

Bemessung von CFK-verstärkten Holzkanteln für Fensterprofile

Mit dem vorliegenden Beitrag wird ein Bemessungskonzept von CFK-verstärkten Holzkanteln für Fensterprofile vorgestellt bzw. erarbeitet. Infolge der gestiegenen Kosten für Holz und Baustoffe sowie der zunehmenden gestalterischen und architektonischen Anforderungen an eine filigrane Bauweise von Fensterkonstruktionen wird es erforderlich, die Querschnitte der Fensterprofile zu verkleinern bzw. zu verringern und so schmal wie möglich zu halten. Eine gute Möglichkeit hierfür bilden laminierte, zusammengesetzte Holzquerschnitte, die unter Einsatz von CFK-Lamellen verstärkt werden können. So kann eine hohe Tragfähigkeit bei einer gleichzeitig schmalen bzw. geringen Querschnittsabmessung der Fensterprofile erreicht werden. Basierend auf allgemein anerkannten Berechnungsansätzen wird nachfolgend ein konservatives Bemessungsverfahren vorgestellt, welches die Tragfähigkeit des Verbundquerschnitts abbilden kann.

Stichworte CFK; Holzkantel; Fensterprofil; Holzverbund

1 Einführung und Grundlage

1.1 Übersicht

Die Ausführung von CFK-verstärkten Bauteilen ist bereits langjährig bewährt und wird u.a. im Betonbau bspw. zur Verstärkung von Stahlbetondecken eingesetzt. Diese werden durch aufgeklebte CFK-Lamellen ertüchtigt, sodass deren Tragfähigkeit erheblich gesteigert werden kann. Generell können diese Systeme schlaff oder vorgespannt aufgebracht werden, wobei nachfolgend von einer schlaffen Verstärkung ausgegangen wird. Dies liegt daran, dass die Lamellen bei der Zusammenstellung des Holzverbundquerschnitts bereits mit eingebettet werden und der Gesamtquerschnitt verklebt bzw. lamelliert wird. Zur Herstellung des Holzverbundquerschnitts werden geeignete Klebstoffe verwendet. Die Ausführung der fachgerechten Herstellung muss überwacht bzw. zertifiziert sein (Eignung zur Herstellung von lamellierten Holzprofilen). Ein erster Eindruck zur statischen Systembildung bzw. grundlegende Bemessungsansätze können der Veröffentlichung [1] „Herstellung und Eigenschaften und geklebten Vollholzprodukten“ des Informationsdiensts Holz entnommen werden. Hier wird unter Abbildung 3.6 [1] (Bild 1) die prinzipielle Dehnungs- und Spannungsverteilung von homogenen, symmetrischen und unsymmetrischen Aufbauten dargestellt.

Durch die Aufbringung von außenseitigen Lamellen in höherer Festigkeit kann die Tragfähigkeit des Gesamt-

Dimensioning of CFRP reinforced wooden scantlings for window profiles

With this essay, a design concept for CFRP-reinforced wooden scantlings for window profiles is presented and developed. As a result of the increased costs for wood and building materials as well as the increasing creative and architectural requirements for filigree construction of window constructions, it is necessary to reduce or decrease the cross sections of window profiles and to keep them as narrow as possible. A good way to do this is to use laminated, composite wood cross-sections that can be reinforced using CFRP slats. In this way, a high loadbearing capacity can be achieved with a narrow or small cross-sectional dimension of the window profiles at the same time. Based on generally recognized calculation approaches, a conservative design method is presented below, which can depict the loadbearing capacity of the composite cross-section.

Keywords CFRP; window profile; wood composite; wooden scantling

querschnitts gesteigert werden. Weiterführend wird auf die Norm [2] DIN EN 14080 „Holzbauwerke – Brett-schichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen“ verwiesen.

1.2 Bemessungsgrundlage

Als Berechnungsgrundlage wird die Modellbildung von Brunner für schlaff geklebte CFK-Lamellen verwendet. Wie in [3] beschrieben, wird von einer spröden Zugseite und einer duktilen Druckseite ausgegangen. Über die Dehnungen ε kann auf die Spannungsverteilung im Holzquerschnitt rückgeschlossen werden. Das begrenzende Kriterium auf der Druckseite stellt die Druckfestigkeit in Faserrichtung $f_{c,0,k}$ des Holzes dar (Bild 2).

