

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Werkstoffgruppen	1
1.2 Die vier Paradoxe	1
1.3 Grundsätzliche Werkstoffeigenschaften, Dimensionen und Abkürzungen	6
1.4 Literaturverzeichnis zu Kapitel 1	9
2 Analogien zwischen Faserverbunden der Natur und Technik	11
2.1 Knochenstrukturen	11
2.1.1 Culmanns Erkenntnis und moderne Berechnungstechnik von Naturstrukturen	12
2.1.2 Krafteinleitungsbereich/Kraftübertragungsbereich	13
2.1.3 Adaption der Struktur an veränderte Lastfälle (Strukturwandel durch Änderung der Umgebung)	13
2.1.4 Spannungsniveaus	15
2.1.5 Histologischer Auf- und Umbau der Knochenstruktur (feingewebliche Untersuchungsergebnisse)	15
2.1.6 Das Wolffsche Gesetz der Transformation des Knochens	17
2.1.7 Ossäre Strukturanalyse, Finite-Element-Methoden (FEM); invasive und nicht-invasive Messtechniken.	17
2.2 Hohlträger.	21
2.2.1 Der Stachel.	22
2.2.2 Der Strohalm.	22
2.3 Technische Erläuterungen zum Leichtbau von Hohlträgern.	22
2.4 Schichtstrukturen.	25
2.4.1 Die natürliche, feste Schichtstruktur	25
2.4.2 Die technische Schichtstruktur	26
2.5 Literaturverzeichnis zu Kapitel 2	28

3 Die Theorie zur Berechnung dünnwandiger Lamine . .	31
3.1 Grundlegende Bemerkungen	31
3.2 Die Spannungs-Dehnungskoeffizienten in matrizieller Darstellung	36
3.3 Koordinatentransformation	39
3.4 Berücksichtigung von Temperatur und Feuchte	41
3.5 Spannungs-Dehnungsbeziehungen für den ebenen Spannungszustand	43
3.6 Die Berechnung relativ dünnwandiger Lamine	47
3.6.1 Spannungs-Dehnungsverlauf im Laminat	48
3.7 Resultierende Laminatkräfte und -momente	50
3.8 Temperaturlasten	54
3.9 Berechnung von Strukturen mit dickwandigen Laminaten	55
3.10 Literaturverzeichnis zu Kapitel 3	56
4 Die Deformation anisotroper Lamine und die Bedeutung der Kopplungsmatrix B	57
4.1 Klassisches orthotropes, symmetrisches Laminat	57
4.2 Pseudo-orthotropes, symmetrisches Laminat	59
4.3 Balancierter, unsymmetrischer Winkelverbund	60
4.4 Unsymmetrischer Kreuzverbund	61
4.5 Symmetrisches, klassisches Laminat	63
4.6 Allgemeiner anisotroper Laminataufbau	64
4.7 Literaturverzeichnis zu Kapitel 4	66
5 Berechnungsbeispiele	67
5.1 Berechnungsbeispiel eines ebenen Laminates	67
5.2 Vereinfachte Formalismen zur Abschätzung der elastischen Eigenschaften, Spannungen und Festigkeiten von Faserverbunden	77
5.2.1 Definition von einfachen Formalismen zur groben Vordimensionierung von faserverstärkten Kunststoffen	80
5.3 Berechnungsbeispiel Kardanwelle	88
5.3.1 Aufgabenstellung	88
5.3.2 Lösungskonzept	89
5.3.3 Laminatbelastung	90
5.3.4 Berechnung der Spannungen und einer vorläufigen Festigkeit	91

