

Gregor Wisner, Frauke Bunzel
Elisabeth Stammen, Klaus Dilger

Entwicklung von nachhaltigen Sandwichelementen aus Holzschaum und Textilbeton – HoTeSa

F 3143

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 978-3-7388-0424-9

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

**Projektbericht im Rahmen der Förderinitiative „Zukunft Bau“ der
Bauforschung**

**Entwicklung von nachhaltigen Sandwichelementen
aus Holzschaum und Textilbeton**

Kurztitel: HoTeSa

Abschlussbericht

AZ: 10.08.18.07-16.40

Laufzeit: 01.10.2016 bis 15.12.2018

Autoren:

Dipl.-Ing. Gregor Wisner *

Dr. rer. nat. Frauke Bunzel **

Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen *

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger *

*** Institut für Füge- und Schweißtechnik ifs, TU Braunschweig**

**** Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI**

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

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.40)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Vorhabens	3
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Wärmedämmung	3
2.2	Faserbewehrter Beton für dünnwandige Querschnitte	4
3	Vorgehensweise	8
4	Anforderungsprofil	9
5	Herstellung Holzschaum.....	10
5.1	Allgemeiner Herstellungsprozess	10
5.2	Allgemeine Eigenschaften	13
5.3	Optimierung der Rezeptur.....	17
6	Herstellung der Sandwichelemente	21
6.1.1	1) Getrennte Herstellung der Betondeckschichten für das Kleben zum Sandwich nach vollständiger Erhärtung.	24
6.1.2	2) Direktes Aufgießen des Betons und Einbetten der textilen Verstärkung	25
6.1.3	3) Definiertes Eindringen des Kerns in eine flüssige untere Betonschicht in einer passgenauen Form mit Rüttler, anschließendes Aufgießen der oberen Deckschicht	26
6.2	Untersuchung der Deckschichthaftung in Druckschubprüfungen	27
6.3	Untersuchung der Tragwirkung von Sandwichbalken unter Biegung.....	30
6.3.1	Biegung von Sandwichen mit geklebter Textilbeton-Deckschichten auf CEM III-Basis	31
6.3.2	Biegung von Sandwichen mit gegossenen Textilbeton-Deckschichten auf Aluminat-Zement-Basis	34
6.3.3	Biegung von hohen Sandwichbalken mit Betondeckschichten von 15 bis 23 mm Stärke	35
7	Zusammenfassung.....	38
8	Wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Nutzen.....	38
9	Literatur	39

1 Ziel des Vorhabens

Der vermehrte Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Bauwesen hilft Energie und Bodenschätze einzusparen. Ein neuer Ansatz zur Substituierung von typischen Kunststoffschäumen stellt der neu entwickelte Holzschaum aus Holz und Holzresten dar. In diesem Forschungsvorhaben wurde ein Sandwichelement entwickelt werden, deren Innenschale aus dem ökologisch-nachhaltigen Holzschaum besteht und einer Außenschale aus Textilbeton, um die Bauteilstärke gering zu halten. Die Kombination dieser beiden Materialien soll ein Sandwichelement ergeben, dass ähnliche Eigenschaften wie schon eingesetzte Sandwichelemente aufweist und somit diese substituieren kann. Dabei soll der Holzschaum üblich eingesetzte PUR-Schäume ersetzen. Vorteil ist zum einen die Ressourcenschonung, da der Holzschaum aus Holzresten von regional verfügbaren Holzarten hergestellt wird ohne Zugabe eines Binders aus fossilen Rohstoffen. Ferner kann die Bauteilstärke durch Einsatz eines textilbewehrten Betons aufgrund der hohen Druckfestigkeiten des Feinbetons und der hohen Zugfestigkeiten der Bewehrungstextilen sehr gering gehalten werden und damit der Materialeinsatz verringert werden. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt war das Fügen der beiden Materialien zu einem festen Verbund durch Oberflächenvorbehandlung und Kleben. Die möglichen Einsatzbereiche des Sandwichelements wurden durch die in diesem Forschungsvorhaben erhalten Materialeigenschaften des entwickelten Sandwichelements identifiziert. Aufgrund der eingesetzten Materialien ist dieses Sandwichelement recyclebar.

2 Stand der Technik

2.1 Wärmedämmung

Wärmedämmungen für Gebäude können aus unterschiedlichen Materialien bestehen wie Mineralwolle, Polymerschäume u.a. Neben den flexiblen Dämmmatten aus Mineralwolle (Glas- und Steinwolle) zählen die druckfesten Polymerschäume aus expandiertem Polystyrol (EPS), extrudiertem Polystyrol (XPS) oder Polyurethan (PUR) zu den am häufigsten eingesetzten Dämmmaterialien. Die Herstellung von Polymerschäumen erfolgt großtechnisch aus petrochemischen Grundstoffen. Bei zunehmender Verknappung fossiler Ressourcen werden nachhaltige Alternativen dringend benötigt. Aber auch aufgrund der Nachfrage nach gesunden Baustoffen nehmen Dämmstoffe aus Naturstoffen an Bedeutung zu. Naturdämmstoffe haben in Deutschland mit ca. 7 %, bezogen auf das gesamte verbaute Dämmstoffvolumen, einen kleinen, aber stabilen Marktanteil. Verglichen mit den synthetischen Dämmstoffen weisen Dämmstoffe aus Naturstoffen noch etwas höher Wärmeleitfähigkeiten auf, sind nicht auf lange Zeit formstabil und sind im Vergleich zu synthetischen Dämmstoffen teurer. Positive Aspekte von Naturdämmstoffen sind ihre unproblematische Entsorgung bzw. die Möglichkeit zum Recycling sowie ihr Brandverhalten insbesondere im Vergleich mit Dämmstoffen aus Polymerschäumen. In jüngster Zeit standen zunehmend Dämmungen aus Polystyrol, die einen Großteil der in Deutschland verwendeten Wärmedämmungen an Gebäuden ausmachen, in der Kritik. Eine bisher ungelöste Frage ist, wie die erheblichen Mengen an Styropor, die zumeist mit dem toxischen Brandschutzmittel Hexabromocyclododecan (HBCD) ausgerüstet sind, entsorgt werden sollen.

In der heutigen Zeit wird ein Bewusstsein für gesundes Wohnen immer stärker, so dass neben dem Einsatz von Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen auch die Emission gesundheitsgefährdender Stoffe ein großes Thema ist. Bei neuen Baumaterialien aus mineralischen oder auch petrochemischen Grundstoffen können gesundheitsgefährdende Stoffe emittiert werden, was eventuell erst Jahre später entdeckt wird. Nachwachsende Rohstoffe hingegen sind nicht gesundheitsgefährdend, geben ein gutes Raumklima und sind preiswert. Im Bereich der Wärmedämmung gibt es alternative Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen wie Stroh, Holzfaser, Holzwolle, Hanf und Cellulose.

Aus den stabilen Naturfaserstoffen werden in verschiedenen industriellen Verfahren poröse Matten, Vliese und Gewebe hergestellt, welche Anwendung als Wärmedämmung finden. Diese Produkte haben jedoch den Nachteil, dass sie weniger druckfest bzw. formstabil sind als Dämmmaterialien aus Polymeren. Demzufolge sinken die Dämmmaterialien aus Naturfasern häufig im Laufe der Zeit ein, wodurch ein Teil der Dämmwirkung verloren geht. Besonders ist dieser Effekt bei Einblasdämmstoffen zu beobachten. Ferner lassen sich keine geschlossenporigen Strukturen erzeugen, wie es bei den zuvor beschriebenen polymerbasierten Schaumstoffen der Fall ist [Scholtyssek 2014].

Der am WKI entwickelte Holzschaum kann die beschriebenen Nachteile der Naturfaserdämmplatten überwinden. Aufgrund der hohen Festigkeit ist der Holzschaum druckfest und formstabil. Im Vergleich zu Holzfaserdämmplatten wird kein Bindemittel eingesetzt, sondern nur die holzeigenen Bindungskräfte aktiviert. Dadurch werden keine gesundheitsgefährdenden Emissionen freigesetzt. Durch die Porosität des Holzschlumes kann Feuchtigkeit aufgenommen werden, aber auch wieder abgegeben werden und bietet daher ein angenehmes Raumklima. Ferner können auch Holzreste eingesetzt werden, so dass sich dadurch der Preis reduzieren lässt. Außerdem ist der Holzschaum auch zu 100 % recycelbar.

Die Herstellung des Holzschlumes ist patentiert worden. Eine Zuteilung des Patentcs hat aber bis Ende 2018 noch nicht stattgefunden.

2.2 Faserbewehrter Beton für dünnwandige Querschnitte

Allgemein technisch nutzbar wird Beton nur durch eine Faserverstärkung im zugbeanspruchten Bauteilbereich, da der Beton alleine hauptsächlich nur druckbeanspruchbar ist. Im allgemeinen Bauwesen wird hauptsächlich eine Zug-Armierung durch Stahl in Form von Drähten, Matten oder Stangen realisiert. Zum Korrosionsschutz der Stahlarmierung im Randbereich der Betonbauteile wird eine sogenannte Betonüberdeckung von 30 mm bis 40 mm [DIN 1045-2] gefordert, d. h. die Armierung muss allseitig im Beton eingebettet sein, der sie durch die hohe Alkalität vor korrosivem Angriff schützt. Nur korrosionsbeständige Armierungen (Edelstähle, Alkaliresistente (AR) Glas-, Carbon-, oder Kunststoff-Fasern) benötigen deutlich weniger oder keine Beton-Überdeckung.

Dünnwandige Betonquerschnitte werden daher mit faserbewehrten Betonen und zumeist mit nicht metallischer Bewehrungen realisiert. Dabei stellen ungerichtet kurzfaserverstärkte Betone mit einem Faservolumengehalt zwischen 1 % und 5 % (Vol.) wegen ihres einfachen Herstellverfahrens die wichtigste Anwendung dar, jedoch auf Kosten der geringeren Tragfähigkeit im Vergleich zu gerichtet textilverstärkten Betonen, bei denen Endlosfasern als Garne textiltechnisch als ebene Gewebe, Gewirke, Gelege und Fliese bereitgestellt werden und im Bauteil gezielt belastungsgerecht angeordnet werden können. Auch dreidimensionale Textilien kommen vereinzelt als Geflechte oder Gewirke zum Einsatz. Das Tragverhalten der Fasern in der Beton-Matrix ist von verschiedenen Voraussetzungen abhängig, in zwei Sonderforschungsbereichen der DFG wurden seit Ende der Neunzehnhundertneunziger Jahre grundlegende Erkenntnisse in Dresden (SFB 528) und Aachen (SFB 532) für die sogenannten „Textilbewehrten Betone“ erarbeitet.

Bei textilbewehrten Betonen ist zwischen ungetränkten und vorgetränkten Faserbündeln oder Garnen als Armierung zu unterscheiden. Die mittragende Wirkung der Fasern im Garn ist wesentlich von der Anbindung an den Matrixwerkstoff (Zementleim im Beton) abhängig. Die Fasern im Garn liegen jedoch zumeist so eng aneinander, dass der Klinker im Zementleim nicht in die Zwischenräume eindringen kann und im Wesentlichen nur Porenwasser in das Faserbündel (Garn) eindringt. Damit ist nur ein Teil der Fasern am Verbund beteiligt. Eine Möglichkeit, den gesamten Garnquerschnitt stoffschlüssig in den Verbund zu integrieren, ist die Vorträngung der Garne und Aushärtung vor dem Betonieren mit einem Bindemittel, z. Bsp. einem Kunstharz, wie es in der Faserverbundkunststoff-

Verarbeitung mit Polyesterharzen oder Epoxidharzen möglich ist [Kol06]. Durch die niedrige Viskosität der Tränkharze kann der volle Garnquerschnitt mit praktisch allen Fasern eingebunden werden, die ausreichende Haftung im Beton muss über die äußere Oberfläche der vorgetränkten Garne realisiert werden. Vorgetränkte Textilien, zumeist in offenmaschigen Gewebematten sind am Markt verfügbar, häufiger werden die Textilien jedoch ohne polymere Vorbeschichtung als trockene Textilien verarbeitet und man nimmt die eingeschränkte Tragwirkung in Kauf. Weiterhin wird die Kurzfaserverstärkung häufig mit der textilen Bewehrung kombiniert und erzielt mit der Kurzfaserverteilung eine günstige Mikrorissbildung einerseits und durch die Endlosfaserverstärkung eine hohe Gebrauchstauglichkeit (Makrorissbildung und Duktilität) andererseits.

Die Betone als Matrix im Verbundwerkstoff müssen sich sehr niedrigviskos verarbeiten lassen und weisen in der Regel Größtkörner von nur wenigen Millimetern auf. Weiterhin dürfen sie nur wenig schwinden, daher haben sie geringe Wasser/Bindemittelwerte (Wasserzementwerte) in der Größenordnung von 0,4. Dies wird nur möglich durch die Zugabe von Fließmitteln. Von den Normalzementen kommen hauptsächlich CEM I, CEM II und CEM III zum Einsatz, zusammen mit weiteren Hilfsmitteln wie Silica und Flugasche werden zumeist härteste Betone erzielt, die als Feinbetone bezeichnet werden.

Die wesentlichen Werkstoffeigenschaften von Glasfaserbeton können mit der Normengruppe EN 1170 (Teile 1 bis 8) ermittelt werden. Für tragende Bauteile müssen textile Bewehrungen aus Langfasern (AR-Glasfasern, ggf. Carbonfasern oder Aramidfasern) in Analogie zum Stahlbeton gezielt in Richtung der dominierenden Zugbeanspruchung und ggf. Schubbeanspruchungen angeordnet werden. Sowohl vorbeschichtete als auch unbeschichtete Textilbewehrungen erfordern differenzierte Betrachtungen des Verbundtragverhaltens. In den Sonderforschungsbereichen (SFB 528 und SFB 532) wurden sowohl experimentelle Untersuchungen als auch numerische Modellierungen auf drei Strukturebenen betrieben, siehe Abbildung 1.

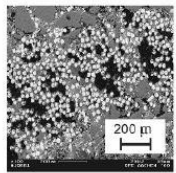
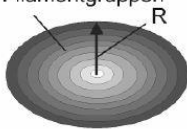
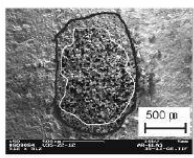
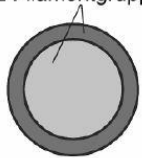
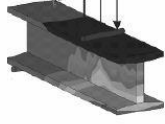
Detailierungsgrad		Struktur	Modellierung	Experiment
	Mikroebene (Filament, Matrix)		n Filamentgruppen 	- Filamentzugversuch - Filamentpullout
	Mesoebene (Garn, Matrix)		max. 2 Filamentgruppen 	- Garnzugversuch - Garnpullout - Schallemissionsanalyse / FILT-Test
	Makroebene (Komposit, Bauteil)			- Dehnkörperversuche - Balkenversuche - Biegung - Querkraft - Torsion - Scheibenversuche

Abbildung 1 Struktur- und Modellierungsebenen für textil bewährten Beton nach [Bru07, Vos08a]

Ausführliche Beschreibungen des Verbundtragverhaltens auf den Mikro-, Meso- und Makroebenen können der Literatur entnommen werden [Ban06, Heg06a, Bru07, Kon08, Vos08a]. Die auf der

Makroebene abgeleiteten Ingenieurmodelle eignen sich demnach zur Beschreibung des Tragverhaltens von Bauteilen, sie stützen sich auf standardisierte Dehnkörper- und Biegeversuche an ausgewählten Materialkombinationen. Der komplexere Zusammenhang zwischen Bewährung und Betonmatrix im Vergleich zum etablierten Stahlbetonbau ist die wesentliche Ursache für die relativ geringe Anwendung im Bauwesen, jedoch sind zahlreiche prototypische Beispiel-Bauteile mit Zulassungen im Einzelfall umgesetzt worden. Ein Schwerpunkt bilden dabei hinterlüftete Fassadenelemente für Gebäude, die unter kontrollierten Fertigungsbedingungen in einem Fertigteilwerk vorgefertigt werden können und als Systembauteil z. Teil bauaufsichtliche Zulassungen erhalten haben. Vorhang-Fassadenelemente werden als versteifte Platten oder Sandwichelemente in textilbewährtem Beton realisiert. Im Fall der Sandwichelemente sind dabei stets wärmedämmende Kernwerkstoffe aus mineralischen oder organischen Materialien integriert. Diese wärmedämmenden Kernwerkstoffe weisen jedoch fast ausschließlich mechanische Eigenschaften auf, die einer selbsttragenden Bauweise widersprechen, so dass stets mechanische Verbindungsmittel (punkt- oder linienförmig) zwischen den textilbewährten Betondeckschichten für den tragenden Verbund vorgesehen werden müssen. Am Beispiel des wärmedämmtem Sandwich-Vorhangelementes aus dem Forschungsprojekt „INSUSHELL“ [IMB09] ist die Anordnung und Wirkungsweise typischer Verbindungsmittel zwischen Innen- und Außenschale dargestellt, Abbildung 2. Die Diagonalanker sind Zugstreben und stellen dabei linienförmige Tragelemente dar während Bügelanker/Verbundnadeln als punktförmige Verbundmittel agieren.

