

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 114 (1996)
Heft: 44

Artikel: Verstärkung durch CFK-Lamellen
Autor: Deuring, Martin / Steiner, Werner
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-79071>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Martin Deuring, Winterthur, und Werner Steiner, Zürich

Verstärkungen durch CFK-Lamellen

Innert weniger Monate werden momentan die Verkaufsflächen eines Warenhauses in Winterthur beträchtlich vergrössert und neu erschlossen. Während der gesamten Umbauarbeiten bleiben die Verkaufsräumlichkeiten geöffnet, so dass rationelle Baumethoden von grosser Bedeutung sind, um den Betrieb möglichst wenig zu tangieren. Dank dem Einsatz von CFK-Lamellen konnten viele Stahlbetondecken sehr effizient verstärkt werden.

Unsere Gebäude werden während ihrer Lebensdauer zunehmend verschiedenen Nutzungen unterworfen, oft verbunden mit Eingriffen in die Tragstrukturen. Führen die veränderten Ansprüche dazu, dass einzelne Bauteile den Anforderungen nicht mehr genügen, sind Verstärkungsmassnahmen oder ein Teilersatz erforderlich.

Heute stehen für das Verstärken und/oder Versteifen von Tragkonstruktionen aus Stahlbeton, Mauerwerk, Stahl und Holz verschiedene Verstärkungsmethoden zur Verfügung. So kann Stahlbeton seit 1967 in zug- und schubbeanspruchten Zonen durch Aufkleben von Stahllamellen nachträglich verstärkt werden. Das Verfahren wurde u.a. durch die Empa Dübendorf in Zusammenarbeit mit verschiedenen Unternehmen entwickelt und erfolgreich in den Markt eingeführt. Heute stehen umfangreiche Bemessungs- und Anwendungshinweise zur Verfügung [1], das Verfahren darf zum «Stand der Technik» gezählt werden.

1987 hat Prof. Urs Meier von der Empa Dübendorf erstmals aufgezeigt, wie geklebte Bewehrungen ebenfalls mit Lamellen aus kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) ausgeführt werden können [2]. Gegenüber den Stahllamellen (in der Regel werden Flachbleche mit der Qualität Fe E 235 eingesetzt) weisen CFK-Lamellen folgende Vorteile auf [3]:

Beliebige Lieferlängen: Die CFK-Lamellen können mit Längen bis zu einigen hundert Metern gerollt transportiert werden. Damit entfallen die bei Stahl sehr schwierig ausführbaren Stossverbindungen, zudem ist das Einbringen bei beschränkten Platzverhältnissen, wie sie beispielsweise bei Brückenkästen oder oft auch in

Hochbauten vorkommen, unproblematisch. Vorteilhaft ist ebenso die Möglichkeit des Einfüdelns bei Installationsleitungen, Mauerwerksdurchbrüchen usw.

Chemische Beständigkeit: Gegenüber den Schadstoffen, die in der Regel bei unseren Bauwerken vorkommen, sind die CFK-Lamellen ohne spezielle Behandlung absolut beständig. Insbesondere entfällt die Gefahr des seitlichen Unterrostens, wie dies bei Stahllamellen zu einem Ausfall führen kann.

Hohe Festigkeit/geringes Gewicht: Die heute eingesetzten CFK-Lamellen weisen Festigkeiten von über 3000 N/mm² auf. Dank dieser hohen Festigkeit und der geringen Rohdichte müssen für die gleiche Aufgabe 40mal weniger Masse zum Einsatzort getragen werden. Wie später aufgezeigt wird, erlaubt das geringe Gewicht zudem eine sehr effiziente Applikation der Lamellen. Im weiteren führt die hohe Festigkeit dazu, dass Lamellen mit sehr geringen Dicken eingesetzt werden können. In Bereichen ohne abgehängte Decken ist dies oft vorteilhaft, da mittels Farbanstrichen oder Abrieben aus Gips die Verstärkungen einfach überarbeitet werden können und diese damit nicht mehr sichtbar sind. Im Hochbau sind oft Lamellenkreuzungen erforderlich. Bei Stahl müssen die Lamellen der einen Richtung eingelassen werden oder der Betonquerschnitt ist mittels Reprofilierungen aufzudoppeln. In einzelnen Anwendungen wurden die Lamellen der zweiten Lage mit einer doppelten Dicke und entsprechenden Ausfräsungen im Bereich der Kreuzungen eingesetzt. Nebst dem zu grossen Materialverbrauch und den zu schweren Lamellen sind dabei auch die Ablenkkkräfte im Bereich der Kreuzungen zu beachten.

Gegenüber dem Stahl weist die CFK-Lamelle unter Last ein verändertes Verhalten auf. Einerseits ist zu berücksichtigen, dass die mechanischen Eigenschaften von der Beanspruchungsrichtung abhängig sind, die Festigkeiten quer zur Längsrichtung sind sehr gering. Andererseits kennt die CFK-Lamelle keine plastische Verformbarkeit, im einachsigen Zugversuch resultiert bis zum Bruch ein nahezu linear-elastisches Verhalten. Bei der Dimensionierung ist diesem Umstand Rechnung zu tragen, obwohl auch ein mit CFK verstärktes

