

INHALTSVERZEICHNIS

1. Nomenklatur, Indizierungsregeln und Definitionen	1
1.1 Abkürzungen	1
1.2 Formelzeichen, Zeichen	3
1.3 Indizes	7
1.3.1 Hochgestellte Indizes (i.a. rechte Seite)	7
1.3.2 Tiefgestellte Indizes (rechte Seite)	7
1.3.3 Über dem Zeichen	8
1.4 Doppelindizes	8
1.4.1 Allgemeines	8
1.4.2 Hinweis auf Unterschiede bei der Indizierung	10
1.4.3 Koordinatensysteme	11
1.4.4 Stoffkontinuum im ES-KOS	12
1.5 Mehrfachindizierung	12
1.6 Einfache Indizierungen für Spannungen im Schichtenverbund	13
1.7 Bezeichnungen von auftretenden Spannungen und ihren Resultierenden im Schichtenverbund	13
1.7.1 Gebrauch von Spannungen und ihre Unterscheidung	14
1.7.2 Indizierung der Spannungsergebnisresultierenden	15
1.8 Stoffgrößen-Bezeichnung	16
1.9 Die Bedeutung des Begriffes "Modell"	17
2. Faser-Kunststoff-Verbund und seine Ausgangswerkstoffe	21
2.1 Einführung zum Verbundwerkstoff	21
2.2 Schichtenverbunde und Lamine	23
2.3 Ausgangswerkstoffe	29
2.4 Faserwerkstoffe	31
2.4.1 Allgemeines	31
2.4.2 Faserarten	35
2.4.2.1 Glasfasern (GF)	37
2.4.2.2 Kohlefasern, Carbonfasern (CF)	38
2.4.2.3 Aramidfasern (AF)	39
2.4.2.4 Borfäden (BF)	40
2.4.2.5 Kunststofffasern, Synthesefasern (SF)	40
2.4.2.6 Andere Fasern	40
2.4.3 Faseroberfläche (Interphase)	40

2.4.4 Vorimprägnierte Faserprodukte (Prepregs)	41
2.5 Matrixwerkstoffe	42
2.5.1 Allgemeines	42
2.5.2 Duomere Kunststoffe; Reaktionsharze	44
2.5.2.1 Phenolharze (PF)	45
2.5.2.2 Ungesättigte Polyesterharze	45
2.5.2.3 Modifizierte Methacrylatharze (duomere Acrylharze)	47
2.5.2.4 Vinylesterharze	47
2.5.2.5 Epoxidharze	48
2.5.2.6 Polyimide	49
2.5.2.7 Triazine	49
2.5.3 Thermoplastische Kunststoffmatrices	50
2.5.4 Matrixhybride	51
2.6 Andere Ausgangswerkstoffe	51
2.6.1 Stützkernwerkstoffe	52
2.6.2 Liner (zur Auskleidung zylindrischer Bauteile)	52
2.7 Allgemeines zur Wahl der Ausgangswerkstoffe	53

3. Verbund- und Bauteilherstellung 55

3.1 Die Bedeutung der Herstellung für die Bauteilauslegung	55
3.2 Herstellverfahren	58
3.2.1 Manuelle Verfahren (Verbundformung auf dem Formwerkzeug)	61
3.2.2 Bandlegen	62
3.2.2.1 Maschinelles Bandlegen (Verbundformung auf dem Formwerkzeug mittels der Prepreg-Technologie)	62
3.2.2.2 Manuelles Bandlegen (Verbundformung auf oder zwischen dem Formwerkzeug)	62
3.2.3 Wickeln (Verbundformung auf dem Formwerkzeug)	62
3.2.4 Schleudern (Verbundformung im Formwerkzeug)	65
3.2.5 Pressen (Verbundformung zwischen Formwerkzeugen)	67
3.2.6 Sondertechniken (Verbundformung meist zwischen Formwerkzeugen)	69
3.2.6.1 Kontinuierliche Verfahren (zur Erzeugung von Profilen, Platten und bandförmigem Halbzeug)	69
3.2.6.2 Injektionsverfahren	70
3.2.6.3 Spritzgießen	71
3.2.6.4 Vakuumsackverfahren	71

