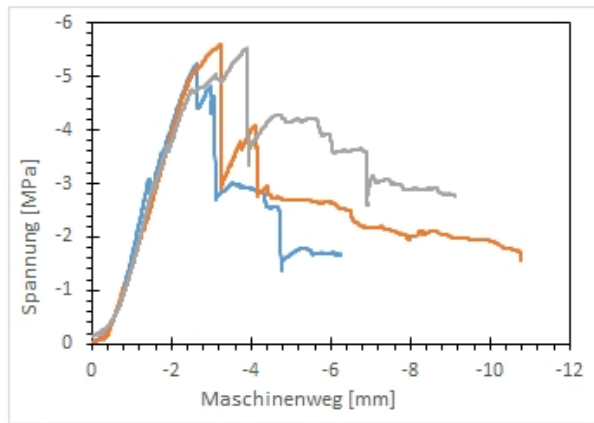


Abbildung 1-18: Spannungs-Weg-Diagramme der drei Verbundversuche

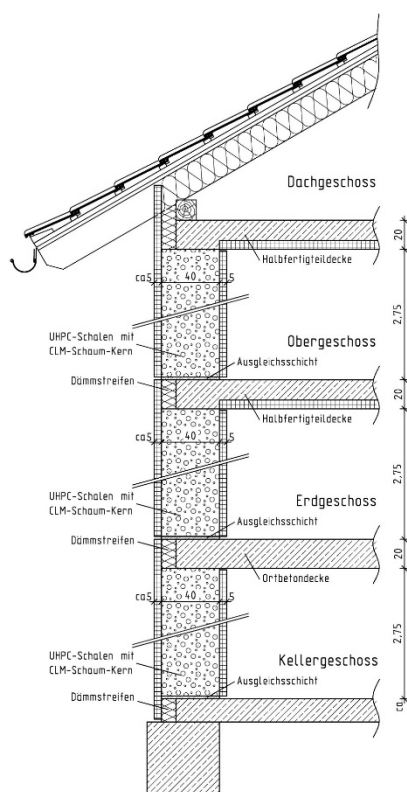
ZWEITER TEIL

Bemessung von Hybrid-Wandelementen und Validierung

Das Ergebnis dieser Forschungsarbeit soll in der Entwicklung eines vollständig mineralischen, tragenden und gleichzeitig wärmedämmenden Wandbauteiles mit dem hybriden Aufbau aus ultrahochfesten Beton (UHPC)-Schalen und einem innenliegenden CLM-Schaumkern bestehen. Um hierfür Bemessungsansätze formulieren zu können, ist es zunächst notwendig, die Beanspruchungen an ein Wandelement zu definieren und an experimentellen Untersuchungen die gewählten Lösungsansätze zu validieren.

Vorüberlegungen zur Beanspruchung eines hybriden Wandelements

Die Belastung eines Außenwandelements in einem Hochbau besteht im Abtragen vertikaler Lasten (Eigengewicht und Nutzlast) sowie horizontaler Lasten in Plattenrichtung (Windlasten) und Scheibenrichtung (Aussteifungslasten). Für die quantitative Bestimmung der Belastung wird ein Ein- bis Zweifamilienhaus mit Keller und Dachgeschoss zu Grunde gelegt (Abbildung 2-1). Die Decken werden als Stahlbetonvollplatten und die Dachkonstruktion aus Holz angenommen. Die Decken liegen nur auf dem CLM-Schaumkern auf.



Für die Lastannahmen werden folgende Werte auf der sicheren Seite liegend berücksichtigt:

- Rohwichte CLM-Schaum: $5,0 \text{ kN/m}^3$,
- Rohwichte UHPC: $25,0 \text{ kN/m}^3$
- üblicher Deckenausbau im Wohnungsbau mit Fliesen, Estrich, Dämmung und Putz: $1,0 \text{ kN/m}^2$
- üblicher Dachaufbau im Wohnungsbau mit Eindeckung samt Lattung, Dämmung 18cm, Sparren (10cm / 22 cm, $e = 80 \text{ cm}$), Lattung samt Innenverkleidung, Dachneigung 40° : $10,0 \text{ kN/m}$
- Nutzlast Wohn- und Aufenthaltsräume: $2,0 \text{ kN/m}^2$
- Schneelast: $5,0 \text{ kN/m}$

Abbildung 2-1: Schnitt durch einen Außenwandbereich.

Eigenlasten Außenwand

UHPC Innenschale $d = 3 \text{ cm}$	$g = 0,03 \text{ m} \cdot 25,0 \text{ kN/m}^3$	$= 0,8 \text{ kN/m}^2$
CLM-Schaum $d = 40 \text{ cm}$	$g = 0,40 \text{ m} \cdot 5,0 \text{ kN/m}^3$	$= 2,0 \text{ kN/m}^2$
UHPC Außenschale $d = 3 \text{ cm}$	$g = 0,03 \text{ m} \cdot 25,0 \text{ kN/m}^3$	$= 0,8 \text{ kN/m}^2$
Summe		$= 3,6 \text{ kN/m}^2$

Die lichte Raumhöhe im Wohnungsbau beträgt ca. 2,50 m.

$$\text{Streckenlast eines Geschosses } g = 2,50 \text{ m} \cdot 3,6 \text{ kN/m}^2 = 9,0 \text{ kN/m}$$

Eigenlasten Geschossdecken

$$\text{Deckendicke } h = 0,20 \text{ m} \quad g = 0,20 \text{ m} \cdot 25,0 \text{ kN/m}^3 = 5,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ausbau} = 1,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Summe} = 6,0 \text{ kN/m}^2$$

Nutzlasten Geschossdecken

$$\text{Wohn- und Aufenthaltsräume} \quad q = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

Für die Ermittlung der Einflussbreite der Deckenlasten wird auf der sicheren Seite liegend von einer einachsig gespannten Decke mit einer Stützweite von 6,0 m ausgegangen. Die Wand, die als Deckenaufleger dient besitzt demnach eine Einflussbreite von 3,0 m. Den parallel zur Deckenspannrichtung verlaufenden Außenwänden kann man eine Streichlast mit einer Einflussbreite von ca. 1,0 m zurechnen.

$$\text{Maximale Streckenlast aus Decke} \quad g = 3,00 \text{ m} \cdot 6,0 \text{ kN/m}^2 = 18,0 \text{ kN/m}$$

$$q = 3,00 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 = 6,0 \text{ kN/m}$$

$$\text{Minimale Streckenlast aus Decke} \quad g = 1,00 \text{ m} \cdot 6,0 \text{ kN/m}^2 = 6,0 \text{ kN/m}$$

$$q = 1,00 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 = 2,0 \text{ kN/m}$$

Eigen- und Schneelasten aus Dachkonstruktion

$$\text{Eigenlasten max.} \quad g = 10,0 \text{ kN/m}$$

$$\text{Schneelasten max.} \quad q = 5,0 \text{ kN/m}$$

Die maximale Vertikallast am Wandfuß des Kellergeschosses ergibt sich zu (inkl. Obergeschoss):

$$g = 9,0 \text{ kN/m} \cdot 3 + 18,0 \text{ kN/m} \cdot 3 + 10,0 \text{ kN/m} = 91,0 \text{ kN/m}$$

$$q = 6,0 \text{ kN/m} \cdot 3 + 5,0 \text{ kN/m} = 23,0 \text{ kN/m}$$

Die minimale Vertikallast am Wandfuß des Kellergeschosses ergibt sich zu (ohne Obergeschoss + Vernachlässigung Dachkonstruktion und Verkehrslasten):

$$g = 9,0 \text{ kN/m} \cdot 2 + 6,0 \text{ kN/m} \cdot 2 = 30,0 \text{ kN/m}$$

Grenzfallbetrachtung

Am Fuß der Kellergeschosswand entsteht eine Druckspannung im CLM-Schaumkern infolge der maximalen vertikalen Belastung aus Eigen-, Nutz- und Schneelasten. Die Aufstandsfläche des CLM-Schaumes beträgt aufgrund der Anordnung eines Dämmstreifen (siehe Abbildung 2-1) 30 cm.

$$\sigma_{\text{vorh,k}} = (1,35 \cdot 91,0 + 1,5 \cdot 23,0) \text{ kN/m} / 0,30 \text{ m} = 524,5 \text{ kN/m}^2 = 0,525 \text{ N/mm}^2$$

Die im Versuch ermittelte Druckfestigkeit des CLM-Schaumkerns betrug 5,0 N/mm². Unter Berücksichtigung von zeitlichen Einflüssen und Materialstreuungen ergibt sich eine zulässige Festigkeit von

$$\sigma_{\text{zul,k}} \approx 5,0 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,85 / 1,8 = 2,36 \text{ N/mm}^2$$

Für angreifende Windlasten braucht in Anlehnung an das vereinfachte Berechnungsverfahren nach DIN 1053-1 (Mauerwerk) ein Nachweis für Wind rechtwinklig zur Wandebene nicht geführt werden, wenn die Außenwanddicke, bei einer lichten Geschoßhöhe von 2,50 m, mindestens 17,5 cm ist. Die vorhandene Wanddicke beträgt 40 cm.

Laborversuche zum Wandkopfdetail

Um das Verbundverhalten zwischen den UHPC-Schalen und dem CLM-Schaumkern gezielt zu untersuchen, wurden weitere Versuche unternommen. Dafür wurde der nachfolgend dargestellte Versuchsaufbau in Anlehnung an Push-Out-Versuchen an Mauerwerkskörpern gewählt. Hierbei wird ein Versuchskörper aus drei Mauersteinen und zwei Mörtelfugen so hergestellt, dass der mittig angeordnete Stein zwischen den zwei äußeren Steinen durchgedrückt werden kann. Es stellt sich ein Versagen in der Mörtelverbindung zwischen dem mittleren und den äußeren Steinen ein, welches im Experiment beobachtet und beschrieben wird.

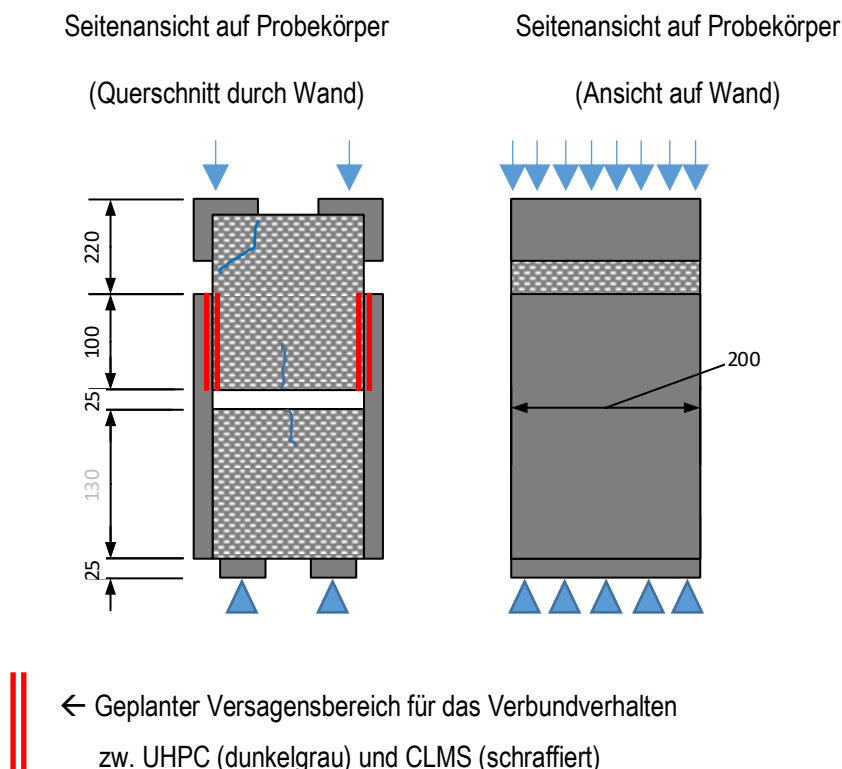


Abbildung 2-2: Probekörper für Versuche des Wandkopfdetails.

Versuchskörper und Versuchsaufbau waren so geplant, dass das Versagen der Verbundzone im rot markierten Bereich (Abbildung 2-2) eintreten sollte. Leider ist es für diesen Probekörper nicht gelungen, das Versagen in der

Verbundzone zu provozieren. Entweder ist der Eckbereich in der Lasteinleitung abgebrochen oder es entstand ein Biegezugversagen im oberen bzw. unteren CLM-Schaublock. Eine Nachrechnung mit FEM (mit entsprechend angepassten Materialkennwerten) hat gezeigt, dass auch bei geänderter Geometrie nicht ausgeschlossen werden kann, dass das Versagen an anderen Stellen auftritt als in der Verbundzone. Somit wurde dieser Versuchsaufbau nicht weiterverfolgt.

Da das Verbundversagen nur eines von vielen möglichen Versagensarten im Kopfbereichen eines Wandelementes ist, wurde auf eine weitere Untersuchung verzichtet.

Im nächsten Schritt wurde ein Versuchsaufbau gewählt, der das Kopfdetail eines möglichen Wandelementes repräsentieren sollte. Dieser Aufbau sollte eine exzentrische Belastung ermöglichen, da die vertikale Belastung bei einem typischen Deckenaufleger auf einem Wandelement stets exzentrisch sein wird (Abbildung 2-3). An diesem Aufbau können auch weitere Versagensarten auftreten und somit können unter anderem auch das Verbundversagen beobachtet und beschrieben werden.

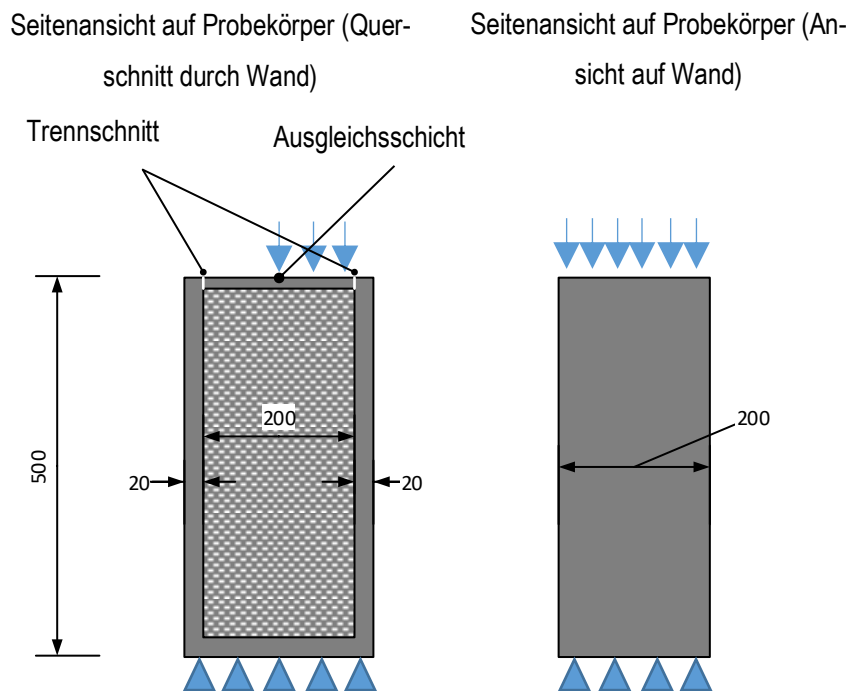


Abbildung 2-3: Probekörper für Versuche zum Verbund, Abmessung und Belastungsmodell.

Für den exzentrischen Versuch zeigt Abbildung 2-4 eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus sowie der verwendeten Messeinrichtung und Abbildung 2-5 je ein Foto vor und nach dem Versuch. In Abbildung 2-5 ist ebenfalls zu erkennen, dass zusätzlich zu den induktiven Wegaufnehmern, welche für eine definierte Länge die Längenänderungen integral aufnehmen, auch das foto-optische Messprogramm GOM zum Einsatz kam. Hierfür war die Präparierung der Beobachtungsfläche mit einer weißen Grundierung und dem Anbringen eines stochastisch verteilten Musters bzw. von Messpunkten erforderlich.

Versuchsbegleitend werden mit dem Messsystem GOM von der zu untersuchenden Oberfläche Aufnahmen gemacht, die im Post-Processing die räumliche Verformungsermittlung der markierten Oberflächenpunkte möglich

und die Rissbildungsentwicklung sichtbar macht. Auf diese Weise lassen sich Dehnungsfelder der beobachteten Wandfläche grafisch darstellen und mit der aufgezeichneten Kraftentwicklung koppeln.

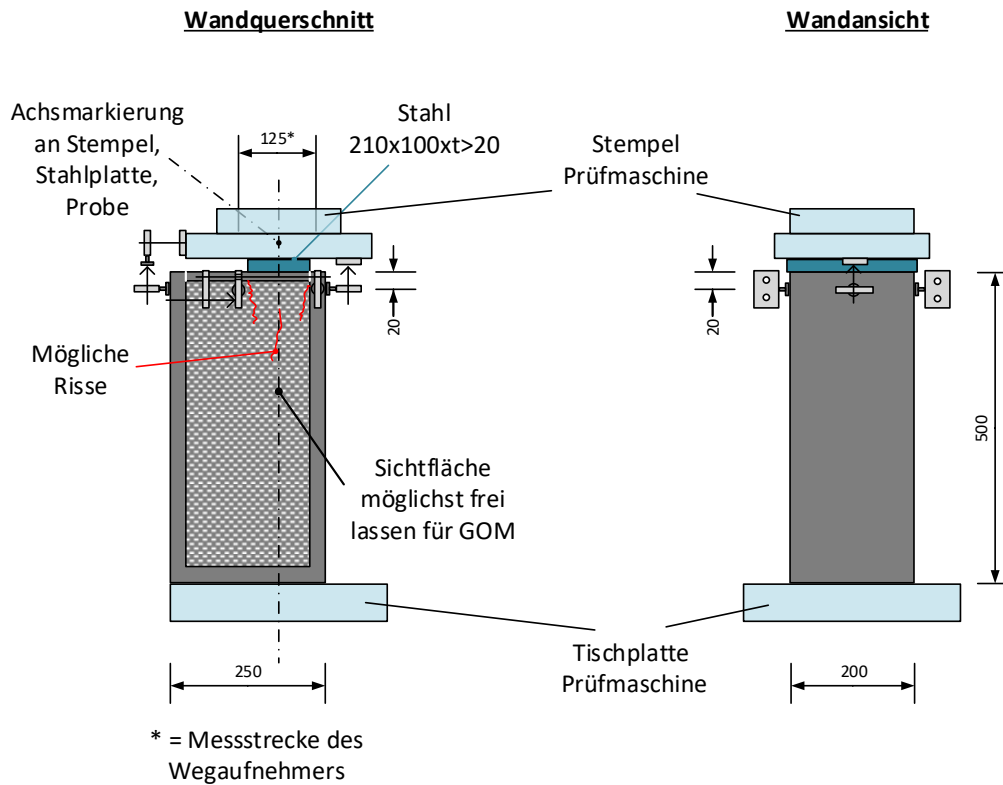


Abbildung 2-4: Probekörper für Versuche zum Verbund, Versuchsaufbau.

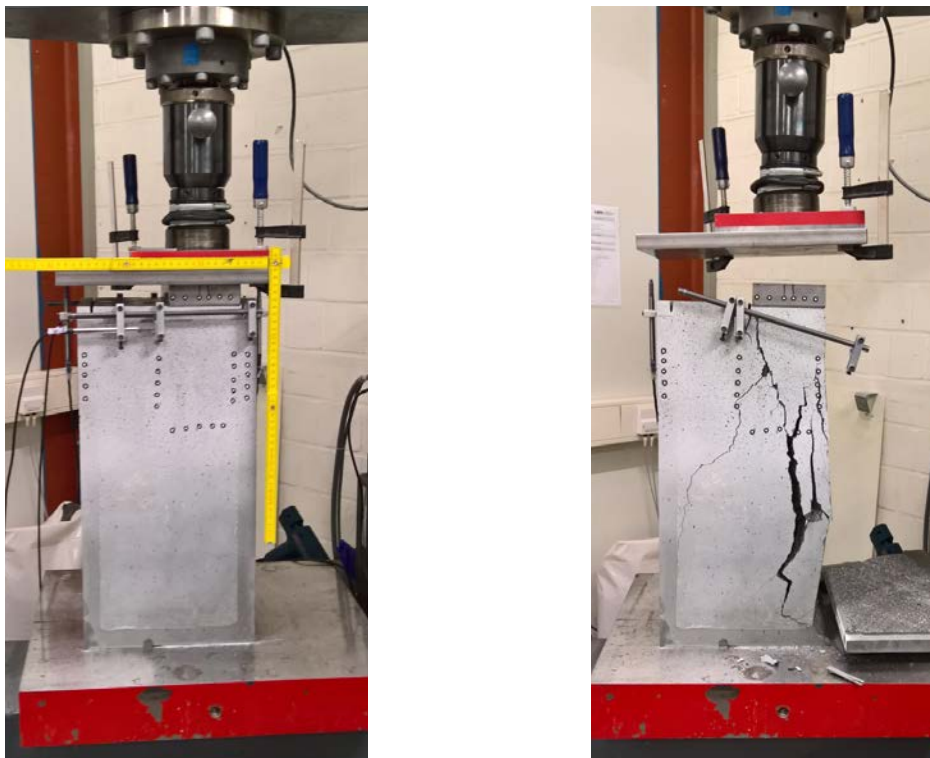
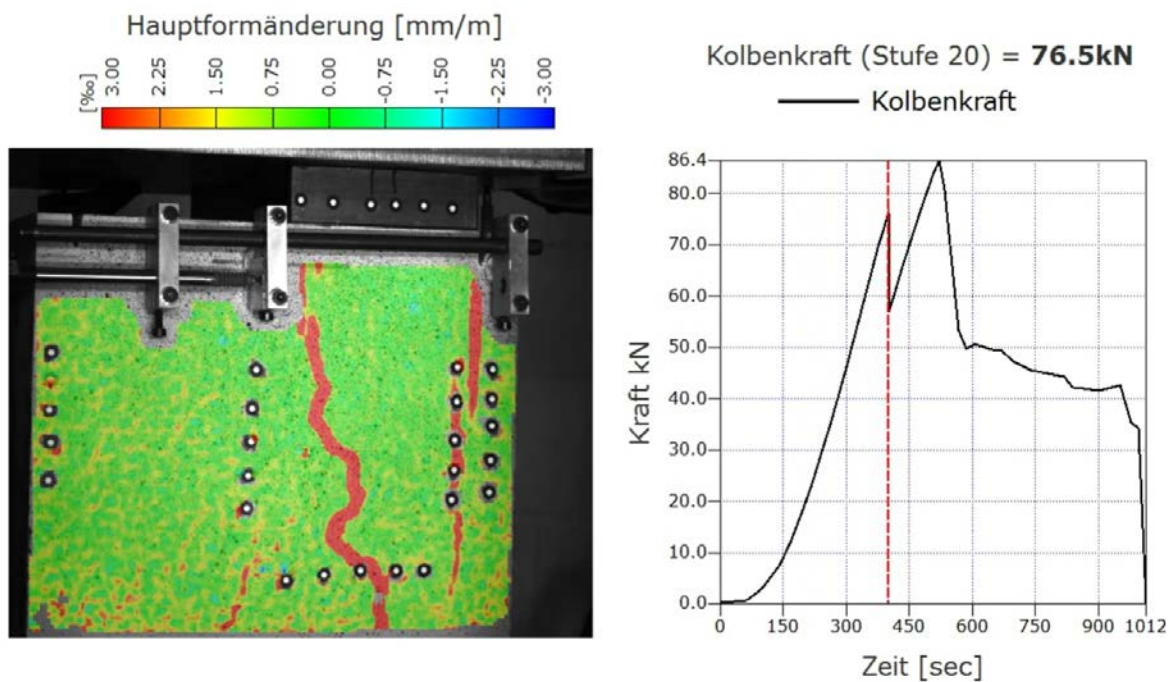


Abbildung 2-5: Probekörper für Versuche zum Verbund mit GOM-Messsystem, Probe vor dem Versuch (links), und nach der Belastung (rechts).