Die inneren Kräfte auf der Zug- und auf der Druckseite ergeben sich aus den Spannungen und den jeweiligen Querschnittsanteilen bzw. Querschnittsflächen. Die Spannungen können über die Spannungs-Dehnungs-Beziehung $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ermittelt werden. Für das vorliegende Bemessungskonzept wird von reiner Biegung ausgegangen, weswegen die Summe der inneren Kräfte null ergibt. Die Lage des Schwerpunkts S kann mittels eines geeigneten Querschnittsprogramms bestimmt werden, welches in der Lage sein muss, die unterschiedlichen E-Moduln des Holzquerschnitts sowie der Querschnitte der CFK-Verstärkung abbilden zu können. Nachfolgend wird in Ein-

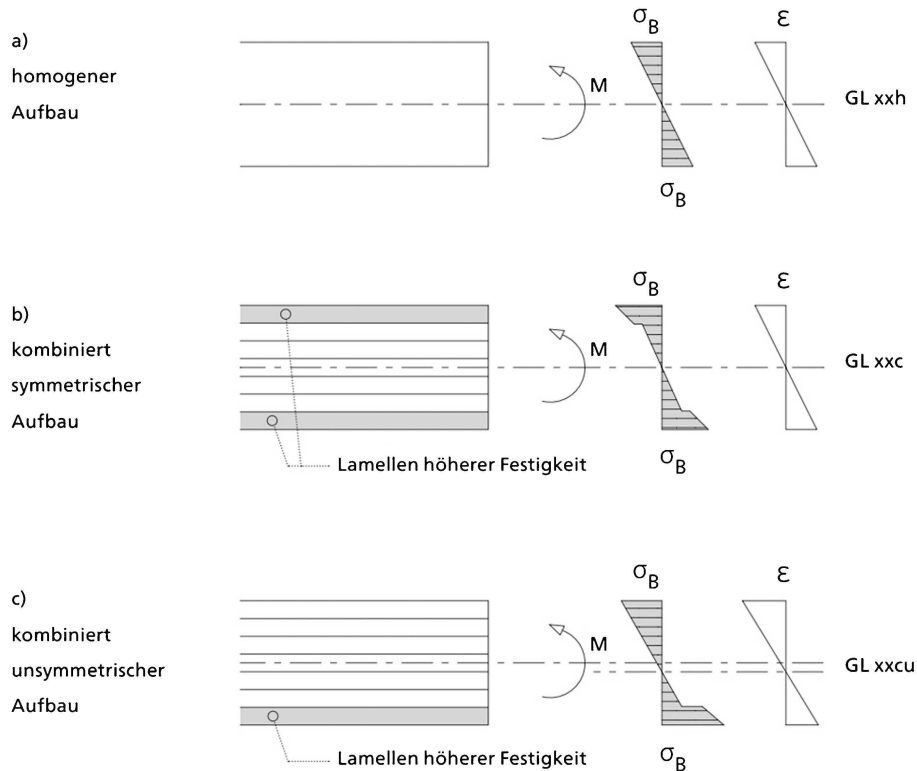


Bild 1 Biegespannungsverteilung in BS-Holz mit verschiedenem Aufbau ([1], Abbildung 3.6)
Bending stress distribution in GL-wood with different structures ([1], Abbildung 3.6)

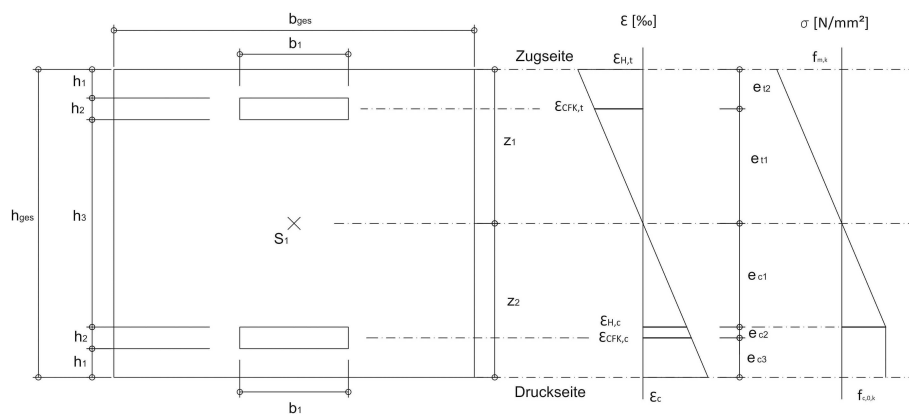


Bild 2 Dehnungs- und Spannungsverteilung im verstärkten Holzquerschnitt
Strain and stress distribution in the reinforced wood cross-section

zelschritten die prinzipielle Ermittlung des Widerstands auf reine Biegung beschrieben.

