

Bernd Hillemeier, Henning Kaiser

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

F 2787

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8618-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



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

Projektleiter: Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Henning Kaiser, M.S.

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.

Berlin, Dezember 2009

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
2. Ausgangssituation	3
2.1 Statische Anforderungen solargenutzter Hallendächer	4
2.1.1 Zusatzlasten aus Eigengewicht	4
2.1.2 Zusatzlasten aus Wind	4
2.1.3 Zusatzlasten aus Schnee	5
2.1.4 Übersicht der Gesamtbeanspruchung	6
2.2 Wirtschaftlichkeit möglicher Ertüchtigungsmaßnahmen	7
2.3 Zielsetzung	8
3. Faserverbundwerkstoffe im konstruktiven Ingenieurbau	11
3.1 Faserverstärkte Kunststoffe	12
3.1.1 Erzeugnisformen	12
3.1.2 Eigenschaften	13
3.2 Anwendungen im Stahlbetonbau	14
4. Mechanische Eigenschaften der Werkstoffe	17
4.1 Holzwerkstoffe	17
4.1.1 Konstruktionsvollholz und Brettschichtholz	17
4.1.2 Mechanische Eigenschaften	18
4.1.3 Hygrothermische Eigenschaften	20
4.1.4 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung	21
4.2 Epoxidharzklebstoffe	23
4.2.1 Allgemeine Eigenschaften	24
4.2.2 Mechanische Eigenschaften	25
4.2.3 Hygrothermische Eigenschaften	26
4.2.4 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung	27
4.2.5 Bruchverhalten von Klebungen	28
4.3 CFK-Lamellen	29
4.3.1 Mechanische Eigenschaften	30
5. Stand der Forschung im konstruktiven Holzbau	33
5.1 Biegeverstärkungen	36
5.2 Schubverstärkungen	40
5.3 Modellierung des Tragverhaltens	45
5.3.1 Biegetragfähigkeit unverstärkter Träger	45

5.3.2	Biegetragfähigkeit von Verbundträgern	52
5.3.3	Schubverstärkungen	57
5.3.3.1	Flächige Verstärkungen.....	58
5.3.3.2	Stabförmige Verstärkungen.....	62
5.4	Modellierung des Verbundverhaltens	64
5.4.1	Klebung mit Stahl- und FVK-Lamellen	65
5.4.2	Holzschrauben	72
5.4.3	Eingeklebte Gewindebolzen und FVK-Stäbe	73
5.5	Zusammenfassung und Forschungsansatz.....	75
6.	Verbundverhalten in Holz eingeklebter CFK-Lamellen	81
6.1	Materialauswahl.....	81
6.2	Versuchsaufbau und Prüfkörperabmessungen	82
6.2.1	Versuchsaufbau für Verbundlängen $l_v \leq 400$ mm	82
6.2.2	Versuchsaufbau für Verbundlängen $l_v > 400$ mm	85
6.3	Herstellung der Verbundprobekörper	86
6.4	Messeinrichtungen	88
6.5	Versagensmechanismen	92
6.5.1	Verbundversagen im Grenzbereich Lamelle/Klebstoff	92
6.5.2	Verbundversagen im Grenzbereich Klebstoff/Holz	92
6.5.3	Schubversagen im Holz	93
6.5.4	Kombinierte Versagensmechanismen.....	93
6.6	Versuchsprogramm	94
6.7	Trag- und Bruchverhalten unter quasi-statischer Beanspruchung	96
6.7.1	Vorversuche	96
6.7.2	Last-Relativverschiebungs-Verläufe.....	98
6.7.2.1	Verhalten am lastseitigen Ende der Verbundlänge	99
6.7.2.2	Verhalten am lastfernen Ende der Verbundlänge	100
6.7.3	Kraft- und Spannungsverlauf entlang der Verbundlänge	101
6.7.3.1	Verlauf der Lamellenkraft	101
6.7.3.2	Verlauf der Schubspannung	102
6.7.4	Querverformungen des Holzkörpers	104
6.7.5	Einflussgrößen der Verbundtragkraft	105
6.7.5.1	Verbundlänge	105
6.7.5.2	Schlitzbreite.....	106
6.7.5.3	Holzart	109
6.7.5.4	Epoxidharzkleber.....	110
6.7.5.5	Abstand der Lamelle zum Bauteilrand.....	111
6.7.6	Untersuchung des Reibungsverhalten	114