Die Bilder in Abbildung 2-5 zeigen den Probekörper vor und nach der Belastung. Die Lasteinleitungsplatte reichte von der Innenkante der rechten UHPC-Schicht bis zur Mitte des mittleren CLMS-Kerns. D.h. sie lag nur auf dem CLMS auf. Die nachfolgenden Bilder zeigen einen Auszug aus der optischen Verformungsmessung. Die erste Bildreihe (Abbildung 2-6) zeigt die Hauptformänderungen (Zugdehnungen in rot). Die zweite Bilderreihe (Abbildung 2-7) zeigt dieselben Belastungszustände (Stufen) aber es sind Nebenformänderungen (Stauchungen in Blau) dargestellt. Es zeigt sich, dass sich sowohl auf Zug (Risse) als auch auf Druck Dehnungen bzw. Stauchungen lokalisieren können (rote bzw. blaue Linien) und mit dem Messsystem darstellbar sind. Die Belastung erfolgte mit einer konstanten Wegrampe, somit kann die Zeit in der Abszisse in den Kraft-Zeit-Diagrammen als Kolbenweg betrachtet werden.

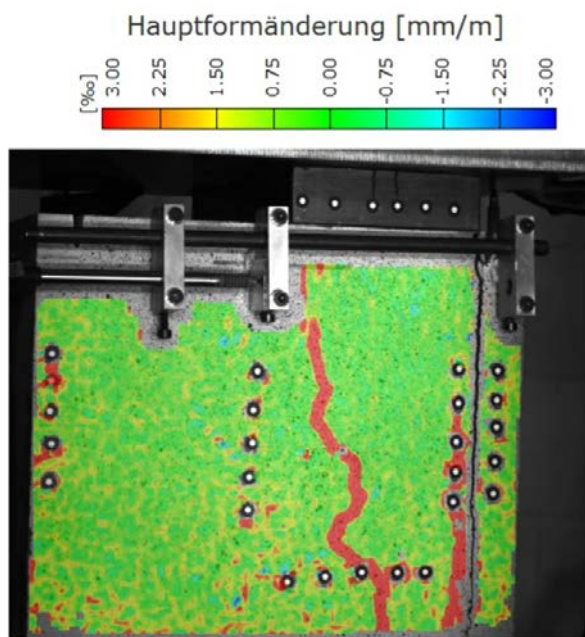
Stufe 20

Wandkopfdetailversuch 2



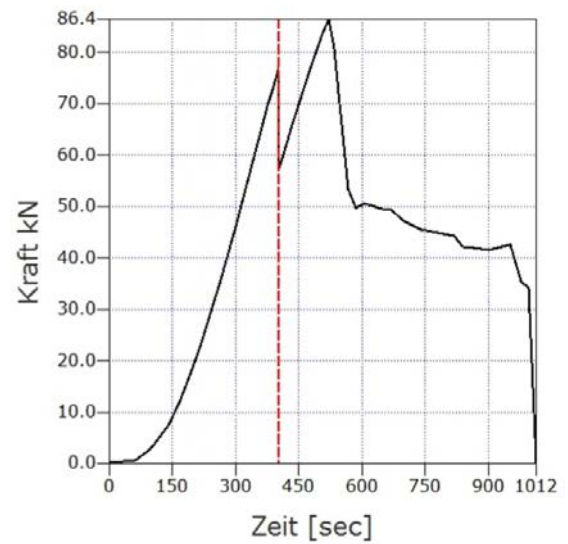
Stufe 21

Wandkopfdetailversuch 2



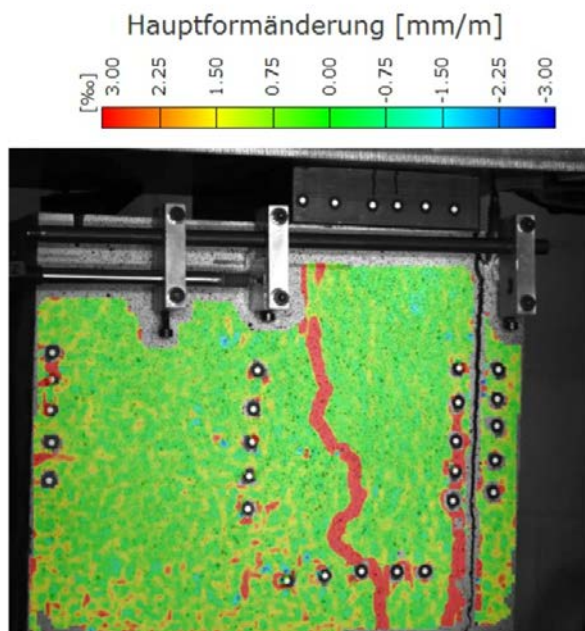
Kolbenkraft (Stufe 21) = **57.6kN**

— Kolbenkraft



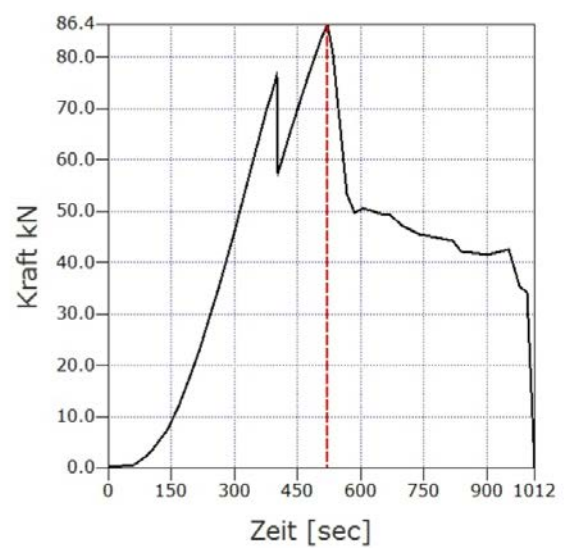
Stufe 27

Wandkopfdetailversuch 2



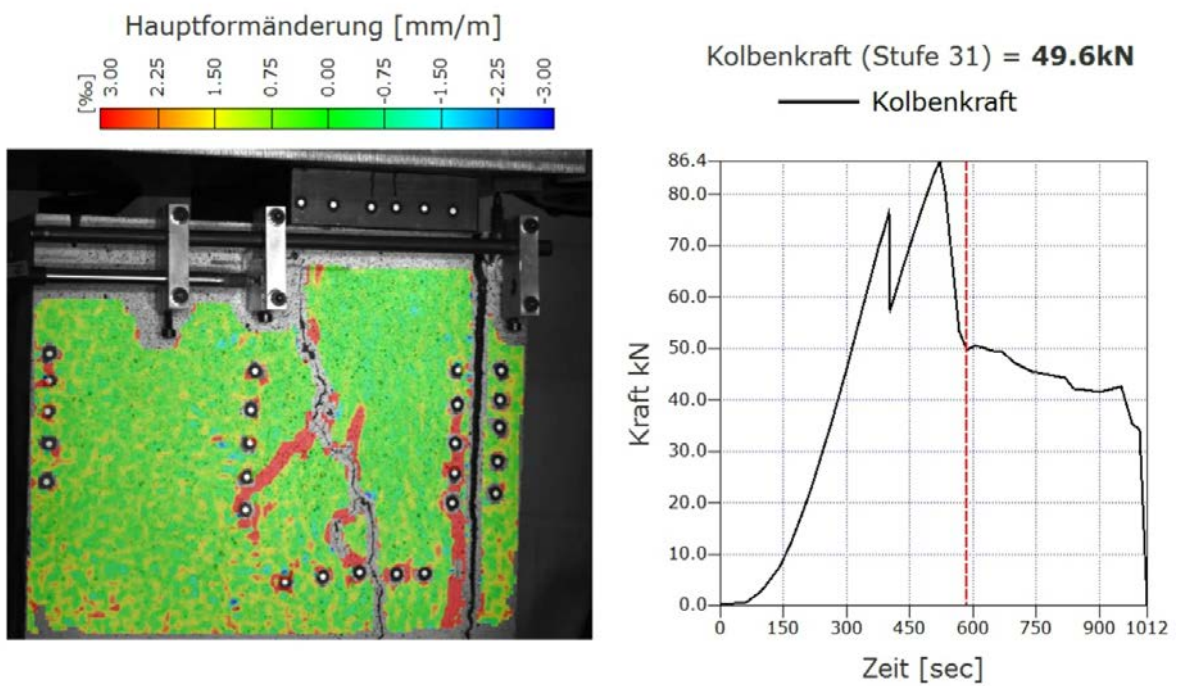
Kolbenkraft (Stufe 27) = **86.4kN**

— Kolbenkraft



Stufe 31

Wandkopfdetailversuch 2



Stufe 43

Wandkopfdetailversuch 2

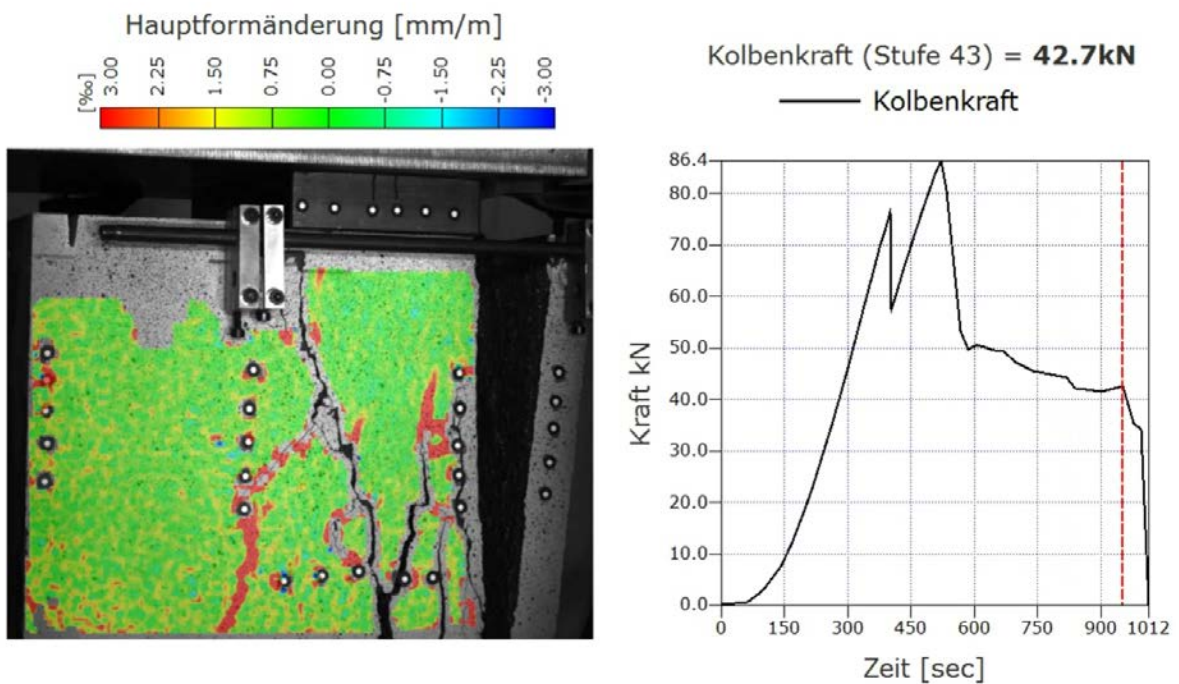
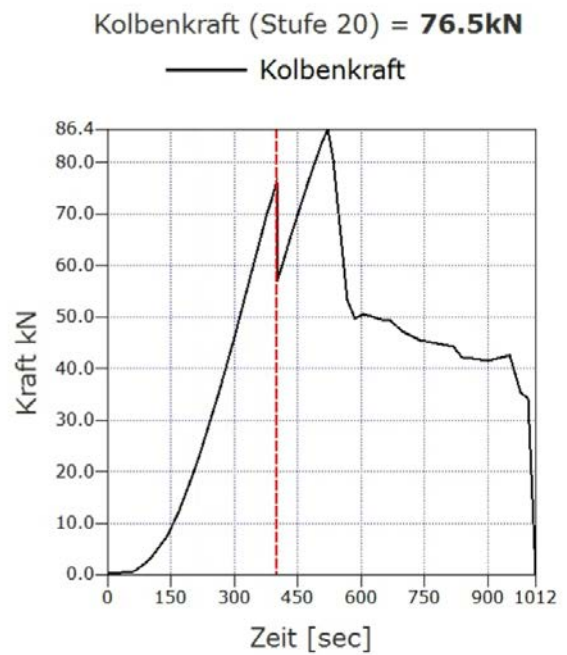
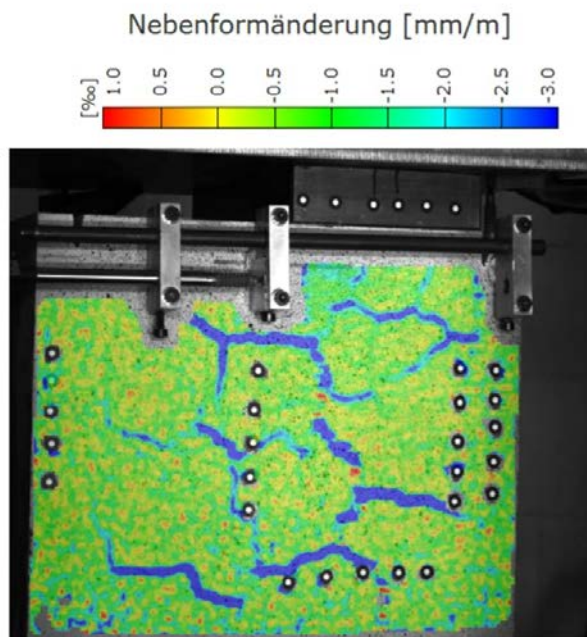


Abbildung 2-6: Probekörper für Versuche zum Verbund, Auswertung zur Hauptformänderung

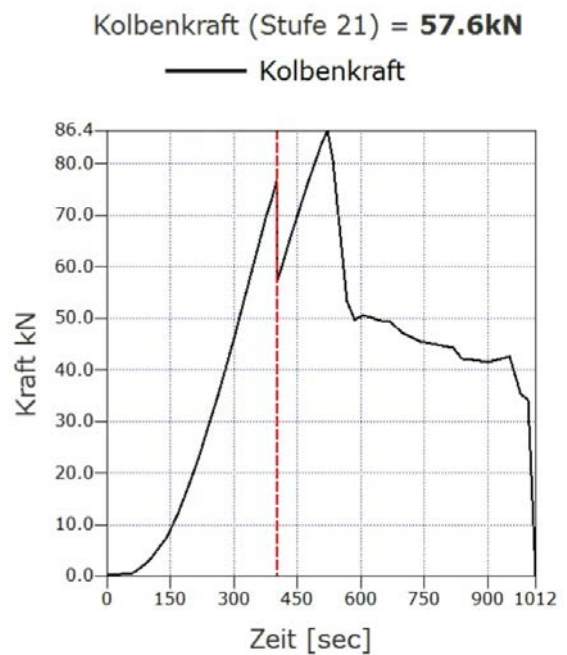
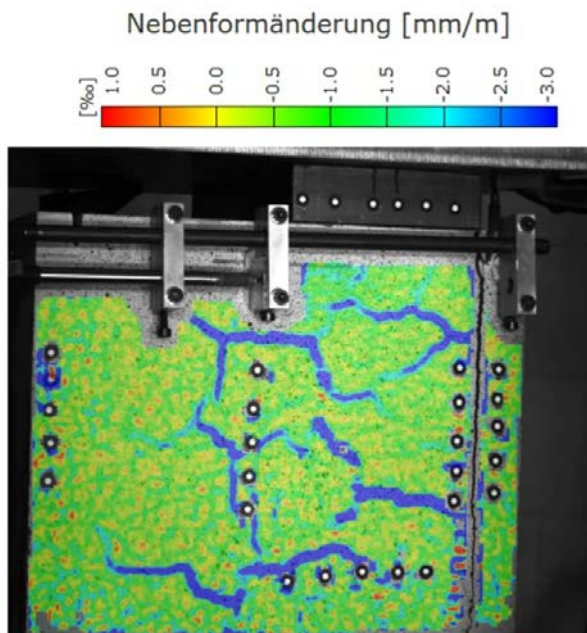
Stufe 20

Wandkopfdetailversuch 2



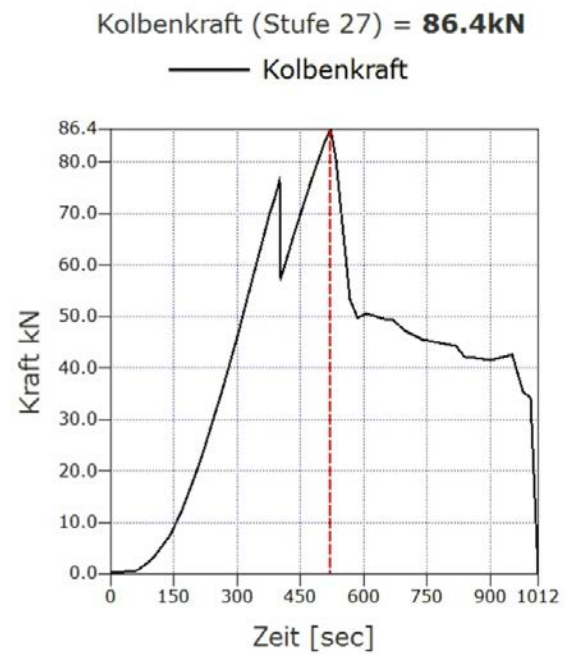
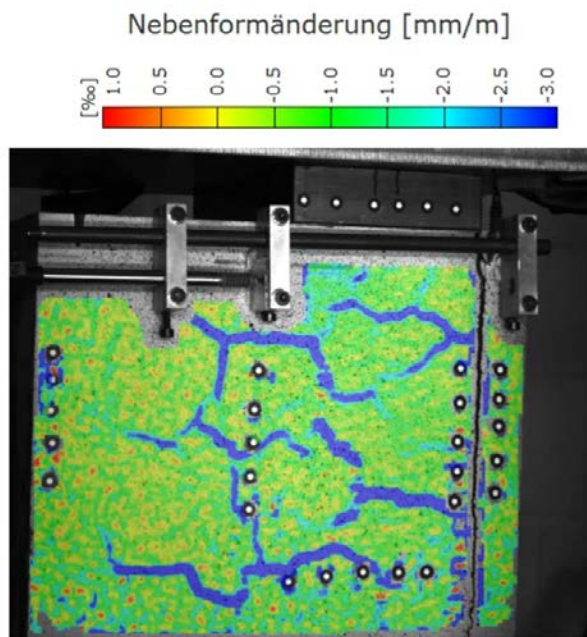
Stufe 21

