

HANSER

Inhaltsverzeichnis

Handbuch Leichtbau

Methoden, Werkstoffe, Fertigung

Herausgegeben von Frank Henning, Elvira Moeller

ISBN: 978-3-446-42267-4

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42267-4>

sowie im Buchhandel.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Autorenverzeichnis.....	XXXI

Teil I – Produktentstehungsprozess für Leichtbaukomponenten und -systeme..... 1

1	Der Prozess der Produktentstehung	
	<i>Albert Albers, Andreas Braun</i>	5
1.1	Grundlagen	7
1.1.1	Modellierung von Produktentstehungsprozessen.....	8
1.1.2	Grundlagen der Systemtechnik.....	9
1.1.3	Bekannte Prozessmodelle	10
1.1.4	Grenzen herkömmlicher Prozessmodelle.....	12
1.1.5	Neues Modell für einen Produktentstehungsprozess – Controlling vs. Entwicklerunterstützung	14
1.1.5.1	Controlling im Mittelpunkt.....	14
1.1.5.2	Unterstützung von Entwicklern.....	15
1.2	Das integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM).....	16
1.2.1	Hypothesen der Produktentstehung.....	16
1.2.2	Begriffe und Elemente des iPeM	18
1.2.2.1	Aktivitätenmatrix	18
1.2.2.2	Aktivitäten der Produktentstehung.....	19
1.2.2.3	Problemlösungsprozess SPALTEN.....	21
1.2.2.4	Das Systemtriple aus Ziel-, Objekt- und Handlungssystem.....	22
1.2.2.5	Ressourcen	22
1.2.2.6	Phasenmodell.....	23
1.2.2.7	Erfahrung und Wissen im Produktentstehungsprozess.....	23
1.2.3	Modellebenen.....	24
1.3	Anwendung des iPeM bei der Entwicklung einer Felge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff.....	25
1.4	Zusammenfassung	29
1.5	Weiterführende Informationen	30
2	Technologiemanagement für den Leichtbau	
	<i>Joachim Warschat, Stefanie Bunzel</i>	31
2.1	Dimensionen des Technologiemanagements im Umfeld Leichtbau.....	33
2.1.1	Grundlagen des strategischen Technologiemanagements	33
2.1.2	Auslöser von Innovationen	34
2.1.3	Technologieadaption – Chance für die Produktentwicklung.....	35
2.2	Methodische Unterstützung bei der Identifikation von Technologiepotenzialen	37
2.2.1	Identifikation von Leichtbaupotenzialen.....	39
2.2.2	Bewertung von Technologiealternativen für verschiedene Märkte.....	42

2.3	Erstellung und Abstimmung von Technologiestrategien.....	53
2.4	Fazit.....	55
2.5	Weiterführende Informationen	55
3	Leichtbaustrategien und Bauweisen	
	<i>Gundolf Kopp, Norbert Burkart, Neven Majić.....</i>	<i>57</i>
3.1	Einleitung.....	59
3.2	Anforderungen an Leichtbaukonstruktionen	59
3.3	Leichtbaustrategien	62
3.3.1	Bedingungsleichtbau	63
3.3.2	Konzeptleichtbau.....	64
3.3.3	Stoffleichtbau	65
3.3.4	Formleichtbau	66
3.3.5	Fertigungsleichtbau	67
3.3.6	Leichtbau versus Kosten	67
3.4	Bauweisen	70
3.4.1	Differentialbauweise.....	70
3.4.2	Integralbauweise	70
3.4.3	Modulbauweise.....	71
3.4.4	Verbundbauweise.....	72
3.4.4.1	Hybridbauweise.....	73
3.4.4.2	Multi-Material-Design.....	73
3.5	Fazit.....	75
3.6	Weiterführende Informationen	75
4	Virtuelle Produktentwicklung	
	<i>Albert Albers, Neven Majić, Andreas Schmid</i>	<i>77</i>
4.1	Computergestützte Konstruktion – Computer Aided Design (CAD).....	79
4.2	Computergestützte Entwicklung (CAE).....	81
4.2.1	Produktsimulation mit der Finite-Elemente-Methode (FEM).....	81
4.2.2	Kurzer Rückblick auf die Entwicklung der FEM.....	81
4.2.3	Anwendungsbereiche der FEM.....	82
4.2.4	FEM-Programme	83
4.2.5	Ablauf einer FEM-Analyse.....	84
4.2.6	Literatur zu Berechnungsprogrammen und zu FEM.....	88
4.3	Strukturoptimierung	88
4.3.1	Topologieoptimierung	89
4.3.1.1	Topologieoptimierung eines Fahrradbremskraftverstärkers.....	91
4.3.1.2	Topologieoptimierung eines Felgensterns.....	93
4.3.2	Formoptimierung.....	96
4.3.2.1	CAD-basierte Formoptimierung.....	97
4.3.2.2	FE-Netz-basierte Formoptimierung.....	98
4.3.2.3	Beispiel zur Netz-basierten Formoptimierung.....	98

4.3.3	Formoptimierung mit Sicken.....	104
4.3.3.1	Beispiel zur Versickerung einer Ölwanne.....	107
4.3.4	Parameteroptimierung.....	109
4.4	Fazit.....	113
4.5	Weiterführende Informationen	113
5	Systemleichtbau – ganzheitliche Gewichtsreduzierung	
	<i>Albert Albers, Norbert Burkardt</i>	115
5.1	Definitionen der Begriffe	117
5.2	Rahmenbedingungen für den Systemleichtbau	120
5.3	Analyse und Synthese des technischen Systems	122
5.3.1	Funktionsintegration in einem Bauteil	123
5.3.2	Trennung der Funktionen	123
5.4	Rechnergestützte Methoden im Systemleichtbau.....	124
5.4.1	Topologieoptimierung von Elementen in einem technischen System.....	125
5.4.2	Optimierung von mechatronischen Systemen.....	125
5.4.3	Automatische Lastenermittlung.....	127
5.5	Konstruktion eines Roboterarms.....	127
5.6	Fazit.....	131
5.7	Weiterführende Informationen	132
6	Validierung im Produktentstehungsprozess	
	<i>Albert Albers, Tobias Düser</i>	133
6.1	Verifizierung und Validierung von Produkteigenschaften	135
6.2	Virtuelle und experimentelle Validierungsumgebung.....	136
6.3	Zielkonflikte bei der Validierung von Produkteigenschaften im Leichtbau	137
6.4	Validierungsprozess	138
6.5	Systemleichtbau durch keramische Werkstoffe als Beispiel	139
6.6	Fazit.....	141
6.7	Weiterführende Informationen	141
7	Praxisbeispiel aus dem Rennsport	
	<i>Christian Wendland</i>	143
7.1	Bedeutung des Leichtbaus im automobilen Rennsport.....	145
7.2	Gestaltung eines Leichtbauteils für einen Rennwagen.....	145
7.3	Auslegung einer Crashstruktur aus CFK unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen.....	146
7.4	Leichtbaukonzept eines Heckflügels	149
7.4.1	Heckflügel mit Stützstruktur.....	149
7.4.2	Heckflügel ohne Stützstruktur	151
7.5	Stofflicher Leichtbau im Rennsport	152
7.5.1	Bremsscheibe aus CFK	153
7.5.2	Pedalerie	153

