

Geklebte Verstärkungen – Brandschutz und hohe Temperaturen

CFK Lamellen im Brandfall und unter Asphalt

Dipl.-Ing. (FH) Florian Eberth

Simpson Strong-Tie GmbH, Bad Nauheim, Deutschland

Zusammenfassung

Die Glasübergangstemperatur von Epoxidharzklebstoffen für die CFK Verstärkung liegt bei ca. 50 °C – 60 °C. Ab dieser Temperatur beginnt der Festigkeitsverlust der Klebstoffe und die CFK Verstärkung verliert ihre statische Wirkung. Diese Temperaturen werden im Brandfall und beim Überbau mit Asphalt deutlich überschritten und auch die direkte Sonneneinstrahlung auf die Asphaltdecke kann eine erhöhte Temperatur verursachen. Über eine Heißbemessung lässt sich in den allermeisten Fällen eine ausreichende Tragfähigkeit der Bauteile ohne Verstärkung im Brandfall nachweisen. Je nach Gegebenheit kann das Bauteil durch einen dünnen baulichen Brandschutz zusätzlich geschützt werden. Dicke Beplankungen, um die CFK Lamellen zu schützen, sind meist nicht erforderlich.

Forschungsvorhaben [1],[2],[3] der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (Empa) in der Schweiz zeigen, dass der Überbau mit Asphalt, das Aufbringen einer Bitumendichtbahn und auch die erhöhte Temperatur durch Sonneneinstrahlung bedenkenlos möglich sind.

1. Einführung

Das Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung wie CFK Lamellen ist Stand der Technik. Mit der Richtlinie des DAfStb ergeben sich viele Möglichkeiten der Bemessung und Nachweisverfahren. Auch die Verbundfestigkeit (Verbundkrafterhöhung durch Bügelumschließung) von aufgeklebten CFK Lamellen lässt sich durch geeignete Mittel z. T. deutlich erhöhen.

Im Brandfall bzw. bei höheren Temperaturen (direkte Sonneneinstrahlung) ist die Glasübergangstemperatur des Klebstoffes der CFK Lamellen maßgebend, welche bei ca. 50°C – 60 °C liegt. Ab dieser Temperatur beginnt der Klebstoff seine Festigkeit zu verlieren und die CFK Lamellen fallen rechnerisch aus. Im Idealfall werden die CFK Lamellen im Brandfall aber gar nicht benötigt.

Im Brückenbau ist eine häufig angewendete Methode die oberseitige Verstärkung der Kragarme. Hier werden die CFK Lamellen i. d. R. anschließend mit Asphalt überbaut. Zu den statischen Nachweisen gesellen sich somit zwei Fragestellungen:

- Wie verhält sich der Verbund im Zusammenspiel von Klebstoff und dem heißen Gussasphalt?
- Und wie verhält sich das Verbundsystem im Hinblick auf die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen?

2. Brandschutzanforderungen bei CFK Verstärkungen

Eine immer wiederkehrende Angelegenheit sind die Anforderungen an die geklebten CFK Lamellen im Brandfall. Sind CFK Lamellen im Brandfall überhaupt einsetzbar bzw. müssen oder können die Lamellen

brandschutztechnisch verkleidet werden? Brandschutzsysteme für CFK Verstärkungen existieren und haben entsprechende gutachterliche Stellungnahmen. Diese Systeme tragen jedoch ca. 90 mm stark auf (R90) und allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen wurden bisher noch nicht erteilt. Dies liegt auch daran, dass Brandschutzsysteme für CFK Lamellen in den meisten Fällen nicht erforderlich sind und sich eine bauaufsichtliche Zulassung nicht lohnt.

