

# **Aktueller Überblick bei der Verwendung von nichtmetallischer Bewehrung im Neubau und beim Bauen im Bestand**

**Alexander Schumann<sup>1</sup>, Maximilian May<sup>2</sup>, Tilo Senckpiel-Peters<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *IU Internationale Hochschule, Standort Dresden, Schweriner Straße 5, Dresden;  
CARBOCON GMBH, Mohorner Straße 13, Dresden*

<sup>2</sup> *CARBOCON GMBH, Mohorner Straße 13, Dresden*

<sup>3</sup> *Johne & Groß GmbH, Kamenzer Straße 18, Schwepnitz*

**Zusammenfassung:** Nichtmetallische Bewehrungen (u. a. Carbon, Glas oder Basalt) finden heutzutage vermehrt Einsatz in der Baubranche. Sowohl für Neubauteile als auch für den Erhalt von Bauwerken können nichtmetallische Bewehrungen zur Reduzierung der endlichen Ressourcen im Bauwesen bzw. zum Erhalt unserer Bausubstanz beitragen. Im Zuge des Beitrags wird das Potential der neuen Bauweise aufgezeigt und Hintergründe zur Berechnung und Bemessung für die jeweiligen Bereiche gegeben. Zusätzlich wird der aktuelle Stand der baurechtlichen Anwendung in Deutschland für den Neubau und die Verstärkung gegeben.

## **1 Einleitung**

Die Baubranche ist weltweit nicht nur für 30 - 50 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen, sondern auch für die Hälfte des Ressourcenverbrauches und 55 % des weltweiten Abfallaufkommens verantwortlich [1-3]. Das Bauen nachhaltiger zu gestalten, wird die Herausforderung der kommenden Jahrzehnte sein. Um die klimabezogenen Zielsetzungen Deutschlands zu erfüllen, bedarf es einer tiefgreifenden Veränderung im Bauwesen. Dies beinhaltet auch, bestehende Planungskonzepte und Überlegungen im gesamten Gestaltungsprozess kritisch zu hinterfragen und hinsichtlich ihrer Klimarelevanz neu zu beurteilen. Dabei sollten klimafreundliche und ressourcensparende Neuerungen verstärkt in den Bausektor integriert werden.

Heutzutage ist Stahlbeton immer noch das meistverwendete Baumaterial der Welt. Jedoch ist weitreichend bekannt, dass die Betonherstellung und -ausführung einen signifikanten Einfluss auf die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen besitzt. Aus diesem Grund und infolge der Korrosionsanfälligkeit des Stahls im Beton wird seit Jahren intensiv nach Alternativen gesucht. Im Hinblick auf die aktuellen Entwicklungen der Nachhaltigkeit und der

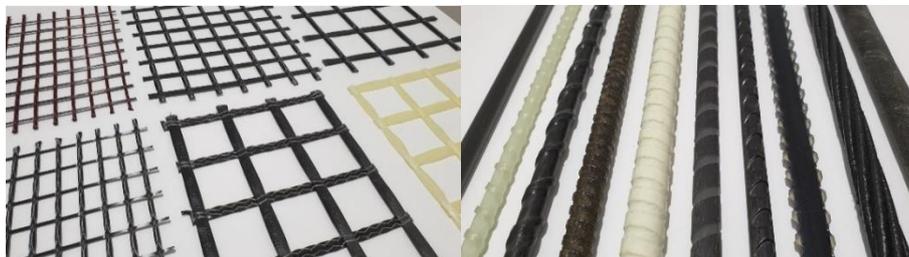
Ressourceneinsparung hat sich der Hochleistungswerkstoff Carbonbeton als mögliche Lösung entwickelt. Hierbei kann der Werkstoff Carbonbeton sowohl für den Neubau als auch für die Verstärkung und Instandsetzung von bestehenden Bauwerken eine wichtige Rolle einnehmen. Zum einen kann mit Hilfe von Carbonbeton im Vergleich zum Stahlbeton wesentlich dünner und somit ressourcensparender und zum anderen langlebiger gebaut werden. Im Bereich des Verstärkens von Bestandsbauwerken bietet der Carbonbeton zudem durch minimale Verstärkungsdicken von wenigen Millimetern enormes Potential, um Bauwerke vor dem Abriss zu bewahren. Dieser war bisher oft unumgänglich, da die konventionellen Verfahren infolge materialintensiver und massiver Ausführungen die maroden Tragstrukturen der Bauwerke überbeanspruchen und als Sanierungslösung ungeeignet sind. Aufgrund der minimalen Dicken beim Verstärken mit Carbonbeton können nun alte Bauwerke erhalten werden, die ansonsten abgerissen werden, da konventionelle Verfahren an Ihre Grenzen, u. a. aufgrund des hohen Zusatzgewichtes beim Spritzbeton, gekommen wären.

