

## Zukunft Bau

### STRUKTUR / GLIEDERUNG KURZBERICHT

---

#### Titel

Langfassung Titel: „Erarbeitung der Grundlagen zur Anwendung eines neuartigen zementgebundenen Hochleistungswerkstoffes im Hochbau mit ausgerichteten Kohlenstofffasern und hoher Zugfestigkeit“

#### Anlass/ Ausgangslage

Seit längerem gibt es intensive Bestrebungen, den volkswirtschaftlich außerordentlich bedeutsamen Verbundwerkstoff Stahlbeton weiterzuentwickeln und dazu vor allem die Zugfestigkeit von Beton zu erhöhen. Mit dem an der Universität Augsburg entwickelten Herstellungsverfahren, bei dem die Ausrichtung beigemischter Kohlenstofffasern durch eine Düse gezielt eingestellt werden kann, ist es gelungen, mit handelsüblichen Ausgangsstoffen und im Grunde praxisgerechten Verfahren eine signifikante Erhöhung des Verhältniswertes von Zug- und Druckfestigkeit bei Zementsteinproben zu erreichen.

#### Gegenstand des Forschungsvorhabens und Fazit

In den Untersuchungen zur Materialentwicklung konnte gezeigt werden, dass die hohen Festigkeiten der faserverstärkten Prüfkörper auch mit kürzeren Fasern erreicht werden können und somit besser verarbeitbare Mörtel gleicher Festigkeit herstellbar sind. Ein sowohl preisliches als auch in der Ökobilanz günstigeres System konnte ohne Festigkeitsverlust realisiert werden, indem teure neuwertige Fasern durch günstigere Recyclingprodukte ersetzt wurden. Es konnte deutlich aufgezeigt werden, dass sich die Ausrichtung der Fasern in einem engen Winkelbereich abspielen muss, bereits bei Abweichungen von ca. 10° ist ein deutlicher Festigkeitsverlust spürbar. Die Druckfestigkeit der Systeme scheint nicht direkt mit der Faserausrichtung zusammenzuhängen. Die Festigkeitsentwicklung der faserverstärkten Systeme verläuft schnell, der entscheidende Faktor scheint die Geschwindigkeit des Erstarrens und Verfestigens der Zementmatrix zu sein, eventuelle Nachhärtungseffekte scheinen keine große Rolle zu spielen. Die bisher verwendeten Rezepturen sind auf den Einsatz von CEM I 52,5 R ausgelegt; es konnte allerdings gezeigt werden, dass mit relativ einfachen Anpassungen auch andere Zementarten einsetzbar sind, ohne die Leistungsfähigkeit des Systems groß zu verändern. Der Widerstand gegenüber Ermüdung wird durch die Faserbewehrung deutlich heraufgesetzt, bei gleichem Verhältnis von Oberspannung im zyklischen Versuch zu Bruchspannung steigt die Lastwechselzahl bis zum Bruch um Größenordnungen. Die Machbarkeit des Einbringens von Füllstoffen zur weiteren Preissenkung wurde aufgezeigt und lieferte vielversprechende Ergebnisse. Durch Einsatz feinkörniger Quarzmehle konnte eine Rezeptur gefunden werden, die gut spritzbare Mörtelsysteme bei vergleichsweise niederem w/z-Wert liefert. Diese Mörtelmischung zeigt bei niedrigeren Fasergehalten bessere Biegezugfestigkeiten als das Zementleimrezept, bei Fasergehalten über 2 Vol.-% sinkt die Festigkeit im Vergleich zur Zementleimrezeptur leicht ab. Das System ist problemlos durch einen Extrusionsprozess druckbar und hat damit hohes Potential für Anwendungen in der additiven Fertigung („3D-Druck“).

Die Biegezugfestigkeit des Mörtelsystems wurde bis zu einem Faservolumengehalt von 2% überprüft und entspricht den hohen Werten der bisher verwendeten Zementleimrezeptur. Durch eine spezifische Anpassung des w/z-Wertes an den Faservolumengehalt konnten Mischungen erstellt werden, die von Hand gut spritzbar waren und damit deutliches Potential zur automatischen Druckbarkeit haben.

