

Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen
Book Series of the Department of Civil Engineering
Technische Universität Berlin

Herausgeber:

Editors:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Barjenbruch

Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kochendörfer

Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis

Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich

Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid

Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt

Shaker Verlag

Aachen 2014

Untersuchungen an geklebten Verbundkonstruktionen aus Holz und Leichtbeton

vorgelegt von Dipl.-Ing. Doreen Zauft
aus Potsdam

von der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid

Gutachterin: Prof. Dr. Maria Anna Polak, P. Eng. (University of Waterloo, Canada)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 11. Juni 2014

Berlin 2014

D 83

Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen
Book Series of the Department of Civil Engineering
Technische Universität Berlin

Band 17

Doreen Zauft

**Untersuchungen an geklebten Verbund-
konstruktionen aus Holz und Leichtbeton**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2014

Untersuchungen an geklebten Verbundkonstruktionen aus Holz und Leichtbeton

Dissertationsschrift von Doreen Zauft
Fakultät VI – Planen, Bauen, Umwelt
der Technischen Universität Berlin

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid
Prof. Dr. Maria Anna Polak, P. Eng. (University of Waterloo, Canada)

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3200-0

ISSN 1868-8357

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Diese Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet „Entwerfen und Konstruieren – Verbundstrukturen“ der Technischen Universität Berlin entstanden. Betreut wurde ich von Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid, dem ich herzlich für seine Geduld und Förderung danke. Er setzte sich dafür ein, dass die Versuche ohne finanzielle Drittmittel durchgeführt wurden.

Prof. Dr. Maria Anna Polak, P. Eng. bin ich für die stetige Unterstützung und für den produktiven sechsmonatigen Aufenthalt an der University of Waterloo/Canada zu Dank verpflichtet.

Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Prof. Dr.-Ing. Annette Bögle, die mich durch ihr Vorbild und durch persönliche Gespräche geprägt hat.

Ein besonders herzlicher Dank gilt meinem geschätzten Kollegen Dipl.-Ing. Stefan Behring für die anregenden Diskussionen und sein persönliches Engagement in der Werkstatt. Für die Unterstützung bei der Leichtbetonentwicklung bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Marcus Hutfilz. Herrn Dipl.-Ing. Wilfried Walkowiak und Dipl.-Ing. Hilmar Wenke danke ich für die messtechnische Unterstützung, Herrn Miroslav Brkovic für die unkomplizierte Zusammenarbeit beim Vorbereiten der Versuche.

Für die vielen Sachspenden möchte ich BASF Construction Polymers GmbH, Baumaterial GmbH, Dyckerhoff AG, Grace Bauprodukte GmbH, HeidelbergCement AG, Liapor GmbH & Co. KG, SFS intec GmbH, Sika Deutschland GmbH, STRAB Ingenieurholzbau Hermsdorf GmbH, meinen Dank zum Ausdruck bringen, ohne die meine Probekörper nicht hätten hergestellt werden können.

Herrn Levin Neß BSc und Frieder Graf BSc danke ich für die produktive Zusammenarbeit im Betonlabor zur Herstellung der Probekörper.

Bernhard Frisch MSc und Annick Becker MSc bin ich für ihren außerordentlichen Einsatz bei der Bearbeitung der von mir betreuten Masterarbeiten sehr verbunden, die zum erfolgreichen Gelingen meiner Dissertation beigetragen haben. Die Ergebnisse der von mir betreuten Bachelorarbeiten von Marie Dörbaum MSc, Melf Sutter MSc, Stella Goldmann MSc, Benedickt Lütcke BSc, André Hoffmann Bsc, Kolja Dietzel BSc und Matthias Bayer Bsc flossen auch in die vorliegende Arbeit ein.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich herzlich für die Unterstützung.

Berlin, Juni 2014

Zusammenfassung

Bei Holzbalkendecken in Altbauten treten oft Schwingungen auf, die im Allgemeinen von Personen als unangenehm, aber insbesondere in Mehrfamilienhäusern als störend empfunden werden. Das spiegelt sich in den Nachweisen der einzelnen Grenzzustände der [DIN EN 1995-1-1] wider, da die angegebenen Grenzwerte von einfachen Holzbalkendecken bei großen Spannweiten von bis zu 10 m nicht erfüllt werden können. Eine auf das Holz aufgebrachte Betonschicht führt zur Erhöhung der Steifigkeit und trägt somit zur Verbesserung des Verhaltens hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit bei. Beide Materialien werden entsprechend ihrer Festigkeitseigenschaften eingesetzt; der Beton in der Druckzone des Querschnitts und das Holz im Zugbereich. Eine solche Verbundkonstruktion ist nicht nur bei Sanierungen von Vorteil, sondern kann auch bei Neubauten, insbesondere wegen des geringeren Eigengewichts, als Fertigteil eingesetzt werden.