$$e_{t1} = z_1 - h_1 - \frac{h_2}{2} \quad (2)$$

a) Ermittlung der Lage des Schwerpunkts S als auch des Trägheitsmoments I bezogen auf den E-Modul des Holzquerschnitts:

Die Ermittlung hat mit einem geeigneten Programm zu erfolgen. Hieraus ergeben sich die Schwerpunktabstände z_1 und z_2 .

b) Ermittlung der Dehnungen auf der Zugseite (Gln. (1)–(3)):

$$\varepsilon_{H,t} = f_{m,k} \cdot \frac{k_h}{E_{\text{Holz}}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{CFK},t} = \varepsilon_{H,t} \cdot \frac{e_{t1}}{z_1} \quad (3)$$

c) Ermittlung der Spannungsanteile (Gln. (4), (5)):

$$\sigma_{\text{CFK},t} = \varepsilon_{\text{CFK},t} \cdot E_{\text{CFK}} \quad (4)$$

$$\sigma_{H,t} = f_{m,k} \cdot k_h \quad (5)$$

d) Ermittlung der Flächenanteile (Gln. (6), (7)):

$$A_{CFK,t} = b_1 \cdot h_2 \quad (6)$$

$$A_{H,t} = \frac{(b_{ges} \cdot z_1 - A_{CFK})}{2} \quad (7)$$

e) Da die Summe der inneren Kräfte null ergibt, kann der Tragwiderstand auf reine Biegung wie folgt ermittelt werden (Gl. 8)):

$$M_{Rk} = 2 \cdot \left(\sigma_{CFK,t} \cdot A_{CFK,t} \cdot e_{t1} + \sigma_{H,t} \cdot A_{H,t} \cdot z_1 \cdot \frac{2}{3} \right) \quad (8)$$

Zur Kontrolle kann noch die resultierende Kraft auf der Druckseite nach dem gleichen Vorgehen ermittelt werden, wobei gilt, dass $\varepsilon_{CFK,c}$ auf $\leq \varepsilon_{H,c}$ zu begrenzen ist.

2 Berechnungsbeispiel

Zur Veranschaulichung wird nachfolgend ein Berechnungsbeispiel dargestellt und ausgeführt. Für den Querschnitt wie in Bild 3 dargestellt wird der charakteristische Tragwiderstand M_{Rk} berechnet. Die Ermittlung der Schwerpunktlage S wurde mit einem geeigneten Querschnittsprogramm bestimmt. Als Trägheitsmoment bezogen auf den E-Modul des Holzquerschnitts ($E = 11.000 \text{ N/mm}^2$) ergab sich ein Wert von $I = 380,1 \text{ cm}^4$.

– Ermittlung der Dehnungen:

$$\varepsilon_{H,t} = 24 \cdot 1,1/11.000 = 2,40\text{‰}$$

$$e_{t1} = 33,0 - 6,6 - 5/2 = 23,9 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{CFK,t} = 2,40 \cdot 23,9/33,0 = 1,74\text{‰}$$

$$\varepsilon_c = 2,40/33,0 \cdot 38,0 = 2,76\text{‰}$$

$$\varepsilon_{H,c} = 21,5/11.000 = 1,95\text{‰}$$

$$e_{c1} = 38,0/2,76 \cdot 1,95 = 28,8 \text{ mm}$$

$$e_{c3} = 6,6 + 5/2 = 9,1 \text{ mm}$$

$$e_{c2} = 38,0 - 28,8 - 9,1 = 0,1 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{CFK,c} = 2,76/38,0 \cdot (28,8 + 0,1) = 2,10\text{‰}$$

$$> \varepsilon_{H,c} = 1,95\text{‰} \Rightarrow \varepsilon_{CFK,c} = 1,95\text{‰}$$

