

# Wind-Ertüchtigung statisch ausgenutzter Hallendächer zur Aufnahme angestellter Solarpaneele mit innovativen CFK-Verstärkungssystemen

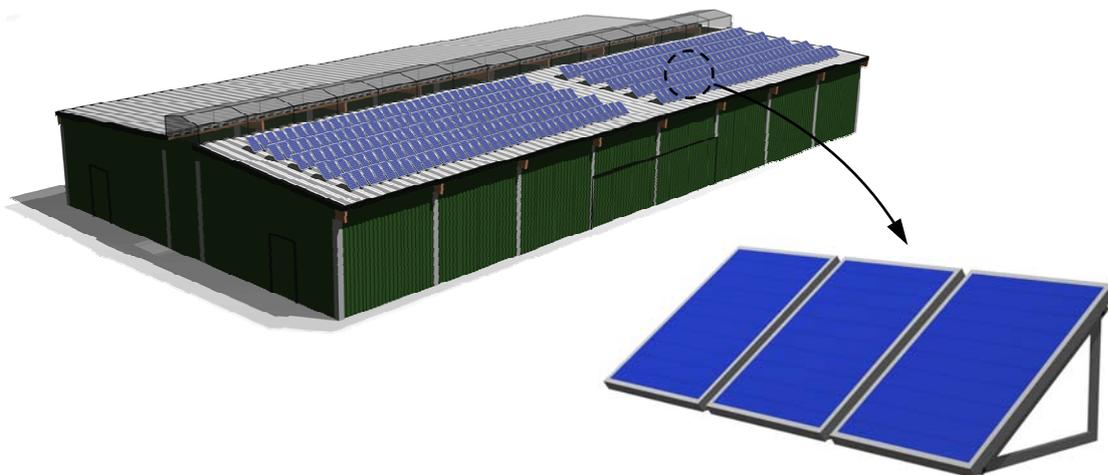
Henning Kaiser  
Bernd Hillemeier

Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Baustoffe und Baustoffprüfung  
Sekt. TIB 1-B4  
Gustav-Meyer-Allee 25  
13355 Berlin

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert (Aktenzeichen: Z 6 – 10.08.18.7-07.26/ II 2 – F20-07-10). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

## 1. Ziel der Forschungsaufgabe

Infolge stetig ansteigender Verkehrslasten, klimatischer Veränderungen, sowie der Installation innovativer Techniken, wie beispielsweise der vermehrten Nutzung bestehender Dachflächen durch Sonnenkollektoren, werden unsere Bauwerke zukünftig immer größeren Beanspruchungen ausgesetzt. Für die verstärkte Nutzung der Photovoltaik bieten sich beispielsweise riesige Dachflächen von Hallen, Versammlungsstätten oder Einkaufszentren an, deren Tragkonstruktion vielfach in Brettschichtholzbauweise (BSH) ausgeführt ist. Da auf gering geneigten Hallendächern in der Regel ein Anstellen der Paneele von rund 30 bis 35 Grad gefordert ist, werden die Windangriffsfläche und damit die Windbelastung für das Tragwerk erheblich vergrößert. Für das statische System folgt hieraus nicht selten die Notwendigkeit einer Anpassung an die neue Lastsituation. Abbildung 1 zeigt ein typisches Nutzungskonzept.



**Abbildung 1:** Aufständerung von Solarkollektoren auf Hallendächern

Eine Verstärkung mit konventionellen Materialien wie beispielsweise Stahl oder Holz ist aufgrund des hohen Eigengewichts bzw. der großen erforderlichen Querschnittsflächen in vielen Situationen jedoch mit erheblichen Einschränkungen verbunden. Für die Ertüchtigung bestehender Bausubstanz sind deshalb in der Vergangenheit vornehmlich kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zum Einsatz gekommen, deren Vorzüge sich in den herausragenden mechanischen Eigenschaften, der exzellenten Dauerhaftigkeit, sowie des geringen Eigengewichts ausdrücken.

Die bauaufsichtlich zugelassene Anwendung von CFK zur statischen Verstärkung ist in Deutschland bislang ausschließlich Stahlbetonbauwerken vorbehalten (z. B. [Deu02, Deu04]), wo sie mittlerweile zum Stand der Technik gezählt werden kann. In der Vergangenheit wurde jedoch vielfach nachgewiesen, dass auch die Verstärkung von Holz mittels CFK zu einer erheblichen Verbesserung des Tragverhaltens führen kann [Tri97, Lug01, Bla03, Bru05, Mic05, Joh07].

