

## **Biegezugverstärkung mit CFK Lamellen**

Neues Bemessungsmodell nach EC 2 und DIN 1045-1

Peter Onken, Wiebke vom Berg, bow ingenieure, Braunschweig

Geklebte CFK Lamellen zur Biegezugverstärkung werden inzwischen weltweit angewandt. In Deutschland erfolgt die Anwendung auf der Grundlage der DIBt-Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen mit CFK Lamellen. Die Bemessung erfolgt zur Zeit noch nach dem globalen Sicherheitskonzept der DIN 1045 (07/88).

Im folgenden Beitrag wird ein neues Bemessungskonzept für EC 2 und DIN 1045-1 vorgestellt, das auf dem in der internationalen Normenwelt weit verbreiteten Prinzip der Teilsicherheitsbeiwerte beruht. Erläutert werden die Berechnungsgrundlagen sowohl für die Biege- und Querkraftbemessung als auch die notwendigen Nachweise für die Verankerung der Lamellen. Das neue Berechnungsmodell wird mit dem derzeitigen Regelwerk nach DIN 1045 (07/88) verglichen. Anhand von Beispielen werden die Grundzüge einer EDV-gestützten Berechnung dargestellt.

## **Flexural Strengthening with CFRP Laminates**

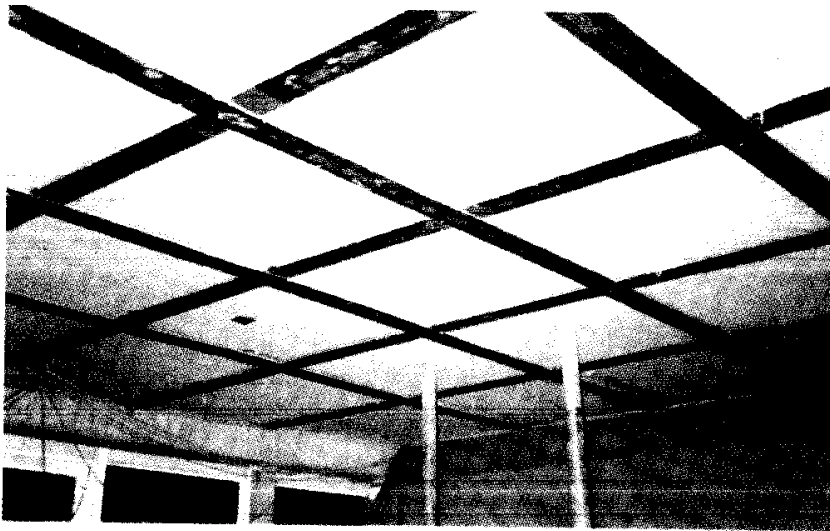
New Design Program according to EC 2 and DIN 1045-1

The flexural strengthening of concrete structures using CFRP laminates is spread worldwide. Whereas application in Germany is ruled by the DIBt-guideline for the strengthening of concrete structures by CFRP laminates, current design is still based on the global safety concept of DIN 1045 (07/88). A new design concept for EC 2 and DIN 1045-1 according to the internationally well-known principle of partial safety factors is presented in this paper. The analytical basis for the design of flexural and shear strengthening is discussed as well as the necessary verification of the bonding of CFRP laminates. The new design concept is compared with the current regulations of DIN 1045 (07/88). Furthermore, the principles of computer aided calculations are outlined.

## 1 Problemstellung

Mit der Einführung der DIN 1045-1 sind für die tägliche Bemessungspraxis im Stahlbeton- und Spannbetonbau gravierende Änderungen zu erwarten. Gegenüber der bisherigen DIN 1045 aus dem Jahre 1988 wird sich nicht nur der Anwendungsbereich auf Spannbeton, Leichtbeton und hochfesten Beton erweitern, auch das Sicherheitskonzept wird sich zukünftig grundsätzlich ändern. Wie bei allen zeitgemäßen Regelwerken wird das Sicherheitskonzept der DIN 1045-1 auf dem Prinzip der Teilsicherheitsbeiwerte beruhen. Dies hat zur Folge, daß die in der Praxis verwendeten Bemessungsverfahren und -programme an das neue Normenkonzept angepaßt werden müssen. Das gleiche gilt für zahlreiche allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen, die derzeit noch auf die bisherige DIN 1045 (07/88) aufbauen.

Für die Verstärkung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit geklebten CFK Lamellen (Bild 1) sind in Deutschland Produkte von drei verschiedenen Herstellern bauaufsichtlich zugelassen (s. [1]). Die in den jeweiligen Zulassungen enthaltenen Bemessungsgrundlagen basieren zur Zeit noch auf dem globalen Sicherheitskonzept der DIN 1045 (07/88). Mit Einführung der neuen DIN 1045-1 stehen diese Zulassungen und die damit verbundene Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen mit CFK Lamellen [3] vor einer grundlegenden Überarbeitung. Die Anpassung der Zulassungen und der Richtlinie wird eine der wesentlichen Aufgaben sein, die auf den neuen Sachverständigenausschuß des DIBt für Konstruktions- und Bemessungsfragen künftig zukommen werden.



**Bild 1** Verstärkung einer Deckenplatte mit CFK Lamellen

**Fig. 1** Strengthening of a ceiling board with CFRP laminates

## 2 Entwicklung von Bemessungsverfahren

Bedingt durch intensive Forschungsarbeiten wurden in Deutschland bereits frühzeitig Berechnungsmodelle für die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit geklebter Bewehrung entwickelt. Einen guten Überblick über die Anwendung und Bemessung gibt der Aufsatz im Betonkalender 1996 von Rostásy et al. [4]. Durch das in Deutschland obligatorische Zulassungsverfahren haben Verstärkungsmaßnahmen mit CFK Lamellen und damit auch die Berechnungsmodelle schnell den Weg in die Praxis gefunden. Inzwischen ist die Verstärkung mit CFK Lamellen für viele Ingenieure ein gängiges Verfahren geworden [1], [2].

Auch im Ausland, insbesondere in den USA und Japan, wurden CFK Lamellen und CFK Sheets bereits frühzeitig eingesetzt, vor allem zur Verbesserung der Duktilität von Stahlbetonbauteilen gegenüber Beanspruchungen im Erdbebenfall. Jedoch wurden diese Verstärkungsmaßnahmen in vielen Fällen mangels geeigneter Bemessungsmodelle nicht durch rechnerische Untersuchungen gestützt.

Seit einiger Zeit gibt es auch im Ausland Bestrebungen, die Anwendung von CFK Materialien zur Verstärkung von Betonbauteilen zu regeln. In Frankreich wurden bereits erste Systeme zugelassen; in Großbritannien und Korea laufen derzeit Zulassungsverfahren. In den USA arbeitet das ACI Committee 440 an einer Richtlinie zur Bemessung und Konstruktion von Verstärkung von Betonbauteilen mit FRP (**F**iber **R**einforced **P**olymer) [5]. Parallel dazu wird gegenwärtig die Entwicklung von Bemessungshilfen und -programmen forciert, die auf die jeweilige nationale Vorschrift aufbauen. Grundlage ist in allen Fällen ein Nachweis im Grenz-zustand der Tragfähigkeit analog zur Nachweisbedingung im EC 2:

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

$S_d$  kennzeichnet dabei den Bemessungswert der aufzunehmenden Schnittgröße und  $R_d$  den Bemessungswert des Tragwiderstands, z.B. das aufnehmbare Biegemoment des betreffenden Querschnitts. Die Ermittlung der Bemessungswerte erfolgt unter Berücksichtigung der jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen und für die Baustoffeigenschaften. Tabelle 1 gibt einen Überblick über verschiedene Normen.

