

Schädigungsanalyse mit kombinierten ZfP-Verfahren an Carbonkurzfaser-verstärktem Hochleistungsbeton

Christian U. Grosse, Oliver Fischer, Malte A. Peter, Dirk Volkmer

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Grosse, Christian U., Oliver Fischer, Malte A. Peter, and Dirk Volkmer. 2026.
“Schädigungsanalyse mit kombinierten ZfP-Verfahren an Carbonkurzfaser-verstärktem Hochleistungsbeton.” In *DGZfP 2026 - DGZfP-Jahrestagung 2026, 11.–13. Mai, 2026, Aachen*, 1–8. Mayen: NDT.net. <https://doi.org/10.58286/32890>.

Schädigungsanalyse mit kombinierten ZfP-Verfahren an Carbonkurzfaser-verstärktem Hochleistungsbeton

Christian U. GROSSE¹, Oliver FISCHER², Malte A. PETER³, Dirk VOLKMER⁴

¹ Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, D-85748 Garching bei München, Deutschland, grosse@tum.de

² Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, D-80333 München, Deutschland, oliver.fischer@tum.de

³ Lehr- und Forschungseinheit Angewandte Analysis, Universität Augsburg, Universitätsstr. 12, D-86159 Augsburg, Deutschland, malte.peter@math.uni-augsburg.de

⁴ Lehrstuhl für Festkörper- und Materialchemie, Institut für Physik, Universität Augsburg, Universitätsstr. 1, D-86159 Augsburg, Deutschland, dirk.volkmer@physik.uni-augsburg.de

Kurzfassung. In einem Teilprojekt des DFG-Schwerpunktprogramms SPP2020 „Zyklische Schädigungsprozesse in Hochleistungsbetonen im Experimental-Virtual-Lab“ wurde der Schädigungsverlauf in additiv-gefertigtem Carbonkurzfaser-verstärktem Hochleistungsbeton unter hochzyklischer Zug- und Biegezugbeanspruchung untersucht. Für die mehrskaligen Untersuchungen wurden verschiedene ZfP-Techniken verwendet, mit denen die Bruchprozesse lokalisiert und identifiziert wurden und die halfen, die Schädigungsentwicklung in Abhängigkeit von Variationen der Material- und Fertigungsparameter zu dokumentieren. Dies⁴ führte zu einem verbesserten Verständnis der Materialeigenschaften und bildet die Grundlage für die Optimierung dieses innovativen Werkstoffs.

Als ZfP-Techniken wurden neben der Schallemissionsanalyse u.a. die Ultraschalltechnik, die Codawellen-Interferometrie, die digitale Bildkorrelation sowie die Röntgen-Computertomografie eingesetzt. Diese experimentellen Untersuchungen wurden durch eine skalenübergreifende Werkstoff-Modellierung der Schädigungsentwicklung sowie der Wellenausbreitung ergänzt. Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Projekt erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Lehrstühlen für Massivbau und Zerstörungsfreie Prüfung der Technischen Universität München sowie Festkörperchemie und Angewandte Analysis der Universität Augsburg. Der Schwerpunkt des Beitrags liegt auf zerstörungsfreien Prüftechniken.

Keywords: Virtual lab, Carbonkurzfaser-verstärkter Beton, Schallemissionsanalyse, Röntgen-Computertomografie, Ultraschall, Digital Image Correlation, Codawellen-Interferometrie



Motivation

Carbonkurzfaser-verstärkter Beton (engl. Carbon short-fiber reinforced high-performance concrete, CSFRC) stellt eine neue Klasse zementgebundener Verbundwerkstoffe dar, die entwickelt wurde, um die inhärente Sprödigkeit und die begrenzte Ermüdungsfestigkeit herkömmlichen Betons zu überwinden (Hambach et al. 2016; Hambach & Volkmer 2017). Durch die Einarbeitung kurzer, hochfester Kohlenstofffasern in die Zementmatrix und die Ausrichtung der Fasern entlang der Hauptzugspannungsrichtungen weist das Material eine einzigartige Kombination aus hoher Zugfestigkeit, ausgeprägtem Verfestigungsverhalten und verbesserter Schadenstoleranz auf.

Ein wesentliches Merkmal von CSFRC ist die kontrollierte Faserorientierung, die durch extrusionsbasierte und additive Fertigungsverfahren erreicht wird. Diese anisotrope Mikrostruktur ermöglicht eine effektive Aktivierung der Fasern bereits bei relativ geringen Dehnungen, was zu einer Mehrfachrissbildung mit engen Rissabständen statt einer frühen Risslokalisierung führt. Aus bautechnischer Sicht ist dieses Verhalten äußerst vorteilhaft, da es die Energieableitungsfähigkeit erhöht, die Rissbreiten verringert und die Dauerfestigkeit unter Betriebs- und Ermüdungsbeanspruchung verbessert. Die Aufgabe von zerstörungsfreien Prüftechniken (ZfP) war dementsprechend die Begleitung der experimentellen Untersuchungen im sogenannten Virtual-Lab hinsichtlich der Schädigungsentwicklung. Von den Projektpartnern wurden dabei eine Reihe unterschiedlicher Techniken eingesetzt.

