

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Autorenverzeichnis.....	XXXI

Teil I – Produktentstehungsprozess für Leichtbaukomponenten und -systeme 1

1	Der Prozess der Produktentstehung	
	<i>Albert Albers, Andreas Braun, Jonas Heimicke, Thilo Richter</i>	5
1.1	Grundlagen	9
1.1.1	Modellierung von Produktentstehungsprozessen.....	9
1.1.2	Grundlagen der Systemtechnik.....	11
1.1.3	Das Erklärungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung	12
1.1.4	Bekannte Prozessmodelle	12
1.1.5	Grenzen herkömmlicher Prozessmodelle.....	14
1.1.6	Neues Modell für einen Produktentstehungsprozess – Controlling vs. Entwicklerunterstützung	16
1.1.6.1	Controlling im Mittelpunkt.....	17
1.1.6.2	Unterstützung von Entwicklern.....	17
1.2	Das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell.....	18
1.2.1	Hypothesen der Produktentstehung.....	18
1.2.2	Begriffe und Elemente des iPeM	21
1.2.2.1	Aktivitätenmatrix	21
1.2.2.2	Aktivitäten der Produktentstehung.....	21
1.2.2.3	Problemlösungsprozess SPALTEN.....	24
1.2.2.4	Das Systemtriple aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem.....	26
1.2.2.5	Ressourcensystem.....	26
1.2.2.6	Phasenmodell.....	27
1.2.2.7	Ganzheitliche Modellierung durch die verschiedenen Ebenen und deren Wechselwirkungen im iPeM.....	27
1.2.2.8	iPeM zur Nutzung von Erfahrung und Wissen im Produktentstehungsprozess	28
1.3	Anwendung des iPeM bei der Entwicklung einer Felge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff.....	29
1.4	Zusammenfassung.....	32
1.5	Weiterführende Informationen	33
2	Technology Intelligence – Technologiefrühaufklärung mit Künstlicher Intelligenz	
	<i>Joachim Warschat, Antonino Ardilio</i>	37
2.1	Auslöser von Innovationen	41
2.2	Herausforderungen bei der Technologiesuche.....	41
2.2.1	Suchstrategie.....	41
2.2.2	Wissenswachstum.....	42

2.3	Die funktionssemantische Methode (FSM).....	43
2.3.1	Der Ansatz	43
2.3.2	Vom Informationsbedarf zur gezielten Suche.....	44
2.4	Die funktionssemantische Methode im Leichtbau.....	48
2.5	Technologieradar.....	49
2.6	Marktextplorer.....	50
2.7	Fazit.....	51
2.8	Literaturverzeichnis	51
3	Leichtbaustrategien und Bauweisen	
	<i>Gundolf Kopp, Norbert Burkardt, Neven Majić.....</i>	<i>53</i>
3.1	Einleitung.....	55
3.2	Anforderungen an Leichtbaukonstruktionen	55
3.3	Leichtbaustrategien	58
3.3.1	Bedingungsleichtbau	59
3.3.2	Konzeptleichtbau	60
3.3.3	Stoffleichtbau	61
3.3.4	Formleichtbau	62
3.3.5	Fertigungsleichtbau	63
3.3.6	Leichtbau versus Kosten	63
3.4	Bauweisen	66
3.4.1	Differentialbauweise.....	66
3.4.2	Integralbauweise	66
3.4.3	Modulbauweise.....	67
3.4.4	Verbundbauweise.....	68
3.4.4.1	Hybridbauweise.....	69
3.4.4.2	Multi-Material-Design.....	69
3.5	Fazit.....	71
3.6	Weiterführende Informationen	71
4	Virtuelle Produktentwicklung	
	<i>Albert Albers, Neven Majić, Andreas Schmid, Manuel Serf.....</i>	<i>73</i>
4.1	Computergestützte Konstruktion – Computer Aided Design (CAD).....	77
4.2	Computergestützte Entwicklung (CAE) – Computer Aided Engineering.....	79
4.2.1	Produktsimulation mit der Finite-Elemente-Methode (FEM).....	79
4.2.2	Entwicklung der FEM.....	80
4.2.3	Anwendungsbereiche der FEM.....	81
4.2.4	Verfügbare FEM-Programme.....	81
4.2.5	Ablauf einer FEM-Analyse.....	82
4.2.6	Literatur zu Berechnungsprogrammen und zu FEM.....	86
4.3	Strukturoptimierung	86
4.3.1	Topologieoptimierung	87
4.3.1.1	Topologieoptimierung eines Fahrradbremskraftverstärkers.....	89

4.3.1.2	Topologieoptimierung eines Felgensterns.....	91
4.3.2	Formoptimierung.....	94
4.3.2.1	CAD-basierte Formoptimierung.....	95
4.3.2.2	FE-Netz-basierte Formoptimierung.....	96
4.3.2.3	Beispiel zur Netz-basierten Formoptimierung.....	97
4.3.2.4	Formoptimierung mit Sicken.....	102
4.3.3	Parameteroptimierung.....	107
4.4	Fazit.....	110
4.5	Weiterführende Informationen	111
5	Systemleichtbau – ganzheitliche Gewichtsreduzierung	
	<i>Albert Albers, Norbert Burkardt</i>	113
5.1	Definition der Begriffe.....	117
5.2	Rahmenbedingungen für den Systemleichtbau	119
5.3	Analyse und Synthese des technischen Systems	122
5.3.1	Funktionsintegration in einem Bauteil	122
5.3.2	Trennung der Funktionen	123
5.4	Rechnergestützte Methoden im Systemleichtbau.....	123
5.4.1	Topologieoptimierung von Elementen in einem technischen System	124
5.4.2	Optimierung von mechatronischen Systemen.....	125
5.4.3	Automatische Lastenermittlung.....	126
5.5	Konstruktion eines Roboterarms.....	127
5.6	Fazit.....	130
5.7	Weiterführende Informationen	131
6	Funktionsbasierte Entwicklung leichter Produkte	
	<i>Albert Albers, Sven Revfi, Markus Spadinger</i>	133
6.1	Der Erweiterte Target Weighing Ansatz (ETWA).....	137
6.2	Der ETWA als Problemlösungsprozess	137
6.3	Funktionsweise des Erweiterten Target Weighing Ansatzes	138
6.3.1	Produktgeneration G_{n-1}	138
6.3.2	Funktionsanalyse	138
6.3.3	Aufwandsanalyse der Teilsysteme oder Funktionsbereiche.....	139
6.3.4	Erstellung der Funktion-Aufwand-Matrix	139
6.3.5	Identifikation von Suchfeldern.....	140
6.3.6	Unternehmensspezifische Gewichtung der Faktoren Masse, Kosten und CO ₂ -Emissionen	141
6.3.7	Konzeptfindung	142
6.3.8	Konzeptbewertung	142
6.3.9	Konzepttragweite.....	142
6.3.10	Zielaufwand.....	145
6.4	ETWA und MBSE.....	145
6.5	Getriebegehäuse als Beispiel	146