Wandkopfdetailversuch 2



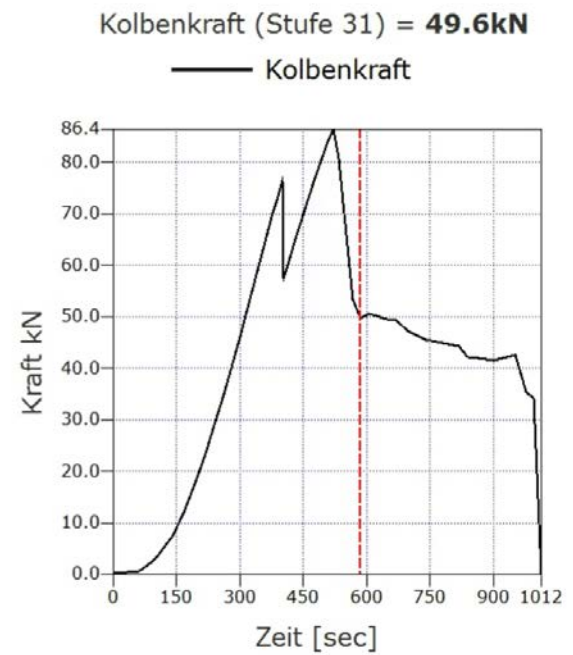
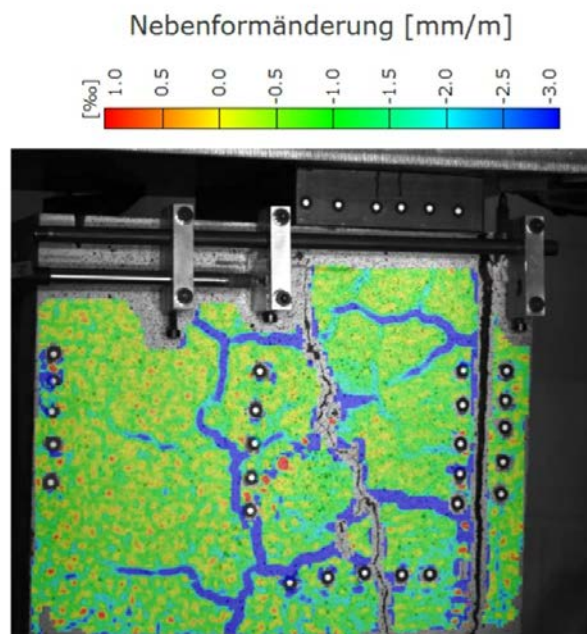
Stufe 27

Wandkopfdetailversuch 2



Stufe 31

Wandkopfdetailversuch 2



Wandkopfdetailversuch 2

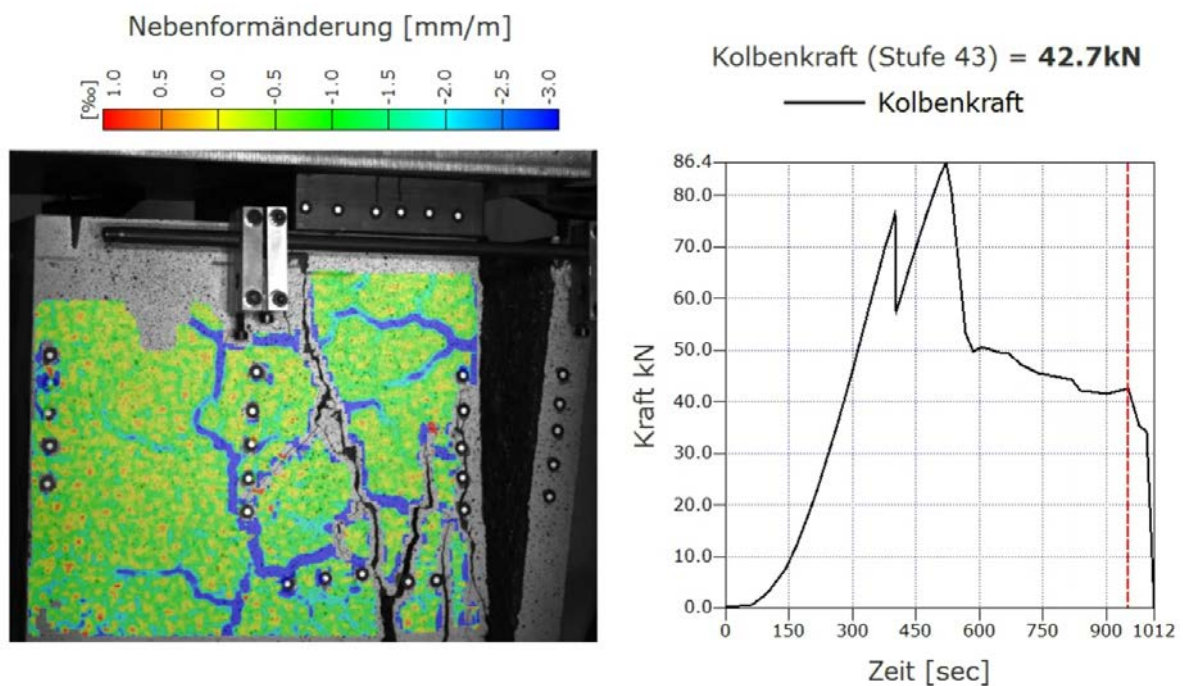


Abbildung 2-7: Probekörper für Versuche zum Verbund, Auswertung zur Nebenformänderung

Das nachfolgende Diagramm (Abbildung 2-8) zeigt eine Zusammenfassung von zwei Versuchen, die mit den gleichen Versuchsparametern stattgefunden haben. Gegenübergestellt werden der Kolbenweg und die horizontale Verformung der Wegaufnehmer, die letztendlich die Summe aller Risse und Verformungen innerhalb der horizontalen Messstrecke zeigen. Zusätzlich wurde die Kolbenkraft auf die Spannungsfläche unterhalb der Lasteinleitung bezogen. D.h. die Ordinate zeigt die gemittelte Spannung unter der Lasteinleitungsplatte.

Laborversuche an Wandelementen

Bei Einsatz von CLM-Schaumbeton-Hybrid-Fertigteilen als Außenwände im Hochbau ist eine kombinierte Belastung aus vertikalen ständigen und veränderlichen Lasten in Wandscheibenrichtung, aus horizontalen Windlasten senkrecht zur Wandscheibe sowie, wenn für die Aussteifung des Gebäudes erforderlich, aus horizontalen veränderlichen Lasten in Wandscheibenrichtung zu erwarten. Versuche an raumhohen Wandelementen sollen diese Belastungssituation abbilden.

Versuchskörper und Versuchsaufbau

Hierfür wurden Versuche an 2,52 m hohen Wandelementen in einer Vier-Säulen-Prüfmaschine durchgeführt (Abbildung 2-11). Entsprechend der Einbausituation im Gebäude (vgl. Abbildung 2-1) erfolgt die Belastung sowohl am Fuß als auch am Kopf des Wandelements exzentrisch zur Wandmittellachse. Dabei wird nur der CLM-Schaum belastet. Geplant waren zu variierende Parameter wie das Maß der Exzentrizität und der Wandaufbau. Untersucht

werden sollte ein dreischaliges System (HPC-CLMS-HPC) und ein zweischaliges System (HPC-CLMS) unter Beibehaltung der Gesamtwanddicke.

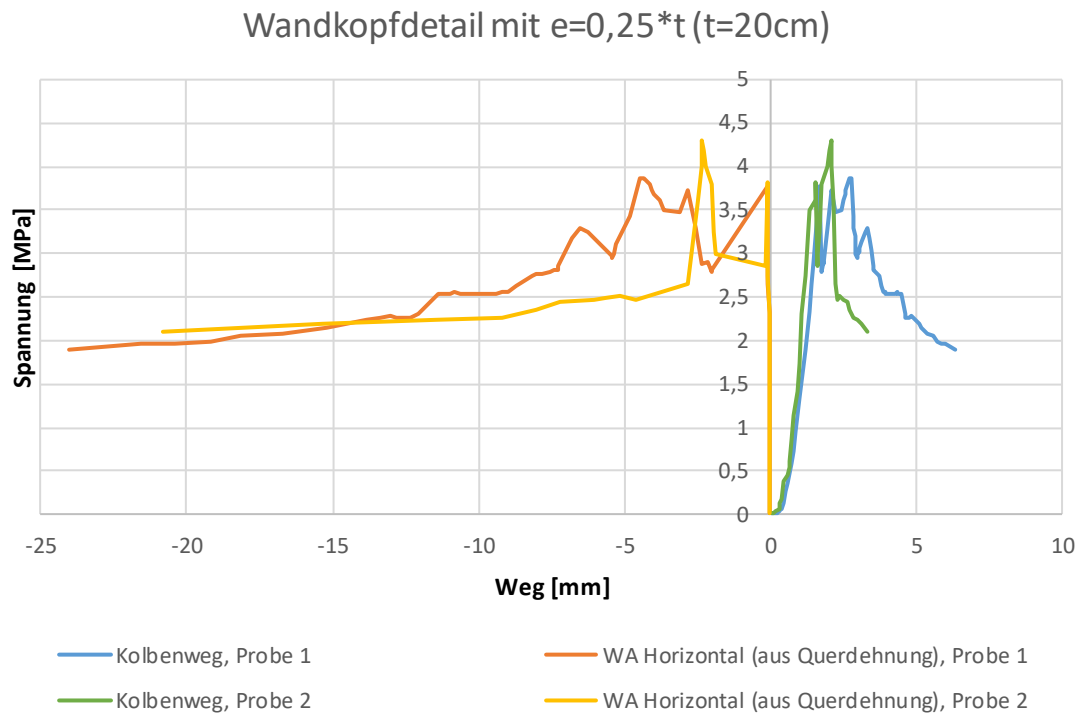


Abbildung 2-8: Spannungs-Weg-Diagramm für Versuche zum Verbund, Auswertung der horizontalen Wegaufnehmer

Die Breite des Prüfkörpers war durch die Prüfeinrichtung im Labor des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau auf $b = 38 \text{ cm}$ limitiert. Eventuell auftretende Einflüsse aus der Schlankheit des Versuchskörpers wurden nicht erwartet.

Von der Fa. Hentschke Bau zur Verfügung gestellt wurden 3 Versuchskörper (Abbildung 2-9): ein Versuchskörper nur aus einem 20 cm starken CLM-Schaum sowie zwei Versuchskörper mit dreischaligem Aufbau aus 2 HPC-Schalen mit 1,5 cm Dicke und einem UHPC-Schaumkern mit 20 cm Stärke. Alle Versuchskörper wiesen ausgeprägte Vorschädigungen auf.

Der Versuchskörper nur aus CLM-Schaum zeigte eine starke Schwindrissbildung. Im Inneren des Versuchskörpers verbindet ein Bewehrungsstahl $\varnothing 8 \text{ mm}$ die am oberen und unteren Ende angebrachte Schraubhülse. Dies hat offensichtlich ausgereicht, das im CLM-Schaum auftretende Schwinden zu behindern und senkrecht zur Bauteilachse auftretende Schwindrisse zu initiieren (Abbildung 2-10). Die Schwindrisse hatten eine Breite von 0,2 mm bis 0,4 mm.



Abbildung 2-9: Obere Ansicht der Versuchskörper für die Wandversuche; nur CLM-Schaum (links), dreischalig mit sehr großer Vorschädigung (mittig) und dreischalig mit großer Vorschädigung (rechts)

Beide dreischaligen Versuchskörper zeigen einen mittig trennenden Riss (Abbildung 2-9), der infolge der Schwindprozesse in den HPC-Schalen im CLM-Schaum entstanden ist. Initiiert scheint er ebenfalls durch die Lage der Schraubhülsten. Über die Versuchskörperlänge mäandern die Risse innerhalb des CLM-Schaums bis in die Verbundschicht zwischen HPC-Schale und CLM-Schaum. Die Breite der Risse betrug zwischen 3,0 mm und 1,3 cm (Abbildung 2-9).

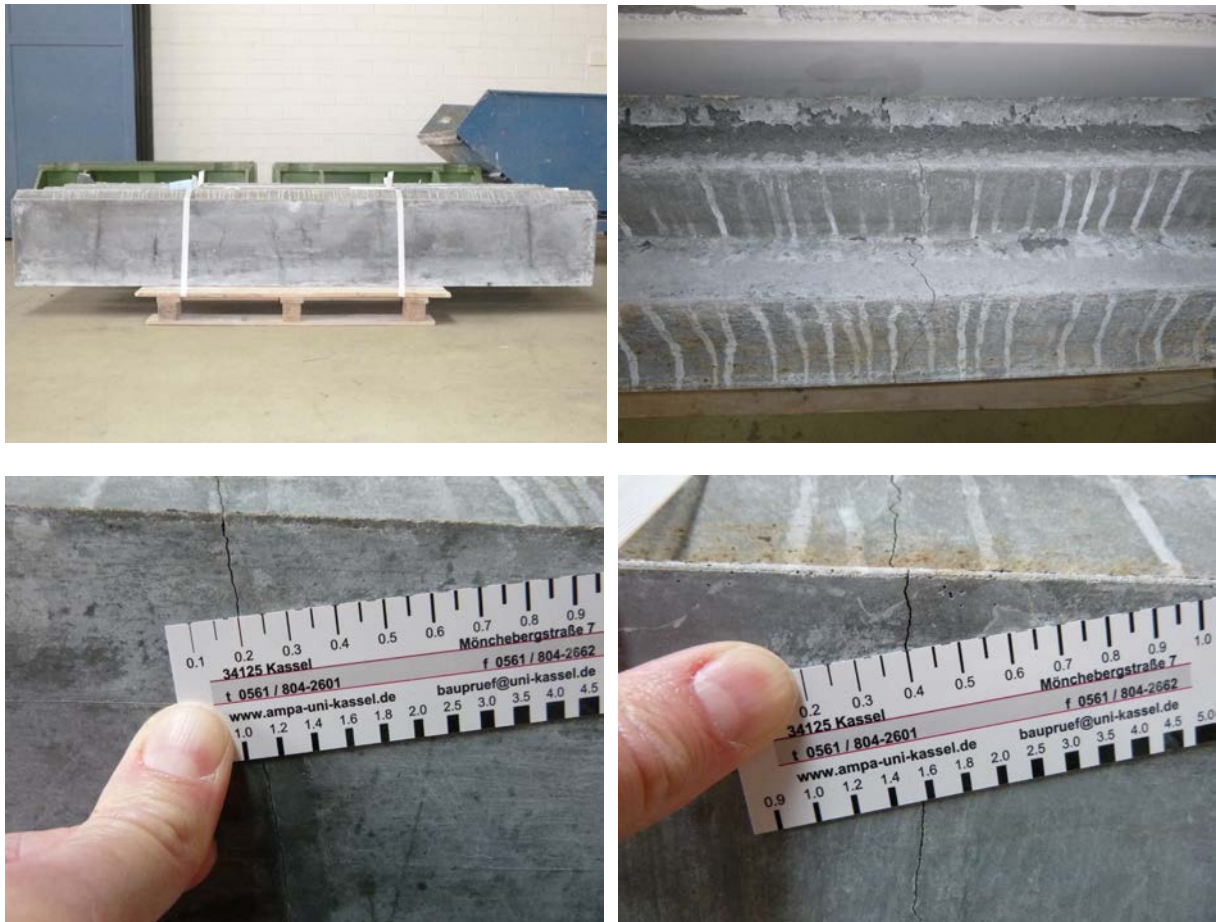


Abbildung 2-10: Durchgehende Schwindrisse im Versuchskörper aus CLM-Schaum

Für die Durchführung der Versuche wurde auf den Versuchskörper mit der sehr großen Vorschädigung, die sich auch auf eine teilweise Ablösung einer HC-Schale erstreckte, verzichtet.

Die Versuche an den Wandelementteilen wurden in einer Universalprüfmaschine des Zentrallabors des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau an der Universität Kassel durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2-11 schematisch und in Abbildung 2-12 im Foto dargestellt. Die Versuche sollten die Wandelementteile statisch monoton zunehmend vertikal belasten. Die Lasteinleitung erfolgte über Lasteinleitungsplatten 130 mm x 320 mm x 40 mm. Diese wurden so angeordnet, dass sich eine Exzentrizität von 35 mm, dies entsprach $7/40$ der Dicke des CLM-Schaumkerns, ergab.

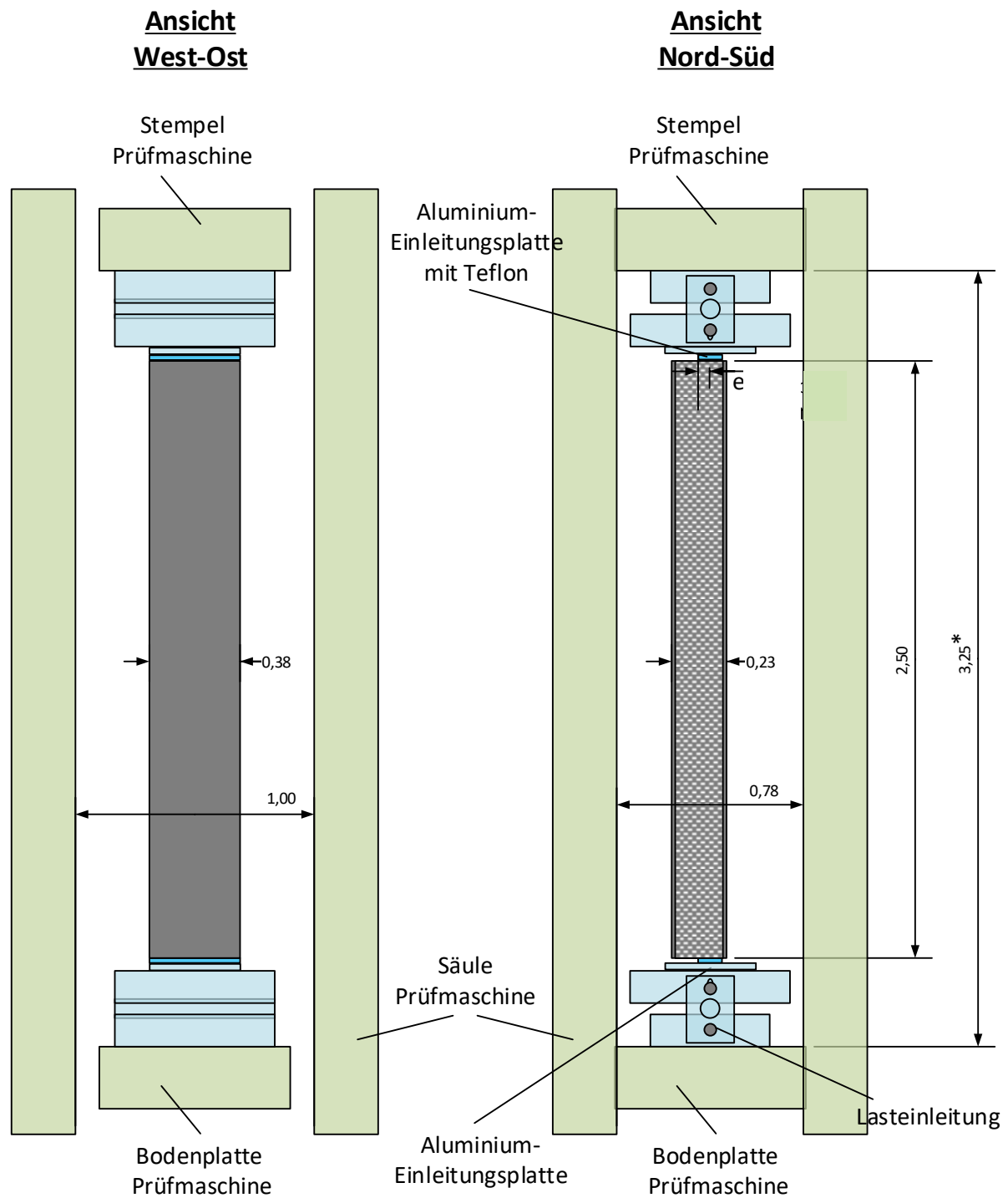


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus in Stirnflächen- (Nord-Süd) und Seitenansicht (Ost-West).

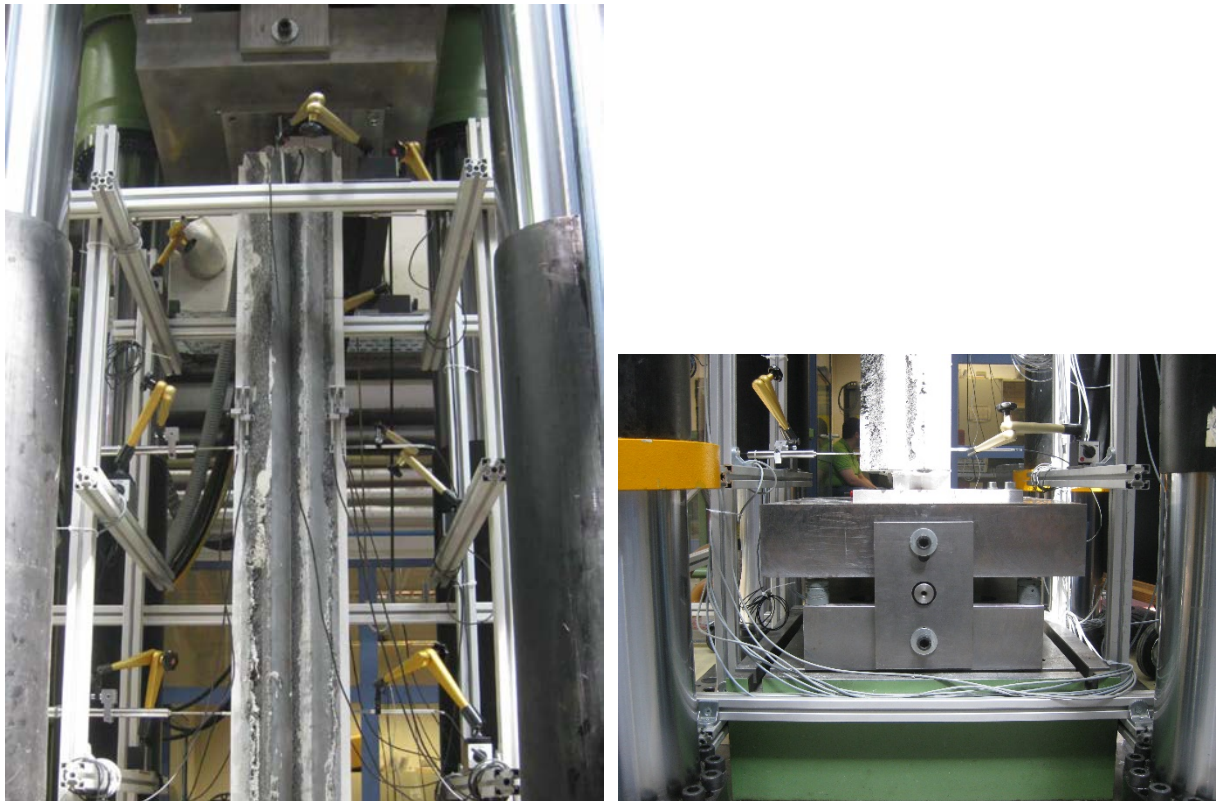


Abbildung 2-12: Obere Stirnflächenansicht (links) und Fußpunktlagerung (rechts)

Versuchsdurchführung, Messeinrichtung und Versuchsergebnisse

Zwischen Versuchskörper und Lasteinleitungseinrichtung wurde eine Lasteinleitungsplatte angeordnet. Unebenheiten der Versuchskörperoberseite wurden durch eine Ausgleichsschicht behoben.

Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,02 mm/s bis zum Bruch, welcher definiert war als Lastabfall nach Erreichen der Höchstlast bei gleichzeitigem Öffnen eines Versagensrisses. Die Daten wurden mit einer Messrate von 10 Hz aufgezeichnet.

Zu den aufgezeichneten Daten gehören: Maschinenkraft, Maschinenweg, Gesamtstauchung des Versuchskörpers, relative horizontale Verschiebung der HPC-Schaloberflächen an den Seitenflächen (vergleiche Abbildung 2-12) und relative Verschiebung zwischen HPC-Schale und CLM-Schaumkern bzw. Verformung CLM-Schaum. Zum Einsatz kamen induktive Wegaufnehmer AX 50, AX10 und AX5 der Fa. Hottinger. Bis auf die mittels Halteböckchen direkt an den Stirnflächen angebrachten Wegaufnehmer, wurden alle Wegaufnehmer von Magnetstativen gehalten, welche an einem Haltegerüst angebracht waren.



Abbildung 2-13: Verformung und relative Verschiebung zwischen HPC-Schale und CLM-Schaum (links) und Verformung des CLM-Schaums (rechts).

Der dreischalige Versuchskörper erreichte eine Höchstlast von ca. 73 kN bei gleichzeitig auftretender Stauchung des Versuchskörpers von ca. 3,3 mm mit dann einsetzendem treppenförmigen Lastabfall. Bei einer Gesamtstauchung von ca. 4 mm wurde das Bruchkriterium erreicht, d.h. es öffnete sich im Kopfbereich des Versuchskörpers ein großer Versagensriss. Dagegen erreichte der CLM-Schaumkern eine Höchstlast von ca. 280 kN bei einer Stauchung von ca. 5,3 mm mit dann auftretendem schlagartigem Lastabfall auf 75 kN. Damit war das Bruchkriterium ebenfalls erreicht.

Das Versagen stellte sich im Kopfbereich ein. Bereits vorhandene Risse infolge des unterschiedlichen Schwindens von HPC-Schale und CLM-Schaumkern öffneten sich > 1 cm. Diese markante Rissöffnung setzte sich über die gesamte Höhe des Versuchskörpers fort. Um ein Auseinanderfallen des Versuchskörpers zu verhindern, wurden Haltegurte (spannungslos) am Versuchskörper angebracht (Abbildungen 2-14 bis 2-17).

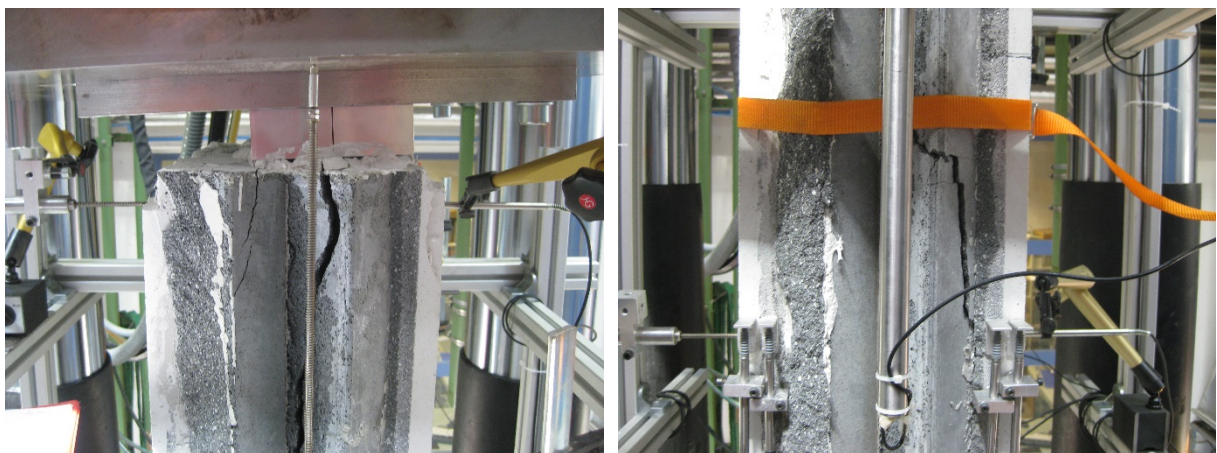


Abbildung 2-14: Versagensriss am Wandelementkopf.

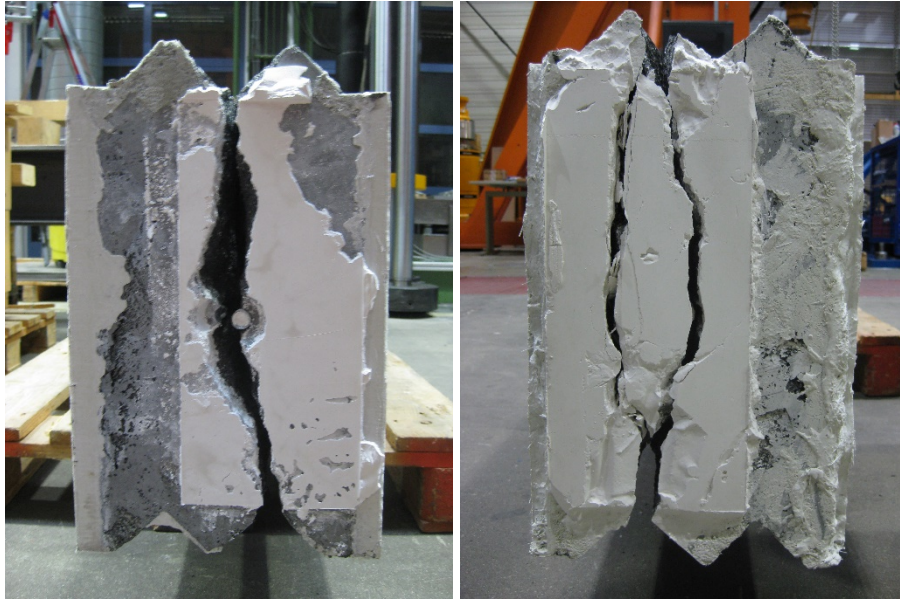


Abbildung 2-15: Draufsicht auf Versuchskörperober- und -unterseiten; unten (links) und oben (rechts).



Abbildung 2-16: Versagensrisse im Wandkopf- (links) und Wandfußbereich (rechts).



Abbildung 2-17: Dreischaliges Wandelementteil nach Versuch.

Die Last wurde durch eine Lasteinleitungsplatte mit den Abmessungen 130 mm x 320 mm eingeleitet. Lokal ergab sich damit für den dreischaligen Versuchskörper im Kopf- bzw. Fußbereich der Versuchskörper eine Normalspannung von ca. 1,75 N/mm². Für den CLM-Schaumkern stellt sich im Vergleich dazu eine Normalspannung von ca. 6,7 N/mm² ein.

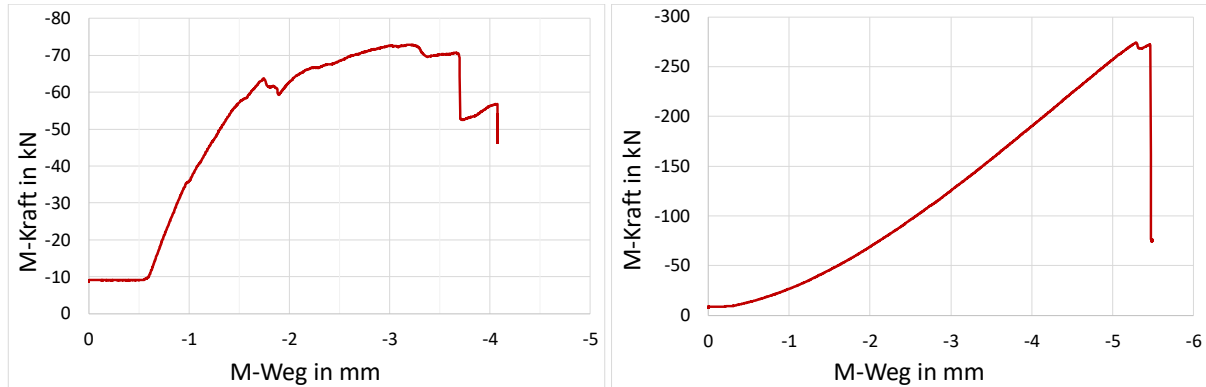


Abbildung 2-18: Kraft-Weg-Diagramm für dreischaligen Versuch (links) und CLM-Schaumkern (rechts).

Im dreischaligen Versuch zeigen die an den HPC-Schalen aufgebrauchten horizontalen Wegaufnehmer eine ausgeprägte horizontale Verformung in westlicher Richtung. Die Differenz der Messergebnisse weist auf die innere Gefügestörung in Form von sich öffnenden Rissen. Eine deutliche Biegeverformung infolge der Exzentrizität bildet sich nicht heraus, da die vor Versuch vorhandenen Risse die Aktivierung des gesamten Querschnitts verhinderten.

Im Gegensatz dazu zeigt der Versuch am CLM-Schaumkern einen Wechsel der Verformungsrichtung von anfänglich westlicher in schlussendlich östlicher Richtung. Die Vorschädigung des Versuchskörpers ist geringer und anders gelagert, sodass sich eine deutliche Biegeverformung einstellen kann (vgl. Abbildung 2-20 rechts).

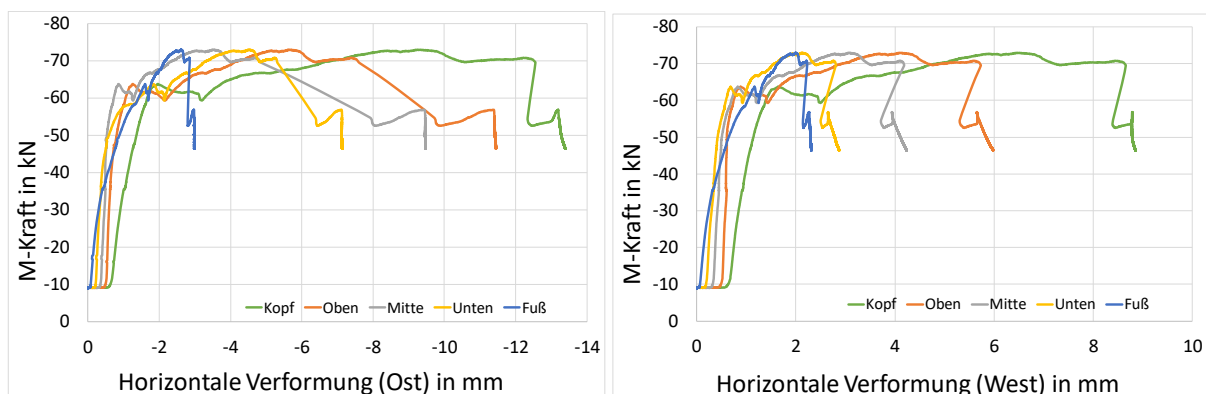


Abbildung 2-19: Horizontale Verformung der HPC-Schalseiten auf der Ost- (links) und Westseite (rechts) des dreischaligen Versuches.

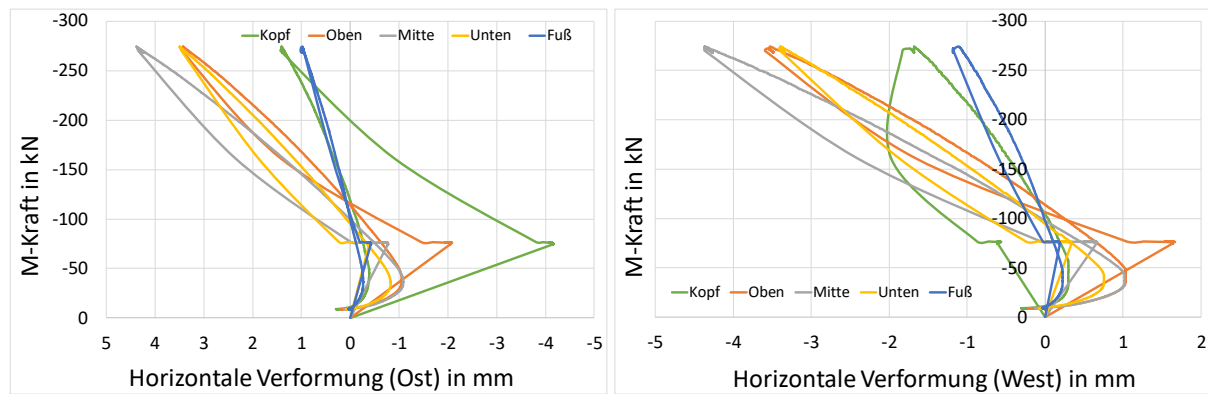


Abbildung 2-20: Horizontale Verformung der Seitenflächen auf der Ost- (links) und Westseite (rechts) des CLM-Schaumkernversuches-

Vorläufige Empfehlung für die Bemessungsansätze

Die durchgeführten Versuche an 2,52 m hohen Wandelementteilen konnten nur tendenziell das Trag- und Verformungsverhalten des hier untersuchten Wandaufbaus als vermutlich ausreichend demonstrieren. Um belastbare Aussagen hinsichtlich der Trag- und Verformungskapazität treffen zu können, sind weitere experimentelle Untersuchungen vor allem an nicht vorgeschädigten Versuchskörpern erforderlich. Diese wären auch grundsätzlich notwendig, um weitergehende Fragen nach dem Tragverhalten infolge horizontaler Belastung in Platten- bzw. in Scheibenrichtung (Aussteifung von Gebäuden) und damit nach Fragen der Anforderungen an vertikale und horizontale Fugenausbildung beantworten und Hinweise bezüglich der Bauausführung geben zu können. In diesem Zusammenhang muss angemerkt werden, dass mit diesen Versuchen auch Antworten bezüglich der Anforderungen an Anschlagmittel für das Bewegen der Wandelemente gefunden werden müssen.

Die Versuche zum Wandkopfdetail haben gezeigt, dass bis zum Erreichen der ersten Maximallast ein lineares Tragverhalten vorliegt. Nach Überschreiten findet zwar zunächst ein Lastabfall statt, doch sind anschließend noch Steigerungen der ersten Maximallast möglich. Nach dem zweiten Peak zeigt sich ein deutlicher Lastabfall, der bei zunehmenden Verformungen bei einem gewissen Restkraftniveau verbleibt, wobei das Niveau des Resttragverhaltens bei weiterhin zunehmenden Verformungen abnimmt.

Somit wäre für den aktuellen Stand die vorläufige Empfehlung für die Betrachtung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für eine experimentell ermittelte höchste Maximallast zu bemessen und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) deutlich unter dieser Maximallast zu verbleiben, denn sie zeigt ein Ablösen der Wandschale und damit einen unumkehrbaren Zustand an. Natürlich sind für den GZT entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte auf der Materialseite zu verwenden, welche in weiteren experimentellen Untersuchungen noch zu bestimmen wären. Vorläufig könnte man sich zunächst an dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_c=1,5$ nach DIN EN 1996 im GZT orientieren. Diese Angaben sind um weitere Sicherheitsüberlegungen zu erweitern. Eine Möglichkeit dafür wäre die Nutzung der Angaben nach DIN EN 1990:2010-12 im Anhang D.7.2. Hier wird angegeben, wie die Sicherheitsbeiwerte in Abhängigkeit der Streuung der Versuchswerte, wie z.B. die Streuung der Druckfestigkeit des CLMS-Materials, zu ermitteln sind. Unter Befolgung der Angaben der Norm kann ein Wert für die 5%-Quantile ermittelt

werden. Dazu muss eine ausreichend große Datenbasis der Festigkeiten vorliegen. D.h. es müssen weitere Versuche unternommen werden. Für den GZG sind ebenfalls noch weitere Untersuchungen vor allem zum Kriechverhalten zu empfehlen, Grundsätzlich können die Angaben der DIN EN 1996 als Richtwerte angenommen werden (gegebenenfalls auch nach DIN EN 1992). Aber auch hier sind noch weitere Überlegungen zur Einhaltung von Sicherheiten in Abhängigkeit der Versuche anzustellen.

DRITTER TEIL

Verbundsystem als Fertigteil und Erstellung eines Demonstrators

Abweichend von den Vorgaben der EnEV wurden die Wandelemente des Demonstrators mit einem 20 cm dicken Schaumkern erstellt. Diese Entscheidung wurde auf Grund der im Werk vorliegenden Mischerkapazität getroffen. Zudem vereinfacht es den Transport und den Bau an der Uni Kassel, da hier nur eingeschränkte Hebeeinrichtungen zur Verfügung stehen. Technisch wäre die Herstellung nach ENEV jedoch machbar. Zusammen mit den UHPC-Schalen ergibt sich aus den Abmaßen ein U-Wert von $0,48 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Herstellungsablauf

Für die Herstellung der Schaumkerne wurden zwei Schalungen mit den Abmaßen $2,5 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$ hergestellt. An den seitlichen Flanken wurden die Profile für die Verzahnung angebracht. Zum Bewegen der Teile wurden Transportanker in der Schalung vorgesehen. Da bei vorangegangenen Versuchen die Transportanker ausgezogen wurden, sind diese mit einem Bewehrungsstab verbunden worden. Zudem wurde noch ein Quereisen angeschweißt, um einen sicheren Transport der Wandelemente zu gewährleisten (Abbildung 3-1).



Abbildung: 3-1: Schalung für einen Schaumkern mit Transportankern (links), und eingefüllter Schaumbeton beim Auftreiben (rechts).

Nach der Herstellung des Schaumbetons wurde das Auftreiben von allen Schaumkörpern dokumentiert (Abbildung 3-2). Dabei wurde auch ein Absacken des Betons nach Erreichen der maximalen Auftreibhöhe beobachtet. Dieses betrug ca. 3 cm. Etwa vier Stunden nach Herstellung wurde der übergequollene Teil des Betons mit einer Säge abgetragen. Für die Erhärtung wurde der Beton mit einer Schaumstoffmatte abgedeckt.



Abbildung 3-2: Maximale Treibhöhe des Schaumbetonkerns (links) und Abtragen des übergequollenen Betons (rechts).

Nach etwa 24 Stunden wurden die Schaumkerne aus der Schalung geholt (Abbildung 3-3). Die untere glatte Schalenseite des Schaumbetons wurde mit Schleifpapier aufgeraut. Nach vier Tagen wurden zwei Schaumkerne zusammenstehend und nass in eine Schalung gestellt.



Abbildung 3-3: Schaumkern nach dem Ausschalen.

Es wurde ein Hochleistungsbeton, der als Fassadenbeton bei der Firma Hentschke Bau verwendet wird, als Schalen anbetoniert. Der HPC hat eine Grundrezeptur auf Basis Weißzement mit einem Größtkorn von ca. 1 mm und 1 % Glasfasern. Die genaue Betonrezeptur unterliegt jedoch dem Betriebsgeheimnis der Firma Hentschke Bau. Der Beton mit einer sehr fließfähigen Konsistenz erreicht nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von ca. 80-100 N/mm² und eine mittlere Biegezugfestigkeit von 10 N/mm².

Die Entscheidung den oben beschriebenen HPC zu verwenden wurde auf Grund des zeitlichen Verzugs und der Bedenken des Praxispartners bezüglich der Betonage (Einfüllung des Betons in eine stehende Schalung über 2,5 m). Da die Schalen nicht direkt belastet werden und die Anforderungen an die Oberfläche (dichte und glatte Oberfläche) durch den HPC erfüllt werden, sollte die geänderte Betonwahl keinen zusätzlichen Einfluss auf das Tragverhalten der Wandelemente haben.

In einige Elemente wurden zusätzlich Temperatursensoren eingebaut (Abbildung 3-4). Das Schwindmaß des für die Wandelemente verwendeten HPC unterscheidet sich maßgeblich vom Schwindmaß des UHPC. Dadurch, dass sich die Schalen sehr viel stärker Verformen als angenommen und der hergestellte Verbund zwischen Schaumbeton und HPC sehr gut verzahnt ist, sind die Schaumbetonkerne nachträglich gerissen. Die Risse ziehen sich teilweise durch den gesamten Kern.



Abbildung 3-4: Wandelement mit Vorsatzschale und Temperatursensor (links), Kabelführung vor Betonage (rechts)

Das Schwindmaß des für die Wandelemente verwendeten HPC unterscheidet sich maßgeblich vom Schwindmaß des UHPC. Dadurch, dass sich die Schalen sehr viel stärker Verformen als angenommen und der hergestellte Verbund zwischen Schaumbeton und HPC sehr gut verzahnt ist, sind die Schaumbetonkerne nachträglich gerissen. Die Risse ziehen sich teilweise durch den gesamten Kern. Diese Risse führen zu einer verminderten Tragfähigkeit der Wandelemente. Die bauphysikalischen Eigenschaften werden dagegen nicht negativ beeinflusst. Auf Grund der hohen Auslastung des Herstellungswerks konnten in der gegebenen Zeit keine weiteren Wandelemente hergestellt werden.

Demonstratorgebäude unter Einsatz der HPC-Schalen+CLM-Schaumkern-Wandelemente

Der Demonstrator soll als einfaches Gebäude die prinzipielle Baubarkeit beweisen. Es konnte in Abstimmung mit der Verwaltung der Universität Kassel ein Ort auf dem Gelände der Universität gefunden werden, an dem ein Bau errichtet werden konnte.