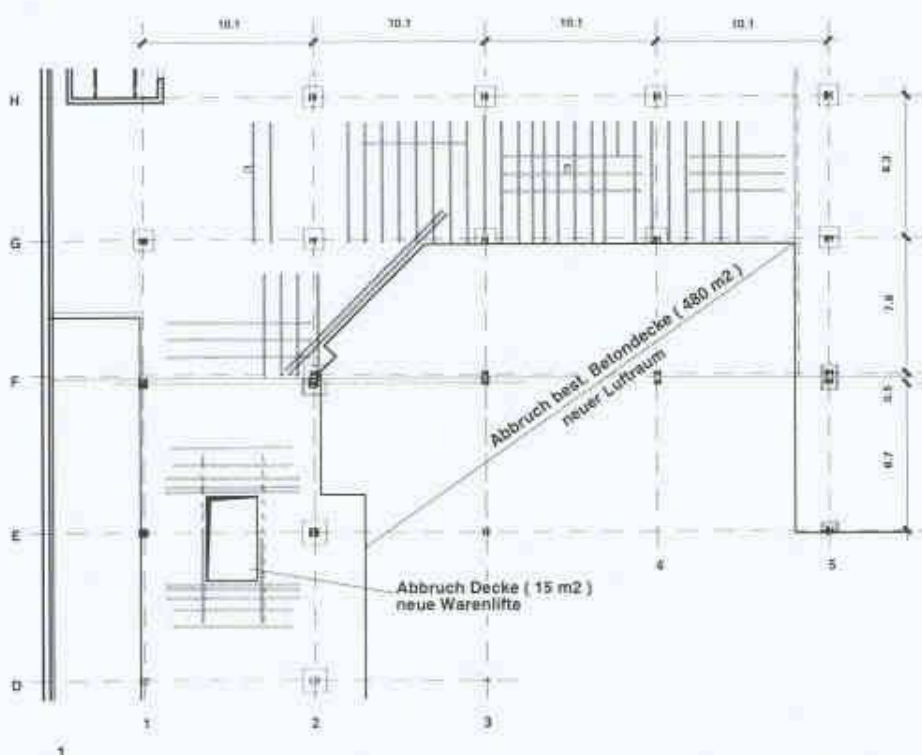
Bauteil eine geringe Duktilität aufweist [4]. Der grösste Biegezugwiderstand wird dann erreicht, wenn ein Lamellenbruch während des Stahlfließens und vor Betonbruch eintritt. Jedoch können auch andere Kombinationen eintreten, die aber zu einem geringeren Biegezugwiderstand führen. Die Bruchart kann insbesondere durch den Lamellenquerschnitt und bei einer gespannt applizierten Lamelle durch den Spanngrad beeinflusst werden.

Ausgangssituation

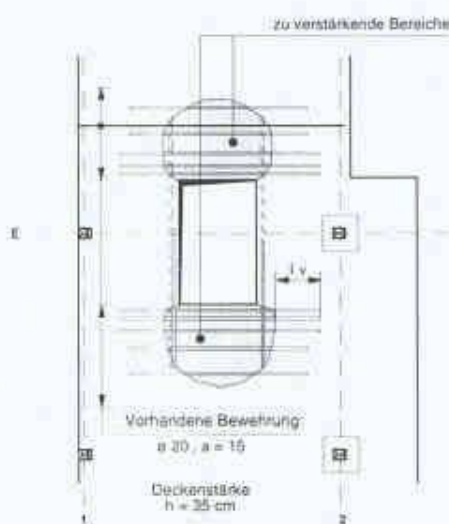
Das Gebäude wurde in den Jahren 1978 bis 1980 im Zentrum von Winterthur erstellt. Der Warenhausteil wird künftig durch einen neuen Mieter betrieben, wobei die Verkaufsflächen um ein Geschoss und damit um 50% ausgebaut werden. Die Lebensmittelabteilung im Untergeschoss bleibt bestehen und wird um 500 m² vergrössert. Die Vorhaben führen dazu, dass in kürzester Zeit Baumassnahmen für insgesamt 25 Mio. Franken durchzuführen sind. So werden im 2. Obergeschoss der Hof mit einer Fläche von 800 m² mittels einer Stahlkonstruktion überdacht und in diversen Geschossen Einrichtungen ersetzt und Installationen erneuert. Diese Massnahmen erfordern diverse Eingriffe in die Tragstrukturen. So führen die Durchbrüche für die neuen Warenlifte sowie die Rolltreppen und -bänder und die Vergrösserung der Raumhöhe über der zu erweiternden Verkaufsfläche im UG zum Abbruch von 280 m³ Beton. Die 30-40 cm starken Stahlbetondecken werden mittels Betonbeisser oder Fräse abgebaut und laufend abtransportiert. Bedingt durch die Änderungen der statischen Systeme müssen folgende Verstärkungsarbeiten durchgeführt werden:

- Verstärkung von Zugzonen mittels geklebter Bewehrung, insgesamt 25 Stahllamellen mit einer Gesamtlänge von 120 m und 170 CFK-Lamellen mit einer Gesamtlänge von 1500 m
- Vergrösserung der statischen Höhe von Stahlbetondecken durch Aufbringen von neuem Beton im Verbund mit Altbeton, u.a. mit Verwendung einer Hafibrücke
- Einbau diverser neuer Stahlstützen
- Verankerung diverser Bewehrungsstäbe, parallel mit den Betonschneidarbeiten
- Verlängerung einer Stahlbetondecke unter Verwendung nachträglich versetzter Bewehrungsanschlüsse

In den nachfolgenden Kapiteln wird von den oben aufgeführten Verstärkungsarbeiten auf die geklebte Bewehrung mit CFK-Lamellen eingegangen.



Ausschnitt Decke über 1. UG: Verschiedene Deckenbereiche werden mit CFK-Lamellen verstärkt, da beim Deckenabbruch für die neuen Warenlifte der Gurtstreifen zu ersetzen ist und die früheren Mittelfelder beim neuen Luftraum als Randfelder stärker beansprucht werden.



Ausschnitt Decke über 1. UG, Bereich Deckendurchbruch für die neuen Warenlifte: Zu verstärkende Bereiche, die im Beispiel beschrieben werden.

