

Konrad Bergmeister
Kohlenstofffasern
im Konstruktiven
Ingenieurbau

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Abkürzungsverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines über Kohlenstofffasern	1
1.2 Lebensdauer von Bauwerken	2
1.3 Sicherheitsaspekte und Teilsicherheitsfaktoren	3
1.3.1 Teilsicherheitsfaktoren für Baustoffe nach den Emocodes	4
1.3.2 Teilsicherheitsfaktoren für Kohlenstofffaser-Elemente	5
1.3.3 Stochastische Modellierung von Baustoffen	7
1.4 Einwirkungen bei Verstärkungsmaßnahmen	9
1.4.1 Ständige und veränderliche Einwirkungen im Hochbau	10
1.4.2 Ständige und veränderliche Einwirkungen im Brückenbau	12
1.4.3 Erdbebenbelastung	15
1.5 Widerstände von Konstruktionen	16
1.5.1 Tragverhalten und Duktilität	16
1.5.2 Widerstand gegenüber Erdbebeneinwirkung	17
2 Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe – Grundlagen und bauspezifische Anwendungen	19
2.1 Historische Entwicklung	19
2.2 Kunststoffe	22
2.2.1 Einteilung	22
2.2.2 Thermoplaste bzw. Plastomere	23
2.2.3 Elastomere	24
2.2.4 Duroplaste bzw. Duromere	24
2.2.5 Eigenschaften von Kunststoffen	25
2.2.5.1 Kriechen und Relaxation	27
2.2.5.2 Zeitstandfestigkeit	27
2.3 Klebstoffe	27
2.3.1 Kleber für Kohlenstofffaser-Elemente	28
2.3.2 Bindungskräfte in der Klebetechnik	29
2.3.3 Oberflächenbehandlung	30
2.3.4 Voraussetzungen für eine gute Verklebung	32
2.3.5 Überprüfung von Verklebungen	33
2.4 Faserwerkstoffe	33

2.5	Kohlenstofffasern	35
2.5.1	Herstellungsprozess	36
2.5.1.1	Herstellung von PAN-gebundenen Kohlenstofffasern (PAN-based Carbonfibers)	37
2.5.1.2	Herstellung von Pech-gebundenen Kohlenstofffasern (Pitch-based Carbonfibers)	37
2.6	Physikalische Eigenschaften	38
2.7	Faserverbundwerkstoffe	41
2.7.1	Fertigung von Verbundbauteilen	43
2.7.1.1	Handlaminierverfahren	43
2.7.1.2	Vakuumsackverfahren	43
2.7.1.3	Faserspritzverfahren	44
2.7.1.4	Injektionsverfahren	44
2.7.1.5	Pressverfahren	44
2.7.1.6	Prepreg- und Autoklavenverfahren	44
2.7.1.7	Pultrusionsverfahren	44
2.7.1.8	Wickelverfahren	44
2.7.1.9	Schleudern	45
2.7.2	Nachbehandlung	45
2.7.3	Eigenschaften von Faserverbundbauteilen aus Kohlenstofffasern	45
2.8	Kohlenstofffaser-Werkstoffe	49
2.8.1	Faserbündel	49
2.8.2	Taue	49
2.8.3	Stränge	49
2.8.4	Garne	49
2.8.5	Gemahlene Fasern	49
2.8.6	Zerhackte Kurzfaserbündel	49
2.8.7	Zerhackte Plättchen und Stäbe	50
2.8.8	Unidirektionale Bänder	50
2.8.9	Gewebe	50
2.8.10	Gelege	52
2.8.11	Kurzfasermatten	52
2.8.12	Vliese	53
2.8.13	Matten	53
2.8.14	Kohlenstofffaser-Lamellen	53
2.8.14.1	Aufrollradius von Lamellen	53
2.8.14.2	Das Verkleben von Kohlenstofffaser-Lamellen	55
2.8.15	Verankerungssysteme für Lamellen	56
2.8.16	Kohlenstofffaser-Kabel	61
2.8.16.1	Herstellung und Anwendung	61
2.8.16.2	Vorspannverluste	64
2.8.17	Verbund von Spanndrähten bei Spannbettvorspannung	64
2.8.18	Verankerungssysteme von Kohlenstofffaser-Kabel	65
2.8.19	Kohlenstofffaser-Schubwinkel	71
2.8.20	Kohlenstofffaser-Strangschlaufen	72