Durch eine Heiß- oder auch Brandbemessung kann die Tragfähigkeit im Brandfall nachgewiesen werden. In ca. 80 % - 90 % der Bauvorhaben kann somit auf die Wirkung der Verstärkung im Brandfall verzichtet werden. Somit ist auch eine Beplankung der CFK Lamellen nicht erforderlich. In vielen Bemessungsprogrammen wird eine solche Heißbemessung angeboten. Bemessen wird mit charakteristischen Lasten, wobei die Nutzlasten zusätzlich mehr oder weniger über die $\Psi_{2,1}$ -Faktoren abgemindert werden dürfen. Im Gegenzug muss jedoch die Zugfestigkeit des Stahls in Abhängigkeit von der Temperatur abgemindert werden. Die Temperatur im Stahl wird wiederum beeinflusst durch den Stahlrandabstand (neutrale Achse der Bewehrung bis beflamte Oberfläche) und somit durch die Betondeckung und die Beflammungsdauer. Der Stahlrandabstand spielt daher eine entscheidende Rolle. Ist dieser zu gering, steigt die Temperatur im Stahl unter hohem Festigkeitsverlust. Gerade bei alten Bauteilen mit geringer Betondeckung kann das zu Problemen beim Brandschutz bzw. der Brandbemessung führen. Der Stahlrandabstand kann jedoch durch eine Brandschutzbeplankung nach Verkleben der CFK Lamellen erhöht werden. Die Brandschutzeigenschaften einer solchen Brandschutzbeplankung sind bei gleicher Dicke zwei- bis dreifach höher als die des Betons und das Eigengewicht ist zudem noch ca. 3-4-mal geringer [4]. Rein wärme- bzw. brandschutztechnisch ersetzt eine

15 mm dicke Brandschutzbeplankung somit 45 mm Betondeckung bzw. Stahlrandabstand bei R90 Brandschutzanforderung (siehe [4] Anhang D2). Eine solche Erhöhung hat bereits einen deutlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit im Brandfall. Um dies zu verdeutlichen, wird das folgende Beispiel dargestellt: Eine 20 cm starke Bestandsdecke mit 6 m Spannweite (B35) mit 1 kN/m² Ausbaulast und 1 kN/m² Nutzlast erfordert eine Bewehrung von 6,9 cm²/m (BSt 420). Durch Umnutzung und Aufstockung wird die Nutzlast auf 4 kN/m² erhöht, was eine erforderliche Bewehrung von nun 10,5 cm²/m zur Folge hat (s.u.). Ein

Verstärkungsgrad von 1,52 kann in diesem Fall mit 120 mm x 1,4 mm CFK Lamellen im Achsabstand von 100 cm erreicht werden (bemessen mit S&P FRP Lamella [6]). Das einwirkende Moment im Brandfall beträgt bei Nutzlast für Versammlungsräume 37,8 kNm (s.u.). Bei planmäßig vorhanden 10 mm Betondeckung besteht ein Stahlrandabstand von ca. 15 mm (Ø 12 mm Eisen). Die erforderliche Bewehrung im Brandfall liegt in diesem Fall bei 22 cm²/m, bei einer Stahltemperatur von ca. 700 °C. (siehe unten; bemessen mit 4H-DULAB [5]).

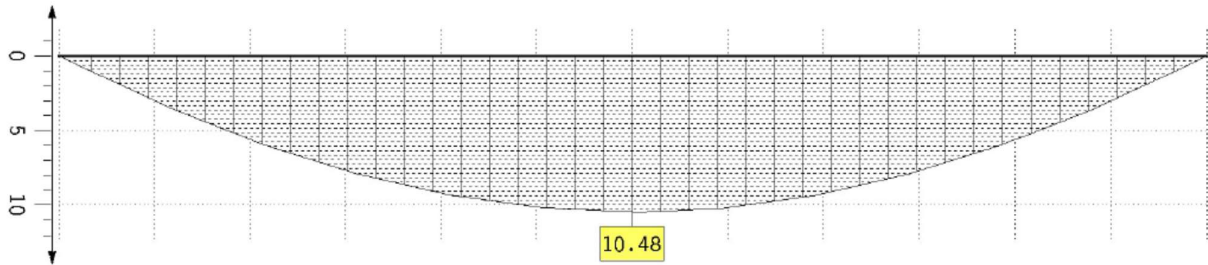


Abb. 1: Erforderliche Bewehrung (BSt 420) nach Umbau bei 63,5 kNm im GZT

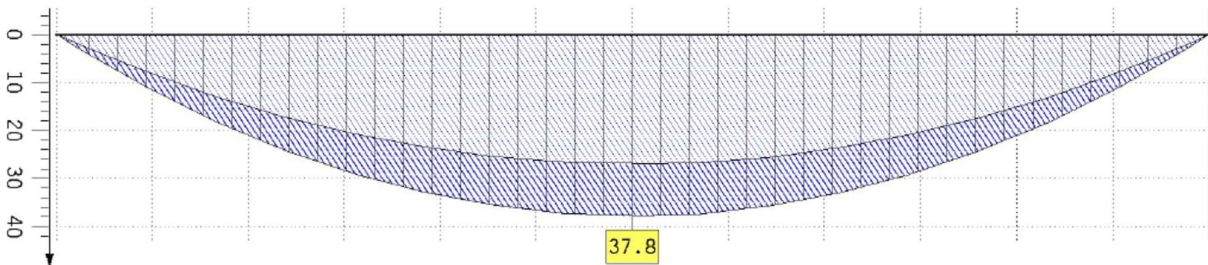


Abb. 2: Einwirkendes Moment im Brandfall nach Umnutzung; $g = 6 \text{ kN/m}^2$, $q = 4 \text{ kN/m}^2$ (Versammlungsräume)