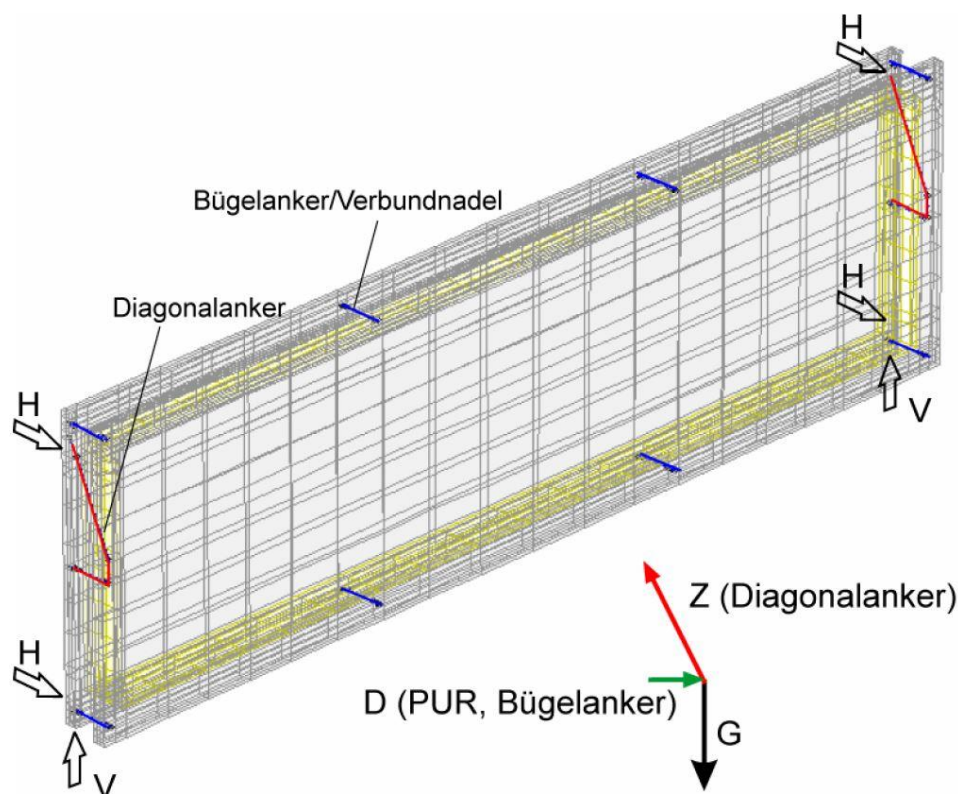


Abbildung 2 Verbindungsmittel-Anordnung an einem Sandwich-Vorhangfassadenelement aus textil bewährtem Betondeckschichten und einem Kern aus PUR-Hartschaum [Insushell09]

Beim Wunsch nach möglichst dünnen Deckschichten für maximale Dämmschichtdicken und geringe Transportgewichte stellt die Integration der Verbundmittel in die Deckschichten als Krafteinleitungsstellen eine zunehmende Herausforderung dar, da lokale Spannungskonzentrationen ausgebildet werden. Die eingeschränkte mittragende Wirkung von vielen Dämmstoffmaterialien

kann jedoch genutzt werden wenn ein Haftverbund zwischen Kernwerkstoff und Deckschichten realisiert wird. Der Haftverbund kann entweder durch die Anhaftung von Frischbeton zum Kernwerkstoff beim Betonieren erfolgen oder nach Erhärten der Betonschichten durch Klebstoffe realisiert werden. Der Haftverbund kann weiterhin durch geometrische Oberflächenmerkmale wie Nuten oder Kerben wie in Holz-Beton-Verbünden in ausgewählte Bauteilrichtungen unterstützt werden. Die mittragende Wirkung wird in der Literatur als Grad der Sandwichtragwirkung mit „Fully-Composite Action“ als schubstarr (FCA), „partially-Composite Action“ als schubweich oder bedingt schubsteif (PCA) und „Non-Composite Action“ als schubschlaff (NCA) beschrieben [Sal97, See97], siehe Abbildung 3.

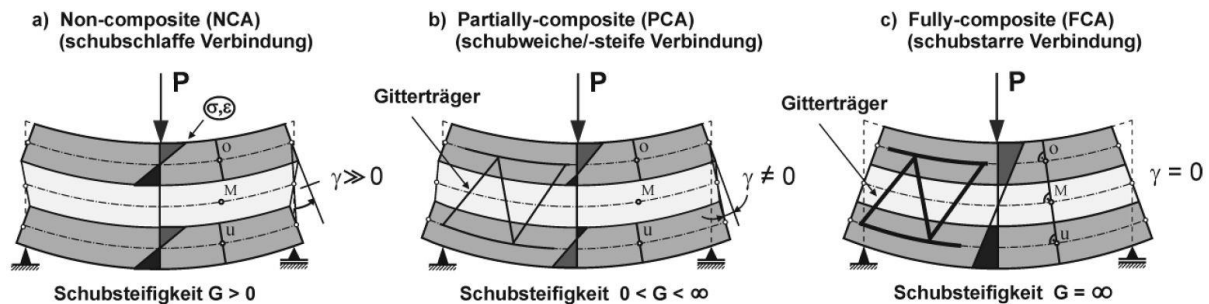


Abbildung 3 Grad der Sandwichtragwirkung (NCA, PCA, FCA) nach der Theorie des elastischen Verbundes [Sta74, Ber98] und der Schubsteifigkeit der Verbundmittel [Sal97] in [Hor10]

Ein Sandwichaufbau mit typischen Wärmedämmmaterialien ohne Verbundmittel (linien- und punktförmig) wird in die Gruppe der NCA oder bei guter Deckschichtanbindung und erhöhter Schubsteifigkeit des Kerns (in Summe beider Eigenschaften) in die Gruppe PCA fallen. Volle FCA-Tragwirkung ist dabei die schubsteife Tragwirkung beider Deckschichten, so dass sich im Gebrauchslastbereich eine Spannungs- und Dehnungsverteilung gemäß der Bernoulli-Hypothese im elastisch beanspruchten Biegebalken einstellt. Dies ist nur durch mechanische Verbindungsmittel möglich.

In nichttragenden Anwendungen wie im Innenausbau von Gebäuden gibt es eine Vielzahl von mehrschichtigen Verbundstoff-Elementen, die eine mittragende Wirkung analog den Sandwichen nutzen. Hier sind die Anforderungen nur teilweise reglementiert, zum Beispiel für Holz-Klebstoffe im Möbelbau [DIN EN 205] und neben den gängigen Holzwerkstoffplatten (Span-, MDF-, OSB-Platten nach weiteren Normen) dominiert bei mineralischen Werkstoffen Gips in Form von ungerichtet Kunststofffaserverstärkten Platten den Markt. Als Ausbauplatten sind jedoch seit Jahren auch Sandwichplatten mit Kern aus Kunststoffschaum aus XPS- oder PUR-Schaum mit Deckschichten aus einem Glasfaser-Gewebe-Textil eingebettet in einer dünnen Zementschicht verfügbar, siehe Beispiel in Abbildung 4.

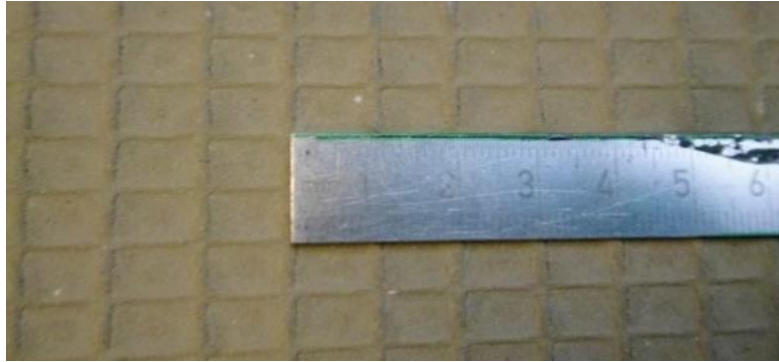


Abbildung 4: Deckschicht einer handelsüblichen Innenausbauplatte auf XPS-Schaum-Basis aus Glasfaser-Gewebe oder -Gelege eingebettet in dünner Betonschicht von ca. 0,5 mm

3 Vorgehensweise

Für die Herstellung der Holzschaum-Textilbeton Sandwichelemente wurden zum einen Holzschäume mit bestimmten Eigenschaften im Hinblick auf Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit hergestellt, um die geforderte Traglast als auch Dämmwert bei möglichst geringen Bauteilstärken zu gewährleisten. Die Wärmeleitfähigkeit ist stark von der Holzart und von der Dichte des Schaumes abhängig.

Ferner wurden Herstellungsverfahren dieser Sandwichelemente erarbeitet. Mehrere unterschiedliche Verfahrensschritte sind hierbei möglich. Zum einen können die einzelnen Bestandteile wie Holzschaum und textilbewehrter Beton einzeln hergestellt und dann zusammengebracht werden, oder aber die Deckschicht aus textilbewehrten Beton wird direkt dünn aufgegossen oder eine Holzschaumplatte wird in eine frische Betonschicht eingedrückt. Hierbei muss die Beständigkeit des Holzschaumes gegenüber Feuchtigkeit, vor allem basischer Umgebung, überprüft werden.

Bei beiden Verfahren müssen der Kern aus Holzschaum und die Außenschalen / Deckschichten aus textilbewehrten Beton eine feste Verbindung eingehen, um die positiven mechanischen Eigenschaften dieser beiden Materialien nutzen zu können. Das Kleben der beiden Materialien nach vorangegangener Oberflächenvorbehandlung hat den Vorteil, dass durch ausgewählte Klebstoffe Lasten im Bauteil gezielt abgeleitet werden können.

Die Materialeigenschaften des Sandwichelement wie Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz und Brandschutz wurden charakterisiert und auf deren Grundlage ein möglicher Einsatzbereich identifiziert.

Das Vorhaben gliederte sich somit in drei Arbeitspakete:

AP 1: Anforderungsprofil Holzschaum

AP 2: Herstellung Holzschaum

AP 3: Herstellung Sandwichelement

4 Anforderungsprofil

Der am WKI hergestellte Holzschaum kann durch die Rezeptur sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Die mechanischen, hygrischen als auch thermischen Eigenschaften hängen dabei stark von der Dichte des Holzschaums ab. Daher wurde im ersten Arbeitspaket ein Anforderungsprofil erarbeitet, um ein geeigneten Holzschaum herstellen zu können.

Die Festigkeit des Holzschaums nimmt mit Reduzierung der Dichte exponentiell ab, da die Kontaktfläche zwischen den Fasern durch die Erhöhung des Porenvolumens stark verringert wird. Da kein Bindemittel eingesetzt wird, wird die Festigkeit durch holzeigene Bindungskräfte zwischen den Fasern als auch durch Verhakung der Fasern bestimmt. Beides nimmt mit Reduzierung der Dichte stark ab. Eine geringe Dichte ist aber notwendig, um eine niedrige Wärmeleitfähigkeit zu erhalten. Diese ist erforderlich, da der Holzschaum als Wärmedämmung im Sandwichelement eingesetzt werden soll. Um die Dicke des Dämmmaterials gering zu halten, muss das Dämmmaterial eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufzeigen. Angemessen wäre ein Wert zwischen 0,035-0,0040 W/m·K. Diesen Wert kann der Holzschaum mit einer Dichte von ca. 40 kg/m³ erreichen (Abbildung 5).

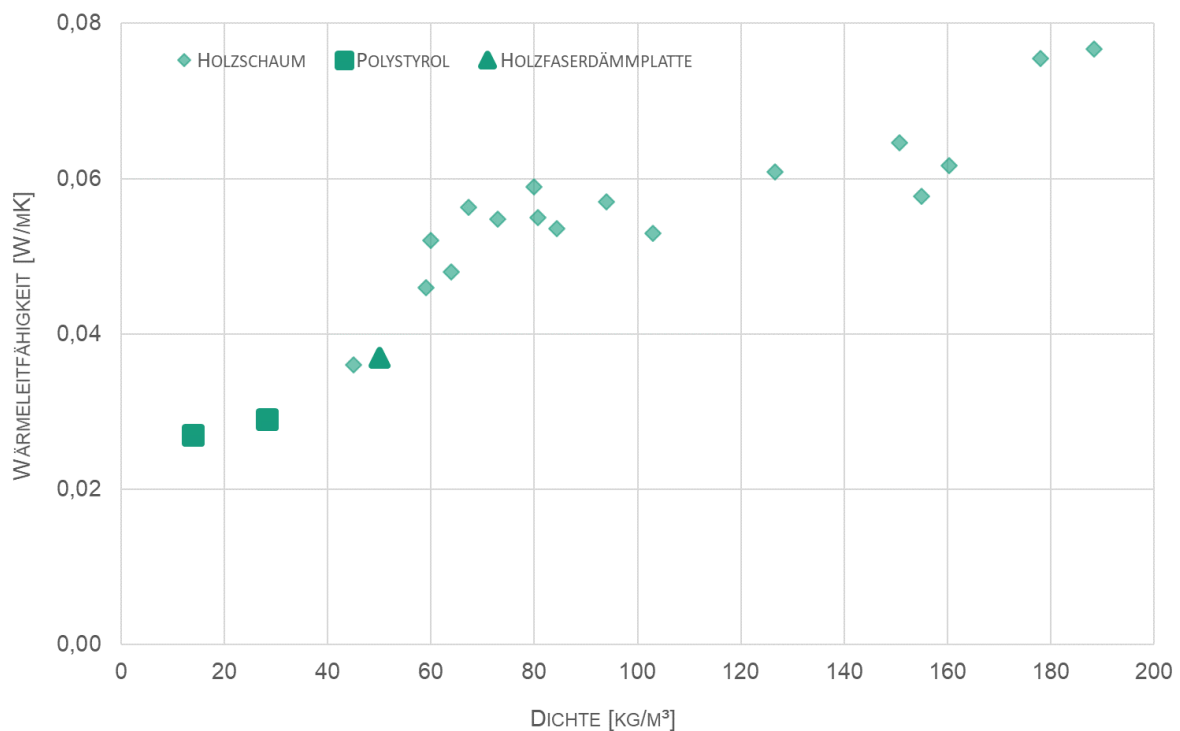


Abbildung 5: Wärmeleitfähigkeit von Holzschäum

Die Festigkeit von Holzschäumen mit dieser Dichte ist sehr gering (Abbildung 6), so dass in diesem Vorhaben Rezepturoptimierung zur Erhöhung der Festigkeit von Schäumen mit einer Dichte von 40 kg/m³ notwendig sind. Eine Mindestfestigkeit konnte in diesem Arbeitspaket erst einmal nicht bestimmt werden. Im Laufe des Vorhabens sollte gezeigt werden, wie hoch die Mindestfestigkeit sein muss, um den Holzschaum mit Textilbeton beschichten zu können. Hier ist vor allem die Druckfestigkeit ein entscheidender Wert. Die Druckfestigkeit der Holzschäume ist allgemein sehr hoch.

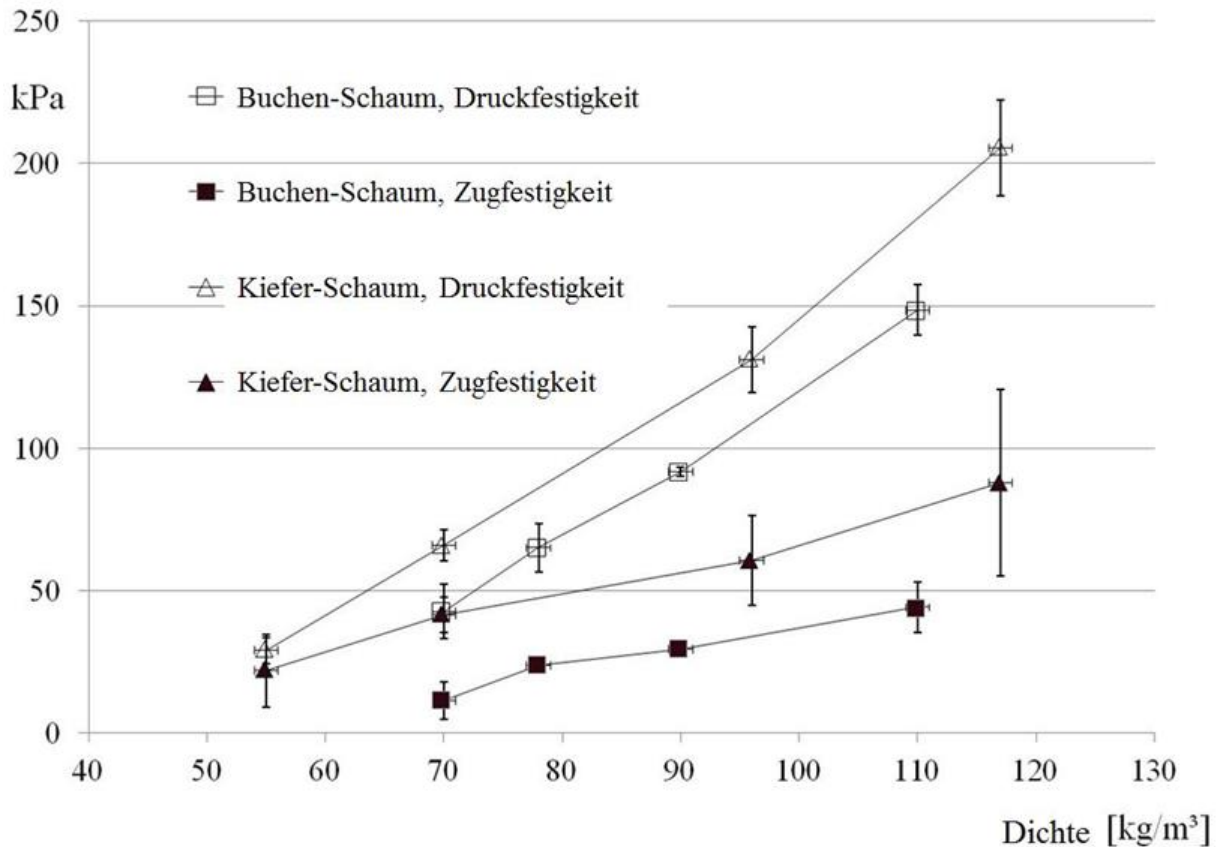


Abbildung 6: Zug- und Druckfestigkeiten von Holzschäum aus Buche und Kiefer

5 Herstellung Holzschäum

5.1 Allgemeiner Herstellungsprozess

Die Herstellung von Holzschäum erfolgt in wenigen Schritten mit weitgehend bekannten Technologien aus der Holz-, Papier- und Polymerschäumindustrie. Da das Holz stark zerkleinert wird, lassen sich neben Laub- und Nadelholz auch Durchforstungshölzer und Sägenebenprodukte als Rohstoffe nutzen. Ferner ist die Verwendung nichtholzhaltiger Lignocellulosen wie Hanf oder Stroh möglich. Um Holz oder andere Lignocellulosen aufzuschäumen, wird der Rohstoff zunächst stark zerkleinert und eine lignocellulosehaltige Suspension erzeugt, die neben der Cellulose mechanisch freigelegte Hemicellulosen, Lignin und weitere Holzinhaltsstoffe enthält. Die Zerkleinerung des Holzes wird durch Refiner-Prozesse bewerkstelligt, so dass große Mengen an Ausgangsmaterial zur Verfügung stehen und die Herstellung großdimensionierter Schäume realisierbar ist.

Während dieses Desintegrationsvorgangs werden die Fasern stark fibrilliert (Abbildung 7). Diese Struktur dürfte eine der Gründe für den Zusammenhalt der Schäumstoffe ohne Zugabe von Klebstoff darstellen, da die stark fibrillierten Fasern mechanisch miteinander verhaken.