Nachfolgend wird der Werkstoff Carbonbeton in Kürze beschrieben und wesentliche Hinweise gegeben. Darüber hinaus wird auf den aktuellen Stand der Regelwerke sowie auf Besonderheiten bei der Berechnung und Bemessung von umgeformten nichtmetallischen Bewehrungen eingegangen.

## 2 Bauen mit Carbonbeton

### 2.1 Textilbeton im Allgemeinen

Der Verbundwerkstoff Textilbeton beruht auf dem gleichen Tragprinzip wie Stahlbeton: der Beton nimmt beim Neubau die Druckkräfte und die nichtmetallische Bewehrung die Zugkräfte auf. Bei der Verstärkung übernimmt der Beton die Verbundkraftübertragung zum Altbeton und die Bewehrung nimmt die Zugkräfte auf. Jedoch kann durch die im Vergleich zu Stahl leistungsfähigeren und dauerhafteren nichtmetallischen Fasern wesentlich an Beton gespart und langlebiger gebaut werden. Heutzutage kommen beim Textilbeton eine Vielzahl an unterschiedlichen nichtmetallischen Bewehrungen (Carbon, Glas und Basalt) zum Einsatz. Neben klassischen Gittern finden gegenwärtig auch vermehrt Stäbe Einzug in die Baubranche. In Abbildung 1 sind einige aktuell verfügbare Bewehrungen für den Neubau und die Sanierung bzw. Verstärkung gezeigt.



**Abbildung 1:** Nichtmetallische Bewehrungen, Foto: Frank Schladitz

Durch die Verwendung von nichtmetallischen Bewehrungen im Betonbau ergeben sich für die Verstärkung von bestehenden Bauwerken als auch für den Neubau neue Möglichkeiten, die aber mit Besonderheiten bei der Planung und Bemessung einhergehend, welche nachfolgend genauer gezeigt werden.

## **2.2 Verstärken von Bestandsbauwerken**

Bestand erhalten – Klima schützen! Im Erhalt unserer bestehenden Bausubstanz liegt einer der Schlüssel zur Erreichung der globalen Klimaziele. Aktuelle Studien und Statements zeigen dies auf [3,4]. Statisch tragende Bauteile im Hoch-, aber insbesondere im Ingenieur- und Verkehrsbau können mit konventionellen Verfahren, wie z. B. Verstärkungen mit Spritzbeton, oftmals nicht für zukünftige Anforderungen fit gemacht werden, insbesondere unter Beachtung aller baurelevanten Anforderungen (u. a. Instandsetzung, Denkmalschutz, Brandschutz). Der ökologisch betrachtet, verschwenderische Abriss mit allen umweltbelastenden Auswirkungen ist dann oftmals die Folge. Zur Vermeidung des Bestandsabbrisses und zur Wahrung unserer gebauten Umwelt hat sich der Carbonbeton im Bereich des Bauens im Bestand als mögliche Variante herauskristallisiert.

Durch die Beständigkeit gegenüber angreifenden Medien sowie die um ein vielfaches höhere Zugfestigkeit der Carbon- gegenüber einer Stahlbewehrung, können mit deutlich kleineren Bewehrungsquerschnitten, bei gleichzeitig reduzierter Betondeckung von wenigen Millimetern, Tragfähigkeitssteigerungen gewährleistet werden. Eine Verstärkungsschicht mit einer Dicke von wenigen Zentimetern (10-20 mm Gesamtschichtdicke) reicht somit oftmals aus, um die Tragfähigkeit eines Bauwerkes wieder herzustellen oder diese signifikant zu erhöhen.