Abbildung 3-5: Standort des Demonstrators auf dem Gelände der Universität Kassel.

Dafür wurde ein rechteckiger Bau mit Pultdach und Außenabmessungen von ca. 2,0 m x ca. 3,0 m im Stil eines Schuppens geplant. Die Wandhöhe des Gebäudes sollte ca. 2,5 m betragen (Abbildung 3-6).

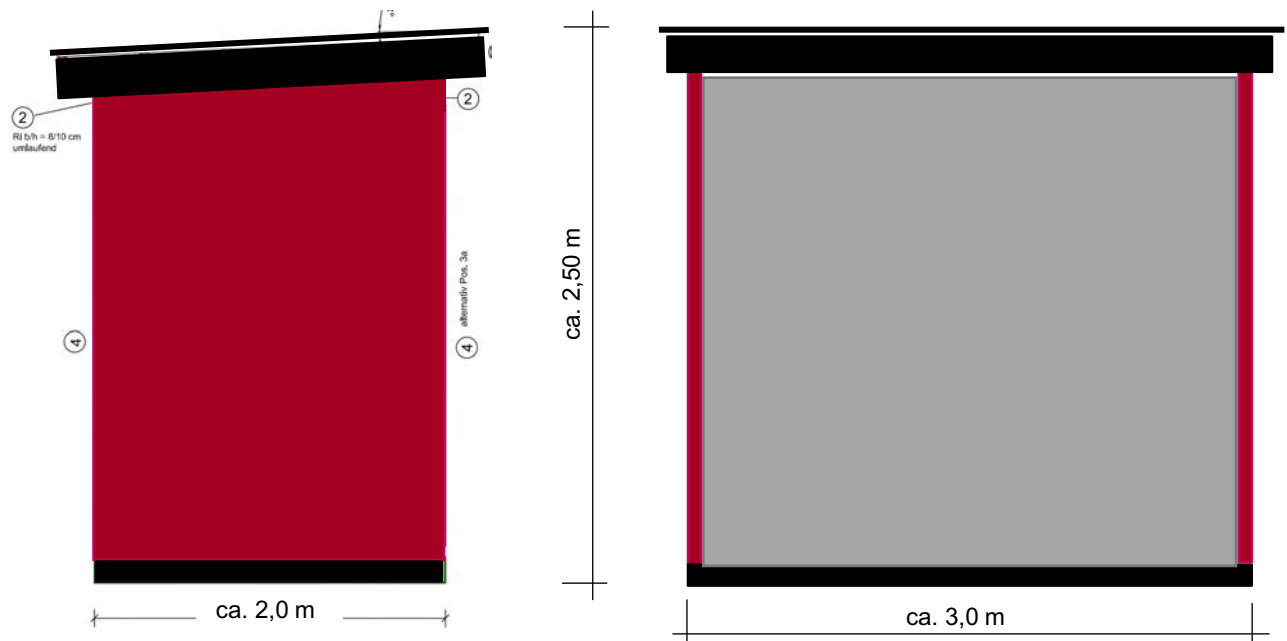


Abbildung 3-6: Demonstrator. Ansicht seitlich (links) und frontal (rechts).

Die zwei 3,0 m langen Wände (Nord- und Südwand) sollen aus den entwickelten HPC-CLM-Schaumkern-Hybridwandelementen hergestellt werden (Abbildung 3-7). Die kurzen Seiten mit ca. 2,0 m Länge und das Pultdach

sind als Holzständerwände bzw. als Holzdachkonstruktion in Standardbauweise geplant. Zum Betreten ist an der Ostseite eine Tür eingebaut. Der technische Ausbau im Inneren betrifft Heizung und Beleuchtung.

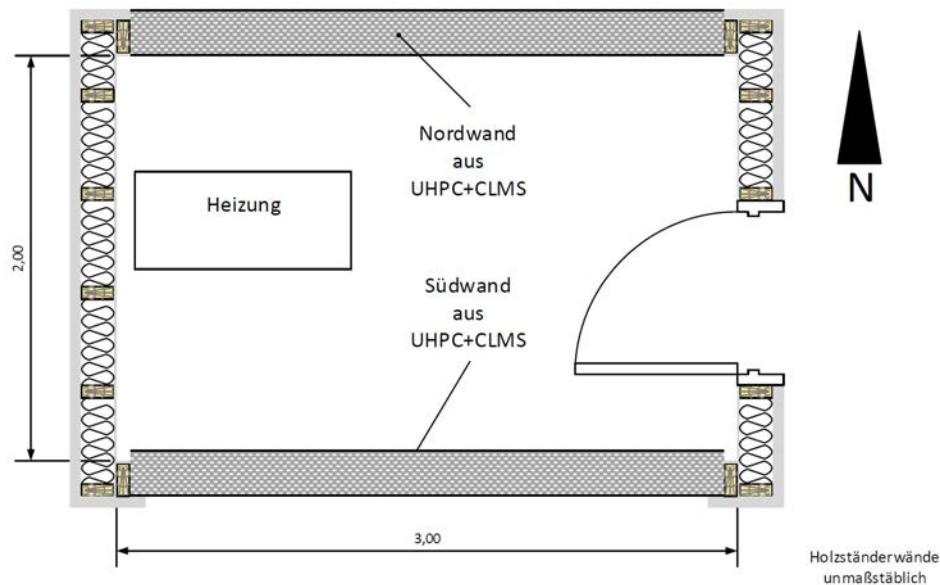


Abbildung 3-7: Grundriss des Demonstrators.

Aufgrund des maximal möglichen Mischvolumens im Werk der Fa. Hentschke Bau haben die einzelnen raumhohen Wandelemente eine Breite von 0,75 m. Damit werden jeweils vier Wandelemente für eine Wand benötigt (Abbildung 3-8). Um den Wärmedurchgang an diesen Stellen zu minimieren und eine formschlüssige Verbindung in der Wandscheibe herzustellen, wird zwischen den Elementen eine Verzahnung vorgesehen (Abbildung 3-8). Entlang der Verzahnung wird ein Dünnett Mörtel aufgetragen. Die Fuge zwischen den inneren bzw. äußeren HPC-Schalen wird mit dauerelastischem Material winddicht verschlossen.

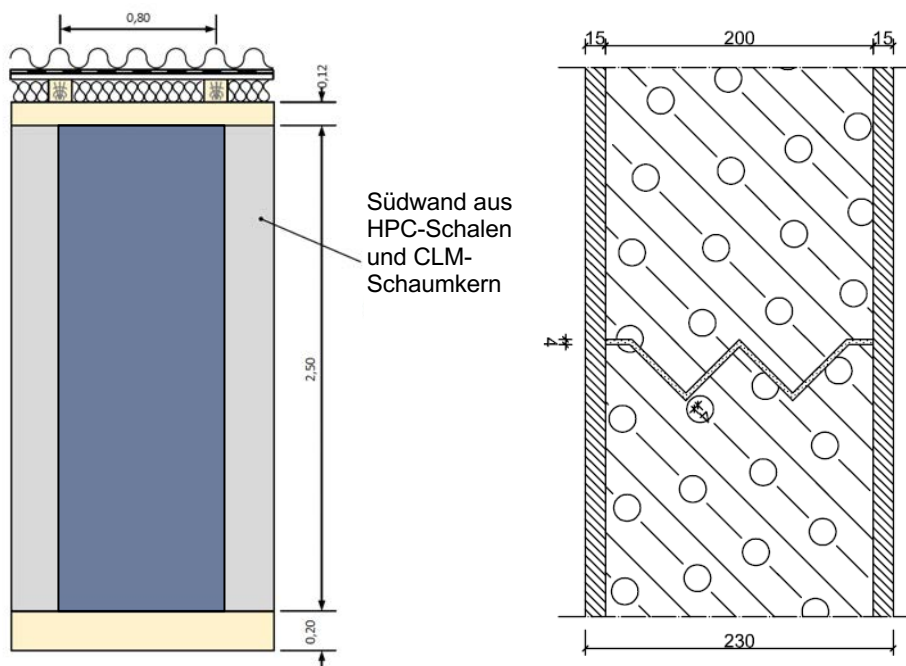


Abbildung 3-8: Wandelement in der Südwand (Seitenansicht) und Verbindung zwischen den Wandelementen (Aufsicht).

Die Wandelemente für den Demonstrator wurden Mitte und Ende Mai 2018 geliefert.



Abbildung 3-9: Wandelemente nach Lieferung.

Für die Errichtung des Demonstrators war zunächst die Frage der Montage zu klären. Mit einem Gewicht jedes Elements von ca. 450 kg war nur eine Montage Element für Element denkbar. Dies ging zu Lasten einer planbaren Anordnung auf der bereits im Dezember 2017 hergestellten Fundamentplatte.



Abbildung 3-10: Westliche Holzständerwand mit Sicherungs- und Anschlagkonstruktion.

In jedem Wandelement waren an den oberen und unteren Stirnflächen je zwei Schraubhülsen in den CLM-Schaum angeordnet. Im Werk der Fa. Hentscke Bau zeigte sich, dass diese Schraubhülsen keine kraftschlüssige Verbindung mit dem CLM-Schaumkern herstellen konnten. Deshalb wurde an der oberen und unteren Schraubhülse ein Bewehrungsstab $\varnothing 8$ mm angeschweißt. Zum Bewegen und zur Montage wurden am unteren Elementrand eine kurze Bohle an den Schraubhülsen befestigt. Anschlagmittel konnten an den oberen Schraubhülsen angebracht werden. Damit war das Versetzen und Montieren mit einem Gabelstapler möglich.

Die seitlichen Holzständerwände wurden soweit vorgefertigt, dass sie als Aussteifungselement im Bauzustand eingesetzt werden konnten und auch die Verbindung zwischen den äußeren Wandelementen mit den Seitenwänden herstellbar war.

Es wurde zunächst die westliche Seitenwand errichtet und abgestützt. Daran schloss sich die Montage der nördlichen Hybridwand an, beginnend mit dem äußeren westlichen Wandelement. Jedes Wandelement wurde erst probegesetzt (zum Prüfen der Fugenmaßhaltigkeit), dann endgültig gesetzt und mit der Bodenplatte und der Seitenwand bzw. dem Nachbarwandelement kraftschlüssig verbunden. Die profilierten Fugen wurden vor dem Setzen der zweiten und aller nachfolgenden Wandelemente mit einem Fliesenkleber vollfugig vermörtelt. Die geplante Fugenbreite von 4 mm konnte dabei nicht immer erreicht werden – es ergaben sich Fugenbreiten bis ca. 10 mm. Der Einfluss der Fugenprofilierung zeigte sich auch in der Unebenheit der Wandfläche: einzelne Wandelemente stehen hervor bzw. sitzen etwas zurück.

Die westliche und nördliche Wand wurden an einem Tag errichtet und zunächst gesichert. Am nächsten Tag erfolgte die Montage der Südwand analog zum eben beschriebenen Ablauf. Zum Ende des zweiten Tages wurde die östliche Wand errichtet.



Abbildung 3-11: Montieren des ersten Wandelements der Nordwand (oben links), Fugenvermörtelung (oben rechts), Setzen des zweiten Wandelements (unten links) und Abstützung des Bauzustands am ersten Tag (unten rechts).

Der weitere Bauablauf entsprach dem gewohnten: zunächst Errichtung der Dachkonstruktion und Dachdeckung, im Anschluss Dämm- und Verkleidungsarbeiten und das Türeinsetzen. Die elektrischen Installationen wurden von der Bauabteilung der Universität Kassel übernommen. Abschließend erhielt das Gebäude im Bereich der Holzständerwände einen Anstrich, die HPC-Flächen verbleiben momentan unbehandelt.

Monitoring des Demonstrators

Als Grundvoraussetzung für das Monitoring eines Bauteils wurden zwei Merkmale festgesetzt. Zum einen soll das Bauteil an der Südseite liegen, um möglichst große Temperaturschwankungen (Tag/Nacht, Sonne/Schatten) abbilden zu können. Zum anderen sollte das Bauteil kein Fenster haben, um die restlichen Randbedingungen konstant zu halten.

Das Temperatur-Monitoring findet kontinuierlich in vier Wandelementen an je 2 Messpunkten in drei Bauteilebenen statt. Die genauen Messpunkte für eine Wand sind in Abbildung 3-12 verzeichnet. Die Temperaturdaten werden mit der Wettermessstation des Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie Kassel Mitte korreliert und sollen Aufschluss über den Wärmetransport im Bauteil geben. Dies soll über einen Zeitraum von mindesten 3 Monaten aufgezeichnet werden.

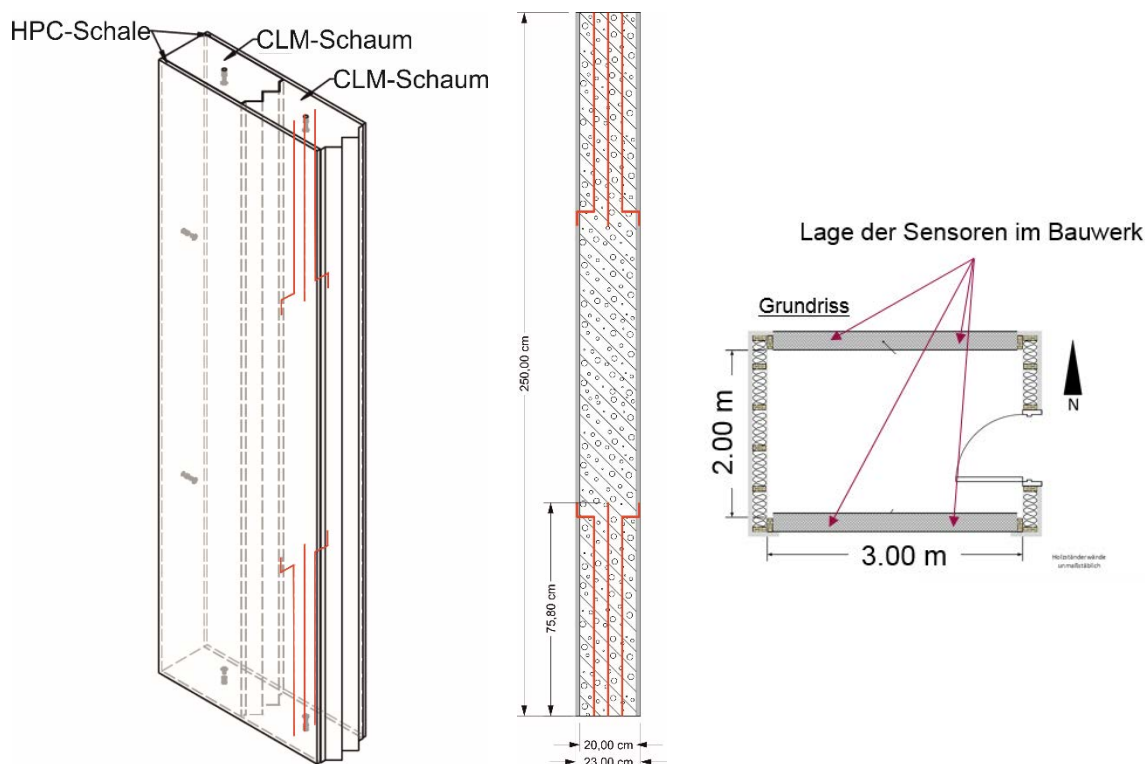


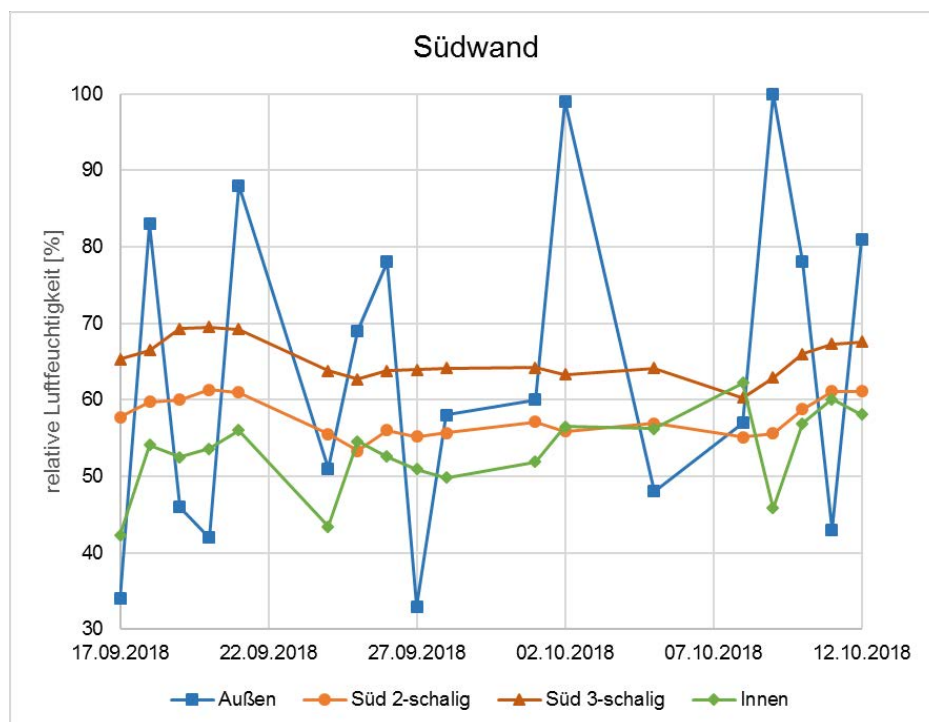
Abbildung 3-12: Temperatur-Monitoring. Lage der Sensoren in den Wandelementen (links und mitte) und im Gesamten Demonstrator)

Die Luftfeuchtigkeit der Außenluft unterliegt großen Schwankungen. Während bei trockenem Wetter Werte von um die 30 % relative Luftfeuchtigkeit erreicht werden, kann nach oder während eines Regenschauers schnell die 100 % relative Luftfeuchtigkeit herrschen. Die Außenhülle von Gebäuden sollte keinen großen Wassertransport zulassen, um Bauschäden zu vermeiden. Um dies zu Untersuchen wurde an vier Messpunkten (ca. 12 cm tief in der Wand) von Mo.-Fr. einmal täglich die Feuchte im bestimmt. Zusätzlich wurde Luftfeuchtigkeit im Innenraum aufgezeichnet. Diese Werte wurden mit den Daten der Messstation Kassel-Mitte des Hessischen Ladensamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) abgeglichen. Diese Messstation liegt Luftlinie etwa 1,5 km vom Demonstrator entfernt. Es ist davon auszugehen, dass sich die Luftfeuchte vor Ort nur gering von denen der Messstation abweicht.

Im Zeitraum zwischen dem 17.09.2018 und dem 12.10.2018 gab es zu den jeweiligen Messzeitpunkten große Schwankungen von knapp 70 % der relativen Luftfeuchtigkeit (Abbildung 3-13) in der Außenluft (blau). In der Süd- wand (orange/rot) schwang die Feuchtigkeit nur im Bereich von 10 %. Während in der 2-schichtige Variante nur bis knapp über 60 % rH gemessen wird, konnte in der 3-schaligen Wand bis zu 70 % rH ermittelt werden. Die beiden Kurven laufen auf den beiden Niveaus jedoch parallel. Auch die Nordwand (Hellgrau/Dunkelgrau) zeigt den gleichen Verlauf. Auch hier liegt die 2-schalige Variante leicht unterhalb der 3-schaligen Variante. Jedoch liegt hier der Unterschied nur bei etwa 3 %.

Die Luftfeuchtigkeit in Innenräumen (ausgeschlossen Badezimmer) sollte zwischen 40 – 60 % liegen. Im Demonstrator liegen die Messwerte genau in diesem Bereich. Nach den Untersuchungen der Luftfeuchte kann somit die Aussage getroffen werden, dass die Wände den Feuchtetransport effektiv verhindern und keine Bauschäden bei korrektem Einbau erwartet werden.

Zusammen mit der Luftfeuchtigkeit wurde auch die Wandtemperatur sowie die Innentemperatur aufgezeichnet (Abbildung 3-14). In blau sind wie bei den Feuchtemessungen die Daten der Messstation Kassel-Mitte (HLNUG) zum Messzeitpunkt dargestellt. In grauhinterlegt ist der Bereich in dem die Temperaturen an diesem Tag lagen. Ohne Heizung sank die Temperatur tagsüber nicht unter 12 °C. Im Vergleich zu den Außentemperaturen steigt oder fällt die Innentemperatur zeitverzögert und langsamer, was zeigt das die Dämmung funktioniert. Der Wandaufbau sowie die Ausrichtung nach Norden oder Süden haben keinen signifikanten Einfluss auf die Wandtemperatur. Dies kann allerdings an der Messung in den Bohrungen liegen und muss durch die einbetonierten Temperaturfühler verifiziert werden. Die Wandtemperatur ist zudem immer etwas niedriger (bis zu 5 °C) als die Innentemperatur.