5.3.5	Frequenzberechnung	95
5.3.6	Die numerische Berechnung einer aus Faserverbundwerkstoffen gewickelten Kardanwelle	96
5.4	Literaturverzeichnis zu Kapitel 5	109
6	Festigkeithypothesen - Festigkeitsberechnungen	111
6.1	Festigkeithypothesen für Metalle	111
6.1.1	Normalspannungshypothese	111
6.1.2	Schubspannungshypothese	112
6.1.3	Gestaltänderungsenergiehypothese	112
6.1.4	Vergleich der Gestaltänderungsenergiehypothese mit der Schubspannungshypothese	113
6.2	Festigkeitskriterien für unidirektional verstärkte Faserverbundwerkstoffe	113
6.2.1	Vorbemerkungen	113
6.2.2	Kriterium der maximalen Spannungen	115
6.2.3	Tsai-Hill-Pauschalkriterium	117
6.2.4	Tsai-Wu Pauschalkriterium in Tensorform	121
6.2.5	Die Bruchtyp-Kriterien von Puck aus dem Jahre 1969	122
6.2.6	Kriterium von Hashin	124
6.2.6.1	Spannungs-Invarianten	124
6.2.6.2	Vorgehensweise von Hashin	127
6.2.7	Neue Theorie des Zwischenfaserbruchs von Puck	132
6.2.7.1	Grundsätzliche Vorüberlegungen	132
6.2.7.2	Beanspruchungsarten des UD-Verbundes, Festigkeiten und Bruchwiderstände der Wirkebene	134
6.2.7.3	Ausprägungen von Zwischenfaserbrüchen	137
6.2.7.4	Puck's Bruchhypothese	139
6.2.7.5	Das Längsschnitt-Modell von Puck für den Master Bruchkörper	139
6.2.7.6	Zwischenfaserbruch-Bedingungen für kombinierte σ_2 , τ_{12} - Beanspruchung	148
6.2.8	Bewertung der neueren Zwischenfaserbruchkriterien	151
6.2.9	Empfehlungen zu den unterschiedlichen Hypothesen und der Dimensionierung von Laminaten	153
6.3	Literaturverzeichnis zu Kapitel 6	154

7 Vergleich der mechanischen Eigenschaften zwischen gerichteten kurz- und langfaserverstärkten Thermoplasten	157
7.1 Anforderungen an einen leistungsfähigen Kurzfaserverbundwerkstoff	157
7.1.1 Anforderungen an die Matrix	158
7.1.2 Anforderungen und Eigenschaften der unterschiedlichen Fasermaterialien	159
7.1.3 Eigenschaften der ausgewählten Einzelkomponenten	162
7.1.3.1 Kenndaten und Eigenschaften von Polyetherimid (PEI)	162
7.2 Gerichtete Kurzfasermaterialien	163
7.3 Herstellung der Kurzfaserprepregs und der daraus gefertigten Laminatplatten	164
7.4 Vergleich der mechanischen Kennwerte zwischen lang- und kurzfaserverstärkten Thermoplasten (PEI)	165
7.4.1 Faservolumengehalt der hergestellten Kurz- und Langfaserproben	165
7.4.2 Vergleich der ermittelten mechanischen Kenngrößen	166
7.5 Problematik bei der Vorhersage von mechanischen Kennwerten bei Kurzfaserverbundwerkstoffen	170
7.5.1 Modellansätze zu statischen Festigkeits- und Steifigkeitsvorhersagen an Kurzfaserverbundstrukturen	170
7.5.2 Vergleich einiger Spannungskonzentrationsfaktoren	177
7.5.3 Vergleich der vorhergesagten Steifigkeiten und Festigkeiten in Faserlängsrichtung an dem UD-Verbund CFK/PEI	179
7.6 Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten an gekerbten lang- und kurzfaserverstärkten Thermoplasten	183
7.6.1 Versuchsprogramm	183
7.6.2 Auswertung der Ermüdungsversuche	185
7.6.2.1 Untersuchung der aufgetretenen Schadensformen	185
7.6.2.2 Auswirkungen der Schäden auf das Festigkeits- bzw. Steifigkeitsverhalten ..	191