Bei der Verstärkung von alten Gebäuden mit Carbonbeton kommen i. d. R. Carbongitter mit kleineren Maschenweiten und ein speziell angepasster Feinkornbeton zur Anwendung. Der verwendete Beton hat ein Größtkorn von 1-2 mm und hohe Druck- und Zugfestigkeiten bei einem geringen E-Modul, weshalb der Feinkornbeton auch für niedrigfeste Betone zur Anwendung kommen kann. Das kleine Größtkorn ist zur Sicherstellung der minimalen Schichtdicken von 3-5 mm erforderlich. Für weiterführende Informationen zum Themenfeld Verstärkung mit Carbonbeton kann u. a. auf [5-10] verwiesen werden.

Die in den vergangenen Jahren ausgeführten Praxisprojekte bestätigen die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des Carbonbetons im Bereich der Verstärkung. So wurden in den letzten Jahren u. a. die Hyparschale in Magdeburg, der Beyer-Bau in Dresden, eine Autobahnbrücke bei Frankfurt über die Nidda und die Fußgängerbrücke über den Stadtgraben zur Thainburg in Naumburg (Saale) mit Carbonbeton instandgesetzt bzw. verstärkt [10-12].

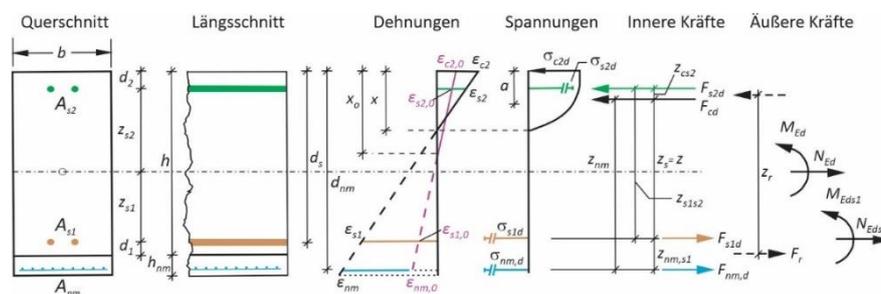
Das Verfahren für eine Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton ist in Deutschland unter der Bezeichnung „Z-31.10-182 CARBOrefit®-Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton“ bauaufsichtlich geregelt. Bei einer Verstärkung mit dem CARBOrefit®-Verfahren ist zu beachten, dass es sich bei den zu verstärkenden Bauteilen um Normalbetone mit einer maximalen Festigkeit entsprechend der Festigkeitsklasse C50/60 handelt. Des Weiteren muss der Altbeton eine Oberflächenzugfestigkeit von mindestens 1,0 N/mm<sup>2</sup> aufweisen, mit der statistischen Auswertung nach der geltenden Zulassung. Zudem sollte die vorhandene Betondeckung des Bestandsstahl mindestens 10 mm betragen. Im Gegensatz zum Spritzbeton wird die Verbundfuge nicht zusätzlich verdübelt. Die

Verbundkräfte zwischen Verstärkung und Bestand werden mittels einer aufgerauten Oberfläche sichergestellt, wobei eine mittlere Rautiefe von mindestens 1,0 mm benötigt wird. Eine Verstärkung mit Carbonbeton darf nur von Unternehmen mit nachgewiesener Eignung entsprechend den Vorgaben des DIBt's durchgeführt werden [25].

Die Berechnung der erforderlichen Lagenanzahl der Verstärkungsschicht erfolgt analog zu einer Dimensionierung mit Spritzbeton. Für die Nachweisführung müssen u. a. folgende Nachweise geführt werden:

- Nachweis der Biegetragfähigkeit,
- Nachweis der Querkrafttragfähigkeit (ohne Ansatz der Carbonbetonschicht),
- Nachweis der Verbundfuge,
- Nachweis des Versatzbruches und der Endverankerung am Ende der Verstärkungsschicht,
- Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit,
- Konstruktive Nachweise,
- Nachweis der Feuerwiderstandsdauer (ohne Ansatz der Carbonfaser, aber ggfs. mit zusätzlicher Betondeckung durch den nachträglich aufgetragenen Feinkornbeton).

