

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b> .....	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
<b>2 Analogien zwischen Faserverbunden der Natur und Technik</b> .....	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

<b>3 Die Theorie zur Berechnung dünnwandiger Lamine . .</b>	<b>31</b>
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 Laminen	55
3.10 Literaturverzeichnis zu Kapitel 3 . . . . .	56
<b>4 Die Deformation anisotroper Lamine und die Bedeutung der Kopplungsmatrix B . . . . .</b>	<b>57</b>
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
<b>5 Berechnungsbeispiele . . . . .</b>	<b>67</b>
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
<b>6</b>	<b>Festigkeithypothesen - Festigkeitsberechnungen .....</b>	<b>111</b>
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 $\sigma_2, \tau_{12}$ - 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

<b>7 Vergleich der mechanischen Eigenschaften zwischen gerichteten kurz- und langfaserverstärkten Thermoplasten</b> .....	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 Kurzfasereprepregs 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
<b>8</b>	<b>Mechanische, temperaturabhängige und wirtschaftliche Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen . . . . .</b>	<b>213</b>
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
<b>9</b>	<b>Das Ermüdungsverhalten von Faserverbunden bei dynamischer Belastung . . . . .</b>	<b>267</b>
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
<b>10</b>	<b>Der Einfluss von feuchtwarmen Klima auf die Lamineigenschaften . . . . .</b>	<b>305</b>
10.1	Temperatur-/Feuchtigkeitseinflüsse . . . . .	305
10.2	Auswirkungen auf die Festigkeit . . . . .	314
10.3	Literaturverzeichnis zu Kapitel 10 . . . . .	319
<b>11</b>	<b>Korrelationsbetrachtungen . . . . .</b>	<b>321</b>
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

<b>12 Schadenstoleranz von Faserverbund-Werkstoffen und -bauteilen</b> .....	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
<b>13 Streuverhalten von Faserverbundwerkstoffen</b> . . . .	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 Festigkeits . . . . .	413
13.9	Untersuchung der Übertragbarkeit der Fasereigenschaften auf die Verbundeigenschaften am Beispiel der Zugfestigkeit . . . . .	414
13.10	Literaturverzeichnis zu Kapitel 13 . . . . .	424
<b>14</b>	<b>Recycling von Faserverbundwerkstoffen und Bauteilen</b>	<b>427</b>
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
<b>15</b>	<b>Aktive Funktionswerkstoffe und -bauweisen</b>	<b>437</b>
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
<b>16</b>	<b>Die elektrischen Eigenschaften von Faserverbunden und modifizierten Matrices . . . . .</b>	<b>453</b>
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 $\mu$ und $\epsilon$ 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

<b>17 Crashverhalten von CFK-Werkstoffen und CFK-Strukturen</b>	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
<b>18 Weitere Kriterien und Einsatzmöglichkeiten bei Verwendung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen . .</b>	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

<b>19 Untersuchungen zum Langzeitverhalten von CFK-Komponenten</b> .....	559
19.1 Bauteil-Auswahl-Kriterien .....	560
19.2 Langzeiterprobungs-Ergebnisse .....	562
19.3 Zusammenfassende Beurteilung .....	566
19.4 Literaturverzeichnis zu Kapitel 19 .....	566
<b>20 Das Beulverhalten und die Tragfähigkeit im Nachbeulbereich</b> .....	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 Membranspannungs- zustandes und des Elastizitätsgesetzes ..	589
20.4.2.3 Wahl eines geeigneten Verformungs- ansatzes 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
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	601