3.2.6.5	Prepregeinsatz	72
3.2.6.6	Thermal-Expansion-Molding	73
3.2.6.7	Sonderhärtetechniken	73
3.3	Verbindungen (Kraftüberleitung in Fügstellen)	73
3.3.1	Lösbare Verbindungen	74
3.3.1.1	Allgemeines	74
3.3.1.2	Bolzen	75
3.3.1.3	Nieten	82
3.3.2	Nicht lösbare Verbindungen	82
3.3.2.1	Einschnittige Überlappung	86
3.3.2.2	Zweischchnittige Überlappung	86
3.3.2.3	Schäftungen und Stufenstöße	90
3.3.3	Krafteinleitungen	95
3.3.3.1	Schlaufe	95
3.3.3.2	Keilanschluß	98
3.3.3.3	Einsetzteil	99
3.3.4	Hinweis auf nachträglichen Einbau von Verbindungszonen	100
3.4	Reparaturen von und mit FKV	101
3.5	Folgerungen für die Projektierung	105

4. Werkstoffeigenschaften, Versuche und Interpretation durch Modelle 111

Kuno Stellbrink und Kurt Moser

4.1	Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe	112
4.1.1	Eigenschaften der gebräuchlichsten Fasern	112
4.1.2	Eigenschaften der gebräuchlichsten Matrices	114
4.1.3	Grenzfläche (Interphase)	114
4.2	Eigenschaften der Einzelschicht bei Belastung in der Schichtebene	116
4.2.1	Einfache (einachsige) Belastung der Einzelschicht	117
4.2.1.1	Kurzzeitbelastung der Einzelschicht	118
4.2.1.2	Ruhende Langzeitbelastung der Einzelschicht	119
4.2.1.3	Veränderliche Langzeitbelastung der Einzelschicht	120
4.2.2	Kombinierte (mehrachsig) Beanspruchung der Einzelschicht	122
4.3	Eigenschaften des Schichtenverbundes	123
4.3.1	Ruhende Kurzzeitbelastung im Schichtenverbund	124
4.3.2	Ruhende Langzeitbelastung im Schichtenverbund	125

4.3.3	Veränderliche Langzeitbelastung des Schichtenverbundes	125
4.3.4	Hybridfaser-Schichtenverbunde	126
4.4	Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die Eigenschaften von Schichtenverbunden	127
4.4.1	Unkonventionelle mechanische Belastung	127
4.4.1.1	Schlag- und Stoßbelastung	127
4.4.1.2	Erosion	128
4.4.2	Einflüsse von Feuchtigkeit und Temperatur	129
4.4.2.1	Verformungen bei Temperaturänderungen	129
4.4.2.2	Verformungen bei Feuchtigkeitsänderungen	130
4.4.2.3	Eigenschaftsänderungen unter Temperatureinfluß	131
4.4.2.4	Eigenschaftsänderungen unter Feuchtigkeitseinfluß	132
4.4.2.5	Eigenschaftsänderungen bei gleichzeitiger Einwirkung von Temperatur, Feuchtigkeit und mechanischer Belastung	132
4.4.3	Alterung	133
4.4.4	Galvanokorrosion	133
4.4.5	Elektrische Belastung	134
4.4.6	Einwirkung chemischer Reagenzien	134
4.4.7	Einflüsse der Weltraumumgebung	134
4.5	Teilchenverbund	135
4.6	Feststellen der Eigenschaften durch Versuche	135
4.6.1	Zugversuch	137
4.6.1.1	Parallel zur Faserrichtung	137
4.6.1.2	Senkrecht zur Faserrichtung	138
4.6.2	Druckversuch	138
4.6.2.1	Parallel zur Faserrichtung	138
4.6.2.2	Senkrecht zur Faserrichtung	139
4.6.3	Bestimmung der intralaminaren Schubsteifigkeit und -festigkeit	140
4.6.3.1	$\pm 45^\circ$ -Zugversuch	140
4.6.3.2	10° -Zugversuch	141
4.6.4	Hygrothermale Ausdehnungskoeffizienten	141
4.6.4.1	Genaue Messung	141
4.6.4.2	Grobe Schätzmethode	142
4.6.5	Praktische Bestimmung von Masse und Geometrie	143
4.6.5.1	Allgemeines	143
4.6.5.2	ES-Dicke	145
4.6.5.3	Fasergehalt	146
4.6.6	Schichtenverbunddicke	148
4.6.7	Zur Analyse des SV	148