Da in Deutschland bislang keine verbindlichen Regelwerke für die Verstärkung von Holzbauteilen mittels CFK existieren, bedingt die statische Ertüchtigung solargenutzter Hallendächer in BSH-Bauweise stets eine Zustimmung im Einzelfall. Dieser Umstand führt nicht selten dazu, dass die Umsetzung eines solarenergetischen Nutzungskonzepts aufgrund enger Kosten- bzw. Terminvorgaben verworfen werden muss. Durch die Einführung bauaufsichtlich zugelassener Regelwerke könnten somit günstigere Rahmenbedingungen geschaffen werden, was jedoch zugleich die Erarbeitung allgemeingültiger technischer Standards sowie der zugehörigen Bemessungsgrundlagen für CFK-verstärkte BSH-Träger erfordert. Aufgrund zusätzlicher Horizontallasten aus Wind kann aus statischer Sicht außerdem die zusätzliche Aussteifung der Dachkonstruktion gefordert sein. Hierfür könnten z. B. Aussteifungsverbände mit leichten und hochfesten CFK-Zugbändern zum Einsatz kommen.

In der vorliegenden Arbeit sollte die Anwendbarkeit von CFK-Lamellen zur statischen Verstärkung von Brettschichtholzbindern experimentell und analytisch untersucht werden. Des Weiteren wurde ein zur Aussteifung der Dachebene anwendbares Verstärkungskonzept vorgeschlagen und experimentell erprobt. Durch die gezielte Entwicklung konnte somit ein für Holzbinderhallen bislang nicht verfügbares Konzept zur statischen Ertüchtigung auf Grundlage kohlenstoffaserverstärkter Werkstoffe vorgelegt werden.

## **2. Durchführung der Forschungsaufgabe**

Aufbauend auf den Erfahrungen früherer Arbeiten [Bla01, Sch05, Kli08] sollte im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen vorrangig das Verfahren „in Schlitze geklebte CFK-Lamelle“ zum Einsatz kommen. Neben brandschutztechnischen Aspekten sowie eines vergleichsweise geringeren Eingriffs in das optische Erscheinungsbild kann durch das Einschlitzverfahren insbesondere eine verbesserte Übertragung der Verbundspannungen erzielt werden.

Für die Forschungsaufgabe wurden stichpunktartig folgende Arbeitspunkte definiert:

- Experimentelle und analytische Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen in Schlitze geklebten CFK-Lamellen und Holz
- Herleitung einer Bemessungsvorschrift zur Berechnung der maximal über Klebeverbund verankerbaren Verbundbruchkraft
- Experimentelle und analytische Untersuchung des Tragverhaltens CFK-Verstärkter Biegeträger aus Brettschichtholz
- Erarbeitung eines praxistauglichen Bemessungskonzepts für BSH-Träger
- Untersuchung eines Verstärkungskonzepts zur Aussteifung des Dachebene

### ***Verbundversuche***

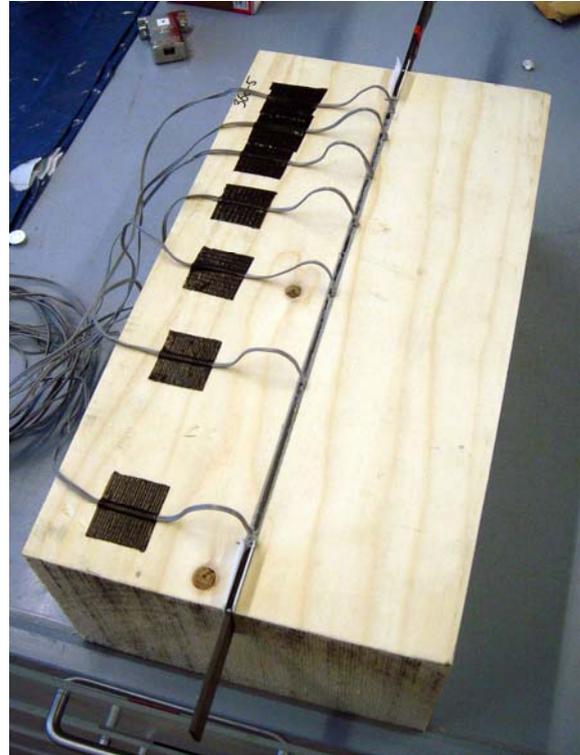
Für die experimentelle Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen CFK-Lamelle und Holz wurde in Anlehnung an frühere Forschungsarbeiten (z. B. [Hol94, Bla01, Lug01, Bla03]) ein spezieller Auszugversuch unter Verwendung eines Druck-Zug-Körpers entwickelt. Um verschiedene Einflussfaktoren wie beispielsweise die Verbundlänge  $l_v$ , die Schlitz- und Lamellenbreite  $b_s$  bzw.  $b_L$ , sowie hygrothermische Einflüsse zu untersuchen, wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit insgesamt 122 Einzelversuchen zusammengestellt. Eine Übersicht der Versuchsparameter kann Tabelle 1 entnommen werden. Der grundsätzliche Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

Zur Herstellung der Verbundprobekörper wurde Fichtenholz der Sortierklasse C24 sowie Kiefern-Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24h gewählt. Als Verstärkungsmaterialien kamen ausschließlich unidirektionale CFK-Lamellen vom Typ CarboDur S der Firma Sika Deutschland GmbH mit einer

Stärke von 2,5 mm sowie mit Breiten von 15 mm (S1.525/60) bzw. 20 mm (S2.025/80) zur Anwendung. Die Verklebung erfolgte mit Hilfe der Klebstoffsysteme Sikadur 30 DUE und Sikadur 330 des gleichen Herstellers. Beide Systeme unterscheiden sich insbesondere in den Viskositäts- und Steifigkeitseigenschaften. Die wichtigsten Kennwerte der Verstärkungsmaterialien sind in Tabelle 2 wiedergegeben.