2.9	Brandeinwirkung auf Kohlenstofffaser-Elemente	72
2.10	Prüfmethoden	74
2.11	Mess- und Überwachungsmethoden	75
2.11.1	Dehnungsmessungen mit Glasfasersensoren an Kohlenstofffaser-Elementen	77
2.11.2	Fabry-Pérot-Interferometer	81
2.11.3	Faser-Bragg-Grating-Sensoren	82
2.11.4	SOFO [®] -Sensoren	83
2.11.5	Microbending-Verformungssensoren	83
2.11.6	Brillouin-Sensoren	84
2.12	Ökologische Aspekte	85
3	Kohlenstofffaser-Bewehrungen im Betonbau	87
3.1	Faserbewehrung	87
3.1.1	Ausziehversuche	88
3.1.2	Modellierung des Verbundverhaltens	89
3.1.3	Wirkungsweise einer Faserbewehrung	92
3.1.4	Theorie der Verbundwerkstoffe	93
3.1.5	Entwicklung und Abschätzung der Risskonfiguration	95
3.1.6	Äquivalente Biegezugfestigkeit	97
3.1.7	Abschätzung der Biegetragfähigkeit	99
3.2	Mattenbewehrung	101
3.3	Kohlenstofffaser-Kabel	102
3.4	Betonbrücke mit Kohlenstofffaser-Bewehrung	106
3.5	Schleuderbetonrohre mit Kohlenstofffaser-Kabel	108
3.5.1	Versagensarten	108
3.5.1.1	Bruch der Verankerung	108
3.5.1.2	Biegeversagen des Betonfertigteils	108
3.5.1.3	Versagen der Zugzone durch Bruch der Kohlenstofffaser-Bewehrung	109
3.5.1.4	Versagen der Druckzone durch Bruch des hochfesten Betons	109
3.5.1.5	Verbundversagen (Drahtverankerungsversagen)	109
3.5.1.6	Kohlenstofffaser-Draht-Druckbruch	110
3.5.1.7	Interlaminaer Drahtbruch	110
3.5.1.8	Spreizrisse	110
3.5.1.9	Kohlenstofffaser-Draht-Zugbruch bei Rissbildung	110
3.5.1.10	Verbundversagen	111
3.5.2	Materialwiderstände	111
3.5.3	Hochfester Schleuderbeton	111
3.5.4	Vorspannverluste	112
3.5.5	Biegebemessung der vorgespannten Rohrquerschnitte	112
3.5.6	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	113
3.6	Hybridprofile mit Kohlenstofffaser-Geweben	113