1. Experimentelle Untersuchungen

Die untersuchten Proben deckten einen weiten Bereich von Längenskalen ab, von Proben im Mikromaßstab, die für hochauflösende Bildgebung und In-situ-Analysen geeignet sind, bis hin zu Proben im Makromaßstab, die für Strukturelemente repräsentativ sind (Abb. 1). Die Proben wurden dabei additiv gefertigt, im 3D-Druckverfahren (Abb. 1, links). Dabei wurden sowohl Biegezug-Prüfungen als auch Zugprüfungen durchgeführt (Abb. 1, rechts, zeigt eine mesoskopische Zugprobe). Dieses multiskalige Prüfkonzept bot einen idealen Rahmen für die systematische Anwendung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfverfahren und ermöglichte eine konsistente Untersuchung von Schadensphänomenen über verschiedene Skalen hinweg, für die dann auch numerische Simulationen eingesetzt wurden.

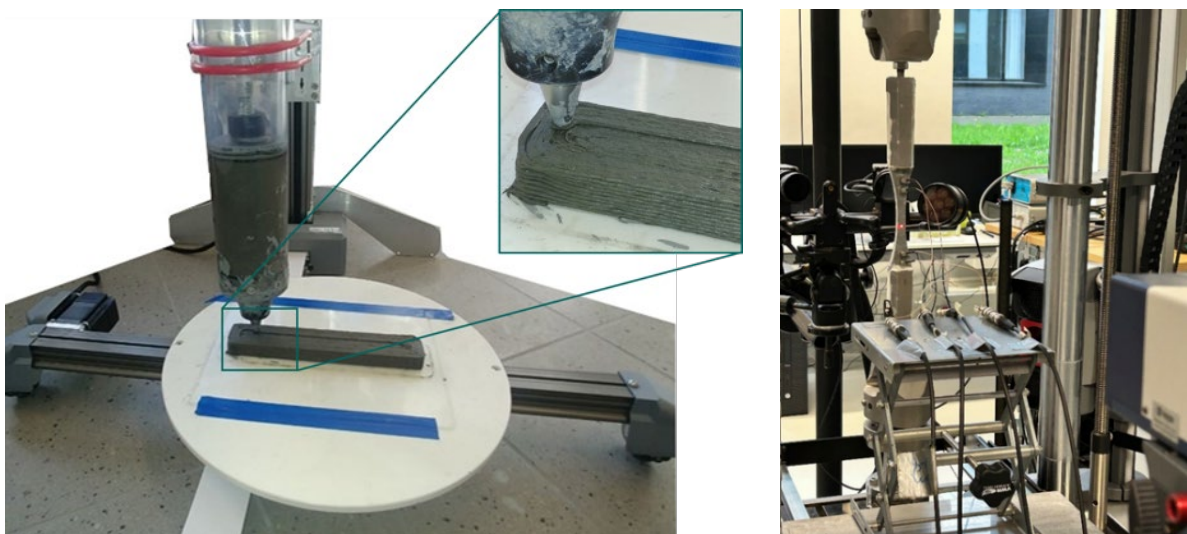


Abb 1: 3D-Druck von Biegeprüfkörpern in Mesogröße aus CSFRC (links) sowie entsprechende statische Zugversuche zur Untersuchung des mehrskaligen Werkstoffverhaltens mit zerstörungsfreien Messverfahren wie Dehnmessstreifen, Schallemissionsanalyse [1, 2] und Laservibrometrie [3].

Weiterhin wurden sowohl statische Belastungsversuche als auch zyklisch-monotone Experimente und Ermüdungsversuche mit unterschiedlichen Belastungsniveaus durchgeführt. Das experimentelle Programm umfasste mehr als 230 sensorbewehrte Belastungsversuche. Während die materialbezogenen Konzepte und Erkenntnisse in mehreren Veröffentlichungen behandelt wurden [4–8], wird eine Zusammenfassung dieses Projekts sowie des SPP2020 in einem Buch veröffentlicht [3], welches sich derzeit in der Fertigstellung befindet. Der vorliegende Beitrag fokussiert auf den ZfP-Einsatz.

2. Einsatz von zerstörungsfreien Prüfmethoden

Die Projektpartner aus Augsburg und München haben im Rahmen des Projekts und in enger Abstimmung den Einsatz von zerstörungsfreien Prüfmethoden optimiert. Insbesondere wurden ZfP-Techniken kombiniert, um eine umfassende Schädigungsanalyse und eine sichere Interpretation der Messergebnisse zu ermöglichen. Zusätzlich wurden Lastzellen, Verformungs- bzw. Dehnungssensoren (z. B. oberflächenmontierte Messwandler, Dehnungsmessstreifen oder faseroptische quasi-kontinuierliche Sensoren) eingesetzt, was hier aber nicht näher beschrieben wird. Das Ziel war einerseits eine raumzeitliche Analyse der Schädigung sowie andererseits eine bruchmechanische Interpretation der Daten hinsichtlich der möglichen Bruchmechanismen.