**Abbildung 2:** Auszugversuch am Holz/CFK-Verbundprobekörper



**Abbildung 3:** Verbundprobekörper mit DMS

Um das Verbundverhalten der CFK-Lamelle sowohl experimentell als auch rechnerisch nachzuvollziehen, wurden an ausgesuchten Probekörpern bis zu acht Dehnungsmessstreifen (DMS) entlang der Klebefuge angebracht (vgl. Abbildung 3). Des Weiteren wurde die Relativverschiebung (Schlupf) zwischen Holz und CFK-Lamelle am lastseitigen und lastfreien Verklebende mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer aufgezeichnet. Anhand der gemessenen Schlupf- bzw. Dehnungswerte konnten anschließend die Verbundschubspannungs-Relativverschiebungs-Beziehungen, im Folgenden als  $\tau(s)$ -Beziehung bezeichnet, analytisch ermittelt werden.

**Tabelle 1:** Übersicht der insgesamt 122 Auszugversuche

Probenumfang	Verbundlänge $l_v$ [mm]	Schlitzbreite $b_s$ [mm]	Beschreibung
21	70	4,0 - 6,3	Vorversuche zur Erprobung der Messeinrichtungen sowie zur Gegenüberstellung eingeschlitzte / oberflächige Verklebung
45	50 - 1.000	4,5	Einfluss der Verbundlänge, Bestimmung der Dehnungsverteilung über die Verbundlänge mittels DMS
10	100 - 300	9,0	Einfluss der Schlitzbreite
6	100	4,5	Abstand zum Bauteilrand (Randleiste: 10 bis 40 mm)
9	100 - 300	4,5	Materialeinfluss Fichten-KVH / Kiefern-BSH
15	100 - 300	4,5	Hygrothermische Einflüsse (70°C, 95% r.F.)
16	100 - 300	3,2 - 4,5	Modellierung des Verbundverhaltens

**Tabelle 2:** Mechanischen Eigenschaften der Verstärkungsmaterialien nach [Sik09a, Sik09b, Sik09c]

Eigenschaften	Sika® CarboDur S	Sikadur® 30 DUE	Sikadur® 330
Zugfestigkeit	> 2.800 N/mm <sup>2</sup>	≥ 21 N/mm <sup>2</sup>	30 N/mm <sup>2</sup>
Elastizitätsmodul	170.000 N/mm <sup>2</sup>	11.200 N/mm <sup>2</sup>	4.500 N/mm <sup>2</sup>

### Modellierung des Verbundverhaltens

Mit Hilfe der Differentialgleichung des verschieblichen Verbunds (DGLvV) sollte anschließend das im Experiment beobachtete Trag- und Verformungsverhalten der in Holz eingeschlitzte verklebten CFK-Lamellen rechnerisch nachvollzogen werden. Zu diesem Zweck wurden zunächst die  $\tau(s)$ -Beziehungen durch Diskretisierung der DGLvV ermittelt. Anschließend wurden die  $\tau(s)$ -Beziehungen durch einen geeigneten Verbundansatz substituiert und die DGLvV mit Hilfe eines numerische Approximationsverfahrens gelöst.

Im Rahmen einer Parameterstudie wurden anschließend die maßgebenden Einflussfaktoren für die maximal über Klebeverbund verankerbare Verbundbruchkraft untersucht. In Abstimmung mit den experimentellen Ergebnissen konnte hieraus eine für die Praxis anwendbare Bemessungsgleichung erarbeitet werden.

### Trägerversuche

Vor dem Hintergrund der Auszugergebnisse wurde anschließend das Tragverhalten CFK-verstärkter Brettschichtholzbinders untersucht. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 26 keilgezinkte Träger aus Kiefern-BSH der Festigkeitsklasse GL24h mit einem Querschnitt von 120 x 360 mm und einer Spannweite von 5.500 mm im 4-Punkt-Biegeversuch getestet. Die Verstärkung der Träger erfolgte überwiegend unter Verwendung der CFK-Lamelle Sika CarboDur S2.025/80. Zu Vergleichszwecken wurde an einigen Trägern zusätzlich auch die für oberflächige Verklebungen entwickelte CFK-Lamelle vom Typ Sika CarboDur S812 mit einer Breite von 80 mm und einer Stärke von 1,2 mm eingesetzt.