4.7	Eigenschaften einzelner Einzelschichtverbunde	148
4.8	Interpretation durch Modelle	151
4.8.1	Struktur - und Modellfindung	151
4.8.2	Einzelschichtmodell	155
4.8.3	E-Modul und Stoffsteifigkeit	156
4.8.4	Einzelschichtmodelle zur Interpretation von Versuchsergebnissen	156
4.8.4.1	Verformungsverhalten	156
4.8.4.2	Bruchverhalten	158
4.8.4.3	Schlußfolgerungen	159
4.9	Zusammenfassung	159
5.	Vorausberechnung der ES-Kennwerte mittels Mikromechanik	163
5.1	Voraussetzungen	163
5.1.1	Mögliche Methoden	163
5.1.2	Elastizitätstheoretische Grundlagen	164
5.1.2.1	Allgemeines	164
5.1.2.2	Zum Stoffverhalten	166
5.1.2.3	Ingenieurkonstanten aus C_{ij}	172
5.1.2.4	Rückrechnung der C_{ij} aus den Ingenieurkonstanten	173
5.1.2.5	Reduzierte Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten	173
5.2	Verformungskennwerte	174
5.2.1	Mikromechanische Modelle	174
5.2.2	Parallelfaserverstärkte Einzelschicht (P-ES)	177
5.2.2.1	E_{11} -Modul bei isotropen Fasern	177
5.2.2.2	E_{11} -Modul bei anisotropen Fasern	179
5.2.2.3	Matrixdominante Ingenieurkonstanten E_{11} , G_{12} , G_{23} , ν_{21} , ν_{13} , ν_{23} bei isotropen Fasern	179
5.2.2.4	Verallgemeinerte Ermittlung der Ingenieurkonstanten E_{ii} und ν_{ij}	180
5.2.2.5	Linearer Temperatur-Ausdehnungskoeffizient α_{11}^T	182
5.2.2.6	Feuchte-Ausdehnungskoeffizient α_{11}^M	184
5.2.3	Wirrfaserverstärkte Einzelschicht (W-ES)	185

5.2.3.1	Räumliche Anordnung der Faser; 3-D-Fall	185
5.2.3.2	Moduln für eine zweidimensionale Verteilung der Fasern; 2-D-Fall	186
5.2.3.3	Temperaturausdehnungskoeffizient α_{11}^T	187
5.2.3.4	Einfluß der Geometrie der Faser	188
5.2.4	Gewebeverstärkte Einzelschicht (G-ES) als Kreuzverbund SV [0/90]	192
5.2.5	Gewebeverstärkte Einzelschicht (G-ES) vorausgerechnet nach der FEM	193
5.3	Festigkeitskennwerte	194
5.3.1	Zur mikromechanischen Beschreibung	194
5.3.2	Parallelfaserverstärkte Einzelschicht (P-ES)	194
5.3.2.1	Zug in Faserrichtung	195
5.3.2.2	Druck in Faserrichtung	201
5.3.2.3	Festigkeiten quer zur Faserrichtung	205
5.3.3	Ansätze für wirrfaserverstärkte ES (W-ES)	208
5.3.3.1	Aus P-ES abgeleitet	209
5.3.3.2	Aus der Einbettungsfestigkeit abgeleitet	209
5.3.4	Ansätze für gewebeverstärkte ES (G-ES)	211
5.4	Ergänzende Betrachtungen	212
5.4.1	Verteilte Faserhybride	212
5.4.2	Imperfekte Faserlagen	213
5.4.3	Langzeitverhalten	214
5.5	Komplexe Verformungskennwerte der P-ES	218
5.5.1	Allgemeines	218
5.5.2	Mikromechanische Berechnung	219
5.5.3	Zylindermodell nach <i>Hashin</i>	220
5.5.4	Federmodell nach <i>Kehl</i>	222
5.5.5	Formeln von <i>Chamis</i>	223
5.5.6	Vergleich der Ergebnisse	224
5.5.6.1	E-Glas (isotrope Faser)	225
5.5.6.2	Carbonfaser (anisotrop)	225
5.6	Zusammenfassung	229