Erste manuelle Versuche zum Hochskalieren der an kleinformigen Prüfkörpern entwickelten Technik zur Ausrichtung von Carbonkurzfasern in einer Zementleimmatrix haben gezeigt, dass auch an größeren Probekörpern ähnlich hohe Biegezugspannungen aufnehmbar sind. Nachdem ein 3D-Drucker für Carbonkurzfaserbeton entwickelt wurde, konnten mit ersten Ergebnissen an Normprismen etwas geringere Festigkeiten als bei den an der Universität Augsburg hergestellten Kleinstprobekörpern gemessen werden. Dabei wurden verschiedene Düsengeometrien und Pumpen zur Betonförderung im Hinblick auf Betonverarbeitbarkeit, Wirtschaftlichkeit und spezifische Eignung untersucht. Es wurde die Grundlage für die Verwendung einer Multidüse geschaffen.

Mit der dabei hauptsächlich verwendeten Mörtelmischung konnte gezeigt werden, dass aufgrund des hohen w/z-Wertes eine Nachbehandlung der hergestellten Probekörper keinen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit hat.

Es wurden ausführliche Untersuchungen zum Tragverhalten mit zentrisch belasteten Proben und unter einachsiger Biegung durchgeführt. Dabei zeigte sich im Zugbereich ein ausgesprochen duktileres Verhalten, welches dem von Stahl nahegeht. Im Druckbereich zeigte sich das für hochfesten Beton übliche linear elastische Verhalten. Diese Tragverhalten lassen sich auf den komplexeren Spannungszustand im Biegeversuch übertragen und es konnte ein schlüssiges Bemessungskonzept entwickelt werden. Grundsätzlich konnte eine sehr hohe Tragfähigkeit ohne den Einsatz von herkömmlicher Stahlbewehrung erzielt werden.

Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten zeigten das außerordentlich hohe Potential des Materials. Das gutmütige Verhalten der Carbonfasern als einzelnes überträgt sich sehr gut auf das Kompositmaterial, wodurch sich neue Möglichkeiten für den Einsatz, im Bereich von Kranbahnen, Brücken oder Windkraftanlagen ergeben.

Auch bei Langzeitbelastungen zeigte sich, dass es durch den Verzicht der für CFK optimierten Schlichte, welche ab Werk auf den Carbonfasern aufgebracht und während des Oxidationsprozesses thermisch entfernt wird, zu keinem Faserauszug kommt. Hier gab es bei bisherigen Untersuchungen zur Einbringung von Carbon in Beton häufig mangelhafte Ergebnisse.

Im Brandversuch konnte keine zufriedenstellende Lösung gefunden werden, um ein Bauteilversagen schon bei „geringen“ Temperaturen zu verhindern. Hier sind tiefgreifendere Untersuchungen notwendig.

## Eckdaten

---

Kurztitel: Zementgebundener kohlenstofffaserverstärkter Hochleistungswerkstoff

Forscher / Projektleitung:

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Massivbau  
Prof. Oliver Fischer  
Philipp Lauff, M.Eng.

Universität Augsburg  
Lehrstuhl für Festkörperchemie  
Prof. Dirk Volkmer  
Dr. Manuel Hambach  
Matthias Rutzen, M.Eng.

Gesamtkosten: 278.526,00 €

Anteil Bundeszuschuss: 184.346,00 €

Projektlaufzeit: 30 Monate

## BILDER/ ABBILDUNGEN:

---

Bild 1: 1 kl. 3D-Drucker.jpg

Extruder für kleinformatische Probekörper

Bild 2: 2 kl. Hohlraumproben.jpg

Kleinformatische, poröse Probekörper (links: Draufsicht, mitte: Schrägschnitt mit mörtelgefüllten Hohlräumen (rot eingefärbt), rechts: Schrägschnitt durch einen etwas größeren Probekörper)

Bild 3: 3 REM.tif

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Carbonfasern, die aus der Betonmatrix herausragen

Bild 4: 4 Kartuschenpresse.JPG

Erste Upscaling-Versuche mit einer Kartuschenpresse

Bild 5: 5 gr. 3D-Drucker.JPG

Eigens entwickelter 3D-Drucker zur Herstellung großformatiger Probekörper

Bild 6: 6 Druckprozess.jpg

Extrusion von Carbonkurzfaserbeton während des Druckprozesses

Bild 7: 7 Freiform TUM.JPG

Durch den Verzicht auf eine Schalung lassen sich beliebige Freiformen herstellen.