

# Untersuchungen zur Verstärkung von Stahlbauten durch kohlenstoffverstärkten Kunststoff (CFK)

G. Zapf, D. Hannebauer, H. Pasternak, Cottbus

Der folgende Forschungsantrag soll dazu dienen, die Benachteiligung des Stahls im Vergleich zu anderen Bauweisen aufzuheben und zeigen, dass man Stahlbrücken und –hochbauten durch aufgeklebte CFK-Lamellen verstärken kann.

Am Lehrstuhl für Stahlbau der BTU Cottbus wurden Pilotversuche zum Thema Verstärkung von Stahl mit CFK-Lamellen durchgeführt. Ziel war die Erarbeitung eines einfachen Ingenieurmodells zur Tragfähigkeitsvorhersage von geklebten Stahl-CFK-Verbindungen auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen sowie theoretischer Modelle des Spann- und Stahlbetonbaus. Die durchgeführten Versuche umfassen Untersuchungen von schlaff bewehrten sowie vorgespannten CFK-Lamellen.

Zur Erstellung eines groben Ingenieurmodells für den Stahl-CFK Verbund wurden vorhandene Theorien (Holzenkämpfer) analysiert und in den Stahlbau-CFK Verbund übertragen. Aussagen zur maximalen Verbundbruchkraft sowie zur maximalen Verankerungslänge sind getroffen worden. Das auf Grundlage der erzielten Ergebnisse entwickelte Bemessungsmodell ebnet den Weg für weiterführende Untersuchungen auf dem Gebiet der Sanierungstechnik in der Stahlbauindustrie.

## 1 Einleitung

Faserverstärkte Kunststoffe werden seit längerem in hoch beanspruchten Konstruktionen des Stoff- und Formleichtbaues (Flugzeugbau, Raumfahrt, Behälterbau u. a.) erfolgreich eingesetzt. Der besondere Vorzug dieser Verbundwerkstoffe besteht darin, dass durch Wahl der Verstärkungsart (unidirektionale, orthotrope oder quasiisotrope Verstärkung) die Tragwirkung in effektiver Weise der Richtung der maßgebenden Beanspruchung angepasst werden kann. Hohe Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte, gepaart mit niedriger Eigenmasse, machen diese Verbundwerkstoffe auch für die Verstärkung bestehender Tragwerke bzw. als Komponenten von Verbundtragwerken interessant. Positive Erfahrungen liegen im Betonbau, Holzbau und Mauerwerksbau vor.

Während man bei Betonbrücken die Zugzone sowohl durch schlaffe als auch vorgespannte CFK bewehrt, beschränkt man sich in den restlichen Fällen i.d.R. auf schlaffe Bewehrung (z.B. bei gusseisernen Stützen erhöht man durch das Ankleben von CFK die Knicklast). Für das Verstärken von Beton durch CFK gibt es bauaufsichtliche Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik.

Die Forschung zum Thema „Verstärkung von Stahl durch (vorgespannte) CFK“ steht indes noch ganz am

Anfang. In Lausanne versuchte man bei einer Rheinbrücke erfolgreich, durch Vorspannung Ermüdungsrisse von Nietlöchern infolge dynamischer Belastung zu schließen. Im Resultat erhält man eine auf der Basis der Bruchmechanik ermittelte, nachhaltig verlängerte, nominelle Lebensdauer der Brücke. Allgemeine Schlussfolgerungen, verwertbar z.B. im Rahmen einer bauaufsichtlichen Zulassung, lassen sich aus der Untersuchung noch nicht ziehen.

Vorteile im Vergleich zur herkömmlichen Verbindungstechnik sind: Ältere Bauwerke (*auch aus nicht schweißbaren Stählen*) können verstärkt werden, die lichte Höhe (z.B. Durchfahrts Höhe) kann beibehalten werden. Die Verstärkung mittels geklebter CFK-Lamelle ist (im Gegensatz zur Verstärkung durch aufgeschweißte Laschen) nahezu eigenspannungsfrei. Auch im Vergleich mit geschraubten Verbindungen ergeben sich keine übermäßigen (durch die Löcher verursachten) Spannungsspitzen. Dazu kommt die gute Handhabbarkeit des Verstärkungsmaterials.

Ziel der in diesem Beitrag präsentierten Ergebnisse ist es, durch Grundlagenuntersuchungen zu zeigen, dass eine Verstärkung von Stahl mit CFK-Lamellen im Hinblick auf eine Tragfähigkeitssteigerung möglich und sinnvoll ist.