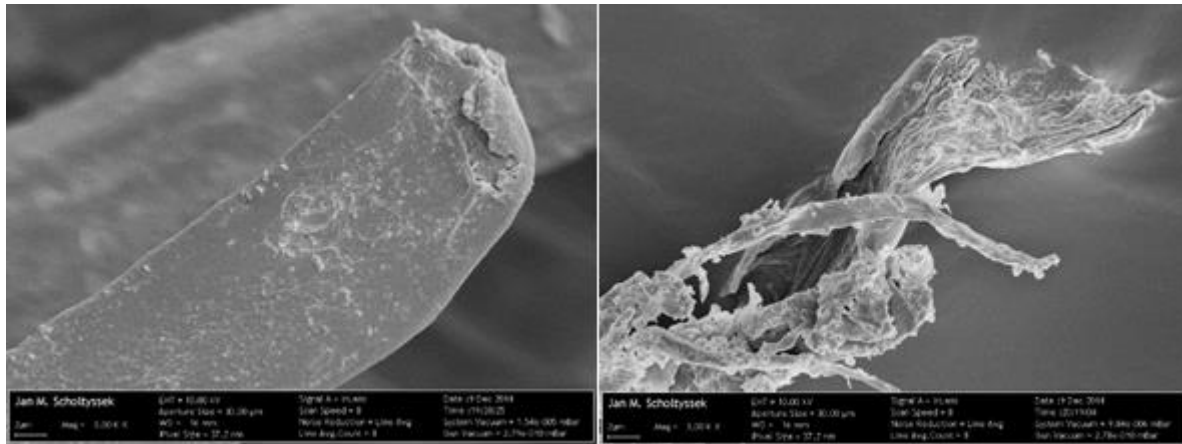


Abbildung 7: REM-Aufnahmen. Links: Spitze einer Buchenholzfasers. Rechts: Spitze einer stark desintegrierten Buchenholzfasers

Der Mahlgrad der Fasersuspension, genauer das Entwässerungsverhalten, wurde nach dem Schopper-Riegler-Verfahren [ISO 5267-1, 2000] bestimmt. Die Methode eignet sich zur schnellen Kontrolle des Mahlprozesses sowie zum Vergleich der Suspensionen miteinander. Hierbei wird das Entwässerungsverhalten gemessen, welches Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Fasern zulässt. Der Schopper-Riegler-Wert (SR-Wert) steigt mit zunehmender Fibrillierung und abnehmender Partikelgröße auf einer Skala von 0 bis 100. In Abhängigkeit von der Mahldauer wurden Werte zwischen 10 und 70 gemessen, jedoch ist zu beachten, dass der SR-Wert auch von anderen Eigenschaften abhängt, so dass z.B. zwischen Kürzung und Fibrillierung der Fasern nicht unterschieden werden kann. Mikroskopische Aufnahmen zeigen abhängig von der Mahldauer eine Verkürzung und Zerkleinerung der Fasern und dadurch unterschiedliche SR-Werte (Abbildung 8).

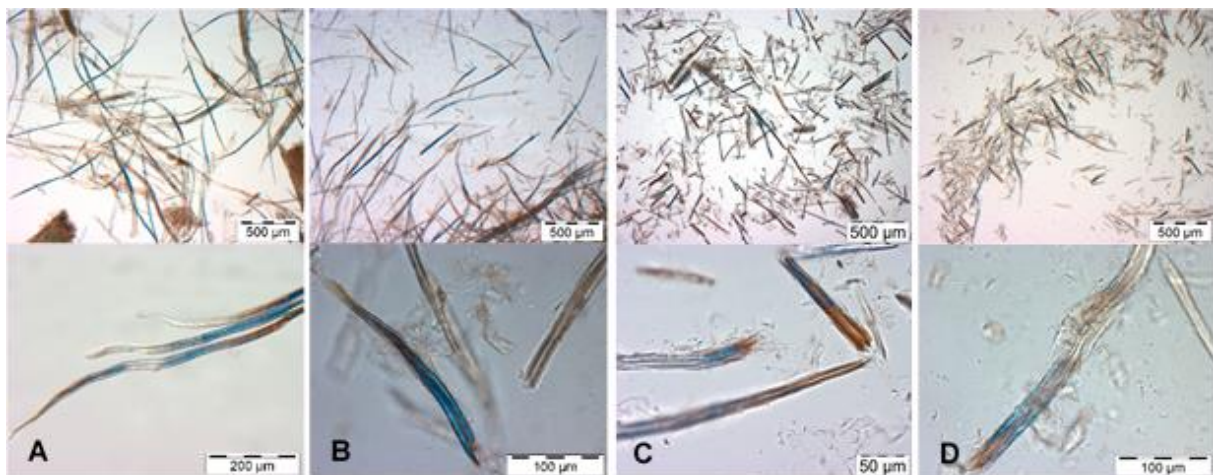


Abbildung 8: Mikroskopische Aufnahmen von Buchenfasern mit unterschiedlichen Mahl-graden: A: SR-Wert 11; B: SR-Wert 17; C: SR-Wert 43, D: SR-Wert 55

Die Mahlgrade hingegen zeigen einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Schäume. Durch den Refinerprozess können die Mahlgrade je nach erforderlichen Eigenschaften eingestellt werden. Die Desintegration der Fasern führt zu einem Abbau verschiedener Holzbestandteile. Je nach gewählten Mahlparametern werden unterschiedliche Anteile an wasserlöslichen Komponenten gelöst, wie z.B. Abbauprodukte der Cellulose, Hemicellulosen und des Lignins sowie andere akzessorische Bestandteile. Diese Komponenten können anschließend als Klebstoff wirken und verkleben die Fasern während der Trocknung.

Um die Holzfasersuspension zu einem Schaum zu verarbeiten, wird ein natürlicher Schaumstabilisator eingesetzt. Durch einschlagen von Luft während des Mischvorgangs entsteht ein Schaum. Dadurch können Dichten zwischen 50 kg/m^3 und 200 kg/m^3 eingestellt werden. Dabei wird die Dichte durch den Mahlgrad stark beeinflusst. Je höher der Mahlgrad umso höher ist auch die Dichte des Schaums (Abbildung 9), da sich die vielen kleinen Partikel dichter anordnen können. In Abbildung 9 sind die erhaltenen Dichten von Holzschäumen dargestellt, die mit drei unterschiedlichen Rezepturen, um die Dichte einzustellen, und mit einer Ausgangsmasse mit unterschiedlichen Mahlgraden hergestellt wurden.

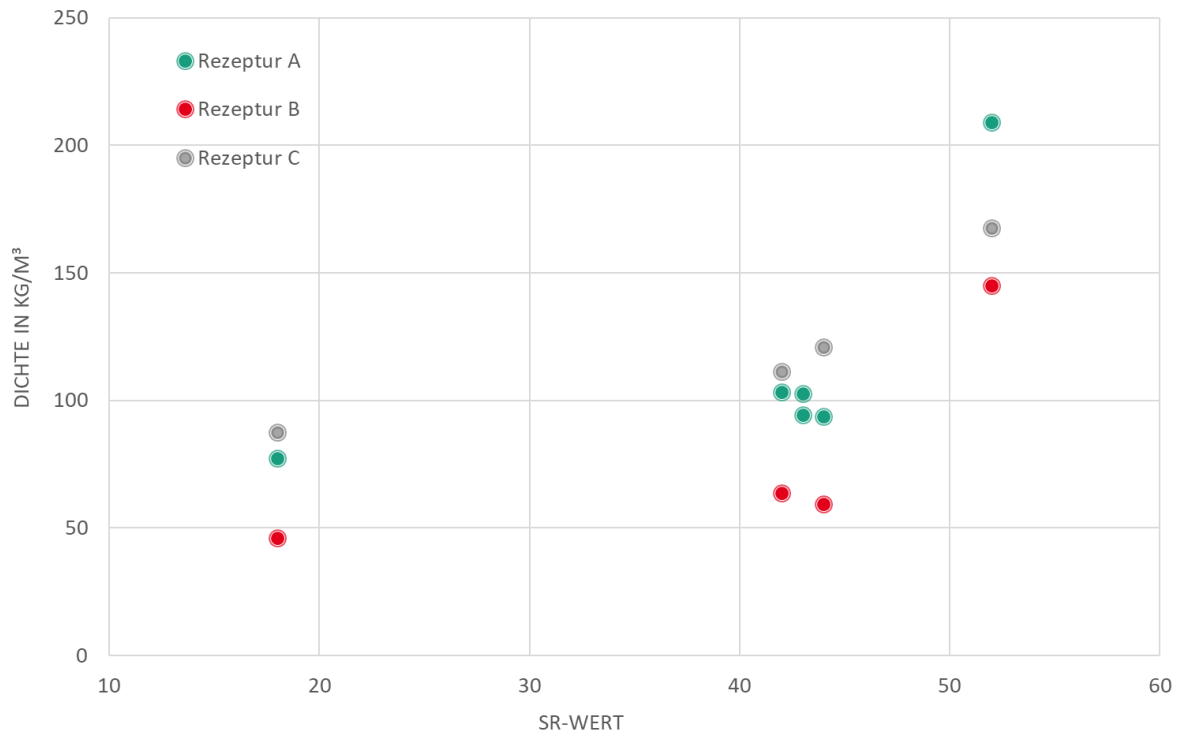


Abbildung 9: Abhängigkeit der Dichte vom Mahlgrad

Aus der Cellulose entsteht nach der finalen Trocknung das festigkeitsbildende Gerüst, wobei die freigelegten Holzinhaltsstoffe für die Verklebung sorgen. Für den Zusammenhalt der Partikel ist daher kein synthetischer Klebstoff notwendig, der zu einer potenziellen gesundheitlichen Belastung durch Emissionen führen könnte. Aufgrund der hohen Wassermenge ist die Trocknung bisher jedoch sehr zeitintensiv, was aber in Zukunft durch andere Trocknungstechniken wie Mikrowelle oder auch Hochfrequenz Trocknung minimiert werden kann.

Als Endprodukt entsteht ein druckfester offenporiger Holzschäum, der aus 100 % Holz besteht und ohne Klebstoff gebunden ist (Abbildung 10). Der Werkstoff ist als Hartschaumplatte weiterzuverarbeiten und wie andere Holzwerkstoffe einfach zu bearbeiten, wobei es kaum zu einer Staubbildung kommt. Als ein weiterer Vorteil ist die Geruchsneutralität der hergestellten Holzschäume zu nennen.



Abbildung 10: Holzschäum mit unterschiedlichen Dichten

5.2 Allgemeine Eigenschaften

Die Eigenschaften der Holzschäume hängen relativ stark von der Dichte der Holzschäume ab. Die Dichte wird über die Rezeptur eingestellt. Dabei kann die Menge an Schäumungsmittel, die Konzentration an Katalysator zur Aktivierung der holzeigenen Bindungskräfte, als auch der Feststoffgehalt der aufzuschäumenden Masse variiert werden. Auch die Holzart hat einen Einfluss auf die Eigenschaften der Schäume, da die Geometrie der Fasern von Baumart zu Baumart unterschiedlich ist. Somit wurden zur Optimierung der Eigenschaften unterschiedliche Schäume hergestellt.

Laub- und Nadelhölzer zeigen unterschiedliche Strukturen und chemische Zusammensetzungen auf. Die Faserlänge ist bei Nadelhölzern bei gleicher Zerkleinerung größer als bei Laubhölzern. Die Zusammensetzung der Holzinhaltsstoffe unterscheidet sich ebenso, so dass sich bei der Vorbehandlung der Hölzer unterschiedliche Sekundärstoffe bilden, die sich entweder besser oder schlechter zu holzeigenen Bindungskräften aktivieren lassen. Dieses sind vor allem sehr unterschiedliche Zuckerarten.

Als Vergleich wurde Buche- und Kiefernholz als Ausgangsmaterial eingesetzt. Diese Hölzer wurden zu einer Faserdispersion mit gleichen Prozessparametern verarbeitet. Der SR-Wert der Buche betrug 60 und der von Kiefer 70. Dies sagt aus, dass die Kieferfasern eine bessere Fibrillierung aufzeigen als Buche.

Aus diesen Fasersuspensionen wurden Schäume mit unterschiedlichen Dichten hergestellt. Die Dichte wurde eingestellt durch die Menge des Schäumungsmittels. Je mehr eingesetzt wurde, umso niedriger ist dann die Dichte des Schaums. Es wurde zum einen die Querkzugfestigkeit nach DIN EN 1607 und die Druckfestigkeit bei 10 % Stauchung nach [DIN EN 826] gemessen. Der Wert der Querkzugfestigkeit gibt einen Hinweis auf die Bindung zwischen den Fasern. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Querkzugfestigkeit als auch die Druckfestigkeit mit der Dichte des Schaums ansteigt

(Abbildung 11). Bei niedrigen Dichten ist die effektive Kontaktfläche zwischen den Fasern sehr gering, damit können die holzeigenen Bindungskräfte zwischen den Fasern nur gering ausgebildet werden und auch die mechanische Verhakung der Fasern ist unzureichend. Die Druckfestigkeit ist aufgrund der größeren Hohlräume bei einer geringen Dichte niedrig, da zunächst die Hohlräume bei der Prüfung zusammengestaucht werden. Daher ist der Unterschied zwischen Buche und Kiefer bei geringen Dichten gering ausgeprägt. Nur die Querkzugfestigkeit gibt einen Hinweis darauf, dass bei der Kiefer die Bindungen, sowohl chemische als auch mechanische, stärker sind als bei Buche. Bei höheren Dichten sind deutliche Unterschiede zwischen beiden Baumarten zu erkennen. Sowohl die Querkzugfestigkeit als auch die Druckfestigkeit der Schäume, hergestellt aus Kieferfasern, sind deutlich höher.

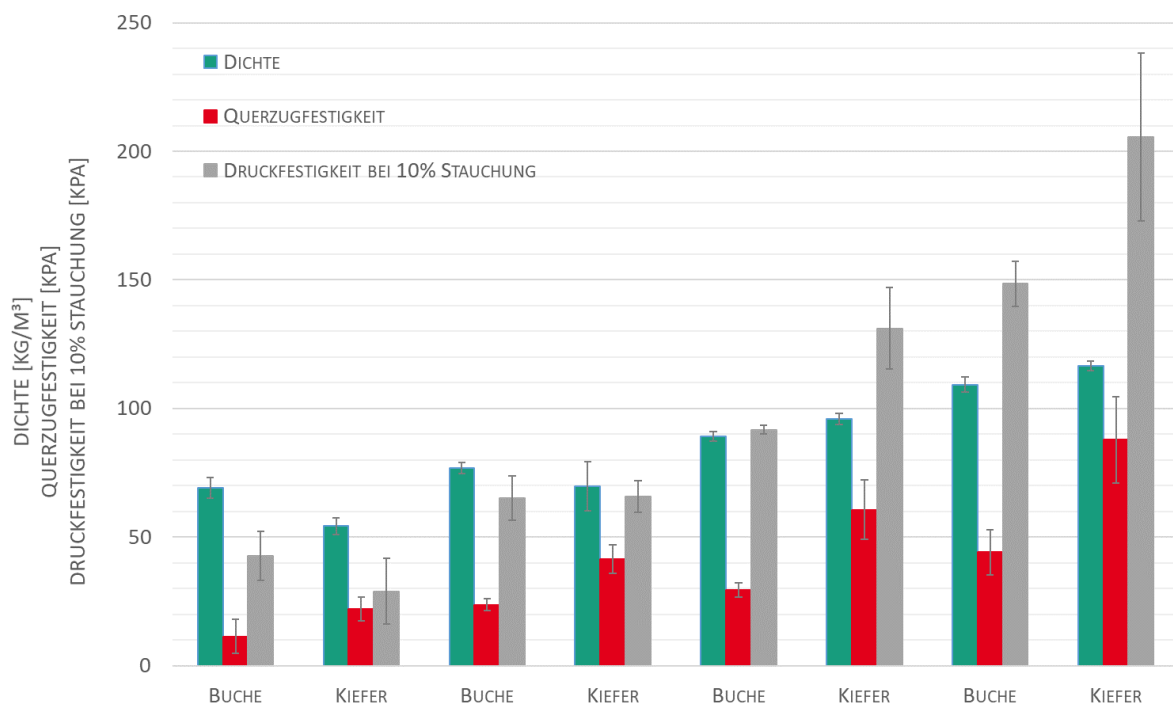


Abbildung 11: Querkzugfestigkeiten und Druckfestigkeiten von Schäumen aus Buchen- und Kiefernfasern

Die Biegefestigkeit nach DIN EN 12089 (Tabelle 1) der Holzschäume ist sehr gering. Hierbei konnten nur Schäume mit einer relativ hohen Dichte geprüft werden:

Tabelle 1: Biegefestigkeit von Holzschäumen aus Buchenfasern

Holzart	Dichte	Biegefestigkeit (DIN EN 12089) in kPa	E-Modul in kPa
Buche	150	172	37300
Buche	120	124	24900

Aufgrund der relativ hohen Druckfestigkeiten und der sehr niedrigen Biegefestigkeit ist der Holzschaum als Mittelschicht in Sandwichelementen sehr gut geeignet. Die Deckschichten geben die

benötigen Biegefestigkeiten und aufgrund der hohen Druckfestigkeit bleibt der Holzschaum in einem Sandwichelement formstabil.

Aufgrund der unterschiedlichen Holzinhaltsstoffe von Buche und Kiefer wird auch die Wasseraufnahme der Schäume dadurch beeinflusst. Die Wasseraufnahme wurde nach [DIN EN 1609] bestimmt. Die Wasseraufnahme der Holzschäume ist aufgrund der offenporigen Struktur im Allgemeinen sehr hoch (Abbildung 12). Kiefernholz beinhaltet aber mehr Harze, die wasserabweisend wirken. Dieses wirkt sich auch auf die Wasseraufnahme der Holzschäume aus Kiefernfasern aus. Die Wasseraufnahme dieser Schäume ist im Vergleich zu Schäumen aus Buchenfaser sehr viel geringer.