Die Analyse aktueller Untersuchungen zum Holz-Beton-Verbund verdeutlicht, dass die Kombination aus Leichtbeton und Brettschichtholz sehr vielversprechend ist. Besonders die von Faust im Jahr 2003 durchgeführten Scherversuche zum Holz-Leichtbeton-Verbund mit mechanischen Verbindungselementen zeigten, dass durch die punktuelle Spannungskonzentration ein Materialversagen im Leichtbeton hervorgerufen wird und im Vergleich zum Normalbeton geringere Bruchlasten liefert [Fau03]. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit der Verbund mithilfe eines hochviskosen zweikomponentigen Epoxidharzklebstoffes hergestellt, der die Kräfte kontinuierlich überträgt. Es werden dabei verschiedene Herstellungsmethoden, das „Nass-in-Nass-Verfahren“ und der Verbund zwischen dem erhärteten Leichtbeton und dem Brettschichtholz, untersucht. Um das Tragverhalten und das spröde Versagen zu analysieren, sind Scher- und Biegeversuche erforderlich, mit denen der Einfluss des Leichtbetons untersucht wird.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Leichtbeton zu entwickeln, der ein geringes Verhältnis zwischen Trockenröhdichte und Druckfestigkeit besitzt, um somit das Eigengewicht zu reduzieren und die auftretenden Kräfte in der Verbundfuge zu übertragen. Die in der Forschungsarbeit durchgeführten Herstellungsvarianten zeigen, dass der Klebeverbund zwischen einem frischen Leichtbeton und einem Brettschichtholz im Vergleich zum einzelnen Brettschichtholz Traglaststeigerungen hervorbringt und die Resultate im gleichen Wertebereich wie die eines geschraubten Holz-Normalbeton-Verbundträgers liegen. Die Computersimulationen auf Grundlage des linearen Materialverhaltens bestätigen das Tragverhalten und verdeutlichen die Unterschiede der Lastabtragung zwischen Scher- und Biegeversuch.

Abstract

Typical wooden beam ceiling often have problems with excessive vibrations and inadequate sound insulation. Due to increasing live loads and a stronger sense of safety over the years, wooden beam ceiling with a span up to 10 m cannot fulfill the serviceability limit states of [DIN EN 1995-1-1]. A concrete layer applied to the timber increases the stiffness of the whole structure and thus contributes to the improvement of serviceability performance. In such applications, both materials are utilized according to their mechanical properties; the concrete is used in the compression zone and the wood in the tension zone. Such a composite construction is advantageous not only for rehabilitation, but also for new construction as a prefabricated segment, especially due to its low weight.

The analysis of recent studies on timber-concrete-composites shows that the combination of light-weight concrete and glued-laminated timber is promising. The shear tests conducted by Faust in 2003 on timber-lightweight-concrete composite structures with mechanical fasteners demonstrated that material failure occurs in the lightweight concrete and at lower loads than when using a standard concrete on equivalent composites. In the case of light-weight concrete, the pin-shaped connections of the mechanical fasteners are disadvantageous as they create localized stress concentrations on the concrete [Fau03]. These results show that using a high-viscous two component epoxy resin adhesive instead of mechanical fasteners yields higher collapse loads for the light-weight concrete, since shear stresses can be transferred more uniformly between both materials. Different methods of gluing as well as the wet-on-wet-method are analyzed. To analyze the structural behavior as well as the brittle failure, shear and bending tests are required to investigate the influence of the light-weight concrete.