Die Biegebemessung für Stahlbetonbauteile mit Carbonbetonverstärkung erfolgt analog zu den Prinzipien des Stahlbetonbaus. Durch Iteration der Dehnungsebene wird ein Gleichgewicht zwischen den inneren Schnittgrößen (Widerständen) mit den äußeren Größen (Beanspruchungen) hergestellt. Dabei werden die Dehnungen des Betons, der Stahlbewehrung sowie der Carbongitter variiert. Mit den Kennlinien und den Stoffgesetzen der verschiedenen Materialien kann folglich der Widerstand ermittelt werden (Abb. 2). Für ausführliche Informationen wird u. a. auf [13-16] verwiesen. Als weitere Variante zur Vereinfachung der Biegebemessung ohne Iteration gibt es, analog zum Stahlbeton, die Möglichkeit, die Bewehrungsmenge mithilfe von Bemessungstabellen zu ermitteln. Diese Bemessungshilfen werden von den entsprechenden Herstellern zur Verfügung gestellt und gelten dann für die in diesen Bemessungshilfen geregelten Carbongittern.



**Abbildung 2:** Prinzipische Skizze zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit eines carbonbetonverstärkten Rechteckquerschnitts, Grafik: Maximilian May

Der Nachweis der Schubkraftübertragung zwischen Verstärkungsschicht und dem Altbeton erfolgt nach EC2. Hierbei kann planerisch von einer rauen Fuge ausgegangen und der Nachweis ohne zusätzliche Verdübelung geführt werden. Die raue Fuge muss im Zuge der

Ausführung sichergestellt und kontrolliert werden. Die weiteren Nachweise u. a. Verankerungsnachweis der Carbongitter oder der Versatzbruchnachweis sind in der entsprechenden Zulassung / Bauartgenehmigung aufgeführt und werden an dieser Stelle nicht weiter vertieft. Auf Grundlage bestehender Erkenntnisse aus dem Stahlbetonbau bzw. aus dem Bereich der aufgeklebten Lamellen (u. a. Versatzbruchnachweis) können mit leichten Modifikationen und den entsprechenden Materialkennwerten der Carbongitter die rechnerischen Nachweise geführt und somit die Tragfähigkeit bestehender Bauteile erhöht bzw. wiederhergestellt werden.

### 2.3 Neubau

Der Carbonbeton ist ebenfalls für den Neubaubereich prädestiniert, da durch die hohe Dauerhaftigkeit der Carbonbetonbauteile in Verbindung mit der hohen Leistungsfähigkeit, Bauteile dünner und langlebiger gestaltet werden können. In Verbindung mit vorgespannten Carbonelementen entstehen auch sehr filigrane bzw. weitgespannte Tragwerke, die sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit sicherstellen. In den letzten Jahren konnten bereits einige Bauwerke bzw. -teile aus Carbonbeton in der Praxis umgesetzt werden. Nachfolgend sind einige ausgewählte Praxisprojekte bzw. Anwendungsfelder aufgezählt (weiterführende Informationen entnehmen Sie [17-21]):

- Diverse Fußgängerbrücken vollständig aus Carbonbeton oder teilweise aus Carbonbeton (hybride Strukturen), u. a. Fußgängerbrücke Albstadt-Lautlingen,
- Nichtmetallisch bewehrte Betonfassaden, u. a. Fassade Neuer Markt,
- Erste Trafo-Station aus nichtmetallischer Bewehrung in Deutschland,
- Vorgespannte Strukturen aus Carbonbeton (CPC),
- Straßenbrücke aus Carbonbeton für den Schwerlastverkehr in Sachsen (Abb. 3).



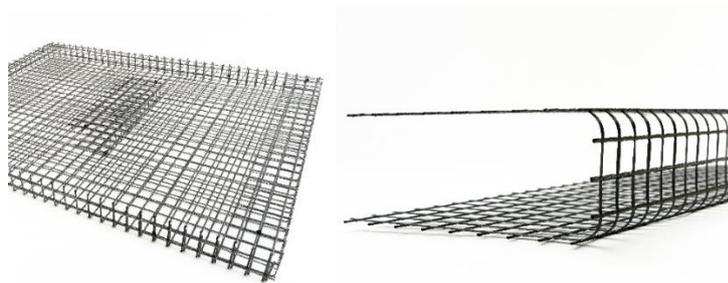
**Abbildung 3:** links: Straßenbrücke für den Schwerlastverkehr vollständig aus Carbonbeton; rechts: Bild von den Carbonstäben; Foto: CARBOCON, Enrico Lorenz

Zusätzlich zu den zuvor genannten Praxisprojekten ist auch in Dresden das erste vollständig aus Carbonbeton errichtete Gebäude entstanden – der CUBE. Das Vorhaben zeigt, dass dies heutzutage technisch bereits möglich ist und dass dabei neue Formenvielfalten entstehen können. Weiterführende Informationen zum CUBE sind [22, 23] zu entnehmen.