6. Schichtenverbundanalyse 231

6.1	Transformationsbeziehungen	231
6.1.1	Das allgemeine 3D-Stoffelement	231
6.1.2	Die 3D-Einzelschicht	233
6.1.3	Die 2D-Einzelschicht	234

6.1.3.1	Transformation von Spannungen und Verzerrungen	235
6.1.3.2	Transformation von Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrizen	236
6.2	Verformungsverhalten einer Einzelschicht	240
6.2.1	Ebener Spannungs- oder ebener Verzerrungszustand - Betrachtung in Richtung der Stoffhauptachsen (on-axis)	241
6.2.2	Ebener Spannungszustand - Betrachtung in beliebiger Richtung (off-axes)	243
6.2.3	Invariante und quasi-isotrope Konstante als Entwurfshilfen	245
6.2.4	Veranschaulichbare Bestandteile von Koeffizienten der Nachgiebigkeitsmatrix, welche Ingenieurkonstanten genannt werden	247
6.2.5	Ingenieurkonstanten der ES im SV-KOS	250
6.2.6	Hygrothermische Verformungen	251
6.2.7	Hinweise auf die Problematik einer G-ES-Berechnung	252
6.2.8	Langzeitverhalten einer Einzelschicht	253
6.3	Festigkeit einer Einzelschicht	253
6.3.1	Isotrope Einzelschicht	253
6.3.2	Orthotrope Einzelschicht	255
6.3.3	Versagenshypothesen für Einzelschichten	258
6.3.3.1	Kriterium der maximalen Hauptspannungen und -verzerrungen	259
6.3.3.2	Tensor-Polynom-Kriterium	261
6.3.4	Beanspruchungsfaktor	267
6.3.5	Spezielle Versagenskriterien	268
6.3.6	Modifiziertes Tensor-Polynom-Kriterium	269
6.4	Verformungsverhalten des Schichtenverbundes	271
6.4.1	Grundlegendes zu den Schichtenverbundtheorien	271
6.4.2	Klassische Laminattheorie (CLT)	276
6.4.2.1	Verformungsverhalten eines SV (allgemein unsymmetrischer Aufbau)	276
6.4.2.2	Sonderfall: Laminat (symmetrischer SV)	282
6.4.3	Bemerkungen zu speziellen Schichtenverbunden	283
6.4.4	Der FKV-Plattenstreifen oder -Balken	284
6.4.5	Dämpfungsverhalten - komplexe Gesamtsteifigkeit	285
6.4.6	SV-Analyse des Gebrauchszustandes	285
6.5	Festigkeit des Schichtenverbundes	286
6.5.1	Nachweisführung: SV-Analyse der Traglastgrenzzustände	287
6.5.1.1	Standardfall	287
6.5.1.2	Die schichtenweise Bruchanalyse der 1. Art	288