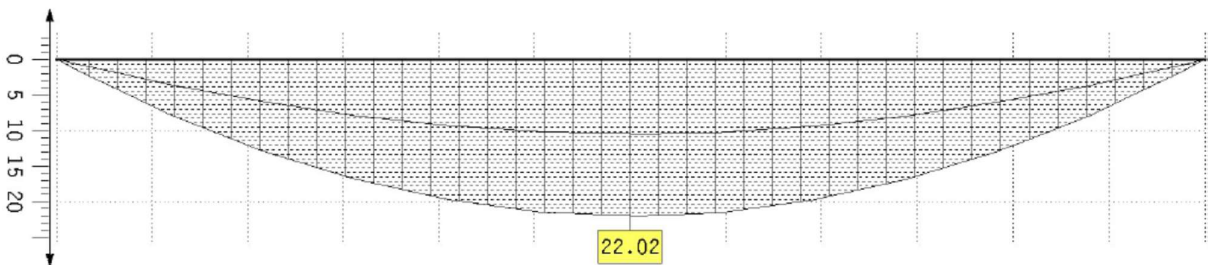


Abb. 3: Erforderliche Bewehrung im Brandfall bei Stahlrandabstand $h_{su} = 15 \text{ mm}$

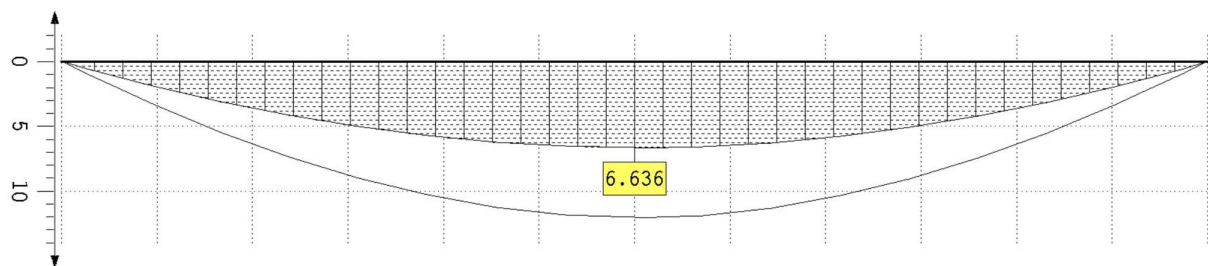


Abb. 4: Erforderliche Bewehrung im Brandfall bei Stahlrandabstand $h_{su} = 35 \text{ mm}$

Eine Brandschutzbeplankung von 10 mm erhöht den Stahlrandabstand wärmetechnisch um 30 mm [4] und das einwirkende Moment erhöht sich hier nur um ca. 0,6 kNm. Bereits bei einem Stahlrandabstand von 35 mm beträgt die erforderliche Bewehrung im Brandfall nur noch 6,6 cm²/m (s.o.) bei noch ca. 465 °C Stahltemperatur. Die Tragfähigkeit im Brandfall wäre gegeben. Die Verstärkung ist im Brandfall nicht erforderlich und die CFK Lamellen müssen nicht für den Brandfall geschützt werden. Die Brandschutzbeplankung von 10 mm dient im vorliegenden Fall dem baulichen Brandschutz der Decke selbst, und wird im Anschluss der CFK Verstärkung montiert.

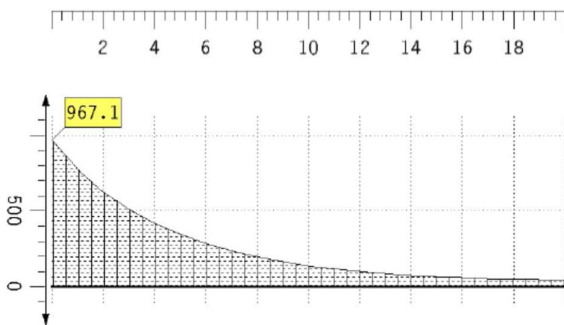


Abb. 5: Temperaturverlauf im Bauteil von links (beflammte Oberfläche) nach rechts (Deckenoberseite)

3. Temperaturstabilität von geklebten CFK-Lamellen im Brückenbau

Um die Fragen hinsichtlich des Überbaus mit Asphalt und der Auswirkungen der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen zu untersuchen und zu beantworten, wurde ein Forschungsvorhaben [1] an der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) in der Schweiz durchgeführt.

