

# Verstärkung von Bauteilen mit geklebten CFK-Lamellen

R. Sedlmair<sup>1</sup>, L. Stempniewski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Abteilung Massivbau, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

## 1. Motivation

Die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit aufgeklebten CFK-Lamellen zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit ist seit mehreren Jahrzehnten eine anerkannte Technik. Hierzu werden die CFK-Lamellen mit epoxidharzbasierten und quarzsand-verfüllten Klebstoffen (EP) auf die gewünschte Betonoberfläche appliziert. Diese Klebstoffe zeichnen sich durch hohe Steifigkeit (E-Modul  $\geq 2000$  MPa) sowie hohe Adhäsions- und Kohäsionsfestigkeiten aus. Allerdings resultiert diese hohe Steifigkeit auch in einer unzureichenden Verformungsfähigkeit der Klebschicht, da schon kleine Rissöffnungen ( $w_r \approx 0,02$  mm) direkt zu einer Schädigung des Verbundes Lamelle-Beton führen und nur ein geringer Anteil der geklebten Fläche zum Lastabtrag herangezogen werden kann. Dies resultiert in einem hohen Aufwand innerhalb des Nachweisformates – zusätzlich zum bekannten Endverankerungsnachweis muss oftmals ein Verbundnachweis über die gesamte Bauteillänge, die nun in von Biegerissen getrennte Elemente (Zwischenrisselemente) unterteilt wird, erfolgen. Des Weiteren werden hohe Spannungsspitzen in der CFK-Lamelle an den Diskontinuitätsstellen (Rissufer) aufgebaut und der Verbund übermäßig beansprucht. Bei Rissöffnung übernimmt die CFK-Lamelle den Hauptteil der abzutragenden Zuglast; die einbetonierte Betonstahlbewehrung wird implizit entlastet. Dieser Zustand wird erst durch die bereichsweise Schädigung des Verbundes bzw. Verbundentkopplung ( $w_r \approx 0,50$  mm) aufgehoben – es muss von einer unzureichenden Interaktion bzw. Kompatibilität der Verstärkungsmaßnahme gesprochen werden. Weiterhin führen zyklische Belastungen durch die frühe Schädigung zu vorzeitigem Verbundversagen und aufgrund einer Glasübergangstemperatur im Bereich von 40°C bis 60°C ist kein Widerstand gegenüber erhöhten Temperaturen gegeben. Dies führt zu bedeutenden Einschränkungen in der jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassung.

## 2. Vorgehen

Im Rahmen des Forschungsprojektes soll eine Verstärkungsmaßnahme aus geklebten CFK-Lamellen entwickelt werden, welche die oben aufgeführten Defizite implizit mindert. Hierzu wird ein Klebstoff auf Polyurethan-Basis (PU) entwickelt, der eine dauerelastische Klebschicht ausbildet. Die Verbundsteifigkeit und Verformungsfähigkeit der Klebschicht wird auf das Verbundsystem Betonstahl-Beton abgestimmt – somit kann man einem kompatiblen Verstärkungssystem gesprochen werden. Durch die ausgeprägte Elastizität werden Spannungsspitzen an Diskontinuitätsstellen gemindert; die Aufnahme zyklischer Lasten über den Klebeverbund der CFK-Lamelle wird ermöglicht. Des Weiteren zeichnen sich PU-Klebstoffe durch Glasübergangstemperaturen weit unter 0°C aus – ihre Entfestigung bei Erwärmung ist durch einen linearen Zusammenhang gegeben und exakt definierbar. Die Einfluss der Klebschichtsteifigkeit auf das Interaktionsverhalten von einbetonierter (Betonstahl) und aufgeklebter Bewehrung (CFK-Lamelle) wird im ersten Schritt numerisch mit dem Softwarepaket Abaqus untersucht. Hierbei werden sowohl Simulationen auf Verbund- (Endverankerung, Zwischenrisselement (ZRE)) und auf Bauteilebene (verstärkter Biegebalken) durchgeführt. In einem zweiten Schritt erfolgt die experimentelle Untersuchung des Einflusses der Klebschichtsteifigkeit auf das Verbundverhalten aufgeklebter CFK-Lamellen im Rahmen von Endverankerungsversuchen. Im Vordergrund stehen hierbei die Ermittlung der maximalen Tragfähigkeit und des jeweiligen Verbundverhaltens, das über die Verbundspannung-Schlupf-Beziehung (VSB) abgebildet wird. Die Demonstration der Effektivität einer kompatiblen Verstärkungsmaßnahme erfolgt in Bauteilversuchen (verstärkter Biegebalken) mit realen Abmessungen.