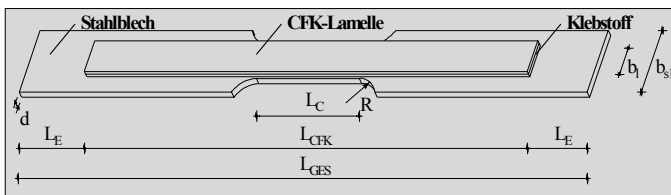
Am Lehrstuhl für Stahlbau der BTU Cottbus wurden Pilotversuche zum Thema Verstärkung von Stahl mit

CFK-Lamellen durchgeführt. Ziel war die Erarbeitung eines einfachen Ingenieurmodells zur Tragfähigkeitsvorhersage von geklebten Stahl-CFK-Verbindungen auf der Grundlage

- Experimenteller Untersuchungen sowie
- Theoretischer Modelle des Spann- und Stahlbetonbaus.

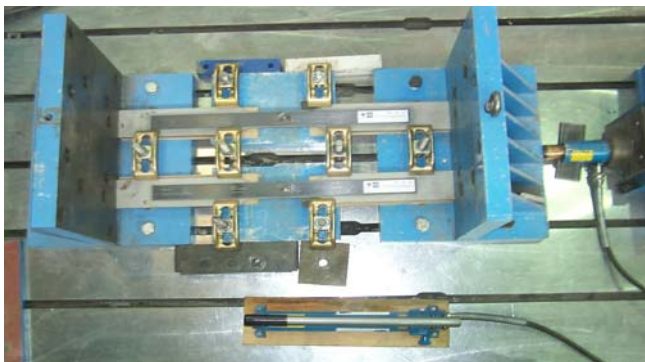
## 2 Experimentelle Untersuchungen

Zur Ermittlung der charakteristischen Kennwerte des Klebverbundes wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils 3 Prüfkörpern gefahren. Die verwendeten Prüfkörper bestanden aus einem 1m langen Stahlblech (S235), welches in der Mitte zur Erzielung einer Sollbruchstelle verjüngt wurde, **Bild 1**. Auf dieses wurde eine ca. 80cm lange CFK-Lamelle einseitig, unter Verwendung des Klebstoffes Sikadur 30, aufgebracht.



**Bild 1** – Aufbau eines Versuchskörpers

Um den Einfluss des Vorspannes zu berücksichtigen, wurde ein Teil der Proben vorgespannt bewehrt. Die Vorspanneinrichtung konnte mit sehr einfachen Mitteln durch das Aufkleben der Lamellen auf gestauchte Stahlbleche realisiert werden, **Bild 2**



**Bild 2** – Vorspanneinrichtung

Die Prüfkörper wurden hierbei zwischen einer feststehenden und einer verschiebblichen Konsole platziert, welche dann mittels einer Presse

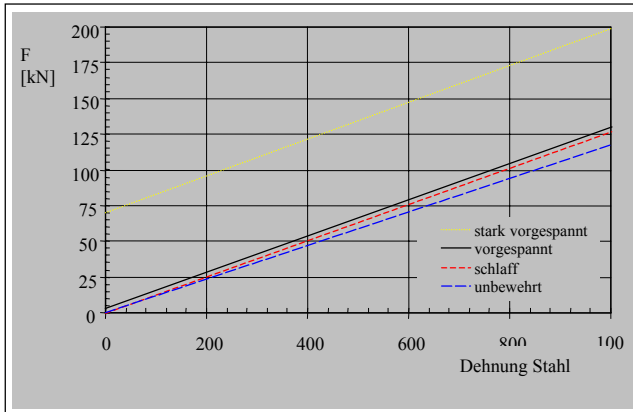
zusammengedrückt wurden. Durch das Applizieren der Lamelle auf das gestauchte Stahlblech konnte beim Entspannen des Prüfkörpers eine Vorspannung erzielt werden. Aufgrund einer auf etwa 100kN begrenzten Pressenkraft wurden die Stahlbleche nur mit maximal 50kN gestauch. Mit einem Flächenverhältnis  $A_{CFK}/A_{Stahl}$  von 0,1 ergab sich die maximal erreichbare Vorspannkraft der Lamelle zu 5kN. Die relativ geringe Vorspannkraft ist akzeptabel, da die Untersuchungen eine prinzipielle Berücksichtigung von schlaff und vorgespannt aufgeklebter Bewehrung zum Ziel hatten.