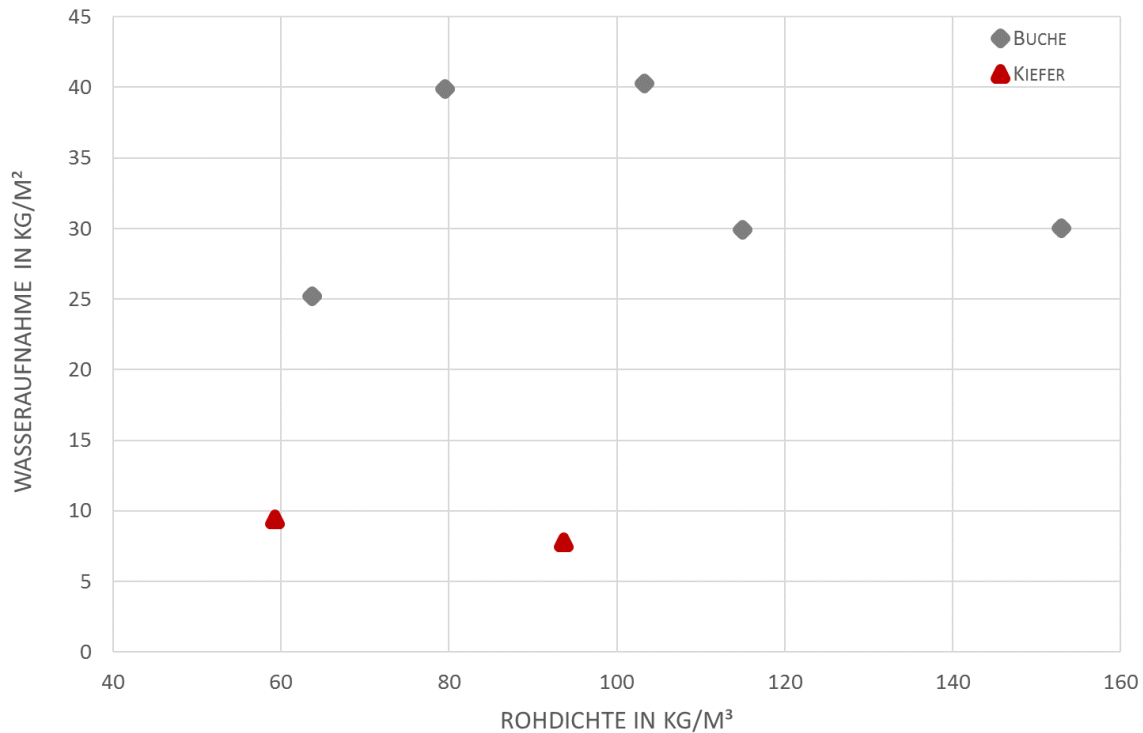


Abbildung 12: Wasseraufnahme von Holzschäumen

Eine weitere positive Eigenschaft von Holzschäumen ist aufgrund der offenporigen Struktur die hohe Schallabsorption. Der Schallabsorptionskoeffizient wurde mittels der Methode des Kundtschen Rohres bestimmt (Abbildung 13). Es wurden zwei Holzschäume mit unterschiedlichen Dichten gemessen. Die Dicke der eingesetzten Proben war 30 mm. Zum Vergleich wurden zwei EPS-Schäume mit unterschiedlichen Probendicken gemessen. Je dicker eine Probe ist, desto höher ist der gemessene Schallabsorptionskoeffizient. Der Schallabsorptionskoeffizient wurde bei steigenden Frequenzen gemessen. Der Holzschaum mit der höheren Dichte von 150 kg/m³ und einer Probendicke von 30 mm zeigt einen ähnlichen Verlauf des Schallabsorptionskoeffizienten wie eine EPS-Probe mit einer vergleichbaren Probendicke von 30 mm. Ein Holzschaum mit einer niedrigen Dichte von 70 kg/m³ und einer Probendicke von 30 mm zeigt hingegen einen ähnlichen Schallabsorptionskoeffizientenverlauf wie eine EPS-Probe mit einer Dicke von 80 mm. Somit zeigt sich, dass ein Holzschaum mit einer niedrigen Dichte eine höhere Schallabsorption aufgrund der offenporigen Struktur aufweist als ein üblich eingesetzter EPS-Schaum. Damit könnte bei Verwendung von Holzschäum die Dicke des Akustikmaterials verringert werden.

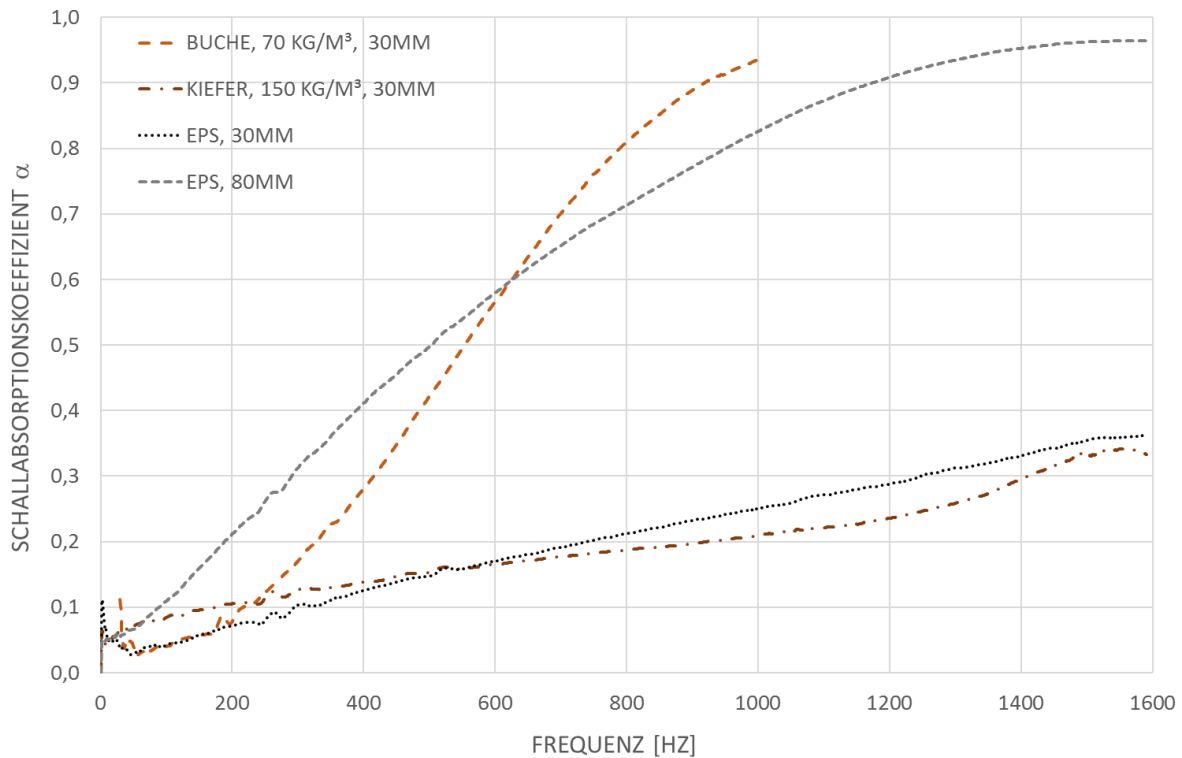


Abbildung 13: Schallabsorption von Holzschäumen

Um den Holzschaum als Dämmmaterial einsetzen zu können, ist auch die Frage des Brandverhaltens eine immer wiederkehrende. Es wurden Brandversuche in Anlehnung an DIN 4102 durchgeführt. Es zeigte sich, dass das Brandverhalten der Holzschäume weder von der Holzart noch von der Dichte abhängig ist. Die Brennweite nach Erlöschen der Flamme darf nach 20 s nicht weiter als 150 mm betragen, um die Brandklasse B2 und damit „normalentflammbar“ zu erreichen. Dieses Kriterium wurde erreicht: Die Flamme erlischt selbstständig nach ca. 18 s und die Brennweite beträgt ca. 120 mm (Abbildung 14). Ein Glimmen konnte bei diesem Test nicht festgestellt werden.

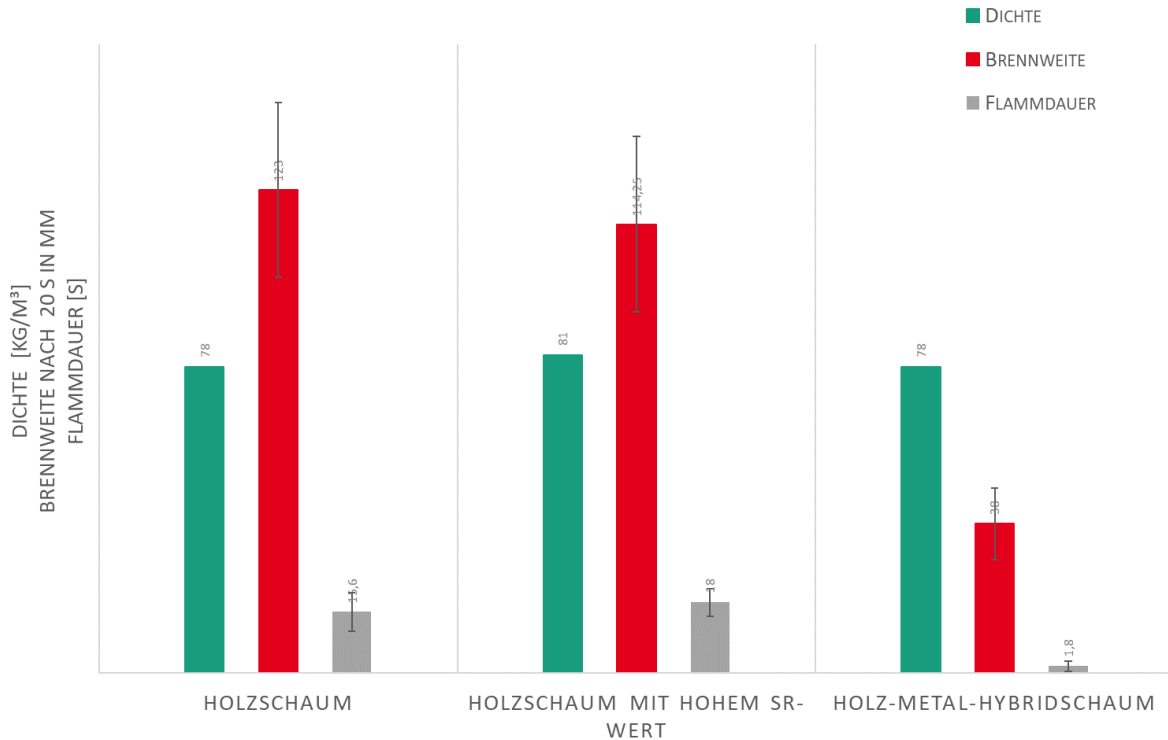


Abbildung 14: Ergebnisse von Brandversuchen in Anlehnung an DIN 4102 (B2-Test)

Diese allgemeinen Ergebnisse zeigen gute Voraussetzungen für eine Verwendung als Dämmstoff. Dennoch sind einige Eigenschaften des Holzschäums noch nicht optimal und müssen verbessert werden.

5.3 Optimierung der Rezeptur

Die in Kapitel 5.2 genannten Eigenschaften der Holzschäume beruhen auf Rezepturen, aus denen Holzschäume hergestellt wurden, die aus 100 % Holz bestehen. Nun können die Eigenschaften durch Additive verbessert werden. Ziel war es, nur geringe Mengen an petrochemischen Additiven einzusetzen, um immer noch ein ökologisches Produkt zu erhalten. Neben Querkzugfestigkeit und Druckfestigkeit wurde auch die Wärmeleitfähigkeit der erhaltenen Schäume gemessen. Aufgrund des besseren Handlings wurden Schäume im Dichtebereich von 70-150 kg/m³ hergestellt.

Zunächst wurde versucht, natürliche Additive einzusetzen wie z.B. Stärke, die auch in der Verpackungsindustrie als Klebstoff eingesetzt wird. Nun zeigte sich, dass die Zugabe von Stärke weder einen Einfluss auf die Querkzugfestigkeit wie auch auf die Druckfestigkeit hat (Abbildung 15). Es wurde beobachtet, dass bei gleicher Rezeptur die Zugabe von Stärke die resultierende Dichte des Holzschäums erhöht. Wahrscheinlich füllt die Stärke die beim Aufschäumen entstehenden Hohlräume aus. Dies erklärt dann auch die erhöhte Wärmeleitfähigkeit der Schäume mit Stärke, da weniger isolierende Hohlräume vorhanden sind. Damit zeigte sich Stärke als nicht geeignet.

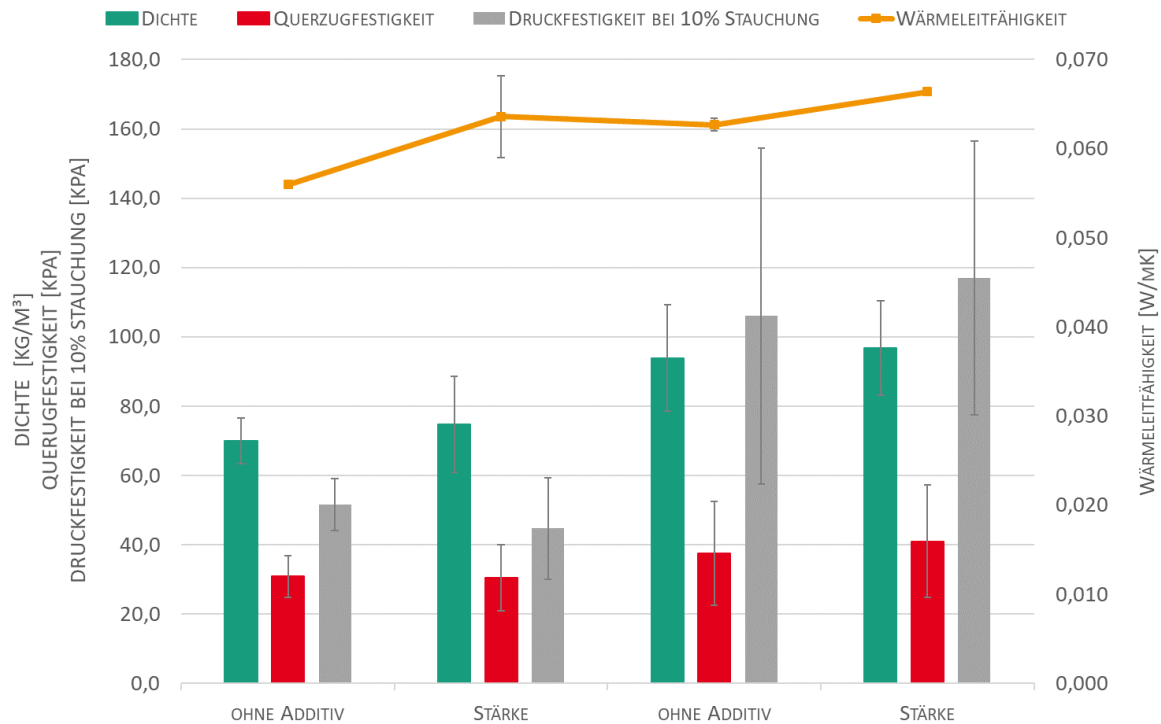


Abbildung 15: Vergleich Holzschäume mit und ohne Stärke

Ein weiteres Additiv, dass in der Holzwerkstoffindustrie teilweise eingesetzt wird, ist das Glutaraldehyd. Glutaraldehyd wird bei der Herstellung von Holzwerkstoffen eingesetzt, um die Festigkeiten zu erhöhen. Glutaraldehyd reagiert mit den OH-Gruppen der Holzinhaltsstoffe und da es zweibindig ist, wirkt es so als Vernetzer. Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringe Menge an Glutaraldehyd die Querkzugfestigkeit und die Druckfestigkeit stark erhöht bei gleichbleibender Dichte. Die Wärmeleitfähigkeit wird durch den Einsatz von Glutaraldehyd nicht beeinflusst, so dass Glutaraldehyd als Vernetzer zur Steigerung der Festigkeit einsetzbar ist.

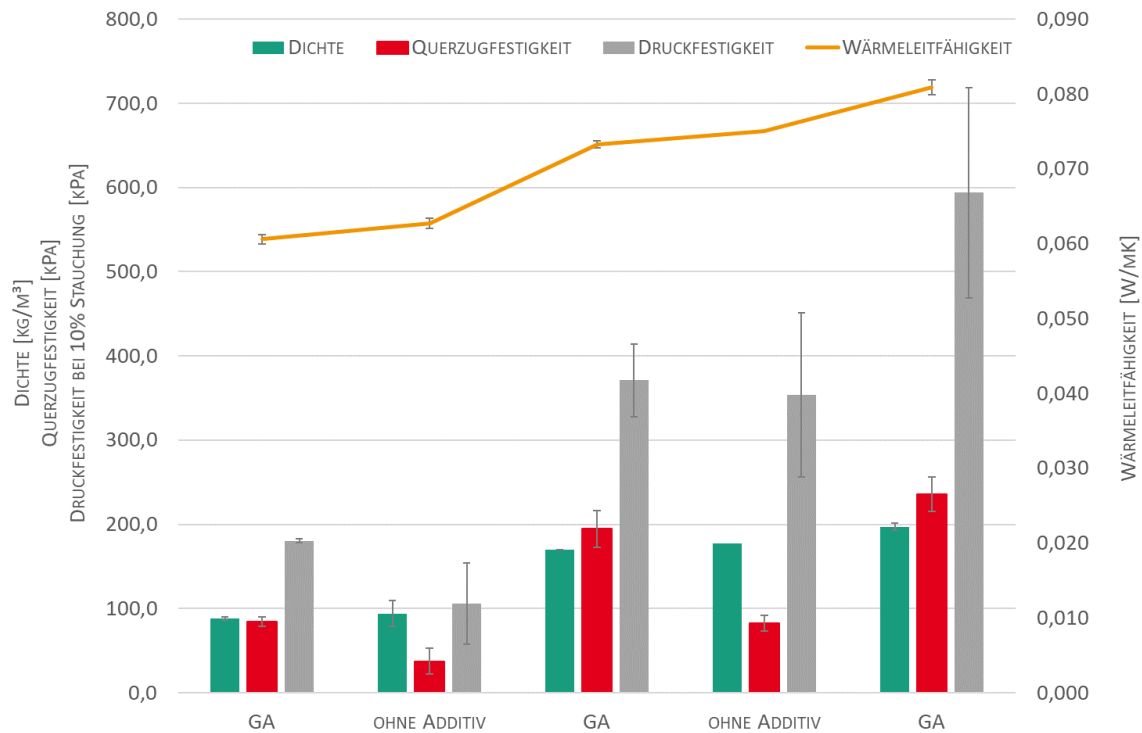


Abbildung 16: Vergleich Holzschäume mit Glutaraldehyd (GA) und ohne Zusatz

Ein weiteres Additiv zur Verbesserung der Eigenschaften wurde in Form von Nanoclay eingesetzt. Nanoclay zeigte in verschiedenen Einsatzgebieten Vorteile aufgrund der geringen Größe, der hohen Oberflächenenergie und der ungesättigten Bindungen an der Oberfläche. Dadurch könnte das Brandverhalten und die mechanische Festigkeit verbessert werden. Somit wurde 2,5 % Nanoclay bei der Herstellung der Holzschäumvarianten eingesetzt. Es zeigte sich, dass Nanoclay diese Vorteile bei Holzschäum nicht hervorbringen konnte. Mit Nanoclay ist die Festigkeit der Holzschäume so gering, dass diese beim Handling fast auseinanderfallen und die Querzugfestigkeit nicht bestimmt werden konnte (Abbildung 17). Grund hierfür könnte die Anlagerung des Nanoclays auf der Faseroberfläche sein, so dass die Oberfläche glatt wird und ein mechanisches Verhaken nicht mehr möglich ist. Daher wurde versucht, Nanoclay mit Glutaraldehyd zu kombinieren. Auch hier zeigte sich aber, dass die mit Glutaraldehyd erhaltenen erhöhten Festigkeiten durch Anwesenheit von Nanoclay wieder sinken. Dennoch ist eine Verbesserung im Vergleich zu einem Schaum ohne Additiv zu erkennen. Bei Zugabe von Nanoclay konnte die Wärmeleitfähigkeit reduziert werden. Somit ist der Einsatz von Nanoclay prinzipiell möglich. Dabei ist aber ein relativ hoher Preis des Additivs Nanoclay zu bedenken und man daher abwägen muss, ob die Eigenschaftsverbesserungen tatsächlich so gravierend sind, um dieses hochpreisige Additiv einzusetzen.

