

## BAUWERKSVERSTÄRKUNG

# Geklebte Bewehrung aus Faserverbundwerkstoffen

Im Bauwesen werden Klebstoffe mittlerweile auch zur Verbindung tragender Bauteile eingesetzt. Besonders im Bereich der statischen Verstärkung von Stahlbetonbauteilen empfiehlt sich die Verwendung nachträglich angeklebter Bewehrung. Anstatt der früher üblichen angeklebten Stahllaschen haben sich dabei leichte Faserverbundwerkstoffe durchgesetzt.

WIEBKE VOM BERG, CHRISTOPH A. BEECKEN

**B**elastungsänderungen, veränderte statische Systeme, Setzungen, Korrosion von Bewehrung, Ausführungsfehler, aber auch Erdbeben- und Anpralllasten können während der Nutzungsdauer von Bauwerken dazu führen, dass die ursprüngliche Tragsicherheit oder Gebrauchstauglichkeit nicht mehr gewährleistet ist. In vielen Fällen ist eine Nachverstärkung bestehender Bauwerke erforderlich. In den letzten Jahren haben sich dafür geklebte Bewehrungen aus FRP (Fibre Reinforced Polymer) am Markt durchgesetzt.

Für Verstärkungsmaßnahmen an Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen sind folgende FRP-Systeme für unterschiedlichste Anwendungsfälle erhältlich:

- In-situ handlamierte FRP-Verstärkungssysteme aus Fasergeweben und -gelegen,
- vorgefertigte oberflächlich aufgeklebte Kohlefaserlamellen,
- vorgefertigte in Schlitze eingeklebte Kohlefaserlamellen,
- vorgefertigte vorgespannte Kohlefaserlamellen,
- In-situ handlamierte vorgespannte Aramidbänder.

Zur Herstellung eines Faserverbundwerkstoffs werden die Ausgangsfasern in eine Polymer-Matrix eingebettet, die einerseits der Kraftübertragung zwischen den ein-

zelnen Fasern dient und andererseits die Kräfteinleitung zwischen dem FRP-System und dem verstärkten Bauteil sicherstellt.

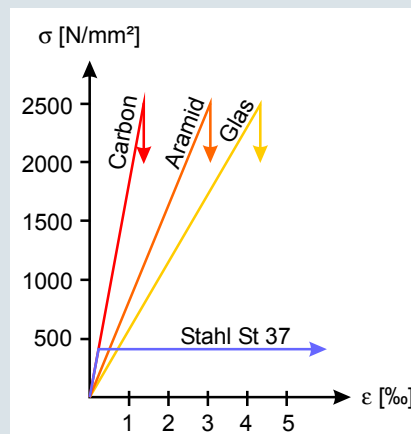
## Ausgangsfasern

Verstärkungssysteme basieren auf einem Fasertyp oder auf Faserkombinationen (Hybriden). Die verwendeten Fasermaterialien (Bild 1) richten sich nach dem Verwendungszweck:

- Kohlefasern: Kohlefasern (Carbon) sind wegen ihrer hohen Steifigkeit (hoher E-Modul) besonders für Verstärkungen geeignet, zum Beispiel für die Traglasterrhöhung

von Biegebauteilen. FRP-Systeme aus Kohlefasern zeichnen sich durch ihre geringe thermische Ausdehnung, ihre geringe Ermüdungsanfälligkeit sowie durch ihre ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit aus.

- Aramid: Aramidfasern besitzen eine hohe Zähigkeit. Daher werden Aramidfasern zur Verbesserung des Anprallschutzes, zum Beispiel bei Brückenpfeilern oder vergleichbaren Bauteilen eingesetzt. Wegen ihrer geringen Querdruckempfindlichkeit lassen sich FRP-Systeme aus Aramidfasern auch um scharfe Bauteilkanten herumführen oder zur



▲ Bild 1: Spannungs-Dehnungs-Linien der unterschiedlichen Fasermaterialien im Vergleich zu Baustahl



▲ Bild 2: Handlamination von FRP-Sheets

Aufbringung einer Vorspannung schlaufenartig verankern.