– Ermittlung der Spannungsanteile:

$$\sigma_{CFK,t} = 1,74 \cdot 130.000/1000 = 226,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{H,t} = 24 \cdot 1,1 = 26,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{CFK,c} = 1,95 \cdot 65.000/1000 = 126,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{H,c} = 21,5 \text{ N/mm}^2$$

– Ermittlung der Flächenanteile:

$$A_{CFK,t} = 25 \cdot 5 = 125 \text{ mm}^2$$

$$A_{H,t} = (83 \cdot 33,0 - 125)/2 = 1307 \text{ mm}^2$$

$$A_{CFK,c} = 25 \cdot 5 = 125 \text{ mm}^2$$

$$A_{H,c1} = 83 \cdot (9,1 + 0,1) - (25 \cdot 2,6) = 698,6 \text{ mm}^2$$

$$A_{H,c2} = (83 \cdot 28,8 - 25 \cdot 2,4)/2 = 1165,2 \text{ mm}^2$$

– Ermittlung des charakteristischen Tragwiderstands:

$$M_{Rk} = 2 \cdot \left(\frac{226,2 \cdot 125 \cdot 23,9}{+ 26,4 \cdot 1307 \cdot 33,0 \cdot \frac{2}{3}} \right) / 1000$$

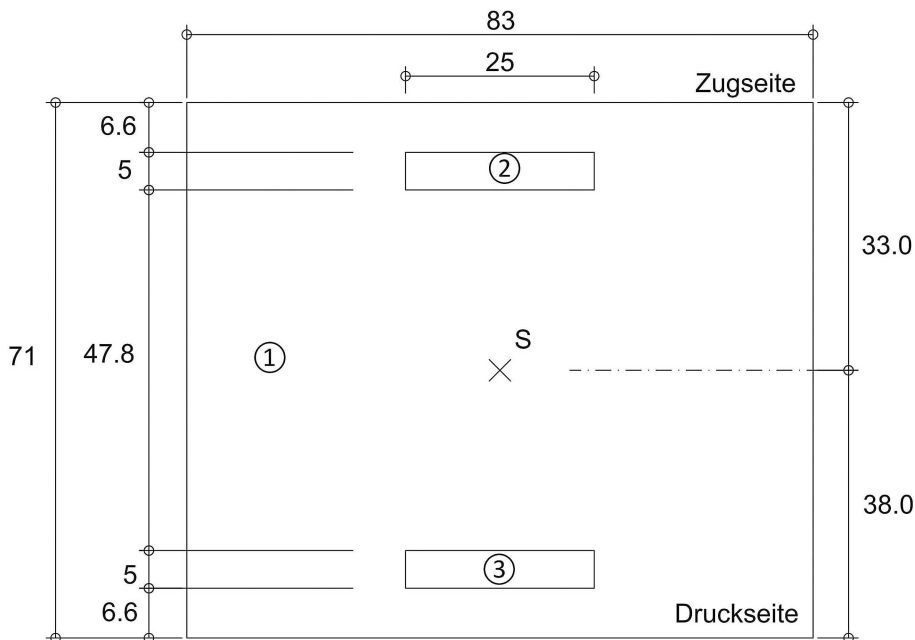
$$= 2870 \text{ kN mm}$$

– Kontrollrechnung mit Druckseite:

$$M_{Rk,c} = \left(\frac{126,8 \cdot 125 \cdot 28,9 + 21,5 \cdot 698,6}{\cdot 33,4 + 21,5 \cdot 1165,2 \cdot 28,8 \cdot \frac{2}{3}} \right) / 1000$$

$$M_{Rk,c} = 1441 \text{ kN mm} \cong 1435 \text{ kN mm} = M_{Rk}/2$$

$\Rightarrow$ somit Gleichgewicht erreicht $\Rightarrow$ OK



① Holz GL24: $E = 11\,000 \text{ N/mm}^2$ | $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ | $f_{c,0,k} = 21.5 \text{ N/mm}^2$

② CFK Lamelle Zug: $E = 130\,000 \text{ N/mm}^2$

③ CFK Lamelle Druck: $E = 65\,000 \text{ N/mm}^2$

Bild 3 Berechnungsbeispiel
Calculation example

Für den dargestellten Querschnitt ergibt sich ein Tragwiderstand M_{Rk} von 2870 kNm. Um den Bemessungswert des Widerstands zu erhalten, ist dieser noch mit dem Modifikationsbeiwert k_{mod} und dem Teilsicherheitsbeiwert γ_m zu beaufschlagen. Das entsprechende Bemessungskonzept ist in [4] dargestellt.