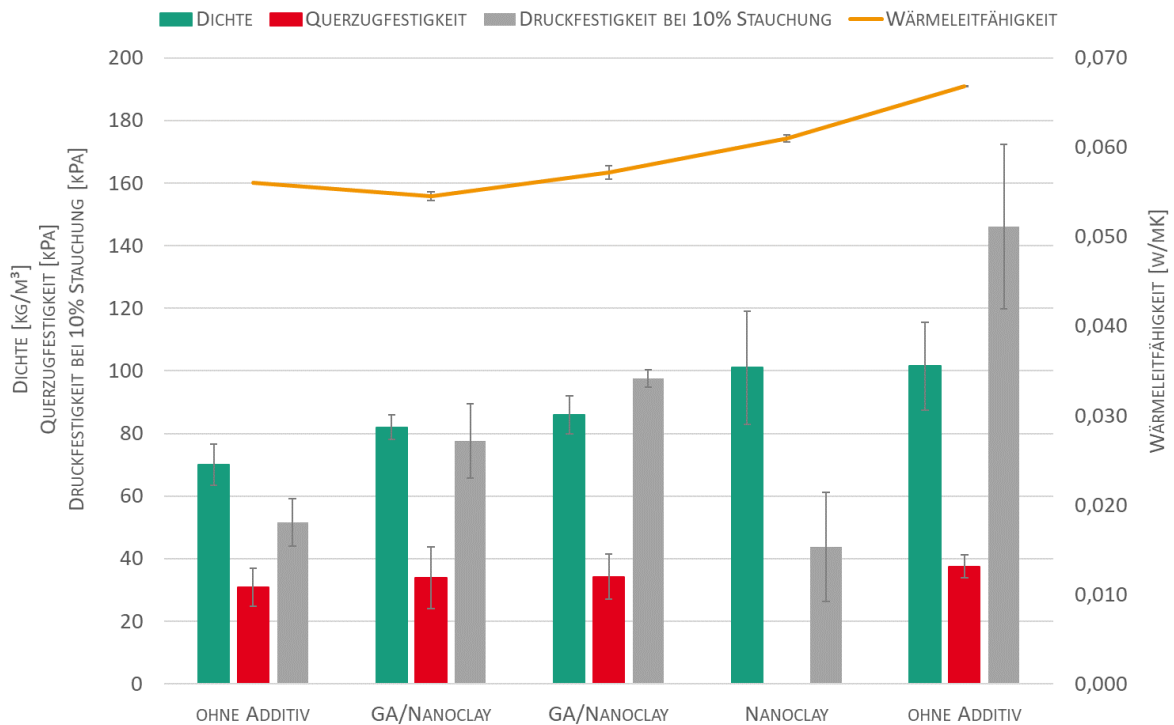


Abbildung 17: Vergleich Holzschaume mit Nanoclay, Nanoclay/Glutaraldehyd (GA) und ohne Zusatz

Um die Wasseraufnahme der Schäume zu reduzieren, wurden diese unterschiedlich mit Silanen behandelt. Hierzu wurden eine Silan-Ethanol-Lösung und eine Silan-Hexan-Lösung eingesetzt. Zwei unterschiedliche Techniken wurden angewandt. Die Holzschaume wurden in die Lösungen eingedippt und dann getrocknet bzw. die Holzschaume wurden mit den Lösungen besprüht und dann getrocknet. Eine Imprägnierung des Holzschaumes mit einer Silan-Hexan-Lösung zeigt eine deutliche Reduzierung der Wasseraufnahme unabhängig von der Behandlungstechnik (Abbildung 18). Mit einer Silan-Ethanol-Lösung wurde nur eine Reduzierung der Wasseraufnahme durch Dippen, also durch vollständige Imprägnierung, erreicht.

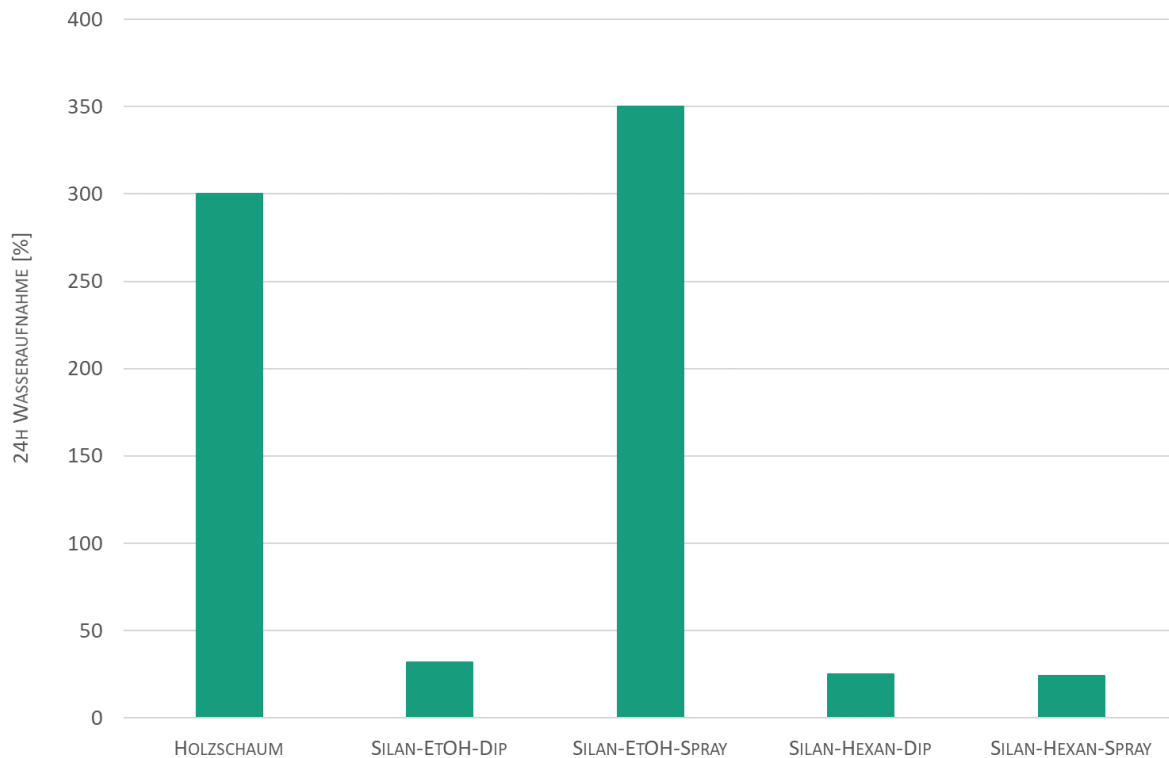


Abbildung 18: Wasseraufnahme von Holzschäumen nach Behandlung mit Silan

Damit kann die Wasseraufnahme von Holzschäum durch einfache Nachbehandlung durch Sprühen stark reduziert werden, so dass ein möglicher Pilzbefall durch ständige Feuchte minimiert werden kann.

6 Herstellung der Sandwichelemente

Für die Herstellung der Sandwichelemente wurden Holzschäume einmal aus Kieferfasern und einmal aus Buchenfasern für die Versuche hergestellt. Um zunächst einmal die Beschichtung mit einem Textilbeton testen zu können, wurden Holzschäume mit einer relativ hohen Dichte hergestellt, da diese eine höhere Festigkeit aufweisen und damit besser zu handhaben sind. Auch wurden zunächst keine Additive hinzugesetzt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Rezepturen und resultierende Dichten hergestellter Holzschäume (500x500x60mm)

Schaum-Nr.	Holzart	Mahlgrad (SR-Wert)	Protein	H ₂ O ₂	Dichte
1	Kiefer	73	20%	35%	90 kg/m ³
2	Buche	78	20%	35%	123 kg/m ³

Auch hier ist zu erkennen, dass bei gleicher Rezeptur dennoch mit unterschiedlichen Holzarten unterschiedliche Dichten resultieren. Die Buche weist bei gleicher Vorbehandlung einen etwas höheren Mahlgrad auf als Kiefer. Die Fasern sind etwas kürzer, so dass eine höhere Dichte erhalten wird, da beim Trocknungsprozess eine größere Schwindung erfolgt, als bei Kieferfasern. Längere Kieferfasern können die Schaumstruktur aufgrund besserer Verhakung der Fasern beim Trocknen halten, so dass dieser Schaum eine geringe Schwindung aufzeigte.

Für die Herstellung von Sandwichbalken (100 x 1000 mm) für die Biegeprüfungen wurde zunächst versucht, einzelne Balken aus Holzschaum herzustellen. Aufgrund der Schwindung beim Trocknen war es nicht möglich, einzelne Balken in zufriedenstellender Qualität herzustellen. Daher wurden größere Holzschaumplatten mit Abmessungen von 500 x 1000 x 80 mm bzw. 500 x 1000 x 50 mm in dafür vorgefertigte Formen hergestellt. Es wurde eine Dichte von 70 kg/m³ eingestellt, um relativ feste Holzschäume zu erhalten. Die erhaltenen Holzschäume wurden nach dem Trocknen in Balken 100 x 1000 mm geschnitten und mit Textilbeton beschichtet. Um die Festigkeit der Holzschäume zu erhöhen und das Schwinden bei der Trocknung zu reduzieren, wurden zu den fein gemahlenden Fasern 30 % TMP-Fasern hinzugegeben. Folgende Rezepturen wurden hierfür verwendet:

Tabelle 3: Rezepturen Holzschäume für Biegeprüfungen

Schaum-Nr.	Holzart	Mahlgrad (SR-Wert)	Protein	H ₂ O ₂	Dichte
3	Kiefer	70	20%	20%	66 kg/m ³
4	Kiefer	75	12%	10%	72 kg/m ³
5	Buche	80	12%	10%	72 kg/m ³

Die Rezepturen wurden an den Mahlgrad angepasst, um vergleichbare Dichten zu erhalten.

Zur Herstellung von Sandwichplatten analog von Fassadenelementen beim Projektpartner Universalbeton Heringen GmbH wurden weitere Holzschaumplatten in den Abmessungen 500 x 1000 mm in zwei verschiedenen Plattenstärken (50 mm und 75 mm) hergestellt. Auch hier wurden als Verstärkung 30 % TMP-Fasern eingesetzt.

Tabelle 4: Rezepturen Holzschäume für Fassadenelemente

Schaum-Nr.	Holzart	Mahlgrad (SR-Wert)	Protein	H ₂ O ₂	Dichte
6	Kiefer	75	20%	20%	75 kg/m ³
7	Kiefer	75	12%	10%	73 kg/m ³

Ausgangsbasis für die Herstellung von Sandwichelementen im Projekt waren daher stets fertig aufgeschäumte und erhärtete, trockene Holzschaumplatten in unterschiedlichen Dichten und Dicken. Diese sollten durch adhäsive Anbindung an Sandwichdeckschichten aus Textilbeton zu Sandwichplatten ohne weitere Verbindungsmittel montiert werden. Dabei sollten möglichst dünnwandige Betonquerschnitte realisiert werden, um das Potenzial als leichtes Ausbauelement aufzuzeigen. Die adhäsive Anbindung kann allgemein durch Konstruktionsklebstoffe auf getrennt hergestellten Kern- und Deckschichtmaterialien erfolgen oder bei vorgefertigtem Holzschaukern auch im Gieß- oder Spritzverfahren von flüssigem Zement mit wirr eingemischten Kurzfasern sowie auf dem Holzschaukern vorgelegten Endlosfaser-Textilien. Weiterhin kann der Holzschaukern auch in offene Betonschalungen in den nassen Beton definiert eingedrückt werden. Die letzte Methode ist gängig bei prototypischen Anwendungen mit polymeren Schaukernen in verschiedenen Verfahrensvarianten, je nachdem, ob gut abgeformte Sichtbetonflächen aus Schalungen ein- oder beidseitig erzielt werden sollen. Im Fall des nassen Auftrags von Frischbeton aus Normalzementen sowie Schnellzementen auf Aluminat-Basis ist das Saugverhalten des Holzschauks ggf. nachteilig einzuschätzen, da dem Zementleim das Wasser zur sehr langsam fortschreitenden Hydratation entzogen werden könnte. Der schnell abbindende Aluminat-Zement ist dabei weniger gefährdet, weil der Festigkeitsaufbau um Größenordnungen schneller fortschreitet.

Die Faserverstärkung des Feinbetons mit Kurzfasern und Textilien als ebene Wirrfliese und Gewebe wurde mit handelsüblichen AR-Glasfasern der Firma DURAPACT ausgeführt. Folgende AR-Glasfasern kamen zum Einsatz:

- AR-Glasfaser, lose Kurzfasern zum Einmischen in den Frischbeton, AR-TEC 901 (2)-13, Type: integral, Schnittlänge: 13 mm, 2450 Tex, 18 μ , 200 Fil./Strang
- AR-Glasfaserwirrfließ: AR-Glasfasermatte, DURA-MAT 120/975, 120 g/m², wasserlöslicher Binder
- AR-Glasfasergewebe: Gittergewebe DURA-WEB HR 120 / 105, Masche 10x10 mm, 120 g/m²

Verschiedene Betonmischungen wurden für Sandwich-Deckschichten eingesetzt, basierend auf Vorschlägen aus dem Kreise der Projektpartnerfirmen Durapact, Universalbeton Heringen und Imerys Aluminates (früher: Kerneos), siehe nachfolgende Tabelle 5.

Tabelle 5 Feinbetonmischungen für textilbewehrte Sandwich-Deckschichten

Stoffbestandteil	Einheit	Feinbeton Rezeptur CEM III DURAPACT	Feinbeton Rezeptur CEM I UBH	Aluminat- Schnellzement IMERYS
Zementtyp		CEM III/B 42,5	CEM I 52,5 R oder N	Aluminat-Basis TERNAL EV
Zementgehalt (z)	kg/m ³	600	730	Fertigmischung
Silikastaub (s)	kg/m ³	300 (DURAPACT Konzentrat H)	38	
Flugasche (f)	kg/m ³		176	
Bindemittel (b = z+f+s)	kg/m ³	900	944	
Fließmittel Polycarboxylat	kg/m ³	18	29,3	
Zuschlag 0,2 - 0,6 mm	kg/m ³	864	1218	
Zugabewasser	kg/m ³	342	202,4	240 g Wasser pro Kg Mörtel
Wasser/Bindemittel- Wert (w/b)		0,38	ca. 0,27	
Kurzfasergehalt (KF)	% (Masse)	2	2	2

Textilbeton-Sandwiche mit konventionellen Polymerschäumen wurden schon umfassend untersucht und sind Stand der Technik. Der Schwerpunkt der Textilbeton-Deckschichtgeometrie wurde daher mit Rücksicht auf das zu untersuchende Holzschäumverhalten als neuartiger Kernwerkstoff bewusst auf sehr dünne Betonplatten von nur wenigen Millimetern Dicke gelegt, um in den Biegeprüfungen das komplexe Deformationsverhalten der Kerne zu beobachten und nicht durch dicke Betonschichten eher überdimensionierte Druckprüfungen auszuführen. Durch Beton-Deckschichtplatten von 2 bis 5 mm Dicke konnte auch ein günstiges Membranverhalten der Deckschichten, ähnlich der von metallischen Deckschichten in Sandwichbauteilen, erzielt werden. Ein Deckschichtversagen durch Zugrisse oder lokales Beulen wurde in den Biegeprüfungen nicht beobachtet, da stets ein Erstversagen durch Schubrisse im Querkraftbeanspruchten Kernwerkstoffbereich auftrat welches zum deutlichen Steifigkeitsverlust des Bauteils führte und eine weitere Steigerungen der Beanspruchung in den Deckschichten erst bei sehr großen Durchbiegungen ermöglicht hätte.

Neben den relativ dünnen Textilbeton-Deckschichten wurden vom Projektpartner Universalbeton Heringen auch Sandwichplatten analog von Fassadenelementen hergestellt. Hier wurden Betondeckschichten zwischen 15 und 20 mm eingestellt und diese durch mechanische

Verbindungsmittel zusätzlich fixiert. Punktförmige Verbundnadeln erfordern eine Mindestbetondicke in dieser Größenordnung um ausreichend im Beton verankert werden zu können.