Nachfolgend soll ein Bemessungsmodell für CFK Lamellen nach EC 2 bzw. DIN 1045-1 vorgestellt werden, das in den Grundzügen auf die in Deutschland zur Zeit gültigen Zulassungen und Richtlinie [3] aufbaut. Das neue Modell wird mit dem derzeitigen Regelwerk nach der DIN 1045 (07/88) verglichen.

Norm	Einwirkungen		Tragwiderstand	
	Eigengewicht	Verkehrslasten	Beton	Betonstahl
	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\gamma_C$	$\gamma_S$
EC 2 / DIN 1045-1	1,35	1,5	1,5	1,15
BS 8110	1,4	1,6	1,5	1,15
BAEL 91	1,35	1,5	1,5	1,15
ACI 318	1,4	1,7	1 / 0,9	
KCI	1,4	1,7	1 / 0,85	

**Tabelle 1** Teilsicherheitsbeiwerte für Eurocode 2 (EC 2), British Standard (BS), Norme Française (BAEL), American Concrete Institute (ACI) und Korean Concrete Institute (KCI)

**Table 1** Partial safety factors for Eurocode 2 (EC 2), British Standard (BS), Norme Française (BAEL), American Concrete Institute (ACI) and Korean Concrete Institute (KCI)

### 3 Berechnungsgrundlagen nach der Richtlinie und DIN 1045 (07/88)

Die Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen mit CFK Lamellen fordert im Rahmen der statischen Nachweise, daß die rechnerische Tragfähigkeit des verstärkten Bauteils nicht größer als die zweifache Tragfähigkeit des unverstärkten Bauteils sein darf. Ausgedrückt wird dies durch den Biegeverstärkungsgrad  $\eta_B$ :

$$\eta_{B,DIN} = \frac{M_{uV}}{M_{u0}} \leq 2 \quad (2)$$

Mit  $M_{u0}$  wird dabei das rechnerische Bruchmoment des unverstärkten Querschnitts und mit  $M_{uV}$  das des verstärkten Querschnitts bezeichnet. Strenggenommen ist die Bezeichnung für das rechnerische Bruchmoment des verstärkten Bauteils  $M_{uV}$  nicht ganz richtig, da es sich hierbei nicht um das aufnehmbare Moment im verstärkten Zustand (Widerstandsseite), sondern um das zukünftig aufzunehmende Biegemoment im rechnerischen Bruchzustand (Einwirkungsseite) handelt. Eine Überbemessung ist durchaus zulässig, jedoch darf die rechnerische Biegebeanspruchung nicht mehr als das Zweifache des Bruchmoments des unverstärkten Bauteils erreichen.

Zur Bemessung der CFK Lamellen findet man in der Richtlinie keine konkreten Angaben. Es wird lediglich darauf verwiesen, daß im rechnerischen Bruchzustand die volle Mitwirkung der vorhandenen Bewehrung und der CFK Lamellen innerhalb der Grenzdehnungen angenommen werden darf. Ansonsten gelten die bekannten mechanischen Regeln der klassischen Stahlbetonbemessung:

- Bei der Biegebemessung wird von einem ebenen Dehnungszustand ausgegangen (Bernoulli-Hypothese).
- Ein Mitwirken des Betons auf Zug wird nicht berücksichtigt. Alle zum inneren Gleichgewicht erforderlichen Zugkräfte werden durch die innere Bewehrung bzw. über die zusätzlichen CFK Lamellen übertragen.
- Es wird vollständiger unverschieblicher Verbund vorausgesetzt. Alle Querschnittselemente, die in Fasern mit gleichem Abstand von der Dehnungsnulldlinie liegen, erfahren die gleiche Dehnung.

In Bild 2 sind die Bedingungen für die Grenzdehnung  $\varepsilon_l$  zur Ermittlung der Bruchschnittgrößen angegeben. Üblicherweise beträgt die Grenzdehnung etwa 50 % der mittleren Bruchdehnung in Faserrichtung. Die beiden letztgenannten Bedingungen dienen indirekt der Kontrolle der Innenbewehrung. Sie sollen ein Fließen des Bewehrungsstahls im Gebrauchszustand verhindern, da die Gebrauchsdehnungen im Rahmen einer Handrechnung nur schwer kontrollierbar sind. Die Bedingungen werden ohnehin nur bei einer Innenbewehrung mit geringer Streckgrenze maßgebend (z.B. BSt I).

### Grenzdehnung für CFK Lamellen

In Abhängigkeit vom Lamellentyp und E-Modul in Faserrichtung:

a)  $\text{grenz } \varepsilon_l = 0,65 - 0,85 \text{ ‰}$

Weiterhin gilt für Stahlbetonbauteile:

b)  $\text{grenz } \varepsilon_l = 5 \frac{f_{syk}}{E_s}$

bzw. für  $\eta_B > \gamma$

c)  $\text{grenz } \varepsilon_l = \frac{f_{syk}}{E_s} \cdot \frac{(\eta_B - 1)}{(\eta_B/\gamma - 1)} \cdot (1 - \beta) \kappa_z$

$f_{syk}/E_s$  Dehnung an der Nennstreckgrenze des Betonstahls

$\eta_B$  Biegeverstärkungsgrad

$\gamma$  globaler Sicherheitswert nach DIN 1045 (07/88)

$\beta$  Vordehnungsgrad der Innenbewehrung zum Zeitpunkt der Verstärkung

$\kappa_z$  Verhältnis der inneren Hebelarme von Lamelle und Innenbewehrung.

**Bild 2** Grenzdehnungen für CFK Lamellen gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung

**Fig. 2** Strain limit states for CFRP laminates according to German general approval

In Ermangelung konkreter Bemessungshilfen ist der Tragwerksplaner bei der Ermittlung des erforderlichen Lamellenquerschnitts auf Hinweise in der Literatur angewiesen (z.B. [4]). Inzwischen steht für diese Aufgabe ein leistungsfähiges Bemessungsprogramm zur Verfügung [6].

## 4 Bemessungsmodell nach EC 2 und DIN 1045-1

### 4.1 Definition des Verstärkungsgrades

Grundlage für Berechnungen nach EC 2 und letztlich auch für alle anderen Normen in Tabelle 1 ist, wie bereits in Kapitel 2 dargelegt, die Nachweisführung im  $S \leq R$  – Format nach Gl. 1. Angewendet auf die Bemessung von CFK Lamellen bedeutet dies, daß der Bemessungswert der Schnittgröße im verstärkten Zustand  $M_{Sdf}$  dem Bemessungswert des Tragwiderstands  $M_{Rdf}$ , also dem aufnehmbaren Biegemoment des verstärkten Querschnitts, gegenüberzustellen ist. Der Index  $f$  kennzeichnet den Zustand nach dem Verstärken (mit FRP). Beide Größen sind als Bemessungswerte (design) mit den jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerten nach Tabelle 1 behaftet.