Bemessung

Die erforderlichen Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise können verschiedenen Schriften entnommen werden [4, 5]. Am Beispiel eines Deckenausschnitts des hier vorgestellten Umbauvorhabens wird das gewählte Vorgehen vereinfacht dargestellt (Decke 1. UG, Bereich neue Warenlifte; Bilder 1 und 2).

Tragsicherheit

Kontrolle des unverstärkten Bauteils

Eine geklebte Bewehrung aus Stahl oder CFK kann während der Nutzung aus verschiedenen Gründen versagen (Brand [6], Anprall von Fahrzeugen usw.). Es ist daher zu gewährleisten, dass die Folgeschäden abschätzbar bleiben und kein Sicherheitsrisiko entsteht. Daher soll ein nachträglich verstärktes Tragwerk unter den vereinbarten Nutzungszuständen nach einem Lamellenausfall noch einen Gesamtsicherheitsfaktor von $\gamma > 1$ aufweisen. Die entsprechenden Tragsicherheitsnachweise haben am unverstärkten Bauteil zu erfolgen. Analog zu dieser Forderung wird in der deutschen Richtlinie für das Verstärken mit Stahllamellen vorgegeben, dass die rechnerische Tragfähigkeit des verstärkten Bauteils nicht grösser sein darf als das Zweifache des unverstärkten.

Kann die Tragsicherheit wie oben beschrieben nicht erfüllt werden, sind zusätzliche Massnahmen, die beispielsweise

eine Veränderung des statischen Systems bewirken, oder gänzlich andere Verstärkungsmethoden vorzusehen.

Kontrolle des verstärkten Bauteils

Nachfolgend wird auf die Ermittlung des Biege Widerstandes eingegangen. Selbstverständlich ist auch bei einer nachträglichen Verstärkung eine gesamtliche Betrachtungsweise unerlässlich. Sämtliche erforderlichen Nachweise des zu verstärkenden als auch der übrigen betroffenen Bauteile müssen erbracht werden. Geometrie und Baustoffwerte (Rechenwerte) für den oben erwähnten Deckenausschnitt sind untenstehend aufgeführt.

Wird der vorhandene Biege Widerstand aus obigen Daten durch den Widerstandsbeiwert dividiert, resultiert ein Wert von $M_R/\gamma_R = 210 \text{ kNm}$. Demgegenüber stehen die Bemessungswerte aus der Plattenberechnung. Resultierend aus diesen Vergleichen sind in Bild 2 die zu verstärkenden Flächen eingetragen (untere Bewehrung in Richtung Achse E).

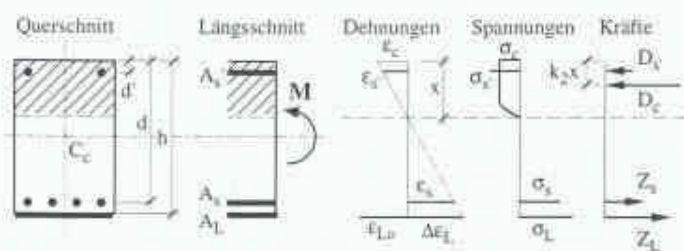
Für die Bereiche mit einem Bemessungswert von $M_d = 270 \text{ kNm}$ wird ein La-

mellenquerschnitt von 150 mm^2 gewählt. Die Annahmen und Formeln für die Berechnung am Rechteckquerschnitt im Zustand II sind nachfolgend zusammengestellt (Zusammenfassung aus [4], die Bezeichnungen können Bild 3 entnommen werden).

- Die idealisierten Spannungs-Dehnungs-Diagramme für Beton und Stahl sind gültig.
- Die Betonzugkraft wird vernachlässigt, das heisst, der Beton trägt in der Zugzone nicht mit.
- Die Dehnungen sind über die Querschnittshöhe proportional zum Abstand zur Neutralachse verteilt (Ebenbleiben des Querschnitts für mittlere Dehnungen).
- Über die Lage des Risselements bleiben die Lage der Kräfte sowie der Neutralachse konstant, und die Betonrandstauchungen entsprechen den mittleren Dehnungen.

Die Verhältnisse der maximalen Dehnungen im Rissquerschnitt zu den mittleren Dehnungen über das Risselement werden mittels der Verbundkoeffizienten κ dargestellt.

Breite b [mm]	1000	E-Modul Beton E_c [N/mm ²]	36 000
Höhe h [mm]	350	E-Modul Bewehrung E_s [N/mm ²]	210 000
Bewehrung A_s [mm ²]	2090	E-Modul Lamelle E_L [N/mm ²]	165 000
Statische Höhe d [mm]	300	Druckfestigkeit Beton f_{cd} [N/mm ²]	16
Lamelle A_L [mm ²]	150	Fließgrenze Stahl f_{yk} [N/mm ²]	460
		Zugfestigkeit Lamelle f_{tL} [N/mm ²]	2000



$$\epsilon_{L,u} = \kappa_L \epsilon_{L,max} \text{ mit } \kappa_L = 0.65 - 0.8$$

$$\text{für } \sigma_{L,max} = \sigma_{Lu} \quad (1)$$

$$\epsilon_{s,u} = \kappa_s \epsilon_{s,max} \text{ mit } \kappa_s = 0.9 - 1.0$$

$$\text{für } \sigma_{s,max} \geq f_{sy} \quad (2)$$

Am Querschnitt gemäss (Bild 3) müssen die Gleichgewichtsbedingungen (3) und (4) erfüllt werden.