Die folgenden Prozessrouten zur Herstellung der Sandwiche wurden näher untersucht:

1) Getrennte Herstellung von Kern und Betondeckschichten, anschließend kleben zum Sandwich

Vorteile:

- ausreichend getrocknete und erhärtete Substrate werden prozesssicher verbunden
- Schwindung des Betons ohne Auswirkung auf den Verbund

Nachteile:

- ggf. Formtrennstoffe auf Betonoberfläche
- zusätzlicher Prozessschritt
- zusätzlicher Werkstoff (Kosten und Recycling)

2) Direktes Aufgießen des Betons und Einbetten der textilen Verstärkung

Vorteile:

- wirtschaftlicheres Verfahren
- sehr dünne Betonschichten realisierbar

Nachteile:

- Feuchteregime ggf. ungünstig für Substrate im Verbund
- Weiterverarbeitung mit zweiter Deckschicht erst nach Erstarren der ersten Deckschicht möglich

3) Eine Variante zum direkten Verbinden des trockenen Holzschaumkerns mit flüssigem Frischbeton ist das definierte Eindrücken des Kerns in eine vorgelegte untere Betonschicht in einer passgenauen Form mit Rüttler. Nach dem Einlegen des Holzschaumkerns wird eine analoge obere Betondeckschicht gegossen. Diese Methode wurde beim Industrie-Partner Universalbeton Heringen in Anwendungsversuchen vor Ort ausgeführt.

Vorteile:

- wirtschaftlicheres Verfahren
- Herstellung des vollständigen Sandwiches in nur einer Sequenz

Nachteile:

- Feuchteregime ggf. ungünstig für Substrate im Verbund

6.1.1 1) Getrennte Herstellung der Betondeckschichten für das Kleben zum Sandwich nach vollständiger Erhärtung.

Zur Vermeidung einer Trennstoff-Kontamination der flachen Betonbretter wurden flache elastische Schalungen aus PVC-Kunststoff angefertigt, die nach dem Erhärten des Textilbetons elastisch deformiert werden konnten, um eine schädigungsfreie Entformung zu ermöglichen. Die Abmessungen der flachen Betonplatten hatten typisch 1000 x 110 x 4 mm, aus denen Sandwichdeckschichten mit einer typischen Länge von 880 mm gewonnen werden konnten. Die

textile Verstärkung der 4 mm dicken Normal-Zement-Betonplatten vom Typ CEM III und CEM I wurden in zwei Varianten ausgeführt:

- 2 % Kurzfasern (Mass.-%) im Frischbeton eingerührt,

Weiterhin: Anordnung von Vliesen (Kürzel V) und Geweben (Kürzel G) in den

- Varianten: unten V, mitte G, oben V als 1-lagige Gewebeverstärkung (VGV),
- sowie der Variante: unten G, mitte V, oben G als 2-lagige Gewebeverstärkung (GVG)

Die Wirkung der verschiedenen Formtrennstoffe auf typische Konstruktionsklebstoffe (Epoxidharze, PUR, Acrylate) ist z. Teil unbekannt. Formtrennstoffe der Betonfertigteilherstellung beeinflussen die Kleberoute generell ungünstig, verschiedene Formtrennstoffe sind im Einsatz in Fertigteilwerken. Klebgerechte Betonoberflächen sollten daher ohne Formtrennstoffe in kunststoffbeschichtete Holzschalungen gefertigt werden, welche bei bestimmten Anforderungen neben typischen Stahlschalungen eingesetzt werden, jedoch auch wenn nur kleine Bauteilserien und komplexe Geometrien zu realisieren sind. Trotz entnetztem Verhalten der Kunststoffoberflächen kann das Entformen aufgrund von Anhaftungen des erstarrten Betons erschwert sein, was in der Regel zum schnellen Verschleiß der Holzschalungen führt.

Kleben zum Sandwich erfolgt typisch mit ein- oder zwei-komponentigen Konstruktionsklebstoffen im Kaltklebverfahren (1K- oder 2K-Kleben). Hier steht eine große Bandbreite an unterschiedlichen Klebstoffen zur Verfügung, je nach Festigkeitsanforderung oder Umgebungsbedingungen können preiswerte oder hochwertige Klebstoffe ausgewählt werden. Bei der Verarbeitung sollte auf eine möglichst lange offene Zeit geachtet werden, um ein vorzeitiges Abbinden speziell bei warmer Witterung zu vermeiden. Für witterungsbeständige Klebungen werden 2K-Polyurethanklebstoffe empfohlen, die gut spaltfüllend sind und strukturell fest abbinden. Im Projekt wurde der 2K-PUR Klebstoff SikaForce 7710 L35 von Sika mit gutem Eigenschaftsspektrum für das Sandwichkleben eingesetzt. Die Verarbeitungsviskosität ist bei einer Mischviskosität von ca. 10.000 mPas ausgewogen bei einer Topfzeit von ca. 35 Minuten lassen sich einzelne Sandwichelemente manuell gut verarbeiten. Nach einer Mindestpresszeit von ca. 125 min können Sandwichplatten aus dem Montagebereich transportiert werden.

Für geringere Umweltansprüche speziell im Innenbereich von Wohngebäuden oder Industriebauten können preiswertere Klebstoffe wie z. Bsp. für den Möbelbau eingesetzt werden. Weißleime sind 1K-Klebstoffdispersionen auf Wasserbasis. Durch Abtrocknen bindet das Polymer ab. Varianten des Weißleims sind auch in feuchtebeständiger Formulierung erhältlich. Aufgrund des relativ hohen Wasseranteils sind Weißleime nicht so gut spaltüberbrückend, d.h. Kavitäten können nicht zuverlässig mit Klebstoff aufgefüllt werden. Das Produkt PONAL von Henkel wurde für die Klebungen auf Basis von PVAC untersucht.

6.1.2 2) Direktes Aufgießen des Betons und Einbetten der textilen Verstärkung

Ohne Formtrennstoffe kommt das direkte Aufgießen eines flüssigen Betons auf die Holzschaumschicht aus und nutzt die direkte Haftung durch Benetzung und Verfüllen der Holzschaumporen. Analog zur Herstellung mit getrennten Betondeckschichten werden Kurzfaserverstärkung und textile Bewehrung mit Vliesen und Geweben realisiert und in den Varianten VGV als 1-lagig und GVG als 2-lagig Gewebeverstärkt ausgeführt.

6.1.3 3) Definiertes Eindrücken des Kerns in eine flüssige untere Betonschicht in einer passgenauen Form mit Rüttler, anschließendes Aufgießen der oberen Deckschicht

Ebenfalls ohne Formtrennstoffe kommt das definierte Eindrücken des trockenen Holzschaukerns in den flüssigen Beton aus, der Aufbau der Haftung erfolgt analog zum Gießen. Textile Verstärkungen werden in Form von weitmaschigen Gelegen oder Geweben in den Frischbeton eingedrückt.

Die Verfahrensschritte werden anhand der folgenden Bildsequenz deutlich,



Abbildung 19 Herstellungssequenz eines Sandwiches durch Eindrücken in Frischbeton und anschließendem Aufgießen der oberen Deckschicht in passgenauer Form (Variante 3, Quelle: Universalbeton Heringen)

6.2 Untersuchung der Deckschichthaftung in Druckschubprüfungen

Im Vergleich zu echten zellförmigen Schaumwerkstoffen begünstigt die sehr offenporige Struktur des Holzschaums die Penetration von niedrigviskosen Bindemitteln in die Oberfläche mit einer mittleren Eindringtiefe von wenigen Millimetern ohne Zuhilfenahme von Anpressdruck. Dies wurde mit handelsüblichen Klebstoffen auf PUR- und PVAC-Basis beobachtet, auch die verwendeten Zementleime als Frischbeton auf Aluminat-Basis und Normalzementen auf CEM III und CEM I-Basis sind in der Lage, geringfügig in die Holzschaumoberfläche einzudringen und sich beim Abbinden dort zu verankern, siehe Abbildung 20. Damit beruht die Verbindung neben der adhäsiven Anbindung auch nicht unerheblich auf dem Formschluss in der rauen Oberfläche. Diese beiden Anteile (Adhäsion und Formschluss) in der Grenzschicht quantitativ zu unterscheiden, trifft jedoch auf größere Schwierigkeiten, für eine technologische Aussage zur Haftwirkung der Verbindung ist die Summe der Teilwirkungen relevant, um eine Aussage zwischen „unkontrolliertem adhäsivem Versagen“ oder „sicherem Bruch in den Fügeteilen“ zu treffen.

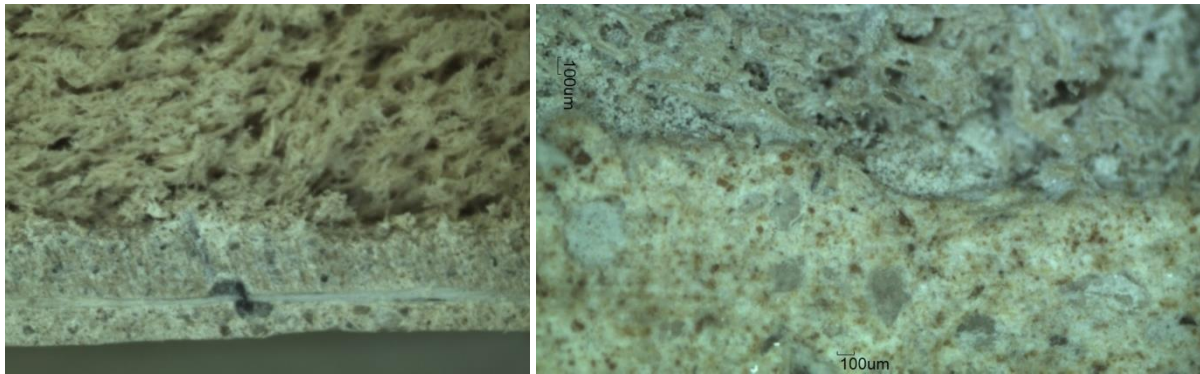


Abbildung 20 Glasfaserverstärkte Aluminat-Beton Deckschicht (jeweils unten angeordnet) auf Holzschaum, ca. 2 mm stark (links), Detail der Grenzschicht, in Übergangszone Holzschaumfasern mit Zement durchdrungen

Die Haftung zwischen Holzschaum und Betondeckschichten wurden durch eine kombinierte Druck-Schub-Prüfung experimentell untersucht. Untersuchungen zu geklebtem Beton werden wegen der ausgeprägten Zugspannungs-Empfindlichkeit häufig in einer kombinierten Druck-Schub-Konfiguration ausgeführt, Beispiele aus der Literatur sind in Abbildung 21 wiedergegeben

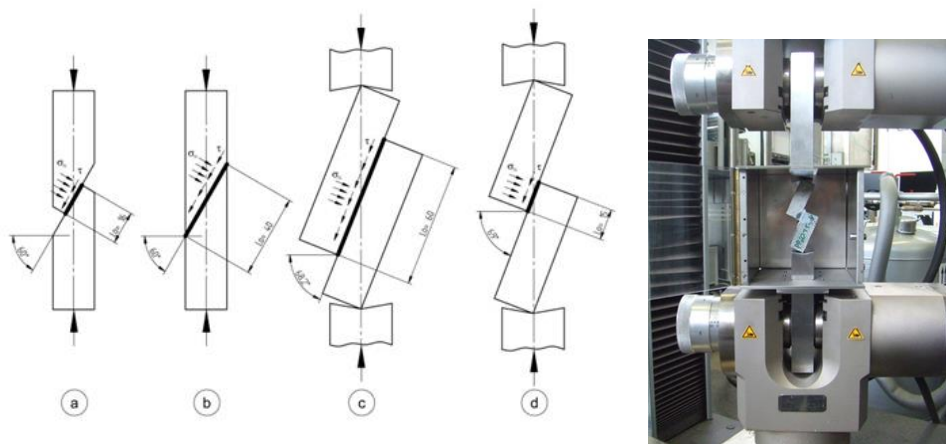


Abbildung 21 Verschiedene vorgeschlagene Probenformen für Druck-Schub-Prüfungen

Um die geringe Schubfestigkeit im Holzschaum zu berücksichtigen wurde eine Konfiguration mit relativ großer Überlappfläche ausgewählt, während das Holzschaumsubstrat selbst möglichst dünn

ausgebildet wurde, um die Schubspannungen dominant in den beidseitigen Haftflächen und im Substrat zu halten. Der Holzschaum selbst kann für die Lasteinleitung im Prisma nicht genutzt werden. Der Schichtaufbau der Druck-Schub-Probe ist in Anlehnung an Holz-Beton-Verbundproben in Abbildung 22 dargestellt, die Substratabmessungen betragen:

Substratabmessungen: 80 mm x 50 mm x 20 mm (Länge x Breite (Tiefe) x Dicke)

Damit wird eine Überlappfläche von 60 mm x 50 mm untersucht. Die Prüfungsgeschwindigkeit der aufgetragenen Druckkraft in einer Universal Zug-Druck-Prüfmaschine ist quasistatisch mit 1 mm / min.

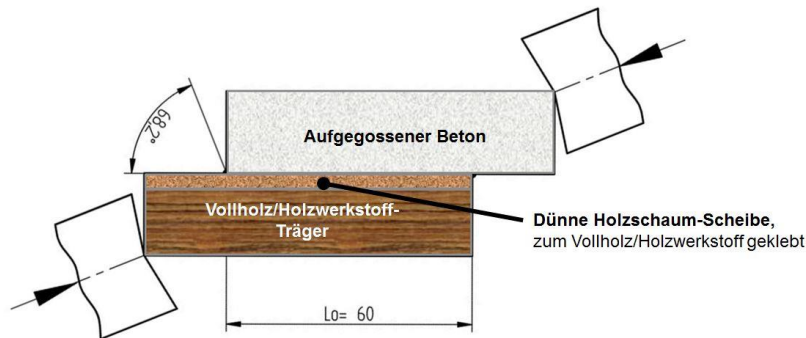


Abbildung 22 Druck-Schub-Probe zwischen Lasteinleitungsprismen für Ermittlung der Haftung zwischen Deckschicht und Holzschaum, Prinzip (links), Experiment (rechts)

Beispielhaft sind die Druck-Schub-Prüfungen einmal von mit 2K-PUR geklebten CEM III-Deckschichten und einmal in flache 4 mm dicke Aluminat-Frischzementschichten eingedrückten Buchenholzschaumscheiben mit 5 mm Dicke gegenüber gestellt. Die ausgehärteten flachen Aluminat-Zementscheiben wurden anschließend mit 2K-PUR Klebstoff auf Betonklötze geklebt, um eine weitgehend steife antimetrische Druck-Schub-Probe zu erhalten. Buchenholzschaumscheiben mit 5 mm Dicke wurden nach Untersuchungen zur Eindringtiefe der verwendeten Klebstoffe und Frischzemente ausgewählt. Dabei wurde eine typische Eindringtiefe in der Größenordnung bis 2 mm häufig beobachtet, dann die 2,5-fache mittlere Eindringtiefe als Holzschäumscheibe festgelegt, um ein Durchpenetrieren und Kontakt mit Haftung auf der gegenüber eingedrungenen Kleb- oder Mörtelschicht auszuschließen. Die so präparierten Proben sind in den Varianten Holzschäumscheibe nass in Aluminat-Zement (Farbe beige) gedrückt sowie mit 2K-PUR geklebt auf CEM III-Betonscheibe hergestellt worden, siehe Abbildung 23. Nachfolgend wurden noch annähernd symmetrisch dicke Klötze aus Beton oder Spanplatten mit dem 2K-PUR aufgeklebt.

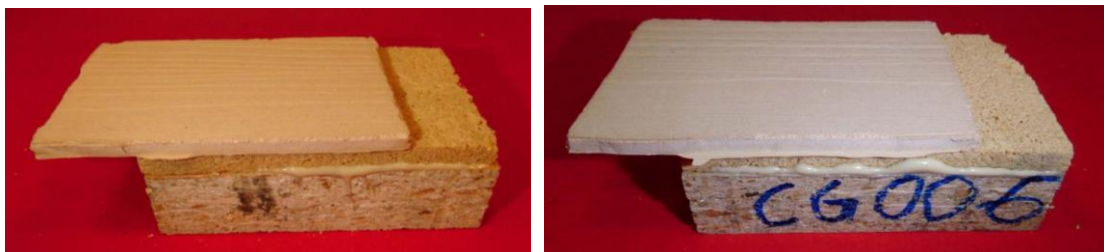


Abbildung 23 Präparierte dünne Holzschäumscheiben für Druck-Schub-Proben auf Überlapplänge 60 mm in flüssigem Aluminat-Zement (links) und geklebt mit 2K-PUR auf Normalzement CEM III (rechts)

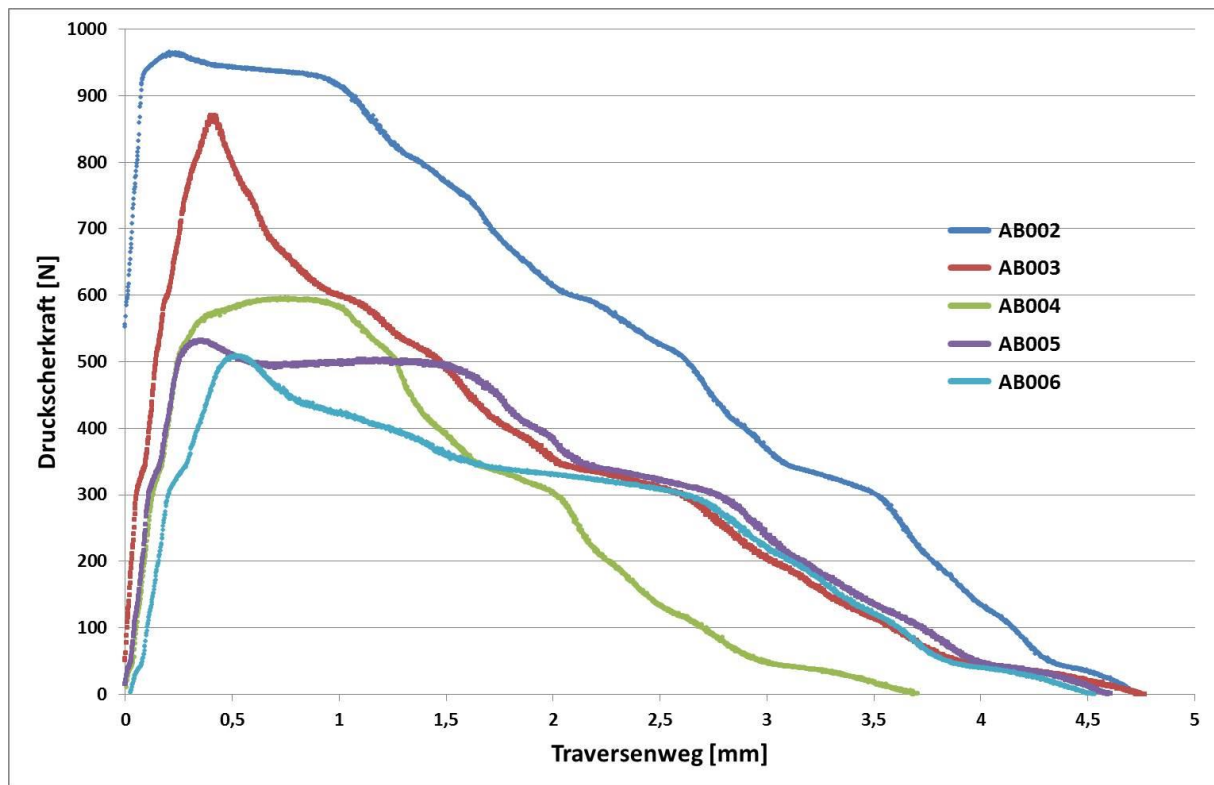


Abbildung 24 Kombinierte Haftung geklebter Holzschaum-Beton-Verbindungen in Druck-Schub-Prüfungen