## 3. Ergebnisse

Der Einfluss der Klebschichtsteifigkeit wurde durch das in Abb. 1 (links) dargestellte numerische Modell des gemischt bewehrten ZRE (Betonstahl in rot und CFK-Lamelle in blau) untersucht. Hierbei stellt K1 einen handelsüblichen EP dar, während K2 für einen sehr weichen PU und K3 für einen dauerelastischen PU mit einer auf den Betonstahl angepassten Verbundsteifigkeit steht. Die ermittelten Verbundkoeffizienten  $\lambda$  der Bewehrungselemente je nach Rissöffnung  $w_r$  sind in Abb.1 (rechts) dargestellt.

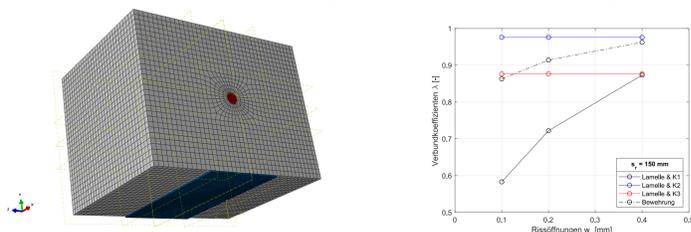


Abb. 1: gemischt bewehrtes ZRE – Modell und ermittelte Verbundkoeffizienten

Die deutlich verbesserte Interaktion der Bewehrungselemente bei der Verwendung von K3 ist durch die Annäherung des Verbundkoeffizienten  $\lambda$  der CFK-Lamelle an den Wert für Bewehrung (Betonstahl) ersichtlich. Mit einer steifen Klebschicht (K1) ergeben sich die bekannten Spannungskonzentration im Riss und sukzessive Verbundschädigung bei fortschreitender Rissöffnung, die mit einer Änderung des Verbundkoeffizienten einhergeht.

Im Rahmen von Endverankerungsversuchen (Einzellaschenkörper, Druck-Zug-Kombination), s. Abb. 2 (links) konnte die gesteigerte Leistungsfähigkeit elastisch geklebter CFK-Lamellen gezeigt werden, s. Abb. 2 (rechts). Hierbei kamen zwei verschiedene Lamine zum Einsatz.

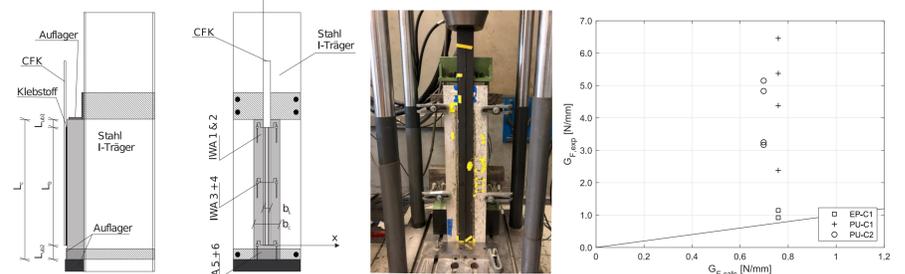


Abb. 2: Endverankerungsversuche – Aufbau (Skizze und Bild) und ermittelte Bruchenergien  $G_{F,exp}$

Die Bruchenergie der mit PU geklebten CFK-Lamellen war hierbei um Faktor vier bis sechs höher als bei der Verwendung des handelsüblichen EP. Durch die kontinuierliche Dehnungsmessung in der CFK-Lamelle mit faseroptischen Sensoren konnte je Klebstoff und Klebschichtdicke das entsprechende Verbundverhalten (VSB) charakterisiert werden, s. Abb. 3. Zusätzlich eingezeichnet ist eine bilineare Idealisierung der VSB.