Die Definition einer Bruchschnittgröße ist im Bemessungskonzept des Eurocode 2 nicht vorgesehen. Um die Verstärkungsbedingung nach der Richtlinie [3] in Gl. 2 sinngemäß anwenden zu können, muß die Formel für den Biegeverstärkungsgrad  $\eta_B$  angepaßt werden:

$$\eta_{B,EC} = \frac{M_{Sdf}}{M_{Rd0}} \leq 2 . \quad (3)$$

Für  $M_{Sdf}$  gelten dabei die Kombinationsregeln für Einwirkungen nach EC 2 im Grenzzustand der Tragfähigkeit;  $M_{Rd0}$  ist das aufnehmbare Bemessungsmoment des unverstärkten Querschnitts. Ein Vergleich des Verstärkungsgrades nach Gl. 3 mit der derzeitigen Definition in der Richtlinie (Gl. 2) zeigt, daß der Unterschied gering ist. Je nach Verkehrslastanteil beträgt die Abweichung bis zu 6 %.

Eine Begrenzung des Verstärkungsgrades gibt es nur in der deutschen Richtlinie [3]. In ausländischen Vorschriften oder Richtlinien für das Verstärken von Betonbauteilen mit CFK Lamellen wurde bisher auf eine entsprechende Limitierung verzichtet. Da bisher kaum Erfahrungen mit hochverstärkten Bauteilen gemacht wurden und ein starker Beanspruchungsgrad das Verbundverhalten von CFK Lamellen z.B. durch zunehmende Betonrißbildung ungünstig beeinflussen kann, empfehlen einige Hersteller und Fachleute auch in anderen Ländern eine Begrenzung des Verstärkungsgrades.

Das ACI Committee 440 verfolgt bei der Ausarbeitung der neuen Richtlinie für die Verstärkung von Betonbauteilen mit FRP eine etwas andere Philosophie. Danach sollen biegebeanspruchte Stahlbetonbauteile auch nach dem Ausfall der Lamellen gegenüber der Gebrauchslast im verstärkten Zustand (unfactored loads) noch eine minimale Tragsicherheit ( $\gamma > 1,0$ ) aufweisen. In diesem Fall gilt:

$$\eta_{B,k} = \frac{M_{Rk0}}{M_{Skf}} > 1,0 . \quad (4)$$

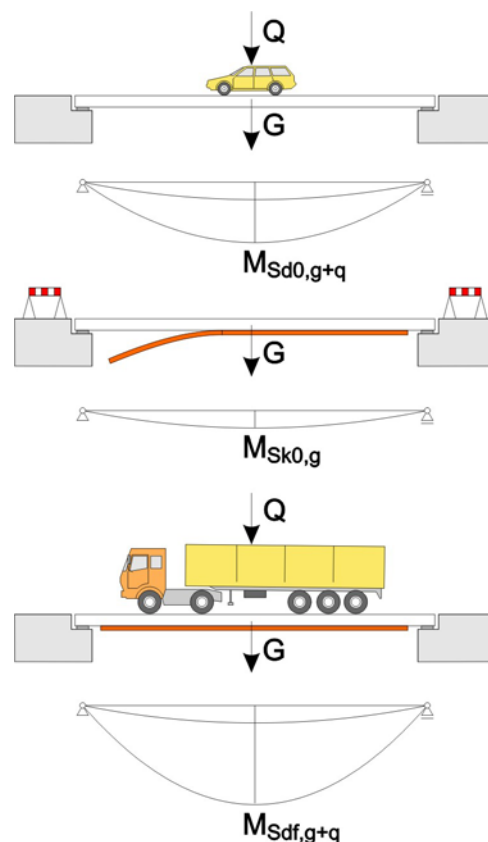
Der Index  $k$  in der Formel verdeutlicht, daß es sich jeweils um charakteristische Werte handelt. Im Vergleich zur Beschränkung nach der deutschen Richtlinie ist das Gefährdungsbild „Ausfall der Lamellen“ z.B. durch Brandeinwirkung oder mechanische Schädigung in den meisten Fällen sogar restriktiver. In ähnlicher Weise wird der Biegeverstärkungsgrad seit kurzem auch in den koreanischen und französischen Zulassungen begrenzt.

## 4.2 Ermittlung der Biegebeanspruchung

Analog zur Neubemessung eines Querschnitts muß die Beanspruchung des zu verstärkenden Stahlbetonbauteils im Vorfeld einer Bemessung ermittelt werden. Der einfachste Weg ist die Einsichtnahme in vorhandene Bestandsunterlagen eines Bauwerks, wie z.B. statische Berechnungen, Positionspläne etc. Sofern diese Möglichkeit nicht besteht, müssen Bauteilgeometrie, statische Systeme und Lasten durch Aufmaß erfaßt und der Biegemomentenverlauf des zu verstärkenden Bauteils unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Lasteinwirkungen rechnerisch ermittelt werden.

Dabei ist zu beachten, unter welcher Beanspruchung das vorhandene Stahlbetonbauteil verstärkt werden soll bzw. welches eingeprägte Biegemoment zum Zeitpunkt des Klebens der CFK Lamellen auf das zu verstärkende Betonbauteil wirkt. In der Regel handelt es sich hierbei um das Eigengewicht des Bauteils. Diese Angabe dient zur Bestimmung des vorhandenen Vordehnungszustandes. Die Ermittlung des Biegemomentenverlaufs für den Vordehnungszustand erfolgt unter Gebrauchslasten.

Im weiteren ist der Bemessungswert der Biegebeanspruchung  $M_{Sdf}$  für zukünftig zu erwartende Einwirkungen unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 1 zu ermitteln. Bild 3 zeigt schematisch die Vorgehensweise bei der Schnittgrößenermittlung.



**Bild 3** Beanspruchung vor, während und nach der Verstärkung mit CFK Lamellen

**Fig. 3** Load cases before, during and after strengthening with CFRP laminates

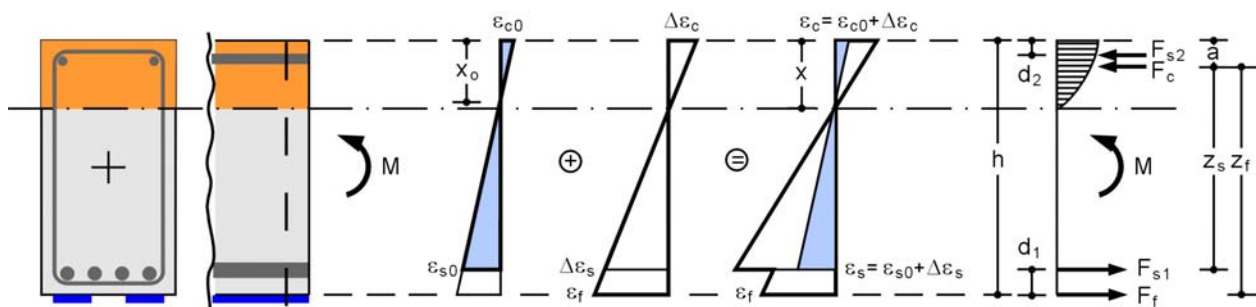
### 4.3 Bemessung

Zur Überprüfung des zulässigen Biegeverstärkungsgrades  $\eta_B \leq 2$  muß zunächst das aufnehmbare Bemessungsmoment  $M_{Rd0}$  des unverstärkten Stahlbetonquerschnitts unter Berücksichtigung der vorhandenen Querschnittsgeometrie, Bewehrung und Betongüte berechnet werden. Bei der Berechnung nach EC 2 bzw. DIN 1045-1 sind die Teilsicherheitsbeiwerte für die Baustoffeigenschaften nach Tabelle 1 zu verwenden. Hierfür stehen in der Praxis entsprechende Bemessungshilfen und -programme zur Verfügung. Sofern die notwendigen Angaben nicht aus Bestandsunterlagen ermittelt werden können, muß eine Zustandserfassung vor Ort durchgeführt werden. Unter Umständen ist sogar eine Probenentnahme zur Überprüfung der Betondruckfestigkeit gemäß DIN 1048 erforderlich.