Im Bereich der Brücke erfolgt der übliche Aufbau der Fahrbahn in drei Arbeitsschritten:

- Einbau der CFK Klebelamellen mit dem Epoxidharzklebstoff direkt auf den Rohbeton oder in Schlitzte verklebte CFK Lamellen.
- Darüber wird eine Polymerbitumen-Dichtungsbahn (PBD) verlegt.
- Anschließend wird der heiße Gussasphalt (ca. 220 °C - 240°C im Fahrmischer) aufgebracht.

In einem ersten Teil des Forschungsprojekts wurden in Bauteilversuchen die Temperaturen in der Ebene der Klebstofffuge gemessen, beim Einbau der PBD (Abb 1), sowie beim Einbau des Gussasphaltes (Abb 2). Im Nachgang wurde die Haftzugfestigkeit der verklebten CFK Lamellen untersucht und mit den Referenzproben verglichen.



Abb. 6: Aufbringen der PBD [1]



Abb. 7: Einbau des Gussasphaltes [1]

Aufgrund der hohen Einbautemperatur von Gussasphalt war zu erwarten, dass die Temperaturen im Bereich der CFK Verstärkung die Glasübergangstemperatur des Klebstoffs übersteigen.

Die Untersuchungen zur Temperaturentwicklung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Temperaturen während des Aufbringens der PBD sind vernachlässigbar. Zwar ist die Temperatur hoch, jedoch ist die Einwirkungsdauer sehr kurz, so dass sich die Klebstofffuge kaum erwärmt.
- Beim Aufbringen des Gussasphaltes, kann die Temperatur in der Epoxidharzschicht bis zu 80 °C betragen. Während des Asphalteinbaus können die CFK Lamellen also nicht statisch berücksichtigt werden. Die Abkühlphase bis die Temperatur wieder auf die maximal zulässige Dauerbauteiltemperatur (gemäß Zulassungen und Richtlinien) von 40 °C sinkt, beträgt ca. 3 h. Nach dieser Zeit können die CFK Lamellen wieder voll angesetzt werden. Versuche an den CFK Lamellen ergaben keine Änderung der Festigkeiten.
- Die anschließend durchgeführte Prüfung der Haftzugfestigkeit zeigt nur eine minimale Beeinflussung des Verbundes. Diese Restfestigkeit ist jedoch höher als die durch die Bemessung ansetzbare Verbundfestigkeit. Die Bemessung bzw. Bemessungsfestigkeiten müssen somit nicht angepasst werden.
- Durch das beschleunigte Erhärten (i. d. R. wird ein Versuchsalter von 28 Tagen für die

Glasübergangstemperatur herangezogen) steigt die Glasübergangstemperatur durch Nacherhärtungseffekte nachträglich an.

Eine untergeordnete Rolle spielt lediglich die Kontaktfläche zwischen CFK Lamelle und PDB. Aufgrund möglicher Diffusion von Weichmachern aus der CFK Lamelle konnten hier teilweise kleinflächige Verbundstörungen beobachtet werden. Bei zusätzlichem Asphaltaufbau kann dies aufgrund des Eigengewichts des Asphalts jedoch vernachlässigt werden. Sofern es zu CFK Verstärkungen und anschließender PBD, ohne Auflast durch Asphalt o. ä. kommt, kann auf der sicheren Seite eine dünne Schutz- bzw. Trennschicht (Bodenbeschichtung oder Epoxidharz) auf die CFK Lamellen aufgebracht werden. Versuche zeigen, dass geringfügige Blasenbildung somit verhindert werden kann.

3. Dauerhaftigkeit von geklebten CFK Lamellen unter Temperatureinfluss

In einem zweiten Teil der Studie wurden Langzeitüberwachungen an CFK verstärkten Kragträgern durchgeführt [2], [3]. Die mit Asphalt überbauten verstärkten Platten wurden unter Gebrauchslast und jahreszeitlichen Umwelt- und Temperatureinflüssen über vier Jahre beobachtet (Abb. 3) [2]. Um den Einfluss der Temperatur auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit zu untersuchen, wurden die Probekörper anschließend im Labor zum Versagen unter Bruchlast gebracht [3].