6.6	Fazit.....	150
6.7	Weiterführende Informationen	150
7	Validierung im Produktentstehungsprozess	
	<i>Albert Albers, Tobias Düser</i>	153
7.1	Verifizierung und Validierung von Produkteigenschaften.....	155
7.2	Virtuelle und experimentelle Validierungsumgebung.....	155
7.3	Zielkonflikte bei der Validierung von Produkteigenschaften im Leichtbau	156
7.4	Validierungsprozess	157
7.5	Systemleichtbau durch keramische Werkstoffe als Beispiel	158
7.6	Fazit.....	160
7.7	Weiterführende Informationen	160
	Teil II – Werkstoffe für den Leichtbau – Auswahl und Eigenschaften	163
1	Werkstoffauswahl für den Leichtbau	
	<i>Kay Weidenmann, Alexander Wanner</i>	167
1.1	Werkstoffe und ihre Eigenschaften	169
1.2	Allgemeine Aspekte der Werkstoffauswahl.....	172
	1.2.1 Informationsquellen.....	172
	1.2.2 Darstellen und Vergleichen von Werkstoffeigenschaften	172
	1.2.3 Werkstoffauswahl im Produktentstehungsprozess.....	173
1.3	Auswahlstrategien	174
	1.3.1 Anforderungsprofil und Werkstoffbewertung	174
	1.3.2 Werkstoffindices zur Bewertung von Werkstoffen.....	176
1.4	Werkstoffauswahl mit Werkstoffindices.....	177
	1.4.1 Leichtbaurelevante Werkstoffindices	180
	1.4.2 Werkstoffauswahldiagramme.....	181
1.5	Mehrfache Randbedingungen und konkurrierende Ziele	183
	1.5.1 Mehrfache Randbedingungen	183
	1.5.2 Konkurrierende Ziele.....	184
1.6	Einfluss der Bauteilform	187
	1.6.1 Grundsätzliches	187
	1.6.2 Form und Effizienz	187
	1.6.3 Der Formfaktor	187
	1.6.4 Rolle des Formfaktors bei der Werkstoffauswahl	188
1.7	Beschränkungen durch den Bauraum	190
	1.7.1 Grundsätzliches.....	190
	1.7.2 Auswahlstrategie bei beschränktem Bauraum	190
	1.7.3 Weitere Bauteile und Lastfälle.....	192
1.8	Zusammenfassung.....	192
1.9	Weiterführende Informationen	194

2	Stähle	
	<i>Wolfgang Bleck</i>	195
2.1	Stähle sind vielseitige Werkstoffe	199
2.2	Hochfeste Flachprodukte	199
2.2.1	Stähle für Feinstblech (< 0,5 mm).....	199
2.2.2	Stähle für Feinblech (0,5–3 mm)	202
2.2.2.1	Bake-Hardening-Stähle.....	205
2.2.2.2	Hochfeste IF-Stähle	207
2.2.2.3	Mikrolegierte Stähle (HSLA-Stähle)	207
2.2.2.4	Dualphasenstähle (DP- und DH-Stähle).....	207
2.2.2.5	TRIP-Stähle	208
2.2.2.6	Komplexphasenstähle (CP-Stähle)	208
2.2.2.7	Martensitische Stähle (MS-Stähle).....	208
2.2.3	Stähle für Bleche in größeren Dicken.....	209
2.2.4	Stähle für das Pressformen.....	214
2.3	Stähle für Schmiedestücke	217
2.4	Stähle für hochfeste Drähte.....	220
2.5	Höchstfeste Stähle.....	221
2.5.1	Höchstfeste Vergütungsstähle.....	221
2.5.2	Höchstfeste martensitaushärtende Stähle (Maraging-Stähle).....	222
2.6	Recyclieverhalten von Stahl	223
2.7	Weiterführende Informationen	223
3	Aluminiumwerkstoffe	
	<i>Jürgen Hirsch, Friedrich Ostermann</i>	225
3.1	Aluminium als reines Metall.....	229
3.2	Aluminiumlegierungen	230
3.2.1	Einteilung und Nomenklatur	230
3.2.2	Knetlegierungen für Strukturbauteile	232
3.2.2.1	Mittelfeste Strukturwerkstoffe der Legierungsgruppe Al-Mg (EN AW-5xxx)	233
3.2.2.2	Mittelfeste Strukturwerkstoffe der Legierungsgruppe AlMgSi (EN AW-6xxx)	235
3.2.2.3	Mittelfeste Strukturwerkstoffe der Legierungsgruppe AlZnMg (EN AW-7xxx).....	235
3.2.2.4	Hochfeste AlCu- und AlZnMgCu-Legierungen der Serien AW-2xxx und AW-7xxx	236
3.2.3	Gusslegierungen für Strukturbauteile	236
3.3	Be- und Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen.....	237
3.3.1	Formgießen - Urformen	237
3.3.2	Halbzeuge aus Aluminiumknetlegierungen - Umformen	238
3.3.2.1	Aluminium-Strangpressprofile	239
3.3.2.2	Bänder, Bleche und Platten	239
3.3.2.3	Werkstoffverbunde mit Aluminium	240
3.3.3	Verarbeitung von Aluminiumhalbzeugen	241
3.3.3.1	Bearbeitung von Profilen.....	241
3.3.3.2	Blechumformung.....	241

3.3.4	Trennen und Spanen von Aluminiumlegierungen.....	243
3.3.5	Oberflächenbehandlungen.....	243
3.3.6	Fügen.....	244
3.3.7	Reparaturmöglichkeiten	245
3.4	Konstruktive Gesichtspunkte.....	245
3.4.1	Grundsätze der Gewichtseinsparung	245
3.4.2	Elastische Werkstoffeigenschaften und Leichtbaugrad.....	246
3.4.3	Verhalten unter schlagartiger Beanspruchung.....	247
3.4.4	Grundsätze für die Schwingfestigkeit	248
3.5	Recycling	249
3.6	Anwendung von Aluminiumwerkstoffen	249
3.7	Zusammenfassung.....	251
3.8	Weiterführende Informationen	252
4	Magnesiumwerkstoffe	
	<i>Peter Kurze</i>	255
4.1	Magnesium als reines Metall	259
4.2	Magnesiumlegierungen	260
4.2.1	Einteilung und Nomenklatur von Magnesiumlegierungen	260
4.2.2	Einfluss der Legierungselemente	261
4.3	Eigenschaften von Magnesiumlegierungen.....	262
4.3.1	Mechanische Eigenschaften	262
4.3.2	Physikalische Eigenschaften	264
4.3.3	Chemische Eigenschaften	266
4.4	Korrosion und Korrosionsschutz	267
4.4.1	Korrosion	267
4.4.2	Korrosionsschutz.....	268
4.4.2.1	Zusatz von ausgewählten Legierungselementen.....	268
4.4.2.2	Oberflächenbehandlung von Magnesiumwerkstoffen	268
4.5	Verarbeitung und Bearbeitung von Magnesiumlegierungen.....	271
4.5.1	Urformen	271
4.5.2	Umformen	272
4.5.3	Fügen von Magnesiumlegierungen	273
4.6	Anwendung von Magnesiumlegierungen	274
4.6.1	Automobilbau	274
4.6.2	Elektronik	275
4.6.3	Maschinenbau.....	276
4.6.4	Raumfahrt	277
4.7	Fazit.....	277
4.8	Weiterführende Informationen	278