Rechentechnisch aufwendiger ist die Ermittlung des erforderlichen Lamellenquerschnitts für den verstärkten Zustand. Einerseits muß der zugehörige Vordehnungszustand berücksichtigt werden und andererseits wird das Kräftegleichgewicht zur Berechnung des Tragwiderstandes um die zusätzliche Kraftkomponente der angeklebten CFK Lamellen erweitert. Zwar werden in der Literatur Möglichkeiten zur Berechnung der Biegetragfähigkeit im verstärkten Zustand aufgezeigt [4], jedoch sind entsprechende Nachweise im Rahmen einer Handrechnung eher mühsam. Außerdem basieren solche Bemessungsformeln stets auf Näherungen, die zwar im Stahlbetonbau grundsätzlich zulässig sind, wie z.B. der Ansatz eines geschätzten Hebelarms für die inneren Kräfte, die aber im Einzelfall zu einer Unterbemessung des Lamellenquerschnitts führen können. Insbesondere bei Querschnitten, die im Druckbereich bereits stark ausgenutzt sind, kann dies zu Ungenauigkeiten führen. Auch ein mögliches Fließen der inneren Bewehrung im Gebrauchszustand ist in dieser Form kaum kontrollierbar.

Sinnvoller ist eine Bemessung mit Hilfe der EDV. Die Grundzüge eines solchen Bemessungsverfahrens sollen daher nachfolgend kurz skizziert werden.

Zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit eines verstärkten Querschnitts wird ein Dehnungszustand gesucht, bei dem die inneren und äußeren Kräfte des Stahlbetonbauteils im Gleichgewicht stehen. Bild 4 zeigt die an einem aufgeschnittenen Stahlbetonquerschnitt angreifenden inneren Kräfte. Bei der Berechnung werden die Dehnungszustände aus der eingepprägten Vordehnung  $\varepsilon_0$  und der Zusatzbeanspruchung im verstärkten Zustand  $\Delta\varepsilon$  überlagert.



**Bild 4** Überlagerung der Dehnungszustände und Gleichgewicht der inneren und äußeren Kräfte

**Fig. 4** Superposition of initial strain and additional strain and equilibrium of internal and external forces



Die Ermittlung des Tragwiderstandes des unverstärkten Querschnitts  $M_{Rd0}$ , des eingepprägten Vordehnungszustandes  $\varepsilon_0$  sowie die Berechnung des erforderlichen Lamellenquerschnittes  $erf A_f$  und des Bemessungsmomentes  $M_{Rdf}$  für den verstärkten Zustand ergibt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen  $\Sigma H = 0$  und  $\Sigma M = 0$  unter Berücksichtigung der jeweiligen Materialgesetze.

innere Kräfte

*Stahl*       $F_s = E_s \cdot A_s \cdot \varepsilon_s \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \cdot A_s$       (5)

*CFK*       $F_f = E_f \cdot A_f \cdot \varepsilon_f$        $\varepsilon_f \leq \varepsilon_{f,limit}$       (6)

*Beton*       $F_c = \alpha_R \cdot b \cdot x \cdot \frac{\alpha \cdot f_{ck}}{\gamma_c}$       ( $\alpha_R$  : Völligkeitsbeiwert)      (7)

$\Sigma H = 0$

$F_{s2} + F_c - F_{s1} - F_f = 0$       (8)

$\Sigma M = 0$

$F_{s2} \cdot d_2 + F_c \cdot a - F_{s1} (h - d_1) - F_f \cdot h = 0$       (9)

Die Lösung der Gleichgewichtsbedingungen Gl. 8 und 9 erfolgt iterativ durch Variation der Dehnungen, wobei ein Ebenbleiben des Querschnitts vorausgesetzt wird (Bernoulli-Hypothese). Die Gleichgewichtsbedingungen werden beim Durchlaufen der verschiedenen Dehnungsverhältnisse überprüft.

*unverstärkter Querschnitt:*

$0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}$        $\rightarrow$        $M_{Rd0}$  wird iterativ ermittelt  
 $0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$

*Vordehnungszustand:*

$M_{Sk0}$  ist bekannt       $\rightarrow$        $\varepsilon_{s0}$  und  $\varepsilon_{c0}$  werden iterativ ermittelt

*verstärkter Querschnitt:*

$M_{Sdf}$  ist bekannt       $\rightarrow$        $erf. A_f$  und  $M_{Rdf}$  werden iterativ ermittelt  
 $0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}$   
 $0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$   
 $0 < \varepsilon_f \leq \varepsilon_{f,limit}$

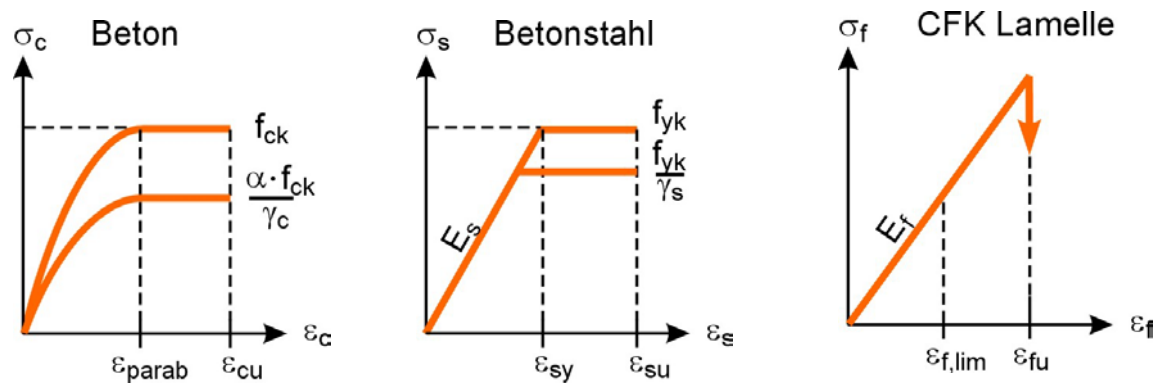
Da die Dehnungen in einem linearen Zusammenhang stehen, liefert das Gleichgewichtsproblem stets eine eindeutige Lösung, vorausgesetzt die gesuchte Lösung liegt innerhalb der Grenzdehnungen.

#### 4.4 Spannungsdehnungslinien

Die Ermittlung der inneren Kräfte erfolgt mit Hilfe der in EC 2 angegebenen Spannungsdehnungslinien für Beton und Betonstahl. Dabei wird für den Beton das Parabel-Rechteck-Diagramm verwendet, wobei der Grenzwert für die maximale Stauchung am gedrückten Rand wie in DIN 1045  $\varepsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$  beträgt (Bild 5a). Für den Betonstahl wird die idealisierte bilineare Arbeitslinie zugrunde gelegt (Bild 5b). Die Bemessungswerte – Index  $d$  – ergeben sich nach Division der charakteristischen Festigkeiten durch den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwert.