Die Belastung wurde weggesteuert aufgebracht, **Bild 3**.



**Bild 3** - Versuchsaufbau

Die in den Versuchen gemessenen Stahldehnungen des mittleren Querschnittsbereiches sind vergleichend für einen unverstärkten Stahlquerschnitt, einen schlaffbewehrten und einen vorgespannt verstärkten Prüfkörper dargestellt, **Bild 4**. Aufgrund des geringen Vorspanngrades (max. 5kN) liegt diese Kennlinie nur knapp über der des schlaff bewehrten Prüfkörpers. Aus diesem Grund ist zusätzlich die maximal mögliche Verstärkung bei maximaler Vorspannung dargestellt.



**Bild 4 – Last-Dehnungsdiagramm**

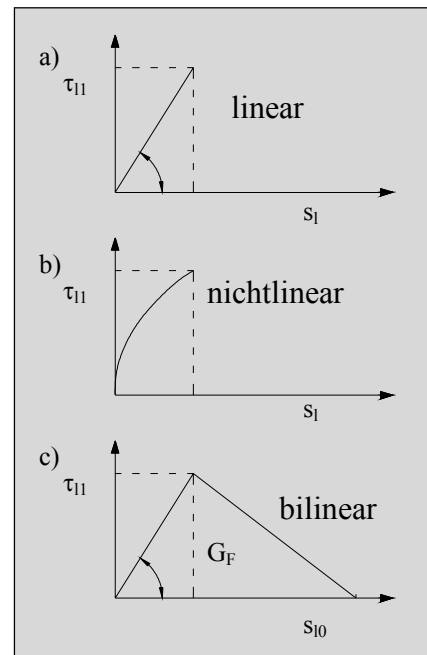
Der Grad der Traglaststeigerung ist somit von der Höhe der Vorspannung und dem Steifigkeitsverhältnis der Werkstoffe Stahl/CFK abhängig. Bei maximalem Vorspanngrad wäre für den Prüfkörper eine Erhöhung der Tragfähigkeit von ca. 60% möglich, für einen IPE 300 läge die Steigerung vergleichsweise bei ca. 15%. Für den Verbund typisch konnten die in Kombination auftretenden Versagensarten

- Adhäsionsbruch an der Stahloberfläche bzw.
  - Fügeteilversagen in der CFK-Lamelle (Zwischenfaserbruch)
- beobachtet werden.

### 3 Theoretische Modelle

Grundlage vieler Ingenieurmodelle zur Beschreibung von Klebeverbindungen ist die von *Volkersen* im Jahre 1938 aufgestellte Theorie zur Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes. Auf dieser basierend wurden von *Holzenkämpfer* zur Vorhersage der Verbundtragfähigkeit und der Verformungen von Stahllaschen verstärkten Betonbauteilen Bruchmodelle mit den dargestellten linearen, nichtlinearen und bilinearen  $\tau - s$  Ansätzen untersucht, **Bild 4**. Für den Stahlbeton ließen sich mit dem bilinearen Ansatz sehr gute Ergebnisse erzielen, die interessierenden Größen, wie z.B. die Verbundbruchkraft, konnten jedoch aufgrund der Komplexität des Ansatzes nur iterativ ermittelt werden.

Des weiteren konnte gezeigt werden, dass die Verbundtragfähigkeit bei großen Längen einen Endwert anstrebt. Dieser wird durch die Lamellenkenngrößen: Breite, Dicke, E-Modul, sowie von der Fläche unter der  $\tau$ -s-Beziehung bestimmt.



**Bild 4 -  $\tau - s$  - Ansätze**

Die Fläche wird als gesamte Bruchenergie  $G_F$  des oberflächennahen Betons definiert, welche für die vollständige Entkopplung des Verbundes einer Einheitsfläche erforderlich ist.