## 2.4 Nichtmetallische Formbewehrung

Ebene Bewehrungen, wie z. B. Carbongitter oder -stäbe, sind heutzutage schon vielfach im Einsatz, sowohl im Neu- als auch im Bestandsbau. Geformte Bewehrungen aus nichtmetallischen Fasern sind in Deutschland bisher weniger weit verbreitet. Aufgrund der Anisotropie der nichtmetallischen Fasern stellen umgeformte Bewehrungen hohe Anforderungen an die Herstellung und Bemessung. Nachfolgend wird eine mögliche Ausführung von umgeformten Bewehrungen aufgezeigt.

Ebene, thermoplastisch gebundene CFK-Gitter werden unter Einsatz eines bei der Johne & Groß GmbH intern entwickelten Formgebungsverfahrens nach ihrer Fertigung zu Formgittern weiterverarbeitet. Die gewünschten Profile können gemäß Bewehrungsplan bzw. Biegeliste produziert werden. Dieses Verfahren ermöglicht es nahezu sämtliche Bauteilformen beanspruchungsorientiert zu bewehren. Ein statisch tragender Einsatz der nichtmetallischen Formbewehrung ist zwar wissenschaftlich belegt [24], jedoch noch nicht zulassungsseitig reglementiert. Er bedarf gegebenenfalls einer Zustimmung im Einzelfall bzw. vorhabenbezogener Bauartgenehmigung, wozu die Johne & Groß GmbH die vorhandene experimentelle Datenbasis zur Verfügung stellt bzw. bei der Erlangung weiterer Daten unterstützt. Nichtmetallische Formbewehrung ist in allen aus dem Betonstahl bekannten Biegeformen erhältlich. Die maximale Formgitterbreite beträgt 2,44 m. Die Schenkellängen können von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern betragen. Umformungen in zwei Richtungen sind möglich. Es können sowohl Faserstränge in Längs- als auch in Querrichtung umgeformt werden.



**Abbildung 4:** CFK-Bewehrungsprodukte im Überblick; links: Formgitter als C-Profil; rechts: zusammengesetzter CFK-Bewehrungskorb, Bild: Johne & Groß GmbH

Im Bereich der Umformung wird die Zugtragfähigkeit der Bewehrung beeinflusst bzw. abgemindert. Es ist bekannt, dass sich die Zugbruchspannung der Faserstränge mit kleineren Biegerollendurchmessern und damit zunehmender Umlenkpressung verringert. Zur Bestimmung der anrechenbaren Zugfestigkeit umgeformter CFK-Stäbe, gibt die DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ Auskunft, welche zeitnah bauaufsichtlich eingeführt wird [27].

Zur Ermittlung der anrechenbaren Zugfestigkeit, s. Gl. (1), umgeformter CFK-Gitter wird der Abminderungsbeiwert  $\alpha_{D,min}$  benötigt.

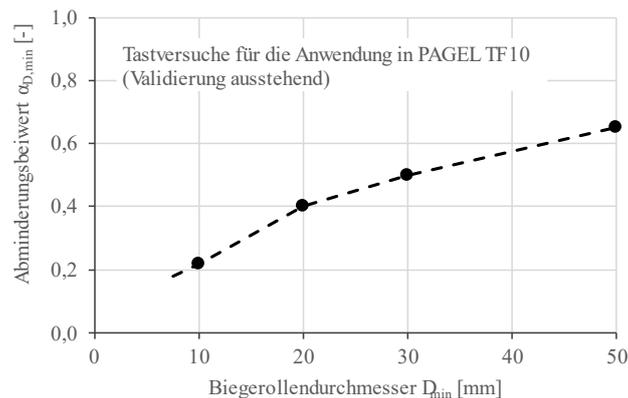
$$f_{f,nm,d} = f_{f,nm,k} \cdot \alpha_{nmt} \cdot \frac{\alpha_{D,min}}{\gamma_{nm}} \quad (1)$$

mit  $f_{f,nm,k}$  ... Charakteristische Kurzzeit-Zugfestigkeit (auf die Faserfläche bezogen) gemäß Produktdatenblatt [25]