Im Gegensatz zu Beton und Betonstahl wird für die CFK Lamelle linear-elastisches Werkstoffverhalten vorausgesetzt (Bild 5c). Der Ansatz des Elastizitätsmoduls erfolgt in Abhängigkeit vom Lamellentyp. Er ist der jeweiligen Zulassung zu entnehmen. Die Bruchdehnung der Lamelle spielt für den Grenzzustand der Tragfähigkeit eines verstärkten Stahlbetonbauteils keine Rolle. Bereits weit vor Erreichen der Bruchdehnung werden in der Regel andere Versagensmechanismen maßgebend. Zur Ermittlung des Bemessungsmomentes im verstärkten Zustand wird daher die Lamellendehnung begrenzt (vergl. Bild 2). Die Einführung eines weiteren Teilsicherheitsbeiwertes ( $\gamma_f > 1,0$ ) für die CFK Lamelle macht somit wenig Sinn.

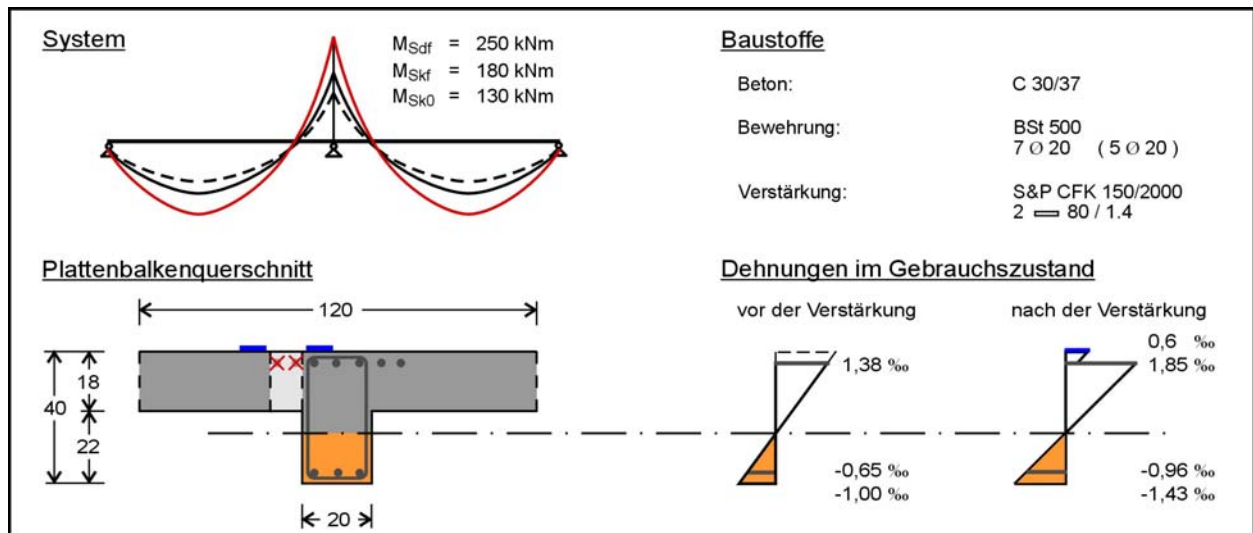
**Bild 5** Rechnerische Spannungsdehnungslinie für Beton, Betonstahl und CFK Lamelle



**Fig. 5** Design stress-strain diagram for concrete, reinforcing steel and CFRP laminates

#### 4.5 Bemessungsbeispiel und ergänzende Hinweise

In [1] und [2] wurden bereits die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von CFK Lamellen dargestellt. Daß CFK Lamellen nicht nur für Verstärkungsmaßnahmen, sondern auch für die Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen geeignet sind, zeigt das Beispiel in Bild 6.



**Bild 6** Bemessungsbeispiel: Ersatz für zerstörte Bewehrung

**Fig. 6** Design example: replacement of demolished reinforcement

Seitens der Praxis wird häufig die Frage aufgeworfen, ob der Vordehnungszustand bei der Bemessung vernachlässigt werden kann. Im Vergleich zu den Dehnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind die eingepprägten Dehnungen beim Kleben der CFK Lamellen unter Gebrauchslasten gering. Das Beispiel in Bild 6 macht aber deutlich, daß dies keineswegs als Regelfall betrachtet werden kann. Im Stützbereich eines Unterzuges wurde im Deckenanschnitt eine Kernbohrung ausgeführt. Dabei wurde ein Teil der ausgelagerten Stützbewehrung des Plattenbalkenquerschnitts durchtrennt. Durch zwei aufgeklebte CFK Lamellen wurde die ursprüngliche Tragfähigkeit des Unterzuges wieder hergestellt. Die Dehnungsbilder in Bild 6 zeigen, daß durch die reduzierte Bewehrung im Vordehnungszustand bereits ein Großteil des Dehnungspotentials aufgezehrt wurde. Im Vordehnungszustand erreicht die Stauchung des gedrückten Betonrandes bereits 30 % der Grenzdehnung nach EC 2 bzw. DIN 1045, die entsprechende Betonstahldehnung liegt bei etwa 60 % der Streckgrenze. Eine Vernachlässigung des Vordehnungszustandes würde im vorliegenden Fall zu einer Unterbemessung des Querschnitts führen. Fließen der Stahlbewehrung unter Gebrauchslasten wäre die Folge. Das Beispiel macht deutlich, daß die Kontrolle der Dehnungen bei der Bemessung von Stahlbetonbauteilen mit CFK Lamellen besonders wichtig ist. Sinnvoll kann dies nur in Form einer EDV gestützten Bemessung erfolgen.

Ähnlich wie in der klassischen Stahlbetonbemessung führt auch bei Verstärkungsmaßnahmen ein Nachweis nach EC 2 im Vergleich zur DIN 1045 (07/88) zu einer wirtschaftlicheren Bemessung des Lamellenquerschnitts. Vergleichsrechnungen an zahlreichen Beispielen zeigen, daß je nach Bauteil, Betongüte und Beanspruchung die Unterschiede bis zu 25 %

ausmachen können. Ungünstiger kann das Verhältnis werden, wenn die Druckzone bereits weitestgehend ausgenutzt ist. Dann bewirkt der höhere Teilsicherheitsbeiwert für Beton bei ansonsten gleichen Randbedingungen eine Vergrößerung des erforderlichen Lamellenquerschnitts gegenüber der Regelung nach DIN 1045 (07/88).

## 5 Nachweis der Verankerung

### 5.1 Bemessung nach der gültigen Richtlinie

Wie bei einbetonierten Betonstählen erfolgt die Einleitung der Lamellenzugkraft über die Verankerungslänge. Während jedoch Betonstähle mit zunehmender Verankerungslänge bis zur Streckgrenze belastet werden können, wächst die Verbundbruchkraft von CFK Lamellen ab einer bestimmten Verankerungslänge  $l_{t,max}$  nicht mehr an. Basierend auf Versuchen mit Stahlaschen wurde in [7] ein Berechnungsmodell für die Verbundtragfähigkeit von geklebter Bewehrung entwickelt. Inzwischen wird dieses Verbundmodell in modifizierter Form auch auf CFK Lamellen angewendet und ist fester Bestandteil der Bemessungsregeln in der Richtlinie [3]. Nach der Richtlinie ist im Rahmen der Zugkraftdeckung nachzuweisen, daß die im rechnerischen Bruchzustand vorhandene Lamellenzugkraft  $F_l$  kleiner gleich der verankerbaren Verbundbruchkraft  $T_k$  ist. Danach können die Verbundbruchkraft  $T_k$  und die zugehörige Verankerungslänge  $l_t$  über die maximale charakteristische Verbundbruchkraft  $T_{k,max}$  und die zugehörige Verankerungslänge  $l_{t,max}$  ermittelt werden:

$$T_{k,max} = 0,5 \cdot b_l \cdot k_b \cdot k_T \cdot \sqrt{E_l \cdot t_l \cdot f_{ctm}} \quad [\text{N}] \quad (10)$$

$$l_{t,max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_l \cdot t_l}{f_{ctm}}} \quad [\text{mm}] \quad (11)$$

In den Gln. 10 und 11 bedeuten:

- $b_l$  Lamellenbreite in mm
- $t_l$  Lamellendicke in mm
- $E_l$  E\_Modul der CFK Lamelle gemäß Zulassung in N/mm<sup>2</sup>
- $f_{ctm}$  Rechenwert der Oberflächenzugfestigkeit des Betons in N/mm<sup>2</sup>,  
Gültigkeitsbereich:  $1,5 \text{ N/mm}^2 \leq f_{ctm} \leq 3,0 \text{ N/mm}^2$ .
- $k_b$  Breitenbeiwert gemäß Richtlinie [-]
- $k_T$  Temperaturbeiwert zur Berücksichtigung von Temperaturschwankungen, Abminderung auf 0,9 bei Außenbauteilen [-].