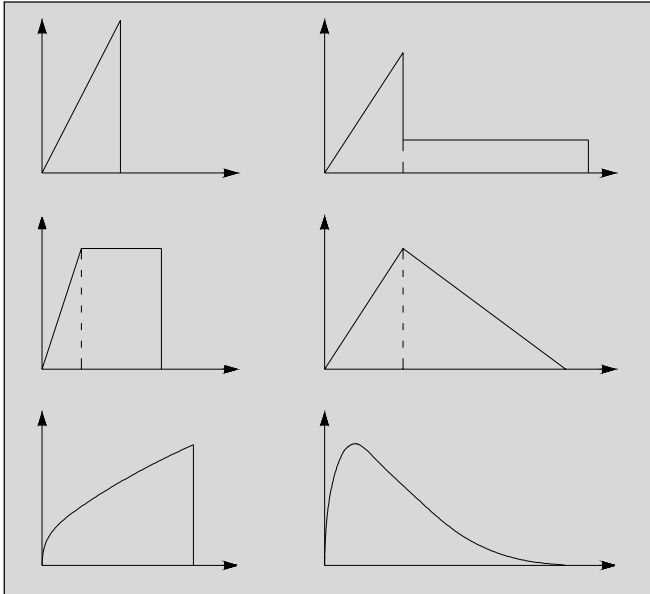
Entkopplung, das heißt Verbundbruch tritt ein, wenn die Grenzverschiebung  $s_{10}$  erreicht wird. Bei lastgesteuerten Versuchen liegt die Kraft, die zur Entkopplung des Elementes  $i$  geführt hat, nun am Element  $i+1$  an, welches daraufhin ebenfalls entkoppelt wird.

Daraus folgt, dass die maximale Verbundbruchkraft nicht von der Verankerungslänge, sondern einschließlich von der Größe der Bruchenergie abhängig ist.

Diese wird somit durch den Flächeninhalt der  $\tau$ -s-Beziehung und nicht durch deren Form bestimmt.

Diese Aussage wurde anhand von Untersuchungen an sechs verschiedenen, flächengleichen Verbundansätzen verifiziert, **Bild 5**. Dabei ergab sich für alle untersuchten Ansätze die selbe Verbundbruchkraft.

Aufgrund dieser Tatsache verwendete *Holzenkämpfer* zur Erstellung des Rechenmodells einen einfacheren fiktiven linearen Ansatz, wobei die Größen  $\tau_{11}$  und  $G_F$  beibehalten wurden. Auf diese Weise war eine geschlossene Lösung der DGL des verschieblichen Verbundes möglich, was zu handhabbaren Gleichungen führte.

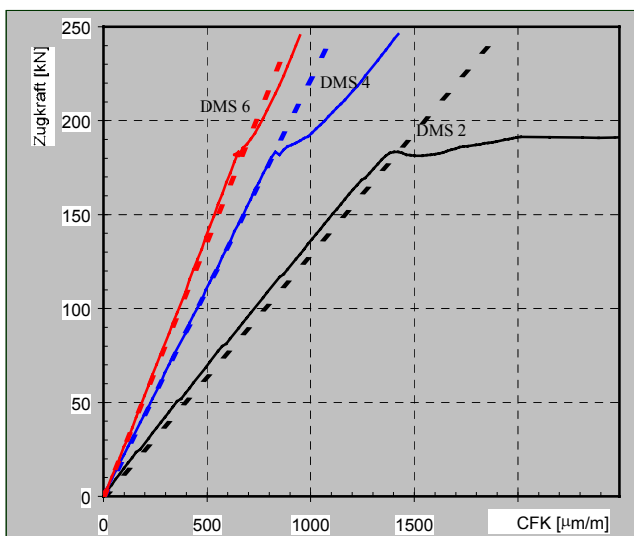


**Bild 5** – flächengleiche Verbundansätze

Die Lösungen für die DGL sind prinzipiell für den Druck-Zug- (DZK) und den Zug-Zug-Körper (ZZK) zu unterscheiden. Da die in den durchgeführten Versuchen verwendeten Prüflinge als DZK und ZZK zu klassifizieren sind, wurden auch hierfür die Lösungen hergeleitet und mit den Ergebnissen der beiden klassischen Varianten verglichen.

Es wird ersichtlich, dass sich der in den Versuchen verwendete Prüfkörper wie ein Zug-Zug-Körper mit großer Verankerungslänge verhält.

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich zwischen rechnerischem und gemessenem Dehnungsverlauf exemplarisch für die CFK-Lamelle, **Bild 6**.



**Bild 6** – Dehnung gemessen (-) und berechnet (- -)

Eine gute Übereinstimmung der Graphen liegt bis zum Erreichen der Stahlstreckgrenze vor, danach differieren die Werte deutlich.

