

Untersuchung von Stäben und Gelegen aus rezyklierten Carbonfasern

Dipl.-Ing. Enrico Baumgärtel

Institut für Massivbau der TU Dresden, 01062 Dresden

E-Mail: enrico.baumgaertel@tu-dresden.de, Telefon: +49 351 463 42631

Zusammenfassung

Die Wiederverwendung von Carbonfasern gewinnt angesichts steigender Ressourcenknappheit und Klimaschutzbestrebungen zunehmend an Bedeutung. Insbesondere die ganzheitliche Betrachtung von geschlossenen Stoffkreisläufen erreicht im Bauwesen einen immer höheren Stellenwert. Durch das Aufbereiten und In-Form-Bringen von Carbonfasern zu Halbzeugen wird der noch offene Stoffkreislauf geschlossen. Aufgrund von unterschiedlichen technologischen Hürden unterliegt die konstante Herstellung von Stäben und Gelegen aus recycelten Carbonfasern bei gleichbleibender Qualität noch großen Schwankungen. Ziel der Forschung ist die Untersuchung und Charakterisierung von Carbonstäben und Carbongelegen aus recycelten Fasern im Vergleich zu Halbzeugen aus neuen Carbonfasern.

1 Nachhaltigkeit des Werkstoffes Carbon

Während Metalle und sortenreine Kunststoffe bereits sehr gut recycelt werden können, bestehen bei der Wiederverwendung von Carbonfasern erhebliche Defizite. Aufgrund des hohen Energieeinsatzes für die Herstellung von Carbonfasern ist aber die Notwendigkeit eines Rohstoffkreislaufes essentiell [1]. Durch das Schließen des Rohstoffkreislaufes des Werkstoffes Carbon kann ein großer Teil der Energie, welche für die Herstellung von neuen Fasern benötigt wird, eingespart werden.

Für den Einsatz von Carbon im Betonbau spricht, dass Carbon im Gegensatz zu Stahl nicht korrodieren kann; eine Reduktion der Mindestbetondeckung ist möglich. Durch die reduzierte Betondeckung wird weniger Beton und somit auch weniger Zement benötigt. Dadurch kann der Ausstoß von Kohlenstoffdioxid verringert werden. Durch die Herstellung von neuen Carbonfasern entsteht aber ebenfalls eine nicht unerhebliche Menge an CO₂. Auch deshalb muss eine Wiederverwendung dringend angestrebt werden [2].

Aufgrund des Fehlens eines werkstoffgerechten und energieeffizienten Recyclingprozesses von Carbonbetonbauteilen ist der ökologisch und ökonomisch sinnvolle Einsatz von Carbon oftmals nicht möglich. Ein weiterer Faktor ist zudem der immer weiter steigende Materialpreis sowie der Mangel an Alternativprodukten in Gestalt von hochwertigen und standardisierten Halbzeugen aus wiederaufbereiteten Werkstoffen. Durch den Aufbau eines wirtschaftlichen, standardisierten Prozesses zur Wiederverwendung von Carbonfasern in Halbzeugen für den Einsatz im Bauwesen kann ein erster Schritt im Schließen des Stoffkreislaufes von Carbonbetonbauteilen erfolgen.

2 Recycling von Carbon

Der erste Schritt für das Recycling von Carbon ist das Entfernen von allen Zusatz- und Verbundstoffen aus der Abbruchmasse bzw. den *End-of-Life*-Bauteilen. Abhängig vom Ausgangsmaterial kann eine entsprechende Zerkleinerung notwendig sein. Nachteil einer Zerkleinerung ist, dass die langen Carbonfasern durch den Bearbeitungsprozess gekürzt werden [4]. Inwieweit die Faserlänge einen Einfluss auf die späteren Materialeigenschaften (Verbund- und Zugfestigkeit, E-Modul, Dauerhaftigkeit etc.) hat, soll im Rahmen des Forschungsprojektes EDISON-rCF untersucht werden.