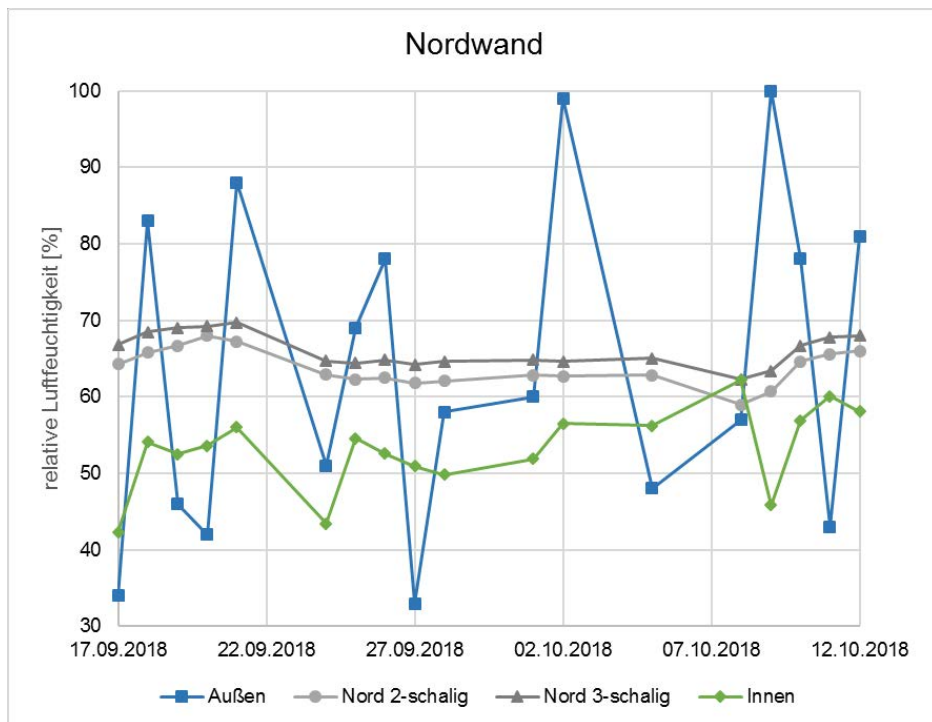


Abbildung 3-13: Feuchte-Monitoring: Auswertung für Südwand (oben) und Nordwand (unten) für den Zeitraum vom 17.09.18 – 12.10.18.

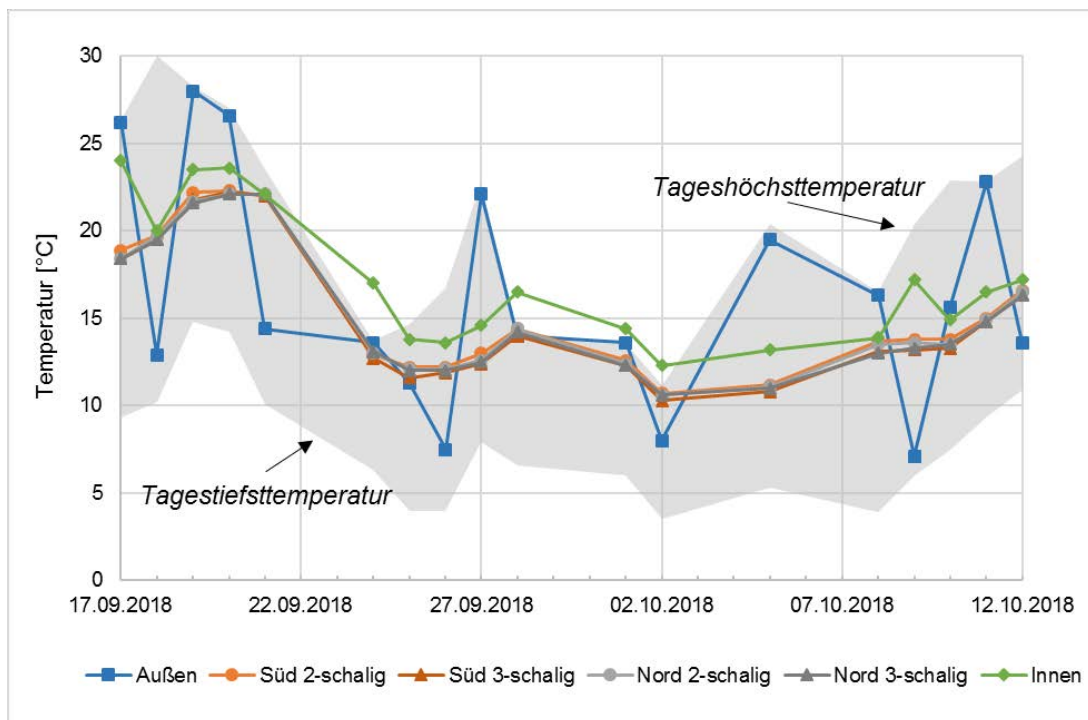


Abbildung 3-14: Feuchte-Monitoring: Auswertung für Südwand (oben) und Nordwand (unten) für den Zeitraum vom 17.09.18 – 12.10.18.

VIERTER TEIL

Prof. Dr.-Ing. Armin Just (EBZ Business School GmbH)

David Reichenbacher, M.Sc. (EBZ Business School GmbH)

Lebenszyklusanalyse

Im Rahmen des durch die Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ geförderten Forschungsprojektes „Wandelemente aus UHPC-Schaumbeton-Hybrid-Fertigteilen“ sollen multifunktionelle mineralische Wandelemente aus UHPC-Schaumbeton-Hybriden für die modulare Fertigbauweise für den Einsatz im städtischen Wohnungsbau entwickeln werden.

Eine derartige Konstruktion aus Hybrid-Fertigteilen muss sich auf dem Markt gegen bewährte konventionelle Bauweisen funktional und wirtschaftlich durchsetzen können. Ein möglichst objektiver ökonomischer Vergleich verschiedener Wandkonstruktionen kann dabei nur unter Einbeziehung aller damit in unmittelbarem Zusammenhang anfallenden Kosten im Laufe des gesamten Lebenszyklus der Wand oder des Gebäudes erfolgen. Alleine die Betrachtung der Erst-Investitionskosten zur Erstellung einer tragenden Außenwandkonstruktion ist unzureichend, da sich im Laufe des Lebenszyklus grundsätzlich für jede Baukonstruktion weitere Kosten ergeben, beispielsweise für Instandsetzungen. Ebenso wie die Neubauinvestitionen unterscheiden sich diese Kosten für unterschiedliche Konstruktionen teilweise erheblich voneinander und können die Erst-Investitionskosten gar übersteigen. Unter Einhaltung der energiesparrechtlichen Anforderungen haben zudem die wärmedämmenden Eigenschaften der Baukonstruktion einen signifikanten Einfluss auf die Bauteildimensionierung (Wanddicke) und somit auf die werkseitigen Fertigteilkosten.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wird daher zunächst eine rechnerische Bauteildimensionierung vorgenommen, um darauf basierend die werkseitigen Fertigteilkosten abzuschätzen. Unter Einbeziehung weiterer bauteilbezogener Kosten wird abschließend eine Lebenszykluskostenanalyse für die gesamte Außenwand vorgenommen und mit konventionellen Außenwandkonstruktionen verglichen.

Bauteildimensionierung unter Einhaltung energiesparrechtlicher Anforderungen

Einzuhaltende Wärmedurchgangskoeffizienten

In der aktuellen Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) ist der Höchstwert des Jahres-Primärenergiebedarfs für zu errichtende Wohngebäude und Nichtwohngebäude geregelt. Er darf für Neubauvorhaben das 0,75-fache des Primärenergiebedarfs des Referenzgebäudes (fiktives Gebäude gleicher Kubatur und vorgegebener Anlagentechnik) nicht überschreiten. Für Wohngebäude ist zudem der Höchstwert des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen, Transmissionswärmeverlusts begrenzt. Bei Nichtwohngebäuden sind die zulässigen Höchstwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten der verschiedenen Bauteile vorgegeben. (vgl. Bundesgesetzblatt 2013)

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden zur Dimensionierung des Hybrid-Fertigteils und für die Vergleichsberechnungen mit konventionellen Außenwandkonstruktionen alle Wärmedurchgangskoeffizienten einheitlich mit

dem 0,75-fachen des Wärmedurchgangskoeffizienten für das Referenzgebäude bestimmt, bei sonst identischer Anlagentechnik. **Tab. 4-1** enthält die für das Referenzgebäude rechnerisch zu verwendenden Wärmedurchgangskoeffizienten für Außen- und Kellerwände sowie die um 25% reduzierten Wärmedurchgangskoeffizienten für Wohngebäude und Nichtwohngebäude (Heizfall über 19°C Raum-Solltemperatur).

Tab. 4-1: Um 25 % reduzierte Wärmedurchgangskoeffizienten gegenüber des Referenzgebäudes

Bauteil	Wärmedurchgangskoeffizient $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$	
	Referenzgebäude	gewählter Wert (75 % des Referenzwertes)
Außenwand	0,28	0,21
Kellerwand	0,35	0,263

Quelle: Bundesgesetzblatt 2013, eigene Berechnungen

Aufgrund der im Vergleich zu Kellerwänden höheren Anforderungen an Außenwände werden im Folgenden zunächst alle technischen und ökonomischen Berechnungen des Hybrid-Fertigteils bzw. der entsprechenden gesamten Außenwandkonstruktion für den Einsatz als Außenwand vorgenommen.

Erforderliche Bauteildicken

Bei gegebenem Wärmedurchgangskoeffizienten des Hybrid-Fertigteils und gegebener Dicke sowie Wärmeleitfähigkeit der UHPC-Schalen ist die erforderliche Gesamtbau-teildicke abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des CLMS und der Anzahl der UHPC-Schalen. Wobei der UHPC aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit und der geringen Dicke von 15 mm je Schale keinen nennenswerten Beitrag an der Wärmedämmung des Fertigteils hat.

Der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des Hybrid-Fertigteils R_{Hybrid} setzt sich zusammen aus:

$$R_{\text{Hybrid}} = R_{\text{si}} + R_{\text{CLMS}} + R_{\text{UHPC}} + R_{\text{se}}$$

R_i = Wärmedurchgangswiderstand der Schicht

R_{si} = innerer Wärmeübergangswiderstand (0,13 für Außenwände, horizontal)

R_{se} = äußerer Wärmeübergangswiderstand (0,04 für Außenwände, horizontal)

Der zu erreichende Wärmedurchlasswiderstand der CLMS-Schicht R_{CLMS} ergibt sich demnach zu:

$$R_{\text{CLMS}} = R_{\text{Hybrid}} - R_{\text{UHPC}} - R_{\text{si}} - R_{\text{se}}$$

Mit

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad \lambda = \text{Wärmeleitfähigkeit, } d = \text{Dicke der Schicht}$$

$$R = \frac{1}{U} \quad U = \text{Wärmedurchgangskoeffizient}$$

folgt:

$$\frac{d_{\text{CLMS}}}{\lambda_{\text{CLMS}}} = \frac{1}{U_{\text{Hybrid}}} - \frac{d_{\text{UHPC}}}{\lambda_{\text{UHPC}}} - R_{\text{si}} - R_{\text{se}}$$

Die erforderliche Dicke der CLMS-Schicht d_{CLMS} berechnet sich dann zu:

$$d_{\text{CLMS}} = \left(\frac{1}{U_{\text{Hybrid}}} - \frac{d_{\text{UHPC}}}{\lambda_{\text{UHPC}}} - R_{\text{se}} - R_{\text{si}} \right) \cdot \lambda_{\text{CLMS}}$$

Für eine dreischalige Hybrid-Fertigteil-Konstruktion mit zwei Außenschalen aus UHPC sowie einer Dicke von 1,5 cm (0,015 m) je UHPC-Schicht ist $d_{\text{UHPC}} = 0,03 \text{ m}$. Die Wärmeleitfähigkeit des UHPC beträgt $1,56 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$, die des CLMS $0,1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$.

Somit ergibt sich für das Hybrid-Fertigteil als Außenwandelement unter Einhaltung der EnEV ($U_{\text{Hybrid}} = 0,21 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$) die erforderliche Dicke der CLMS-Schicht zu:

$$d_{\text{CLMS}} = \left(\frac{1}{0,21 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} - \frac{0,03 \text{ m}}{1,56 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} - 0,13 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} - 0,04 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right) \cdot 0,1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$d_{\text{CLMS}} = 0,46 \text{ m}$$

Die erforderliche Gesamtbauteildicke d_{Hybrid} ist dann:

$$d_{\text{Hybrid}} = d_{\text{CLMS}} + N_{\text{UHPC}} \cdot d_{\text{UHPC}}$$

$$N_{\text{UHPC}} = \text{Anzahl UHPC – Schalen}$$

$$d_{\text{Hybrid}} = 0,457 \text{ m} + 2 \cdot 0,015 \text{ m}$$

$$d_{\text{Hybrid}} = 0,49 \text{ m}$$

Für ein Hybrid-Fertigteil mit einer Wärmeleitfähigkeit des CLMS von $0,1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ ergibt sich somit eine rechnerische Dicke der CLMS-Schicht von rund 46 cm und eine Gesamtbauteildicke von 49 cm für einen dreischichtigen Aufbau mit zwei UHPC-Schalen. In Abb. 4-1 ist die erforderliche Dicke der CLMS-Schicht in Abhängigkeit von der erreichten Wärmeleitfähigkeit des CLMS für den Einsatz als Außenwand sowie als Kellerwand ($R_{\text{se}} = 0$) aufgetragen.

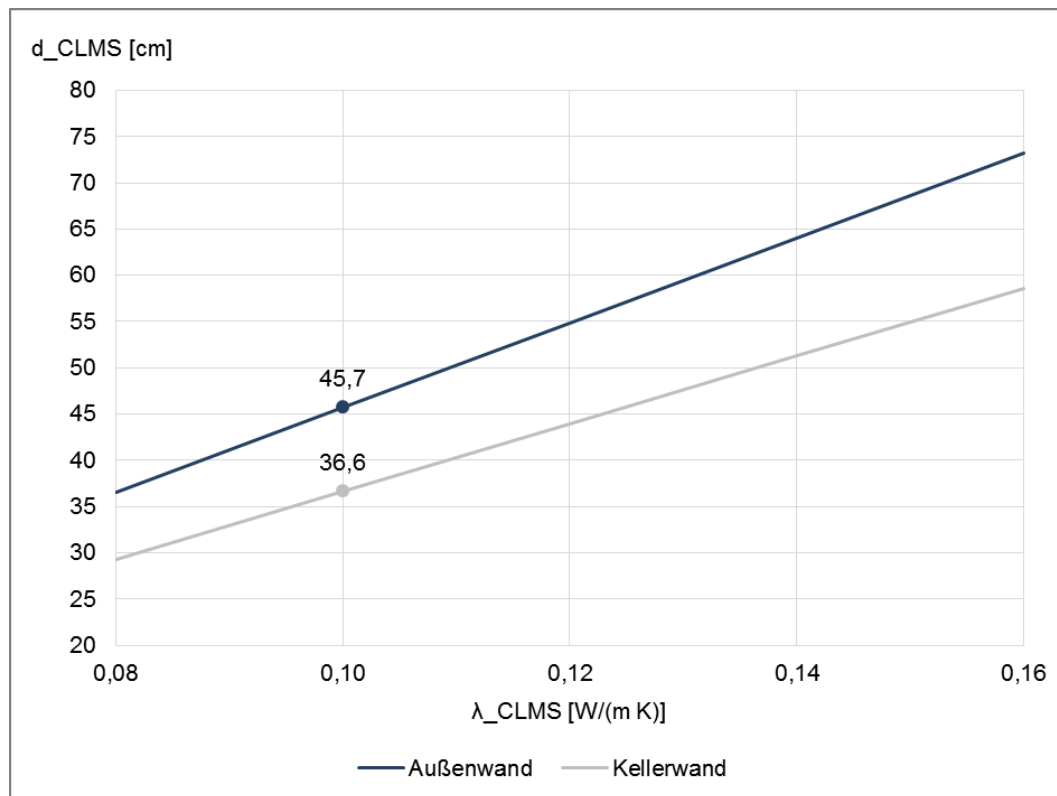


Abb. 4-1: Erforderliche Dicke der CLMS-Schicht in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit. Quelle: Eigene Berechnungen

Abschätzung der Erstellungskosten

Zur Abschätzung der flächenbezogenen Kosten $\left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2_{\text{Wand}}} \right]$ zur Erstellung von Außenwänden (im Folgenden Erstellungskosten) aus Hybrid-Fertigteilen werden Stoffkosten, Herstellungskosten, Logistikkosten, Montagekosten, Gerüstkosten sowie Baunebenkosten in Ansatz gebracht.

Untersuchte Bauteilvarianten

Beton-Fertigteile sind auf dem Markt in unterschiedlichen Bauteildimensionen (Höhe, Länge, Dicke) sowie mit verschiedenen Oberflächen verfügbar. Zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Hybrid-Fertigteil-Konstruktion im Vergleich zu konventionellen Außenwandkonstruktionen (vgl. Konventionelle Außenwandkonstruktionen) wird die Schätzung der Erstellungskosten ebenfalls für verschiedene mögliche Bauteilvarianten vorgenommen. Bei einer gegebenen Fertigteil-Höhe von 3,00 m werden in den Berechnungen drei unterschiedliche Fertigteil-Längen und zudem Varianten mit zwei und nur einer UHPC-Schale abgebildet. Ziel ist es, eine realistische Bandbreite der Erstellungskosten in Abhängigkeit konstruktiver Kostentreiber aufzuzeigen. Diese sind in kürzeren Montagezeiten (inkl. Aufbringung des Fugenbandes) bei größerer Fertigteil-Länge zu sehen sowie einem hohen Anteil der Kosten je UHPC-Schale an den Gesamtkosten. Es ergeben sich so insgesamt die in Tab. 4-2 sechs aufgeführten Fertigteilvarianten.

Tab. 4-2: Varianten des Hybrid-Fertigteils und resultierende Fugenanteile

Fertigteil-Höhe	Fertigteil-Länge	Fertigteil-Fläche	Fugenanteil (ohne unterste/ oberste Geschossdecke)	Anzahl UHPC-Schichten
3 m	0,75 m	2,25 m ²	$1,67 \frac{m_{\text{Fuge}}}{m^2 \text{ Fertigteil}}$	1
				2
	1,50 m	4,5 m ²	$1,00 \frac{m_{\text{Fuge}}}{m^2 \text{ Fertigteil}}$	1
				2
	2,25 m	6,75 m ²	$0,78 \frac{m_{\text{Fuge}}}{m^2 \text{ Fertigteil}}$	1
				2

Quelle: Eigene Berechnungen

Da die Kosten zur Aufbringung des Fugenbandes bei Beton-Fertigteilen den weitaus größten Anteil an den gesamten Lohnkosten ausmachen und zudem nach ihrer Nutzungsdauer erneuert werden müssen, kommt dem Fugenanteil und somit der Fertigteil-Länge eine hohe Bedeutung zu. Abb. 4-2 zeigt grafisch den Fugenanteil je m² Fertigteil-Fläche in Abhängigkeit von der Fertigteil-Länge. Es wird deutlich, dass aufgrund des nichtlinearen Zusammenhangs eine Verdopplung der Fertigteil-Länge von 0,75 m auf 1,50 m eine Verringerung des Fugenanteils, und somit auch der Kosten für das Aufbringen der Fugenbänder, um 40 % bewirkt (Fugenanteil 1,67 zu 1,00), wohingegen eine weitere Verlängerung des Fertigteils von 1,50 m auf 2,25 m den Fugenanteil lediglich um 20 % verringert.

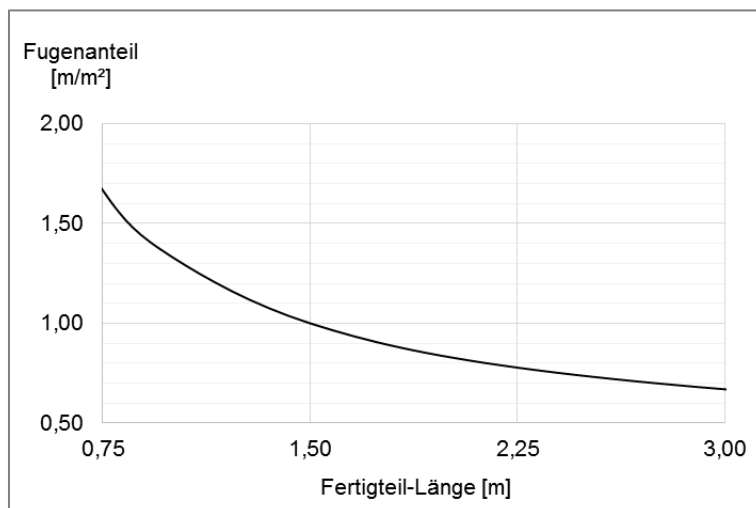


Abb. 4-2: Fugenanteil des Hybrid-Fertigteils in Abhängigkeit von der Fertigteil-Breite. Quelle: Eigene Berechnungen

Weitere fixe Rechenparameter für alle Varianten sind:

Schichtdicke CLMS	46 cm
Schichtdicke UHPC (je Schicht)	1,5 cm
Wärmedurchgangskoeffizient Fertigteil	$0,21 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$
Dichte CLMS	$0,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$
Dichte UHPC	$1,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$

Angesetzte Parameter und Kosten

Zur Abschätzung der Erstellungskosten werden die in Tab. 4-3 aufgeführten Stoffkosten, Herstellungskosten sowie weitere Kostensätze und Randbedingungen definiert.

Tab. 4-3: Kostenansätze zur Berechnung der Erstellungskosten des Hybrid-Fertigteils.

Kostenart	Angesetzte Kosten	Quelle
Stoffkosten CLMS	$158 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$	Angaben Hentschke Bau GmbH
Stoffkosten UHPC	$310 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$	Angaben Hentschke Bau GmbH
Herstellungskosten CLMS	$190 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$	Eigene Schätzung und Marktrecherche
Herstellungskosten UHPC (je m ²)	$80 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$	Eigene Schätzung und Marktrecherche
Anzahl Arbeitskräfte zur Montage	3	Eigene Schätzung
Arbeitslohn	$45 \frac{\text{€}}{\text{h}}$	Eigene Schätzung
Logistikkosten (Werk – Baustelle)	$15 \frac{\text{€}}{\text{t}}$	Eigene Schätzung und Marktrecherche
Fugenband aufbringen	$45 \frac{\text{€}}{\text{m}}$	Schmitz et al. 2018 a

Die Arbeitszeit für die Montage wird aufgrund fehlender Literaturwerte auf Basis von Herstellerangaben vergleichbarer Fertigteile aus Porenbeton je nach Fertigteil-Länge, wie in Tab. 4-4 aufgeführt, angesetzt.