$\alpha_{nmt}$  ... Beiwert zur Berücksichtigung der Langzeitauswirkungen, s. Abbildung 5

$\gamma_{nm}$  ... Teilsicherheitsbeiwert [21]

Der Abminderungsfaktor  $\alpha_{D,min}$  für die CFK-Gitter kann für eine Vorbemessung der Abbildung 5 entnommen werden. Die Ergebnisse stammen aus dem im Rahmen des BMBF-Programm RUBIN (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation) geförderten Forschungsprojekt „Industriestandard Carbonbeton“ (ISC) und sollen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Massivbau der TU Dresden in einem umfangreichen Versuchsprogramm für unterschiedliche Betonmatrixes validiert werden. Die Werte aus der Abbildung 5 wurden in ersten Tastversuchen im Verbund mit einem Feinkornbeton mit kleinem Größtkorn (TF10 CARBOrefit® Feinbeton) erzielt. Weitere Zugfestigkeiten der Formgitter der Johne & Groß GmbH im Verbund mit weniger festen Betonmatrixes werden derzeit ermittelt.



**Abbildung 5:** Abminderungsbeiwert  $\alpha_{D,min}$  zur Abschätzung der anrechenbaren Zugfestigkeit umgeformter CFK-Gitter in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser nach [26]

Dieser kurze Überblick zeigt, dass verschiedene Formbewehrungen auch mit nichtmetallischer Bewehrung möglich sind. Zu beachten ist dabei, dass die Umlenkung einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit und somit die Bemessung hat. Zur Übertragung einer größtmöglichen Kraft wird ein Mindestbiegerollendurchmesser von 30 mm empfohlen [26].

## 2.5 Aktuelle Regelwerke

Normative Regelwerke, sei es auf nationaler oder internationaler Ebene, erleichtern dem Anwender den Umgang mit dem darin geregelten Gegenstand und schaffen Planungssicherheit. Obwohl Textilbeton bereits seit über 25 Jahren erforscht wird, gibt es

aktuell noch keine Norm, die den Werkstoff und seine Anwendung regelt. Durch das Fehlen von Normen oder Richtlinien dürfen Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton nur mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) bzw. allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) innerhalb des vorgegebenen Anwendungsbereichs angewendet werden. Liegt jedoch in dem Zusammenhang mit der jeweiligen Baumaßnahme keine abZ oder aBG vor, bedarf es einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bzw. einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG). Das Erfordern einer ZiE / vBG führt zwangsläufig zu höheren Kosten und hat ggfs. Einfluss auf den Zeitplan. Für das Verstärken mit Carbonbeton (CARBOrefit®) gibt es eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung bzw. allgemeine Bauartgenehmigung, welche das Verstärken durch Carbonbeton im definierten Anwendungsbereich ermöglicht.

Im Bundesvorhaben C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite wurde im Vorhaben V1.2 „Normung und Zulassung“ die Vorarbeit für die Erstellung allgemeingültiger Regelwerke für den Werkstoff Carbonbeton begonnen, sowohl im Bereich des Neubaus als auch in der Verstärkung. Nach Ablauf des Vorhabens V1.2 wird im Anschlussprojekt L9 „Regelwerke“ versucht, die bestehenden Lücken zu schließen. Dies geschieht unter der Koordination des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton e.V. (DAfStb). Parallel und nach Abschluss des Forschungsvorhabens arbeitet aktuell ein Unterausschuss des DAfStb an der ersten Richtlinie für Neubauteile aus nichtmetallischer Bewehrung [27]. Mit Erscheinen der Richtlinie können erste Bauteile aus nichtmetallischen Bewehrungen im Bereich des Neubaus geplant und umgesetzt werden. Die Veröffentlichung der Richtlinie für den Neubau ist im Jahr 2024 geplant. Zeitgleich wird im Bereich der Verstärkung mit Carbonbeton ebenfalls an einer Richtlinie vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton gearbeitet.