Der Faktor 0,5 in Gl. 10 ist materialspezifisch und berücksichtigt u.a. das Verhältnis der charakteristischen Verbundbruchkraft  $T_{k,max}$  zur mittleren Verbundbruchkraft  $T_{m,max}$ . Ähnliches gilt für die Gl. 11. Weitere Hinweise sind der Richtlinie [3] zu entnehmen.

### 5.2 Formulierung nach EC 2 bzw. DIN 1045-1

Obwohl es sich bei der Verbundbruchkraft nach Gl. 10 um einen charakteristischen Wert handelt, dem im Sinne von EC 2 im allgemeinen ein Fraktilwert einer Baustoffeigenschaft zugrunde liegt, darf nach der Richtlinie als Rechenwert für die Oberflächenzugfestigkeit  $f_{ctm}$  der Mittelwert der Grundgesamtheit angesetzt werden. Für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach EC 2 ist der Bemessungswert der Lamellenzugkraft  $F_{fd}$  mit dem

Bemessungswert der Verbundbruchkraft  $F_{bd}$  unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 1 zu vergleichen:

$$F_{fd} \leq F_{bd} \quad (12)$$

Der Index d verdeutlicht, daß es sich bei den Größen in Gl. 12 um Bemessungswerte handelt. Index f kennzeichnet den verstärkten Zustand und b bezieht sich auf den Verbund (**b**ond). Die rechnerische Lamellenzugkraft  $F_{fd}$  wird analog zur Vorgehensweise im klassischen Stahlbetonbau aus der Momentenlinie bestimmt. Für die Widerstandsseite kann die maximale Verbundbruchkraft  $F_{bd,max}$  mit Hilfe des Bemessungswertes für die Oberflächenzugfestigkeit  $f_{ctd}$  ermittelt werden:

$$F_{bd,max} = 0,5 \cdot b_f \cdot k_b \cdot k_T \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctd}} \quad [\text{N}] \quad (13)$$

$$\text{mit } f_{ctd} = \frac{f_{ctm}}{\gamma_c} \quad [\text{N/mm}^2]. \quad (14)$$

Der Unterschied gegenüber der derzeitigen Regelung nach der Richtlinie beträgt je nach Verkehrslastanteil, Oberflächenzugfestigkeit und Wahl der Lamelle maximal 6 %.

Entsprechend läßt sich das Nachweiskonzept unter Beachtung des Bemessungswertes für die Oberflächenzugfestigkeit Gl. 14 auch auf die Berechnung der maximalen Verankerungslänge für die CFK Lamellen nach Gl. 11 anwenden:

$$l_{bd,max} = 0,6 \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{f_{ctd}}} \quad [\text{mm}] \quad (15)$$

Um trotz der Einführung des Bemessungswertes  $f_{ctd}$  in Gl. 15 eine vergleichbare Verankerungslänge wie nach Gl. 11 zu erhalten, muß der Koeffizient vor der Wurzel auf 0,6 reduziert werden. Gegenüber Gl. 11 ergibt sich nach Gl. 15 eine um ca. 5 % größere Verankerungslänge.

## 6 Bemessung für Querkraft

### 6.1 Schubverstärkung nach DIN 1045 (7/88)

Im Rahmen rechnerischer Untersuchungen zur Biegezugverstärkung von Betonbauteilen ist in aller Regel auch die Schubtragfähigkeit des Bauteils zu überprüfen. Daraus erwächst häufig die Notwendigkeit einer Schubverstärkung. Bei Stahlbetonvollplatten ist dagegen nachzuweisen, daß auch im verstärkten Zustand eine Schubbewehrung entbehrlich ist. Sofern dies nicht gelingt, muß gegebenenfalls über eine andere Verstärkungsmethode nachgedacht werden.

Die Nachweise für eine zusätzliche geklebte Schubbewehrung sind in der Richtlinie [3] angegeben. Hinsichtlich der Bemessung gilt die DIN 1045 (7/88). Nach der derzeitigen Regelung darf der Schubbereich 3 nicht angewendet werden. Bei der Querkraftdeckung unterscheidet die Richtlinie zwei Fälle:

Fall 1:

Die durch die innere Schubbewehrung gedeckte Querkraft  $ged Q_{VS}$  reicht nicht aus, um die Querkraft des verstärkten Zustands  $Q_V$  abzudecken. Die Laschenbügel sind für die Differenzkraft zu bemessen:

$$Q_{VI} = Q_V - ged Q_{VS} \quad (16)$$

bzw.

$$Q_{VI} = \frac{\eta_B - 1}{\eta_B} Q_V \quad (17)$$

Die zusätzlich anzuordnenden Schubbügel in Form geklebter Stahlbügel aus Baustahl S 235 müssen die Zugzone umschließen und in der Druckzone verankert werden.

Fall 2:

Die durch die innere Schubbewehrung gedeckte Querkraft  $ged Q_{VS}$  ist auch für den verstärkten Zustand ausreichend dimensioniert:

$$ged Q_{VS} \geq Q_V \quad (18)$$

Die Laschenbügel sind dann für die anteilige Querkraft gemäß Gl. 17 zu bemessen. Liegt die Schubbeanspruchung jedoch unterhalb  $\tau_{012}$  nach DIN 1045 Tab. 13, darf auf eine Verankerung in der Druckzone verzichtet werden. Liegt sie unterhalb des Grenzwertes des Schubbereichs 1 für Platten  $\tau_{011}$ , darf vollständig auf Laschenbügel verzichtet werden.

## 6.2 Querkrafttragfähigkeit und –verstärkung nach EC 2 bzw. DIN 1045-1

Da EC 2 und DIN 1045-1 von einem grundsätzlich anderen Nachweiskonzept für die Querkrafttragfähigkeit ausgehen als die DIN 1045 (7/88), sind die Regeln der Richtlinie [3] nicht ohne weiteres in ein neues Bemessungsmodell überführbar. Nach EC 2 kann die aufzunehmende Querkraft  $V_{Sd}$  entweder allein vom Beton übertragen werden oder gemeinsam mit der Schubbewehrung. Die Querkrafttragfähigkeit wird dabei durch die Bemessungswerte  $V_{Rd1}$  bis  $V_{Rd3}$  beschrieben. Die zugehörigen Formeln nach EC 2 werden als bekannt vorausgesetzt.

