

# Neuartige textile Bewehrungen mit integrierten textilbasierten in-situ-Sensoren für die Verstärkung bestehender Betonstrukturen gegenüber kurzzeitdynamischen Ereignissen

Hung Le Xuan

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden  
[hung.le\\_xuan@tu-dresden.de](mailto:hung.le_xuan@tu-dresden.de)

09.12.2024

## 1. Einleitung und Motivation

Beton und Stahlbeton gehören weltweit zu den häufigsten verwendeten Baustoffen. Aufgrund der stetig wachsenden Weltbevölkerung ist in den nächsten Jahren mit einer steigenden Nachfrage nach Betonbauwerken (z. B. Wohnraum, Altersheim, Schulen etc.) zu rechnen. Trotz der vielen Vorteile, die Beton bietet, stellt seine Anfälligkeit gegenüber kurzzeitigen dynamischen Belastungen wie Aufprall, Explosion oder Erdbeben aufgrund seiner Sprödigkeit eine große Herausforderung dar. Angesichts der zunehmenden Häufigkeit von Naturkatastrophen ist die Sicherheit von Menschen und kritischen Infrastrukturen von entscheidender Bedeutung.

Um diese Herausforderung zu adressieren, können dünne textil- und faserverstärkte Betonschichten auf bestehende Bauwerke aufgetragen werden, um deren Impaktresistenz zu erhöhen (Abbildung 1). Darüber hinaus bietet dies eine nachhaltige Bauweise an, indem Baumaterialien möglichst langfristig genutzt werden und somit der Bedarf an erforderlichen Neubauten minimiert wird, insbesondere vor dem Hintergrund der hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bauindustrie bei der Zementherstellung.

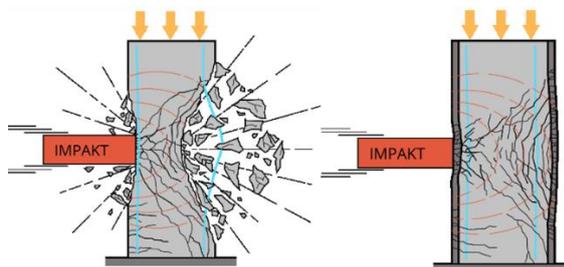


Abbildung 1 : Schematische Darstellung des Verhaltens von Beton unter Impakt ohne (links) und mit dünnen Verstärkungsschichten (rechts)

Das Ziel der Dissertationsarbeit ist daher die Entwicklung von impaktresistenten und mit textilbasierten Dehnungssensoren funktionalisierten textilen Bewehrungen für den Einsatz in zementbasierten Verbundwerkstoffen.

## 2. Methodik

Um die dynamischen Effekte und das Verhalten großflächiger Betonstrukturen unter Impakt systematisch zu erforschen, wurde ein mehrskaliger Forschungsansatz umgesetzt. Dieser umfasst umfangreiche Entwicklungsarbeiten und Experimente wie quasi-statische und zyklische Zug-, Druck- und Biegeversuche und dynamische Fallturmversuche auf der Faser-, Textil-, Verbund- und Strukturebene (Abbildung 2).

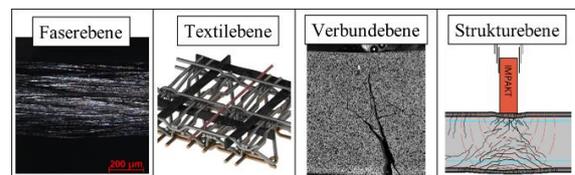


Abbildung 2: Mehrskalenaufbau der Dissertation

## 3. Ergebnisse

Auf der Faserebene lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung und echtzeitfähigen Charakterisierung von textilbasierten Sensoren mit Sensitivitäten gegenüber Zug-, Druck- und Biegebeanspruchungen. Abbildung 3 zeigt das Sensorverhalten eines Carbonfaser-basierten Sensorgarns (resistives Messprinzip) integriert in carbonfaserverstärkten Kunststoff (CFK)-Proben sowohl unter Zug- als auch Druckbeanspruchung.

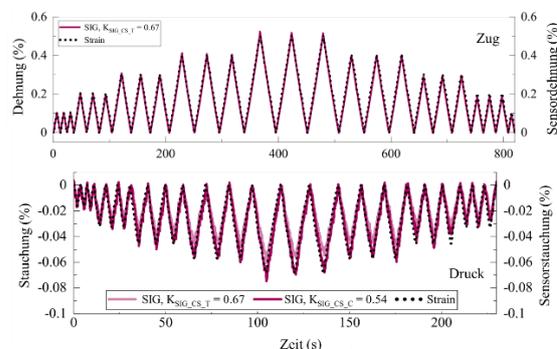


Abbildung 3: Carbonfaser-Stapelfasersensor in CFK unter Zug (oben) und Druck (unten)

Die erfasste Dehnung und Stauchung durch die textilen Sensoren zeigen hierbei eine hohe

Übereinstimmung und Korrelation mit der tatsächlich induzierten Beanspruchung. Diese umfangreiche Sensorcharakterisierung bildet die Grundlage für ein verbessertes Verständnis der impaktinduzierten Wellenausbreitung und der Aktivierung der entwickelten textilen Bewehrung innerhalb des zementbasierten Verbundwerkstoffes. Als Vorzugslösung wurden das carbonfaserbasierte Stapelfasergarn Sigrafil (70 tex, Bruchdehnung: 5 %) und der Edelstahl-draht Isohm (0,07 mm, Bruchdehnung: 20 %) identifiziert. Beide weisen eine Linearitäts- und Hystereseseabweichung von  $< 2,5\%$  bzw.  $< 5,0\%$  auf.