7.6.2.3	Unterschiede im Ermüdungsverhalten zwischen kurz- und langfaserverstärkten Thermoplasten	197
7.6.3	Verwendung der Ergebnisse für Vorhersagen zum Ermüdungsverhalten	201
7.7	Optische Ganzfeldverschiebungsmessungen an FVW zur Überprüfung von FEM-Schadensmodellen	204
7.8	Unterschiede im Umformverhalten zwischen kurz- und langfaserverstärkten Thermoplasten	205
7.8.1	Umformmechanismen	205
7.8.2	Unterschiede im Umformverhalten zwischen lang- und kurzfaserverstärktem PEI	206
7.9	Weitere Thermoplasteigenschaften	207
7.10	Liste der verwendeten Symbole und Indizes	208
7.11	Literaturverzeichnis zu Kapitel 7	209
8	Mechanische, temperaturabhängige und wirtschaftliche Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen	213
8.1	Kurzer Überblick über die Bedeutung der Werkstoffe generell	213
8.2	Spezifische mechanische Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen	218
8.2.1	Faserspezifische Probleme bei faserverstärkten Kunststoffen	222
8.2.2	Matrixspezifische Probleme bei faserverstärkten Kunststoffen	229
8.2.3	Haftfestigkeit und Verbindungsmechanismus zwischen Faser und Harz	242
8.2.3.1	Nichtoxidative Verfahren	244
8.2.3.2	Oxidative Verfahren	244
8.2.4	Einfluss der Verstärkungsfasern auf die Eigenschaften unidirektionaler Verbunde quer zur Faserrichtung	258
8.3	Literaturverzeichnis zu Kapitel 8	263
9	Das Ermüdungsverhalten von Faserverbunden bei dynamischer Belastung	267
9.1	Schädigungsmechanismen bei dynamischer Belastung ...	270
9.2	Untersuchung des Ermüdungsverhaltens	272
9.3	Die Anwendung des Haigh-Schaubildes aus Ergebnissen von Einstufenversuchen	275

9.3.1	Erläuterungen zu CFK-Haighdiagrammen	275
9.3.2	Streuung und Überlebenswahrscheinlichkeit	280
9.4	Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit beliebig gestalteter und belasteter Faserverbundstrukturen	282
9.4.1	Ermüdungsfestigkeit bei Mehrfachbelastungen	283
9.4.1.1	Der Betriebsfestigkeitsversuch nach Gassner	283
9.4.1.2	Versuche mit Zufallsfolgen	287
9.4.2	Rechnerische Lebensdauerabschätzung nach dem Verfahren von Palmgren-Miner	287
9.4.2.1	Die Palmgren-Miner-Regel (elementare Miner-Regel)	287
9.4.2.2	Die Relativ-Miner-Regel	289
9.4.2.3	Beispiele	291
9.4.3	Weitere Modelle zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit bei Mehrstufenbelastung	293
9.5	Kurze Beschreibung von weiteren Lebensdauerhypothesen	294
9.5.1	Das Strength-Degradation-Modell	295
9.5.2	Die Percent-Failure-Regel	296
9.5.3	Das Marco-Starkey-Modell	297
9.5.4	Das Fatigue-Modulus-Konzept	298
9.5.5	Das Restfestigkeits-/Steifigkeitsmodell	302
9.6	Literaturverzeichnis zu Kapitel 9	302
10	Der Einfluss von feuchtwarmen Klima auf die Lamineigenschaften	305
10.1	Temperatur-/Feuchtigkeitseinflüsse	305
10.2	Auswirkungen auf die Festigkeit	314
10.3	Literaturverzeichnis zu Kapitel 10	319
11	Korrelationsbetrachtungen	321
11.1	Korrelation zwischen Glasübergangstemperatur und mechanischen Eigenschaften	321
11.2	Korrelation zwischen Compression after Impact (CAI) und verschiedenen Eigenschaften	326
11.2.1	Erklärungen zum F-Test	350
11.3	Literaturverzeichnis zu Kapitel 11	332