Tab. 4-4: Angesetzte Montagezeiten des Hybrid-Fertigteils.

Fertigteil-Länge	Montagezeit
0,75 m	$0,12 \frac{\text{h}}{\text{m}^2}$
1,50 m	$0,09 \frac{\text{h}}{\text{m}^2}$
2,25 m	$0,06 \frac{\text{h}}{\text{m}^2}$

Quelle: Eigene Schätzung und Marktrecherche

Bauteil-Kostenkennwert des Hybrid-Fertigteils

Der Erstellungskostenkennwert für das Hybrid-Fertigteil sowie die darin enthaltenen Kostenanteile berechnen sich für die sechs Bauteilvarianten zu den in Tab. 4-5 aufgeführten Kostenkennwerten.

Tab. 4-5: Ergebnisse der Berechnung des Bauteil-Kostenkennwertes des Hybrid-Fertigteils.

Höhe	m	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Länge	m	2,25	1,50	0,75	2,25	1,50	0,75
Fläche	m ²	6,8	4,5	2,3	6,8	4,5	2,3
Anzahl Schichten UHPC		1	1	1	2	2	2
Gesamtstärke	cm	47,5	47,5	47,5	49,0	49,0	49,0
Volumen	m ³	3,2	2,1	1,1	3,3	2,2	1,1
Masse	t	1,8	1,2	0,6	2,1	1,4	0,7
Kostenanteil für CLMS (Stoffkosten, Herstellungskosten)	€/m ²	160,1	160,1	160,1	160,1	160,1	160,1
Kostenanteil für UHPC (Stoffkosten, Herstellungskosten)	€/m ²	84,7	84,7	84,7	169,3	169,3	169,3
Montagekosten	€/m ²	43,1	57,2	91,2	43,1	57,2	91,2
Logistikkosten (Werk - Baustelle)	€/m ²	4,0	4,0	4,0	4,6	4,6	4,6
Erstellungskostenkennwert nach DIN 276, KG 331 (Tragende Außenwände)	€/m²	292	306	340	372	391	425

Quelle: Eigene Berechnungen

Lebenszykluskostenanalyse

Die Ermittlung der Lebenszykluskosten (LzK) dient einer phasenübergreifenden Kostenanalyse, beispielsweise von Gebäuden, Bauteilen oder Anlagen und soll somit nicht nur die Investitionskosten, sondern auch alle weiteren Kosten im Verlauf eines gewählten Betrachtungszeitraums berücksichtigen. Für tragende Außenwände sind dies neben den Investitionskosten insbesondere Kosten für Instandsetzung und Modernisierung sowie Rückbau und Entsorgung. Der gesamte Lebenszyklus eines Gebäudes beträgt zumeist deutlich mehr als 50 Jahre. Je länger der Betrachtungszeitraum gewählt wird, desto ungenauer sind jedoch Prognosen, beispielsweise hinsichtlich Markt- und Preisentwicklungen oder des technischen Fortschritts. Zu kurze Zeiträume hingegen können dazu führen, dass

Investitionen unvorteilhaft erscheinen, deren Vorteile sich gegenüber anderen Investitionsalternativen erst nach längerer Zeit zeigen würden.

Konventionelle Außenwandkonstruktionen

Im Geschosswohnungsbau finden sich heute diverse Außenwandkonstruktionen, die sich hinsichtlich Erstellung, Instandhaltung, Material, Optik und Statik teilweise erheblich unterscheiden. Die zu entwickelnde Hybrid-Fertigteilkonstruktion soll hinsichtlich der über den Lebenszyklus zu erwartenden Kosten typischen konventionellen Außenwandkonstruktionen aus einer möglichst großen LzK-Spanne gegenübergestellt werden:

1. Monolithisch: Porenbeton-Planelemente $d=36,5$ cm
2. Monolithisch: Porenziegel-Lochsteine $d=36,5$ cm
3. Einschalig: Kalksandstein-Mauerwerk $d=24$ cm, WDVS (PS)
4. Zweischalig hinterlüftet: Kalksandstein-Mauerwerk $d=24$ cm, Mineralfaserdämmung, Verblendmauerwerk
5. zweischalig hinterlüftet: Ortbeton $d=24$ cm, Mineralfaserdämmung, Verblendmauer

Instandsetzungsmaßnahmen und -Kosten

Für die Instandsetzung der Außenwandbeschichtung (Fassadenfarbe) der monolithischen und einschaligen Außenwandkonstruktionen wird vereinfacht ein Instandhaltungsintervall von 20 Jahren angesetzt sowie ein Intervall von 40 Jahren für die Erneuerung des Außen- und Innenputzes.

Bei den hinterlüfteten Konstruktion werden nach 40 Jahren eine Reinigung, Sichtverfugung und Imprägnierung des Verblendmauerwerks in Ansatz gebracht sowie die Erneuerung des Innenputzes. Anerkannte Richtwerte für Nutzungsdauern von Bauteilen finden sich beispielsweise in BKI Bauelemente Neubau (vgl. BKI 2016) oder den Nutzungsdauertabellen des BNB (vgl. Website nachhaltigesbauen).

Für die zu entwickelnde Hybrid-Fertigteilkonstruktion ist nach etwa 40 Jahren mit einer Erneuerung des Fugenbandes zu rechnen. Aufgrund der hohen Oberflächengüte sowohl der Innen- als auch Außenseite der Wände ist kein Putz oder Farbanstrich vorgesehen. Die für die nachfolgenden Berechnungen angesetzten Kostenkennwerte können den Tabellen der Anlage dieses Berichts entnommen werden.

Vergleich der Lebenszykluskosten

Im Rahmen der Lebenszykluskosten-Berechnung (LzK-Berechnung) wird ein Betrachtungszeitraum von 40 Jahren gewählt, da nach diesem Zeitraum von wesentlichen Ersatzinvestitionen ausgegangen werden kann, die neben den Investitionskosten einen entscheidenden Einfluss auf die gesamten LzK haben können.

Auf eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus tragender Außenwandkonstruktionen von ca. 100 Jahren wird hier bewusst verzichtet. Die Unsicherheiten bezüglich prognostizierter Randbedingungen wie z. B. Zins- und Lohnkostenentwicklungen würden die Aussagefähigkeit und Validität der Berechnungen signifikant verringern.

Aufgrund des hier gewählten Zeitraumes empfiehlt sich die Anwendung einer dynamischen Berechnungsmethode, welche den Zeitwert des Geldes abbildet. Da beim Vergleich der hier betrachteten Außenwandkonstruktionen ein

einheitlicher Betrachtungszeitraum von 40 Jahren gewählt werden kann, liefert der Kapitalwert (Kapitalwertmethode) eine geeignete Kennzahl für die LzK. Der Kapitalwert der Lebenszykluskosten berechnet sich allgemein zu (vgl. GEFMA 2010):

$$K = I + \sum_{t=0}^n Z \cdot (1 + i)^{-n} + R \cdot (1 + i)^{-n}$$

mit

K = Kapitalwert (hier der LzK)

I = Investitionskosten

Z = Zahlungsdifferenz der jährlichen Ein – und Auszahlungen

i = Kalkulationszinssatz

n = Anzahl der Jahre des Betrachtungszeitraums

R = Restwert

Bei der Berechnung der LzK von Außenwandkonstruktionen können die Ein- und Auszahlungen auf die Auszahlungen für Instandsetzungen und Ersatzinvestitionen eingegrenzt werden. Da hier am Ende des Betrachtungszeitraums (40 Jahre) nicht von einem Rückbau sondern einer Ersatzinvestitionen ausgegangen wird, entfällt zusätzlich der rechnerische Anteil für den Restwert. Der Kalkulationszinssatz i wird mit 4,5 % in Ansatz gebracht. Zudem wird eine jährliche Verteuerung der Baupreise für Wohngebäude von 2 % unterstellt.

Tab. 4-6: Investitionskosten und dynamische LzK der untersuchten Außenwandkonstruktionen.

Bezeichnung	Investition Neubau [$\frac{\text{€}}{\text{m}^2}$]	Lebenszykluskosten (LzK) [$\frac{\text{€}}{\text{m}^2}$]
monolithisch - Porenbeton	245	337
monolithisch - Ziegel	278	370
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/2,25	352	375
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/1,50	369	396
einschalig - KS, WDVS	298	416
zweischalig hinterlüftet - KS, MW, Klinker	378	441
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/0,75	408	449
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/2,25	450	473
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/1,5	467	494
zweischalig hinterlüftet - Ortbeton, MW, Klinker	463	526
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/0,75	506	547

Quelle: BKI 2016, Schmitz et al. 2018 a, Schmitz et al. 2018 b, eigene Marktrecherchen

Tab. 4-6 beinhaltet die errechneten Investitionskosten (Neubau) für alle untersuchten Außenwandkonstruktionen sowie die dynamischen LzK. Die LzK enthalten bereits Kosten für Arbeitsgerüste sowie pauschal in Ansatz gebrachte Baunebenkosten von 15 % für Neubau und 20 % für Instandsetzung.

In Abb. 4-3 ist neben den dynamischen LzK der konventionellen Außenwandkonstruktionen die Bandbreite der LzK des Hybrid-Fertigteils auf Basis der sechs berechneten Bauteilvarianten aufgetragen (unter Angabe der Anzahl UHPC-Schichten und der Fertigteil-Breite in Metern, bspw. 2/0,75). Jeder Sprung in den LzK-Kurven repräsentiert hierbei die Kapitalkosten der Investitionen im entsprechenden Jahr des Betrachtungszeitraums von 40 Jahren. Zusätzlich zu den Varianten des Hybrid-Fertigteils mit dem niedrigsten und höchsten LzK ist die günstigste Variante mit nur einer UHPC-Schale abgebildet.

Kodierung der Bezeichnungen der UHPC-CLMS-Hybrid-Fertigteile:
Anzahl der UHPC-Schalen/Länge des Fertigteils in m

Bei Betrachtung der kumulierten LzK gegenüber der Erst-Investitionen für den Neubau in Abb. 4-3 fällt zunächst der Kostensprung für Außenwandkonstruktionen mit Außenputz- und Farbe nach 20 Jahren auf, welche zu diesem Zeitpunkt einer ersten Instandsetzung unterliegen. Des Weiteren ist insbesondere der allgemein geringe Kostenanteil für Instandsetzungen des Hybrid-Fertigteils auffällig, wodurch diese Konstruktion trotz der vergleichsweise hohen Erst-Investitionskosten über den Lebenszyklus gesehen an Wirtschaftlichkeit gewinnt. Hierbei wird auch der Einfluss der Fertigteil-Länge auf die LzK deutlich, da diese die Montagezeiten und den Fugenanteil je m² Wandfläche und somit sowohl die Kosten der Erst-Investition als auch der Instandsetzung beeinflussen (Höhe des Kostensprungs im Jahr 40 des LzK-Diagramms). Einen Einfluss auf die LzK hat zudem die Anzahl der UHPC-Schalen des Hybrid-Fertigteils. So liegen die LzK einer Fertigteil-Bauweise mit nur einer UHPC-Schale selbst bei geringer Fertigteil-Länge im Kostenbereich der in der Praxis häufig angewendeten Konstruktionen aus Kalksandstein, während die Verwendung einer zweiten UHPC-Schale auch bei großer Fertigteil-Länge zu deutlich höheren LzK führt.

Zu berücksichtigen ist auch der Einfluss des gewählten Kalkulationszinssatzes und der Preissteigerungsrate auf die LzK. Je später der Zeitpunkt einer Investition (Instandsetzung) liegt, desto stärker werden die damit verbundenen (dynamischen) Kapitalkosten beeinflusst. Bei geringem Kalkulationszinssatz und hoher Preissteigerungsrate steigt über den Lebenszyklus gesehen die Wirtschaftlichkeit von Außenwandkonstruktionen, dessen Großteil der Kapitalkosten zu einem frühen Zeitpunkt (Neubau) anfallen. Abb. 4 zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse innerhalb realistischer Bandbreiten beider Parameter auf die LzK. Insbesondere die Preissteigerungsrate unterlag in der Vergangenheit starken Schwankungen und beeinflusst die LzK in hohem Maße. Bei Betrachtung der LzK-Diagramme wird deutlich, dass die Hybrid-Fertigteil-Konstruktion gegenüber den konventionellen Außenwandkonstruktionen bei hoher Preissteigerungsrate deutlich an Wirtschaftlichkeit gewinnt, da der Großteil der Kapitalkosten bereits bei der Erst-Investition (Neubau) anfällt und im weiteren Lebenszyklus nur geringe Instandsetzungskosten entstehen.

Kalkulationszinssatz	↓ 4,0 %	Kalkulationszinssatz	4,5 %	Kalkulationszinssatz	↑ 5,0 %
Preissteigerungsrate	↑ 3,0 %	Preissteigerungsrate	2,0 %	Preissteigerungsrate	↓ 1,0 %

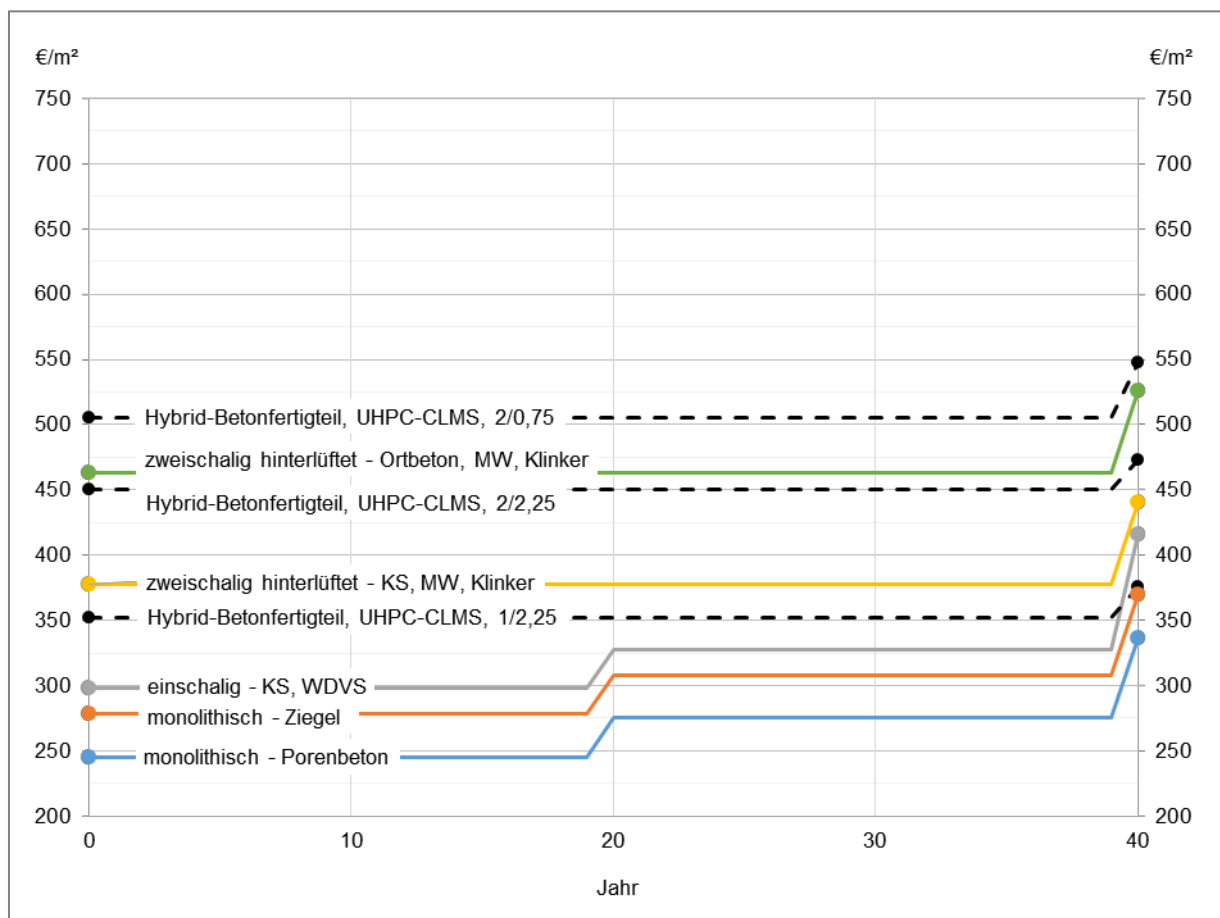


Abb. 4-3: Darstellung der dynamischen kumulierten LzK verschiedener Außenwandkonstruktionen. Quelle: Eigene Berechnungen

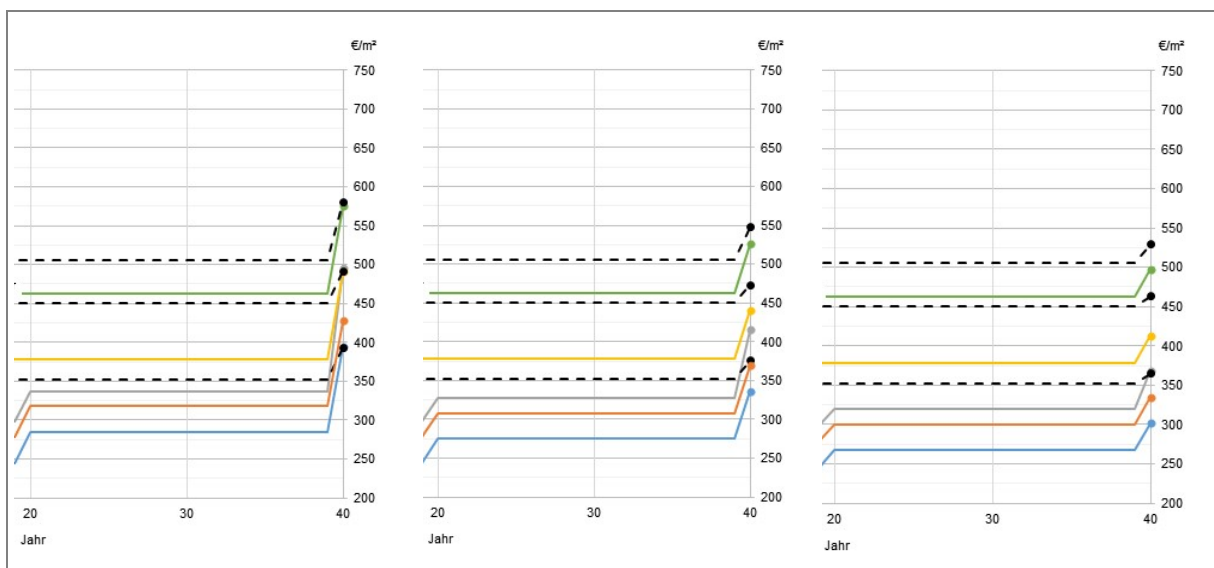


Abb. 4: Einflusses von Kalkulationszinssatz und Preissteigerungsrate auf die LzK. Quelle: Eigene Berechnungen

Fazit und Zusammenfassung

Die Lebenszykluskostenanalyse verschiedener Varianten des UHPC-Schaumbeton-Hybrid-Fertigteils sowie konventioneller Außenwandkonstruktionen zeigt, dass ein wirtschaftlicher Einsatz der neu entwickelten Fertigteil-Konstruktion möglich ist. Eine Beeinflussung der gesamten, über die Nutzungsdauer betrachteten, Kosten ist im Rahmen der konstruktiven Ausgestaltung zum einen in der Anzahl der UHPC-Schichten zu sehen, da diese einen hohen Anteil der werkseitigen Kosten ausmachen. Weiterhin zeigt sich, dass die Dimensionierung der Fertigteil-Länge ein wesentliches Potenzial zur Kostenreduzierung darstellt, da bei größerer Länge sowohl die Montagekosten als auch die Kosten zur Erneuerung der Fugenbänder sinken.

Die Hybrid-Fertigteil-Konstruktion ist gegenüber anderen Außenwandkonstruktionen vor allem durch verhältnismäßig hohe Erst-Investitionskosten sowie sehr niedrige Instandsetzungskosten und lange Nutzungsdauern gekennzeichnet. Der Einsatz ist somit bei langfristig niedrigem Zinsniveau und stark steigenden Baupreisen gegenüber anderen Konstruktionen umso wirtschaftlicher. Gleichzeitig ist damit das Risiko der naturgemäß schwer abschätzbaren Instandsetzungskosten im Laufe des gesamten Gebäude-Lebenszyklus geringer, was dem Bauherrn mehr kalkulatorische Sicherheit bietet.

Insgesamt ist eine Fertigteil-Länge von 0,75 m wirtschaftlich gesehen als kritisch zu bewerten und es sollten Längen ab ca. 1,5 m bevorzugt werden. Die Anzahl der UHPC Schichten hat zwar einen starken Einfluss auf die Kosten, dennoch kann ein wirtschaftlicher Einsatz auch von 2 UHPC-Schalen vermutet werden, insbesondere bei einer Fertigteil-Breite über 2 m.

Da sich die Hybrid-Fertigteil-Konstruktion nach den hier vorgenommenen Kostenschätzungen im mittleren bis hohen Preissegment einordnen lässt, ist davon auszugehen, dass sich die neuen Fertigteile als Außenwand insbesondere dann bei Investitionsentscheidungen durchsetzen können, wenn die spezifischen Vorteile der Konstruktion ausgenutzt werden können. Diese sind unter anderem in einem geringen Instandsetzungs- und Reinigungsaufwand während des gesamten Lebenszyklus, der monolithischen und somit auch nachhaltigen Bauweise und der hohen mechanischen Widerstandsfähigkeit aufgrund der UHPC-Schalen zu sehen.