- **AR-Glas:**  
Alkaliresistente Glasfasern (AR-Glas) werden aufgrund ihrer geringen Steifigkeit (niedriger E-Modul) vor allem zur Verbesserung der Duktilität im Rahmen seismischer Verstärkungsmaßnahmen angewendet. Sie sind besonders geeignet für die Verstärkung von Mauerwerk.

**FRP-Produkte für die örtliche Handlamination**

Flächige FRP-Produkte für die Handlamination, so genannte Sheets, werden aus uni- oder bidirektional angeordneten Fasern gefertigt. Eine schubfeste Verbindung der Fasern untereinander sowie zum Untergrund entsteht erst durch das Aufkleben auf den Beton (Bild 2). Das Laminierharz übernimmt dabei die Funktion der Matrix.

Zur Herstellung unidirektionaler Gelege werden die Verstärkungsfasern parallel zueinander auf ein Tragitter aufgeklebt. Diese Produkte zeichnen sich aufgrund der gestreckten Anordnung der Fasern durch eine hohe Steifigkeit aus.

Bei einer bidirektionalen Anordnung der Verstärkungsfasern erfolgt die Herstellung im Webvorgang. Herstellungsbedingt sind die Fasern im Gewebe leicht gewellt. Deshalb müssen die Verstärkungsfasern unter Belastung zunächst leicht gestreckt werden, bevor sie größere Kräfte aufnehmen können. Daher sind Produkte mit bidirektionaler Faseranordnung weniger steif als Produkte mit unidirektionalen Fasern.

**Vorgefertigte FRP-Produkte**

Zur Herstellung vorgefertigter FRP-Lamine werden die Ausgangsfasern im Herstellwerk in eine Epoxidharzmatrix eingebettet und thermisch ausgehärtet. Sowohl uni- als auch bidirektionale Lamine können vorgefertigt werden. Bekannteste Beispiele sind so genannte CFK-Lamellen, die überwiegend zur Biegezugverstärkung verwendet werden (Bilder 3 und 4).

Die Verklebung des vorgefertigten Laminates am Bauteil erfolgt durch ei-



◀ Bild 3: Aufkleben vorgefertigter CFK-Lamellen auf die Bauteiloberfläche



Bild 4: Einkleben von vorgefertigten CFK-Lamellen in Betonschlitzten ▼

Dicke [mm]	Breite [mm]	E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [%]
1,2 bis 1,4	10 bis 150	150 bis 300	2400 bis 3000	1,2 bis 1,5

▲ Kennwerte von CFK-Lamellen

nen mit Quarzmehl gefüllten Epoxidharzklebstoff, der auf der Baustelle aus den beiden Komponenten Harz und Härter hergestellt wird.

**Klebeverbund**

Für die statische Verstärkung von Bauteilen ist der Verbund zwischen Kunststofffasern und Untergrund entscheidend. Die Zug- und Schubfestigkeiten des Klebstoffes sind in der Regel höher als die des Betons, sodass die Verbundtragfähigkeit oberflächlich aufgeklebter FRP-Systeme in erster Linie durch ein Versagen der Betondeckungsschicht begrenzt wird. Der große Einfluss der Oberflächenzugfestigkeit des Untergrunds und somit letztlich der Qualität der Betondeckungsschicht führen da-

zu, dass sich auch bei maximaler Verbundlänge nur etwa 8 – 25 % der FRP-Bruchkraft verankern lassen.

Um eine ausreichende Kraftübertragung zu gewährleisten, ist bei oberflächlich aufgeklebten FRP-Systemen eine sorgfältige Vorbehandlung des Betonuntergrunds durch Abschleifen oder Sandstrahlen erforderlich, um eine Oberflächenhaftzugfestigkeit von mindestens 1,0 N/mm<sup>2</sup> zu erreichen.

Für optimale Verklebungsergebnisse werden matrixreiche Randschichten der Lamellen abgeschliffen und die Lamellenoberfläche vor der Montage von Staub und Fett befreit.

Als Laminierharze für Fasergelege oder -gewebe werden reine oder mit Ze-

ment verfüllte Epoxidharze verwendet. Wegen der vergleichsweise großen Oberfläche lassen sich flächige FRP-Systeme erheblich besser verankern als vorgefertigte CFK-Lamellen.