$$\Sigma Z = 0 \quad Z_L + Z_s - D_c = 0 \quad (3)$$

$$\Sigma M = 0 \quad M_R - Z_L (h - k_2 x) - Z_s (d - k_2 x) = 0 \quad (4)$$

Die mittleren Dehnungen beim Bruch sind wie folgt gegeben:

$$\text{Beton: } \epsilon_c = -\frac{\Delta \epsilon_L}{h - x} x + \epsilon_{c,u}$$

$$\text{wobei: } \epsilon_c \geq -3.5\text{‰} \quad (5)$$

$$\text{Stahl: } \epsilon_s = \frac{\Delta \epsilon_L}{h - x} (d - x) + \epsilon_{s,u}$$

$$\text{wobei: } \epsilon_{sy} \leq \epsilon_{s,max} = \frac{\epsilon_s}{\kappa_s} \leq \epsilon_{Rk} \quad (6)$$

$$\text{Lamelle: } \epsilon_L = \epsilon_{L,u} + \Delta \epsilon_L$$

$$\text{wobei: } \epsilon_{L,u} + \Delta \epsilon_{L,max} = \epsilon_{L,u} \quad (7)$$

$$\text{d.h.: } \Delta \epsilon_L = \kappa_L \Delta \epsilon_{L,max} = \kappa_L (\epsilon_{L,u} - \epsilon_{L,u}) \quad (8)$$

Die Anteile $\epsilon_{c,u}$ und $\epsilon_{s,u}$ berücksichtigen allfällige Dehnungen, die bereits vor dem Anbringen der Lamelle vorhanden sind, mit $\epsilon_{L,u}$ kann eine Vordehnung der Lamelle infolge einer Spannkraft zum Zeitpunkt $t=0$ eingesetzt werden.

Die Betondruckkraft D_c gemäss Spannungs-Dehnungs-Diagramm nach der Norm SIA 162 (1989) kann bezüglich Grösse und Lage mit den Parametern k_1 und k_2 festgelegt werden.

$$D_c = k_1 b x \sigma_c \quad (9)$$

$$\epsilon_c \geq -2\text{‰}$$

$$k_1 = -\frac{1000}{6} (500 \epsilon_c^2 + 3 \epsilon_c) \quad (10)$$

$$k_2 = 1 - \frac{750 \epsilon_c + 4}{2(500 \epsilon_c + 3)} \quad (11)$$

$$\sigma_c = -1000 \epsilon_c (250 \epsilon_c + 1) f_c \quad (12)$$

$$-2\text{‰} \geq \epsilon_c \geq -3.5\text{‰}$$

$$k_1 = 1 + \frac{1}{1500 \epsilon_c} \quad (13)$$

$$k_2 = 1 - \frac{0.5 - (3 \cdot 10^6 \epsilon_c)^{-1}}{1 + (1500 \epsilon_c)^{-1}} \quad (14)$$

$$\sigma_c = f_c \quad (15)$$

Damit lässt sich die Lage der Neutralachse x mit (16) und (17) unter Verwendung von k_1 nach (10) bzw. (13) berechnen.

$$\epsilon_c = -\frac{\kappa_L (\epsilon_{L,u} - \epsilon_{L,u})}{h - x} x + \epsilon_{c,u} \quad (16)$$

$$A_L f_{Lu} + A_s f_{sy} - k_1 b x \sigma_c = 0 \quad (17)$$

Bei bekannter Lage der Neutralachse x wird der Biegezugwiderstand M_R nach (18) ermittelt.

$$M_R = A_L f_{Lu} (h - k_2 x) + A_s f_{sy} (d - k_2 x) \quad (18)$$

Oben aufgeführte Werte führen zu nachfolgend dargestellten Resultaten:

Neutralachse x [mm]	99
Biegezugwiderstand M_R [kNm]	342
Verstärkungsfaktor [-]	1.4
Betonstauchung ϵ_c [‰]	-0.33
Stahldehnung ϵ_s [‰]	0.68

Die Betonstauchung und die Stahldehnung liegen in den vorgegebenen Grenzen gemäss (5) und (6). Zum erforderlichen Bemessungswert von $M_R = 270$ kNm resultiert mit $M_R / \gamma_R = 285$ kNm eine Reserve von 6%.

Verankerung der CFK-Lamellen

Die Verankerung von CFK-Lamellen wurde an der Empa Dübendorf bereits innerhalb verschiedener Forschungsarbeiten untersucht und mittels Bauteilversuchen geprüft. Abschliessende Ergebnisse und Bemessungshinweise für die Praxis liegen zur Zeit jedoch noch nicht vor. Die Bemessung der erforderlichen Verankerungslänge l_v in deutschen Zulassungen basiert auf den Untersuchungen von Ransisch [1] und wird wie folgt angegeben:

$$l_v = \frac{(Z_{L,u} \gamma_R)^2}{b_L^2 \kappa_L \tau_K} \geq 500 \text{ mm} \quad (19)$$

wobei:

$Z_{L,u} \gamma_R$ = vorhandene, zu verankernde Lamellenzugkraft (Bemessungswert) multipliziert mit dem Widerstandsbeiwert, jedoch max. $f_{Lu} b_L t_L$

f_{Lu} = Rechenwert der Lamellenzugfestigkeit

b_L = Lamellenbreite

t_L = Lamellendicke

κ = Vergleichsspannung = 50 N/mm^2

τ_K = Klebverbundspannung, in Abhängigkeit der mittleren Haftzugfestigkeit $f_{c,u}$ des Betons ($f_{c,u} = 1.5 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \tau_K = 5 \text{ N/mm}^2$; $2.2 \Rightarrow 8$; $2.8 \Rightarrow 11$; $3.1 \Rightarrow 12$)

Die Übertragbarkeit der Kräfte von der Lamelle auf den Beton ist insbesondere von den mechanischen Eigenschaften des Betons sowie dem Schubmodul des Klebstoffs abhängig. Somit kann, bis entsprechende Bemessungshinweise vorliegen, die Verankerungslänge für CFK-Lamellen in der Regel gemäss (19) für eine äquivalente Stahllamelle ermittelt werden. Muss die gesamte Zugkraft bei $f_{Lu} = 2000 \text{ N/mm}^2$, $t = 1 \text{ mm}$ und $f_{c,u} = 2.2 \text{ N/mm}^2$ verankert werden, resultiert eine Verankerungslänge von $l_v = 2.0 \text{ m}$ (Bild 2).

