

HANSER



Leseprobe

zu

„Handbuch Leichtbau“

von Frank Henning und Elvira Moeller

Print-ISBN: 978-3-446-45638-9
E-Book-ISBN: 978-3-446-45984-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45638-9>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 1. Auflage

Leichtbau ist die Umsetzung einer Entwicklungsstrategie, die darauf ausgerichtet ist, unter vorgegebenen technischen Randbedingungen die geforderte Funktion durch ein System minimaler Masse zu realisieren. Hinzu kommt die Gewährleistung der Systemzuverlässigkeit über die gesamte Produktlebenszeit.

Unter Leichtbau versteht man jedoch nicht nur die Verringerung des Gewichts, sondern die Steigerung der Effizienz eines Gesamtsystems. Leichtbau erfordert einen ganzheitlichen, interdisziplinären Ansatz, der sich in die Bereiche Methoden, Werkstoffe und Produktion einteilen lässt. Um Leichtbau effizient umzusetzen, muss der Ingenieur auf umfassendes Wissen zurückgreifen können, das diese Themenfelder einschließt. Effiziente Leichtbaulösungen hängen neben den technischen Anforderungen zudem auch von den ökonomischen, ökologischen und sozialen Randbedingungen ab.

Die Herausforderung der Zukunft liegt vor allem im Optimieren und Zusammenführen unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe zur Realisierung eines leichten, wirtschaftlich umsetzbaren Systems, entweder durch produktionsintegrierte Hybridisierung oder durch anschließendes Fügen von Einzelbauteilen zu einem hybriden Gesamtsystem.

Um dieses komplexe Thema praxisgerecht aufzubereiten, ist das Buch entlang des Wertschöpfungsprozesses gegliedert: Ausgehend von der Produktentstehung für Leichtbaukomponenten und -systeme über die unterschiedlichen, für den Leichtbau relevanten Konstruktionswerkstoffe, der direkt damit verbundenen Produktion, die sich in Fertigungsverfahren, Nacharbeit und Fügetechnologien unterteilen lassen, bis hin zur Bewertung von Leichtbauteilen und Strukturen sowie den Methoden der ganzheitlichen Bilanzierung.

In Teil I werden das integrierte Produktentstehungsmodell und die damit verbundene ganzheitliche Lösung zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen und der sie unterstützenden Methoden vorgestellt. Dank gilt Herrn *Prof. Dr.-Ing. Albert Albers*, dessen Arbeiten diesen Teil prägen und der die

Themen mit seinen Mitarbeitern in diesem Teil des Buches zusammengeführt hat.

In Teil II werden die relevanten Leichtbauwerkstoffe und systematischen Methoden zur Werkstoffauswahl beschrieben. Die Kapitel zu den einzelnen Werkstoffen enthalten übersichtliche Angaben und Vergleiche zu Eigenschaften und viele spezielle Hinweise und Anwendungsbeispiele, die sich auf ihre Eignung als Leichtbauwerkstoff beziehen. Besonderer Dank gilt Herrn *Dr.-Ing. Kay Weidenmann*, der nicht nur als Koordinator, sondern auch wesentlich zum Inhalt dieses Teils beigetragen hat. Ohne sein herausragendes Engagement würde der zweite Teil sicherlich nicht in dieser Form vorliegen.

In Teil III des Handbuchs stehen die Fertigungsverfahren im Leichtbau, die Formgebung, die Be- und Verarbeitung von Leichtbauprodukten und -werkstoffen im Fokus. Die Fertigungsverfahren sind oftmals der Schlüssel für eine wirtschaftliche Herstellung von Leichtbauteilen und wesentlicher Bestandteil des Systemansatzes mit den interagierenden Bereichen der Methoden, Werkstoffe und Produktion. Für die inhaltliche Koordination dieses Kapitels gebührt Herrn *Prof. Dr.-Ing. Volker Schulze* entsprechender Dank.

Teil IV setzt sich mit dem für den Leichtbau bedeutenden Thema der Fügetechnologien auseinander, die in fünf Gruppen unterteilt werden. Für Mischbauweisen im Multi-Material-Design spielt vor allem das Kleben, also das chemische Fügen, eine zunehmende Rolle. Kombinierte Fügeverfahren, auch als Hybridfügen bezeichnet, kombinieren die Vorteile verschiedener Verfahren und spielen für den Leichtbau hinsichtlich der Materialeinsparung an den Fügstellen eine wichtige Rolle.

Teil V des Buches beschäftigt sich mit der Bewertung von Bauteilen und Leichtbaustrukturen. Dieses Themenfeld umfasst die Prozess- und Bauteilsimulation neuer Leichtbauwerkstoffe, die oft nicht mit konventionellen Materialgesetzen zu beschreiben sind und eine besondere Herausforderung darstellen. Weitere Kapitel sind die Betriebsfestigkeit im Leichtbau, die zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen und

Bauteilen, das Structural Health Monitoring – die Schadensdetektion, die Reparaturfähigkeit einer Faserverbundstruktur und Reparaturkonzepte bis hin zu End-of-Life-Konzepten und Recycling.