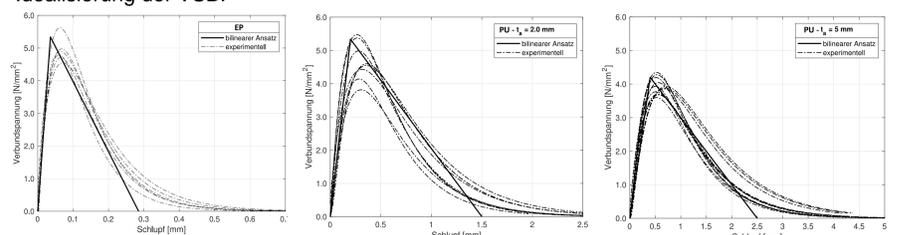


Abb. 3: im Experiment ermittelte VSB für geklebte CFK-Lamelle – EP (links), PU (Mitte und rechts)

Die Steigung des linear-elastisch ansteigenden Astes der VSB kann durch die Schubsteifigkeit des reinen Polymers und der Klebschichtgeometrie in guter Näherung abgebildet werden. Der elastische Grenzschlupf ist hierbei größer als die im Gebrauchszustand zu erwartenden Rissöffnungen. Die Sekantensteifigkeit der VSB entspricht der für einbetonierten Betonstahl – eine Kompatibilität der Verstärkung hinsichtlich Verformungs- und Verbundverhalten ist gegeben.

Die Demonstration der Leistungsfähigkeit elastisch geklebter CFK-Lamellen zur Biegeverstärkung wurde im Rahmen von Vier-Punkt-Biegeversuchen demonstriert, s. Abb. 4.



Abb. 4: verstärkter Biegebalken im Vier-Punkt-Biegeversuch (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts)

Durch die Applikation der CFK-Lamelle mit dem PU wurde, im Vergleich zu EP, die Tragfähigkeit um 20 Prozent und die Ausnutzung der Lamelle um 53 Prozent gesteigert. Weiterhin versagte der PU-Balken durch Fließen der Betonstahlbewehrung, gefolgt von einem Versagen der Betondruckzone bevor die CFK-Lamelle samt Betondeckung kohäsiv auf Höhe der Längsbewehrung entkoppelte. Die Ausbildung eines Lastplateaus beim PU-Balken spricht für eine Aufrechterhaltung der Verformungsfähigkeit und eine Versagensvorankündigung. Diese ist bei dem EP-Balken durch die frühzeitige Entkopplung der CFK-Lamelle nicht gegeben – eine Plastifizierung der Betondruckzone erfolgte nicht. Zur Beurteilung der Interaktion erfolgt die Ermittlung der Verbundkoeffizienten der CFK-Lamelle  $\lambda_L$ , s. Abb. 5.

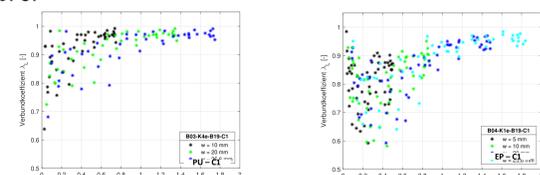


Abb. 5: Verbundkoeffizienten der Lamelle im Gebrauchszustand – Klebschicht PU (links) und EP (rechts)

Dieser liegt im Gebrauchszustand und Tragfähigkeitsbereich bei PU weitestgehend bei 0,9 bis 0,95, was dem Wert für einbetonierten Betonstahl entspricht. Für EP zeigt sich hier die gleiche Tendenz wie im numerischen Modell. Somit kann bei der Applikation der CFK-Lamelle mit PU von einer kompatiblen und erfolgreichen Verstärkungsmaßnahme gesprochen werden.