The aim of the present work is to develop a light-weight concrete possessing a low ratio between dry density and compressive strength in order to reduce the weight and to transmit the forces continuously in the composite joint. The carried out variations of production show that the adhesive bond between a fresh light-weight concrete and glulam increases the load compared to an individual glulam. The results lie in the same range as those of a timber-concrete-composite girder. The computer simulations on the basis of the linear material behavior confirm the structural behavior and illustrate the differences in load transfer between shear and bending tests.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Zusammenfassung	iii
Abstract	v
Abkürzungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Forschung	5
2.1 Entwicklung der Holz-Beton-Verbundbauweise	5
2.2 Holz-Beton-Verbundbauweise mit mechanischen Verbindungsmitteln	6
2.2.1 Schrauben und Dübel in Kombination mit Leichtbeton	7
2.2.2 Kerven in Kombination mit Normalbeton	9
2.2.3 Eingeklebte mechanische Verbindungsmittel	13
2.3 Holz-Beton-Verbundbauweise mit natürlichem Verbund	15
2.4 Holz-Beton-Verbundbauweise mit geklebtem Verbund	15
2.4.1 Geklebter HBV mit Normalbeton	17
2.4.2 Geklebter HBV mit Polymerbeton	20
2.4.3 Geklebter HBV mit hochfestem Beton	21
2.4.4 Geklebter HBV mit Leichtbeton	24
2.5 Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung	24
3 Parameterstudie	29
3.1 Elastischer Verbund	30
3.2 Bemessungskriterien im Holzbau	32
3.3 Stand der Forschung	34
3.4 Langzeitverhalten	36
3.4.1 Kriechen	36
3.4.2 Schwinden und Quellen	37
3.5 Ergebnisse der Parameterstudie	40
3.5.1 Spannungen	40
3.5.2 Verformungen und Schwingungen	42
3.5.3 Einfluss verschiedener Verbindungsmittelsteifigkeiten, der Temperatur, der Feuchtigkeit und verschiedener Verkehrslasten	47
3.6 Ergebnisse der Parameterstudie	47

4	Materialeigenschaften	51
4.1	Leichtbeton	51
4.1.1	Mechanische Materialeigenschaften	52
4.1.2	Eigenschaften im Langzeitverhalten	57
4.2	Brettschichtholz	57
4.2.1	Mechanische Materialeigenschaften	58
4.2.2	Eigenschaften im Langzeitverhalten	60
4.3	Epoxidharz	60
4.3.1	Mechanische Materialeigenschaften	61
4.3.2	Eigenschaften im Langzeitverhalten	62
4.3.3	Versagensarten und Bruchverhalten	62
5	Scherversuche	65
5.1	Entwicklung des Versuchsaufbaus	65
5.2	Versuchsdurchführung	68
5.2.1	Herstellung der Probekörper	69
5.2.2	Versuchsprogramm	72
5.2.3	Versuchsauswertung – Geschraubter Verbund	74
5.2.4	Versuchsauswertung – Geklebter Verbund	75
5.3	Numerische Modellbildung der Scherversuche	85
5.4	Erkenntnisse und Folgerungen aus den Scherversuchen	87
6	Biegeversuche	91
6.1	Herstellung der Probekörper	91
6.2	Versagensmechanismen	94
6.2.1	Biegezug- und Schubversagen im Brettschichtholz	95
6.2.2	Schubversagen der Verbindung/ fugennahes Schubversagen im Füge- geteil	96
6.3	Versuchsdurchführung – Spannweite 2,30 m	97
6.3.1	Versuchsprogramm	97
6.3.2	Versuchsergebnisse	101
6.4	Versuchsdurchführung – Spannweite 5,70 m	117
6.4.1	Versuchsprogramm	118
6.4.2	Versuchsergebnisse	118
6.5	Numerische Modellbildung der Biegeversuche	126
6.6	Erkenntnisse und Folgerungen aus den Biegeversuchen	133
7	Verbundverhalten	137
7.1	Tragverhalten des Leichtbetons in der Verbundfuge	138
7.2	Haftzugfestigkeitsversuche am Leichtbeton	140
7.3	Spannungsinteraktion im Bruchzustand	142
7.4	Erkenntnisse	145
8	Zusammenfassung und Ausblick	147
A	Parameterstudie	151
B	Materialeigenschaften	155

B.1 Leichtbeton	155
B.2 Brettschichtholz	162
C Biegeversuche	165
C.1 Horizontale Verschiebungen	165
C.2 Normalspannungsverläufe	165
C.3 Extrapolationsmethode	169
C.4 Vergleich der Längsspannungen	170
C.5 Haftzugfestigkeitsprüfung	172
Abbildungsverzeichnis	173
Tabellenverzeichnis	179
Literaturverzeichnis	181
Normenverzeichnis	187