**Tabelle 3:** Übersicht der Trägerversuche

Versuche	n	Lamellenlänge $l_L$	Lamellenfläche $A_L$	Verstärkungsgrad $\rho = A_L/A_H$	Beschreibung
trv_REF	7	-	-	0,00%	Referenzversuche (unverstärkt)
trv_0,22	2	5.300 mm	96 mm <sup>2</sup>	0,22%	oberflächige Verstärkung (S812)
trv_0,23	3	5.300 mm	100 mm <sup>2</sup>	0,23%	seitliche Einschlitzung (S2.025/80)
trv_0,35	3	5.300 mm	150 mm <sup>2</sup>	0,35%	unterseitige Einschlitzung (S2.025/80)
trv_0,35_VGS	3	5.300 mm	150 mm <sup>2</sup>	0,35% + VGS	unterseitige Einschlitzung (S2.025/80) plus Vollgewindeschrauben Ø8mm
trv_0,35_K	3	3.120 mm	150 mm <sup>2</sup>	0,35% (kurz)	unterseitige Einschlitzung (S2.025/80), lokale Verstärkung in Trägermitte
trv_0,81	2	5.300 mm	350 mm <sup>2</sup>	0,81%	unterseitige + seitliche Verstärkung (S2.025/80)
trv_0,91	3	5.300 mm	392 mm <sup>2</sup>	0,91%	oberflächige Verstärkung (S812) + seitliche Verstärkung (S2.025/80)

Eine Zusammenstellung der maßgebenden Versuchsparameter ist in Tabelle 3 wiedergegeben. Um die Effektivität der Verstärkung bewerten zu können, wurden vorab 7 Biegeversuche an unverstärkten Referenzversuche durchgeführt. Im Anschluss an diese Untersuchungen wurden Verstärkungsgrade zwischen 0,22% und 0,91% bezogen auf die Fläche des Holzquerschnitts untersucht. Die Lamellen

wurden hierbei stets bis 100 mm vor die Endauflager geführt. Bei der Versuchsreihe trv\_0,35\_K wurden die Auswirkungen einer lokalen Verstärkung im Bereich der maximalen Biegebeanspruchung untersucht, wodurch erheblich größere Verbundspannungen im Endverankerungsbereich zu erwarten waren. Der Nutzen einer zusätzlichen Schubverstärkung wurde anhand der Reihe trv\_0,35\_VGS erprobt, wobei je zwei nebeneinander angeordnete Vollgewindeschrauben (VGS) vom Typ ASSY plus der Firma Würth mit einem Durchmesser von 8 mm im Abstand  $d = h = 360$  mm entlang der gesamten Spannweite verschraubt wurden.

### Stochastische Simulation des Tragverhaltens

Bedingt durch den vergleichsweise hohen Material- und Herstellungsaufwand konnte nur eine begrenzte Anzahl an großmaßstäblichen Bauteilversuchen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurde ein stochastisches Rechenmodell zur computergestützten Simulation zusätzlicher Verstärkungskonfigurationen entwickelt. Um die Brauchbarkeit des Rechenmodells zu bewerten, wurden mit Hilfe eines auf dem Monte-Carlo-Prinzip basierenden Computerprogramms nach Abbildung 4 zunächst die experimentellen Versuchsreihen nachgerechnet. Im Zuge einer anschließenden Parameterstudie wurden in über 120.000 Simulationsrechnungen unter anderem die Einflüsse aus den Materialeigenschaften der Holz- und CFK-Werkstoffe sowie aus den Abmessungen der Brett- und CFK-Lamellen auf das Biegetragverhalten untersucht.