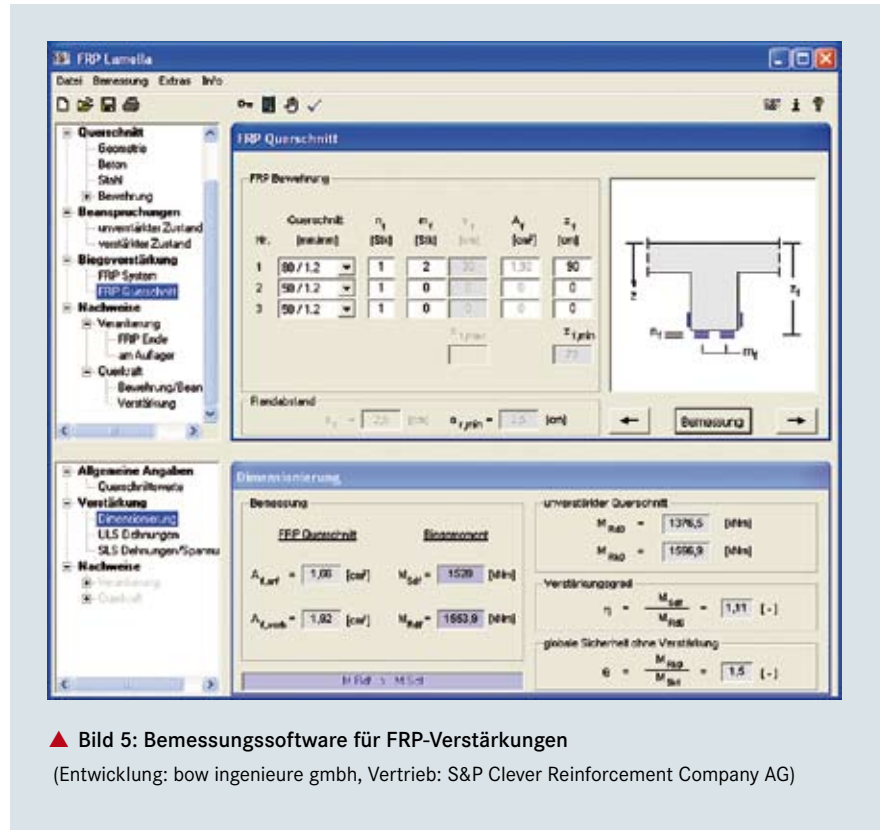
In örtlich hergestellte Schlitz in der Betonoberfläche eingeklebte CFK-Lamellen weisen wesentlich bessere Verbundeigenschaften auf als oberflächlich aufgeklebte FRP-Systeme. Die Verbundtragfähigkeit dieses Systems hängt maßgeblich von der Schubtragfähigkeit des Epoxidharzklebstoffes ab. Da die vorgefertigten Lamellen in mit Klebstoff gefüllte Schlitz in der Betonoberfläche eingedrückt werden, spielt die Tragfähigkeit des Untergrunds nur eine untergeordnete Rolle und es kann auf eine Oberflächenvorbehandlung verzichtet werden (Bild 4).

Ist die FRP-Bewehrung zur Sicherung der Tragfähigkeit eines Bauteils erforderlich, so ist wegen der Temperaturempfindlichkeit des Epoxidharzklebstoffes eine Brandschutzverkleidung vorzusehen, die eine ausreichende Feuerwiderstandsdauer gewährleistet.

## Bemessung

Die wichtigsten Hersteller besitzen für ihre FRP-Verstärkungssysteme, wie oberflächlich aufgeklebte oder in Schlitz verklebte CFK-Lamellen, allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt). Die Zulassungen beinhalten Angaben zur Bemessung der Verstärkungsmaßnahmen. Darüber hinaus bieten einige Hersteller spezielle Berechnungssoftware für ihre Produkte an. So sind Bemessungsprogramme für die Biegezug- und Querkraftverstärkung sowie für die Umschnürung von Druckstützen verfügbar (Bild 5).