$V_{Rd1}$  → aufnehmbare Querkraft ohne Schubbewehrung – die Querkraft wird allein durch den Beton übertragen

$V_{Rd2}$  → maximal aufnehmbare Querkraft – maßgebend für die Querkrafttragfähigkeit ist die Tragfähigkeit der geneigten Druckstreben

$V_{Rd3}$  → aufnehmbare Querkraft mit Schubbewehrung – die Querkraftübertragung erfolgt durch den Beton und durch die Schubbewehrung

Der untere Bemessungswert  $V_{Rd1}$  ist der maßgebende Wert für Platten, die üblicherweise ohne Schubbewehrung ausgeführt werden. Er ist vergleichbar mit dem Grenzwert  $\tau_{011}$  des Schubbereichs 1 für Platten nach DIN 1045 (7/88). Als oberer Grenzwert darf  $V_{Rd2}$  von der aufzunehmenden Querkraft nicht überschritten werden.

Überträgt man die Bedingungen der Richtlinie [3] auf das Nachweiskonzept nach EC 2, so sind hinsichtlich der Querkrafttragfähigkeit eines zu verstärkenden Stahlbetonbauteils folgende Fälle zu unterscheiden:

1. Ist die vorhandene Querkraftbeanspruchung  $V_{Sdf}$  des zu verstärkenden Bauteils geringer als die allein vom Beton übertragbare Querkraft  $V_{Rd1}$ , dann ist keine zusätzliche Schubverstärkung erforderlich. Dieser Fall trifft im allgemeinen für Platten zu.

$$V_{Sdf} \leq V_{Rd1} \quad (19)$$

$V_{Sdf}$  und  $V_{Rd1}$  werden dabei unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 1 ermittelt.

2. Kann die Querkraftbeanspruchung im verstärkten Zustand durch Ansatz der vorhandenen inneren Bügelbewehrung voll aufgenommen werden, ist nur eine konstruktive zusätzliche Schubbewehrung erforderlich.

$$V_{Sdf} \leq V_{Rd3} \quad (20)$$

Die zusätzliche Schubbewehrung wird gemäß Richtlinie für den Querkraftanteil  $\Delta V$  in Abhängigkeit vom Verstärkungsgrad bemessen. Sie verbindet die zusätzliche Zuggurtkraft der Lamellen mit den inneren Fachwerkstreben des Stahlbetonbiegeträgers.

$$\Delta V = \frac{\eta_B - 1}{\eta_B} V_{Sdf} \quad (21)$$

In diesem Fall kann eine Verankerung der zusätzlichen Schubbewehrung in der Biegedruckzone entfallen (s. Bild 7).

3. Übersteigt die Querkraftbeanspruchung im verstärkten Zustand die rechnerische Querkrafttragfähigkeit des vorhandenen Querschnitts, ist die Schubverstärkung für die Differenzkraft zu bemessen.

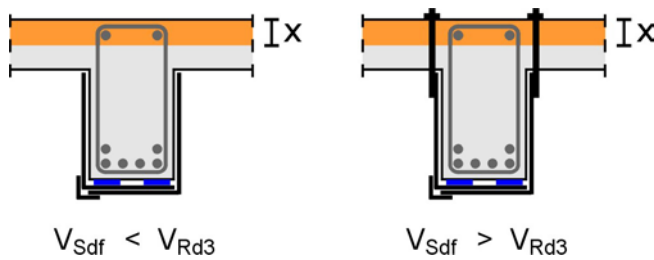
$$V_{Sdf} > V_{Rd3} \quad (22)$$

$$\Delta V = V_{Sdf} - V_{Rd3} \quad (23)$$

Da die zusätzliche Schubbewehrung zum Nachweis der Quertragfähigkeit des verstärkten Querschnitts rechnerisch erforderlich ist, muß sie auch in der Biegedruckzone verankert werden (s. Bild 7).

4. Die maximal aufnehmbare Querkraft  $V_{Rd2}$  liefert letztlich auch für den verstärkten Zustand die Obergrenze der Querkrafttragfähigkeit. Da aber nach der bisherigen Richtlinie der Schubbereich 3 nicht angewendet werden darf, sollte auch bei einer Bemessung nach EC 2 die maximale Schubtragfähigkeit begrenzt werden. Sinnvoll ist eine Reduzierung des Grenzwertes um 50 %. Dies entspricht etwa der Abgrenzung von Schubbereich 3 nach DIN 1045 (7/88).

$$V_{Sdf} \leq 0,5 V_{Rd2} \quad (24)$$



**Bild 7** Verankerung der zusätzlichen Schubbewehrung in Abhängigkeit von der Querkraftbeanspruchung  
**Fig. 7** Application of additional shear reinforcement depending on the design shear force

### 6.3 Bemessung der Schubverstärkung

Als zusätzliche Schubbewehrung nach der Richtlinie sind derzeit nur Stahllaschenbügel aus Baustahl S 235 zugelassen. Im Ausland werden Schubverstärkungen zunehmend auch mit Sheets, einem Gewebe aus hochmoduligen Carbonfasern ausgeführt. Diese unidirektionalen Sheets mit einem E-Modul von ca. 640.000 N/mm<sup>2</sup> sind wesentlich einfacher in der Handhabung und somit trotz des hohen Materialpreises wirtschaftlich einsetzbar.

Die äußere Schubbewehrung in Form von Stahllaschenbügeln oder Sheets wird für die Differenzkraft  $\Delta V$  nach Gl. 21 bzw. 23 bemessen. Da die Innenbewehrung und die zusätzliche äußere Schubbewehrung als parallel geschaltete elastisch-plastische Elemente zu betrachten sind, muß die Dehnungskonformität auch im verstärkten Zustand gewahrt bleiben. In [4] wird daher die Dehnung der Laschenbügel auf  $\varepsilon_{\text{limit}} = 2 \text{ ‰}$  reduziert. Dieser Grenzwert wird auch für die Applikation von Sheets aus Carbonfasern empfohlen. Bei neuerem Bewehrungsstahl ist daher die Spannung der inneren Schubbügel zu begrenzen:

$$\sigma_{sw} = \varepsilon_{\text{limit}} \cdot E_s \leq f_{yd} \quad (25)$$

Die Bemessung der äußeren Laschenbügel oder Sheets erfolgt nach dem Standardverfahren des EC 2

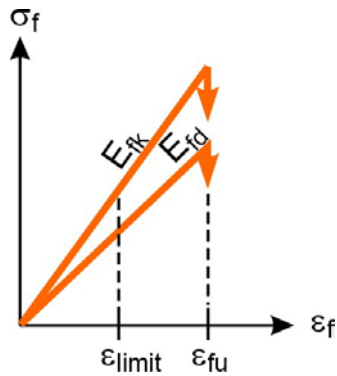
$$A_w = \frac{\Delta V}{0,9 \cdot d_f \cdot \sigma_{wd}} \quad (26)$$

wobei für den inneren Hebelarm näherungsweise  $0,9 \cdot d_f$  (Nutzhöhe der Lamelle) eingesetzt werden darf. Bei Verwendung von Stahllaschenbügeln S 235 gilt  $\sigma_{wd} = f_{yd}$ . Für Carbonsheets ist die aufnehmbare Spannung analog Gl. 25 zu begrenzen:

$$\sigma_{wd} = \varepsilon_{\text{limit}} \cdot E_{fd} \quad (27)$$

Da die Carbonsheets keine Eigensteifigkeit besitzen und bei einer Querkraftverstärkung unter Baustellenbedingungen von Hand verarbeitet werden, ist fraglich, ob der hohe E-Modul von ca. 640.000 N/mm<sup>2</sup> in der Anwendung tatsächlich erreicht wird. Daher sollte der E-Modul in Gl. 27 für Carbonsheets gemäß Bild 8 abgemindert werden. Hierfür wird derzeit ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,2 empfohlen [8].