Gebrauchstauglichkeit

Die CFK-Lamelle bewirkt nicht nur eine Verstärkung, sondern durch die Erhöhung des Trägheitsmoments auch eine Versteifung des Querschnitts. Wird sie gespannt angebracht, so wird dieser Effekt noch verstärkt. Diese Versteifung führt zu geringeren Stahlspannungen und reduzierten Verformungen sowie kleineren Rissbreiten. Letztere werden zudem durch die guten Verbundeigenschaften der aufgeklebten CFK-Lamelle mit dem Beton positiv beeinflusst. Spannungs- und Verformungsberechnungen können mit den üblichen Methoden durchgeführt werden, da die von Bernoulli-Navier eingeführte Hypothese vom Ebenbleiben ursprünglich ebener Querschnitte für mittlere Dehnungen in nicht schubbeanspruchten Zonen auch für nachträglich mit CFK-Lamellen verstärkte Zonen gültig ist [4]. Einzig müssen die bekannten Zustände I und II, Beton ungerissen und in der Zugzone vollkommen gerissen, für Abschätzungen von Grenzwerten erweitert werden. Entsprechend wird der Zustand III eingeführt, der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Stahlstäbe die Fließdehnung überschritten haben. Analog zum Rissmoment M_r kann das Fließmoment M_f , das den Übergang vom Zustand II in den Zustand III beschreibt, eingeführt werden. Nach Überschreiten von M_f können die Stahlspannungen nicht mehr vergrössert werden ($\sigma_s = f_{sy}$).

Am Bau Beteiligte:

Bauherr:	Coop Winterthur
Architekt und Gesamtleiter:	Stutz+Böli, dipl. Arch. ETH SIA BSA, Winterthur
Bauingenieur:	Dr. Deuring+Oehninger AG, Winterthur
Baumeister:	Arge AG Baugeschäft Wülflingen und Lerch AG, Winterthur
Abbrucharbeiten:	Ziltener AG, Winterthur, und U. Bonomo Söhne AG, Zürich
Verstärkungsarbeiten:	Renesco AG, Regensdorf
Stahlbauarbeiten:	Geltinger Stahlbau AG, Bülach, und Baltensperger AG, Hölvi
Materialprüfungen:	Empa, Dübendorf
Lieferant Verbundanker und Verbundmörtel für Bewehrungsanschlüsse:	Hilti AG, FL-Schaan
Lieferant CFK-Lamellen, Klebstoffe sowie Haftbrücke:	Sika AG, Zürich

Die Überprüfung der Dauerhaftigkeit kann entsprechend der Norm SIA 162 (1989) über eine Kontrolle der Stahlspannungen der Zugbewehrung erfolgen. Da im Zustand III die Dehnungen, Verformungen und Rissbreiten überproportional zunehmen, darf im Gebrauchszustand das Flieissmoment M_i nicht erreicht werden.

Die Zugbewehrungen in oben dargestelltem Beispiel erreichen im verstärkten Querschnitt maximale Spannungen von $\sigma_s = 300 \text{ N/mm}^2$, womit die Flieissgrenze weit unterschritten wird.

Baustoffe**CFK-Lamellen**

Die CFK-Lamellen werden im Strangziehverfahren hergestellt. Bei diesem kontinuierlichen Herstellungsprozess werden einige Dutzend Kohlenfaserbündel, sogenannte Rovings, in ein Epoxidharzimprägnierbad getaucht, durch eine entsprechende Form gezogen und anschliessend im Ofen gehärtet. Es entsteht ein Werkstoff mit hervorragenden mechanischen und chemischen Eigenschaften [7]. Mit der Methode des Strangziehverfahrens können ausserordentlich lange CFK-Lamellen hergestellt und in Längen von 250–500 Metern aufgerollt werden.

Die CFK-Lamellen weisen in der Faserlängsrichtung sehr hohe Zugfestigkeiten auf, die im Bereich von über 3000 N/mm^2 liegen. Die geringe Lamellenfestigkeit in Querrichtung ist für die Verstärkungsaufgaben nicht bedeutend. Bei einer allfälligen Überbeanspruchung in der Querrichtung wird parallel zu den Fasern ein Matrixriss entstehen. Ein solcher Matrixriss beeinträchtigt die Zugfestigkeit in Längsrichtung nicht und ist daher für die Verstärkung unbedeutend.

Eine CFK-Lamelle von 50 mm Breite und 1,2 mm Stärke besteht aus etwa 1,3 Millionen Kohlefasern, welche einen Durchmesser von einem Fünftausendstel Millimeter aufweisen. Mit dem Strangziehver-

fahren werden diese dünnen Fasern in der Längsrichtung parallel aneinander gereiht und mit Epoxidharz miteinander verklebt. Infolge der grossen Anzahl dieser Fasern in unidirektionaler Richtung ist die Streuung der Zugfestigkeiten gering. Wenn innerhalb einer Lamelle eine Faser bricht, wird sich der Bruch nicht wie bei einem Festkörper ausbreiten, die übrigen Fasern bleiben intakt. Die Einbettung der Kohlefasern in der Epoxidharzmatrix bewirkt, dass auch eine gerissene Faser nach wenigen Millimetern beidseits der Trennstelle die volle Beanspruchung wieder übernehmen kann.