Der unverstärkte Querschnitt würde nur einen Tragwiderstand M_{Rk} von 1840 kNm bei einem Trägheitsmoment I von 247,6 cm⁴ aufweisen.

3 Verifizierung/Abgleich mit Bauteilversuchen

Zum Abgleich bzw. zur Verifizierung des dargestellten Berechnungsansatzes wurden Bauteilversuche am ift Rosenheim durchgeführt. Für die Versuchsdurchführung wurde die ift-Richtlinie HO-10/1 [5] herangezogen.

Der Querschnitt, wie unter Abschn. 2 dargestellt, wurde mittels eines Vier-Punkt-Biegeversuchs auf dessen Tragfähigkeit hin untersucht. Im gleichen Zug wurden die auftretenden Verformungen gemessen. Die Bewertung bzw. Auswertung erfolgte an jeweils sechs Probekörpern.

Für den unverstärkten bzw. reinen Holzquerschnitt ergab sich eine Tragfähigkeit M_{Rk} von 2621 kNm. Bei einer Berechnung gemäß [4] würde sich der Wert zu 1673 kNm (ohne Höhenbeiwert k_h) bzw. 1840 kNm (mit Höhenbeiwert $k_h = 1,1$) ergeben. Dies stellt eine Abweichung zwischen der berechneten und versuchstechnisch ermittelten Tragfähigkeit von 157 % bzw. 142 % dar.

Für den mit CFK-Lamellen verstärkten Querschnitt ergab sich die versuchstechnische Tragfähigkeit M_{Rk} zu 4997 kNm. Der unter Abschn. 2 berechnete Wert liegt bei 2870 kNm. Hier beträgt die Abweichung zwischen Versuch und Berechnung 174 %. Wird nun die Berechnung der Tragfähigkeit mit dem E-Modul $E_{0,05} = 5/6 \cdot E_{0,mean} = 9167 \text{ N/mm}^2$ durchgeführt, so ergibt sich die rechnerische Tragfähigkeit M_{Rk} zu 3142 kNm, was eine Abweichung von 159 % darstellen würde.

Somit liegt die Abweichung im Mittel bei ca. 160 % und stellt die übliche Differenz zwischen Berechnung und versuchstechnischer Ermittlung dar. Es kann damit bestätigt werden, dass der gewählte Berechnungsansatz ausreichend konservativ ist und für die Bemessung von CFK-verstärkten Holzkanteln für Fensterprofile herangezogen werden kann.

Zur prinzipiellen Modellbildung kann auf die Norm [2] DIN EN 14080 „Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen“ verwiesen werden. Hier wird unter 5.1.5.3 beschrieben, dass die Biegefestigkeit von kombiniertem Brettschichtholz anhand der Verbundtheorie aus den entsprechenden Werten für die verschiedenen Lamellenbereiche zu bestimmen ist. Diese Vorgehensweise wurde in dem beschriebenen Bemessungskonzept so berücksichtigt bzw. umgesetzt, wobei die Spannung auf der Druckseite durch die Druckfestigkeit in Faserrichtung des Holzes begrenzt wurde.

4 Konstruktive Hinweise

Zum Nachweis der Eignung zur Herstellung von lamellierten Holzkanteln für Fensterprofile ist eine Zertifizierung des Herstellungsbetriebs erforderlich. Diese kann durch geeignete Prüf- bzw. Zertifizierungsstellen erfolgen. Exemplarisch wird hier die ift-Richtlinie HO-10/1 [5] „Massiv, keilgezinkte und lamellierte Profile für Holzfenster – Anforderung und Prüfung“ genannt. Diese enthält neben konstruktiven Vorgaben zur Ausführung von lamellierten Holzprofilen für Fenster auch weiterführende Hinweise zur Durchführung von Versuchen und Überwachung der Herstellung von CFK-Holzverbundkanteln. Weitere bzw. ausführliche Vorgaben, Randbedingungen etc. zur Herstellung von Brettschichtholz und Balkenschichtholz gibt die Norm [2] DIN EN 14080. Auch hier werden div. detaillierte Vorgaben zu Ausführung, Herstellung und Überwachung dargestellt bzw. eingehend erläutert.