5	Titanwerkstoffe	
	<i>Heinz Sibum, Jürgen Kiese</i>	281
5.1	Titan als Metall	285
5.2	Einteilung der Titanwerkstoffe	285
5.2.1	Reintitan	285
5.2.2	Titanlegierungen	286
5.3	Eigenschaften von Titanlegierungen	289
5.3.1	Physikalische und technologische Eigenschaften	289
5.3.2	Konsequenzen für eine werkstoffgerechte und kosteneffektive Konstruktion im Leichtbau ..	292
5.4	Be- und Verarbeitung von Titanwerkstoffen	293
5.4.1	Wärmebehandlung	293
5.4.2	Fügeverfahren	296
5.4.2.1	Thermisches Fügen	296
5.4.2.2	Mechanisches Fügen	297
5.4.2.3	Chemisches Fügen	299
5.4.3	Spanende Bearbeitung	299
5.4.4	Trennen, Stanzen, Lochen und Abtragen	300
5.4.5	Umformen	300
5.4.6	Oberflächenbearbeitung	301
5.4.6.1	Dekorative Schichten	301
5.4.6.2	Verschleißschutzschichten	302
5.4.6.3	Festigkeitsstrahlen	302
5.5	Sicherheitsaspekte und Recycling	302
5.6	Halbzeugherstellung und Halbzeugformen	303
5.7	Anwendungsbeispiele	304
5.8	Zusammenfassung und Ausblick	306
5.9	Weiterführende Informationen	307
6	Kunststoffe	
	<i>Axel Kauffmann</i>	309
6.1	Grundlagen	313
6.2	Thermoplaste	316
6.2.1	Standardkunststoffe	319
6.2.2	Technische Kunststoffe	320
6.2.3	Hochleistungspolymere	320
6.3	Duromere	321
6.3.1	Harzsysteme, Formmassen	321
6.3.2	Vernetzte Polyurethane	321
6.4	Elastomerwerkstoffe	323
6.4.1	Vernetzte Elastomere (Gummiwerkstoffe, Kautschuk)	323
6.4.2	Thermoplastische Elastomere (TPE)	325
6.5	Geschäumte Polymere	326

6.5.1	Weichelastische Schaumstoffe	327
6.5.2	Halbharte Schaumstoffe	328
6.5.3	Harte Schaumstoffe	328
6.6	Additive und Füllstoffe	330
6.7	Weiterführende Informationen	332
7	Faserverstärkte Kunststoffe	
	<i>Frank Henning unter Mitarbeit von Klaus Drechsler und Lazarula Chatzigeorgiou</i>	335
7.1	Das Prinzip von Verbundwerkstoffen	339
7.2	Kunststoffe als Matrix	340
7.3	Verstärkungsfasern und ihre Eigenschaften	343
7.3.1	Glasfasern	343
7.3.2	Kohlenstofffasern	344
7.3.3	Aramidfasern	347
7.3.4	Naturfasern	348
7.4	Textile Halbzeuge	350
7.4.1	Matten und Vliese	350
7.4.2	Gewebe	351
7.4.3	Gelege	352
7.4.4	Geflechte	353
7.4.5	Gesticke	354
7.4.6	Fiber Patch Preforming	356
7.4.7	Nähetechnologie	357
7.4.8	Bindertechnologie	358
7.5	Imprägnierte Halbzeuge	359
7.5.1	Duromere Systeme	360
7.5.1.1	Diskontinuierlich faserverstärkte Duromere	360
7.5.1.2	Kontinuierlich faserverstärkte Duromere	363
7.5.2	Thermoplastische Systeme	365
7.5.2.1	Diskontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste	365
7.5.2.2	Kontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste	366
7.6	Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen	369
7.6.1	Haftung zwischen Matrix und Faser	371
7.6.2	Einfluss auf Festigkeit und Steifigkeit	371
7.7	Anwendungsgebiete	373
7.8	Weiterführende Informationen	379
8	Technische Keramik	
	<i>Walter Krenkel</i>	383
8.1	Strukturkeramiken für Leichtbauanwendungen	387
8.1.1	Monolithische Keramiken	387
8.1.2	Keramische Wälzlager für die Antriebstechnik	388
8.1.3	Leichtbau-Kameragehäuse aus Siliciumnitrid	389

8.2	Leichtbau mit Faserverbund-Keramiken.....	390
8.2.1	Keramische Verbundwerkstoffe.....	390
8.2.2	Verstärkungsfasern.....	392
8.2.3	Herstellverfahren für CMC-Bauteile	393
8.2.4	Eigenschaften der CMC-Werkstoffe.....	395
8.2.5	Hochtemperatur-Leichtbau in der Raumfahrt.....	397
8.2.6	Keramische Leichtbaubremsen	398
8.2.7	Leichtbau in der Verbrennungstechnik und Wärmebehandlung.....	399
8.3	Zusammenfassung und Ausblick	400
8.4	Weiterführende Informationen	400
9	Hybride Werkstoffverbunde	
	<i>Kay Weidenmann, Frank Henning</i>	<i>403</i>
9.1	Verbundwerkstoffe vs. Werkstoffverbund.....	405
9.2	Grundlagen der Hybridisierung.....	406
9.3	Leichtbaurelevante Hybridkonzepte.....	409
9.3.1	Kunststoff-Metall-Hybride.....	409
9.3.2	Kunststoff-Kunststoff-Hybride.....	412
9.3.3	Kunststoff-Keramik-Hybride.....	415
9.3.4	Kunststoff-Holz-Hybride.....	416
9.4	Zusammenfassung.....	418
9.5	Weiterführende Informationen	418

Teil III – Fertigungsverfahren im Leichtbau – Formgebung, Be- und Verarbeitung..... 419

1	Urformen von metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Andreas Bührig-Polaczek</i>	
	<i>unter Mitarbeit von Samuel Bogner, Stephan Freyberger, Matthias Jakob, Gerald Klaus,</i>	
	<i>Heiner Michels, Christian Oberschelb, Uwe Vroomen.....</i>	<i>423</i>
1.1	Gießen.....	427
1.1.1	Verfahrensspezifische Möglichkeiten zur gegossenen Leichtbaukonstruktion	427
1.1.1.1	Konstruieren von Gussteilen	427
1.1.1.2	Charakteristische Größen der Gießprozesse.....	428
1.1.2	Auswirkungen von Prozess und Legierung auf die Eigenschaften des Gussbauteils.....	428
1.1.2.1	Auswirkungen der Erstarrungsbedingungen auf Gussgefüge und mechanische Eigenschaften.....	428
1.1.2.2	Gießbare Magnesiumwerkstoffe	429
1.1.2.3	Gießbare Aluminiumlegierungen	430
1.1.2.4	Titanlegierungen für den Formguss	430
1.1.2.5	Gusseisenwerkstoffe und gießbare Stähle.....	431
1.1.2.6	Hybride Werkstoffverbunde.....	432