Im VI. Teil des Buches werden der für den Leichtbau sehr bedeutende Aspekt der ganzheitlichen Bilanzierung und die hierfür angewandten Methoden vorgestellt. Die sogenannte Life-Cycle-Analyse umfasst die ganzheitliche Betrachtung eines Leichtbausystems entlang der Wertschöpfungskette über die Produktlebenszeit bis zur Verwertung und ermöglicht somit eine aussagekräftige Bewertung hinsichtlich technischer, ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte.

August 2011

Unser Dank gilt den Autoren aller Einzelbeiträge und allen, die auf andere Weise am Zustandekommen des Buches beteiligt waren – auch den Firmen und Organisationen, die Bildmaterial und Daten zu Verfügung gestellt haben, um einzelne Sachverhalte zu verdeutlichen.

Besonders danken möchten wir Herrn *Dipl.-Ing. Volker Herzberg* vom Carl Hanser Verlag, der mit Verständnis und Hilfsbereitschaft, mit viel Sachverstand und Diplomatie eine positive und konstruktive Zusammenarbeit bewirkt hat.

*Frank Henning
Elvira Moeller*

Vorwort zur 2. Auflage

Das vorliegende Buch ist im Jahre 2011 in der 1. Auflage erschienen. Inzwischen sind in vielen Bereichen neue Erkenntnisse erarbeitet, Fertigungsverfahren optimiert und die Eigenschaften von Werkstoffen verbessert worden. Diese Aspekte wurden bei der Überarbeitung und Aktualisierung berücksichtigt.

In der vorliegenden 2. Auflage wurden aber auch neue Kapitel aufgenommen, z.B. die Additive Fertigung sowie die Einbeziehung der Künstlichen Intelligenz zur Gewinnung aktuellen Wissens. Gründlich überarbeitet wurde der Teil der Werkstoffe, vor allem der der faserverstärkten Kunststoffe.

Einige völlig neue Aspekte wurden in das Buch aufgenommen: Die Initiative Massiver Leichtbau, die Bionik, also die Umsetzung biologischer Systeme in technische Produkte und die wirtschaftlichen Aspekte des Leichtbaus. Nicht alles was technisch machbar ist, ist auch bezahlbar, d.h. die wirtschaftliche Effektivität muss mit dem technischen Fortschritt einhergehen.

April 2020

Ein weiteres Wort zur 2. Auflage: Herr Professor Henning konnte in dieser Ausgabe nicht mehr als aktiver Herausgeber mitwirken. Er hat inzwischen ein Reihe weiterer Aufgaben übernommen, sodass für die Herausgebere Tätigkeit keine Zeit blieb.

Dessen ungeachtet hat er seine eigenen Beiträge auf dem Gebiet der faserverstärkten Kunststoffe gründlich überarbeitet und aktualisiert.

Ich danke allen Autoren, den neuen und den bisherigen, für die Mühe, die sie sich gemacht haben, um neue Erkenntnisse in den Text aufzunehmen.

Nicht zuletzt danke ich – wie immer – Herrn Volker Herzberg für seine Hilfe und Unterstützung, aber auch für seine Geduld und Diplomatie, mit der er die Entstehung des Werkes begleitet hat.

Elvira Moeller

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Autorenverzeichnis	XXXI

Teil I – Produktentstehungsprozess für Leichtbaukomponenten und -systeme

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	Nähtechnologie	357
7.4.8	Bindertechnologie	358
7.5	Imprägnierte Halbzeuge	359
7.5.1	Duomere Systeme	360
7.5.1.1	Diskontinuierlich faserverstärkte Duomere	360
7.5.1.2	Kontinuierlich faserverstärkte Duomere	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>	403
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, Heiner Michels, Christian Oberschelb, Uwe Vroomen</i>	423
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>	449
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>	491
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
8.3.2.2	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>	909
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>	925
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

Autorenverzeichnis

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT,
Pfinztal

frank.henning@ict.fraunhofer.de

Dipl.-Chem. Elvira Moeller

Leinfelden-Echterdingen

elvira.moeller@t-online.de

Dr.-Ing. Martin Baitz

Thinkstep – a Spera Company Stuttgart

m.baitz@spera.com

VI.1

Dipl.-Ing. Chris Becke

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

wbk - Institut für Produktionstechnik

becke@wbk.uka.de

III.7

Autoren

Prof. Dr.-Ing., Dr. h.c. Albert Albers

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

albert.albers@kit.edu

I.1, I.3, I.4, I.5, I.6, I.7

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck

RWTH Aachen

Institut für Eisenhüttenkunde

bleck@iehk.rwth-aachen.de

II.2

Dr.-Ing. Stefan Albrecht

Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP)