Sowohl der E-Modul als auch die Zugfestigkeit der Epoxidharzmatrix sind für die Berechnung der Kennwerte des Faserverbundwerkstoffs vernachlässigbar. Während bei der Bemessung von handlamierten Systemen nur mit dem theoretischen Faserquerschnitt und mit den Kennwerten der Faser gerechnet wird, werden bei vorgefertigten CFK-Lamellen die effektiven Kennwerte des Laminats und der tatsächliche Lamellenquerschnitt zugrunde gelegt. Da die Fa-



▲ Bild 5: Bemessungssoftware für FRP-Verstärkungen

(Entwicklung: bow ingenieure gmbh, Vertrieb: S&P Clever Reinforcement Company AG)

serverfüllung von unidirektionalen Laminaten verfahrenstechnisch auf etwa 70 % beschränkt ist, erreichen unidirektionale Laminats mechanische Eigenschaften von annähernd 70 % der theoretischen Faserkennwerte.

Anwendungsbedingt ist beim Handlaminierten eine optimale Faseranordnung nicht immer gewährleistet. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Faserkennwerte für die Bemessung zusätzlich abzumindern. Je nach Produkt (Gelege oder Gewebe) sollte die rechnerische Steifigkeit der Sheets um 15 % bis 30 % reduziert werden.

### Projektbeispiel: Verstärkung eines Unterzuges in einem Bürogebäude

Beim technischen Ausbau eines neuen Verwaltungsgebäudes in Hamburg wurde mehr als die Hälfte der Biegebewehrung eines Stahlbetonunterzuges durch eine falsch angeordnete Kernbohrung zerstört, die der Durchführung von Leitungen dienen sollte. Als Ersatz für die durchtrennten Bewehrungsstäbe wurden vorgefertigte CFK-Lamellen auf die Unterseite des Trägers geklebt (Bild 6).

Um ein Ablösen der FRP-Verstärkung zu verhindern, wurde außerdem eine Umschließung der CFK-Lamellen mit Stahlbügeln realisiert.

### Projektbeispiel: Verstärkung der Dachdecke eines Krankenhauses

Um Raum für zusätzliche Patientenzimmer zu schaffen, erhielt ein Gebäude des Krankenhauses in Hamburg-Wilhelmsburg ein zusätzliches Geschoss. Durch die damit einhergehende Erhöhung der Nutzlasten war eine Ergänzung der Stützbewehrung der bisherigen Dachdecke erforderlich. Zunächst waren aufgeklebte Stahl- oder CFK-Lamellen vorgesehen. Diese oberflächlich aufgeklebten Systeme erforderten jedoch eine großflächige und geräuschintensive Untergrundvorbehandlung, die den Betrieb der unter dem neuen Geschoss befindlichen Pflegestation stark einschränkte. Daher kamen schließlich in Schlitz eingeklebte CFK-Lamellen zur Ausführung (Bild 7), die wesentlich einfacher und geräuschärmer appliziert werden konnten.

**Projektbeispiel:  
Verstärkung einer Spannbe-  
tonbrücke**

Durch die geplante Verlängerung der Einfädelspur auf der in den 1970er-Jahren errichteten West Gate Bridge in Melbourne (Bild 8) wurde die Verstärkung eines ca. 700 m langen Teilstücks der Spannbetonbrücke erforderlich. Im Rahmen der Ausschreibung der Baumaßnahme sah ein Sondervorschlag anstelle der geplanten Stahllaschenverstärkung den Einsatz von Kohlefaserverbundwerkstoffen vor. Der Sondervorschlag umfasste folgende Verstärkungsmaßnahmen:

- Torsions- und Schubverstärkung des Hohlkastenquerschnitts mit CFK-Lamellen und CF-Laminaten,
- Verstärkung der durchlaufenden Fahrbahnplatte im Bereich der auskragenden Querträger durch angeklebte CFK-Lamellen (Feldbereich) und durch in Schlitze eingeklebte CFK-Lamellen (Stützbereich),
- Biegezugverstärkung der auskragenden Querträger mit CFK-Lamellen und Verstärkung der Druckzone mit Stahllaschen,
- Biegezugverstärkung des Hohlkastenquerschnitts im Bereich der Segmentfugen zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit.

Aufgrund der einfacheren Anwendung der FRP-Verstärkung und der Dauerhaftigkeit des Materials erwies sich diese Variante als besonders kostengünstig.