1.1.3	Verfahren der Gießereitechnik.....	433
1.1.3.1	Dauerform und verlorene Form	433
1.1.3.2	Wirkgrößen im Gießprozess	433
1.1.3.3	Schmelze, Gießen und Nachbearbeitung.....	434
1.1.4	Schwerkraftguss.....	436
1.1.4.1	Schwerkraftkokillenguss	436
1.1.4.2	Schwerkraftsandguss	439
1.1.5	Das Niederdruck-Kokillengießverfahren.....	440
1.1.6	Das Druckgießverfahren	441
1.1.7	Das Feingussverfahren	443
1.1.8	Ausblick	446
1.2	Weiterführende Informationen	448
2	Umformen von metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Christoph Dahnke, Soeren Gies, Christian Löbbe, Alessandro Selvaggio, A. Erman Tekkaya</i>	<i>449</i>
2.1	Herstellung von Leichtbaustrukturen aus Blech durch Umformen.....	453
2.1.1	Unterschiedliche Leichtbaustrategien	453
2.1.2	Erweiterte Formgebungsgrenzen durch wirkmedienbasierte Blechumformverfahren	453
2.1.3	Herstellung belastungsangepasster Blechformteile	457
2.1.4	Presshärten höchstfester Blechformteile.....	458
2.1.5	Hybridbauweisen auf Basis von Blechhalbzeugen.....	460
2.2	Herstellung von Leichtbaustrukturen durch Massivumformung.....	462
2.2.1	Strangpressen	463
2.2.2	Runden beim Strangpressen	468
2.2.3	Verbundstrangpressen	469
2.2.4	Schmieden	470
2.3	Herstellung von Leichtbaustrukturen durch Biegeumformung	472
2.3.1	Profile als Basis für den Leichtbau	472
2.3.2	Herstellung von geraden Profilen durch Biegen	473
2.3.3	Herstellung von belastungsangepassten Profilen durch Biegen	476
2.3.4	Biegen von Rohren und Profilen	479
2.3.5	Biegen von belastungsangepassten Rohren und Profilen.....	483
2.4	Zusammenfassung.....	485
2.5	Weiterführende Informationen	486
3	Trennen von metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Benedict Stampfer, Volker Schulze, Jürgen Michna.....</i>	<i>491</i>
3.1	Zerteilen	495
3.1.1	Verfahren des Zerteilens	495
3.1.2	Verschleiß und Formfehler an der Schnittfläche.....	496
3.1.3	Zerteilen von NE-Metallen.....	496
3.2	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide.....	498
3.2.1	Einfluss auf den Prozess des Zerspanens.....	498

3.2.2	Zerspanen von NE-Metallen	501
3.2.2.1	Titanzerspanung.....	501
3.2.2.2	Magnesiumzerspanung	505
3.2.2.3	Aluminiumzerspanung.....	506
3.3	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide.....	508
3.3.1	Wasserstrahlschneiden.....	508
3.3.2	Schleifen	509
3.4	Abtragen	510
3.4.1	Laserbearbeitung.....	510
3.4.2	Funkenerosives Abtragen	511
3.5	Zusammenfassung	511
3.6	Weiterführende Informationen	512
4	Eigenschaftsänderungen bei metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Alexander Erz, Jürgen Hoffmeister, Stefan Dietrich, Volker Schulze</i>	515
4.1	Verfestigung durch Umformen	519
4.1.1	Verfestigungsstrahlen (Kugelstrahlen).....	519
4.1.2	Verfestigung durch Walzen (Festwalzen)	519
4.2	Wärmebehandlung.....	520
4.2.1	Härten	520
4.2.1.1	Martensitische Umwandlung	520
4.2.1.2	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder (ZTU-Schaubilder).....	522
4.2.1.3	Härtbarkeit von Stahl.....	524
4.2.2	Vergütung von Stahl.....	525
4.2.3	Chemische Verfahren bei Stählen.....	526
4.2.4	Aushärten am Beispiel einer Aluminiumlegierung	527
4.2.5	Aushärtung von Magnesiumlegierungen	531
4.2.6	Härten und thermomechanisches Behandeln von Titanlegierungen	532
4.2.7	Lokale Wärmebehandlungsmethoden zum thermischen Einstellen von Gefügegradienten...534	
4.3	Zusammenfassung.....	535
4.4	Weiterführende Informationen	536
5	Verarbeitung von Kunststoffen	
	<i>Axel Kauffmann</i>	539
5.1	Extrusion.....	543
5.1.1	Rohr- und Profilextrusion	544
5.1.2	Extrusionsblasformen.....	545
5.2	Spritzgießen.....	547
5.2.1	Thermoplast-Spritzgießen.....	548
5.2.2	Elastomer-Spritzgießen	550
5.2.3	Duroplast-Spritzgießen.....	550
5.2.4	Sonderverfahren	551
5.3	Schäumverfahren.....	554

5.3.1	Extrusionsschäumen	554
5.3.2	Partikelschäumen.....	554
5.3.3	Polyurethanschäumen	556
5.4	Pressen	558
5.5	Tiefziehen.....	559
5.6	Rotationsformen.....	560
5.7	Zusammenfassung.....	562
5.8	Weiterführende Informationen	562
6	Fertigungstechnologien für faserverstärkte Kunststoffe	
	<i>Frank Henning</i>	565
6.1	Fertigungsverfahren für diskontinuierlich faserverstärkte Duromere	569
6.1.1	Bulk Moulding Compound (BMC)	569
6.1.2	Rieselfähige diskontinuierlich faserverstärkte duromere Formmassen	569
6.1.3	Reinforced-Reaction Injection Moulding (R-RIM).....	570
6.1.4	Fasersprühen von Polyurethan	570
6.1.5	Fließpressen von SMC.....	573
6.1.6	Fließpressen diskontinuierlich faserverstärkter Duromere im Direktverfahren.....	574
6.2	Fertigungsverfahren für diskontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste.....	576
6.2.1	Spritzgießen	576
6.2.2	Direktprozesse im Spritzgießen	578
6.2.3	Fließpressen.....	580
6.2.3.1	Fließpressen glasmattenverstärkter Thermopaste (GMT)	580
6.2.3.2	Fließpressen langfaserverstärkter Thermoplastgranulate (LFT-G)	580
6.2.3.3	Fließpressen diskontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste im Direkt-Verfahren	581
6.3	Fertigungsverfahren für kontinuierlich faserverstärkte Duromere.....	585
6.3.1	Handlaminieretechnik.....	585
6.3.1.1	Unterteilung der Verfahren	587
6.3.1.2	Beispiele für die Anwendung des Handlaminierens.....	588
6.3.2	Prepreg-Technologien	590
6.3.2.1	Teilprozesse der Prepreg-Technologie	591
6.3.2.2	Werkzeuge für die Prepreg-Technologie.....	596
6.3.2.3	Aushärtung der Lamine	597
6.3.2.4	Anwendungsbeispiele für unterschiedliche Prepreg-Technologien	599
6.3.3	Flüssigharz-Imprägnierverfahren - LCM-Technologien.....	601
6.3.3.1	Übersicht über die Verfahren	601
6.3.3.2	Gebräuchliche Harzimpregierverfahren.....	605
6.3.3.3	Harzinjektionsverfahren	605
6.3.3.4	Pultrusion	617
6.3.3.5	Faserwickeln	619
6.3.3.6	Anwendungsbeispiele.....	621
6.3.3.7	Sonderverfahren	622
6.4	Fertigungsverfahren für kontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste	623
6.4.1	Tapelegetechnologien.....	623