### **3 Schluss**

In Anbetracht der dringenden Notwendigkeit, die Baubranche nachhaltiger zu gestalten und ihren erheblichen Beitrag zu CO<sub>2</sub>-Emissionen, Ressourcenverbrauch und Abfallaufkommen zu reduzieren, steht die Branche vor einer gewaltigen Herausforderung. Die Integration von Innovationen wie Carbonbeton, die sowohl im Neubau als auch bei der Sanierung bestehender Bauwerke Anwendung finden, ist entscheidend für die Erreichung der klimabezogenen Zielsetzungen. Mit den fortschreitenden Entwicklungen in den Regelwerken und Richtlinien wird Carbonbeton nicht nur eine umweltfreundlichere Alternative zu traditionellen Materialien bieten, sondern auch die Anwendung in der Praxis vereinfachen und somit einen wesentlichen Beitrag zur Transformation der Baubranche im Sinne des Klimaschutzes leisten.

### **4 Literatur**

- [1] Global Alliance for Building and Construction: GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION, United Nations Environment Programm, 2021, 105 Seiten
- [2] Weidner, S. et al.: Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien, Beton- und Stahlbetonbau 116, Nr. 12 (2021). S. 969 - 977.

- [3] W. Sobek: non nobis: über das Bauen in der Zukunft. Buch 1: Ausgehen muss man von dem, was ist. Stuttgart:av edition, 2022
- [4] Schumann, A.; Schöffel, J.; May S.; Schladitz, F.; Curbach M. Ressourceneinsparung mit Carbonbeton am Beispiel der Verstärkung der Hyparschale in Magdeburg. In: Hauke, B. (Hrsg.) Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz. Institut Bauen und Umwelt e. V., DGNB e. V., 2021, S. 282-286
- [5] Younes, A.; Seidel, A.; Rittner, S. et al.: Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile. Beton- und Stahlbetonbau 110, S1 (2015), S. 16-21. <https://doi.org/10.1002/best.201400101>
- [6] Curbach, M.; May, S.; Müller, E.; Schumann, A.; Schütze, E.; Wagner, J. (2021) Verstärken mit Carbonbeton. In: Beton-Kalender 2022 – Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung; Hrsg. Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D., Eds.; Ernst und Sohn: Berlin, Germany, 2021; pp. 761–804.
- [7] Scheerer, S. et al. (2019) Flexural strengthening of RC structures with TRC - Experimental Observations, Design Approach and Application, Applied Sciences. Special Issue "Textile Reinforced Cement Composites: New Insights in Structural and Material Engineering" 9, 1322, DOI: 10.3390/app9071322.
- [8] Jesse, F.; Curbach, M. (2010) Verstärken mit Carbonbeton. BetonKalender 2010, S. 457 – 565.
- [9] Müller, E.; Schmidt, A.; Schumann, A.; May, S.; Curbach, M.: Biegeverstärkung mit Carbonbeton - Neue Carbonbewehrung im Anwendungstest. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) 10, S. 758-767 - DOI: 10.1002/best.202000012.
- [10] Wagner, J.; Würgau, C.; Schumann, A.; Schütze, E.; Ehlig, D.; Nietner, L.; Curbach, M.: Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Carbon Reinforced Concrete – Possibilities and Challenges. CivilEng 3 (2022) 2, S. 400 – 426 - [doi.org/10.3390/civileng3020024](https://doi.org/10.3390/civileng3020024)
- [11] Riegelmann, P.; Bochmann, J.; Schumann, A.; May, S.; Garibaldi, P.-M.; Curbach, M.: Mütter's shell structures in Germany - restoration vs. Demolition. Engineering History and Heritage 174 (2020) 3, S. 124-132 - [doi.org/10.1680/jenhh.20.00012](https://doi.org/10.1680/jenhh.20.00012).
- [12] Steinbock, O.; Bösche, T.; Schumann, A.: Carbonbeton - Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken; Teil 2: Carbonbeton im Brückenbau und Informationen zur Zustimmung im Einzelfall für das Pilotprojekt - Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) 2, S. 109-117 - DOI: 10.1002/best.202000106.
- [13] Beckmann, B.; Frenzel, M.; Lorenz, E.; Schladitz, F.; Rempel, S.: Biegetragverhalten von textilbetonverstärkten Platten. Beton- und Stahlbetonbau 110 S1 – Verstärken mit Textilbeton (2015), Januar, S. 47–53, <https://doi.org/10.1002/best.201400117>.
- [14] Frenzel, M.; Curbach, M.: Bemessungsmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit von biegeverstärkten Stahlbetonplatten. In: Curbach, M.; Ortlepp, R. (Hrsg.): Textilbeton in Theorie und Praxis – Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken. Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 (Dresden) und 532 (Aachen) am 19./20.9.2011 in Berlin, 2011, S. 381–399.