4	Kohlenstofffaser-Verstärkungen im Betonbau	117
4.1	Geschichtlicher Überblick	117
4.2	Mechanische Modellierung im Betonbau	117
4.2.1	Druckfestigkeit	118
4.2.1.1	Ermittlung der Betondruckfestigkeit	119
4.2.1.2	Unterschiedliche Abmessungen des Prüfzylinders	119
4.2.1.3	Die Zeitabhängigkeit der Druckfestigkeit	120
4.2.1.4	Beeinflussung der Bohrkerne durch Bewehrungsstäbe	120
4.2.2	Zugkapazität	121
4.2.3	Modellierung des gerissenen Stahlbetons	122
4.3	Mechanische Modellierung von Stahl	124
4.3.1	Betonstahl	124
4.3.2	Spannstahl	124
4.4	Stahl und Kohlenstofffaser-Bewehrung: ein Vergleich	124
4.5	Einflussparameter bei der Biegeverstärkung mit Kohlenstofffaser-Lamellen	126
4.5.1	Einflussparameter des Klebeverbundes	126
4.5.1.1	Einfluss lokaler Unebenheiten – Bereich 1	127
4.5.1.2	Einfluss vertikaler Rissuferversätze – Bereich 2	127
4.5.1.3	Einfluss der Ablösung der Betondeckung am Laschenende durch Schubrisse – Bereich 3	128
4.5.1.4	Einfluss des äußersten Biegerisses – Bereich 4	128
4.5.1.5	Einfluss des Rissfortschrittes im maximalen Momentbereich – Bereich 5	130
4.5.1.6	Einfluss des Rissfortschrittes im Querkraftbereich – Bereich 6	130
4.6	Einflüsse bei der Biegeverstärkung mit Kohlenstofffaser-Gelegen	131
4.7	Verbundfestigkeit	131
4.7.1	Dehnungsgradienten	131
4.7.2	Verteilung der Verbundspannungen	134
4.7.3	Verbundgesetz – Verbundbruchkraft	135
4.8	Berechnung der Zugverankerung	138
4.9	Bemessung eines mit Kohlenstofffaser-Lamellen verstärkten Biegeträgers	140
4.9.1	Kräfte und Dehnungen	140
4.9.2	Spannungen und Dehnungen im ungerissenen Zustand	145
4.9.3	Übergang vom ungerissenen zum gerissenen Zustand	146
4.9.4	Spannungen und Dehnungen im gerissenen Zustand	150
4.10	Nachweisführung für die Querkraftbemessung	151
4.11	Nachweisführung für die Gebrauchstauglichkeit	152
4.11.1	Begrenzung der Gebrauchsspannungen	153
4.11.2	Begrenzung der Durchbiegung	153
4.11.3	Begrenzung der Rissbreite	154
4.12	Eingeschlitzte Kohlenstofffaser-Lamellen	155
4.12.1	Bemessung von eingeschlitzten Kohlenstofffaser-Lamellen	159

4.12.1.1	Biegebemessung	159
4.12.1.2	Verbundbemessung	159
4.12.1.3	Schubbemessung	160
4.12.1.4	Ermüdung	160
4.12.1.5	Gebrauchstauglichkeit	160
4.13	Biegeverstärkung mit vorgespannten Kohlenstofffaser-Lamellen	161
4.13.1	Rechenmodell zur Bemessung von vorgespannten Kohlenstofffaser-Lamellen.	161
4.14	Konzepte und Bemessung der Querkraftverstärkung	161
4.14.1	Verstärkung mit Kohlenstofffaser-Stäben	162
4.14.2	Querkraftverstärkung mit Kohlenstofffaser-Gelegen	163
4.14.3	Querkraftverstärkung mit Kohlenstofffaser-Schlaufen	163
4.14.4	Querkraftverstärkung von Rahmenknoten mit Kohlenstofffaser-Gelegen	164
4.14.5	Bemessung von Querkraftverstärkungen	164
4.15	Bemessung von Torsionsverstärkungen	167
4.16	Befestigung von Kohlenstofffaser-Verstärkungen mit Endplatten	167
4.16.1	Befestigungssysteme für gerissenen Beton	167
4.16.2	Querkraftbemessung einer Dübelgruppe	168
4.16.2.1	Stahlversagen	168
4.16.2.2	Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite	169
4.17	Bemessungsnachweise für Kohlenstofffaser-Lamellen aus der bauaufsichtlichen Zulassung	170
4.18	Beispiel: Einfeldträger mit zwei Einzellasten	173
4.18.1	Ungerissener Zustand	173
4.18.1.1	Bemessungswerte	173
4.18.1.2	Schnittgrößen vor der Verstärkung	174
4.18.2	Übergang vom ungerissenen zum gerissenen Zustand	175
4.18.3	Gerissener Zustand	177
4.18.4	Grafische Darstellung der Berechnungsergebnisse	178
4.18.4.1	Abschälen im Biegebereich	178
4.18.4.2	Abschälen im Querkraftbereich durch Schubrisse	180
4.18.4.3	Abschälen im Querkraftbereich durch hohe Querkräfte	181
4.18.4.4	Verankerungslänge	182
5	Kohlenstofffaser-Verstärkungen von Betonscheiben	183
5.1	Modellierung der Tragwirkung von Scheiben	183
5.1.1	Fachwerk- und Druckfeldmodelle	183
5.1.2	Gerissenes Scheibenmodell	185
5.1.3	Fachwerkmodelle in Normvorschriften	187
5.2	Tragverhalten und Bemessung von verstärkten Wandscheiben	187
5.2.1	Stabwerksmodelle für verstärkte Scheiben	188
5.2.2	Spannungsfeldtheorie für verstärkte Wandscheiben	189
5.2.3	Nichtlineare Finite-Elemente-Methode (FEM) für Scheiben	192