Im Moment existieren zwei prinzipielle Verfahren zur Verwertung von Carbonfaserkunststoffen (CFK). Das erste Verfahren basiert auf dem Prinzip der Pyrolyse. Dabei wird CFK auf bis rund 600 °C unter Sauerstoffabschluss erhitzt. Dabei zersetzt sich die Kunststoffmatrix und wird als Pyrolysegas abgetrennt. Dieses abgetrennte Pyrolysegas kann wiederum als Energiequelle für den Prozess

verwendet werden. Nach dem Abschluss des Pyrolyseprozesses bleiben die reinen Carbonfasern zurück. Nachteilig ist, dass die Schlichte der Carbonfasern beschädigt bzw. zerstört wird. Die Schlichte ist für die Weiterverarbeitung zu Garnen allerdings essentiell. Je höher der Anteil der Schlichte, desto besser lassen sich die einzelnen Fasern zu Garnen verarbeiten [5], [6].

Das zweite Verfahren zur Wiederverwendung von Carbonfasern ist die Solvolyse. Dabei werden die Fasern inklusive Matrix in einer Flüssigkeit erhitzt und unter Druck aufgeschlossen. Durch die Zugabe von Katalysatoren werden Zusatzstoffe wie Harze oder Kunststoffmatrices von den Carbonfasern gelöst. Vorteil des Solvolyseprozesses ist, dass die Schlichte der Carbonfasern zum größten Teil erhalten bleibt. Die gelöste Matrix kann zusätzlich zur Faser ebenfalls zurückgewonnen werden. Nachteil der Solvolyse ist allerdings, dass aufgrund der prozesstechnischen Verarbeitung eine hohe Menge an Energie benötigt wird. Der Prozess der Solvolyse ist im Vergleich zur Pyrolyse wesentlich komplexer. Zum aktuellen Zeitpunkt gelingt der Aufschlussprozess erst im Labormaßstab. Eine Erweiterung des Maßstabs auf industrielles Niveau ist in Vorbereitung. Im Rahmen des Forschungsprojekts EDISON-rCF sollen Carbonbauteile mittels Solvolyse in deren Ausgangsstoffe aufgegliedert werden [5], [6].

3 Herstellung von Carbonstäben und Carbongelegen aus recycelten Fasern

Die Herstellung von Carbonstäben und Carbongelegen aus Recyclingmaterial befindet sich momentan noch in der Phase der experimentellen Erprobung. Ausgangsmaterial für Stäbe und Gelege ist ein Garn aus rezyklierten Carbonfasern.

Besonders seien die veränderten Eigenschaften im Vergleich zum neuwertigen Endlosgarn erwähnt. Neues Endlosgarn kann aufgrund einer höheren Zugfestigkeit mittels Pultrusion zu einem Carbonstab verarbeitet werden. Da die rezyklierten Fasern keine Endlosfasern sind, ist eine Pultrusion aufgrund der Abzugskräfte momentan noch nicht möglich. Nur bei einer ausreichenden Zugfestigkeit des Garns aus recycelten Fasern wäre eine Pultrusion vorstellbar.

Für die Herstellung von Carbongelegen kann auf bereits existierende Garnablegemaschinen zurückgegriffen werden. Die Herstellung von Garn aus Recyclingfasern erfolgt im Prinzip wie die Herstellung von Baumwollgarn [7]. Dabei wird das ungeordnete Faserbündel in eine Krempelmaschine eingeführt. Das Prinzip der Krempelmaschine (Trockenvliesverfahren) ist, die einzelnen Fasern in eine Richtung auszurichten und miteinander zu einem Vlies zu verarbeiten. Das entstandene Vlies wird in einem weiteren Schritt zu einem Krempelband zusammengeführt. Dieses Krempelband wird durch Verstrecken zum Streckband. Dabei werden die Fasern noch weiter ausgerichtet. Als letzter Schritt wird das Streckband der Spinnmaschine zugeführt und zum fertigen Stapelfasergarn ausgesponnen [7].