7.5.3	Getriebegehäuse aus CFK	153
7.5.4	Stützstrebe aus CFK.....	154
7.6	Zusammenfassung.....	154
7.7	Weiterführende Informationen	155
 Teil II – Werkstoffe für den Leichtbau – Auswahl und Eigenschaften.....		157
1	Werkstoffauswahl für den Leichtbau	
	<i>Kay Weidenmann, Alexander Wanner</i>	161
1.1	Werkstoffe und ihre Eigenschaften	163
1.2	Allgemeine Aspekte der Werkstoffauswahl.....	166
1.2.1	Informationsquellen.....	166
1.2.2	Darstellen und Vergleichen von Werkstoffeigenschaften	166
1.2.3	Werkstoffauswahl im Produktentstehungsprozess.....	167
1.3	Auswahlstrategien	168
1.3.1	Anforderungsprofil und Werkstoffbewertung	168
1.3.2	Werkstoffindices zur Bewertung von Werkstoffen.....	170
1.4	Werkstoffauswahl mit Werkstoffindices.....	171
1.4.1	Leichtbaurelevante Werkstoffindices	174
1.4.2	Werkstoffauswahldiagramme.....	176
1.5	Mehrfache Randbedingungen und konkurrierende Ziele	177
1.5.1	Mehrfache Randbedingungen	177
1.5.2	Konkurrierende Ziele.....	178
1.6	Einfluss der Bauteilform	181
1.6.1	Grundsätzliches	181
1.6.2	Form und Effizienz	181
1.6.3	Der Formfaktor	182
1.6.4	Rolle des Formfaktors bei der Werkstoffauswahl	183
1.7	Beschränkungen durch den Bauraum	184
1.7.1	Grundsätzliches	184
1.7.2	Auswahlstrategie bei beschränktem Bauraum	184
1.7.3	Weitere Bauteile und Lastfälle.....	186
1.8	Zusammenfassung.....	188
1.9	Weiterführende Informationen	188
2	Stähle	
	<i>Wolfgang Bleck</i>	191
2.1	Stähle sind vielseitige Werkstoffe	193
2.2	Hochfeste Flachprodukte	193
2.2.1	Stähle für Feinstblech (< 0,5 mm).....	193
2.2.2	Stähle für Feiblech (0,5–3 mm)	196
2.2.2.1	Bake Hardening-Stähle.....	199

2.2.2.2	Phosphorlegierte Stähle und hochfeste IF-Stähle	200
2.2.2.3	Mikrolegierte Stähle (HSLA-Stähle)	201
2.2.2.4	DP-Stähle (Dualphasen-Stähle).....	201
2.2.2.5	TRIP-Stähle oder RA-Stähle (Restaustenit-Stähle).....	202
2.2.2.6	CP-Stähle (Complexphasen-Stähle).....	202
2.2.2.7	PM-Stähle (teilmartensitische Stähle)	203
2.2.3	Stähle für Bleche in größeren Dicken.....	205
2.2.4	Stähle für das Pressformen.....	211
2.3	Stähle für Schmiedestücke	214
2.4	Stähle für hochfeste Drähte.....	217
2.5	Höchstfeste Stähle.....	217
2.5.1	Höchstfeste Vergütungsstähle.....	219
2.5.2	Höchstfeste martensitaushärtende Stähle (Maraging-Stähle).....	219
2.6	Recyclieverhalten von Stahl	220
2.7	Weitere Informationen	220
3	Aluminiumwerkstoffe	
	<i>Jürgen Hirsch, Friedrich Ostermann</i>	221
3.1	Aluminium als reiner Stoff.....	225
3.2	Aluminiumlegierungen	226
3.2.1	Einteilung und Nomenklatur	226
3.2.2	Knetlegierungen für Strukturbauteile	228
3.2.2.1	Mittelfeste Strukturwerkstoffe der Legierungsgruppe Al-Mg (EN AW-5xxx)	229
3.2.2.2	Mittelfeste Strukturwerkstoffe der Legierungsgruppe Al-MgSi (EN AW-6xxx).....	233
3.2.2.3	Mittelfeste Strukturwerkstoffe der Legierungsgruppe Al-ZnMg (EN AW-7xxx).....	235
3.2.2.4	Hochfeste Al-Cu- und Al-ZnMgCu-Legierungen der Serien AW-2xxx und AW-7xxx.....	236
3.2.3	Gusslegierungen für Strukturbauteile	236
3.3	Be- und Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen.....	238
3.3.1	Formgießen - Urformen	238
3.3.2	Halbzeuge aus Aluminiumknetlegierungen - Umformen	239
3.3.2.1	Aluminium-Strangpressprofile	239
3.3.2.2	Bänder, Bleche und Platten	240
3.3.2.3	Werkstoffverbunde mit Aluminium	241
3.3.3	Verarbeitung von Aluminiumhalbzeugen	242
3.3.3.1	Bearbeitung von Profilen.....	242
3.3.3.2	Blechumformung.....	242
3.3.4	Trennen von Aluminiumlegierungen.....	244
3.3.5	Oberflächenbehandlungen.....	244
3.3.6	Fügen.....	244
3.3.7	Reparaturmöglichkeiten	246
3.4	Konstruktive Gesichtspunkte.....	246
3.4.1	Gewichtseinsparungsgrundsätze.....	246
3.4.2	Elastische Werkstoffeigenschaften und Leichtbaugrad.....	246
3.4.3	Verhalten unter schlagartiger Beanspruchung.....	249

3.4.4	Schwingfestigkeitsgrundsätze	249
3.5	Recycling	249
3.6	Anwendung von Aluminiumwerkstoffen	250
3.7	Zusammenfassung.....	252
3.8	Weiterführende Informationen	253
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 und 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.....	321
6.2.2	Technische Kunststoffe.....	322
6.2.3	Hochleistungspolymere.....	322
6.3	Duromere.....	323
6.3.1	Harzsysteme, Formmassen.....	323
6.3.2	Vernetzte Polyurethane.....	325
6.4	Elastomerwerkstoffe.....	326
6.4.1	Vernetzte Elastomere (Gummiwerkstoffe, Kautschuk).....	326
6.4.2	Thermoplastische Elastomere (TPE).....	326
6.5	Geschäumte Polymere.....	328
6.5.1	Weichelastische Schaumstoffe.....	330
6.5.2	Halbharte Schaumstoffe.....	331
6.5.3	Harte Schaumstoffe.....	332
6.6	Füllstoffe und Additive.....	333
6.7	Weiterführende Informationen.....	335