5.3	Beispiele für eine Modellbildung von Kohlenstofffaser-Verstärkungen an Wandscheiben	194
5.3.1	Verwendete Verstärkungsmaterialien	194
5.3.2	Wandscheibe ohne Öffnung	196
5.3.3	Wandscheibe mit Öffnung	197
5.3.4	Ausgeklinkter Träger	198
5.3.4.1	Nichtlineare Finite-Element-Berechnung	199
5.3.4.2	Modellierung mit den Stabwerken	201
5.3.4.3	Berechnung mit Spannungsfeldern	204
5.4	Fazit	207
6	Kohlenstofffaser-Verstärkungen von Stützen	209
6.1	Tragfähigkeit und Duktilität	209
6.2	Stabilitätskriterien bei Ausfall von Bewehrungsbügeln	211
6.2.1	Ausweichen der mittleren Längsstäbe unter Druck	211
6.2.2	Ausweichen der Eckstäbe unter Druck	213
6.3	Druckfestigkeit des mit Kohlenstofffasern umwickelten Betons	213
6.3.1	Bemessungsvorschlag nach Monti	214
6.3.2	Bemessungsvorschlag nach Mander	214
6.3.3	Bemessungsvorschlag nach Seible et al.	215
6.3.4	Wirkungsparameter der Kohlenstofffaser-Umschnürung	215
6.3.4.1	Volle Umwicklung	216
6.3.4.2	Teilweise Umwicklung	217
6.3.4.3	Einfluss der Faserausrichtung	218
6.3.4.4	Einfluss durch die Stützenform	218
6.4	Querkraftverstärkung von Stützen mit Kohlenstofffaser	220
7	Kohlenstofffaser-Verstärkungen im Holzbau	221
7.1	Eigenschaften von Holz	221
7.1.1	Neues Konstruktionsholz	221
7.1.2	Altes Konstruktionsholz	223
7.2	Verstärkungen von Holz	225
7.2.1	Verstärkungen in eingefräster Nut parallel zur Faserrichtung	227
7.2.2	Parallel zur Faserrichtung aufgeklebte Kohlenstofffaser-Lamellen	229
7.2.3	Kohlenstofffaser-Verstärkungen quer zur Faserrichtung	229
7.2.4	Kohlenstofffaser-Verstärkungen an ausgeklinkten Holzträgern	229
7.2.5	Verstärkungen von Trägerdurchbrüchen	230
7.2.6	Verstärkungen von gekrümmten Trägern	230
7.2.7	Verstärkungen im Bereich konzentrierter Lasteinleitungen	231
7.2.8	Vorgespannte Kohlenstofffaser-Verstärkungen	232
7.3	Bemessung von Kohlenstofffaser-Verstärkungen im Holzbau	233
7.3.1	Elastische Bemessung	233
7.3.2	Plastische Bemessung	233