12 Schadenstoleranz von Faserverbund-Werkstoffen und -bauteilen	333
12.1 Beschreibung der Ursachen und Auswirkungen von Fehlstellen in Faserverbundwerkstoffen	341
12.2 Betriebsschäden	343
12.3 Möglichkeiten zur Verbesserung des Schadensverhaltens .	345
12.3.1 Möglichkeiten bezüglich des Werkstoffes	345
12.3.2 Möglichkeiten bezüglich der konstruktiven Gestaltung	351
12.4 Einfluss verschiedener Kerbformen auf das Zugfestigkeitsverhalten von multidirektionalen CFK-Laminaten	353
12.4.1 Untersuchungsergebnisse aus der Zugfestigkeit ungekerbter CFK-Proben	356
12.4.2 Restzugfestigkeit gekerbter Proben	359
12.4.3 Zusammenfassende Erläuterungen	361
12.4.4 Kerbeinflusszahlen von gekerbten Proben beider Lamine	365
12.5 Literaturverzeichnis	368
13 Streuungsverhalten von Faserverbundwerkstoffen	371
13.1 Voraussetzungen zur Auswertung der ermittelten Kennwerte	374
13.1.1 Prepregsystem Code 69/T300	375
13.1.2 Prepregsystem Fiberite 976/T300	375
13.1.3 Prepregsystem Narmco 5245C/T800	375
13.1.4 Prepregsystem Krempel U214/HTA7	375
13.1.5 Prepregsystem Ciba 6376/T400	375
13.1.6 Kennwertauswertung	375
13.2 Einfluss der Probengeometrien auf die Laminatkennwerte und die Dimensionierung sowie die statistische Erfassung der Daten	382
13.3 Möglichkeiten zur Reduzierung des Versuchsaufwandes für eine Qualifikation .	390
13.4 Beschreibung des Verfahrens zur Abschätzung des Werkstoffverhaltens und einer Kurzqualifikationsmöglichkeit	392

13.5	Zusätzliche Einflüsse auf ein eigenschaftstypisches Streuungsverhalten von physikalischen und mechanischen Kennwerten	395
13.6	Gesetzmässigkeiten des Streuungsverhaltens	396
13.6.1	Vorgehensweise zur Untersuchung des Streuungsverhaltens	396
13.6.2	Begriffserklärungen zur Festlegung von geeigneten statistischen Methoden für die Faserverbundtechnik	403
13.7	Beurteilung des Streuungsverhaltens der Faserverbundsysteme Fiberite 976/T300 und Code 69/T300	406
13.8	Bewertung des Streuungsverhaltens der wichtigsten Festigkeiten	413
13.9	Untersuchung der Übertragbarkeit der Fasereigenschaften auf die Verbundeigenschaften am Beispiel der Zugfestigkeit	414
13.10	Literaturverzeichnis zu Kapitel 13	424
14	Recycling von Faserverbundwerkstoffen und Bauteilen	427
14.1	Recyclingverfahren	428
14.2	Abfälle aus faserverstärkten Kunststoffen	430
14.3	Weitere Bemerkungen zur Entsorgung von Kunststoffen .	433
14.3.1	Entsorgung von Fluor-Chlor- Kohlenwasserstoffen (FCKW)	433
14.3.2	Weitere Entsorgungstendenzen von Kunststoffen und Faserverbunden durch Verbrennung	434
14.4	Literaturverzeichnis zu Kapitel 14	435
15	Aktive Funktionswerkstoffe und -bauweisen	437
15.1	Beispiele für aktive Werkstoffe und Funktionsbauweisen	437
15.2	Aktuelle Beispiele zur Anwendung aktiver Funktionsbauweisen	439
15.3	Aktive Werkstoffe und Funktionsbauweisen	440
15.3.1	Wirkungsweise piezoelektrischer Werkstoffe . . .	440
15.3.2	Piezoelektrische Polymere und ihre Anwendung in Faserverbunden	441
15.3.3	Elektrostriktive Materialien und ihre Bedeutung für Faserverbunde	443
15.3.4	Magnetostriktive Materialien	444