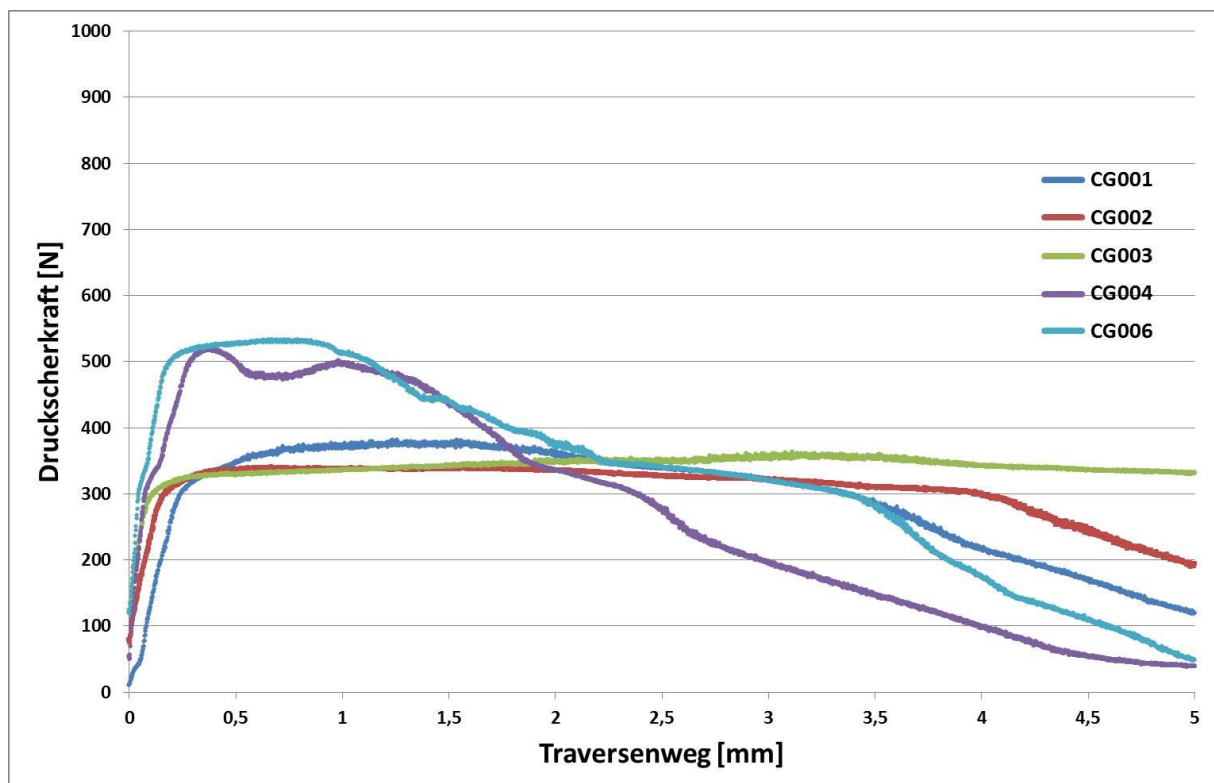


Abbildung 25 Kombinierte Haftung flüssig gegossener Holzschaum-Aluminat-Beton-Verbindungen in Druck-Schub-Prüfungen

Die mit Konstruktionsklebstoff 2K-PUR geklebten Deckschichten erzielen im Mittel höhere Druck-Schubwiderstände auf der gleichen Holzschaum-Charge, wie die nass applizierten Schnellzementmörtel aus Aluminaten, siehe auch Vergleich in Abbildung 26.

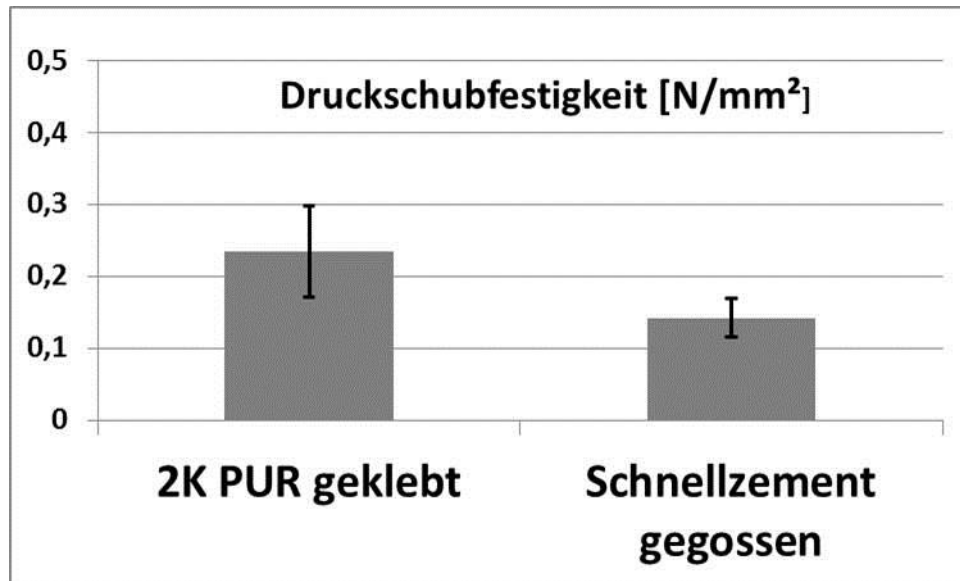


Abbildung 26 Vergleich der Druckschubfestigkeiten unterschiedlich gefügter Substrate

Die ausgezeichnete Haftung des Polyurethan-Klebstoffs auf vielen Holzsubstraten wird auch auf dem Holzschaum deutlich, der Schnellzement ist jedoch ausreichend niedrigviskos und mit feinem Gesteinskorn versehen, dass er sich ebenfalls gut in den offenen Poren des Holzschaums verankern kann. Die Bruchbilder der vollständig versagten dünnen Holzschaumscheiben zeigen ein vollständig kohäsives Versagen im Holzschaum. Keines der adhäsiv angebundenen Substrate zeigte adhäsives Versagen, siehe Abbildung 27.



Abbildung 27 Kohäsiv versagte dünne Holzschaumscheibe nach Druck-Schub-Versuchen auf Überlapplänge 60 mm Aluminat-Zement gegossen (links) und Normalzement CEM III geklebt mit 2K-PUR (rechts)

6.3 Untersuchung der Tragwirkung von Sandwichbalken unter Biegung

Nach den Druck-Schub-Untersuchungen wurden Biegebalken in Form von Sandwich-Plattenstreifen aufgebaut und in der 4-Punkt Biege-Konfiguration in Anlehnung an EN 1170-5 belastet. Bedingt durch die Größe der zur Verfügung stehenden Prüfvorrichtung haben die Plattenstreifen eine typische Länge von 880 mm bei typisch 90 bis 100 mm Breite. Die Sandwichhöhe konnte variieren.

Sandwichstreifen als Biegebalken sollten die Tragwirkung des Verbundbauteils in ausgewählten Varianten aus Herstellmethoden, Holzschaum-Art, -Rohdichte und -Kerndicken sowie auch die Textilbeton-Deckschichten mit den Betonmischungen, Faserverstärkungen und Deckschichtdicken aufzeigen.

Der 4-Punkt Biegeversuch in Anlehnung an EN 1170-5 wurde in einer Prüfvorrichtung mit einem maximalen unterstützenden Auflagerabstand von 840 mm mit Belastung in den Drittelpunkten (280 mm Abstand) symmetrisch durchgeführt. Die Probenbalken wurden mit 0,03 mm/s quasistatisch belastet. Eine maximale (symmetrische) Durchbiegung von bis zu 30 mm wurde angestrebt, bei asymmetrischem Teilversagen wurde die Prüfung vor dem Aufsetzen des Balkens auf die Traverse manuell gestoppt.

Das Versagen der untersuchten Sandwichbalken im Biegeversuch ist stets dominiert durch Schubversagen im Holzschaum in den seitlichen durch Querkraft beaufschlagten Bereichen. Hier treten zunächst Schubrisse in 45° Orientierung auf, die sich dann in flacherem Winkel durch den Holzschaumkörper ausweiten. Die Rissfront strebt gegen die Grenzschicht zwischen Schaumkern und Deckschichten, erreicht die Deckschichten jedoch nicht, sondern wandert teilweise nahe an den durch mit Klebstoff oder flüssig aufgetragenem Beton penetrierten Holzschaum weiter. Die zuerst gefertigten Holzschaumbalken wurden mangels ausreichend großer Holzschaumplattengrößen mehrteilig gefertigt (mittlerer Teil mit ca. 500 mm Länge), wobei die Kanten mit einem Schäftungswinkel von 25° versehen waren und diese Holzschaumstücke untereinander mit dem gleichen Klebstoff oder Mörtel geklebt wurden, wie der Verbund zur Deckschicht. Schubrisse wanderten ebenfalls gegen diese geklebten Grenzschichten im Holzschaumkern im Winkel von 25°, führten jedoch nicht zu Grenzschichttrissen, sondern der Riss pflanzte sich hinter der Grenzschicht analog fort, siehe Abbildung 28.



Abbildung 28 Riss durchwandert Grenzschichten (geschäftete Klebung unter 25° für lange Kern-Streifen aus kürzeren Einzelstücken) in einem 45 mm dicken Holzschaumkern

Eine Auswahl an Biegeprüfungen ist im nachfolgendem dargestellt.

6.3.1 Biegung von Sandwichen mit geklebter Textilbeton-Deckschichten auf CEM III-Basis

Ein Sandwichbalken mit geringer Schaumhöhe von nur 25 mm aus Buchenschaum mit einer Dichte von 123 kg/m³ wurde mit 2K-PUR Klebstoff auf 1-lagig verstärkte CEM III-Beton Deckschichten geklebt. Mangels ausreichend großer Holzschaumplatten zum Fertigungszeitpunkt wurden Plattenstreifen an den Kanten im Winkel von 25° geschäftet und aus drei Teilen zu einem Biegebalken mit 880 mm Länge geklebt. Der Biegebalken ertrug eine vergleichsweise hohe Biegekraft von fast 700 N und zeigte die ersten Risse im Holzschaum erst bei einer Durchbiegung von ca. 13 mm, siehe Abbildung 29 und Abbildung 30.

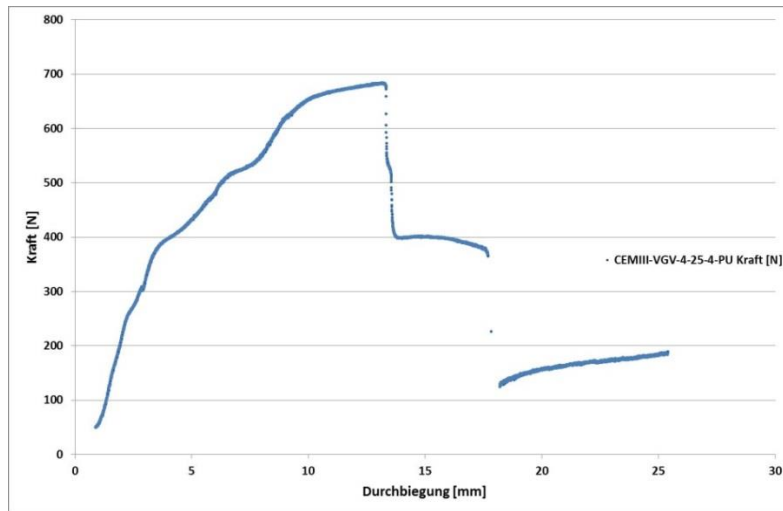


Abbildung 29 Verlauf der Biegekraft zu Durchbiegung bei Biegeprüfung von 2K-PUR-geklebten Betondeckschichten auf 25 mm dünnem Buchenholzschäum mit relativ hoher Dichte von 123 kg/m^3



Abbildung 30 Zerstörende Biegeprüfung an 2K-PUR-geklebten Betondeckschichten auf 25 mm dünnem Buchenholzschäum mit relativ hoher Dichte von 123 kg/m^3

Die geschäftet geklebten Bereiche lagen nicht im Bereich der Erstrisse, sondern wurden im Laufe der Rissausbreitung durchwandert.

Die Biegeprüfung einer von zweien fast gleich aufgebauten Biegebalken aus Kieferschäum mit 70 kg/m^3 und CEM III wurde zweimal unterbrochen, um die Deckschichtverschiebungen in horizontaler und vertikaler Richtung an ausgezeichneten Punkten zu vermessen, siehe Abbildung 31.

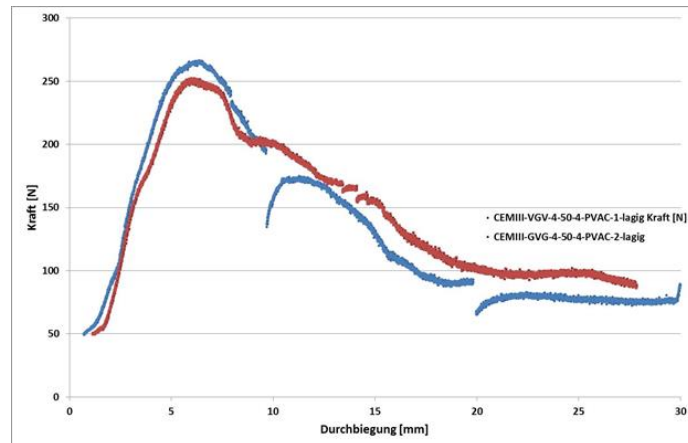


Abbildung 31 Biegeprüfung PVAC-geklebter Betondeckschichten auf 50 mm dickem Kiefernholzschaum (Dichte 70 kg/m^3)

Bei einer Durchbiegung von 10 mm und 20 mm wurden Zwischenwerte manuell aufgenommen und aufgezeichnet. Die kurzen Pausen in der ansonsten quasistatisch stetigen Belastung führten zu Entlastungskriechprozessen, die bei Fortsetzung der Prüfung an identischer Stelle jeweils durch einen Kraftabfall gekennzeichnet waren, siehe Biegekraft-Durchbiegungsdiagramm der Probe CEM III-VGV-4-50-4-PVAC-1-lagig.

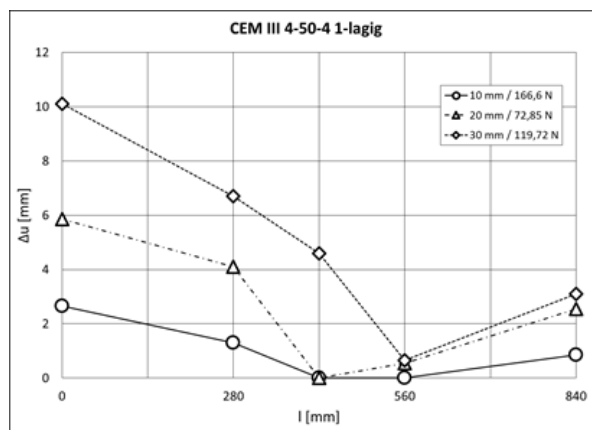


Abbildung 32 Deckschichtverschiebungen, relativer horizontaler Anteil

Die horizontale Verschiebung der Deckschichten ist in dem Diagramm in Abbildung 32 aufgetragen, sie bildet das häufig beobachtete asymmetrische Versagen des Sandwichbalkens ab, jedoch wurden auch weitgehend symmetrisch versagte Biegebalken beobachtet.

6.3.2 Biegung von Sandwichen mit gegossenen Textilbeton-Deckschichten auf Aluminat-Zement-Basis

Die Biegeprüfung zweier der fast gleich aufgebauten Biegebalken aus Kiefernholzschaum mit 70 kg/m^3 und aufgegossenen Aluminat-Zement Deckschichten in jeweils leicht asymmetrischem Aufbau, oben 3 mm unten 4 mm, wurden in 1-lagiger und 2-lagiger Gewebeverstärkung jeweils in beiden Deckschichten ausgeführt, Abbildung 33. Hier führen die steiferen Deckschichten zu höheren Biegekräften und Momenten und einem Erstversagen im Querkraft beaufschlagten Randbereich des Schaumkerns bei einer geringfügig größeren Durchbiegung sowie im weiteren Verlauf einer abfallenden Momentenübertragung mit konstant höherem Differenzbetrag bei fortschreitender Schädigung im Kern.

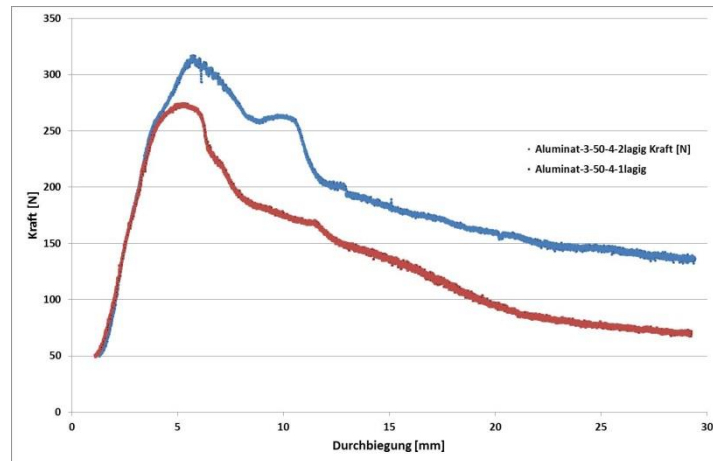


Abbildung 33 Biegeprüfung aufgegossener Aluminat-Betondeckschichten auf 50 mm dickem Kiefernholzschaum (Dichte 70 kg/m^3)

Bei einer weiteren Holzschaum-Biegeprobe wurde ein relativ hoher Buchenschaumkern von 45 mm mit einer einlagigen Gewebeverstärkung eingebettet in sehr dünne Aluminat-Zementschicht von nur ca. 2 mm versehen. Diese Deckschicht erzielte nur sehr niedrige Biegefestigkeiten, der Buchenholzschaum riss schon bei kleinen Durchbiegungen von ca. 2,5 mm und sehr geringen Biegekräften weit unter 100 N. Wieder kam ein geschäftet angeklebter mehrteiliger Schaumkern zum Einsatz, eine Ursache in der Schäftung wird nicht vermutet, eher scheint eine versteckte Inhomogenität im Schaumkern zum frühen Erstversagen des Balkens geführt zu haben, der aus einer relativ frühen Charge stammte, siehe Abbildung 34 und Abbildung 35.