6.4.2	Formgebung kontinuierlich faserverstärkter Organobleche und konsolidierter Gelege	625
6.4.3	Fertigung hybrider kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste	627
6.5	Weiterführende Informationen	628
7	Trennen faserverstärkter Kunststoffe	
	<i>Anton Helfrich, Volker Schulze, Chris Becke</i>	633
7.1	Bearbeitungsfehler und Bearbeitungsqualität	637
7.2	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide.....	639
7.2.1	Verschleiß und Schneidstoffe	639
7.2.2	Fräsen.....	639
7.2.3	Bohren	641
7.2.4	Drehen.....	644
7.2.5	Einspannen von faserverstärkten Kunststoffen bei der Zerspanung.....	645
7.3	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	646
7.3.1	Schleifen	646
7.3.2	Wasserstrahlschneiden.....	646
7.4	Abtragen.....	648
7.4.1	Abtragen mit Laserstrahlen.....	648
7.4.2	Funkenerosives Abtragen (EDM)	648
7.5	Zusammenfassung.....	649
7.6	Weiterführende Informationen	649
8	Formgebung bei Technischer Keramik	
	<i>Reinhard Lenk</i>	653
8.1	Technologie der Keramikherstellung.....	657
8.2	Formgebung Technischer Keramik	659
8.2.1	Prinzipien keramischer Formgebung.....	659
8.2.2	Keramische Formgebungsverfahren	661
8.2.2.1	Pressformgebung.....	661
8.2.2.2	Plastische und thermoplastische Formgebung.....	665
8.2.2.3	Gießformgebung	669
8.2.2.4	Additive Fertigung.....	671
8.2.3	Binderkonzepte und Entbinderungsverfahren	671
8.3	Komplexe keramische Bauteilstrukturen	672
8.3.1	Grundlagen.....	672
8.3.2	Fertigungstechnische Möglichkeiten und Anwendungsbeispiele für den Leichtbau.....	674
8.3.2.1	Direkte Formgebung	675
8.3.3.2	Formgebung und Fügen	675
8.3.2.3	Replikationstechniken.....	676
8.3.2.4	Verwendung von Trägermaterialien (PT-Keramik®)	678
8.3.3	Anwendungsbeispiele für den Leichtbau	681
8.4	Zusammenfassung.....	683
8.5	Weiterführende Informationen	683

9	Fertigungsrouten zur Herstellung von Hybridverbunden	
	<i>Frank Henning, Kay Weidenmann, Bernd Bader</i>	685
9.1	Oberflächenbehandlung als Vorbereitung zur Fertigung.....	689
9.1.1	Oberflächenmodifizierung mit Plasma.....	689
9.1.2	Chemische Aktivierung.....	689
9.2	In-mould Assembly (IMA).....	691
9.2.1	Umspritzen und Umpressen.....	691
9.2.2	Verarbeitung von Organoblechen in hybriden Verbunden.....	692
9.2.2.1	Allgemeine Aspekte.....	692
9.2.2.2	Fertigung von verstärkten Bauteilen auf Basis von Organoblechen.....	692
9.2.3	Fertigungsverfahren für kontinuierlich verstärkte, diskontinuierliche Faserverbunde.....	694
9.2.4	Hybride Innenhochdruckumformung.....	696
9.3	Post Moulding Assembly (PMA).....	699
9.3.1	Vergleich von PMA und IMA.....	699
9.3.2	Verbindungstechnik als wesentlicher Aspekt der PMA-Route.....	700
9.4	Fügen von Hybridverbunden mit anderen Bauteilen.....	701
9.5	Zusammenfassung.....	702
9.6	Weiterführende Informationen.....	703
10	Additive Fertigung von Strukturen und Werkstoffen für den Leichtbau	
	<i>Christian Haase, Patrick Köhnen</i>	705
10.1	Einleitung.....	709
10.2	Potenziale für den Leichtbau.....	710
10.3	Designkriterien additiv gefertigter Leichtbaustrukturen.....	711
10.4	Verfahren der additiven Fertigung.....	713
10.4.1	Pulverbettverfahren.....	713
10.4.1.1	Selektives Lasersintern.....	715
10.4.1.2	Selektives Laserschmelzen.....	715
10.4.1.3	Elektronenstrahlschmelzen.....	716
10.4.2	Auftragschweißverfahren.....	716
10.4.3	Harzbad-Photopolymerisation.....	717
10.4.4	Materialextrusion.....	718
10.4.5	Binderdruck.....	719
10.4.6	Materialdruck.....	720
10.4.7	Laminationsverfahren.....	721
10.5	Anwendungsfelder und -beispiele.....	721
10.6	Weiterführende Informationen.....	723
11	Initiative Massiver Leichtbau	
	<i>Hans-Willi Raedt, Thomas Wurm, Alexander Busse</i>	725
11.1	Einleitung.....	729
11.2	Untersuchte Fahrzeuge und Vorgehensweise der Initiative Massiver Leichtbau.....	729

11.3	Übersicht über Leichtbaupotenziale	729
11.4	Leichtbau durch Werkstoffinnovationen	731
11.4.1	Hochfeste Edelbaustähle für den Leichtbau	732
11.4.2	Leichtbau mit höherfesten Stählen	734
11.4.3	Leichtbau im Getriebe: Schlüsselfaktor Werkstoff	735
11.4.4	Beurteilung von werkstofflichem Leichtbau	736
11.5	Umformtechnische Potenziale für den Leichtbau	736
11.5.1	Leichtbaupotenziale im Verbrennungsmotor	737
11.5.2	Leichtbaupotenziale im Power-Split-Getriebe und im weiteren Antriebsstrang	738
11.5.3	Leichtbaupotenziale im elektrischen Hinterachsantrieb	739
11.5.4	Leichtbaupotenziale im Fahrwerk von Pkw und Lkw	740
11.6	Zusammenfassung	743
11.7	Weiterführende Informationen	743

Teil IV – Fügetechnologien im Leichtbau

745

1 Mechanisches Fügen

Ortwin Hahn, Sushanthan Somasundaram, Gerson Meschut, Florian Augenthaler, Vadim Sartisson..... 749

1.1	Stanznieten	753
1.1.1	Verfahrensbeschreibung	754
1.1.2	Qualitätsbestimmende Größen von Stanznietverbindungen	756
1.1.3	Konstruktive Hinweise	757
1.1.4	Einsatzbereiche	757
1.1.5	Systemtechnik zum Stanznieten	759
1.1.6	Prozessüberwachung des Setzvorgangs	760
1.1.7	Nacharbeitslösungen und Reparatur	761
1.1.8	Sonderstanznietverfahren	762
1.1.9	Anwendungsbeispiele für das Stanznieten	764
1.2	Blindnieten	765
1.2.1	Blindnietssysteme – genormt und anwendungsbezogen	765
1.2.2	Allgemeine Richtlinien zur Auswahl von Blindnieten	767
1.2.3	Qualitätssicherung	768
1.2.4	Anwendungsbeispiele für das Blindnieten	771
1.3	Schließringbolzensetzen	772
1.3.1	Schließringbolzensysteme	772
1.3.2	Eigenschaften von Schließringbolzenverbindungen	774
1.3.3	Allgemeine Richtlinien	774
1.3.4	Qualitätssicherung	776
1.3.5	Anwendungsbeispiele für das Schließringbolzensetzen	778
1.4	Clinchen	779
1.4.1	Clinchsysteme	780
1.4.2	Allgemeine Richtlinien	782
1.4.3	Qualitätssicherung	784

