

**Konrad Bergmeister**  
**Kohlenstofffasern**  
**im Konstruktiven**  
**Ingenieurbau**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	VII
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	XVII
<b>1 Einleitung</b> .....	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
<b>2 Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe – Grundlagen und bauspezifische Anwendungen</b> .....	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 <sup>®</sup> -Sensoren .....	83
2.11.5	Microbending-Verformungssensoren .....	83
2.11.6	Brillouin-Sensoren .....	84
2.12	Ökologische Aspekte .....	85
<b>3</b>	<b>Kohlenstofffaser-Bewehrungen im Betonbau .....</b>	<b>87</b>
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

<b>4</b>	<b>Kohlenstofffaser-Verstärkungen im Betonbau</b> .....	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
<b>5</b>	<b>Kohlenstofffaser-Verstärkungen von Betonscheiben</b>	<b>183</b>
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
<b>6</b>	<b>Kohlenstofffaser-Verstärkungen von Stützen</b>	<b>209</b>
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
<b>7</b>	<b>Kohlenstofffaser-Verstärkungen im Holzbau</b>	<b>221</b>
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
<b>8</b>	<b>Kohlenstofffaser-Verstärkungen im Stahl- und Verbundbau</b>	<b>259</b>
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
<b>9</b>	<b>Kohlenstofffaser-Verstärkungen von Mauerwerk</b>	<b>267</b>
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
<b>10</b>	<b>Konstruktive Anwendungen von Kohlenstofffaser-Elementen</b>	<b>293</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>307</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>323</b>