Gründe hierfür liegen in der Beschreibung der Werkstoffkennlinien des verwendeten Klebstoffes und des Stahls.

#### 4 Ingenieurmodell

Zur Erstellung eines Ingenieurmodells für den Verbund Stahl und CFK wurden vorhandene Theorien analysiert und auf eventuelle Übertragbarkeit geprüft.

Analog der beschriebenen Vorgehensweise wurde in Anlehnung an existierende Modelle zur Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens verstärkter Stahlbetonbauteile ein grobes Ingenieurmodell zur Beschreibung der Tragfähigkeit eines Stahl-CFK-Verbundes entwickelt und anhand durchgeführter Versuche kalibriert werden. Zusammenfassend konnten folgende grobe Bemessungsformeln aufgestellt werden:

**Maximale Verbundbruchkraft  $T_{u,max}$ :**

$$T_{u,max} = 0,51 \cdot b_l \cdot \sqrt{\tau_{l1} E_l t_l}$$

**Mindestverankerungslänge  $l_{t,max}$ :**

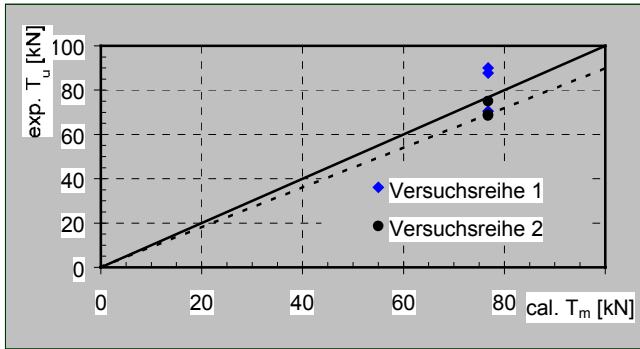
$$l_{t,max} = 1,14 \cdot \sqrt{\frac{E_l t_l}{\tau_{l1}}}$$

**Symbolik:**

- $b_l$  Lamellenbreite [mm]
- $t_l$  Lamellendicke [mm]
- $E$  Lamellenelastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>]
- $\tau_{l1}$  max. Schubspannung des Klebstoffes [N/mm<sup>2</sup>]

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die experimentell gemessenen Verbundkräfte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den errechneten Verbundkräften auf Grundlage des entwickelten Ingenieurmodells, **Bild 7**.



**Bild 7** – Vergleich Verbundkräfte

Die durchgeführten Grundlagenuntersuchungen zeigen, dass eine Verstärkung von Stahl mit CFK-Lamellen möglich und sinnvoll ist, sowohl im Hinblick auf eine Tragfähigkeitssteigerung als auch eine Erhöhung der Ermüdungssicherheit. Die durchgeführten Untersuchungen ebnen einen Weg zu weiterführenden Untersuchungen, welche dazu beitragen, die Benachteiligung des Stahls im Vergleich zu anderen Bauweisen aufzuheben.

Ein Ziel kann es hierbei sein, kostengünstige und zeitsparende Alternativen für bevorstehende Sanierungsarbeiten etlicher Stahlbrücken und –bauten aufzuzeigen.

Das auf Basis von Versuchen ermittelte Grobmodell dient ausschließlich zur Ermittlung der maximalen Verbundbruchkraft.

Es gilt, das entwickelte Bemessungsmodell anhand fortführender theoretischer sowie praktischer Betrachtungen im Rahmen eines Forschungsprojektes der Studiengesellschaft Stahlanwendung zu vervollständigen, um Aussagen zum Verbundkraftverlauf des CFK-Stahlverbundes zu treffen. Es sollen Basisuntersuchungen unter Berücksichtigung vorhandener Biegebeanspruchungen im Verbund durchgeführt sowie (neben statischer Beanspruchung der Verbundträger) dynamische Belastungen untersucht werden.

#### Literatur

- Bassetti A., Colombi P., Nussbaumer A.: Finite element analysis of steel members repaired by prestressed composite patch. in International

Conference on Steel Structures of the 2000's, 2000, S. 375-380

- Holzenkämpfer P.: Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile. Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1993
- Meier H.: Einführung in das Gebiet des Klebens. EMPA Düsseldorf, 12/1991
- Meier, U.: Brückensanierungen mit Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen. in Material und Technik, Nr.4 1987, S.125-128
- Meier U.: Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. in Construction and Building Materials, Vol.9, No.6 1995, S.341-351