4 Untersuchung von Carbonstäben und Carbongelegen aus recycelten Carbonfasern

4.1 Versuchsprogramm

Im Rahmen des Forschungsprojekts EDISON-rCF werden von der Firma Zeisberg Carbon GmbH die Carbonstäbe und das Carbongelege hergestellt. Für eine erste Aussage über die materialtypischen Eigenschaften sollen die Carbonstäbe aus rezykliertem Carbon einem umfassenden Versuchsprogramm unterzogen werden. Dieses beinhaltet unter anderem:

- Statische und zyklische Zugversuche an stabförmigen Halbzeugen,
- Verbundversuche an stabförmigen Halbwerkzeugen,
- Temperaturversuche an stabförmigen Halbwerkzeugen,
- Dauerstandversuche an stabförmigen Halbwerkzeugen,
- Bauteilversuche an stabförmigen Halbwerkzeuge.

Für einen direkten Vergleich sollen alle geplanten Versuche ebenfalls mit Carbonstäben aus Endlosfasern durchgeführt werden. Somit sollen eventuelle Abweichungen aufgrund von beispielsweise unterschiedlichen Versuchsdurchführungen bzw. Variationen von Verbrauchsmaterialien (Betonzusammensetzung etc.) vermieden werden. Als Referenzcarbonstab wird ein Stab der Firma Action Composites, ehemals thyssenkrupp Carbon Components gewählt. Dieser hatte in bereits durchgeführten Versuchen gute Werte in Zug- und Verbundversuchen gezeigt [8].

4.2 Verbundversuche an Carbonstäben

Die ersten geplanten Versuche an Carbonstäben aus rezyklierten Carbonfasern sollen Aussagen über die Verbundeigenschaften zulassen. Dafür wird ein rund 60 cm langer Stab in einen Betonzylinder einbetoniert. Es wird voraussichtlich ein Normalbeton mit einer Druckfestigkeit von 30 N/mm^2 gewählt. Bei bereits durchgeführten Tests mit Carbonstäben hatte sich ein Verbundversagen schon bei einer Betondruckfestigkeit von rund 30 N/mm^2 in die Bewehrungsebene verschoben. Bei höherfesten Betonen kommt es daher zu keiner Steigerung der übertragbaren Verbundspannung [9], [8] mehr. Der prinzipielle Versuchsaufbau wird in Bild 1 dargestellt.

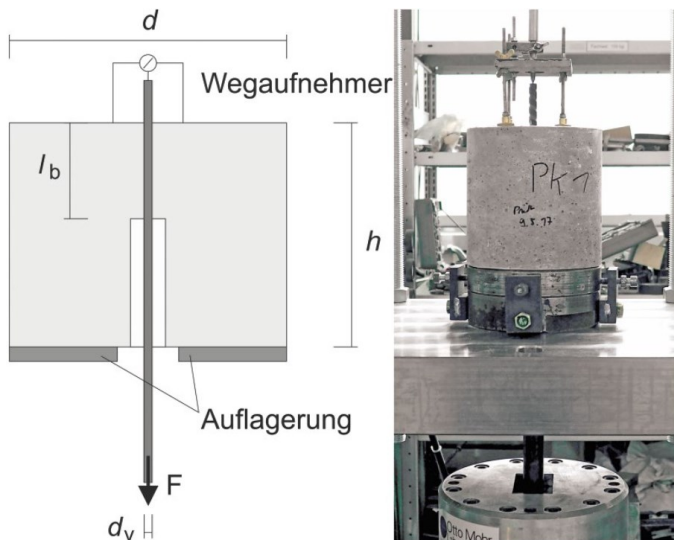


Bild 1 Versuchsaufbau zur Ermittlung des Verbundverhaltens. Abbildung aus [9]

4.3 Statische Zugversuche an Carbonstäben

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit der Carbonstäbe sollen an [10] angelehnte Versuche durchgeführt werden. Dabei wird ein einzelner Carbonstab beidseitig in eine Stahlhülse eingegossen. Die ersten Versuche bilden die Grundlage für weitere Zugversuche unter eventuell angepassten Parametern. Insbesondere eine inverssegmentierte Vergussverankerung lieferte gute Ergebnisse in Hinblick auf die Versagensart des Stabes. In Bild 2 ist die inverssegmentierte Vergussverankerung dargestellt.