15.3.5	Formgedächtnislegierungen und ihre Bedeutung für Faserverbunde	444
15.4	Die mechanische Interaktion zwischen aktiven Elementen und Faserverbundstrukturen	445
15.5	Konstruktive Gestaltungs- und Fertigungsgesichtspunkte bei aktiven Faserverbundfunktionsbauweisen	447
15.6	Literaturverzeichnis zu Kapitel 15	449
16	Die elektrischen Eigenschaften von Faserverbunden und modifizierten Matrices	453
16.1	Einführung	453
16.2	Beschreibung und theoretische Herleitung der eingesetzten Messverfahren	457
16.2.1	Ermittlung des Durchgangswiderstandes für Gleichspannungen nach IEC 93	460
16.2.2	Ermittlung des spezifischen Widerstandes nach der 4-Elektroden-Methode	462
16.2.3	Ermittlung des Oberflächenwiderstandes	463
16.2.4	Ermittlung der Dielektrizitätszahl für Frequenzen bis 15 MHz	465
16.2.5	Ermittlung der Permeabilitätszahl für Frequenzen bis 15 MHz	468
16.2.6	Ermittlung der Permittivität und Permeabilität für Frequenzen über 500 MHz	471
16.2.6.1	Allgemeine Herleitung der Materialparameter aus der Wellengleichung	471
16.2.6.2	Materialvermessung unter Zuhilfenahme der S-Parameter	474
16.2.6.3	Einfluss der Probendicke auf das Messergebnis	476
16.2.6.4	Einfluss der Probenposition im Hohlleiter auf das Messergebnis	476
16.3	Erstellung der Versuchsaufbauten und Probenkörper	478
16.3.1	Versuchsaufbau zur Messung des Durchgangswiderstandes nach IEC 93	479
16.3.2	Versuchsaufbau zur Messung des spezifischen Widerstandes nach der 4-Elektroden-Methode ...	481
16.3.3	Versuchsaufbau zur Messung des Oberflächenwiderstandes	482

16.3.4	Versuchsaufbau zur Messung der Dielektrizitätszahlen für Frequenzen unter 15 MHz	483
16.3.5	Versuchsaufbau zur Messung der Permeabilitätszahlen für Frequenzen unter 15 MHz	484
16.3.6	Versuchsaufbau zur Messung der Permeabilität und Permittivität für Frequenzen über 500 MHz	486
16.4	Auswertung der durchgeführten Versuche	487
16.4.1	Messergebnisse des elektrischen Durchgangswiderstandes nach IEC 93	487
16.4.2	Messergebnisse des elektrischen Durchgangswiderstandes nach der 4-Elektroden-Methode	493
16.4.3	Messergebnisse des elektrischen Oberflächenwiderstandes	494
16.4.4	Messergebnisse der Dielektrizitätszahlen für Frequenzen unter 15 MHz	495
	16.4.4.1 Kohlenstofffüllung	495
	16.4.4.2 Graphitfüllung	497
	16.4.4.3 CKF-Füllung	499
	16.4.4.4 Eisenfüllung	500
16.4.5	Messergebnisse der Permeabilitätszahlen für Frequenzen unter 15 MHz	501
	16.4.5.1 Kohlenstofffüllung, Graphitfüllung, CKF-Füllung	501
	16.4.5.2 Eisenfüllung	501
16.4.6	Messergebnisse der Materialparameter μ und ϵ für Frequenzen über 500 MHz	505
	16.4.6.1 Kohlenstofffüllung	507
	16.4.6.2 Graphitfüllung	508
	16.4.6.3 Kohlekurzfaser-Füllung	509
	16.4.6.4 Eisenfüllung	511
16.4.7	Der Einfluss von Glasfasern auf die Permittivität	512
16.5	Umsetzung der Messergebnisse auf reale Strukturen	515
16.6	Literaturverzeichnis zu Kapitel 16	519