6.8	Trag- und Bruchverhalten unter hygrothermischer Beanspruchung.....	116
6.8.1	Einfluss erhöhter Umgebungstemperaturen.....	117
6.8.2	Einfluss erhöhter Umgebungsfeuchten	119
6.9	Zusammenfassung zum Verbundverhalten.....	125
7.	Modellierung des Verbundverhaltens eingeklebter CFK-Lamellen.....	127
7.1	Herleitung des mechanischen Modells.....	127
7.1.1	Problemstellung und Lösungsansatz	127
7.1.2	Modellierung des verschieblichen Verbunds.....	129
7.1.2.1	Herleitung der DGL des verschieblichen Verbunds.....	129
7.1.2.2	Lösung der DGLvV für den linearen Verbundansatz.....	130
7.1.2.3	Modellannahmen	132
7.1.2.4	Diskretisierung der DGLvV	134
7.2	Bestimmung des rechnerischen Verbundansatzes	136
7.2.1	Gleitverhalten an der Klebefuge	136
7.2.2	Gemessene Verbundspannungs-Schlupf-Verläufe	140
7.3	Numerische Berechnung des Verbundverhaltens	145
7.3.1	Numerische Approximation der DGLvV	146
7.3.2	Nachrechnen von Auszugversuchen.....	147
7.3.3	Parameterstudie	151
7.4	Bestimmung der Verbundbruchkraft.....	153
7.4.1	Ergebnisse des Verbundmodells.....	153
7.4.2	Ergebnisse der Auszugversuche.....	154
7.4.3	Bemessungsgleichung der Verbundbruchkraft	155
8.	Tragverhalten verstärkter Brettschichtholzträger	157
8.1	Materialauswahl.....	157
8.2	Versuchsaufbau und Messeinrichtungen	158
8.3	Herstellung der Referenz- und Verbundträger	160
8.4	Bruchmechanismen.....	162
8.4.1	Zugversagen der Keilzinkenverbindungen	162
8.4.2	Zugversagen an Wuchsunregelmäßigkeiten des Holzes	163
8.4.3	Druckversagen des Holzes	163
8.4.4	Zug- und Endverankerungsversagen der CFK-Lamelle.....	164
8.5	Versuchsprogramm	165
8.6	Trag- und Bruchverhalten der Trägerversuche	168
8.6.1	Last-Verschiebungs-Verläufe	169
8.6.2	Dehnungsverläufe	169
8.6.2.1	Messungen am Holzquerschnitt	170

8.6.2.2	Messungen an der CFK-Lamelle.....	171
8.6.3	Schubspannungsverläufe.....	172
8.6.3.1	Verankerung im Auflagerbereich.....	172
8.6.3.2	Verankerung im Bereich der Lasteinleitung.....	173
8.6.4	Referenzversuche	174
8.6.5	Versuche mit oberflächiger Verstärkung ($\rho = 0,22\%$).....	175
8.6.6	Versuche mit seitlich eingeschlitzter Verstärkung ($\rho = 0,23\%$)	176
8.6.7	Versuche mit unterseitig eingeschlitzter Verstärkung ($\rho = 0,35\%$).....	177
8.6.7.1	Versuche mit Vollgewindeschrauben	179
8.6.7.2	Versuche mit lokaler Verstärkung.....	181
8.6.8	Versuche mit umseitig eingeschlitzter Verstärkung ($\rho = 0,81\%$)	182
8.6.9	Versuche mit kombinierter Verstärkung ($\rho = 0,91\%$).....	183
8.7	Zusammenfassung zum Tragverhalten	184
9.	Stochastische Modellierung des Tragverhaltens	189
9.1	Ansatz und Modellannahmen.....	189
9.1.1	Simulation des Trägeraufbaus	190
9.1.2	Numerische Approximation des Biegetragverhaltens	192
9.1.2.1	Berechnung der Biegetragfähigkeit	192
9.1.2.2	Berechnung der Biegeverformung.....	194
9.1.2.3	Nachweis der Endverankerung	196
9.1.2.4	Lokaler Nachweis der Holzschubfestigkeit	197
9.1.3	Software zur Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen.....	198
9.2	Statistische Eingangsparameter.....	199
9.2.1	Statistische Verteilungen.....	199
9.2.1.1	Normalverteilung	200
9.2.1.2	Logarithmische Normalverteilung.....	200
9.2.1.3	Zweiparametrische Weibull-Verteilung	200
9.2.2	Ermittlung der Zufallsgrößen	200
9.2.3	Eigenschaften des keilzinkenfreien Brettschichtholzes.....	201
9.2.3.1	Druckfestigkeit.....	201
9.2.3.2	Zugfestigkeit	202
9.2.3.3	Elastizitätsmodul.....	202
9.2.3.4	Rohdichte	203
9.2.3.5	Entfestigungsverhalten	203
9.2.3.6	Anordnung und Länge der Brettlamellen.....	204
9.2.4	Eigenschaften der Keilzinkenverbindungen	205
9.3	Nachrechnung von Trägerversuchen	205
9.3.1	Bruchlasten und Biegesteifigkeiten	205