Abbildung 34 Frühes Versagen mit Ausriss am linken Balkenrand

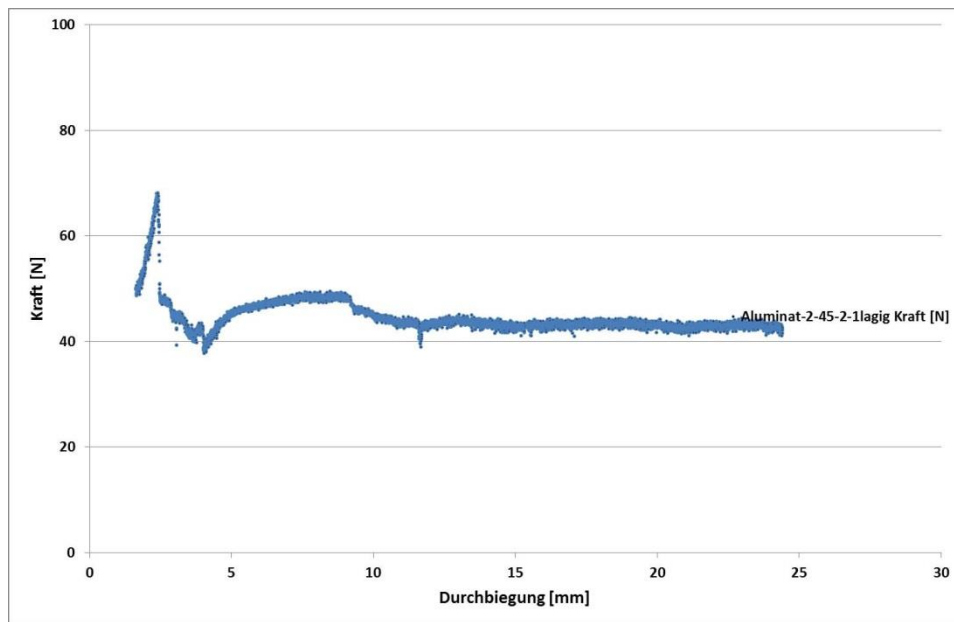


Abbildung 35 Früh versagte Biegeprobe mit aufgegosenen Aluminat-Betondeckschichten in nur 2 mm Dicke auf 45 mm dickem Buchenholzschaum (Dichte 90 kg/m³)

6.3.3 Biegung von hohen Sandwichbalken mit Betondeckschichten von 15 bis 23 mm Stärke

Aus zwei Sandwichplatten analog von Fassadenelementen, hergestellt beim Projektpartner Universalbeton Heringen, wurden ebenfalls je zwei Balken mit 1000 mm Länge und 100 mm Breite durch Nasstrennschnitte entnommen. Diese Biegebalken enthielten auch je vier punktförmige Verbindungsmittel, Edelstahlrahtbügel mit 5 mm Drahtstärke. Die Betondeckschichten aus CEM I wiesen ein Größtkorn von 5 mm auf und wurden mit einer Lage Carbonfasergelege (vorgetränkt mit einer Epoxidharzmatrix) armiert. Das weitmaschige Gelege hatte eine Maschenweite von 40 mm. Die dünnere Sandwichplatte mit einem Kiefernholzschaum von ca. 45 mm Dicke wurde mit je 15 mm dicken Textilbetondeckschichten ausgeführt, die dickere Platte (ebenfalls Kiefernholzschaum) mit jeweils ca. 20 mm Betonschicht auf ca. 75 mm Holzschaumplatte.

Die Biegediagramme sind in der folgenden Abbildung 36 zusammengefasst.

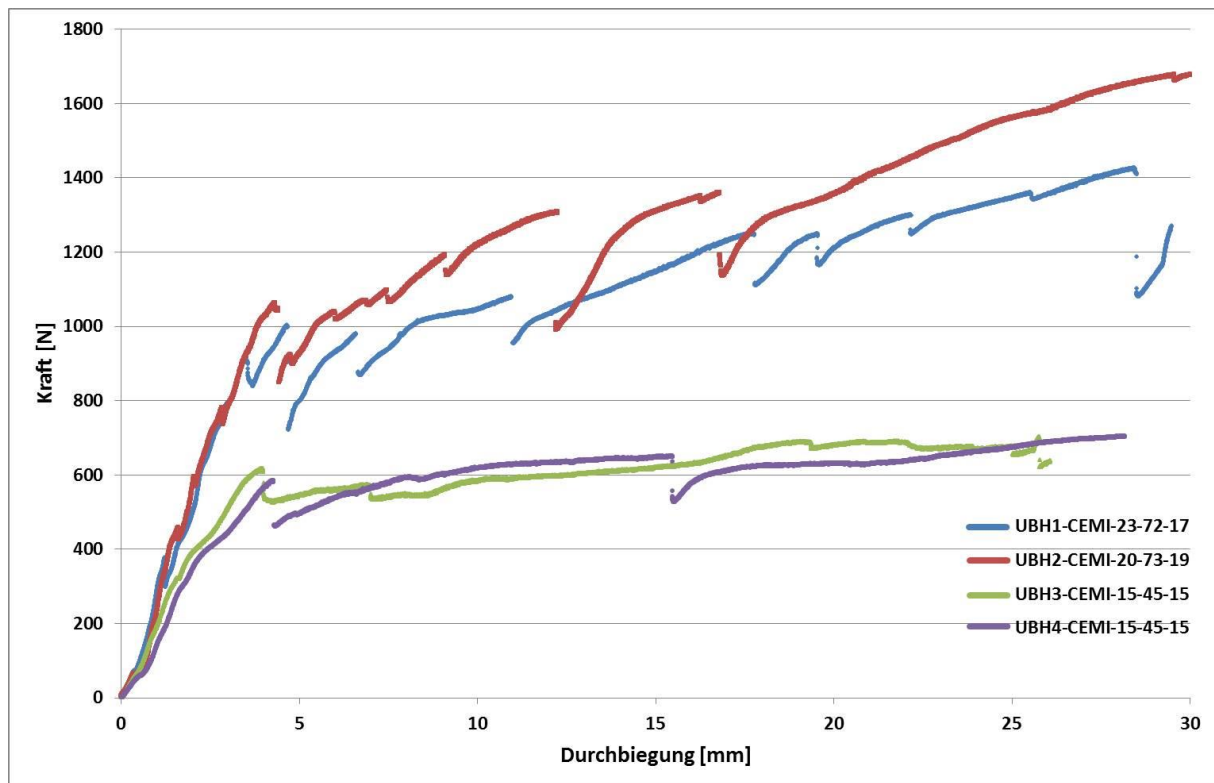


Abbildung 36 Verlauf der Biegekraft zu Durchbiegung bei Biegeprüfungen von Sandwichbalken mit definiert eingedrücktem Holzschaum in Frischbeton CEM I (Methode 3) mit relativ dicken Deckschichten und Einzelbewehrung mit Carbonfasergelege

Die Biegeprüfungen zeigen ausgeprägtes Teilversagen durch lokale Risse in den Betondeckschichten mit scharfen Kraftabfällen in der Größenordnung von 100 bis 200 N. Dieses Verhalten könnte durch Einmischen von Kurzfasern in den Frischbeton deutlich abgemildert werden, was generell zu fein verteiltem Rissbild führt. Weiterhin wirken die punktförmigen Verbindungsmittel (vier Verbundnadeln pro Biegeträger, Anordnung siehe Abbildung 39) auch nach mehreren Deckschichtrissen noch leicht Laststeigernd.

In den folgenden Abbildungen sind Auszüge des Versagensverhaltens dieser Biegebalken dargestellt, die schon weitgehend einem Ausschnitt aus einem Vorhangfassadenelement entsprechen. Punktförmige Verbindungsmittel würden noch um Diagonalanker ergänzt werden und die Ränder der Sandwichplatte müsste witterungsgeschützt ausgeführt werden.



Abbildung 37 Biegung von hohem Sandwichbalken mit Betondeckschichten von ca. 20 mm Stärke (UBH2)



Abbildung 38 Überblick des Versagens an hohem Sandwichbalken mit Betondeckschichten von ca. 20 mm Stärke (UBH2), Erstrisse in der Zugzone der unteren Deckschicht initiieren das anschließende Schubversagen im querkraftbeanspruchten Holzschaukern

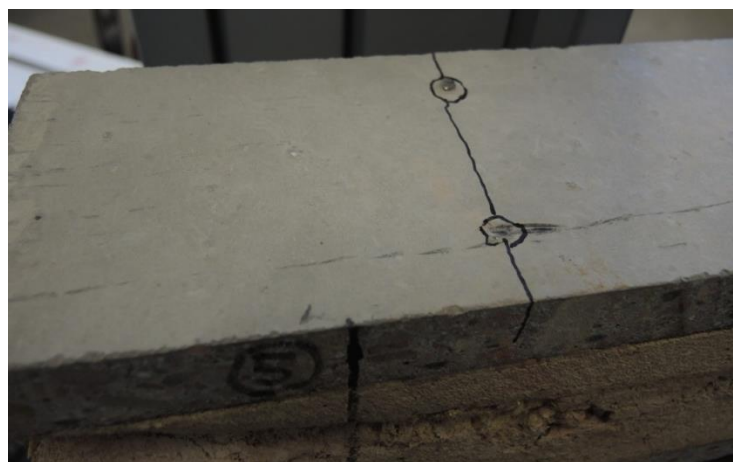


Abbildung 39 Anordnung der punktförmigen Verbindungsmittel (Edelstahldraht 5 mm) in dickwandigen Sandwichelementen, Lage etwa 120 mm von den Balkenenden entfernt, Balkenbreite 100 mm

7 Zusammenfassung

Die Ziele im Projekt waren die Identifikation der technischen Eigenschaften ausgewählter Holzschaumarten mit der Funktion als Kernwerkstoff im Sandwich mit textilbewehrtem Beton in den Deckschichten. Holzschaum aus Buchen- oder Kiefernholz mit einer Mindestdichte ab etwa 70 Kg/m³ stellt einen gut technisch nutzbaren Kernwerkstoff in Sandwichbauweisen dar. Dabei zeigten sich leicht bessere mechanische Eigenschaften bei Kiefernschaum aufgrund der effektiv längeren Holzfasern bei gleichartiger Verarbeitung, was sowohl die Adhäsion zwischen den Fasern mit holzeigenen Bindungskräften wie auch die mechanische Verhakung der Fasern untereinander unterstützt. Die thermischen Isolationseigenschaften sind vergleichbar zu vielen konventionellen Polymerschäumen, im Bereich der Schallabsorption konnten Holzschäume in einzelnen Frequenzbereichen konventionelle Polymerschäume übertreffen. Erste Untersuchungen zum Brandverhalten zeigten ein gleichartiges Verhalten, wie viele zugelassene Holzwerkstoffe.

Weiterhin sollten geeignete Fügeverfahren untersucht und wesentliche Verbundeigenschaften charakterisiert werden. Der Verbund kann durch konventionelle Klebtechnik wie auch im direkten flüssigem Benetzen mit dem Beton realisiert werden. Dabei erzielen konventionelle Klebstoffe eine noch bessere Benetzung und Penetration in der Holzschaumoberfläche als Schnellzemente oder Normalzemente.

Bedingt durch die eingeschränkte Schubfestigkeit aller zur Verfügung stehenden verschiedenen Holzschaum-Varianten und der ausgezeichneten Haftwirkung der Klebstoffe (PUR und PVAC) sowie auch der Betonmischungen zum Holzschaum begrenzt das Schubversagen im Schaumkern die Biegetragfähigkeit der Sandwich-Träger ohne Verbundmittel und der Verbund kann im mittragenden Verhalten nur als bedingt schubsteif (PCA) eingeordnet werden. Diese mechanisch semistrukturellen Eigenschaften liegen jedoch auch bei verschiedenen Polymerschäumen vor, die derzeit als Dämmstoffschichten in nichttragenden oder tragenden Bauteilen (mit Verbundmitteln) Anwendung finden.

Bei ähnlichem Eigenschaftsspektrum in den wichtigen Punkten Wärme- und Schallisolierung sowie ausgezeichneter Verarbeitungsfähigkeit hinsichtlich adhäsiver Anbindung an Betonoberflächen hat der praktisch ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Holzschaum ein sehr großes Potenzial, als deutlich nachhaltigere Alternative die etablierten polymeren Dämmstoffe zukünftig zu substituieren.

8 Wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Nutzen

Die beschriebenen Ergebnisse sind nicht nur für die Verwendung des Holzschaums als Dämmmaterial in einem Sandwichelement einsetzbar. Die grundlegenden Untersuchungen zur Verbesserung der Eigenschaften können für viele weitere Anwendungen eingesetzt werden wie für Verpackungen, Möbel, Polstermaterial und vieles mehr. Durch die Variation der Materialeigenschaften kann das Einsatzgebiet des Holzschaums aber auch noch erweitert werden z.B. in Richtung Automobil und wo Leichtbaumaterialien notwendig sind. Verschiedenen Branchen wird mit den Ergebnissen des Vorhabens aufgezeigt, wie der Holzschaum einsetzbar wäre, womit sich die Nachfrage nach Holzschäumen unterschiedlichster Eigenschaften stark erhöht. Start-up Unternehmen könnten dadurch entstehen, die eine Holzschaumherstellung für zunächst kleine Serien bestimmter Produkte durchführen könnten. Dadurch werden wiederum neue Forschungsprojekte initiiert, um neue Anwendungen zu generieren bzw. zu optimieren.

Damit zeigen die Ergebnisse des Vorhabens die weitreichenden Anwendungsgebiete neben Dämmungen auf.

9 Literatur

- [Ban06] Banholzer, B.: Bond of a strand in a cementitious matrix. In: Materials and Structures, Vol. 39, Nr. 10, Dezember 2006, pp. 1015- 1028.
- [Ber98] Berner, K.: Praxisgerechte Nachweise zur Trag- und Gebrauchsfähigkeit von Sandwichbauteilen. In: Stahlbau 67 (1998), Heft 12, S. 910 – 925.
- [Bru07] Bruckermann, O.: Zur Modellierung des Zugtragverhaltens von textilbewehrtem Beton. Dissertation, RWTH Aachen, 2007. Glasfaserbeton
- [Bun17] Bunzel, F.: Wood Foam – A New Product, IPPS 2017 proc., Llandudno, Wales, UK; 2017, 9 pages
- [Heg06a] Hegger, J.; Bentur, A.; Curbach, M. et al.: Mechanical behaviour of textile reinforced concrete. In: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee TC 201-TRC 'Textile Reinforced Concrete', ISBN 2-912143-99-3, 2006, S. 133 - 186.
- [Hor10] Horstmann, M.: Zum Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textilbewehrtem Beton, Dissertation, RWTH Aachen, 2010.
- [IMB09] Ergebnisbericht Projekt INSUSHELL, Selbsttragende Sandwichfassade aus Textilbeton und PUR-Hartschaumkernen, Institutsbericht-Nr. 237/2009 des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen, 2009
- [Kol06] Kolkman, A.; Gries, T.; Horstmann, M.; Hegger, J.; Mund, F.; Dilger, K.; Böhm, S.: Konfektionieren Textilbewehrter Beton KoTexBet Abschlussbericht Konfektionierung von Textilien durch innovative Fügeverfahren zur industriellen Fertigung textilbewehrter Betonelemente "KoTexBet", Projektschlussbericht, RWTH Aachen, 2006
- [Kon08] Konrad, M.: Effect of multifilament yarn crack bridging on uniaxial behavior of textile reinforced concrete. Dissertation, Institut für Baustatik, RWTH Aachen, 2009.
- [Sal97] Salmon, D. C.; Einea, A.; Tadros, M. et al: Full Scale Testing of Precast Concrete Sandwich Panels. ACI Structural Journal, Vol. 94, 1997, No. 4, S. 354 - 362.
- [See97] Seeber, K. E.; Andrews, R.; Baty, J. R. et al.: State-of-the-Art of Precast/ Prestressed Sandwich Wall Panels, PCI Comittee Report. PCI Journal, Vol. 42, No. 2, März/April 1997, S. 92 - 134.
- [Scho14] Scholtyssek, J.: Holzschaum – ein innovatives, nachhaltiges Leichtprodukt als Alternative zu petrochemischen Schaumstoffen, VDI Ingenieurforum Ausgabe 3/2014, S. 22-23, 2014.
- [Sta74] Stamm, K., Witte, H.: Sandwichkonstruktionen - Berechnung, Fertigung, Ausführung. Springer-Verlag, 1974.
- [Vos08a] Voss, S.: Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von Textilbewehrtem Beton. Dissertation, RWTH Aachen, 2008.

- [DIN 1045-2] DIN 1045-2:2008-08-00, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN 4102] DIN 4102-1:1998-05, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 826] DIN EN 826:2013-05, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung; Deutsche Fassung EN 826:2013, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 205] DIN EN 205, Klebstoffe - Holzklebstoffe für nichttragende Anwendungen - Bestimmung der Klebfestigkeit von Längsklebung im Zugversuch; Deutsche Fassung EN 205:2016, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 1609] DIN EN 1609:2013-05, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem teilweisem Eintauchen; Deutsche Fassung EN 1609:2013, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 12089] DIN EN 12089:2013-06, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Biegebeanspruchung; Deutsche Fassung EN 12089:2013, Beuth Verlag, Berlin
- [EN 1170] DIN EN 1170-5:1998-01 Vorgefertigte Betonerzeugnisse - Prüfverfahren für Glasfaserbeton - Teil 5: Bestimmung der Biegezugfestigkeit; Vollständige Biegezugprüfung; Deutsche Fassung EN 1170-5:1997 Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin
- [ISO 5267-1] ISO 5267-1:1999-03, Zellstoff - Bestimmung der Entwässerbarkeit - Teil 1: Schopper-Riegler-Verfahren, Beuth Verlag, Berlin