1.4.4	Schneidclinchen	785
1.4.5	Anwendungsbeispiele für das Clinchen	786
1.5	Loch- und gewindeformendes Schrauben	786
1.5.1	Schraubssysteme.....	787
1.5.2	Allgemeine Richtlinien.....	790
1.5.3	Qualitätssicherung.....	793
1.5.4	Anwendungsbeispiele für Verschraubungen im Automobilbau	794
1.6	Hochgeschwindigkeitsbolzensetzen	795
1.6.1	Grundlagen und Begriffe.....	796
1.6.2	Verfahrensablauf und Verbindungsausbildung.....	796
1.6.3	Setzgerät zum Bolzensetzen	798
1.6.4	Richtlinien zur Konstruktion und Fertigung.....	799
1.7	Weiterführende Infomationen.....	801
2	Fügen durch Umformen	
	<i>Soeren Gies, A. Erman Tekkaya</i>	807
2.1	Fügen durch Umformen von Rohr- und Profilteilen	809
2.2	Fügen durch Weiten.....	810
2.2.1	Einsatz eines Wirkmediums	811
2.2.2	Einsatz eines starren Werkzeuges	814
2.2.3	Einsatz von Wirkenergie	815
2.3	Fügen durch Engen.....	816
2.3.1	Einsatz von Wirkenergie	816
2.3.2	Einsatz eines starren Werkzeuges.....	819
2.4	Zusammenfassung.....	820
2.5	Weiterführende Informationen	821
3	Thermisches Fügen	
	<i>Thomas Nitschke-Pagel</i>	823
3.1	Schweißen	825
3.1.1	Anforderungen an Schweißverfahren für den Leichtbau.....	827
3.1.2	Übersicht wichtiger Schweißverfahren	829
3.1.2.1	Metall-Lichtbogenschmelzschweißverfahren	829
3.1.2.2	Spezielle Schweißverfahren.....	833
3.1.3	Lichtbogenarten beim MSG-Schweißen.....	836
3.1.4	Wärmereduzierte MSG-Prozesse	839
3.1.4.1	MSG-Prozesse mit Treppenstufenimpuls	839
3.1.4.2	ColdArc-Prozess.....	841
3.1.4.3	CMT-Prozess.....	843
3.1.4.4	Micro-MIG- Prozess	844
3.1.5	Anwendung der energiereduzierten MSG-Prozesse.....	845
3.1.6	Schweißen von Leichtmetalldruckguss	847
3.1.7	Besonderheiten beim Schweißen verfestigter Werkstoffe	849

3.1.8	Weiterführende Informationen zu 3.1	852
3.2	Löten	856
3.2.1	Löten als stoffschlüssiges Fügeverfahren.....	856
3.2.2	Löten artgleicher Werkstoffe	859
3.2.2.1	Löten von Stählen	859
3.2.2.2	Löten von Aluminiumwerkstoffen.....	862
3.2.2.3	Löten von Magnesiumwerkstoffen	862
3.2.2.4	Löten von Titanwerkstoffen	863
2.2.3	Löten von Mischverbindungen	863
3.2.4	Fazit.....	865
3.3	Weiterführende Informationen zu 3.2.....	866
4	Chemisches Fügen – Kleben	
	<i>Klaus Dilger</i>	869
4.1	Kleben als Fügeverfahren.....	873
4.1.1	Klebgerechte Gestaltung	873
4.1.1.1	Kleben geschlossener Profile.....	875
4.1.1.2	Kleben von T-Stößen	877
4.1.2	Klebstoffe für den Leichtbau.....	877
4.1.2.1	Epoxidharzklebstoffe	877
4.1.2.2	Polyurethanklebstoffe.....	879
4.2	Vorbehandlung der Oberflächen zum Kleben	879
4.3	Leichtbauwerkstoffe und deren Klebbarkeit	879
4.3.1	Kleben von Stahlblechen.....	881
4.3.2	Kleben formgehärteter Stahlbauteile	881
4.3.3	Kleben von Aluminiumblechen.....	884
4.3.4	Kleben von Aluminium-Druckguss	887
4.3.5	Kleben von Magnesiumwerkstoffen.....	890
4.3.6	Kleben von Titanwerkstoffen.....	890
4.3.7	Kleben lackierter Bleche	890
4.3.8	Kleben von Kunststoffen	892
4.3.8.1	Kleben thermoplastischer Kunststoffe.....	892
4.3.8.2	Kleben von Elastomeren.....	893
4.3.8.3	Kleben von Duromeren.....	893
4.3.9	Kleben von Faserverbundwerkstoffen	893
4.4	Rechnerische Auslegung von Leichtbauklebungen.....	895
4.4.1	Analytische Berechnungsmethoden für Klebverbindungen.....	896
4.4.1.1	Berechnung von dünnen, strukturellen Klebschichten.....	896
4.4.1.2	Berechnung von flexiblen, gummielastischen Klebschichten	898
4.4.2	Numerische Berechnungsmethoden für Klebverbindungen	900
4.4.2.1	Berücksichtigung mehrachsiger Spannungszustände	901
4.4.2.2	Kohäsivzonenmodelle.....	902
4.5	Kleben im Fahrzeugbau	903
4.5.1	Kleben im Karosserie-Rohbau	903

4.5.2	Kleben in der Automobilmontage	905
4.6	Zusammenfassung	905
4.7	Weiterführende Informationen	906
5	Hybridfügen	
	<i>Ortwin Hahn, Sushanthan Somasundaram, Gerson Meschut, Florian Augenthaler, Vadim Sartisson.....</i>	<i>909</i>
5.1	Grundlagen des Hybridfügens	913
5.2	Fertigung nach verschiedenen Verfahren	913
5.3	Eigenschaften der Verbindungen und deren Prüfung.....	916
5.3.1	Qualitätssicherung	917
5.3.2	Quasistatische Beanspruchung	917
5.3.3	Schwingende Beanspruchung	918
5.3.4	Schlagartige Beanspruchung.....	918
5.3.5	Alterungs- und Korrosionsverhalten	918
5.3.6	Temperaturabhängigkeit der Verbindungseigenschaften.....	918
5.4	Besonderheiten bei loch- und gewindeformendem Schrauben in Kombination mit dem Kleben	919
5.5	Anwendungsbeispiele	919
5.6	Thermisch-mechanische Fügeverfahren	920
5.6.1	Widerstandselementschweißen	921
5.6.2	Reibelementschweißen.....	922
5.7	Weiterführende Informationen	923
6	Qualitätssicherung in der Produktion	
	<i>Jens Ridzewski.....</i>	<i>925</i>
6.1	Ziele der Qualitätssicherung	927
6.2	Qualitätsmanagement – eine Unternehmensphilosophie	928
6.3	Qualitätssicherungsmaßnahmen.....	931
6.3.1	Aufgaben in der Produktion von Faserverbundbauteilen.....	931
6.3.2	Einteilung der Qualitätssicherungsmaßnahmen.....	932
6.3.3	QS-Maßnahmen bei zulassungspflichtigen Bauteilen im Bauwesen	935
6.3.3.1	Einteilung	935
6.3.3.2	Eigenüberwachung oder werkseigene Produktionskontrolle (WPK).....	935
6.3.3.3	Fremdüberwachung oder Inspektion	936
6.4	Prüfverfahren an faserverstärkten Kunststoffen	937
6.4.1	Übersicht der Verfahren	937
6.4.2	Zerstörungsfreie Prüfung.....	937
6.4.3	Rheologische Prüfverfahren	938
6.4.4	Physikalische Prüfverfahren	939
6.4.5	Prüfverfahren zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Laminaten.....	940
6.4.6	Prüfverfahren zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften	949
6.4.7	Übersicht weiterer ausgewählter Prüfnormen	952
6.5	Zusammenfassung.....	952
6.6	Weiterführende Informationen	953