Der Hohlkastenquerschnitt wurde quer zur Fahrbahnrichtung unterseitig und seitlich verstärkt. Hierbei kamen in erster Linie CFK-Lamellen zum Einsatz. Im oberen Anschlusspunkt (Bild 9, Detail B) der seitlichen Zellenwand an die Fahrbahnplatte musste die Lamellenkraft infolge Torsion in voller Höhe im Beton verankert werden, um die Schubkraftübertragung



▲ Bild 6: Biegezugverstärkung eines Stahlbetonunterzuges mit oberflächlich aufgeklebten CFK-Lamellen und Stahl-Laschenbügeln



▲ Bild 7: Oberseitige Deckenverstärkung mit in Schlitze eingeklebten CFK-Lamellen



▲ Bild 8: Untersicht des Spannbeton-Brückenüberbaus vor der Verstärkung

mit der innen liegenden Bewehrung der Deckplatte des Hohlkastens zu gewährleisten. Hierfür wurde ein Anschluss mit eingeschlitzten Lamellen gewählt, der eine Verankerung bis zur maximal zulässigen Lamellenkraft ermöglicht. Im unteren Anschlusspunkt (Bild 9, Detail C) der Bodenplatte an die seit-

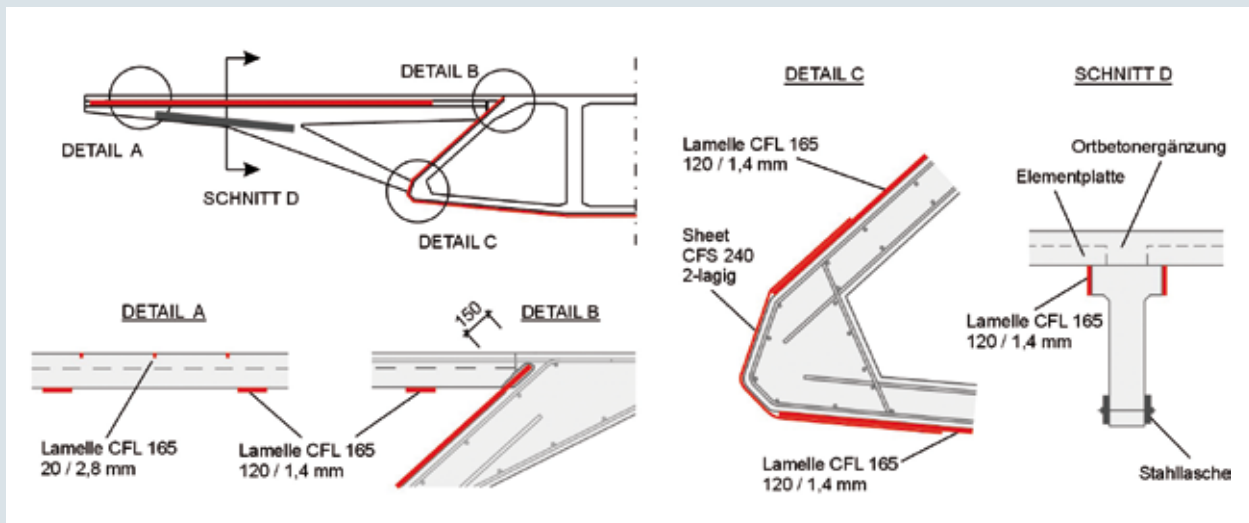
liche Zellenwand des Hohlkastens musste die Lamellenkraft um die Ecke herumgeführt und ausreichend verankert werden. Daher wurden zur Weiterleitung der Torsionskräfte sowie zur Verstärkung des unteren Eckbereiches unidirektionale CF-Sheets eingesetzt.

Darüber hinaus war eine Biegezugverstärkung der Fahrbahnplatte (Bild 9, Detail A) im auskragenden Bereich des Brückenquerschnitts erforderlich. Während zur Vergrößerung des aufnehmbaren Feldmoments unterseitig angeklebte CFK-Lamellen gewählt wurden, wurden im Stützbereich über den Querträgern eingeschlitzte Lamellen verwendet. Letztere sollen die in der Vergangenheit aufgetretenen Rissbreiten an der Oberseite der Fahrbahnplatte reduzieren und somit zusätzlich zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit beitragen.