2.1. Digital Image Correlation (DIC) in Kombination mit Schallemissionsanalyse (SEA)

Die kamerabasierte DIC-Messtechnik ist ein Verfahren zur oberflächennahen Erfassung von Verformungen und der daraus resultierenden Dehnungen. DIC-Messungen wurden sowohl bei statischen als auch bei dynamischen Versuchen sowie bei allen Arten von Proben, insbesondere bei Mikro- und Makroproben, eingesetzt. Zusätzlich wurden bei einigen der Dreipunkt-Biegezugproben Miniatur-Schallemissionssensoren angebracht, um die raumzeitliche Schädigungsentwicklung im Testkörper mit DIC zu vergleichen und eine Bruchtypbestimmung vorzunehmen (Abb. 2, links). Abb. 2 zeigt rechts den Testkörper unter quasi-statischer Biegebelastung mit den an der Oberseite angebrachten vier SEA-Sensoren sowie den Messpunkten an der Seite für die DIC-Messungen. Abb. 3 zeigt demgegenüber ein visuelles Rissbild von unten.

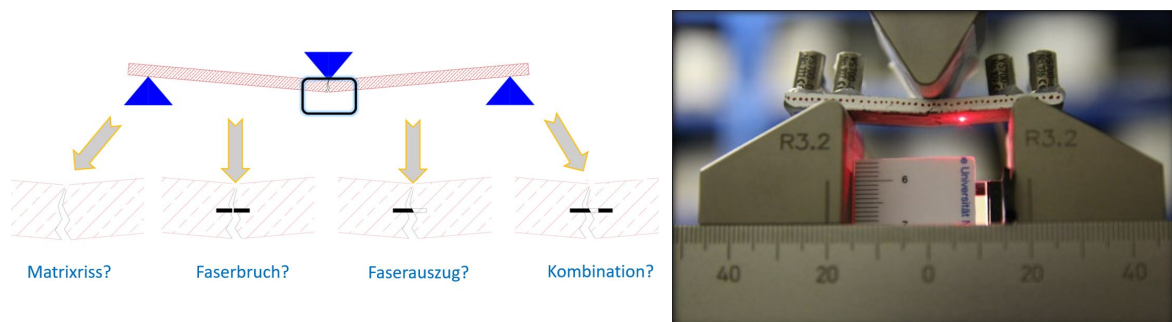


Abb. 2: Einteilung der Schädigung in unterschiedliche Bruchtypen (links) und Messaufbau für ein Biegezug-Experiment mit 1 Vol.% Carbonfasern für SEA- und DIC-Messungen (rechts).

Die Verwendung von vier SEA-Sensoren ermöglichte eine 2D-Lokalisierung der Schallemissionen, der Rissentstehung und -entwicklung sowie einen Vergleich mit den DIC-Daten an der Unterseite des Testkörpers. Abb. 3 zeigt in der Mitte im oberen Teil den Testkörper von unten mit deutlich sichtbarer Rissentwicklung, die Grafik darunter die positionsrichtige Anzahl der Schallemissionen („Events“) und darüber die Ergebnisse der 2D-Lokalisierung. Vier räumliche Bereiche der Rissentwicklung lassen sich unterscheiden und sind mit roten

Flächen hervorgehoben. Ein Maximum der Schallemissionsaktivität liegt etwas links von der Mitte des Testkörpers und korreliert sehr gut mit dem Hauptriss, der sich durch seine Rissbreite deutlich hervorhebt. Die Zeitangabe zum Auftreten der SE-Signale ist dabei nicht gut erkennbar. Im unteren Teil von Abb. 3 ist diese Information deutlicher zu erkennen. Hier sind die 2D-lokaliserten Quellorte der Schallemissionen über der Belastungszeit aufgetragen. Man erkennt, dass sich anfangs mehrere Mikrorisse bilden und erst nach etwa zwanzig Minuten Belastungszeit ein Hauptriss entsteht, der später zum Versagen führt.