17 Crashverhalten von CFK-Werkstoffen und CFK-Strukturen	523
17.1 Einführung zum Crashverhalten von CFK-Proben und CFK-Strukturen	523
17.2 Grundlegende Betrachtungen zum Crash- und Energieabsorptionsverhalten von Faserverbundwerkstoffen	529
17.3 Untersuchungen zum Crash-Verhalten von Busstrukturen aus Faserverbunden	530
17.4 Grundlegende Begriffe und Aussagen für die Konstruktion von mittragenden Crash-Strukturen	531
17.4.1 Einführung	531
17.4.2 Ertragbare, spezifische Energieabsorption	532
17.4.3 Allgemeine Aussagen zur Konstruktion von Crash-Strukturen	533
17.5 Crash-Simulation von Faserverbundbauteilen	536
17.5.1 Einleitung	536
17.5.2 Erläuterungen zur Berechnung des Crash-Vorganges	536
17.5.3 Erklärungen zu Crash-Simulationsprogrammen ..	538
17.6 Literaturverzeichnis zu Kapitel 17	539
18 Weitere Kriterien und Einsatzmöglichkeiten bei Verwendung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen . .	543
18.1 Verbesserte Tragflügelstreckungen durch den Einsatz von CFK	543
18.2 Brandverhalten und Feuerfestigkeit von CFK-Strukturen .	544
18.2.1 Richtlinien und Anforderungen zum Brandverhalten	544
18.2.2 Möglichkeiten zur Verbesserung des Brandverhaltens	547
18.3 Korrosionsverhaltenseigenschaften	548
18.4 Wärmeausdehnungsverhalten von C-Fasern und CFK-Verbunden	551
18.5 Blitzschutzeigenschaften und Schutz gegen elektrostatische Aufladung	552
18.6 Wärmedämmung und Wärmeleitung durch den Einsatz von C-Fasern	556
18.7 Literaturverzeichnis zu Kapitel 18	558

19 Untersuchungen zum Langzeitverhalten von CFK-Komponenten 559

19.1 Bauteil-Auswahl-Kriterien 560

19.2 Langzeiterprobungs-Ergebnisse 562

19.3 Zusammenfassende Beurteilung 566

19.4 Literaturverzeichnis zu Kapitel 19 566

20 Das Beulverhalten und die Tragfähigkeit im Nachbeulbereich 569

20.1 Einleitung 569

20.2 Zur Geometrie der Versuchsteile 569

20.3 Der Vergleich zwischen Theorie und Versuch 575

20.4 Theoretische Grundlagen 584

20.4.1 Die Stabilitätsgrenze der versteiften, anisotropen Platte 584

20.4.2 Lösung des Beulproblems für das in 20.4.1 definierte Beispiel 586

20.4.2.1 Geometrie und charakteristische Daten der Platte 586

20.4.2.2 Bestimmung des Membranspannungszustandes und des Elastizitätsgesetzes . . 589

20.4.2.3 Wahl eines geeigneten Verformungsansatzes für w und Integration der Formänderungsarbeiten 591

20.4.2.4 Differenzierung der Arbeiten nach den Konstanten des Verformungsansatzes und Konstituierung sowie Lösung des Eigenwertproblems 593

20.4.3 Zusammenfassung und Ausblick 596

20.4.4 Die Berücksichtigung der Stringertorsion 597

20.5 Schlussbemerkungen 597

20.6 Literaturverzeichnis zu Kapitel 20 599

Sachwortverzeichnis 601

Faserverbundbauweisen Eigenschaften
mechanische, konstruktive, thermische, elektrische,
ökologische, wirtschaftliche Aspekte

Flemming, M.; Roth, S.

2003, XXVIII, 615 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-00636-7