- [15] Frenzel, M.: Bemessung textilbetonverstärkter Stahlbetonbauteile unter Biegebeanspruchung. Beton- und Stahlbetonbau 110 S1 – Verstärken mit Textilbeton (2015), Januar, S. 54–68, <https://doi.org/10.1002/best.201400115>.
- [16] Curbach, M.; Schladitz, F.; Zobel, R.; Weselek, J.: Eine Vision wird Realität: Der Betonbau der Zukunft ist nachhaltig, leicht, flexibel und formbar – dank Carbon. Der Prüfenieur 51 (2017), S. 20–35.
- [17] Aldermann, K.; Schumann, A.; Rudloff, T.; Zernsdorf, K.; Wiel, R.; Michler, H.: Industriestandard Carbonbeton – durch Standards in eine ressourcenschonende Art des Bauens. Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023) 10, S. 757-765 - <https://doi.org/10.1002/best.202300052>
- [18] LORENZ, E.; PETER, A.; MAY, S.; BÖSCHE, T.: Planung und Neubau einer Straßenbrücke aus Carbonbeton – Carbonbeton „Next Step“. Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023) 9, S. 705-712 - <https://doi.org/10.1002/best.202300037>
- [19] Schumann, A.; May, S.; Curbach, M.: Design and Testing of various Ceiling Elements made of Carbon Reinforced Concrete. Proceedings 2 (2018) 8, 543, <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05436>.
- [20] May, M.; Riegelmann, P.; Schumann, A.; Curbach, M.: Carbonstäbe im Bauwesen; Teil 3: Bestimmung der Zugtragfähigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) 7, S. 508-517 - DOI: 10.1002/best.202100031.
- [21] Curbach, M.; Hegger, J.; Schladitz, F.; Tietze, M.; Lieboldt, M. [Hrsg.]. (2023) *Handbuch Carbonbeton – Einsatz nichtmetallischer Bewehrung, 1. Auflage*. Ernst & Sohn GmbH.
- [21] Betz, P.; Schumann, A.; Scheerer, S.; Curbach M.: Carbonstäbe im Bauwesen; Teil 5: Einflussfaktoren auf das Verbundverhalten. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) 12, S. 924-934 - DOI: 10.1002/best.202100035.
- [22] Frenzel, M.; Scheerer, S.; Schmidt, A.: Übersicht über die im Cube verwendeten Materialien. Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023) S2, S. 56-36 - DOI: 10.1002/best.202200125.
- [23] Zavadski, V.; Frenzel, M.: Aufbau, Bemessung und Planung der TWIST-Carbonbetonschalen. Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023) S2, S. 71-81 - DOI: 10.1002/best.202300009.
- [24] Bielak, J.: Shear in slabs with non-metallic reinforcement. RWTH Aachen, Dissertation, 2021.
- [25] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung / allgemeine Bauartgenehmigung: Z-31.10-182: CARBOrefit – Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton. Deutsches Institut für Bautechnik. Gültig vom 31.08.2023 bis 31.08.2028.
- [26] Technisches Informationsblatt: <https://www.jgg-stahl.de/download/technische-information-cfk-formgitter/>, entnommen am 23.11.2023.
- [27] Will, N.: DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ – Von Forschung und Pilotprojekten zum Regelwerk. Tagungsband vom 61. Forschungskolloquium mit 9. Jahrestagung, 26.-27. September 2022, Dresden, S.157-162.