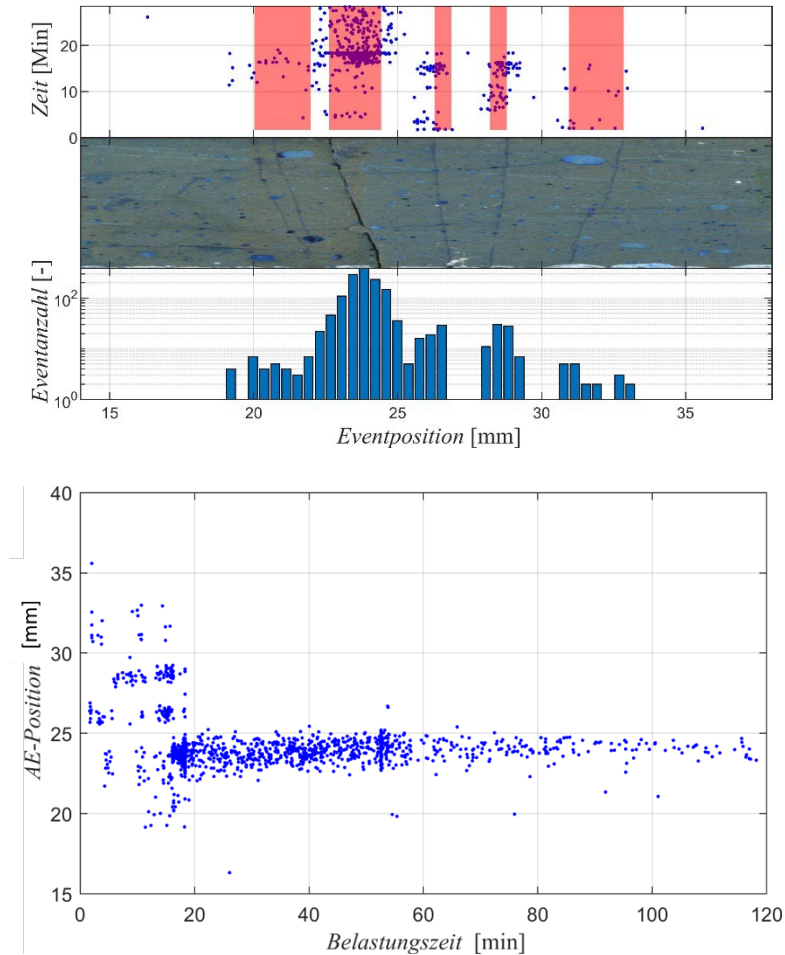


Abb. 3: Rissbildung visuell und mittels Schallemissionsanalyse beobachtet (oben) sowie Darstellung der raumzeitlichen Entwicklung der Risse (unten) [8].

2.2. Zuordnung der Schallsignale zu Bruchtypen

Die von einem Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) erfassten Verschiebungssignale wurden mithilfe einer kontinuierlichen Wavelet-Transformation und eines Gabor-Wavelets in die Frequenz-Zeit-Ebene transformiert. Auf diese Weise wird das zeitliche Auftreten verschiedener Frequenzen sichtbar. Abb. 4 zeigt charakteristische Ereignisse mit steigendem Frequenzgehalt, die unterschiedliche Frequenzanteile repräsentieren und die man hinsichtlich der auftretenden Bruchprozesse interpretieren kann. Die in Abb. 4a dargestellten niedrigsten Frequenzen lassen sich mit einer ausgedehnten Matrixrissbildung in Verbindung bringen, während die höheren Frequenzen verschiedenen anderen Bruchmechanismen zugeschrieben werden können. Faserbrüche werden im Allgemeinen mit einem hohen Frequenzgehalt in Verbindung gebracht, weshalb das Signal in Abb. 4d als Faserbruch angesehen wird. Die

Abbildungen 4b und 4c zeigen Signale mit dazwischenliegenden Frequenzen, die Faserauszureignissen (Pull-out) zugeordnet werden können. Alle Signale weisen bei 85 kHz hohe Amplituden auf, die wahrscheinlich auf Eigenfrequenzen des Testkörpers zurückzuführen sind. Um zwischen verschiedenen Bruchmodi und Eigenfrequenzen zu unterscheiden, sind künftig Modalanalysemessungen erforderlich.