7.3.2.1	Unverstärkter Holzquerschnitt	233
7.3.2.2	Bemessungskonzept für einen verstärkten Querschnitt	236
7.4	Verbund	238
7.5	Versagensarten	242
7.6	Nachweise	246
7.6.1	Tragsicherheit (Spannungsnachweise)	246
7.6.1.1	Allgemeine Biegemessung für Kohlenstofffaser-Verstärkungen	246
7.6.1.2	Nachweis in der Biegedruckfaser	247
7.6.1.3	Nachweis in der Biegezugfaser	247
7.6.1.4	Schubbemessung	247
7.6.1.5	Nachweise in der Kohlenstofffaser-Lamelle	248
7.6.2	Gebrauchstauglichkeit	248
7.7	Bemessungsbeispiele	249
7.7.1	Materialkennwerte	250
7.7.2	Unverstärkter Querschnitt (Holz- oder Brettschichtholzträger)	250
7.7.3	Einseitig verstärkter Querschnitt	252
7.7.3.1	Linear-elastische Berechnung	252
7.7.3.2	Plastische Berechnung	254
8	Kohlenstofffaser-Verstärkungen im Stahl- und Verbundbau	259
8.1	Eigenschaften von Stahl	259
8.1.1	Neue Stahlbezeichnungen und -eigenschaften	259
8.1.2	Historische Stahlbezeichnungen und -eigenschaften	261
8.2	Verstärkungen von Stahlprofilen	262
8.3	Bemessung von Kohlenstofffaser-Verstärkungen an Stahlprofilen	263
8.3.1	Elastische Bemessung	263
8.3.2	Plastische Bemessung	265
8.4	Versagensarten	266
8.5	Vorgespannte Kohlenstofffaser-Elemente	266
9	Kohlenstofffaser-Verstärkungen von Mauerwerk	267
9.1	Materialverhalten von neuem Mauerwerk	269
9.2	Materialverhalten von historischem Mauerwerk	270
9.2.1	Geschichtliche Entwicklung der Formgebungsverfahren	270
9.2.1.1	Streichen	270
9.2.1.2	Pressen	270
9.2.2	Kennwerte von historischen Mauerziegeln	271
9.2.2.1	Rohdichte	272
9.2.2.2	Druckfestigkeit	272
9.2.2.3	Spaltzugfestigkeit	272
9.2.2.4	Elastizitätsmodul	272
9.2.2.5	Richtungsfaktoren	273

9.3	Bemessung von unbewehrtem Mauerwerk	273
9.4	Bemessung von bewehrtem Mauerwerk	275
9.5	Verstärkungsmaßnahmen von Mauerwerk	276
9.5.1	Verstärkung mit Kohlenstofffaser-Lamellen	276
9.5.2	Verstärkung mit Geweben und Gelegen	278
9.6	Berechnungsmethoden	279
9.6.1	Elastizitätstheorie	279
9.6.1.1	Bruchbedingungen für verstärktes Mauerwerk	280
9.6.2	Plastizitätstheorie und Spannungsfelder	282
9.7	Nachweise bei der Verstärkung von Mauerwerk	284
9.7.1	Unverstärkte Tragwand	284
9.7.2	Verstärkte Tragwand	285
9.8	Endverankerung von Kohlenstofffaser-Lamellen	285
9.8.1	Injektionsdübel	286
9.8.2	Kunststoffdübel	288
9.8.3	Bemessung von Kunststoffdübeln durch Versuche am Bauwerk	288
9.8.4	Bemessung nach den Zulassungsfaktoren	289
9.9	Verstärkung von Mauerwerkspfählen mit Kohlenstofffaser-Gelegen	291
10	Konstruktive Anwendungen von Kohlenstofffaser-Elementen	293
10.1	Ertüchtigung einer Bogenbrücke	293
10.2	Ertüchtigung eines Beton-Fachwerkbinders	294
10.3	Ertüchtigung eines Kirchengewölbes	296
10.4	Vorgespannte Kohlenstofffaser-Lamellen zur Verstärkung einer Hochbaudecke	296
10.4.1	Einwirkungen und Geometrie	298
10.4.2	Tragsicherheitsnachweis	299
10.5	Koppelfugensanierung einer Durchlaufträgerbrücke	301
10.5.1	Nachweis der Schwingweite in Koppelfugen	302
10.5.2	Koppelfugensanierung mittels Kohlenstofffaser-Oberflächenvorspannung ...	302
10.6	Internet-Adressen von Herstellern und Anwendern	304
	Literaturverzeichnis	307
	Stichwortverzeichnis	323