6.5.1.3	Die schichtenweise Bruchanalyse der 2. Art	289
6.5.1.4	Die schichtenweise Bruchanalyse der 3. Art	289
6.5.1.5	Bewertung der SV-Analyse nach dem Sicherheitskonzept	289
6.5.1.6	Programntechnische Umsetzung	290
6.5.2	Beanspruchung über FPF hinaus	291
6.6	Nichtmechanische Beanspruchung (Temperatur und Feuchte)	292
6.7	Interlaminare Beanspruchung im SV	298
6.7.1	Interlaminare und räumliche Spannungen im FKV	298
6.7.2	Ermittlung der scheinbaren Scher- und Schubfestigkeit	301
6.7.2.1	Short Beam Shear Test	301
6.7.2.2	Rail Shear Test	302
6.7.2.3	Modifizierter Rail Shear Test	303
6.7.3	Ermittlung der resultierenden ILS-Beanspruchung (Torsionsversuch)	306
6.7.4	Experimentelle Erfassung der tatsächlichen Schub- und Scherspannungen (Neigungsscherversuch)	310
6.7.5	Zusammenfassung der experimentellen Ermittlung der ILS	314
6.7.6	Quadratisches Versagenskriterium	314
6.7.7	Spannungskonzentration am freien Rand (free-edge-effect)	317
6.8	Netztheorie	319
6.9	Ausblick zur Schichtenverbundtheorie	327
7.	Berechnung der Bauteilbeanspruchung	329
	<i>Kurt Moser, Alfred Schmid und Hermann Lehar</i>	
7.1	Voraussetzung zur Beanspruchungsermittlung	329
7.1.1	Was sind Einwirkungen?	329
7.1.2	Welches ist das statisch wirksame System?	334
7.1.3	Was muß noch erwogen werden?	336
7.1.4	Erstannahmen beim Studienentwurf	338
7.2	Grundlegende Verfahren zur Ermittlung der Beanspruchung von Bauteilen	339
7.2.1	Allgemeines	339
7.2.2	Die Verfahren von <i>Ritz</i> und <i>Galerkin</i>	345
7.2.3	Energieprinzip	346
7.2.4	Prinzip der virtuellen Arbeit	348
7.2.5	Prinzip von <i>Lagrange</i>	349
7.2.6	Prinzip von <i>Castigliano</i>	350
7.2.7	Verallgemeinerte Technische Biegetheorie (VTB)	

nach <i>R. Schardt</i>	351
7.2.7.1 Allgemeines	351
7.2.7.2 Verwölbung	352
7.2.7.3 Querschnittsverschiebungen	353
7.2.7.4 Spannungen	354
7.2.7.5 Verformungsfunktionen	355
7.2.7.6 Schnittgrößen	356
7.2.7.7 Wölbwiderstände	357
7.2.7.8 Differentialgleichungen	358
7.2.7.9 Lasten	358
7.3 Computerunterstützte numerische Methoden zur Ermittlung der Beanspruchung in Platten und Schalen	359
7.3.1 Die Finite-Element-Methode (FEM); allgemein	359
7.3.2 Die isoparametrische Formulierung	365
7.3.3 Das degenerierte 3D-Konzept	368
7.3.4 Verschiebungs-Verzerrungs-Beziehungen (geo- metrische Gleichungen)	375
7.3.5 Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen (Stoffgesetze)	378
7.3.6 Spannungserresultierende	378
7.3.7 Schubkorrekturfaktoren	381
7.4 Schubweiche, geschichtete Platten und Schalen nach FEM	383
7.4.1 Vorbemerkungen	383
7.4.2 Elementbeschreibung	384
7.4.3 Verzerrungen im LOK-KOS (SV-KOS)	388
7.4.4 'Konkordante' [B]-Matrix	394
7.4.5 Integration der Steifigkeitsmatrix	398
7.4.5.1 Über die Dicke	398
7.4.5.2 Über das Gebiet	401
7.4.6 Programmierung der Steifigkeitsmatrix	404
7.4.6.1 Gliederung der Steifigkeitsmatrix	404
7.4.6.2. Elimination der inneren Freiheitsgrade	407
7.4.7 Die 'rechte' Seite	408
7.4.7.1 Linienlasten	409
7.4.7.2 Flächenlasten	413
7.4.7.3 Indirekte Lasten	416
7.4.8 Schnittgrößen und deren Glättung	420
7.5 Spezielle Finite Elemente	423
7.5.1 Anwendung von streifenförmigen Elementen	423
7.5.2 Einbindung der Stochastik in die FEM	425
7.5.3 Methode der Randelemente	426
7.6 Instabilität	426
7.6.1 Allgemeine Betrachtungen	426
7.6.2 Der Gelenkstab aus FKV	427