9.3.2	Verformungsverhalten im Bruchzustand	208
9.3.3	Versagensmechanismen	209
9.3.3.1	Plastische Verformung der Druckzone	209
9.3.3.2	Schub- und Endverankerungsversagen	210
9.4	Parameterstudie	211
9.4.1	Einfluss des Verstärkungsgrads	212
9.4.2	Einfluss der Lamellenlänge	214
9.4.3	Einfluss der Festigkeitsklasse	215
9.4.4	Einfluss des E-Moduls der Klebeverstärkung	217
9.4.5	Einfluss der Brettlänge	218
9.4.6	Einfluss des Entfestigungsverhaltens der Druckzone	220
9.5	Bestimmung des Biegetragverhaltens	222
9.5.1	Berechnung der Biegetragfähigkeit	222
9.5.1.1	Berechnung des effektiven Verstärkungsgrads	223
9.5.1.2	Bemessung bei elastischer Druckzone	226
9.5.1.3	Bemessung bei plastischer Druckzone	226
9.5.2	Berechnung der Biegesteifigkeit	229
9.5.3	Nachweis der Verbundspannungen	230
9.5.4	Nachweis der Schubspannungen	231
10.	Untersuchungen zur Aussteifung der Dachebene	235
10.1	Ausgangssituation	235
10.1.1	Lastannahmen	236
10.1.2	Aussteifungskonzept	236
10.2	Modellierung der Dachaussteifung	238
10.2.1	Grundlagen der statischen Modellierung	239
10.2.2	Definition der Modellquerschnitte	239
10.2.2.1	Stahlprofile	241
10.2.2.2	Brettschichtholzträger	241
10.2.2.3	CFK-Zugbänder	242
10.2.3	Klemmverankerung für CFK-Zugbänder	242
10.2.4	Versuchsaufbau	245
10.2.5	Messeinrichtungen	246
10.2.6	Versuchsprogramm	247
10.3	Tragverhalten des modellierten Dachverbands	248
10.3.1	Statische Analyse	248
10.3.2	Adhäsionsfrei verankerte CFK-Zugbänder	248
10.3.3	Adhäsionsverankerte CFK-Zugbänder	250
10.3.3.1	Versuch asv_2	250

10.3.3.2 Versuch asv_3.....	252
10.4 Dimensionierung der Systemkomponenten.....	255
10.4.1 Ausführung der Klemmverankerung.....	255
10.4.2 Ausführung der Zug- und Druckgurte.....	257
11. Zusammenfassung und Ausblick.....	259
Literaturverzeichnis	262
Normen und Richtlinien	268
Bezeichnungen und Symbole.....	270
Anhang A: Untersuchungen an Ausgangsstoffen.....	273
Anhang B: Ergebnisse der Auszugversuche	285
Anhang C: Ergebnisse der Trägerversuche.....	317
Anhang D: Ergebnisse der Aussteifungsversuche	371
Anhand E: Sonstige Untersuchungen	383