Das Ermüdungsverhalten der CFK-Lamellen ist ausgezeichnet. Mehrere Versuche an nachträglich mit CFK verstärkten Stahlbetonträgern an der Empa in Dübendorf haben gezeigt, dass die Kohlefasern im Gegensatz zu Stahllamellen bezüglich sogenannter Reibkorrosion unempfindlich sind. Dies ist vor allem für die Überbrückung von Rissen unter Beanspruchung bedeutend.

Epoxidharzkleber

Mittels Kleben können Bauteile ohne optische Veränderungen auf der Baustelle wirtschaftlich miteinander verbunden werden. Bei Klebeverbindungen erfolgt die Kraftübertragung gleichmässig über die gesamte Klebefläche. Physikalische Bindekräfte werden durch molekulare Anziehungskräfte des Klebstoffs und des zu verbindenden Werkstoffs erzeugt. Die Grösse dieser Bindungskräfte ist abhängig

von der Art der Moleküle und deren Abstand zueinander. Durch Ablagerungen wie Schmutz, Staub oder Fett werden die Anziehungskräfte der Moleküle zueinander stark beeinträchtigt, weshalb eine sorgfältige Untergrundvorbehandlung der zu verklebenden Fügeile von grosser Wichtigkeit ist.

Durch das Aufrauen der Oberfläche wird eine grössere mechanische Verzahnung zwischen dem Klebstoff und den Fügeile erzielt. Zusätzlich wird infolge Rauigkeit die spezifische Oberfläche und damit die totale Klebefläche vergrössert. Für die Verklebung von CFK-Lamellen auf Beton, Stahl, Holz oder Backsteinen eignen sich zweikomponentige Epoxidharzsysteme besonders gut. Dieser Klebstoff hat sehr hohe mechanische Festigkeiten und ebenfalls eine gute chemische Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien. Das gute Benetzungsvermögen auf Beton, Holz usw. ergibt gute Hafteigenschaften [7].

Die besonderen Anforderungen an die Klebeschichten bestehen darin, die über die Fügeile einwirkenden Kräfte zu übertragen. Dabei kommt dem Abbau beziehungsweise der Reduzierung auftretender Spannungsspitzen eine besondere Bedeutung zu. Je mehr eine Klebeschicht solche Spannungsspitzen auszugleichen vermag, desto grösser wird der Anteil der lastübertragenden Klebefläche. Für hoch beanspruchte statische Verklebungen sind folgende Eigenschaften sehr wichtig:

- Hohe Haftungskräfte zu den Fügeileteilen
- Hohe Kohäsionsfestigkeit des Klebers
- Geringe Kriechneigung bei Dauerbelastung
- Gute Beständigkeit gegen Feuchtigkeit und Alkalinität

Dank der hohen Vernetzungsdichte erfüllen Klebschichten aus Epoxidharz die oben aufgeführten Kriterien sehr gut.

Für die Verklebung von CFK-Lamellen dürfen nur qualitativ hochwertige Epoxidharzklebstoffe mit den untenstehenden Eigenschaften (Tabelle) verwendet werden.

Eigenschaften	Richtwerte
Verarbeitungszeit	40–80 Minuten bei 20°C
Standfestigkeit	3–5 mm bei 35°C
Verpressbarkeit	3000–4000 N/mm ² bei 15°C
Druckfestigkeit	75–100 N/mm ²
Zugfestigkeit	20–30 N/mm ²
Scherzugfestigkeit	15–20 N/mm ²
Statischer E-Modul	8000–16 000 N/mm ²
Schwinden	0,04%–0,08%
Nasshaftung	4 N/mm ² (Betonbruch)
Glasübergangspunkt	50°C–70°C

Applikation und Qualitätssicherung

Die Voraussetzung für eine gute Klebeverbindung zu bestehenden Bauteilen ist ein tragfähiger Untergrund. Die Oberflächenvorbehandlung dient einerseits der Entfernung von vorhandenen Fremdstoffen wie Schmutz, Fette und Öle sowie andererseits der Entfernung der Zementhaut. Damit werden auch Zuschlagkörner freigelegt, und es entsteht eine ideale Oberflächenrauigkeit für die Verklebungen von CFK-Lamellen. Die Untergrundvorbehandlungen erfolgen an den verschiedenen zu verstärkenden Stahlbetondecken durch Sandstrahlen. Um angrenzende Verkaufsräumlichkeiten nicht zu beeinträchtigen, muss die Oberflächenvorbereitung entsprechend der Vorgabe des Bauherrn staubfrei erfolgen. Daher werden die Räumlichkeiten mit den zu verstärkenden Betonbauteilen abgeschottet. Zusätzlich wird eine nahezu staubfreie Sandstrahlmethode angewendet, wobei das Strahlgut direkt von der Oberfläche abgesaugt und in einen Behälter zurückgeführt wird. Gemäss den Angaben des verantwortlichen Bauingenieurs werden insgesamt 240 Oberflächenhaftzugfestigkeiten mittels Abziehen von Stahlrondellen gemessen. Die Betonqualität ist überall sehr gut, die gemessenen Zugfestigkeiten liegen zwischen 2.2 N/mm^2 und 5.5 N/mm^2 .

Wenige grössere Löcher und Unebenheiten müssen jeweils am Vortag der Verklebungsarbeiten mit Epoxidharzmörtel ausgebessert werden. Da ausschliesslich im Innenbereich gearbeitet wird, ist die vorhandene Temperatur immer im Bereich von 20°C , also ideal für Verklebungsarbeiten. Deshalb wird auch die Feuchtigkeit in keinem Moment zu hoch. Trotzdem erfolgen stichprobenweise Kontrollmessungen.