7.6.3	Allgemeine Stabtragwerke	428
7.6.4	FKV-Scheibe unter Normalkraftbeanspruchung	430
	7.6.4.1 Kurzzeitbelastung	430
	7.6.4.2 Langzeitbelastung	434
7.6.5	Der Zylinder aus FKV	434
	7.6.5.1 Achsialdruckbeulen	434
	7.6.5.2 Außendruckbeulen; allgemein	436
	7.6.5.3 Außendruckbeulen; Erdbettung	437
7.6.6	Das Knittern der Sandwich-Deckschichte aus FKV	438
7.6.7	Zusammenhang Knickung/Eigenschwingung	439
7.7	Dynamisches Verhalten	440
	7.7.1 Allgemeines	440
	7.7.2 Eigenfrequenzen, Eigenschwingformen	441
	7.7.3 Dämpfungsverhalten	441
	7.7.3.1 Grundsätzliches	441
	7.7.3.2 Auf Biegung beanspruchte Strukturen	442
	7.7.3.3 Zylindrische Tragwerke	444
7.8	EDV-Programme	446
7.9	Zusammenfassung	448
8.	Sicherheit und Zuverlässigkeit	451
8.1	Einführung	451
8.2	Grundlagen	452
	8.2.1 Begriffe	453
	8.2.2 Grenzzustände	454
	8.2.3 Anforderungen an die Zuverlässigkeit	456
	8.2.4 Beurteilung der Zuverlässigkeit; Basisvariable	456
	8.2.5 Begleitende Kontrolle (Dokumentation und Überwachung)	459
8.3	Beschreibung unsicherer Größen auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite	460
	8.3.1 Allgemeines und Wahl der Basisvariablen	460
	8.3.2 Stochastische Modelle für Einwirkungen	467
	8.3.2.1 Zeitunabhängige Einwirkungen	467
	8.3.2.2 Zeitabhängige Einwirkungen	468
	8.3.3 Stochastische Modelle für den FKV-Widerstand	469
	8.3.3.1 Ruhende Kurzeiteinwirkung	469
	8.3.3.2 Ruhende Langzeiteinwirkung	472
	8.3.3.3 Veränderliche Langzeiteinwirkung	473
8.4	Kriterien für die Festlegung des Zuverlässigkeitsniveaus	477

8.5 Grundsätzliche Beurteilung der Sicherheit von FKV-Bauteilen durch einen Zuverlässigkeitsnachweis	478
8.5.1 Allgemeines	478
8.5.2 Stufe-2-Verfahren	483
8.5.3 Nachweis mit Hilfe von Teilsicherheitsbeiwerten und Bemessungswerten (vereinfachtes Stufe 2-Verfahren)	485
8.5.4 Stufe-1-Verfahren	487
8.6 Experimenteller Nachweis der Zuverlässigkeit von FKV-Bauteilen	488
8.6.1 Statistische Qualitätskontrolle	488
8.6.2 Prototypenversuche an Bauteilen	489
8.6.3 Prüfversuche	489
8.7 Zusammenfassung	490
9. Abschließende Empfehlungen	491
9.1 Von der Idee zur Ausführung des Bauteils	491
9.2 Empfehlungen für nachzuweisende Voraussetzungen, die bei der Herstellung von tragenden Bauteilen aus FKV zu erbringen sind	494
9.3 Sonstige Empfehlungen	495
9.4 Das in Europa gültige Qualitätssicherungssystem	496
10. Glossar	497
11. Literaturhinweise	525
12. Stichwortverzeichnis	569