Abb. 8: Probekörper unter Umwelteinfluss [1]

Über den gesamten Versuchszeitraum wurde der Temperaturverlauf in und auf den Probekörpern festgehalten. Die maximale Lufttemperatur betrug dabei ca. 38 °C. Aufgrund der direkten Sonneneinstrahlung auf die Probekörper wurde eine maximale gemessene Temperatur in der Klebstofffuge von 42 °C festgestellt. Die in den Bemessungsrichtlinien festgesetzte maximale Temperatur von 40 °C, wurde somit leicht überschritten. Diese ist als Dauerbauteiltemperatur definiert. Somit

kann diese Grenze auch hier als intakt angesehen werden, aufgrund der nächtlichen Abkühlung.

Im Laufe der Zeit, konnte bei höheren Temperaturen im Probekörper eine größere Dehnung festgestellt werden. Bei geringeren Temperaturen war die viskoelastische Verformung des Klebstoffs deutlich verringert. Der Anstieg der Dehnungen war im Vergleich zur Bemessungsdehnung jedoch moderat. Gleichzeitig war das Verhalten des Klebstoffs zu jeder Zeit stabil, ohne Anzeichen einer Delamination. Ein Zusammenhang von Dehnungszunahme der CFK Lamellen und Kriechen des Betons aufgrund des viskoelastischen Klebstoffverhaltens konnte durch eine MLR-Modellanalyse festgestellt werden. Die Reserve von ca. 10 °C – 20 °C von Glasübergangstemperatur zu der in den Richtlinien festgesetzten max. Dauerbauteiltemperatur ist somit eine sinnvolle Vorgabe.

Bei den anschließenden Versuchen im Labor [3], bei welchen die Probekörper zum Bruch gebracht wurden, konnte zunächst eine etwas verringerte Biegesteifigkeit festgestellt werden (Abb. 4).



Abb. 9: Bruchversuche im Labor [1]

Das Versagen der Probekörper erfolgte aufgrund von Betonquetschungen, ohne sichtbares Delaminieren der CFK Lamellen. Die Biegetragfähigkeit der mit Asphalt überbauten Platten übersteigt die der Referenzversuche ohne Asphalt. Dies wird auf den Asphalteinschluss (Auflast) der CFK Lamellen zurückgeführt, wodurch höhere Dehnungen ermöglicht werden. Bei den Bruchversuchen konnte jedoch bereits ab Gebrauchslastniveau ein deutlicher Schlupf zwischen Asphalt und Beton beobachtet werden. Somit kann auch aufgrund der geringen Steifigkeit des Asphalts ausgeschlossen werden, dass dieser zur Biegetragfähigkeit beiträgt.

Die Langzeitversuche zeigen, dass die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen oder der Überbau mit Asphalt keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit von CFK verstärkten Bauteilen haben. Die Zunahme der Dehnungen in den CFK Lamellen betrifft lediglich die Gebrauchstauglichkeit. Die Auswertung der Restfestigkeit von mit Asphalt überbauten und mit CFK Lamellen verstärkten Platten zeigt, dass die gleichzeitige Beanspruchung bei höheren Temperaturen keine kritische Anwendung im Hinblick auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit darstellt [3].

Literatur

- [1] Czaderski, C./ Gallego, J.M./ Michels, J. (2017): Temperature stability and durability of Externally Bonded CFRP strips in bridge construction (Forschungsprojekt AGB 2012/001). Zürich, Schweiz. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
- [2] Breveglieri, M./ Czaderski, C. (2022): Reinforced concrete slabs strengthened with externally bonded carbon fibre-reinforced polymer strips under long-term environmental exposure and sustained loading. Part 1: Outdoor experiments. Zürich, Schweiz. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
- [3] Breveglieri, M./ Czaderski, C. (2021): RC slabs strengthened with externally bonded CFRP strips under long-term environmental exposure and sustained loading. Part 2: Laboratory experiments. Zürich, Schweiz. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
- [4] ETA-11/0458 (2021): Europäisch Technische Bewertung „AESTUVER“ Brandschutzplatte, James Hardie Europe GmbH
- [5] 4H-DULAB [Software] (2024): pcae Gesellschaft für Programmvertrieb und Computer Aided Engineering mbH. <https://www.pcae.de>
- [6] S&P FRP Lamella 6.0 [Software]: S&P Clever Reinforcement Company AG, Schweiz. <https://www.sp-reinforcement.ch/>