Die jeweils vorbehandelten Betonoberflächen werden vor Ort ausgemessen und die benötigten CFK-Lamellen auf der Baustelle ab Rollen von 250 Metern zugeschnitten. In vielen Bereichen der Decke sind Leitungen und Kanäle vorhanden. Dank der Flexibilität der CFK-Lamellen und deren geringen Stärke von nur 1.2 mm können diese ohne grössere Schwierigkeiten zwischen den Leitungen und der Decke eingezogen und verklebt werden, obwohl die längsten Lamellen 16 Meter lang sind. Auch die über 300 Lamellenkreuzungen lassen sich problemlos ausführen. An einigen Orten werden auch schiefwinklige sowie dreifache Kreuzungen ausgeführt (Bild 4). Einige Applikationen müssen jeweils aus betrieblichen Gründen während der Nacht innerhalb kurzer Zeit ausgeführt werden. Dank der



4
Verstärkte Stahlbetondecke mit dreifacher Lamellenkreuzung

einfachen und wirtschaftlichen Anroll-Applikations-Methode [8] und der effizienten Arbeitsweise des erfahrenen Unternehmens können die zeitlichen Forderungen des Bauherrn bei den vielen einzelnen Bauetappen eingehalten werden.

Kosten

Verschiedene Spezialunternehmer haben für die Verstärkungsarbeiten Angebote eingereicht. Bei der Interpretation nachfolgend aufgeführter Preise sind die momentane Konkurrenzsituation einerseits sowie die relativ grossen Mengen andererseits zu berücksichtigen. In den Ausschreibungsunterlagen sind Vorgehensweisen, Produktanforderungen und erforderliche Qualitätssicherungen genau festgelegt. Die Preise werden für jeden Lamellentyp und die entsprechenden Breiten sowie die Lage der Applikation (Deckenober- oder -unterseite) in folgende Positionen aufgegliedert:

- Betonvorbehandlung/Kontrolle des Untergrunds mittels Haftzugfestigkeitsprüfungen
 - Abtrag von Überprofilen und Reprofilierung von Schwachstellen
 - Lamellenlieferung
 - Reinigung und Applikation der Lamelle (inkl. Zuschlägen für Erschwerisse bei Unterquerungen von Leitungen und dgl.), Qualitätssicherung
- In untenstehend (Tabelle) aufgeführten Preisen sind sämtliche Arbeiten für die Applikation von Lamellen mit Längen bis zu 15 m inklusive Qualitätssicherung eingerechnet.

Lamellentyp	Deckenoberseite	Deckenunterseite
CarboDur, b=100 mm	Fr. 113.-	Fr. 150.-
CarboDur, b=80 mm	Fr. 102.-	Fr. 111.-
CarboDur, b=50 mm	Fr. 80.-	Fr. 88.-

Ausblick

Für geklebte Bewehrungen wurden bis anhin vor allem in der Schweiz sowie in Deutschland über 50 km CFK-Lamellen erfolgreich eingesetzt. In verschiedenen weiteren Ländern werden momentan unter Mitwirkung von Schweizer Unternehmen Verstärkungsmassnahmen mit diesem Werkstoff projektiert. Dieses Engagement lässt sich jedoch zu Gunsten des Werkplatzes Schweiz noch weiter ausbauen.

Nebst dem Einsatz für Stahlbeton liegen ebenso Forschungsergebnisse und teilweise Umsetzungen in die Praxis der geklebten CFK-Bewehrung für die Verstärkung/Versteifung von Mauerwerk, Stahl, Aluminium und Holz vor [9, 10]. Allerdings sind für diese Einsätze als auch für die Verstärkung von Stahlbeton noch diverse weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu leisten [4].

Wie bereits erwähnt, fehlen für die Praxis Modelle für die Berechnung von Verankerungslängen. Ebenfalls ist das Abscheren der Lamelle weiter zu ergründen. Insbesondere bei schlanken Trägern und hohen Einzellasten muss die Möglichkeit eines vorzeitigen Ausfalls einer Verstärkungslamelle genau untersucht werden.

Verschiedentlich wurden bis anhin Lamellen mit einem E-Modul von mehr als $300\,000 \text{ N/mm}^2$ eingesetzt [9]. Insbesondere im Holzbau lassen sich damit Verformungen erheblich reduzieren. Ein höherer E-Modul der CFK-Lamelle führt beim Einsatz im Stahlbetonbau jedoch nur zu einer unwesentlichen Verbesserung des Tragverhaltens. Durch eine Verkleinerung der

Rissbreiten und die entsprechend bessere Verzahnung im Riss wird eine allfällige Abschergefahr etwas reduziert. Keine Veränderung erfährt der Biegezugwiderstand, und die Stahlspannungen werden nur geringfügig reduziert. In obigem Beispiel erfolgt eine Verkleinerung von σ_s um lediglich 2% (294 statt 300 N/mm²), das Flie遨moment M_f wird ebenfalls nur um 2% erhöht.

Eine erhebliche Verminderung der Abschergefahr sowie eine deutliche Entlastung der inneren Stahlbewehrung mit der entsprechenden Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit bewirkt dagegen eine gespannt applizierte Lamelle. Die Umsetzung dieser Anwendung wird, da sowohl Spannvorrichtung als auch Verankerungsmethoden noch weiter entwickelt werden müssen, noch etwas Zeit in Anspruch nehmen.