7	Faserverstärkte Kunststoffe	
	<i>Frank Henning unter Mitarbeit von Klaus Drechsler und Lazarula Chatzigeorgiou</i>	337
7.1	Das Prinzip von Verbundwerkstoffen	341
7.2	Kunststoffe als Matrix	342
7.3	Verstärkungsfasern und ihre Eigenschaften	344
7.3.1	Glasfasern	344
7.3.2	Kohlenstofffasern	346
7.3.3	Aramidfasern	348
7.3.4	Naturfasern	350
7.4	Textile Halbzeuge	352
7.4.1	Matten und Vliese	354
7.4.2	Gewebe	354
7.4.3	Gelege	356
7.4.4	Geflechte	357
7.4.5	Gesticke	359
7.4.6	Fibre Patch Preforming	361
7.4.7	Nähtechnologie	361
7.4.8	Bindertechnologie	365
7.5	Imprägnierte Halbzeuge	365
7.5.1	Duomere Systeme	366
7.5.2	Nicht-fließfähige (endlosfaserverstärkte) Duomerprepregs	368
7.5.2	Thermoplastische Systeme	370
7.6	Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen	376
7.6.1	Haftung zwischen Matrix und Faser	378
7.6.2	Einfluss auf Festigkeit und Steifigkeit	379
7.7	Anwendungsgebiete	383
7.8	Weiterführende Informationen	390
8	Technische Keramik	
	<i>Walter Krenkel</i>	393
8.1	Strukturkeramiken für Leichtbauanwendungen	397
8.1.1	Eigenschaften im Vergleich zu anderen Konstruktionswerkstoffen	397
8.1.2	Keramische Wälzlager für die Antriebstechnik	399
8.1.3	Leichtbau-Kameragehäuse aus Siliciumnitrid	400
8.2	Leichtbau mit Faserverbund-Keramiken	401
8.2.1	Keramische Verbundwerkstoffe	401
8.2.2	Verstärkungsfasern	402
8.2.3	Herstellverfahren für CMC-Bauteile	404
8.2.4	Eigenschaften der CMC-Werkstoffe	406
8.2.5	Hochtemperatur-Leichtbau in der Raumfahrt	407
8.2.6	Keramische Leichtbaubremsen	408
8.3	Zusammenfassung und Ausblick	410
8.4	Weiterführende Informationen	410

9	Hybride Werkstoffverbunde	
	<i>Frank Henning, Kay Weidenmann, Bernd Bader</i>	413
9.1	Verbundwerkstoffe vs. Werkstoffverbund.....	415
9.2	Grundlagen der Hybridisierung.....	416
9.3	Leichtbaurelevante Hybridkonzepte.....	419
9.3.1	Kunststoff-Metall-Hybride.....	419
9.3.2	Kunststoff-Kunststoff-Hybride.....	422
9.3.3	Kunststoff-Keramik-Hybride.....	424
9.3.4	Kunststoff-Holz-Hybride.....	425
9.4	Zusammenfassung.....	427
9.5	Weiterführende Informationen	427
	Teil III – Fertigungsverfahren im Leichtbau – Formgebung, Be- und Verarbeitung	429
1	Urformen von metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Andreas Bührig-Polaczek unter Mitarbeit von Samuel Bogner, Stephan Freyberger, Matthias Jakob, Gerald Klaus, Heiner Michels, Christian Oberschelb, Uwe Vroomen</i>	433
1.1	Gießen.....	437
1.1.1	Verfahrensspezifische Möglichkeiten zur gegossenen Leichtbaukonstruktion	437
1.1.1.1	Konstruieren von Gussteilen	437
1.1.1.2	Charakteristische Größen der Gießprozesse.....	438
1.1.2	Auswirkungen von Prozess und Legierung auf die Eigenschaften des Bauteils	438
1.1.2.1	Auswirkungen der Erstarrungsbedingungen auf Gefüge und Festigkeit.....	438
1.1.2.2	Gießbare Magnesiumwerkstoffe	439
1.1.2.3	Gießbare Aluminiumlegierungen	439
1.1.2.4	Titanlegierungen für den Formguss	440
1.1.2.5	Gusseisenwerkstoffe und gießbare Stähle.....	441
1.1.2.6	Hybride Werkstoffe	442
1.1.3	Verfahren der Gießereitechnik.....	443
1.1.3.1	Dauerform und verlorene Form	443
1.1.3.2	Wirkgrößen im Gießprozess	443
1.1.3.3	Schmelze, Gießen und Nachbearbeitung.....	444
1.1.4	Schwerkraftguss.....	447
1.1.4.1	Schwerkraftkokillenguss	447
1.1.4.2	Schwerkraftsandguss	449
1.1.4.3	Eignung des Sandgussverfahrens für den Leichtbau	451
1.1.5	Das Niederdruck-Kokillengießverfahren.....	452
1.1.6	Das Druckgießverfahren	453
1.1.7	Das Feingussverfahren.....	456
1.1.7.1	Leichtbau im Feinguss.....	457

1.1.7.2	Beispiele von Feingussbauteilen.....	458
1.1.8	Ausblick	459
1.1.9	Weiterführende Informationen.....	461

Hans Claus Neubing, Klaus Hummert

1.2	Sintern	462
1.2.1	Herstellen des Pulvers	462
1.2.1.1	Pulverlegierungstechnik.....	463
1.2.1.2	Pulvermischungen zum Flüssigphasensintern	464
1.2.1.3	Pulvermischungen zum Hetero-Supersolidus-Flüssigphasensintern (SLPS).....	464
1.2.1.4	Zubereiten der pressfertigen Mischungen	465
1.2.2	Herstellung von Aluminium-Sinterformteilen.....	465
1.2.2.1	Formgebung durch Pulverpressen	465
1.2.2.2	Sintern des Pulvers	466
1.2.2.3	Sinterschmieden.....	467
1.2.2.4	Nachbearbeitung der Aluminium-Sinterformteile.....	468
1.2.3	Anwendungsbeispiele für Aluminium-Sinterformteile.....	469
1.2.3.1	Nockenwellenlagerdeckel.....	469
1.2.3.2	Komponenten für Nockenwellenversteller (Camphaser)	470
1.2.4	Herstellung von Aluminium-Hochleistungswerkstoffen	470
1.2.4.1	Fertigung schnell erstarrter Aluminiumwerkstoffe (RS-Werkstoffe).....	471
1.2.4.2	Eigenschaften von RS-Werkstoffen.....	472
1.2.4.3	Anwendungsbeispiele für RS-Aluminiumwerkstoffe	475
1.2.5	Ausblick	475
1.2.6	Weiterführende Information	476

2 Umformen von metallischen Leichtbauwerkstoffen

Sami Chatti, Daniel Pietzka, Alessandro Selvaggio, Michael Trompeter, A. Erman Tekkaya477