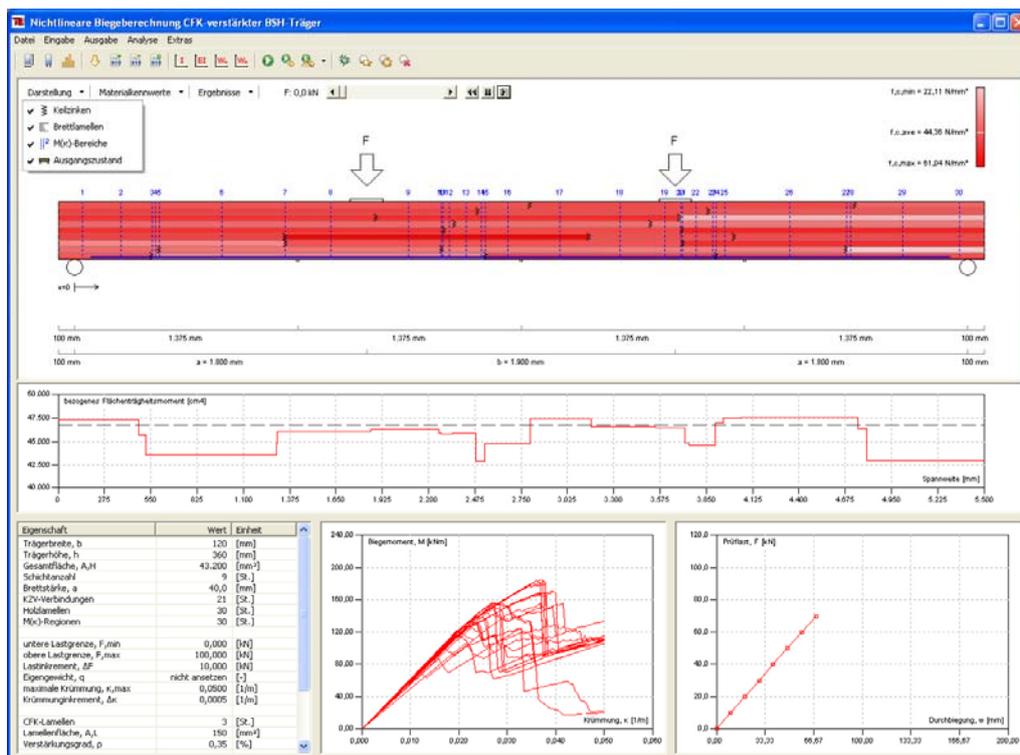


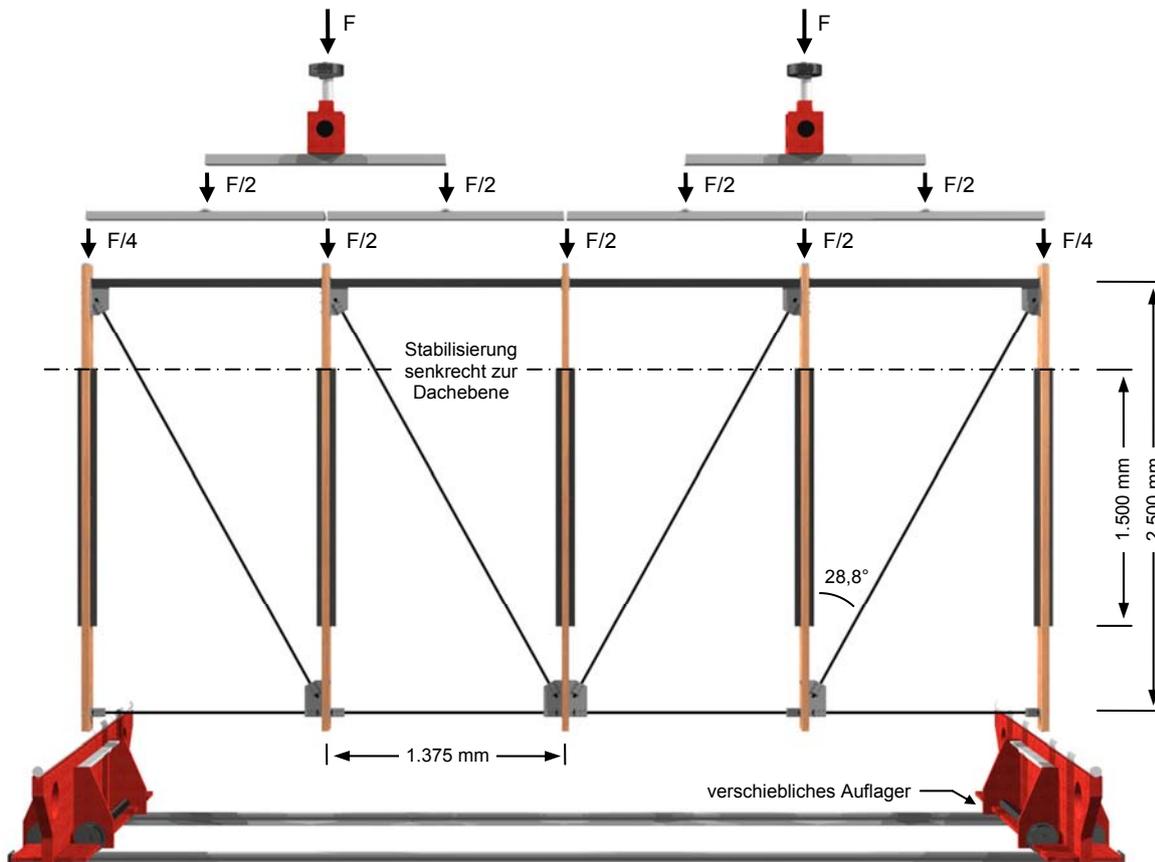
Abbildung 4: Software für stochastische Simulationsrechnungen CFK-verstärkter BSH-Träger