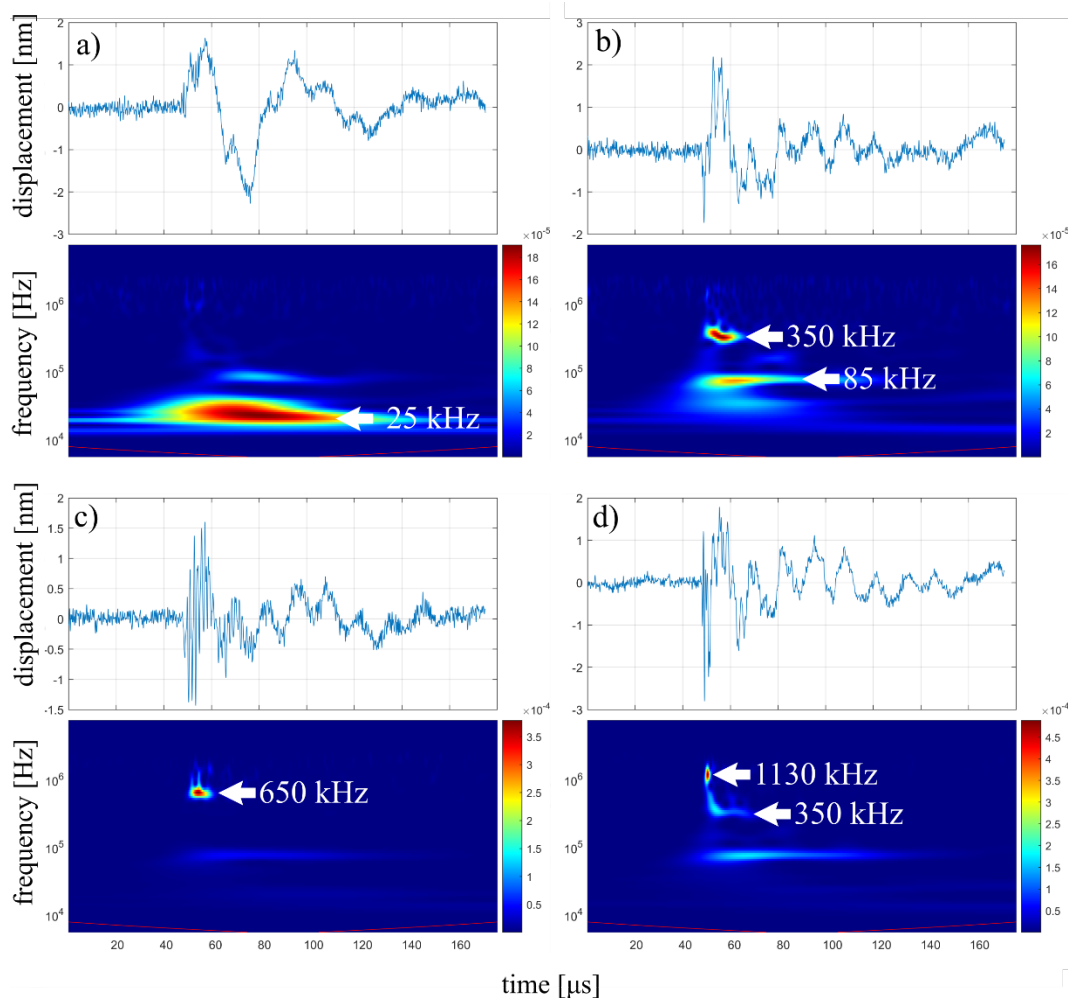


Abb. 4: Ausgewählte charakteristische AE-Signale, die an einem Testkörper mit einer Faserorientierung von 40° aufgezeichnet wurden. Die Signale sind nach steigender Mittenfrequenz geordnet und unter jedem Signal ist im Wavelet-Bereich die Signalfrequenz über der Signalzeit aufgetragen [8].

2.3. Codawelleninterferometrie (CWI)

Für eine schnelle und qualitative Detektion von Schädigungen eignet sich die Codawelleninterferometrie. Dafür wurde bei einem Teil der Experimente mit makroskopischen Testkörpern ein Versuchsaufbau mit Ultraschall-Sender und -Empfänger realisiert (Abb. 5, links), wobei die Testkörper mit unterschiedlichen Dauerschwinglasten beaufschlagt wurden. Der Carbonfaseranteil betrug 1 Vol.-% und die Prüffrequenz 10 Hz. Während der Messzeit von etwa 6 Tagen wurden nach 2.000 bis 10.000 Lastzyklen CWI-Messungen von 30 s Dauer durchgeführt. Bei der CWI-Stretching-Methode wurde anschließend mittels einer Kreuzkorrelation die Ähnlichkeit eines gestreckten Referenzsignals mit dem „gestörten“ Signal ermittelt (Abb. 5, rechts).

Abb. 6 zeigt die Entwicklung des normierten CWI-Koeffizienten mit zunehmender Schädigung des Testkörpers im Dauexperiment aufgetragen in Abhängigkeit von den Lastzyklen. Diese Daten sind temperaturbereinigt, da die Temperatur die Messungen beeinflusst.

Nach einem schnellen Abfall der Korrelation innerhalb der ersten 100.000 Lastzyklen nimmt die Korrelation zunächst nur langsam ab. Die Abnahme der Korrelation beschleunigt sich dann gegen Ende des Schwingversuchs und vor dem Versagen.