**Projektbeispiel:  
Verstärkung eines Wohn- und  
Geschäftsgebäudes**

Ein in den 1990er-Jahren errichtetes Gebäude in Bleicherode zeigte bereits kurz nach der Fertigstellung erhebliche Schäden. Statt der geplanten Leichtbauwände waren im 1. OG massive Kalksandsteinwände eingebaut worden, die zu starken Verformungen der Decke über dem Einzelhandelsmarkt im Erdgeschoss führten und breite Mauerwerksrisse verursachten. Das Sanierungskonzept sah eine Verstärkung der Decken und Unterzüge mit vorgespannten CFK-Lamellen vor (Bild 10). Im Gegen-

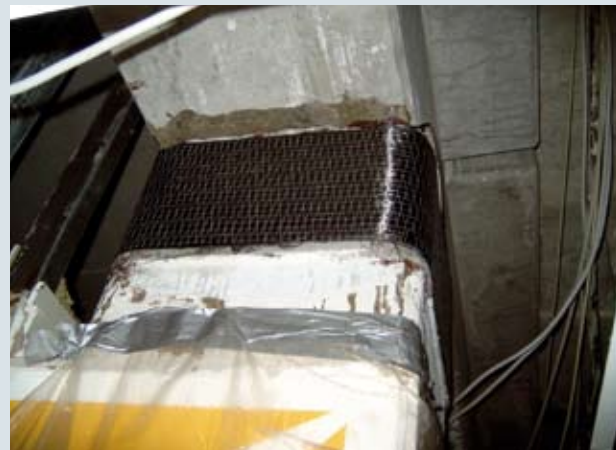
satz zu schlaff verklebten Lamellen konnten durch die Vorspannung weitere Verformungen infolge Verkehrsbelastung stark eingeschränkt werden. Das Vorspannsystem gewährleistet außerdem eine verbesserte Verankerung der Lamellenkräfte. Da zum Zeitpunkt der Bauausführung noch keine allgemeine



▲ Bild 9: Übersicht und Details der FRP-Verstärkungsmaßnahmen



▲ Bild 10: Verstärkung eines Unterzugs mit vorgespannten CFK-Lamellen



▲ Bild 11: Verstärkung eines Stützenkopfes durch Umwicklung mit Carbon-Sheets (Foto: Torkret AG)

bauaufsichtliche Zulassung für dieses FRP-System vorlag, wurde eine Zustimmung im Einzelfall beantragt.

**Projektbeispiel:  
Verstärkung von Stützen eines  
Geschäftshauses**

Mehrere Stahlbetonstützen eines Lebensmittelmarktes in Mülheim an der Ruhr waren ohne die planmäßig vorgesehene Anschlussbewehrung errichtet worden. Durch zu große Lagerabmessungen und eine fehlende Querkzugbewehrung zeigten sich im Bereich der Stützenköpfe Haarrisse und keilförmige

Abplatzungen. Um die unzulässige Verminderung der Querschnittsflächen im Lasteinleitungsbereich auszugleichen und eine ausreichende Tragsicherheit wieder herzustellen, wurden die beschädigten Stützenköpfe mit CF-Sheets umwickelt (Bild 11). Durch die Behinderung der Querdehnung des Betons bei axialer Druckbeanspruchung und dem damit einhergehenden dreiaxialen Spannungszustand kommt es zu einer Erhöhung der Betondruckfestigkeit. Die Verstärkungsmaßnahme wurde realisiert, ohne den laufenden Betrieb maßgeblich zu beeinträchtigen. ■

**Die Autoren**

Wiebke vom Berg (+49(0)40 85 50 49 40, vom.berg@bow-ingenieure.de, www.bow-ingenieure.de) ist in der Hamburger Niederlassung der bow ingenieure gmbh im Bereich Bauwerksverstärkung und Software-Entwicklung tätig. Christoph A. Beecken (+49(0)53 12 43 59-0, beecken@bow-ingenieure.de, www.bow-ingenieure.de) ist Beratender Ingenieur und Geschäftsführer der bow ingenieure gmbh in Braunschweig und Hamburg.