Teil V – Bewertung von Bauteilen und Leichtbaustrukturen	955
1 Werkstoffmodelle für die Prozess- und Bauteilsimulation	
<i>Hermann Riedel</i>	959
1.1 Beschreibung von Plastizitätsmodellen.....	963
1.1.1 Überblick	963
1.1.2 von Mises-Modell	964
1.1.3 Chaboche-Modell.....	964
1.1.4 Anwendung des Chaboche-Modells auf die Rückfederung.....	965
1.1.5 Phänomenologische Modelle für Anisotropie	966
1.1.6 Texturmodelle	967
1.1.7 Anwendung von Texturmodellen auf Leichtbauwerkstoffe	969
1.2 Beschreibung von Schädigungs- und Versagensmodellen	972
1.2.1 Bruchmechanismen	972
1.2.2 Bruchkriterien für duktilen Bruch.....	973
1.2.3 Schädigungsmechanik für duktilen Bruch.....	974
1.2.4 Anwendung des Gologanu-Modells auf die Kantenrissbildung beim Walzen	975
1.2.5 Anwendung des Gologanu-Modells auf das Grenzformänderungsschaubild	977
1.2.6 Bruchverhalten faserverstärkter Kunststoffe	978
1.2.7 Bruchmechanik.....	981
1.3 Weiterführende Informationen	982
2 Crashverhalten von metallischen Werkstoffen und deren Fügeverbindungen	
<i>Dong-Zhi Sun</i>	987
2.1 Einleitung.....	991
2.2 Werkstoff- und Versagensmodelle für Crashsimulation	992
2.2.1 Werkstoffmodelle für Dehnratenabhängigkeit und Anisotropie.....	992
2.2.2 Versagensmodelle	993
2.3 Crashsimulation von Aluminium- und Magnesiumwerkstoffen	995
2.4 Durchgängige Simulation eines TRIP-Stahls vom Umformen bis Crash	998
2.4.1 Einflüsse der Mehrachsigkeit und Belastungsgeschichte auf die Bruchdehnungen.....	998
2.4.2 Versagensmodellierung mit Berücksichtigung von Vordehnungen und Vorschädigung	999
2.5 Crashsimulation von Fügeverbindungen	1001
2.5.1 Ersatzmodelle für Punktschweißverbindungen	1001
2.5.2 Modellierung von Klebverbindungen	1002
2.5.3 Simulation von Hybridverbindungen (Punktschweißkleben).....	1003
2.6 Weiterführende Informationen	1005
3 Crashverhalten von polymeren Werkstoffen	
<i>Stefan Hiermaier</i>	1007
3.1 Mechanische Eigenschaften unverstärkter Thermoplaste	1009
3.2 Numerische Simulation faserverstärkter Kunststoffe unter Crashlast	1014

3.3	Weiterführende Informationen	1016
4	Bedeutung der Betriebsfestigkeit im Leichtbau unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen der E-Mobilität	
	<i>Andreas Büter</i>	1017
4.1	Einleitung.....	1021
4.2	Betriebsfestigkeit als Basis für die Bauteilauslegung	1026
4.2.1	Inhalt des Lastenheftes.....	1027
4.2.2	Formen des Versagens.....	1029
4.2.3	Auswahl des Materials.....	1031
4.2.4	Beispiel 1: Betriebsfeste Auslegung einer hochbelasteten Kunststoffkomponente im Motorraum	1032
4.3	Numerische und experimentelle Betriebslastensimulation	1041
4.3.1	Materialeigenschaften	1041
4.3.2	Mehrachsigkeit.....	1041
4.3.3	Festigkeit von Proben und Bauteilen im Vergleich.....	1043
4.3.4	Schadensakkumulation	1044
4.4	Möglichkeiten von Funktionsintegration im Entwicklungsprozess	1046
4.4.1	Beispiel 2: Hybride Leichtbau-Hinterachse für Elektrofahrzeuge	1047
4.4.2	Beispiel 3: Funktionsintegrierter Leichtbau am Beispiel eines Faserverbund-Querlenkers	1049
4.4.3	Beispiel 4: Entwicklung eines Faserverbund-Rades mit integriertem Elektromotor	1055
4.5	Zusammenfassung.....	1058
4.6	Weiterführende Informationen	1059
5	Zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen	
	<i>Gerd Dobmann, Christiane Maierhofer</i>	1063
5.1	Prüfung von Ausgangswerkstoffen	1067
5.1.1	Prozessintegrierte mikromagnetische Charakterisierung von Festigkeit und Tiefzieheignung	1067
5.1.2	Das Multiparameter-Konzept 3MA.....	1069
5.1.3	Mikromagnetische Inline-Bestimmung von Streckgrenze und Zugfestigkeit	1070
5.1.4	ZfP von Faserverbundwerkstoffen.....	1072
5.1.4.1	ZfP von Faserverbundmaterial mit Ultraschall	1073
5.1.4.2	Thermographie von Faserverbundwerkstoffen	1074
5.1.4.3	Wirbelstromprüfung von Faserverbundkunststoffen	1077
5.2	Prüfung von Halbzeugen, Werkstoffverbunden und Verbundwerkstoffen.....	1078
5.2.1	Fertigungsintegrierte Prüfung von Tailored Blanks	1078
5.2.2	Fertigungsprüfung mechanischer Fügungen	1082
5.2.3	Zerstörungsfreie Charakterisierung der Schadensentwicklung in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen	1083
5.2.4	Blitzthermographie zur Charakterisierung von Fertigungsdefekten in CFK	1085
5.3	Zusammenfassung.....	1086
5.4	Weiterführende Informationen	1086