Der hier untersuchte Betrachtungszeitraum endet nach 40 Jahren. Nach dieser Zeitspanne ist der Lebenszyklus einer tragenden Außenwandkonstruktion für gewöhnlich noch nicht beendet. Eine Erweiterung des Betrachtungszeitraums würde die Lebenszykluskosten der UHPC-CLMS-Elemente mit einer Länge $\geq 1,50$ m im Vergleich zu den anderen verglichenen Konstruktionen positiv beeinflussen. Die geringen Folgekosten im Vergleich zu den zum Teil höheren Erstellungskosten würden bewirken, dass sich für die UHPC-CLMS-Elemente ein vergleichsweise niedriger Kapitalwert entwickeln würde. Da die Aussagefähigkeit von LzK-Berechnungen mit steigendem Betrachtungszeitraum sinkt, wurde hier jedoch bewusst auf eine Quantifizierung der Kosten für den Bereich > 40 Jahre verzichtet.

Literaturverzeichnis

BKI 2016 BKI Baukosteninformationszentrum (2016): Baukosten Bauelemente
Neubau 2016. Stuttgart

- | | |
|------------------------|--|
| Bundesgesetzblatt 2013 | EnEV - Bundesgesetzblatt (2013): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung), zuletzt geändert durch die zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18.11.2013. Bundesanzeiger Verlag. Köln |
| GEFMA 2010 | GEFMA Deutscher Verband für Facility Management e.V. (2010): GEFMA-Richtlinie 220-1 Lebenszykluskosten-Ermittlung im FM. Einführung und Grundlagen. Bonn |
| Schmitz et al. 2018 a | Schmitz, Heinz; Krings, Edgar; Dahlhaus, Ulrich J.; Meisel, Ulli (2018): Baukosten 2018. Instandsetzung, Sanierung, Modernisierung, Umnutzung. Essen |
| Schmitz et al. 2018 b | Schmitz, Heinz; Krings, Edgar; Dahlhaus, Ulrich J.; Meisel, Ulli (2018): Baukosten 2018. Bauen von Ein- und Mehrfamilienhäusern. Essen |

Internetseiten

- | | |
|----------------------------|--|
| Website nachhaltiges-bauen | BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.xls, (letzter Zugriff: 20.02.2018) |
|----------------------------|--|

Anhang

Übersicht der Neubau- und Instandsetzungsmaßnahmen

Alle Kosten in €/m²-Bauteilfläche, per Preisindex bezogen auf 2018 Q 1

EINr	Art	Maßnahme_kurz	Maßnahme_lang	Quelle	Kosten
1	neu	WDVS, komplett	WDVS, PS, 120-140 mm, Armierung, Oberputz, Beschichtung	BKI 2016	104
2	neu	Tragende Außenwand monolithisch, Gasbeton-Blocksteine, 36,5 cm	Gasbeton-Blocksteine, D = 36,5 cm, Dämm-Mörtel	Schmitz et al. 2018 b	143
3	neu	Gerüst	Arbeits- und Schutzgerüst als Stand- und Fassadengerüst aus Stahlrohren im Umfang aufstellen, über die gesamte bauzeit vorhalten und abbauen (€/m² Gerüstfläche)	BKI 2016	15
4	neu	Außenputz und Beschichtung f. monol. Außenwand, Neubau	Außenputz, zweilagig, als Zementputz mit Beschichtung, Schutzschienen	BKI 2016	56
5	neu	Tragende Außenwand monolithisch, Porenziegel-Lochsteine, 36,5 cm	Porenziegel-Lochsteine, D = 36,5 cm, Dämm-Mörtel	Schmitz et al. 2018 b	147
6	neu	Tragende Außenwand, KS, 24 cm	Kalksandstein-Mauerwerk, d=24 cm, Mörtelgruppe II	BKI 2016	93
7	neu	Verblendmauerwerk hinterlüftet + Dämmung MW	Bekleidung mit Verblendmauerwerk, Luftschicht, Drahtanker, Mineralfaserdämmung, Fugenglattstrich	BKI 2016	198
8	neu	Tragende Außenwand, Ortbeton, 24 cm	Betonwände, Ortbeton, d = 24 cm, Schalung, Bewehrung, Aussparungen	BKI 2016	166
9	neu	Innenwandputz	Innenwandputz, zweilagig, Eckschutzschienen, Untergrundvorbehandlung	BKI 2016	24
10	inst	Außenwandfarbe	einfacher Anstrich auf Altputz, gestrichen; incl. notwendiger Vorarbeiten wie Reinigung, Abdeckung, Über-spannungen kleinerer Risse	Schmitz et al. 2018 a	26

EINr	Art	Maßnahme_kurz	Maßnahme_lang	Quelle	Kosten
11	inst	WDVS, komplett	WDVS, PS-Hartschaum; incl. notwendiger Vorarbeiten, ca. 14-18 cm Wärmedämmung, amiertem Kunstharz-/ Mineralputz und Randabschlussprofilen	Schmitz et al. 2018 a	117
12	inst	Gerüst	Arbeits- und Schutzgerüst als Stand- und Fassadengerüst aus Stahlrohren im Umfang aufstellen, über die gesamte bauzeit vorhalten und abbauen (€/m² Gerüstfläche)	BKI 2016	15
13	inst	WDVS abbrechen	WDVS-PS rückbauen; mit Putz abbrechen und entsorgen. Dämmstoff von Bauschutt getrennt entsorgen	Marktrecherche, eigene Schätzung	20
14	inst	Putz abbrechen und neu aufbringen	Kalkzementputz aufbringen, Altputz abschlagen; Putze auf altem Untergrund aufbringen, incl. notwendiger Vorarbeiten wie Reinigen mit Heißdampf, Fugen auskratzen, Vorschlämmen und Spritzbewurf	Schmitz et al. 2018 a	59
15	inst	Außenwandfarbe	einfacher Anstrich auf Neuputz/Ziegeln; incl. notwendiger Vorarbeiten wie Reinigung, Abdeckung, Überspannungen kleinerer Risse	Schmitz et al. 2018 a	19
16	inst	Sichtverfugung Ziegelmauerwerk	Sichtverfugung von Ziegelmauerwerk, incl. Auskratzen der Fugen min 3 cm tief, incl. evtl. erforderlicher dauerelastischer Verfugung	Schmitz et al. 2018 a	60
17	inst	Außenwand reinigen	Wand abwaschen, incl. notwendiger Vorarbeiten	Schmitz et al. 2018 a	7
18	inst	Außenwand imprägnieren	Wand durch Anstrich imprägnieren, [...]	Schmitz et al. 2018 a	14
19	inst	Innenputz abbrechen und neu aufbringen	Innenputze auf Mauerwerk, Altputz abschlagen; incl. [...] Glätten	Schmitz et al. 2018 a	42
22	neu	Tragende Außenwand monolithisch, Gasbeton-Planelemente, 36,5 cm	Gasbeton-Planelemente, D = 36,5 cm, Dünnbett	Schmitz et al. 2018 b	119
101	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/2,25, Fugenband	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/2,25, Fugenband	projektspezifisch	292
102	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/1,50, Fugenband	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/1,50, Fugenband	projektspezifisch	306
103	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/0,75, Fugenband	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/0,75, Fugenband	projektspezifisch	340
104	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/2,25, Fugenband	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/2,25, Fugenband	projektspezifisch	377

EINr	Art	Maßnahme_kurz	Maßnahme_lang	Quelle	Kosten
105	neu	Hybrid-Betonfertigteil, UHPC-CLMS, 2/1,50, Fugenband	Hybrid-Betonfertigteil, UHPC-CLMS, 2/1,50, Fugenband	projektspezifisch	391
106	neu	Hybrid-Betonfertigteil, UHPC-CLMS, 2/0,75, Fugenband	Hybrid-Betonfertigteil, UHPC-CLMS, 2/0,75, Fugenband	projektspezifisch	425
201	inst	Fugenband erneuern Var 2,25 m Fertigteil-Länge	Fugenbänder aufbringen; Sanierung von Fugen zwischen Betonfertigteilen bzw. Platten- und Großtafeln; Vorarbeiten, Untergrundbehandlung, Fugensanierung	Schmitz et al. 2018 a	36
202	inst	Fugenband erneuern Var 1,50 m Fertigteil-Länge	Fugenbänder aufbringen; Sanierung von Fugen zwischen Betonfertigteilen bzw. Platten- und Großtafeln; Vorarbeiten, Untergrundbehandlung, Fugensanierung	Schmitz et al. 2018 a	46
203	inst	Fugenband erneuern Var 0,75 m Fertigteil-Länge	Fugenbänder aufbringen; Sanierung von Fugen zwischen Betonfertigteilen bzw. Platten- und Großtafeln; Vorarbeiten, Untergrundbehandlung, Fugensanierung	Schmitz et al. 2018 a	77

a. Maßnahmen und dynamische Kosten der untersuchten Außenwandkonstruktionen

Alle Kosten in €/m²-Bauteilfläche, per Preisindex bezogen auf 2018 Q 1

Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/2,25								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	101	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/2,25, Fugenband	291,8	43,8	335,6	335,6	335,6
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	201	inst	Fugenband erneuern Var 2,25 m Fertigteile-Länge	35,8	7,2	43,0	95,0	16,3
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/1,50								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	102	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/1,50, Fugenband	305,9	45,9	351,8	351,8	351,8
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	202	inst	Fugenband erneuern Var 1,50 m Fertigteile-Länge	46,1	9,2	55,3	122,1	21,0
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/0,75								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	103	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 1/0,75, Fugenband	339,9	51,0	390,9	390,9	390,9
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7

40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	203	inst	Fugenband erneuern Var 0,75 m Fertigteil-Länge	76,8	15,4	92,2	203,5	35,0
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/2,25								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	104	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/2,25, Fugenband	377,1	56,6	433,6	433,6	433,6
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	201	inst	Fugenband erneuern Var 2,25 m Fertigteil-Länge	35,8	7,2	43,0	95,0	16,3
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/1,5								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	105	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/1,50, Fugenband	391,1	58,7	449,8	449,8	449,8
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	202	inst	Fugenband erneuern Var 1,50 m Fertigteil-Länge	46,1	9,2	55,3	122,1	21,0
Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/0,75								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	106	neu	Hybrid-Betonfertigteile, UHPC-CLMS, 2/0,75, Fugenband	425,2	63,8	488,9	488,9	488,9
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	203	inst	Fugenband erneuern Var 0,75 m Fertigteil-Länge	76,8	15,4	92,2	203,5	35,0

monolithisch - Porenbeton								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
0	22	neu	Tragende Außenwand monolithisch, Gasbeton-Plan- elemente, 36,5 cm	118,8	17,8	136,6	136,6	136,6
0	4	neu	Außenputz und Beschichtung f. monol. Außenwand, Neubau	56,2	8,4	64,6	64,6	64,6
0	9	neu	Innenwandputz	23,9	3,6	27,5	27,5	27,5
20	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	26,0	10,8
20	10	inst	Außenwandfarbe	25,6	5,1	30,7	45,6	18,9
40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	14	inst	Putz abbrechen und neu aufbringen	59,4	11,9	71,3	157,4	27,1
40	15	inst	Außenwandfarbe	18,9	3,8	22,7	50,2	8,6
40	19	inst	Innenputz abbrechen und neu aufbringen	42,0	8,4	50,4	111,2	19,1
monolithisch - Ziegel								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	5	neu	Tragende Außenwand monolithisch, Porenziegel- Lochsteine, 36,5 cm	147,4	22,1	169,6	169,6	169,6
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
0	4	neu	Außenputz und Beschichtung f. monol. Außenwand, Neubau	56,2	8,4	64,6	64,6	64,6
0	9	neu	Innenwandputz	23,9	3,6	27,5	27,5	27,5
20	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	26,0	10,8
20	10	inst	Außenwandfarbe	25,6	5,1	30,7	45,6	18,9

40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	14	inst	Putz abbrehen und neu aufbringen	59,4	11,9	71,3	157,4	27,1
40	15	inst	Außenwandfarbe	18,9	3,8	22,7	50,2	8,6
40	19	inst	Innenputz abbrehen und neu aufbringen	42,0	8,4	50,4	111,2	19,1
einschalig - KS, WDVS								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
0	9	neu	Innenwandputz	23,9	3,6	27,5	27,5	27,5
0	6	neu	Tragende Außenwand, KS, 24 cm	92,5	13,9	106,4	106,4	106,4
0	1	neu	WDVS, komplett	104,0	15,6	119,6	119,6	119,6
0	9	neu	Innenwandputz	23,9	3,6	27,5	27,5	27,5
20	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	26,0	10,8
20	10	inst	Außenwandfarbe	25,6	5,1	30,7	45,6	18,9
40	13	inst	WDVS abbrehen	20,3	4,1	24,4	53,9	9,3
40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	11	inst	WDVS, komplett	116,7	23,3	140,1	309,3	53,2
40	19	inst	Innenputz abbrehen und neu aufbringen	42,0	8,4	50,4	111,2	19,1
zweischalig hinterlüftet - KS, MW, Klinker								
Jahr	EINr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	6	neu	Tragende Außenwand, KS, 24 cm	92,5	13,9	106,4	106,4	106,4
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
0	7	neu	Verblendmauerwerk hinterlüftet + Dämmung MW	197,6	29,6	227,2	227,2	227,2

0	9	neu	Innenwandputz	23,9	3,6	27,5	27,5	27,5
40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	17	inst	Außenwand reinigen	7,2	1,4	8,6	19,0	3,3
40	16	inst	Sichtverfugung Ziegelmauerwerk	60,4	12,1	72,5	160,1	27,5
40	18	inst	Außenwand imprägnieren	13,8	2,8	16,6	36,6	6,3
40	19	inst	Innenputz abbrechen und neu aufbringen	42,0	8,4	50,4	111,2	19,1
zweischalig hinterlüftet - Ortbeton, MW, Klinker								
Jahr	ElNr	Art	Maßnahme_kurz	Ausführungskosten	Baunebenkosten	statische Kosten	nominale Kosten	dynamische Kosten
0	8	neu	Tragende Außenwand, Ortbeton, 24 cm	166,4	25,0	191,3	191,3	191,3
0	3	neu	Gerüst	14,6	2,2	16,7	16,7	16,7
0	7	neu	Verblendmauerwerk hinterlüftet + Dämmung MW	197,6	29,6	227,2	227,2	227,2
0	9	neu	Innenwandputz	23,9	3,6	27,5	27,5	27,5
40	12	inst	Gerüst	14,6	2,9	17,5	38,6	6,6
40	17	inst	Außenwand reinigen	7,2	1,4	8,6	19,0	3,3
40	16	inst	Sichtverfugung Ziegelmauerwerk	60,4	12,1	72,5	160,1	27,5
40	18	inst	Außenwand imprägnieren	13,8	2,8	16,6	36,6	6,3
40	19	inst	Innenputz abbrechen und neu aufbringen	42,0	8,4	50,4	111,2	19,1

FÜNFTER TEIL

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Forschungsprojekt wurde eine anfänglich von der TU Dortmund entwickelte und von der Universität Kassel weiterentwickelte CLM-Schaum Mischung unter Verwendung von durch den Leichtzuschlag Perlit, Basaltfasern und eine Polymerdispersion weiterentwickelt. Hierdurch konnte eine Rohdichte von unter $0,5 \text{ kg/m}^3$ erzielt werden. Dabei bleibt die Gefügestruktur deutlich porenärmer und die Wärmeleitfähigkeit ist geringer als bei vergleichbarem Porenbeton. Damit ist ohne thermische Nachbehandlung ein Werkstoff mit verbesserten Eigenschaften herstellbar. Im Gegensatz zu Porenbeton kann in einem Fertigteilwerk reproduzierbar Schaumbeton hergestellt werden und direkt zu Wandelementen weiterverarbeitet werden. Dabei sind keine zusätzlichen Ausstattungen erforderlich.

In der vorhandenen Rezeptur, für einen nicht mit Fasern bewehrten Ultrahochfesten Beton (UHPC), wurde der Zement CEM I durch einen umweltfreundlicheren Zement CEM III/A ersetzt. Zudem wurde der Einfluss von Basaltfasern/-rovings auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Die Basaltfasern zeigten dabei die besseren Eigenschaften, da die Druckfestigkeit zwar um etwa 20% auf 140 N/mm^2 reduziert wurde, jedoch die Biegezugfestigkeit verdoppelt ($11,1 \text{ N/mm}^2$) werden konnte. Das Schwindmaß der Mischung mit Basaltfasern war um $0,06 \text{ mm/m}$ höher als ohne Fasern. Damit kann bei beiden Mischungen vom gleichen Schwindverhalten ausgegangen werden.

Für die Erzielung guter Verbundeigenschaften zwischen UHPC und CLM-Schaum hat es sich bewährt, den UHPC an eine sägerauhe CLM-Schaumfläche zu betonieren. Mit dieser Vorgehensweise konnten konstant gute Bruchbilder bei der Haftzugprüfung erzeugt werden. Eine sich auf diese Weise einstellende gute Verzahnung der Materialien konnte auch in den mikrostrukturellen Untersuchungen mittels hochauflösenden Computertomographie-Aufnahmen nachgewiesen werden.

Erste Abschätzungen des Tragverhaltens der hier untersuchten hybriden Wandelementbauteile zeigen, dass sich diese aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften und ihres Bruchverhaltens sehr gut für den Hochbau eignen. In Tastversuchen zeigten Verbundkörper ein sehr gutmütiges mechanisches Versagen, da erst im Nachbruchbereich eine optisch wahrnehmbare Ablösung der Schale auftrat. In weiterführenden Untersuchungen wurde die Lasteinleitung am Wandkopf untersucht. Mit der optischen Versuchsauswertung (GOM) konnte der Verbund sowie das exzentrische Tragverhalten dargestellt werden. Zwei Versuche an $2,50 \text{ m}$ hohen Wandelementen konnten tendenziell zeigen, dass für die Anwendung im Hochbau die erforderliche Tragfähigkeit erreicht werden kann.

Daraus ergibt sich aktuell die vorläufige Empfehlung, für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für eine experimentell ermittelte höchste Maximallast zu bemessen und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) deutlich unter dieser Maximallast zu verbleiben, denn sie zeigt ein Ablösen der Wandschale und damit einen unum-

kehrbaren Zustand an. Im Verlauf des Projekts wurde deutlich, dass ein detailliertes Bemessungskonzept mit konkreten Nachweismodellen wegen mangelnder Vergleichbarkeit der Wandelement- mit den Wandkopfversuchen und zu geringer Datenbasis noch nicht ableitbar ist.

Für die Lebenszyklusbetrachtung wurden Berechnungen zu Erstellungskosten von üblichen Wandkonstruktionen erstellt und mögliche Wandquerschnitte für die entwickelten Wandelemente berechnet. Je nach Einsatzgebiet sind nach der Energiesparverordnung unterschiedliche Grenzwerte einzuhalten. Es wird mindestens eine Wandstärke von 30 cm benötigt.

Nach Abschluss des Forschungsprojekts kann festgehalten werden, dass die entwickelte Rezeptur für den CLM-Schaum prinzipiell funktioniert, allerdings für ihre großmaßstäbliche Anwendbarkeit weitere Fragen hinsichtlich Produktion und Transport von Wandelementen noch beantwortet werden müssen. In diesem Zusammenhang muss auch auf die Schwindeigenschaften verschiedener Baustoffe in hybriden Bauteilen und ihren Einfluss auf die Wandelementeigenschaften verwiesen werden, für die während der Projektbearbeitung erste Ansätze zur Lösung entwickelt wurden, die allerdings weitergehender Forschung bedürfen. Das Monitoring der bauphysikalischen Eigenschaften des entwickelten Hybridwandelements wird am Demonstratorbau für wenigstens 3 Monate weitergeführt, da hierbei der meteorologische Einfluss der Umgebung maßgeblich auf die Ergebnisse Einfluss nehmen wird. Insgesamt kann festgehalten werden, dass dieses Projekt den Grundstein für die industrielle Fertigung für Hybridfertigteilewandelemente aus rein mineralischem Material legt.

Veröffentlichungen

Umbach, C.; Wetzel, A.; Schade, T.; Fehling, E.; Middendorf, B.: Multifunctional heat-insulating precast UHPC/ high strength foam concrete elements for house construction. 4th International Symposium on Ultra-high Performance Concrete and High Performance Construction Materials - HiPerMat 2016. Kassel, March 2016.

Wetzel, A.; Umbach, C.; Fehling, E.; Middendorf, B. Multifunctional prefabricated walls made of UHPC and foam concrete, Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation, 2016 Taylor & Francis Group, London, S. 1375-1379.

Umbach, C.; Wetzel, A.; Middendorf, B.: Microstructure of the interface of UHPC and high strength foam concrete. 2nd International Conference on the Chemistry of Construction Materials – ICCCM 2016. Munich, October 2016.

Middendorf, B.; Umbach, C.: Multifunktionale Betone für Hochbau-Wandelemente. In: Beton – Herausforderungen in Forschung und Praxis. Festschrift anlässlich des 60. Geburtstags von Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher, Bochum 2017, S. 294 – 305.

Middendorf, B.; Umbach, C.; Wetzel, A.: Multi-functional Concretes for Structural Wall Elements. 10th National Conference on Solid state Chemistry and Allied Areas (ICAS 2017). Materials Today: Proceedings. Volume 5, Issue 7 (2018) S. 15236-15242.

Umbach, C.; Middendorf, B.: 3D-Strukturanalysen von Beton mittels hochauflösender Computertomographie am Beispiel multifunktionaler Wandelemente. Cement International. (submitted)

Umbach, C., Lorenz, P. Wetzel, A.; Fehling, E., Middendorf, B.: UHPC-schaumbeton-Hybridwandelemente: Zukunftsweisende mineralische Verbundsysteme für den betonfertigteilbau. 20. Internationale Baustofftagung. 12-09—14-09-2018. Weimar, Deutschland. S. 2-289 – 2-294.

Umbach, C.; Wetzel, A.; Middendorf, B.: Pore structure analysis of high strength foam concrete using high-resolution computed tomography. (to be submitted to Cement and Concrete Composites)

Kassel, den 31.10.2018

Univ.-Prof. Dr. Bernhard Middendorf

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling