

Oberflächenprofilierter Carbongitter für Carbonbetonanwendungen

Zierold, K.*; Hahn, L.*; Cherif, C.*

***Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM), TU Dresden**

konrad.zierold@tu-dresden.de

Abstract

Die volle Substanzfestigkeit des Hochleistungsmaterials Carbon kann im Betonverbund immer noch nicht ausgenutzt werden kann. Das liegt in der geringen Festigkeit der stoffschlüssigen Verbindung zwischen Carbonfaden und Betonmatrix begründet. Hier setzte das erfolgreich abgeschlossene Forschungsprojekt IGF 21153 BR des ITM an. Der Fokus lag auf der Entwicklung und Umsetzung von Verfahren zur Integration von Formschlusselementen im Herstellungsprozess von textilen Bewehrungen zur Steigerung der Verbundfestigkeit zwischen Bewehrung und Beton. Es wurde nachgewiesen, dass der dadurch erreichte zusätzliche Formschluss auf Basis einer Oberflächenprofilierung, ähnlich dem gerippten Bewehrungsstahl, den Schubfluss vervierfacht, die erforderliche Überlappungslänge folglich viertelt und damit den Materialeinsatz erheblich reduziert. Zwei Vorzugsvarianten wurden herausgearbeitet, für deren erfolgreiche Umsetzung die Entwicklung von Inline-Temperatur- und Feuchtigkeitsmesssystem erforderlich war.

Ausgangssituation und Problemstellung

Beton ist weltweit der wichtigste und am häufigsten eingesetzte Baustoff und wird in nahezu allen Anwendungsbereichen in Kombination mit einer Bewehrung zur Aufnahme der Zugkräfte eingesetzt [1]. Durch die Kombination von Beton mit einem Bewehrungsmaterial wie Stahl, können Bauwerke errichtet werden, die höchsten Beanspruchungen standhalten können. Da Stahl jedoch ein korrosionsanfälliges Material ist, muss eine signifikante Deckschicht stark basischen Betons aufgewendet werden, um einen Verlust der Tragleistung durch Korrosion der Bewehrung zu verlangsamen [2]. Zur Abtragung der im Bauwerk wirkenden Drucklasten ist die Dicke der Deckschicht nicht erforderlich. Daher erfolgte in den letzten beiden Dekaden die Entwicklung und sukzessive Praxiseinführung von Textilbewehrungen, die aus hochleistungsfähigen Multifilamentgarnen aus Carbon oder alkaliresistentem Glas bestehen, die mit textilen Verfahren zu mehraxialen Gitterstrukturen verarbeitet und, um den inneren und äußeren Verbund sicherzustellen, getränkt werden [3–5]. Derartige Textilbewehrungen können bei einer Betonersparnis von bis zu 70 % (durch dünnwandige Bauweise) die gleichen Kräfte übertragen wie konventionelle Stahlbewehrungen. Textilbewehrungen sind korrosionsunempfindlich und ermöglichen eine sehr effiziente, betonsparende und dauerhafte Armierung von Betonbauwerken bzw. -bauteilen in den vielfältigsten Anwendungsgebieten [6, 7].

Textilbewehrungen für Betonbauteile werden industriell i. d. R. mit der (Multiaxial-)Kettenwirktechnik hergestellt und anschließend im Inline- oder Offline-Verfahren getränkt [8–10]. Hierbei beeinflussen das eingesetzte Tränkungsmedium, das Tränkungs-, Aushärteverfahren und dessen Einstellparameter sowie die Art der Warenführung im Tränkungsgebiet maßgeblich die erreichbaren Festigkeits- und Verbundkennwerte der gefertigten Textilbewehrung und deren Reproduzierbarkeit [11]. Die allein durch den stoffschlüssigen Haftverbund mit Glattgarnen übertragbaren, längenbezogenen Kräfte (Schubfluss) liegen derzeit bei max. 20 N/mm [12]. Ein niedriger Schubfluss führt zu einem hohen Materialbedarf infolge notwendiger Überlappungen der Bewehrungen. Das volle Leistungspotential der kostenintensiven Carbonfasern wird daher derzeit bei Carbonbetonbauweisen bei weitem nicht ausgenutzt. Vor diesem Hintergrund leitete sich die Motivation ab, zum einen die Leistungsfähigkeit textiler Bewehrungen durch Verbesserung des äußeren Verbundverhaltens zur Betonmatrix deutlich zu steigern und zum anderen deren Qualität durch die Implementierung von Prozessüberwachungsmaßnahmen zu erhöhen.

Zur signifikanten Verbesserung der übertragbaren Verbundkräfte ist eine sichere Formschlusswirkung zwischen dem Textil und dem umgebenden Beton erforderlich. Ziel war es daher, den maschinellen Fertigungsprozess für Textilbewehrungen, um eine neuartige Funktionalität zu erweitern, so dass prozessintegriert eine definierte und schubfeste Oberflächenprofilierung erzeugt und diese Profilierung im Zusammenwirken mit einem gezielt gesteuerten Tränkungs- und Aushärteprozess dauerhaft verfestigt werden.

Technische Entwicklung und Umsetzung

Zur Lösung der beschriebenen Problemstellung wurden Verfahren zur prozessintegrierten Profilierung der Textilbewehrung entwickelt. Hierfür wurden zwei Lösungskonzepte entwickelt, erprobt und evaluiert, die durch unterschiedliche Prinzipien (Prägen und Profilwirkfaden) gezielt Profilierungen ausbilden und die zudem in die textile Fertigung integrierbar sind.

Zur Steigerung der Warenqualität und um den Trocknungs- und Aushärteprozess gezielt hinsichtlich der erreichbaren Zugfestigkeit mit geringer Streuung steuern zu können, wurde eine Inline-Temperaturüberwachung auf Basis taktiler, mitlaufender Temperatursensoren entwickelt. Die Überwachung der Gelegeteuchtigkeit erfolgte mit der NIR-Sensorik (Near Infrared). Die Streuung der Zugfestigkeit der Textilbewehrung in der Warenausgangskontrolle konnte aufgrund der Prozessüberwachung halbiert werden. Es konnte zudem gezeigt werden, dass bestimmte Parameter des Multiaxial-Kettenwirkprozesses einen moderaten Einfluss auf die Eigenschaften der Bewehrung und deren Verbund zum Beton haben, z. B. die Stichelänge und die Bindungsart.

Das erste Konzept umfasst ein Modul zur prozessintegrierten Prägung der getränkten Verstärkungsfäden in 0°-Richtung (Haupttragrichtung), dass den vorhandene Tränkungs- und Aushärteprozess erweitert. Das getränkte Textil durchläuft ein Prägwalzenpaar, wodurch eine definierte Profilierung in das Bewehrungstextil eingebracht wird. Während des Prägens erfolgt parallel die Härtung der imprägnierten profilierten Gitterstruktur, um die geformte Textilstruktur zu konsolidieren, sodass die Profilierung nach Abschluss der Konsolidierung reproduzierbar formstabil erhalten bleibt. Dieses Konzept führt zu einer Umformung der Fadengeometrie, mit seitlicher Auslenkung eines Teils der Fadenfilamente. Das Lösungskonzept 1 ist in Abbildung 1 dargestellt.

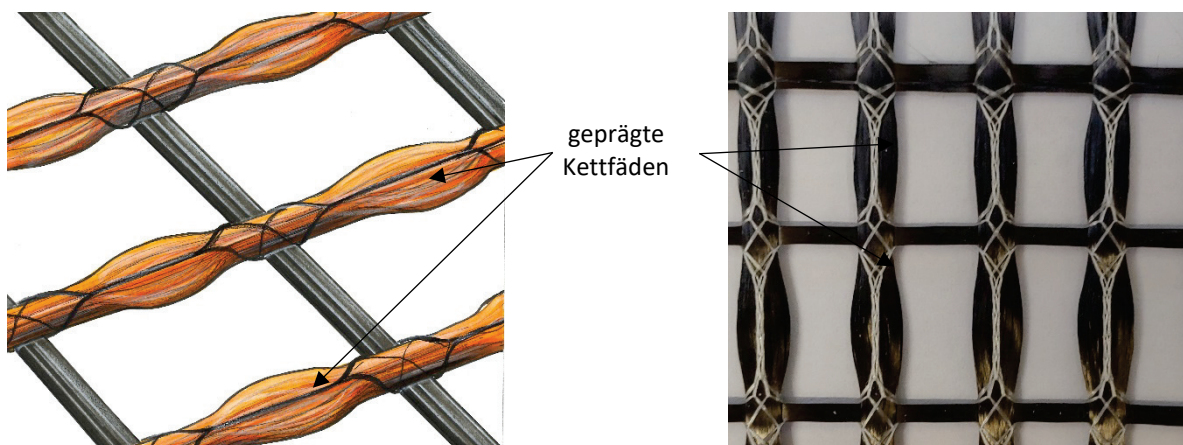


Abbildung 1: Lösungskonzept 1, Profilierung durch Prägen (links: Prinzipdarstellung, rechts: textiltechnische Umsetzung)

Im zweiten Konzept werden die Wirkfäden derartig ausgebildet, so dass die damit wirktechnisch eingebundenen Verstärkungsfäden in 0°-Richtung analog der Rippung von Bewehrungsstahl dauerhaft formstabil und damit im Verbund schubfest profiliert werden. Das entwickelte Lösungskonzept 2 ist in Abbildung 2 dargestellt. Beide Lösungskonzepte führen zu einer formstabilen, reproduzierbaren und strukturintegrierten Profilierung der Bewehrungsstruktur.

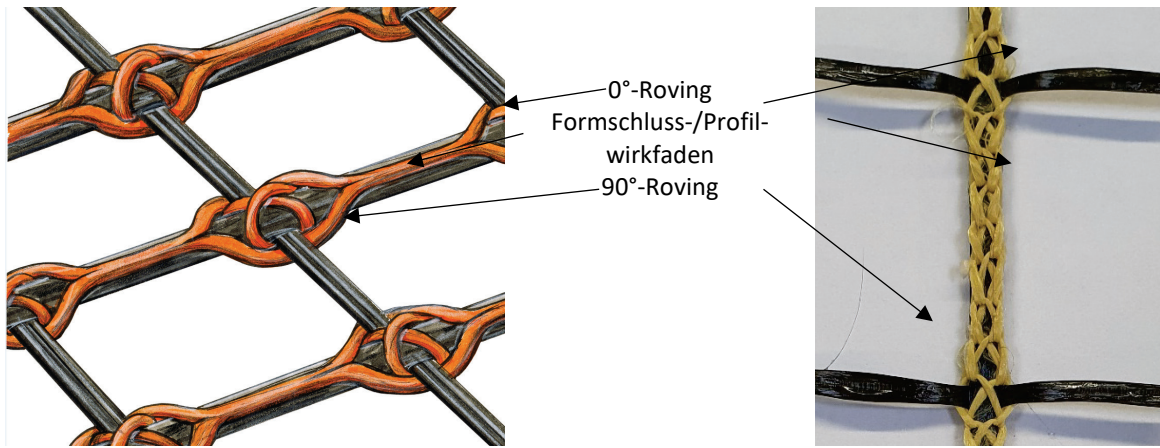


Abbildung 2: Lösungskonzept 2: Profilierung durch Profilwirkfäden (links: Prinzipdarstellung, rechts: textiltechnische Umsetzung)

In Abbildung 3 ist die entwickelte Prozesskette zur Herstellung profilierter Multiaxialgitter, unabhängig von der späteren Tränkungstechnologie, dargestellt. Rot hervorgehoben sind die gemäß der Lösungskonzepte möglichen Eingriffspunkte zur Oberflächenprofilierung.

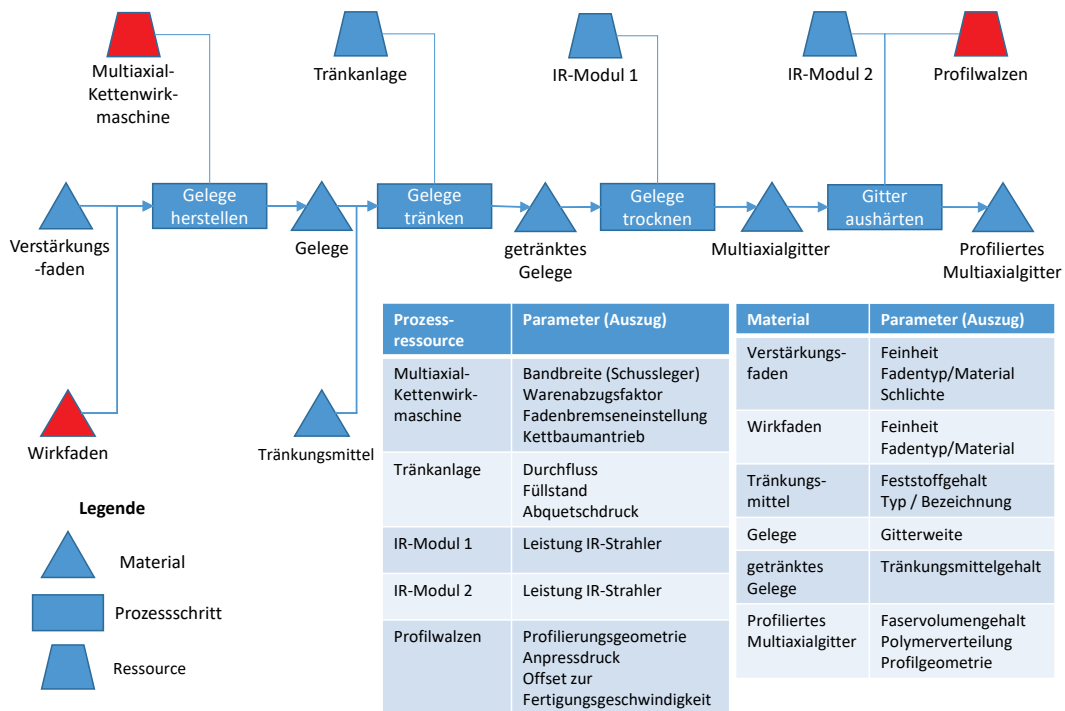


Abbildung 3: Prozessmodell „Textile Bewehrung fertigen“ mit den „Gelege herstellen“, „Gelege tränken“, „Gelege trocknen“, „Gelege aushärten“ (rot hervorgehoben: Eingriffsmöglichkeiten gemäß der Lösungskonzepte zur Profilierung) [13]

Materialcharakterisierung und Ergebnisse

Im Anschluss an die konstruktive Entwicklung und Umsetzung der Lösungskonzepte zur prozessintegrierten Herstellung eines profilierten Multiaxialgitters erfolgte sowohl die Fertigung von textilen Musterstrukturen als auch von Betonverbundprüfkörpern. Zur Charakterisierung der Musterstrukturen wurde das Auszugverhalten der profilierten Multiaxialgitter untersucht. Die für die Fertigung der Bewehrungsstrukturen gewählten Material- und Prozessparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Während der Musterfertigung wurde zudem die Oberflächentemperatur mittels eines eigens dafür entwickelten mitlaufenden kontaktbasierten Temperaturmesssystems sowie die Feuchtigkeit der Musterstrukturen mittels Nah-Infrarotsensoren überwacht und die Temperatur in der Trocknungs- und Aushärtstrecke entsprechend angepasst.

Tabelle 1: Material- und Prozessparameter für Musterstrukturfertigung

Parameter		Bezeichnung / Quantifizierung
Material	Kettfäden	Toho Tenax 48k F13 3200 tex (Teijin Carbon Europe GmbH)
	Schussfäden	Toho Tenax 12k F13 800 tex (Teijin Carbon Europe GmbH)
	Tränkungsmittel	Tecosit CC 1000 (CHT Germany GmbH)
Prozess	Technikumsanlage	Malitronic®, 100 Zoll Arbeitsbreite (Karl Mayer Technische Textilien GmbH) mit integriertem Tränkungs- & Aushärtmodul
	Stichlänge	3,6 mm
	Maschinendrehzahl	bis 275 U/min
	max. Temperatur Aushärtung	185 °C

Im Verbundauszugversuch (gemäß [12]) zeigt sich, dass mittels Prägen profilierte Verstärkungsfäden (Lösungskonzept 1) über einen deutlich erhöhten Schubfluss bei gleicher Auszugslänge gegenüber unprofilierten Verstärkungsfäden oder mit Profilwirkfäden umwirkten Verstärkungsfäden aufweisen (+480 %, siehe Abbildung 4). Die Varianten des Profilwirkfadens (Lösungskonzept 2) brachte nur geringfügige Verbesserungen des Auszugsverhaltens. So konnte zwar die initiale Steifigkeit gesteigert werden, der maximale Schubfluss hingegen konnte gegenüber einem glatten Faden nicht verbessert werden. Begründet liegt dies in der überwiegend stoffschlüssigen Verbindung von Profilwirk- und Verstärkungsfaden über das ausgehärtete Tränkungsmittel. Diese Verbindung wird durch die Kraft beim Garnauszug aus dem Betonverbund durch die entstehenden Scherkräfte an der Kontaktfläche zerstört. Der Verstärkungsfaden wird folglich durch aus den Profilwirkfadenmaschen herausgezogen, weil er maschengerecht der Wirkstelle zugeführt und ein Anstechen der Verstärkungsfäden vermieden wird.

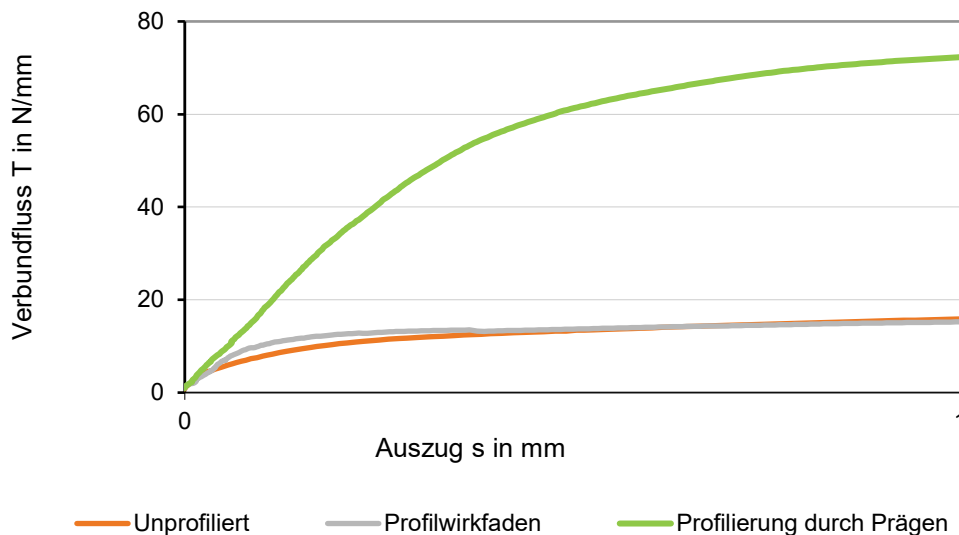


Abbildung 4: Mittelwertkurven zum Vergleich des Verbundflusses von neuartigen profilierten Textilbewehrungen mit unprofilierten Glattelegen

Zusammenfassung

Am ITM der TU Dresden wurden Verfahren entwickelt, die es ermöglichen, auf einer Multiaxial-Kettenwirkmaschine mit integrierter Tränkungs- und Aushärtemodul kontinuierlich oberflächenprofilierete Gitter in reproduzierbarer hoher Qualität für Carbonbetonanwendungen herzustellen. Im Lösungsansatz 1, der Profilierung durch Prägen der Verstärkungsfäden, kann der Schubfluss um mehr als 400 % gegenüber einem Glattelegen gesteigert werden. Die Skalierung und Steigerung der Produktivität dieser Technologie auf Industrieniveau wird Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein. Im Lösungsansatz 2 wurde ein Wirkfaden grober Feinheit (> 150 tex) als profilgebende Komponente (Profilwirkfaden) verwendet und zur maschenbasierten Fixierung der Verstärkungsfäden genutzt. Weitere Forschungsperspektiven zur Steigerung der Verbundhaftung ergeben sich für diese Profilierungsvariante insbesondere in einer Erhöhung der Stoff- und Formschlussverbindung zwischen Profilwirk- und Verstärkungsfaden. Eine Erhöhung des Schubflusses bzgl. des Verbundes zwischen der durch Prägen profilierten Textilbewehrung und dem Beton führt direkt zu einer Verringerung der Auszugslängen unter Last und damit zur Reduzierung der Überlappungslängen um bis zu 75 % bei der Verarbeitung von profilierten Carbonbetonbewehrungen. Damit wird eine Grundlage für eine kosten- und ressourceneffiziente Herstellung von Carbonbetonbauteilen geschaffen, da hierbei eine Vielzahl, von überlappenden Textilbewehrungsbereichen auftreten. Dieser Aspekt verbessert die Wirtschaftlichkeit von Carbonbetonanwendungen und trägt dazu bei, diese innovative und ressourcenschonende Art des Bauens weiter zu etablieren.

Danksagung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 21153 BR der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Der Schlussbericht und weiterführende Informationen sind am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden erhältlich.

Literaturverzeichnis

- [1] BREITENBÜCHER, R.: *Beton ist der am häufigsten verwendete Baustoff - Betonwerk Fertigteil-Technik*. URL https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_Beton_ist_der_am_haeufigsten_verwendete_Baustoff_3307090.html – Überprüfungsdatum 2022-10-28
- [2] WIETEK, B.: *Beton – Stahlbeton – Faserbeton : Eigenschaften und Unterschiede*. Wiesbaden, Heidelberg : Springer Vieweg, 2019
- [3] LORENZ, E. ; SCHÜTZE, E. ; SCHLADITZ, F. ; CURBACH, M.: *Textilbeton - Grundlegende Untersuchungen im Überblick*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Nr. 10, S. 711–722
- [4] EHLIG, D. ; SCHLADITZ, F. ; FRENZEL, M. ; CURBACH, M.: *Textilbeton - Ausgeführte Projekte im Überblick*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (2012), Nr. 11, S. 777–785
- [5] CURBACH, M. ; JESSE, F.: *Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), Nr. 1, S. 9–16
- [6] CURBACH, M. (Hrsg.); ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 528 - Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung - Abschlussbericht : Gekürzte Fassung*. Dresden : Saechsische Landesbibliothek- Staats- und Universitaetsbibliothek Dresden; Technische Universität Dresden, 2012
- [7] GRIES, T. ; JANETZKO, S. ; KRAVAEV, P.: *Textile Verstärkungsstrukturen - Übersicht der Forschungsaktivitäten im Rahmen des SFB 532*. Dresden : Saechsische Landesbibliothek- Staats- und Universitaetsbibliothek Dresden; Technische Universität Dresden, 2011
- [8] HAHN, L.: *Entwicklung einer In-situ-Beschichtungs- und Trocknungstechnologie für multiaxiale Gelegestrukturen mit hohem Leistungsvermögen*. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen. Dissertation. 2020

- [9] HAHN, L. ; RITTNER, S. ; NUSS, D. ; ASHIR, M. ; CHERIF, C.: *Development of Methods to Improve the Mechanical Performance of Coated Grid-Like Non-Crimp Fabrics for Construction Applications*. In: *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* 27 (2019), Nr. 1, S. 51–58
- [10] CURBACH, M. ; PANZER, J. ; MICHLER, H. ; ZIEROLD, K. ; WIEMER, H.: *Ergänzungsvorhaben E – Qualitätssicherung, Entwicklung einer prozessintegrierten Qualitätssicherung zur Fertigung von Carbonbeton : Abschlussbericht : Laufzeit: 36 Monate (5/2017 bis 05/2020)*. In: *Ergänzungsvorhaben E – Qualitätssicherung, Entwicklung einer prozessintegrierten Qualitätssicherung zur Fertigung von Carbonbeton*
- [11] KULAS, C.: *Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile*. 1. Aufl. Aachen : IMB, 2013 (Schriftenreihe des IMB 38)
- [12] PENZEL, P. ; MAY, M. ; HAHN, L. ; SCHEERER, S. ; MICHLER, H. ; BUTLER, M. ; WALDMANN, M. ; CURBACH, M. ; CHERIF, C. ; MECHTCHERINE, V.: *Bond Modification of Carbon Rovings through Profiling*. In: *Materials* 15 (2022), Nr. 16, S. 5581. URL <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/16/5581>
- [13] WIEMER, H. ; ZIEROLD, K. ; PANZER, J. ; IHLENFELDT, S. ; CHERIF, C. ; CURBACH, M.: *Datengetriebene Methoden zur Qualitätssicherung für Produkte aus Carbonbeton/Data-driven methods for quality assurance for carbon concrete products*. In: *Bauingenieur* 95 (2020), Nr. 03, S. 105–113