2.1	Herstellung von Leichtbaustrukturen aus Blech durch Umformen.....	481
2.1.1	Unterschiedliche Leichtbaustrategien	481
2.1.2	Erweiterte Formgebungsgrenzen durch wirkmedienbasierte Blechumformverfahren	482
2.1.3	Herstellung belastungsangepasster Blechformteile	487
2.1.4	Presshärten höchstfester Blechformteile.....	488
2.1.5	Hybridbauweisen auf Basis von Blechhalbzeugen.....	490
2.1.6	Weiterführende Informationen zu 2.1	492
2.2	Herstellung von Leichtbaustrukturen durch Massivumformung.....	494
2.2.1	Einordnung der Massivumformung und deren Verfahren.....	494
2.2.2	Strangpressen	494
2.2.2.1	Verarbeitete Werkstoffe.....	494
2.2.2.2	Verfahrensprinzip des Strangpressens.....	497
2.2.2.3	Warmstrangpressen und Wärmebehandlung	502
2.2.2.4	Runden beim Strangpressen	502
2.2.2.5	Verbundstrangpressen	505

2.2.3	Schmieden	505
2.2.3.1	Freiformschmieden	505
2.2.3.2	Gesenkschmieden	506
2.2.3.3	Werkzeugversagen	508
2.2.4	Weiterführende Informationen zu 2.2	508
2.3	Herstellung von Leichtbaustrukturen durch Biegeumformung	509
2.3.1	Profile als Basis für den Leichtbau	509
2.3.2	Herstellung von geraden Profilen durch Biegen	510
2.3.3	Herstellung von belastungsangepassten Profilen durch Biegen	516
2.3.4	Biegen von Rohren und Profilen	519
2.3.5	Biegen von belastungsangepassten Rohren und Profilen	524
2.4	Zusammenfassung	526
2.5	Weiterführende Informationen zu 2.3	527
3	Trennen von metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Volker Schulze, Jürgen Michna</i>	531
3.1	Zerteilen	535
3.1.1	Verfahren des Zerteilens	535
3.1.2	Verschleiß und Formfehler an der Schnittfläche	536
3.1.3	Zerteilen von NE-Metallen	536
3.2	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide	538
3.2.1	Einfluss auf den Prozess des Zerspanens	538
3.2.2	Zerspanen von NE-Metallen	541
3.2.2.1	Titanzerspanung	541
3.2.2.2	Magnesiumzerspanung	545
3.2.2.3	Aluminiumzerspanung	546
3.3	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	548
3.3.1	Wasserstrahlschneiden	548
3.3.2	Schleifen	549
3.4	Abtragen	550
3.4.1	Laserbearbeitung	550
3.4.2	Funkenerosives Abtragen	551
3.5	Zusammenfassung	551
3.6	Weiterführende Informationen	552
4	Eigenschaftsänderungen bei metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Alexander Erz, Jürgen Hoffmeister, Volker Schulze</i>	555
4.1	Verfestigung durch Umformen	559
4.1.1	Verfestigungsstrahlen (Kugelstrahlen)	559
4.1.2	Verfestigung durch Walzen (Festwalzen)	560
4.2	Wärmebehandlung	560
4.2.1	Härten	560
4.2.1.1	Martensitische Umwandlung	560

4.2.1.2	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder (ZTU-Schaubilder).....	562
4.2.1.3	Härtbarkeit von Stahl.....	564
4.2.2	Vergütung von Stahl.....	565
4.2.3	Chemische Verfahren bei Stählen.....	566
4.2.4	Aushärten am Beispiel einer Aluminiumlegierung	567
4.2.5	Aushärtung von Magnesiumlegierungen	571
4.2.6	Härten und thermomechanisches Behandeln von Titanlegierungen	572
4.3	Zusammenfassung	574
4.4	Weiterführende Informationen	574
5	Verarbeitung von Kunststoffen	
	<i>Axel Kauffmann</i>	577
5.1	Extrusion	581
5.1.1	Rohr- und Profilextrusion	582
5.1.2	Extrusionsblasformen.....	583
5.2	Spritzgießen.....	585
5.2.1	Thermoplast-Spritzgießen.....	587
5.2.2	Elastomer-Spritzgießen	588
5.2.3	Duroplast-Spritzgießen.....	588
5.2.4	Sonderverfahren.....	589
5.3	Schäumverfahren.....	592
5.3.1	Extrusionsschäumen	592
5.3.2	Partikelschäumen.....	593
5.3.3	Polyurethanschäumen	595
5.4	Pressen	597
5.5	Tiefziehen.....	597
5.6	Rotationsformen.....	598
5.7	Zusammenfassung.....	600
5.8	Weiterführende Informationen	600
6	Verarbeitung faserverstärkter Kunststoffe	
	<i>Frank Henning</i>	603
6.1	Verarbeitung kurzfaserverstärkter Kunststoffe	607
6.1.1	Verfahren mit duromerer Matrix	607
6.1.1.1	Bulk Moulding Compound (BMC)	607
6.1.1.2	Reinforced-Reaction Injection Moulding (R-RIM).....	608
6.1.2	Verfahren mit thermoplastischer Matrix.....	608
6.2	Verarbeitung langfaserverstärkter Kunststoffe.....	610
6.2.1	Herstellung langfaserverstärkter Duromerer	610
6.2.1.1	Fasersprühen von Polyurethan	610
6.2.1.2	Fließpressen von SMC.....	611
6.2.1.3	Herstellung langfaserverstärkter duromerer Compounds im Direktverfahren	613
6.2.2	Herstellung langfaserverstärkter Thermoplaste	616

6.2.2.1	Fließpressen glasmattenverstärkter Thermopaste	616
6.2.2.2	Fließpressen langfaserverstärkter Stäbchengranulate	617
6.2.2.3	Fließpressen langfaserverstärkter Thermoplaste im Direkt-Verfahren	617
6.2.2.4	Fließpressverfahren für langfaserverstärkte Thermoplaste im Vergleich.....	618
6.2.2.5	Spritzgießen langfaserverstärkter Thermoplaste	621
6.2.2.6	Fertigungsverfahren für lokal endlosfaserverstärkte Langfaserverbunde.....	623
6.2.2.7	Eigenschaften langfaserverstärkter Thermoplaste	623
6.3	Herstellung endlosfaser- und textilverstärkter Duromerbauteile.....	625
6.3.1	Handlaminieretechnik	625
6.3.1.1	Unterteilung der Verfahren	626
6.3.1.2	Beispiele für die Anwendung des Handlaminierens.....	627
6.3.2	Prepreg-Technologien	630
6.3.2.1	Einteilung in Teilprozesse.....	630
6.3.2.2	Teilprozesse der Prepreg-Technologie	631
6.3.2.3	Werkzeugtechnologien	636
6.3.2.4	Aushärtetechnologien.....	636
6.3.2.5	Anwendungsbeispiele für unterschiedliche Prepreg-Technologien	638
6.3.3	Flüssigharz-Imprägnierverfahren - LCM-Technologien.....	641
6.3.3.1	Übersicht über die Verfahren	641
6.3.3.2	Gebäuchliche Harzimpregierverfahren.....	644
6.3.3.3	Harzinjektionsverfahren	645
6.3.3.4	Pultrusion	657
6.3.3.5	Faserwickeln	660
6.4	Herstellung endlosfaser- und textilverstärkter Thermoplastbauteile.....	663
6.4.1	Formgebung von Organoblechen - Pressverfahren.....	663
6.4.2	Umformen mit Gummiwerkzeugen.....	664
6.4.3	Match-Metal-Molding.....	664
6.5	Weiterführende Informationen	666
7	Trennen faserverstärkter Kunststoffe	
	<i>Volker Schulze, Chris Becke</i>	669
7.1	Bearbeitungsfehler und Bearbeitungsqualität	673
7.2	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide.....	675
7.2.1	Verschleiß und Schneidstoffe	675
7.2.2	Fräsen.....	675
7.2.3	Bohren.....	677
7.2.4	Drehen.....	680
7.3	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	681
7.3.1	Schleifen	681
7.3.2	Wasserstrahlschneiden.....	681
7.4	Abtragen	683
7.4.1	Abtragen mit Laserstrahlen.....	683
7.4.2	Funkenerosives Abtragen (EDM)	683
7.5	Zusammenfassung.....	684
7.6	Weiterführende Informationen	685

8	Formgebung bei Technischer Keramik	
	<i>Reinhard Lenk</i>	687
8.1	Technologie der Keramikherstellung.....	691
8.2	Formgebung Technischer Keramik	693
8.2.1	Prinzipien keramischer Formgebung.....	693
8.2.2	Keramische Formgebungsverfahren	696
8.2.2.1	Pressformgebung.....	696
8.2.2.2	Plastische und thermoplastische Formgebung.....	700
8.2.2.3	Gießformgebung.....	704
8.2.2.4	Sonderverfahren.....	706
8.2.3	Binderkonzepte und Entbinderungsverfahren	707
8.3	Komplexe keramische Bauteilstrukturen	708
8.3.1	Grundlagen.....	708
8.3.2	Fertigungstechnische Möglichkeiten und Anwendungsbeispiele für den Leichtbau.....	711
8.3.2.1	Direkte Formgebung	712
8.3.2.2	Formgebung und Fügen	713
8.3.2.3	Replikationstechniken.....	715
8.3.2.4	Verwendung von Trägermaterialien (PT-Keramik®)	717
8.3.2.5	Keramik aus biogenen Rohstoffen	719
8.4	Zusammenfassung.....	721
8.5	Weiterführende Informationen	722
9	Fertigungsrouten zur Herstellung von Hybridverbunden	
	<i>Frank Henning, Kay Weidenmann, Bernd Bader</i>	723
9.1	Oberflächenbehandlung als Vorbereitung zur Fertigung.....	727
9.1.1	Oberflächenmodifizierung mit Plasma	727
9.1.2	Chemische Aktivierung.....	727
9.2	In-mould Assembly (IMA)	729
9.2.1	Umspritzen und Umpressen.....	729
9.2.2	Verarbeitung von Organoblechen in hybriden Verbunden	730
9.2.2.1	Allgemeine Aspekte	730
9.2.2.2	Fertigung von verstärkten Bauteilen auf Basis von Organoblechen	730
9.2.3	Fertigungsverfahren für lokal endlosfaserverstärkte Langfaserverbunde.....	732
9.2.4	Hybride Innenhochdruckumformung	734
9.3	Post Moulding Assembly (PMA).....	736
9.3.1	Vergleich von PMA und IMA	736
9.3.2	Verbindungstechnik als wesentlicher Aspekt der PMA-Route	737
9.4	Fügen von Hybridverbunden mit anderen Bauteilen	738
9.5	Zusammenfassung	739
9.6	Weiterführende Informationen	739

Teil IV – Fügetechnologien im Leichtbau	741
1 Mechanisches Fügen	
<i>Ortwin Hahn, Sushanthan Somasundaram</i>	745
1.1 Stanznieten	747
1.1.1 Verfahrensbeschreibung	748
1.1.2 Qualitätsbestimmende Größen von Stanznietverbindungen.....	750
1.1.3 Konstruktive Hinweise	751
1.1.4 Einsatzbereich.....	752
1.1.5 Mechanische Eigenschaften der Verbindungen	753
1.1.6 Systemtechnik zum Stanznieten.....	757
1.1.7 Prozessüberwachung des Setzvorgangs	758
1.1.8 Nacharbeitslösungen und Reparatur.....	760
1.1.9 Anwendungsbeispiele für das Stanznieten	761
1.2 Blindnieten	762
1.2.1 Blindnietssysteme – genormt und anwendungsbezogen	762
1.2.2 Allgemeine Richtlinien zur Auswahl von Blindnieten	765
1.2.3 Qualitätssicherung.....	766
1.2.4 Anwendungsbeispiele für das Blindnieten	768
1.3 Schließringbolzensetzen	770
1.3.1 Schließringbolzensysteme.....	771
1.3.2 Eigenschaften von Schließringbolzenverbindungen	772
1.3.3 Allgemeine Richtlinien	774
1.3.4 Qualitätssicherung.....	775
1.3.5 Anwendungsbeispiele für das Schließringbolzensetzen	777
1.4 Clinchen	779
1.4.1 Clinchsysteme.....	780
1.4.2 Mechanische Eigenschaften von Clinchverbindungen.....	784
1.4.3 Allgemeine Richtlinien	785
1.4.4 Qualitätssicherung.....	787
1.4.5 Anwendungsbeispiele für das Clinchen	789
1.5 Loch- und gewindeformendes Schrauben	791
1.5.1 Schraubssysteme.....	792
1.5.2 Eigenschaften der Schraubverbindungen	795
1.5.3 Allgemeine Richtlinien	801
1.5.4 Qualitätssicherung.....	805
1.5.5 Anwendungsbeispiele für Verschraubungen im Automobilbau	806
1.6 Hochgeschwindigkeitsbolzen setzen	807
1.6.1 Grundlagen und Begriffe.....	809
1.6.2 Verfahrensablauf und Verbindungsausbildung.....	809
1.6.3 Eigenschaften der Bolzensetzverbindungen im Vergleich mit anderen Verfahren	811
1.6.4 Korrosionsbeständigkeit	815
1.6.5 Setzgerät zum Bolzensetzen	816
1.6.6 Richtlinien zur Konstruktion und Fertigung.....	819