Adresse der Verfasser:

Martin Deuring, Dr. sc. techn., dipl. Bauing, ETH/SIA, Dr. Deuring + Oehninger AG, Paulstrasse 8, 8400 Winterthur, und Walt + Galmari AG, Englischtalstrasse 24, 8032 Zürich, Werner Steiner, dipl. Bauing, ETH/SIA, Sika AG, Tüfienwies 16-22, 8048 Zürich

Literatur

- [1] Ladner M., Pralong J., Weder Ch.: Geklebte Bewehrung: Bemessung und Erfahrungen, Empa-Bericht Nr. 116/5, 1990
- [2] Meier U.: Brückensanierung mit Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen, Material und Technik Nr. 4, 1987
- [3] Deuring M.: Bemessung von mit CFK-Lamellen verstärkten Stahlbetonträgern sowie gespannte CFK-Lamellen. Nachträgliche Verstärkung von Bauwerken mit CFK-Lamellen. Empa/SIA-Studientagung, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Dokumentation D 0128, S. 37-49 sowie S. 97-99, 21. September 1995
- [4] Deuring M.: CFK-Lamellen im Bauwesen. Verstärkung von Tragwerken aus Beton. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 26, 23. Juni 1994
- [5] Wüstörfer A., Zumbühl R. und Deuring M.: CFK-Lamellen-verstärkte Stahlbetonträger unter Brandbeanspruchung: Empa-Versuchsergebnisse. Empa/SIA-Studientagung, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Dokumentation D 0128, S. 85-86, 21. September 1995

[6] Sika, 1996: Sika-CarboDur, hochfestes CFK-Verstärkungssystem sowie Sikadur-30, CFK-Kleber. Technische Merkblätter. Sika AG, CH-8048 Zürich, 6.96

[7] Steiner W.: Praktische Anwendungstechnik mit dem Anroll-Verfahren: Qualitätssicherung. Nachträgliche Verstärkung von Bauwerken mit CFK-Lamellen. Empa/SIA-Studientagung, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Dokumentation D 0128, S. 25-28, 21. September 1995

[8] Schwegler G.: Verstärkung von Mauerwerk mit CFK-Lamellen sowie CFK-Verstärkungen im Mauerwerks- und Holzbau. Nachträgliche Verstärkung von Bauwerken mit CFK-Lamellen. Empa/SIA-Studientagung, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Dokumentation D 0128, S. 71-83 sowie S. 61-65, 21. September 1995

[9] Künz P. und Meier H.: Das statische Biegeverhalten von Hybridträgern und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter Kurzzeitbelastungen. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa, Dübendorf, Bericht Nr. 126/537/2, 1991

Rolf Walser, Buchs, und Werner Steiner, Zürich

Verstärkung Rheinbrücke Oberriet-Meiningen

Bei der beinahe 35jährigen Rheinbrücke Oberriet-Meiningen waren aufgrund der gestiegenen Strassenlasten 1996 Verstärkungsarbeiten an der Fahrbahnplatte nötig. Diese Verstärkung wurde erstmals mit einer Kombination zweier Verstärkungsmethoden ausgeführt, wobei sich vor allem die Verklebung von total 670 m CFK-Lamellen in der Ausführung bewährte.

Die im Jahre 1965 erstellte Grenzbrücke zwischen der Schweiz und Österreich verbindet das Land Vorarlberg (Meiningen) mit dem Kanton St. Gallen (Oberriet). Sie überquert den Rhein als Dreifeldträger mit den Spannweiten 35.10 m, 45.00 m und 35.10 m (Bild 1). Der Überbau besteht aus einem Stahlverbundträger mit geschweissten Blechträgern und einer Ortbetonplatte (Bild 2).

Die periodische Überwachung des Kantons St. Gallen zeigte auf, dass Unter-

haltmassnahmen nötig waren. Aufgrund der ausführlichen Bestandsaufnahme, zu der auch eine Nachrechnung nach den gültigen SIA-Normen gehörte, ergab es sich, dass nebst den normalen Unterhaltsarbeiten auch eine Verstärkung der Fahrbahnplatte in Querrichtung erforderlich war, weil die Fahrbahnplatte 1963 lediglich für Lastwagen mit 14 Tönnen Gewicht bemessen worden war.

Verstärkungskonzept

Um die Tragsicherheit für die heutigen Strassenlasten weiterhin gewährleisten zu können, standen verschiedene Lösungsmöglichkeiten zur Auswahl.

- Ersatz der gesamten Brückenplatte
- Erhöhen der statischen Höhe durch Ergänzen des Querschnitts
- Verstärkung mit geklebter Bewehrung

Da die bestehende Betonplatte in einem sehr guten Zustand war, die Bohr-

kerndruckfestigkeit $f_{c,km} = 70.7 \text{ N/mm}^2$ / $f_{c,m} = 92.5 \text{ N/mm}^2$ betrug und die Chloridverseuchung nur in den obersten 10 mm die Grenzwerte überschritt, wurde aus Kostengründen auf einen Totersatz der Betonplatte verzichtet. Das Aufbringen eines Überbetons in der notwendigen Stärke zur Erzielung der vollen Biegetragsicherheit ergab jedoch eine zu hohe Beanspruchung in Längsrichtung. Damit blieb nur noch das Verfahren mit geklebter Bewehrung übrig. Verstärkte Bauteile mit aufgeklebter Bewehrung sollten jedoch bei Ausfall der Lamellen noch eine restliche Gesamtsicherheit von $\gamma_d \times \gamma_R = 1.2$ aufweisen. Da der nötige Verstärkungsgrad 2.15 betrug, musste die Brückenplatte trotzdem zusätzlich verstärkt werden.

Mit einer Verstärkung der Plattendicke um 8 cm sowie einer geklebten Bewehrung konnten sämtliche Randbedingungen erfüllt werden (Bild 2). Durch die Aufbetonierung konnte gleichzeitig der chloridverseuchte Beton durch Wasserstrahlen entfernt werden. Für die Bewehrung wurden CFK-Lamellen von 80 mm Breite und 1.2 mm Dicke gewählt (Fasertyp T700).

Zur Verstärkung des Feldes wurden insgesamt 160 Lamellen von rund 4 m Länge in einem gegenseitigen Abstand