Auf der Textilebene wurden neuartige zellulare Bewehrungen für die impaktzugewandte und impaktabgewandte Seite der Betonstruktur entwickelt und umgesetzt. Im Ergebnis stehen eine 3D gewebte Abstandsstruktur (3D-Gewebe) mit gradienten Steifigkeitseigenschaften aus Edelstahl-drähten und geformten Carbonfaserstäben (harte obere Gewebelage mit weicherer unterer Gewebelage) und funktionalisierte 2D Carbonfaser-Gelege (2D-Gelege) mit höherer Duktilität und Energieabsorptionsvermögen in der Verbundebene bereit (siehe Abbildung 4).

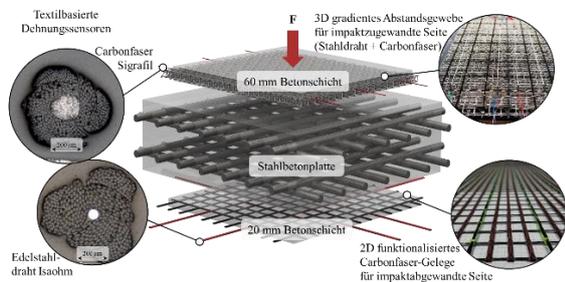


Abbildung 4: Großmaßstäbliche Fallturmversuche mit den identifizierten Vorzugslösungen

Die ermittelten Vorzugslösungen aus Faser-, Textil- und Verbundebene wurden auf der Strukturebene zusammengeführt. Die Energieabsorption und die Widerstandsfähigkeit gegen kurzzeitdynamische Beanspruchungen wurden in großmaßstäblichen beschleunigten Fallturmversuchen bei Geschwindigkeiten bis zu ca. 61 m/s (ca. 220 km/h) mit 21 kg schweren Stahlimpaktoren geprüft. Abbildung 5 zeigt die repräsentativen Ergebnisse der Fallturmversuche an stahlbewehrten Betonquadern.

Während unverstärkte Betonquader bei einer Impaktorgeschwindigkeit von 45 m/s vollständig zerstört wurden, blieb der Quader mit

einer 20 mm Betonschicht mit 3D-Gewebe und 40 mm Leichtbeton selbst bei 56 m/s intakt. Es wurde ausschließlich ein Makroriss über optische Bildauswertungen detektiert. Die integrierten textilen Dehnungssensoren lieferten präzise echtzeitfähige Daten zur Wellenausbreitung und Dehnungsverteilung innerhalb des Verbundes, wodurch eine neuartige Methodik zur Schadensanalyse bereitgestellt wurde, in dem komplexe überlagerte Besprechungen mit einer hohen Zeitaufösung erfasst wurden.

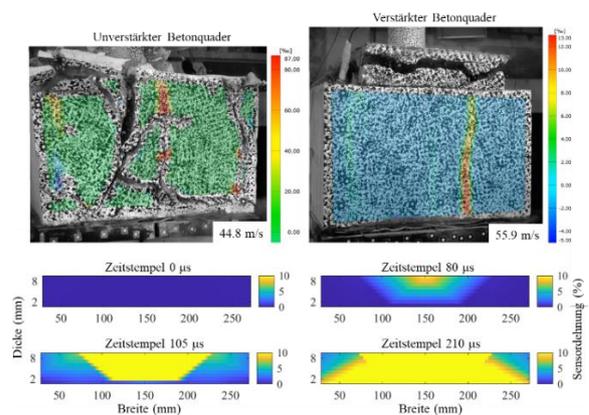


Abbildung 5: Impaktverhalten unverstärkter (links) und verstärkter (rechts) Betonquader ( $0,5 \times 0,5 \times 0,3 \text{ m}^3$ ) mit 3D-Gewebe sowie interpolierte Sensordehnungen über die Bewehrungsdicke und -breite

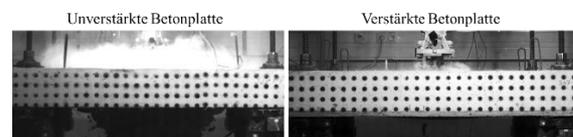


Abbildung 6: Impaktverhalten unverstärkter (links) und verstärkter (rechts) Betonplatte ( $1,50 \times 1,50 \times 0,20 \text{ m}^3$ )

Auch bei den Betonplatten zeigte eine 20 mm dicke Verstärkungsschicht mit dem entwickelten 2D-Gelege eine signifikante Reduktion des Schadens und der Fragmententstehung auf der Rückseite der Platte. Selbst bei 61 m/s Impaktorgeschwindigkeit blieb die strukturelle Integrität der Betonplatte erhalten.

#### 4. Zusammenfassung

Es wurden textile, intelligente Bewehrungen entwickelt, die bestehende Betonstrukturen nicht nur signifikant gegen Impakteinflüsse verstärken, sondern auch durch integrierte textilebasierte Dehnungssensoren ein innovatives Werkzeug bieten. Diese ermöglichen ein tiefergehendes Verständnis des Verhaltens der Bewehrung innerhalb der Verbundstruktur sowie der Wellenausbreitung bei Impakteinwirkung.