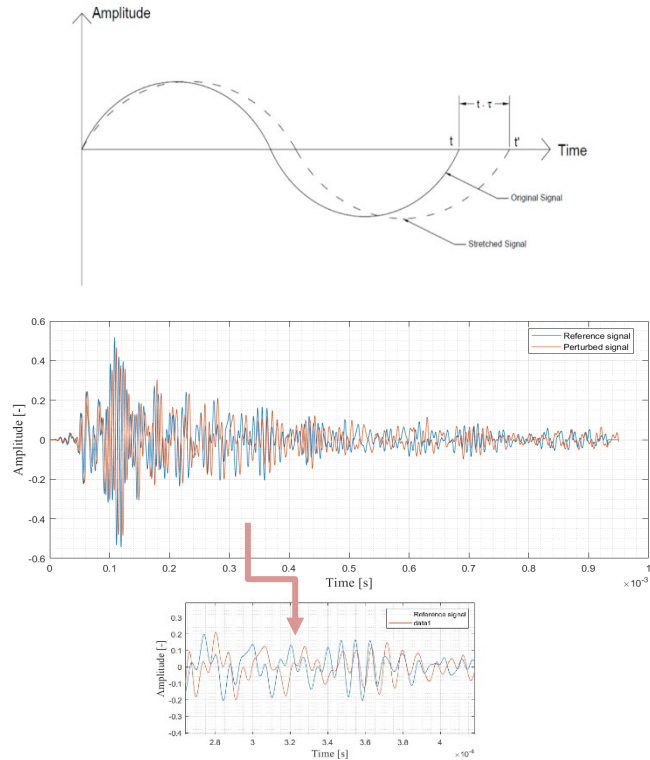
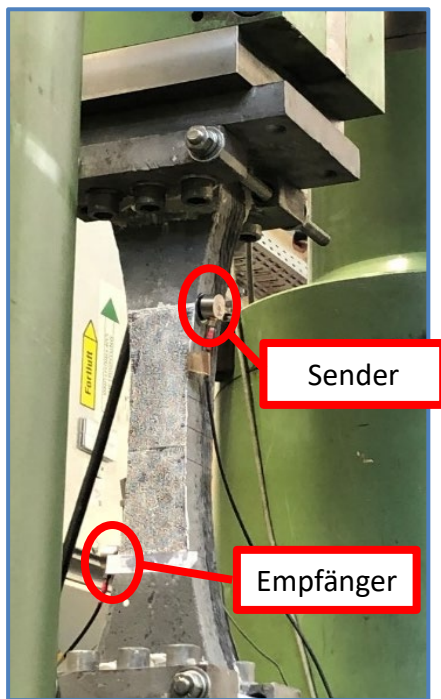


Abb. 5: Versuchsaufbau für CWI-Messungen (links) und Ermittlung des CWI-Korrelationskoeffizienten mit der Stretching-Methode (rechts oben) und Beispielssignale für die Korrelation zweier Signale.

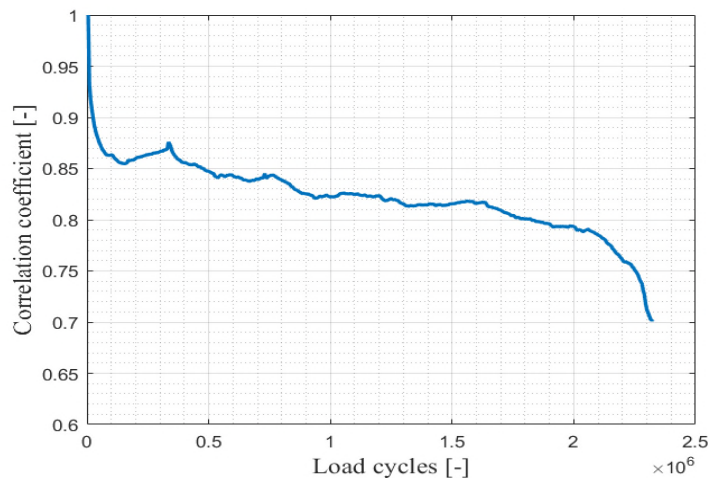


Abb. 6: Abnahme des CWI-Korrelationskoeffizienten mit zunehmender Schwingspielzahl (nach P. Pugacheva).

2.4. Computertomografie (CT)

Die CT-Technik wurde für verschiedene Aufgaben eingesetzt, sowohl zur Analyse der Schadensbilder als auch zur Bestimmung und Kontrolle der Faserausrichtung. Ein Beispiel für die Bestimmung der Hauptfaserrichtung zeigt Abb. 7, a bis d, wobei die segmentierten Fasern farblich hervorgehoben wurden. Dabei wurden Mikrotestkörper in einem Nanotom[®] der Universität Augsburg (Institut für Materials Resource Management) untersucht. Diese Untersuchungen verwendeten Ex-situ-Röntgenuntersuchungen, es war aber auch möglich, In-situ-

CT-Versuche durchzuführen. Ein Röntgen-CT-In-situ-Zugversuch wurde unter Verwendung eines Lasttisches durchgeführt, der entwickelt wurde, um CT-Scans unter Belastung innerhalb einer Vollschutzkammer durchzuführen.