6	Structural Health Monitoring – Schadensdetektion	
	<i>Hans-Jürgen Schmidt, Bianka Schmidt-Brandecker</i>	1091
6.1	Einleitung.....	1093
6.2	SHM-Methoden.....	1094
6.3	Erfassung von Betriebslasten durch SHM.....	1096
6.3.1	Systeme zur Erfassung der Betriebslasten.....	1096
6.3.2	Identifizierung von extremen Landelasten (hard landing detection).....	1096
6.3.3	Anpassung der Inspektionsforderungen.....	1097
6.3.4	Sicherheitsfaktoren.....	1098
6.4	Strukturoptimierung durch SHM.....	1099
6.4.1	Grundlagen für die SHM-Anwendung am Druckrumpf.....	1101
6.4.2	Beispiele zur Gewichtsreduzierung für typische Rumpfschalen.....	1102
6.4.3	Alternative Stringer-Überwachung.....	1103
6.4.4	Schlussfolgerungen.....	1105
6.5	Inspektion von Leichtbaustrukturen.....	1105
6.5.1	Reduzierung oder Ersatz von konventionellen Inspektionen.....	1106
6.5.2	Reduzierung oder Ersatz von Modifikationen.....	1106
6.5.3	Lebensdauererlängerung.....	1107
6.5.4	Zustandsabhängige Wartung.....	1107
6.5.4.1	Erfassung von Betriebslasten.....	1107
6.5.4.2	Kontinuierliche Überwachung.....	1107
6.6	Ausblick.....	1107
6.7	Weiterführende Informationen.....	1108
7	Reparaturfähigkeit und Reparaturkonzepte bei Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen	
	<i>Christian Thum, Georg Wachinger, Helmut Wehlan</i>	1109
7.1	Einleitung.....	1113
7.2	Schäden und Reparaturen an FVK-Strukturen.....	1113
7.2.1	Schadensursachen.....	1114
7.2.2	Schadensformen.....	1114
7.2.3	Schadensbereiche.....	1114
7.2.4	Reparaturkategorien.....	1115
7.3	Reparaturverfahren monolithischer Verbundwerkstoffe.....	1115
7.3.1	Provisorischer Oberflächenschutz mit Reparaturklebebändern.....	1115
7.3.2	Schleifen als Reparaturverfahren.....	1116
7.3.3	Reparatur von Delaminationen mit injizierenden Verfahren.....	1116
7.3.4	Reparatur von Delaminationen durch Einsetzen von Nieten.....	1117
7.3.5	Reparatur von Schäden durch zusätzliche Lagen.....	1117
7.3.6	Schäften als Reparaturverfahren.....	1118
7.3.7	Neue Entwicklungen für das automatisierte Schäften.....	1120
7.3.7.1	Abtrag mittels Fräsen.....	1121
7.3.7.2	Abtrag mittels Wasserstrahl.....	1125
7.3.7.3	Abtrag mittels Laser.....	1127

7.3.7.4	Bewertung der unterschiedlichen automatisierten Abtragsarten	1129
7.3.8	Verfahren mit Aufdoppelung	1129
7.3.9	Alternative Möglichkeiten für die Patchherstellung.....	1132
7.4	Reparatur von Sandwichstrukturen.....	1135
7.4.1	Anbindungsfehler zwischen Wabe und Decklaminat	1135
7.4.2	Oberflächenversiegelung bei zulässigen Schadensgrößen	1136
7.4.3	Beschädigung von Decklaminat und Kernstruktur.....	1136
7.4.4	Reparatur bei einem durchgehenden Schaden.....	1137
7.5	Fazit.....	1138
7.6	Weiterführende Informationen	1138
8	Recyclingfähigkeit und End-of-Life-Konzept im Leichtbau	
	<i>Jörg Woidasky</i>	1141
8.1	Nachhaltigkeitsorientierung als Leitbild.....	1145
8.2	End-of-Life-Konzept	1146
8.3	Grundlagen des Recycling von Leichtbauwerkstoffen	1148
8.4	Materialidentifikation als Schlüsselprozess bei Metallen in Luftfahrtanwendungen.....	1149
8.5	Recycling faserverstärkter Verbundwerkstoffe.....	1151
8.5.1	Bewährt: Mechanische Verfahren.....	1152
8.5.2	Pilotanwendungen: Thermische Verfahren	1153
8.5.3	Aufwändig und vielversprechend: Chemische Verfahren.....	1154
8.5.4	Nachfolgeschritte: Von der Faser zum rezyklathaltigen Halbzeug.....	1155
8.5.5	Beseitigung carbonfaserhaltiger Abfälle	1155
8.5.6	Lohnt sich das Recycling überhaupt?.....	1155
8.6	Kombination mit der Rohstoffherzeugung bei der GFK-Verwertung bei der Zementklinkerherstellung.....	1156
8.7	Schlussfolgerungen	1157
8.8	Weiterführende Informationen	1158
Teil VI	– Spezielle Aspekte des Leichtbaus	1161
1	Ganzheitliche Bilanzierung und Nachhaltigkeit im Leichtbau	
	<i>Matthias Fischer, Stefan Albrecht, Martin Baitz</i>	1163
1.1	Lebenszyklusanalyse und Nachhaltigkeit	1167
1.2	Entwicklung und Stand der Technik in der Ökobilanz.....	1169
1.3	Herausforderungen bei der Vereinfachung komplexer Zusammenhänge.....	1171
1.3.1	Ökonomisch basierte Ansätze der Input-Output-Ökobilanz	1171
1.3.2	Bewertung der Ressourcen	1172
1.3.3	„Footprinting“-Methoden	1173
1.4	Herausforderungen bei der ökologischen Beurteilung von Werkstoffen und Materialien im Leichtbau.....	1173
1.5	Design for Life Cycle im Leichtbau.....	1175

1.6	Einflüsse von Leichtbau-Aspekten auf die technisch-ökologischen Eigenschaften von Produkten und Systemen	1177
1.6.1	Bereitstellung von Material und Rohstoff in der Vorkette	1179
1.6.2	Vom Material zum System – Aktuelle Entwicklungen im Leichtbau	1181
1.7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	1183
1.8	Weiterführende Informationen	1185
2	Bionik als Innovationsmethode für den Leichtbau	
	<i>Helena Hashemi Farzaneh</i>	1189
2.1	Aspekte der Bionik für den Leichtbau	1193
2.1.1	Bionische Materialien und Strukturen.....	1193
2.1.2	Bionische Strategien im Leichtbau	1194
2.2	Entwicklung bionischer Innovationen für den Leichtbau	1196
2.2.1	Strategien zur Anwendung von Bionik	1197
2.2.2	Suche nach biologischen Vorbildern oder technischen Anwendungsgebieten	1199
2.2.3	Analyse und Vergleich biologischer und technischer Systeme.....	1201
2.2.4	Abstraktion biologischer und technischer Systeme.....	1203
2.2.5	Transfer bionischer Analogien für den Leichtbau	1205
2.3	Weiterführende Informationen	1206
3	Betriebswirtschaftliche Aspekte des Leichtbaus	
	<i>Wolfgang Seeliger</i>	1209
3.1	Allgemeine Einführung – Herstellkosten und Investitionsrechnung.....	1213
3.2	Prozessorientiertes Kostenmodell zur Ermittlung der Herstellkosten.....	1214
3.2.1	Aufstellung des Kostenmodells	1214
3.2.2	Datenerhebung und Berechnung	1215
3.2.3	Prozessmodule und die Bedeutung der Gewinn-Marge	1218
3.3	Beispiel für die Anwendung des Kostenmodells – CFK- vs. Blechbauteil.....	1218
3.3.1	Bedeutung der Stückzahlen für die Kosteneffizienz.....	1219
3.3.2	Einfluss der Taktzeit	1220
3.3.3	Solide Marktnische für CFK – Sorgenkind Prozesszeit.....	1222
3.4	Investitionsrechnung als Maßstab für die Wirtschaftlichkeit.....	1222
3.4.1	Grundlagen der Investitionsrechnung nach dem DCF-Modell: Tabelle der Cash Flows und Ermittlung des Netto-Barwerts (NPV).....	1223
3.4.2	Beispiel für die Anwendung der Investitionsrechnung – ein topologieoptimiertes Maschinenbett	1226
3.4.3	Leichtbau lohnt sich auch im Maschinenbau.....	1227
3.5	Schlussbetrachtungen.....	1228
3.6	Weiterführende Informationen	1228
	Sachregister	1229