### Versuche zur Dachaussteifung

Im Rahmen einer abschließenden Modellstudie wurde außerdem die Anwendbarkeit von CFK-Lamellen zur Herstellung leichter und hochfester Aussteifungssysteme für Hallendächer in Brett-schichtholzbauweise untersucht. Als Grundlage dieser Versuchsreihe dienten die statischen Berechnungen einer im Vorfeld durchgeführten Wirtschaftlichkeitsstudie an der Technischen Universität Berlin [Hil07]. In Anlehnung an das hierin betrachtete Hallentragwerk wurden die für den Lastabtrag maßgebenden Konstruktionselemente unter Berücksichtigung von Ähnlichkeitsbedingungen in einen

Modellversuch im Maßstab 1:6 überführt. Mit Hilfe einer versuchsbegleitenden Tragwerksanalyse wurde das im Experiment beobachtete Tragverhalten des Gesamtsystems rechnerisch nachvollzogen.

Um die Komplexität des Modells und den damit verbundenen experimentellen Aufwand zu minimieren und gleichzeitig einen hinreichend großen Modellmaßstab zu ermöglichen, wurde das aus ursprünglich 11 Feldern bestehende Aussteifungssystem in einen 4-Feld-Verband umgewandelt. Um ähnliche Spannungsverteilungen zu erhalten, wurden die Werkstoffe des Modells entsprechend den in der Originalstatik vorgesehenen Materialien gewählt. Abbildung 5 zeigt den grundsätzlichen Versuchsaufbau mit der anhand von Stahltraversen realisierten Windlastverteilung.



**Abbildung 5:** Modellversuch zur Untersuchung von Aussteifungsverbänden in der Dachebene

### 3. Zusammenfassung der Ergebnisse

#### Herleitung des Verbundmodells

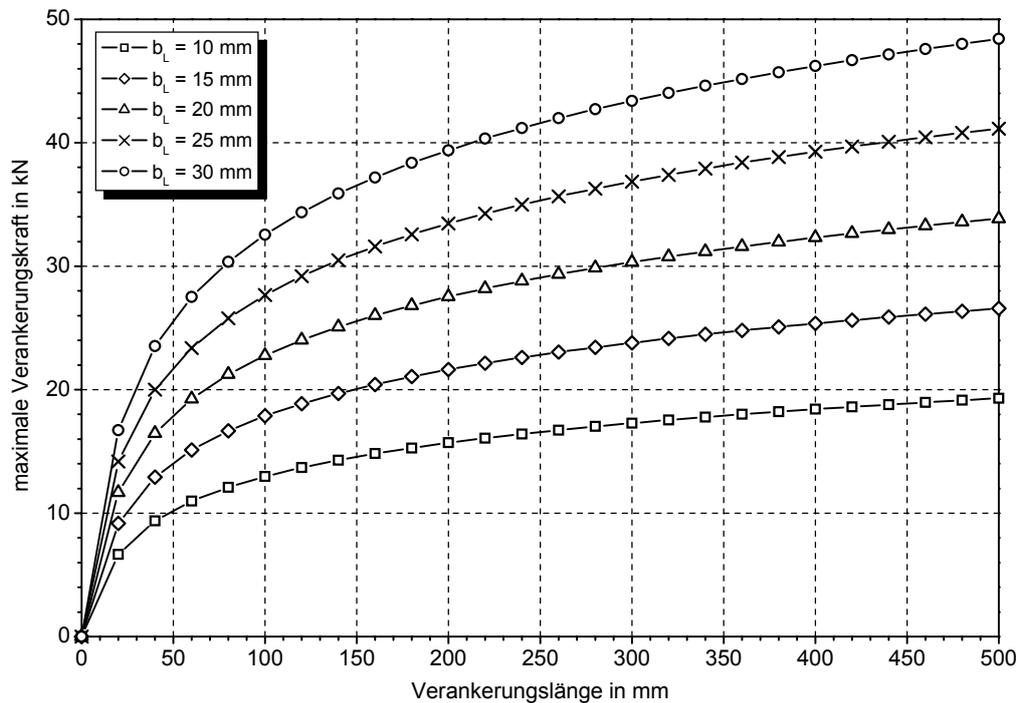
Auf Grundlage der analytischen und experimentellen Kraftverläufe des Auszugsversuchs konnte nachgewiesen werden, dass die rechnerische Abbildung des Verbundverhaltens nur mit Hilfe eines über die Klebelänge veränderlichen Verbundansatzes erfolgen kann. Die Verzerrungen zwischen den Füge-teilen dürfen dabei nicht allein der Klebefuge zugewiesen werden. Aufgrund der vergleichsweise geringen Schubsteifigkeit des Holzes würde diese bei Betonverklebungen durchaus zulässige Vereinfachung zu fehlerhaften Kraftverläufen führen. Für die maximal über Klebeverbund verankerbare Lamellenkraft wurde in Abhängigkeit der Verbundlänge  $l_v$  folgende Bemessungsvorschrift hergeleitet:

$$F_{v,k} = U_{ad} \cdot t_L^{0,325} \cdot [0,110 \cdot \ln(l_v) - 0,143] \quad \text{für } l_v \geq 50 \text{ mm}$$

mit:

$$U_{ad} = t_L + 2 \cdot b_L + 4 \cdot t_{ad}$$

Abbildung 6 zeigt die Verläufe der charakteristischen Verbundbruchlast  $F_{v,k}$  in Abhängigkeit der Verbundlänge  $l_v$  und Lamellenbreite  $b_L$  im Fall einer Lamellenstärke  $t_L = 2,5$  mm sowie einer empfohlenen Klebschichtbreite von  $t_{ad} = 1,0$  mm.



**Abbildung 6:** Charakteristische Verbundbruchlast in Abhängigkeit der Lamellenbreite ( $t_L = 2,5$  mm)

### Bestimmung des Biegetragverhaltens

Im Rahmen der 4-Punkt-Biegeversuche wurde gezeigt, dass die Tragfähigkeit klebarmierter BSH-Träger bereits bei moderaten Verstärkungsgraden von rund 0,35% signifikant gesteigert werden kann. Durch die Verstärkung kommt es gleichzeitig zu einer verbesserten Ausnutzung der Druckzone sowie einer Erhöhung der Biegesteifigkeit. Gegenüber der oberflächigen Applizierung konnte für Träger mit in Schlitze geklebten Lamellen im Versagensfall ein tendenziell günstigeres Bruchverhalten und eine höhere Resttragfähigkeit festgestellt werden. Das Versagen ging dabei letztendlich vorwiegend von Keilzinken (KZV) und/oder Wuchsunregelmäßigkeiten in der Biegezugzone aus.

Mit Hilfe der stochastischen Simulationssoftware wurden zunächst die experimentellen Versuchsreihen nachgerechnet. Dabei konnte eine hinreichende Übereinstimmung zwischen dem simulierten Tragverhalten und den Versuchsergebnissen festgestellt werden. Im Zuge der anschließenden Parameterstudie konnten teils deutliche Abhängigkeiten des Tragverhaltens vom Verstärkungsgrad, von der Lamellenlänge, sowie von der Lamellensteifigkeit nachgewiesen werden. Anhand der Ergebnisse ließ sich für die Festigkeitsklasse GL24h u. a. ein oberer Grenzwert des Verstärkungsgrads von rund 1,5% ableiten. Des Weiteren muss bei lokalen Verstärkungen zunehmend mit dem Versagen der Endverankerung sowie der Überschreitung der Scherfestigkeit des Holzes unmittelbar hinter dem Lamellenende gerechnet werden. Für CFK-Lamellen mit einem E-Modul oberhalb 250.000 N/mm<sup>2</sup> kann es darüber hinaus aufgrund der reduzierten Bruchdehnung zu einem frühzeitigen Zugversagen der Klebeverstärkung kommen.

Demgegenüber wurden für die Länge der Brettlamellen und das Entfestigungsverhalten des Holzes unter Druckbeanspruchung nur vergleichsweise geringe Abhängigkeiten festgestellt. Aufgrund des zu vernachlässigenden Einflusses des Entfestigungsverhaltens wurde bei der Herleitung der relevanten Bemessungsgleichungen ein bilinearer Spannungs-Dehnungs-Verlauf mit konstantem Spannungsplateau zugrunde gelegt. In Anlehnung an die Ergebnisse der experimentellen und simulierten Untersuchungen konnten letztlich die maßgebenden rechnerischen Nachweise zur Bemessung CFK-verstärkter Brettschichtholzträger hergeleitet werden. Hierzu zählen:

- Berechnung des effektiven Verstärkungsgrads  $\rho_{\text{eff}}$  in Abhängigkeit der zulässigen Grenzdehnung an der Trägerunterkante unter Berücksichtigung des vorherrschenden Spannungszustands in der Druckzone (elastisch bzw. plastisch)
- Biegebemessung bei elastischer bzw. plastischer Druckzone
- Berechnung der Biegesteifigkeit nach elastischer Verbundtheorie
- Nachweis der Verbundspannungen (Endverankerungsnachweis)
- Nachweis der Holzschubspannungen unmittelbar hinter dem Lamellenende

### **Wind-Aussteifung der Dachebene**

Die Ergebnisse des im Modellmaßstab durchgeführten Aussteifungsversuchs bestätigen, dass die aus den Kollektorflächen entstehenden horizontalen Windlasten durch das in dieser Arbeit vorgeschlagene Aussteifungssystem aufgenommen werden können. Besondere Aufmerksamkeit erfordern hierbei die Klemmung der CFK-Zugbänder sowie der Kraftübertrag zwischen Klemmvorrichtung und Holzbinder. Aufgrund des orthotropen Materialverhaltens stellt die Begrenzung der zulässigen Querpressung spezielle Anforderungen an das gewählte Klemmsystem. Mit der gezielten Profilierung der Klemmplatten kann einer Überschreitung der zulässigen Querpressung an den Lamellenkanten entgegengewirkt werden. Eine Verbesserung der Schubübertragung zwischen Klemmanschluss und Holzträger kann beispielsweise durch die Verwendung verzahnter Scheibendübel erzielt werden.