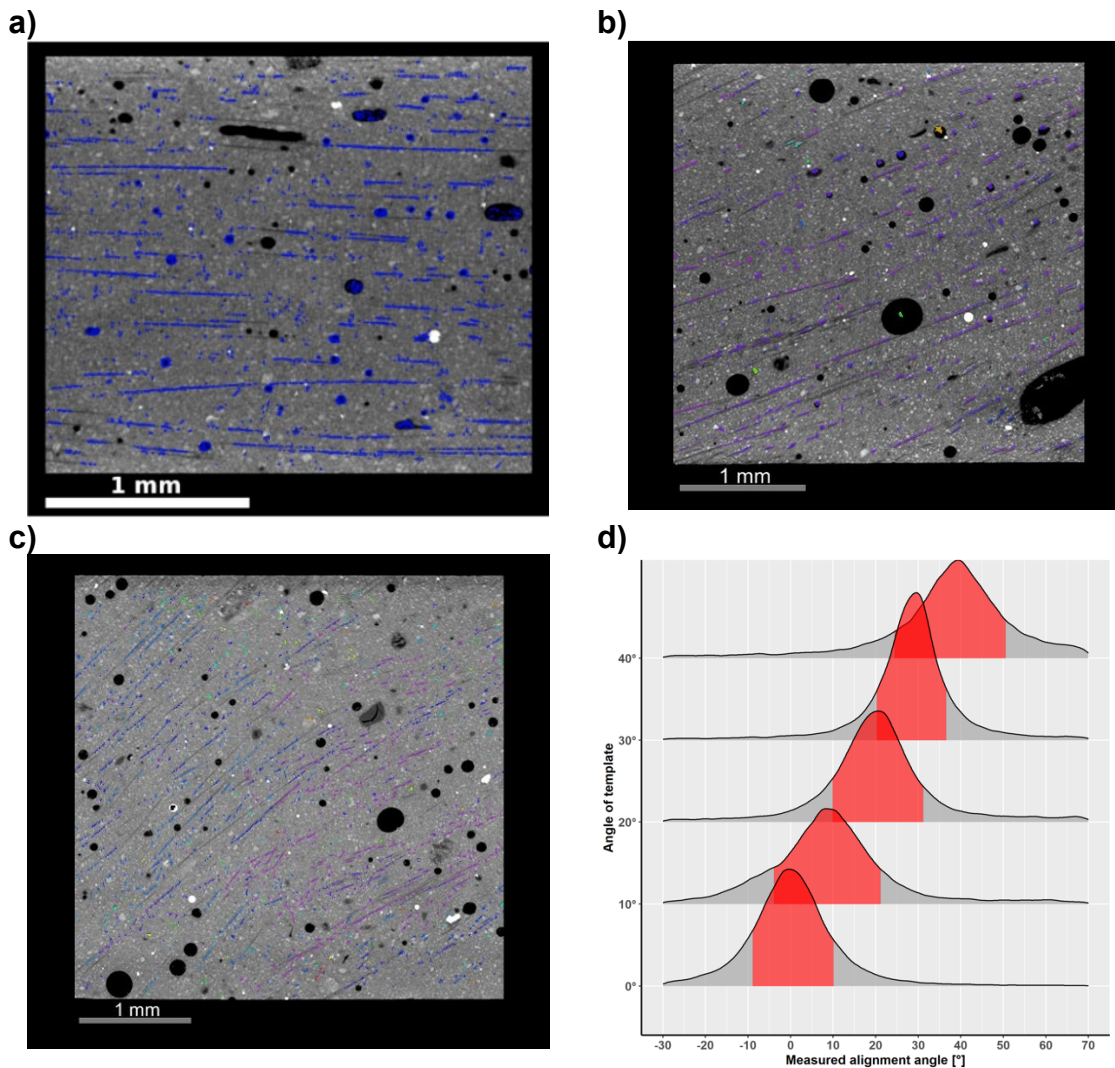


Abb. 7: CT-Aufnahmen zur Segmentierung und Bestimmung der Faserorientierung mit einem mittleren Faserwinkel von 0° (a), 20° (b) und 40° (c) sowie Ergebnis der Segmentierung (d) [8].

3. Zusammenfassung

Durch umfangreiche quasi-statische und dynamische/zyklische Versuchsreihen sowohl an Biege- als auch an Zugproben unterschiedlicher Größenordnung konnten zahlreiche wertvolle neue Erkenntnisse über das komplexe Trag-, Schadens- und Versagensverhalten von Carbonkurzfaser-verstärktem Beton (CSFRC) unter Ermüdung gewonnen werden. Die Verfestigung des Materials (und der Übergang zu einer nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung) wird durch die Carbonfasern und ihre guten Verbund-Eigenschaften erreicht, was zu sehr kleinen Mikrorissen und einem engen Rissabstand führt [9-10]. Dies führt zu einer signifikanten Steigerung sowohl der Dauerhaftigkeit unter statischen und dynamischen Einwirkungen als auch der Festigkeit unter Biege- und Zuglasten.