**Bild 8** Abminderung des E-Moduls von Carbonsheets (Bemessungswert)

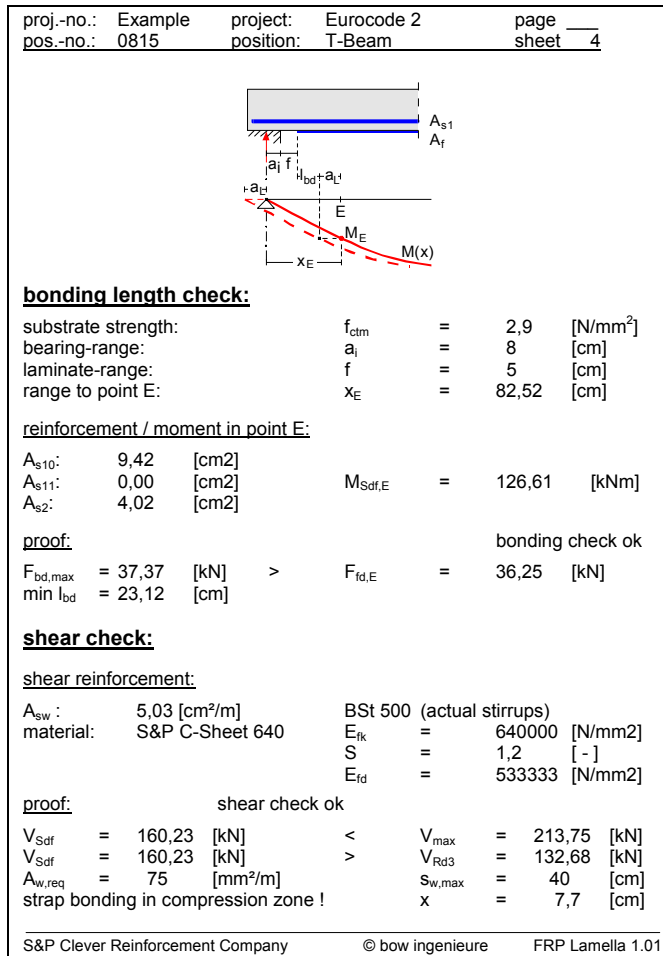
**Fig. 8** Reduction of the modulus of elasticity for carbon sheets (design value)

Bei der Biegeverstärkung von Stahlbetonbalken sind nach der gültigen Richtlinie [3] stets im Verankerungsbereich bzw. am Lamellenende Laschenbügel anzuordnen, auch dann wenn die innere Schubbewehrung für den verstärkten Zustand ausreicht. Schwierigkeiten bereitet häufig das Verankern der Laschenbügel bzw. Carbonsheets in der Biegedruckzone. Hierfür wurden in der Praxis in den letzten Jahren geeignete Verfahren entwickelt. Hinweise dazu findet man in der Literatur [1], [3] bzw. in den Informationsblättern verschiedener Hersteller [z.B. 8].

## 7 Ergänzende Hinweise und Ausblick

Ergänzend zu den Nachweisen in der Richtlinie muß der planende Ingenieur gegebenenfalls auch Rißbreiten und Verformungen des zu verstärkenden Bauteils überprüfen. Nach der aktuellen Richtlinie ist die Kontrolle der Rißbreiten im verstärkten Zustand zur Zeit nicht erforderlich. Dennoch sollte im Einzelfall geprüft werden, ob Dauerhaftigkeit und Gebrauchsfähigkeit des Stahlbetonbauteils gewährleistet sind. Anzumerken bleibt, daß aufgeklebte CFK Lamellen nahezu keinen Einfluß auf die Verformungen eines verstärkten Stahlbetonbauteils haben. Bei Durchbiegungsproblemen sind andere Verstärkungsmaßnahmen wie z.B. Spritzbeton zu bevorzugen.

In mehreren europäischen und außereuropäischen Ländern werden bereits Verstärkungsmaßnahmen mit CFK Materialien auf der Grundlage des hier vorgestellten Bemessungskonzeptes nachgewiesen. Da entsprechende Nachweise vergleichsweise kompliziert und zeitaufwendig sind, werden zunehmend Bemessungsprogramme eingesetzt, die von den Herstellern der CFK Lamellen in der Regel kostenfrei angeboten werden [6]. Seit kurzem steht eine Programmversion zur Verfügung, mit der Verstärkungsmaßnahmen sowohl nach DIN 1045 (7/88) als auch nach DIN 1045-1 bzw. EC 2 bemessen werden können. Bild 9 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus dem Ergebnisprotokoll (englische Fassung).



**Bild 9** Neues Bemessungsprogramm für CFK Lamellen nach EC 2, Auszug aus dem Ergebnisprotokoll

**Fig. 9** New design program for CFRP laminates according to EC 2, extract of the printout

Das Programm wird in ähnlicher Form, angepaßt an die jeweilige Zulassung, Richtlinie und Landesnorm, bereits in 10 Ländern eingesetzt. Es ermöglicht dem Anwender nicht nur eine schnelle und genaue Bemessung des erforderlichen Lamellenquerschnittes, sondern führt darüber hinaus auch alle notwendigen Nachweise. Neben den üblichen Beton- und Betonstahlgüten nach DIN 1045 und EC 2 kann der Anwender eigene Rechenwerte für die Beton- und Betonstahlfestigkeiten definieren. Damit lassen sich auch Ergebnisse von Prüfungen an Bauteilproben berücksichtigen. Programmweiterungen zur Bemessung von Biegezugverstärkungen mit Normalkraftbeanspruchung sind ebenso geplant wie die Berechnung verstärkter Spannbetonbauteile und Druckglieder. Die aktuelle deutschsprachige Version des Bemessungsprogramms kann bei der ispo GmbH, Kriffel, angefordert werden.

## Literatur

- [1] Weidner, J.; Köhler, W.; Krams, J.: Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung. Beton- und Stahlbetonbau 95, 9/2000, S. 537 – 543.
- [2] Hankers, Ch.: Möglichkeiten zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen. Beton- und Stahlbetonbau 95, 9/2000, S. 531 – 536.
- [3] Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstoffaserverstärkten Kunststofflamellen (CFK-Lamellen), Fassung Sept. 1998.
- [4] Rostásy, F. S., Holzenkämpfer, P. und Hankers, C.: Geklebte Bewehrung für die Verstärkung von Betonbauteilen. Beton-Kalender 1996, T.II, Berlin: Ernst & Sohn 1996.
- [5] Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI Committee 440, Revised Version, May 2000.
- [6] Onken, P.; vom Berg, W.; Matzdorff, D.; Nolte, T.: Bemessungsprogramm für CFK-Lamellen. Beton- und Stahlbetonbau 95, 9/2000, S. 551 – 552.
- [7] Holzenkämpfer, P.; Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile. Dissertation TU Braunschweig, 1994.
- [8] Design Guide FRP for S&P Products. S&P Clever Reinforcement Company, Brunnen, Schweiz, Edition June 2000.

## zu den Autoren

Peter Onken

Beratender Ingenieur / VBI  
bow ingenieure  
Breite Straße 15  
D-38100 Braunschweig



Wiebke vom Berg

Leiterin Software-Entwicklung  
bow ingenieure  
Breite Straße 15  
D-38100 Braunschweig