Abkürzungsverzeichnis

	Parallel zur Verbundfuge
°C	Grad Celsius
$\varepsilon_{lc,s,\infty}$	Endschwinddehnung des Leichtbetons
α_{ct}	Abminderungsfaktor des Leichtbetons
ε_{DMS}	Normaldehnungen
φ	Abminderungsfaktor für den Einfluss des Kriechens
γ	Abminderungsbeiwert beim γ -Verfahren zur Berechnung nachgiebig verbundener Querschnitte
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert des Leichtbetons
γ_G	Schubverzerrungen
η_1	Umrechnungsfaktor für die Festigkeitswerte von Normalbeton auf Leichtbeton
η_E	Umrechnungsfaktor für den E-Modul von Normalbeton auf Leichtbeton
λ	Schlankheit
ρ	Trockenrohddichte
σ	Standardabweichung bzw. Spannung im Querschnitt
σ_0	Längsdruck- oder Längszugspannung
σ_{90}	Querdruk- oder Querkzugspannung
τ	Schubspannung
a_{grenz}	Grenzbeschleunigung
ALWAC	Leichtbeton mit leichter Gesteinskörnung in allen Kornfraktionen
BnV	Biegeversuche mit nachträglichem Klebeverbund
BSH	Brettschichtholz
BsV	Biegeversuche mit sofortigem Klebeverbund

CFK	Carbon-Faserverstärkter Kunststoff
CSF	Kohäsives Fügegliedversagen
d	Anzahl der Tage
DMS	Dehnmessstreifen
DMS S	Dehnmessstreifen zur Schubspannungsermittlung
DP	Drehpotentiometer
$E_{0,mean}$	Mittelwert des E-Moduls parallel zur Faser des Holzes
$E_{0,m}$	Mittelwert des Druck-E-Moduls des Holzes
E_{lcm}	Mittelwert des E-Moduls des Leichtbetons
EI	Biegesteifigkeit
EI_{eff}	Effektive Biegesteifigkeit
$f_{c,0,k}$	Charakteristische Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung des Holzes
$f_{c,0,mean}$	Mittelwert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung des Holzes
$f_{c,90,k}$	Charakteristische Druckfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung des Holzes
$f_{c,90,mean}$	Mittelwert der Druckfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung des Holzes
$f_{l,c,cyl}$	Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Leichtbetons
f_{lcm}	Mittlere Druckfestigkeit des Leichtbetons
$f_{lct,fl}$	Charakteristische Biegezugfestigkeit des Leichtbetons
$f_{m,mean}$	Mittelwert der Biegefestigkeit des Holzes
$f_{t,90,mean}$	Mittelwert der Zugfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung des Holzes
F_{ult}	Bruchlast
$f_{v,k}$	Charakteristische Schubfestigkeit des Holzes
$f_{v,mean}$	Mittelwert der Schubfestigkeit des Holzes
f_{ctkm}	Mittelwert der Zugfestigkeit des Normalbetons
$f_{l,c,cube}$	Charakteristische Würfeldruckfestigkeit des Leichtbetons
f_{lctd}	Bemessungszugfestigkeit des Leichtbetons
$f_{lctk,0,05}$	Charakteristische Zugfestigkeit des Leichtbetons
f_{lctm}	Mittlere Zugfestigkeit des Leichtbetons

$f_{m,k}$	Charakteristische Biegefestigkeit des Holzes
f_{\min}	Mindestfrequenz
$f_{t,0,k}$	Charakteristische Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung des Holzes
$f_{t,0,\text{mean}}$	Mittelwert der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung des Holzes
$f_{t,90,k}$	Charakteristische Zugfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung des Holzes
$f_{v,k}$	Charakteristische Schubfestigkeit des Leichtbetons
FEM	Finite-Elemente-Methode
GL	Glued Laminated Timber-Brettschichtholz
h	Anzahl der Stunden
HBV	Holz-Beton-Verbund
HLBV	Holz-Leichtbeton-Verbund
Hz	Hertz
K	Temperaturdifferenz in Kelvin
k	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Natursandes bei der Herstellung des Leichtbetons
k_{def}	Kriechfaktor im Holz
kN	Kilo-Newton
KZV	Keilzinkenverbindung
LC	Leichtbeton
N	Newton
P	Stabpotentiometer
q	Flächenlast
r.L.	relative Luftfeuchtigkeit
s_{lc}	Faktor zur Berücksichtigung des Ausnutzungsgrades der leichten Gesteinskörnung
SLWAC	Leichtbeton unter Verwendung von Natursand
SnV	Scherversuche mit nachträglichem Klebeverbund
SsV	Scherversuche mit sofortigem Klebeverbund
UHPC	Ultra-High-Performance Concrete
w_{fin}	Gesamte Endverformung