Umfangreiche zerstörungsfreie Prüfungen mit DIC, SEA, Röntgen-CT, CWI und vielen weiteren Techniken einschließlich kombinierter Auswertungen trugen wesentlich zu einem tieferen Verständnis der Schadens- und Bruchmechanismen bei. Während DIC in erster Linie genutzt wurde, um einen fundierten Gesamtüberblick über die (oberflächennahen)

Schäden und die Rissentwicklung zu liefern, waren SEA-Messungen besonders hilfreich, um einzelne Quelltypen zu unterscheiden bzw. Ereignisse zu lokalisieren. CT-Untersuchungen (in situ und ex situ) wurden durchgeführt, um zusätzliche wertvolle Informationen zu Versagensklassen und Faserrichtungen zu gewinnen. Andere Techniken wie die Coda-Wave-Interferometrie (CWI) können helfen, den Schädigungsfortschritt auch an realen Bauteilen im Rahmen einer Dauerüberwachung anzuzeigen. Zu den gewonnenen Erkenntnissen gehören Informationen über die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren, sinnvolle Verfahrenskombinationen, optimale Sensorpositionen, die Ankopplung und die Sensorauswahl. Die Arbeiten und Ergebnisse wurden in mehreren Fachpublikationen veröffentlicht und aktuell in einem Buchkapitel zusammengefasst.

Danksagung

Diese Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP2020 gefördert: „Zyklische Alterung von Hochleistungsbeton in einem experimentell-virtuellen Labor“ (Projektnummer 354003768, Fördernummern FI1720/7, GR1664/13, PE1464/6, VO829/13). Die Autoren danken allen am Schwerpunktprogramm SPP 2020 beteiligten Arbeitsgruppen für die gute Zusammenarbeit sowie den Koordinatoren an der Leibniz Universität Hannover. Unser Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unserer Teilprojekte sowie insbesondere Michael Engelhardt, Philipp Lauff, Tanja Lochner, Polina Pugacheva, Manuel Raith, Lisa Reischmann, Matthias Rutzen und Ursula Weiß für die Unterstützung dieses Projekts.

Referenzen

- [1] Aggelis, D.G., Dassios, K.G., Kordatos, E.Z., Matikas, T.E.: Damage accumulation in cyclically-loaded glass-ceramic matrix composites monitored by acoustic emission. *The Scientific World Journal*, 2013(12):869467, <https://doi.org/10.1155/2013/869467>
- [2] Grosse, C.U., Ohtsu, M., Aggelis, D.G., Shiotani, T. (eds): *Acoustic Emission Testing: Basics for Research – Appl. in Eng.*, Springer Publ. (2021), <https://doi.org/10.1007/978-3-030-67936-1>
- [3] Oneschkow N., Lohaus, L. (Eds.). *Cyclic Deterioration of High-Performance Concrete – Reports of the SPP 2020 Experimental-Virtual-Lab*. Springer Nature, (2026) (in print)
- [4] Engelhard, M., Kalytta-Mewes, A., Volkmer, D.: Testing methods for deformation characterization on 3D printed carbon fiber reinforced cementitious composites (2022). *Proc. 14th fib PhD Symp. Rome (2022)*
- [5] Lauff, P., Raith, M., Große, C., Rutzen, M., Volkmer, D., Reischmann, L., Weiß, U., Peter, M., Fischer, O.: Investigation of localised damage indicators of a carbon short-fibre reinforced high performance concrete under dynamic and flexural load. *Proc. fib Symposium Krakow/Poland, 1952-1959 (2019)*
- [6] Lauff, P., Pugacheva, P., Rutzen, M., Weiß, U., Fischer, O., Volkmer, D., Peter, M.A., Grosse, C.U.: Evaluation of the behavior of Carbon Short Fiber Reinforced Concrete (CSFRC) based on a multi-sensory experimental investigation and a numerical multiscale approach. *Materials* 2021, 14(22), 7005, <https://doi.org/10.3390/ma14227005>
- [7] Rutzen, M., Volkmer, D., Weiß, U., Reischmann, L., Peter, M.A., Lauff, P., Fischer, O., Raith, M. and Grosse, C.U.: Microstructural analysis of crack growth caused by static and dynamic loads in a carbon fiber reinforced cement paste. *Proc. Adv. in Eng. Mat., Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*. Zingoni, A. (ed.), CRC Press (2019)
- [8] Rutzen, M., Lauff, P., Niedermeier, R., Fischer, O., Raith, M., Grosse, C.U., Weiss, U., Peter, M.A., Volkmer, D.: Influence of fiber alignment on pseudoductility and microcracking in a cementitious carbon fiber composite material. *Materials and Structures* (2021) 54:58. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01649-2>
- [9] Hambach, M., Möller, H., Neumann, T., Volkmer, D.: Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (> 100 MPa). *Cement and Concrete Research* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.011>
- [10] Hambach, M., Volkmer, D.: Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement & Conc. Composites* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>