Bild 2 Inverssegmentierte Vergussverankerung für Zugversuche. Foto aus [10]

5 Ausblick

Das Projekt EDISON-rCF hat eine Förderdauer bis 31.12.2023. Im Laufe der Projektlaufzeit wird eine Grundlage für die weiterführende Erforschung in Bezug auf Halbzeuge aus rezyklierten Carbonfasern gelegt werden. Durch die vielfältigen Versuche kann eine erste Übersicht über die Eignung der Carbonstäbe und des Carbongeleges aus recycelten Fasern im Baubereich erstellt werden. Eine stetige Verbesserung und Optimierung der Carbonbewehrungen ist während des Projekts vorgesehen.

Dank

Ein besonderer Dank geht an dieser Stelle an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und dem Projektträger Jülich (PtJ) für die Förderung des Projekts EDISON-rCF (FKZ: 03LB3007C).

Literatur

- [1] Greif, A.; Caumanns, T.; Flambard, A. R.; Geschewski, A.; Heidelberger, M.; Schumacher, G.; Weber, M. (2019) *Ex-Ante-Evaluation für ein Technologie-Transfer-Programm Leichtbau* [Schlussbericht]. Projektträger Jülich [Hrsg.].
- [2] Schladitz, F.; Müller, E.; Curbach, M. (2016) *Von Forschung zur Praxis – Carbonbeton*. in: Jahn, C. [Hrsg.] *Jahrbuch Beton Bauteile Edition 2017*. Bauverlag BV GmbH, S. 116–121.
- [3] Bundesministerium der/für Justiz [Hrsg.] (2020) *Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung – AltfahrzeugV)*. Altfahrzeug-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juni 2002 (BGBl. I S. 2214), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. November 2020 (BGBl. I S. 2451) geändert worden ist.
- [4] Zöllner, M.; Lieberwirth, H.; Kempkes, P.; Fendel, A. (2019) *Thermal resistance of carbon fibre reinforced polymers under stationary atmospheric conditions and varying exposure times*. Waste Management 85, S. 327–332.
- [5] Emmerich, R.; Kuppinger, J. (2014) *Kunststofffasern wiedergewinnen – Welches ist der richtige Weg für das Recycling von CFK*. *Kunststoffe*, 6. Ausgabe, S. 92–97.
- [6] Krampitz, T.; Zöllner, M.; Lieberwirth, H. (2018) *Aufbereitung und Verwertung kohlenstofffaserverstärkter Abfälle*. 5. FOREL Akademie, Freiburger Forschungshäfte, A929, Freiberg.
- [7] Hengstermann, M. (2020) *Entwicklung von Hybridgarnen aus recycelten Carbonfasern und Polyamid 6-Fasern für thermoplastische Verbundbauteile mit hohem Leistungsvermögen* [Dissertation]. Technische Universität Dresden. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-738109>
- [8] Schumann, A. (2021) *Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens von Carbonstäben in Betonmatrices* [Dissertation]. Technische Universität Dresden (2020 Jahr der Promotionsverteidigung; erschienen 2021 in Curbach, M. et al. [Hrsg.] *Schriftenreihe konstruktiver Ingenieurbau kid*, Heft 54). <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-732979>
- [9] Betz, P.; Schumann, A.; Scheerer, S.; Curbach M. (2021) *Carbonstäbe im Bauwesen – Teil 5: Einflussfaktoren auf das Verbundverhalten*. *Beton- und Stahlbetonbau* 116, H. 12, S. 924–934. <https://doi.org/10.1002/best.202100035>
- [10] May, M.; Riegelmann, P.; Schumann, A.; Curbach, M. (2021) *Carbonstäbe im Bauwesen – Teil 3: Bestimmung der Zugtragfähigkeit*. *Beton- und Stahlbetonbau* 116, H. 7, S. 508–517. <https://doi.org/10.1002/best.202100031>