1.6.7	Anwendungsbeispiele für das Bolzensetzen.....	820
1.7	Toleranzausgleich	823
1.7.1	Definitionen und Funktionsprinzipien	823
1.7.2	Automatischer rotatorischer Toleranzausgleich	824
1.7.3	Automatischer translatorischer Toleranzausgleich.....	827
1.7.4	Manueller Toleranzausgleich.....	827
1.7.5	Einbauwerkzeuge und Hinweise zur Fertigung	829
1.7.6	Anwendungsbereiche	830
1.8	Weiterführende Infomationen	832
2	Fügen durch Umformen	
	<i>Michael Marré, A. Erman Tekkaya</i>	837
2.1	Fügen durch Umformen von Rohr- und Profilteilen	839
2.2	Fügen durch Weiten.....	840
2.2.1	Einsatz eines Wirkmediums	841
2.2.2	Einsatz eines starren Werkzeuges	844
2.2.3	Einsatz von Wirkenergie	846
2.3	Fügen durch Engen.....	847
2.3.1	Einsatz von Wirkenergie	847
2.3.2	Einsatz eines starren Werkzeuges	850
2.4	Zusammenfassung.....	850
2.5	Weiterführende Informationen	851
3	Thermisches Fügen	
	<i>Thomas Nitschke-Pagel</i>	853
3.1	Schweißen	855
3.1.1	Anforderungen an Schweißverfahren für den Leichtbau.....	857
3.1.2	Übersicht wichtiger Schweißverfahren	859
3.1.2.1	Metall-Lichtbogenschmelzschweißverfahren	859
3.1.2.2	Spezielle Schweißverfahren.....	863
3.1.3	Lichtbogenarten beim MSG-Schweißen.....	866
3.1.4	Wärmereduzierte MSG-Prozesse	869
3.1.4.1	MSG-Prozesse mit Treppenstufenimpuls	869
3.1.4.2	ColdArc-Prozess.....	871
3.1.4.3	CMT-Prozess.....	873
3.1.4.4	Micro-MIG- Prozess	874
3.1.5	Anwendung der energiereduzierten MSG-Prozesse.....	875
3.1.6	Schweißen von Leichtmetalldruckguss	877
3.1.7	Besonderheiten beim Schweißen verfestigter Werkstoffe	879
3.1.8	Weiterführende Informationen.....	882

Jean Pierre Bergmann

3.2	Löten	886
3.2.1	Löten als stoffschlüssiges Fügeverfahren.....	886
3.2.2	Löten artgleicher Werkstoffe	889
3.2.2.1	Löten von Stählen	889
3.2.2.2	Löten von Aluminiumwerkstoffen.....	892
3.2.2.3	Löten von Magnesiumwerkstoffen	892
3.2.2.4	Löten von Titanwerkstoffen	893
2.2.3	Löten von Mischverbindungen	893
3.2.4	Fazit	895
3.2.5	Weiterführende Informationen.....	896
4	Kleben	
	<i>Klaus Dilger</i>	899
4.1	Kleben als Fügeverfahren.....	903
4.1.1	Klebgerechte Gestaltung.....	903
4.1.1.1	Kleben geschlossener Profile.....	905
4.1.1.2	Kleben von T-Stößen	907
4.1.2	Klebstoffe für den Leichtbau.....	907
4.1.2.1	Epoxidharzklebstoffe	907
4.1.2.2	Polyurethanklebstoffe.....	909
4.2	Vorbehandlung der Oberflächen zum Kleben	909
4.3	Leichtbauwerkstoffe und deren Klebbarkeit	909
4.3.1	Kleben von Stahlblechen.....	911
4.3.2	Kleben formgehärteter Stahlbauteile	911
4.3.3	Kleben von Aluminiumblechen.....	915
4.3.4	Kleben von Aluminium-Druckguss	917
4.3.5	Kleben von Magnesium.....	920
4.3.6	Kleben von Titan.....	921
4.3.7	Kleben lackierter Bleche	921
4.3.8	Kleben von Kunststoffen	923
4.3.8.1	Kleben thermoplastischer Kunststoffe.....	923
4.3.8.2	Kleben von Elastomeren.....	924
4.3.8.3	Kleben von Duromeren.....	924
4.3.9	Kleben von Faserverbundwerkstoffen	924
4.4	Rechnerische Auslegung von Leichtbauklebungen.....	926
4.4.1	Analytische Berechnungsmethoden für Klebverbindungen.....	927
4.4.1.1	Berechnung von dünnen, strukturellen Klebschichten.....	927
4.4.1.2	Berechnung von flexiblen, gummielastischen Klebschichten	929
4.4.2	Numerische Berechnungsmethoden für Klebverbindungen	931
4.4.2.1	Berücksichtigung mehrachsiger Spannungszustände	932
4.4.2.2	Kohäsivzonenmodelle.....	933

4.5	Kleben im Fahrzeugbau	934
4.5.1	Kleben im Karosserie-Rohbau	934
4.5.2	Kleben in der Automobilmontage	936
4.6	Zusammenfassung	936
4.7	Weiterführende Informationen	937
5	Hybridfügen	
	<i>Ortwin Hahn, Sushanthan Somasundaram</i>	941
5.1	Grundlagen des Hybridfügens	943
5.2	Fertigung nach verschiedenen Verfahren	944
5.3	Eigenschaften der Verbindungen und deren Prüfung	947
5.3.1	Qualitätssicherung	947
5.3.2	Quasistatische Beanspruchung	948
5.3.3	Schwingende Beanspruchung	950
5.3.4	Schlagartige Beanspruchung	950
5.3.5	Alterungs- und Korrosionsverhalten	953
5.3.6	Temperaturabhängigkeit der Verbindungseigenschaften	954
5.4	Besonderheiten bei loch- und gewindeformendem Schrauben in Kombination mit dem Kleben	954
5.5	Anwendungsbeispiele	957
5.6	Weiterführende Informationen	960
6	Qualitätssicherung in der Produktion	
	<i>Jens Ridzewski</i>	961
6.1	Ziele der Qualitätssicherung	963
6.2	Qualitätsmanagement - eine Unternehmensphilosophie	964
6.3	Maßnahmen zur Qualitätssicherung	966
6.3.1	Aufgaben in der Produktion von Faserverbundbauteilen	966
6.3.2	Einteilung der Qualitätssicherungsmaßnahmen	967
6.3.3	QS-Maßnahmen bei zulassungspflichtigen Bauteilen im Bauwesen	970
6.3.3.1	Einteilung	970
6.3.3.2	Eigenüberwachung	970
6.3.3.3	Fremdüberwachung	971
6.4	Prüfverfahren an faserverstärkten Kunststoffen	971
6.4.1	Werkstoffprüfung	971
6.4.1.1	Übersicht der Verfahren	971
6.4.1.2	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	972
6.4.1.3	Rheologische Prüfverfahren	973
6.4.1.4	Physikalische Prüfverfahren	974
6.4.1.5	Prüfverfahren zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	975
6.4.1.6	Prüfverfahren zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften	983
6.4.1.7	Bewertung auf Eignung für die werkseigene Produktionskontrolle	984
6.4.1.8	Übersicht über weitere Prüfnormen	985
6.4.2	Bauteilprüfung	986

6.5	Zusammenfassung.....	986
6.6	Weiterführende Informationen	987

Teil V – Bewertung von Bauteilen und Leichtbaustrukturen..... 989

1 Werkstoffmodelle für die Prozess- und Bauteilsimulation

	<i>Hermann Riedel</i>	993
1.1	Beschreibung von Plastizitätsmodellen.....	997
1.1.1	Überblick	997
1.1.2	von Mises-Modell	998
1.1.3	Chaboche-Modell.....	998
1.1.4	Anwendung des Chaboche-Modells auf die Rückfederung.....	999
1.1.5	Phänomenologische Modelle für Anisotropie	1000
1.1.6	Texturmodelle	1001
1.1.7	Anwendung von Texturmodellen auf Leichtbauwerkstoffe	1003
1.2	Beschreibung von Schädigungs- und Versagensmodellen	1006
1.2.1	Bruchmechanismen	1006
1.2.2	Bruchkriterien für duktilen Bruch.....	1007
1.2.3	Schädigungsmechanik für duktilen Bruch.....	1008
1.2.4	Anwendung des Gologanu-Modells auf die Kantenrissbildung beim Walzen	1009
1.2.5	Anwendung des Gologanu-Modells auf das Grenzformänderungsschaubild	1011
1.2.6	Faserverstärkte Kunststoffe.....	1012
1.2.7	Bruchmechanik.....	1015
1.2.8	Weiterführende Informationen.....	1016

Dong-Zhi Sun

1.3	Crashverhalten von metallischen Werkstoffen und deren Fügeverbindungen.....	1020
1.3.1	Werkstoff- und Versagensmodelle für Crashsimulation.....	1021
1.3.1.1	Werkstoffmodelle für Dehnratenabhängigkeit und Anisotropie.....	1021
1.3.1.2	Versagensmodelle	1021
1.3.2	Crashsimulation von Aluminium- und Magnesiumwerkstoffen.....	1023
1.3.3	Durchgängige Simulation eines TRIP-Stahls vom Umformen bis Crash.....	1024
1.3.3.1	Einflüsse der Mehrachsigkeit und Belastungsgeschichte auf die Bruchdehnungen.....	1024
1.3.3.2	Versagensmodellierung mit Berücksichtigung von Vordehnungen und Vorschädigung	1025
1.3.4	Crashsimulation von Fügeverbindungen	1026
1.3.4.1	Ersatzmodelle für Punktschweißverbindungen	1027
1.3.4.2	Modellierung von Klebverbindungen	1028
1.3.4.3	Simulation von Hybridverbindungen (Punktschweißkleben).....	1029
1.3.5	Weiterführende Informationen.....	1030

Stefan Hiermaier

1.4	Crashverhalten von Polymerwerkstoffen.....	1033
1.4.1	Mechanische Eigenschaften unverstärkter Thermoplaste.....	1033
1.4.2	Numerische Simulation faserverstärkter Kunststoffe unter Crashlast.....	1038
1.4.3	Weiterführende Informationen.....	1040
2	Bedeutung der Betriebsfestigkeit im Leichtbau	
	<i>Andreas Büter, Holger Hanselka</i>	1041
2.1	Einleitung.....	1043
2.2	Betriebsfestigkeit als Basis für die Bauteilauslegung	1047
2.2.1	Inhalt des Lastenheftes.....	1049
2.2.2	Formen des Versagens.....	1051
2.2.2.1	Strukturdynamische Stabilität	1051
2.2.2.2	Stabilität gegen Knicken und Beulen	1052
2.2.2.3	Festigkeitsversagen	1052
2.2.3	Auswahl des Materials.....	1053
2.2.4	Beispiel 1: Betriebsfeste Auslegung einer hochbelasteten Kunststoffkomponente im Motorraum	1054
2.2.4.1	Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Proben.....	1056
2.2.4.2	Übertragung der Ergebnisse auf ein Bauteil.....	1059
2.2.4.3	Bewertung mehrachsiger Beanspruchungszustände	1060
2.3	Numerische und experimentelle Betriebslastensimulation	1063
2.3.1	Materialeigenschaften	1064
2.3.2	Mehrachsigkeit	1064
2.3.3	Festigkeit von Proben und Bauteilen im Vergleich.....	1066
2.3.4	Schadensakkumulation	1066
2.4	Möglichkeiten der Betriebsfestigkeit im Entwicklungsprozess	1069
2.4.1	Beispiel 2: Entwicklung eines innovativen Hochleistungsratsatzes - Besonderheiten bei der Auslegung und Bewertung von Bauteilen aus Metall	1069
2.4.1.1	Umlaufbiegeversuche unter variablen Amplituden an skalierten Proben zur Reibkorrosion zwischen Aluminium-scheibe und Stahlachse	1070
2.4.1.2	Experimentelle Betriebslastensimulation am Aluminium/Stahl-Hybridratsatz	1073
2.4.2	Beispiel 3: Einsatz faserverstärkter Kunststoffe in Primär- und Sekundärkomponenten - Entwicklung von Kunststoffrädern.....	1076
2.4.2.1	Fahrzeuigräder aus faserverstärkten Kunststoffen.....	1078
2.4.2.2	Anforderungen an Kraftfahrzeuigräder aus Sicht der Betriebsfestigkeit.....	1078
2.4.2.3	Mechanisches und physikalisches Verhalten von faserverstärkten Kunststoffen.....	1082
2.4.2.4	Numerische Betriebsfestigkeitssimulation an Kunststoffrädern.....	1083
2.4.2.5	Entwicklung einer ersten Bemessungsphilosophie für Kunststoffräder	1084
2.4.2.6	Betriebsfestigkeitsversuche an Kunststoffrädern	1085
2.5	Zusammenfassung.....	1087
2.6	Weiterführende Informationen	1087

3	Zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen	
	<i>Gerd Dobmann</i>	1091
3.1	Standardisierte ZFP für den Leichtbau.....	1095
3.2	ZFP-Entwicklungen für die Prüfung von Ausgangswerkstoffen	1097
3.2.1	Fertigungsprüfung von Feinblechen – prozessintegrierte mikromagnetische Charakterisierung von Werkstoffkenngrößen	1097
3.2.1.1	Das Multiparameter-Konzept 3MA.....	1100
3.2.1.2	Mikromagnetische Online-Bestimmung von Streckgrenze und Zugfestigkeit	1102
3.2.2	ZFP begleitend zur Werkstoffentwicklung hochfester Karosseriestähle – mikromagnetische Charakterisierung von plastischem Verformungsverhalten	1105
3.2.2.1	ZFP-Verfahren zum Online-Monitoring der plastischen Verformung an Dualphasen-Stahl ..	1106
3.2.2.2	Monitoring von Laststeigerungsversuchen.....	1106
3.2.3	ZFP von Faserverbundwerkstoffen	1110
3.2.3.1	ZFP von Faserverbundmaterial mit Ultraschall	1110
3.2.3.2	Thermographie von Faserverbundwerkstoffen	1111
3.2.3.3	Wirbelstromprüfung von CFK	1115
3.3	ZFP-Entwicklungen für die Prüfung von Halbzeugen und Werkstoffverbunden	1115
3.3.1	Fertigungsintegrierte Prüfung von Tailored Blanks	1115
3.3.2	Fertigungsprüfung von Laserschweißungen	1120
3.3.3	Fertigungsprüfung mechanischer Fügungen	1121
3.3.4	Prozessintegrierte Qualitätsüberwachung und -optimierung beim Rührreißschweißen	1122
3.3.4.1	Unregelmäßigkeiten beim FSW	1123
3.3.4.2	Zerstörungsfreie Prozessüberwachung beim Rührreißschweißen.....	1124
3.3.4.3	Zerstörungsfreier Nachweis von Schlauchporen	1128
3.3.4.4	Oxideinschlüsse.....	1131
3.3.4.5	Mit Leistungsultraschall unterstütztes FSW	1133
3.4	Zusammenfassung.....	1135
3.5	Weiterführende Informationen	1137
4	Structural Health Monitoring – Schadensdetektion	
	<i>Hans-Jürgen Schmidt, Bianka Schmidt-Brandecker</i>	1141
4.1	Einleitung.....	1143
4.2	SHM-Methoden	1144
4.3	Erfassung von Betriebslasten durch SHM	1146
4.3.1	Systeme zur Erfassung der Betriebslasten.....	1146
4.3.2	Identifizierung von extremen Landelasten (hard landing detection)	1147
4.3.3	Anpassung der Inspektionsforderungen	1147
4.3.4	Sicherheitsfaktoren.....	1148
4.4	Strukturoptimierung durch SHM.....	1149
4.4.1	Grundlagen für die SHM-Anwendung am Druckrumpf.....	1151
4.4.2	Beispiele zur Gewichtsreduzierung für typische Rumpfschalen.....	1152
4.4.3	Alternative Stringer-Überwachung	1155
4.4.4	Schlussfolgerungen.....	1155

4.5	Inspektion von Leichtbaustrukturen	1155
4.5.1	Reduzierung oder Ersatz von konventionellen Inspektionen	1156
4.5.2	Reduzierung oder Ersatz von Modifikationen.....	1157
4.5.3	Lebensdauererlängerung	1157
4.5.4	Zustandsabhängige Wartung.....	1158
4.5.4.1	Erfassung von Betriebslasten	1158
4.5.4.2	Kontinuierliche Überwachung	1158
4.6	Ausblick.....	1159
4.7	Weiterführende Informationen	1159
5	Reparaturfähigkeit und Reparaturkonzepte bei Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK)	
	<i>Georg Wachinger, Christian Thum, Peter Scheid</i>	1161
5.1	Einleitung.....	1163
5.2	Schäden und Reparaturen an FVK-Strukturen.....	1163
5.2.1	Schadensursachen.....	1164
5.2.2	Schadensformen	1164
5.2.3	Schadensbereiche.....	1164
5.2.4	Reparaturkategorien	1165
5.3	Reparaturverfahren monolithischer Verbundwerkstoffe.....	1165
5.3.1	Provisorischer Oberflächenschutz mit Reparaturklebebändern.....	1166
5.3.2	Schleifen	1166
5.3.3	Reparatur von Delaminationen mit injizierenden Verfahren	1166
5.3.4	Reparatur von Delaminationen durch Einsetzen von Nieten	1167
5.3.5	Reparatur von Schäden durch zusätzliche Lagen.....	1167
5.3.5.1	<i>Reparatur durch Auflaminieren</i>	1167
5.3.5.2	Quick Repair Methode von Boeing	1168
5.3.6	Schäften als Reparaturverfahren	1169
5.3.6.1	Allgemeines und Empfehlungen von Airbus	1169
5.3.6.2	Empfehlungen von Boeing	1171
5.3.6.3	Empfehlung von EADS	1172
5.3.7	Verfahren mit Aufdopplung	1176
5.4	Reparatur von Sandwichstrukturen.....	1180
5.4.1	Anbindungsfehler zwischen Wabe und Decklaminat.....	1180
5.4.2	Oberflächenversiegelung bei zulässigen Schadensgrößen.....	1180
5.4.3	Beschädigung von Decklaminat und Kernstruktur.....	1181
5.4.4	Reparatur bei einem durchgehenden Schaden.....	1186
5.5	Fazit.....	1187
5.6	Weitergehende Informationen	1187

6	Recyclingfähigkeit und End-of-Life-Konzept im Leichtbau	
	<i>Jörg Woidasky</i>	1189
6.1	Ressourceneffizienz als Leitbild	1193
6.2	End-of-Life-Konzept	1194
6.3	Beispiele für das Recycling von Leichtbauwerkstoffen	1195
6.3.1	Materialidentifikation als Schlüsselprozess: Metalle in Luftfahrtanwendungen.....	1197
6.3.2	Mechanische Aufbereitung als Schlüsselprozess: Werkstoffliche Kreislaufführung von GFK	1198
6.3.2.1	Ausgangsmaterialien	1199
6.3.2.2	Aufbereitungstechnik	1199
6.3.2.3	Produkte.....	1199
6.3.3	Thermische Behandlung als Schlüsselprozess: Pyrolyseprozesse zur Rückgewinnung von Kohlenstofffasern	1200
6.3.4	Kombination mit der Rohstoffherzeugung als Schlüsselprozess: GFK-Verwertung im Zementwerk	1202
6.4	Schlussfolgerungen	1202
6.5	Weiterführende Informationen	1203
	 Teil VI – Ganzheitliche Bilanzierung	 1205
1	Ganzheitliche Bilanzierung und Nachhaltigkeit im Leichtbau	
	<i>Martin Baitz</i>	1207
1.1	Bedeutung von Nachhaltigkeit und Lebenszyklusanalyse.....	1211
1.2	Entwicklung und Stand der Technik	1213
1.2.1	Entwicklung der Ökobilanz nach ISO	1213
1.2.2	Attributional und Consequential LCA	1215
1.3	Problematik der Vereinfachung komplexer Zusammenhänge	1217
1.3.1	Ökonomisch basierte Input-Output-Ökobilanz-Ansätze	1218
1.3.2	Bewertung der Ressourcen	1218
1.3.3	Ansätze mit „Footprinting“	1219
1.4	Populäre Fehleinschätzungen von Werkstoffen und Materialien.....	1220
1.4.1	Polymere und Erdöl-Ressourcen.....	1220
1.4.2	Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen	1222
1.4.3	Bioabbaubare Produkte	1222
1.4.4	Recycling	1223
1.4.5	Leichtbau	1224
1.5	Einflüsse von Leichtbau-Aspekten auf die technisch-ökologischen Eigenschaften von Produkten und Systemen	1226
1.5.1	Material und Rohstoffbereitstellung in der Vorkette.....	1228
1.5.2	Vom Material zum System	1230
1.5.3	Systemverhalten in der Nutzung.....	1232
1.5.4	Nachnutzungsoptionen.....	1233
1.6	Folgerungen und Empfehlungen	1233
1.7	Weiterführende Informationen	1235