Bei der dargestellten Verstärkung von Holzkanteln wird von schlaff auf- bzw. eingeklebten CFK-Lamellen ausgegangen. Diese werden ebenfalls in den Holzverbundquerschnitt eingebettet und liegen nicht außenseitig. Somit stellt eine mögliche Delaminierung kein Hindernis dar, da keine Vorspannkkräfte am Endauflager des Holzverbundprofils verankert werden müssen. Zudem sind die Lamellen überdeckt und liegen nicht außenseitig an der Zug- bzw. Druckseite an. Sollten theoretisch vorgespannte CFK-Lamellen zum Einsatz kommen, auch wenn dies derzeit baupraktisch noch nicht untersucht wurde, wären gesonderte Maßnahmen bzw. weitere Prüfungen zu einer möglichen Delaminierung erforderlich.

CFK-Lamellen erfahren i.d.R. praktisch keine Deformationsänderungen infolge von Kriechen und Schwinden oder Quellen und Relaxation. Anders stellt sich dies bei Holz dar. Eine mögliche Dimensionsänderung des Holzanteils könnte zu einem Verlust der Vorspannung der eingebetteten CFK-Lamellen führen. Auch aus diesem Grund wird in dem vorgestellten Konzept nur von einer schlaffen Verstärkung ausgegangen. Somit haben die zuvor genannten Dimensionsänderungen keinen bzw. nur einen untergeordneten Einfluss auf die Tragfähigkeit des Holzverbundquerschnitts und können vernachlässigt werden.

5 Zusammenfassung

Das dargestellte Bemessungskonzept zur Ermittlung der Tragfähigkeit von CFK-verstärkten Holzkanteln für Fensterprofile soll die einfache und schnelle Bestimmung des Tragwiderstands M_{Rk} ermöglichen. Die Berechnungsansätze basieren auf bereits allgemein anerkannten

Grundlagen und wurden über die Dehnungs-Spannungs-Beziehung der Werkstoffkombination abgeleitet. Zur Verifizierung des Ansatzes wurden geeignete Bauteilver-suche durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass die Ermittlung der Tragfähigkeit ausreichend konservativ gewählt wurde und diese sich im üblichen Rahmen der Abweichung zwischen Berechnung und versuchstechnischer Ermittlung befindet. Bei der Herstellung der Verbundkante ist auf eine zertifizierte bzw. überwachte Ausführung zu achten, um die Qualität und Tragfähigkeit des Ver-

bundquerschnitts sicherstellen zu können. Die Einsatzmöglichkeit ist auf eine trockene Innenraumanwendung bzw. als Fensterprofile (Nutzungsklasse 1 gemäß [4]) zu beschränken, da derzeit keine Untersuchungen zu möglichen Feuchteeinwirkungen und deren Einfluss auf den Verbund vorliegen. Bei einer fachgerechten Ausführung besteht somit die Möglichkeit, die Querschnitte von Holzfenstern deutlich zu verkleinern bzw. zu optimieren und somit den wirtschaftlichen als auch den gestalterischen Anforderungen Rechnung zu tragen.

Literatur

- [1] Informationsdienst Holz (2022) *Herstellung und Eigenschaften von geklebten Vollholzprodukten*. 5. Aufl. Düsseldorf: Informationsverein Holz e.V.
- [2] DIN EN 14080 (2013) *Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen*. Berlin: Beuth.
- [3] Brunner, M. (2008) *Möglichkeiten der Verstärkung von Holzbalken mit vorgespannten CFK-Lamellen*. Holzbautag Biel 2008. Biel, 8. Mai 2008.
- [4] DIN EN 1995-1-1 (2010) *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth.
- [5] ift-Richtlinie HO-10/1 (2002) *Massive, keilgezinkte und lamellierte Profile für Holzfenster – Anforderungen und Prüfung*.

Autor:in

Dipl.-Ing. (FH) Rolf Hofstetter (Korrespondenzautor:in)
 rolf.hofstetter@bastho.de
 BaStHo GbR
 Tragwerksplanung für Hoch-, Fassaden- und Membranbau
 Marktplatz 25
 85570 Markt Schwaben

Zitieren Sie diesen Beitrag

Hofstetter, R. (2024) *Bemessung von CFK-verstärkten Holzkanteln für Fensterprofile*. Bautechnik 101, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 1, S. 33–37.
<https://doi.org/10.1002/bate.202300086>