### **Ausblick**

Im Hinblick auf die baupraktische Anwendung im Holzhallenbau unterstreichen die Ergebnisse das enorme Anwendungspotential kohlenstofffaserverstärkter Werkstoffe. Neben den herausragenden mechanischen Eigenschaften weist das Material eine gute chemische Beständigkeit bei gleichzeitig geringem Eigengewicht auf. Durch die intensive Erforschung und den langjährigen baustellenseitigen Einsatz der Systemkomponenten sind die grundlegenden Voraussetzungen zur Etablierung des Verfahrens im konstruktiven Holzbau gegeben.

Um die mit dieser Arbeit vorgelegten Erkenntnisse zum Kurzzeitverhalten zu ergänzen, sollten nach Ansicht der Autoren weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden. So liegen für den hier betrachteten Anwendungsfall „in Holz eingeklebte CFK-Lamellen“ beispielsweise nur eingeschränkt Versuchsreihen zur Dauerhaftigkeit unter statischer und dynamischer Beanspruchung sowie unter Feuchteeinwirkung vor. Die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Prinzips würde durch weiterführende Versuchsreihen wesentlich erhöht.

### **Literatur**

- [Bla01] Blaschko, M. A.: Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit in Schlitze eingeklebten CFK-Lamellen, Dissertation: Technische Universität München, 2001.
- [Bla03] Blaß, H. J.; Romani, M.; Schmid, M.: Optimierung von Verbundträgern aus Brettschichtholz mit Verstärkungen aus Faserverbundkunststoffen. Forschungsbericht: Technische Hochschule Karlsruhe, 2003.
- [Bru05] Brunner, M.; Schnueriger, M.: Timber Beams Strengthened by Attaching Prestressed Carbon FRP Laminates with a Gradianted Anchoring Device. International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, Hong Kong, China, 2005.
- [Deu02] Deutsches Institut für Bautechnik: Zulassung Z-36.12-29, Verstärkung von Betonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen "Sika CarboDur". Berlin, 2002.
- [Deu04] Deutsches Institut für Bautechnik: Zulassung Z-36.12-64, Verstärken von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch in Schlitze eingeklebte MC-DUR CFK-Lamellen, Berlin, 2004.
- [Hil07] Hillemeier, B.: Wind-Ertüchtigung statisch ausgenutzter Hallendächer zur Aufnahme angestellter Solarpaneele mit innovativen CFK-Verstärkungssystemen, Vorstudie zum

BBR-Forschungsvorhaben Z6 - 10.08.18.7-07.26: Technische Universität Berlin, 2007 (unveröffentlicht).

- [Hol94] Holzenkämpfer, P.: Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile, Dissertation: Technische Universität Braunschweig, 1994.
- [Joh07] Johnsson, H.; Blanksvärd, T.; Carolin, A.: Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. *Materials and Structures*, 40(1): 47-56, 2007.
- [Kli08] Kliger, R.; Al-Emrani, M.; Johansson, M.; Crocetti, R.: Strengthening timber with CFRP or steel plates - short and long-term performance. *World Conference on timber engineering*, Miyazaki, Japan, 2008.
- [Lug01] Luggin, W. F.; Bergmeister, K.: Vorspannung mit karbonfaserverstärkten Kunststoffen im konstruktiven Holzbau. *Bautechnik*, 78(8): 556-570, 2001.
- [Mic05] Micelli, F.; Scialpi, V.; La Tegola, A.: Flexural Reinforcement of Glulam Timber Beams and Joints with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rods. *Journal of Composites for Construction*, 9(4): 337-347, 2005.
- [Sch05] Schober, K. U.; Rautenstrauch, K.: Experimental investigation on flexural strengthening of timber structures with CFRP. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, Hong Kong, China, 2005.
- [Sik09a] Sika Deutschland GmbH: Sika<sup>®</sup> CarboDur-Lamellen, Pultrudierte CFK-Lamellen für die Bauteilverstärkung. Stuttgart, 2009.
- [Sik09b] Sika Deutschland GmbH: Sikadur<sup>®</sup>-30 DUE, 2-Komponenten-Klebemörtel. Stuttgart, 2009.
- [Sik09c] Sika Deutschland GmbH: Sikadur<sup>®</sup>-330, Armierungskleber. Stuttgart, 2009.
- [Tri97] Triantafillou, T. C.: Shear Reinforcement of Wood using FRP Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(2): 64-69, 1997.