Ganzheitliche Bilanzierung GaBi Stuttgart

stefan.albrecht@ibp.fraunhofer.de

VI.1

Dr.-Ing. Andreas Braun

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

andreas.braun@kit.edu

I.1

Dr. Antonino Ardilio

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und

Organisation (IAO)

antonino.ardilio@iao.fraunhofer.de

I.2

Prof. Dr. Ing. Andreas Bührig-Polaczek

RWTH Aachen

Gießerei-Institut

sekretariat@gi.rwth-aachen.de

III.1

Dr.-Ing. Florian Augenthaler

Robert Bosch GmbH

florian.augenthaler@bosch.com

IV.1, IV.5

Prof. h.c. Norbert Burkardt

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

norbert.burkardt@kit.edu

I.3, I.5

Dr.-Ing. Bernd Bader

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT,

Pfinztal

bernd.bader@ict.fraunhofer.de

III.9

Alexander Busse

fka GmbH, Aachen

III.11

Prof. Dr.-Ing. Andreas Büter Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF andreas.bueter@lbf.fraunhofer.de	V.4	Dipl.-Ing. Alexander Erz Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde alexander.erk@kit.edu	III.4
Dipl.-Ing. Lazarula Chatzigeorgiou Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) lazarula.chatzigeorgiou@igcv.fraunhofer.de	II.7	Dipl.-Ing. Matthias Fischer Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) Ganzheitliche Bilanzierung GaBi matthias.fischer@ibp.fraunhofer.de	VI.1
Dr.-Ing. Christoph Dahnke Institut für Umformtechnik und Leichtbau christoph.dahnke@iul.tu-dortmund.de	III.2	Dr.-Ing. Soeren Gies Technische Universität Dortmund Institut für Umformtechnik und Leichtbau soeren.gies@iul.tu-dortmund.de	III.2, IV.2
Dr.-Ing. Stefan Dietrich Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wbk - Institut für Produktionstechnik stefan.dietrich@kit.edu	III.4	Dr.-Ing. Christian Haase RWTH Aachen Institut für Eisenhüttenkunde christian.haase@iehk.rwth-aachen.de	III.10
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger Technische Universität Braunschweig Institut für Füge- und Schweißtechnik k.dilger@tu-braunschweig.de	IV.4	Prof. Dr.-Ing. Ortwin Hahn Universität Paderborn – Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF) ortwin.hahn@t-online.de	IV.1, IV.5
Prof. Dr. rer.nat. Gerd Dobmann Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung Saar-Universität Saarbrücken gerd.dobmann@t-online.de	V.5	Dr.-Ing. Helena Hashemi Farzaneh Technische Universität München helena.hashemi@tum.de	VI.2
Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler Technische Universität München Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC) drechsler@lcc.mw.tum.de	II.7	M.Sc. Jonas Heimicke Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung jonas.heimicke@kit.edu	I.1
Dr.-Ing. Tobias Düser AVL Deutschland GmbH	I.7		

Anton Helfrich Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde anton.helfrich@kit.edu	III.7	Dipl.-Ing. Gundolf Kopp Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) Institut für Fahrzeugkonzepte gundolf.kopp@dlr.de	I.3
Prof. Dr.-Ing. Frank Henning Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal frank.henning@ict.fraunhofer.de	II.7, II.9, III.6	Prof. Dr.-Ing. Walter Krenkel Universität Bayreuth Lehrstuhl Keramische Werkstoffe walter.krenkel@uni-bayreuth.de	II.8
Prof. Dr.-Ing. Stefan Hiermaier Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik (EMI), Freiburg hiermaier@emi.fraunhofer.de	V.3	Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Kurze Wissenschaftlich-technischer Berater prof.peter.kurze@t-online.de	II.4
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Hirsch Hydro Aluminium Rolled Products GmbH-F&E, Bonn juergen.hirsch@hydro.com	II.3	Dr. Reinhard Lenk CeramTec GmbH, Plochingen r.lenk@ceramtec.com	III.8
Dr.-Ing. Jürgen Hoffmeister Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde juergen.hoffmeister@kit.edu	III.4	Dr.-Ing. Christian Löbbe Institut für Umformtechnik und Leichtbau christian.loebbe@iul.tu-dortmund.de	III.2
Prof. Dr.-Ing. Axel Kauffmann Duale Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe axel.kauffmann@dhbw-karlsruhe.de	II.6, III.5	Dr. Christiane Maierhofer Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) christiane.maierhofer@bam.de	V.5
Dr.-Ing. Jürgen Kiese vorm. ThyssenKrupp VDM GmbH, Essen juergen.kiese@thyssenkrupp.com	II.5	Dr.-Ing. Neven Majić Cevotec GmbH neven.majic@cevotec.com	I.3, I.4
M.Sc. Patrick Köhnen RWTH Aachen Institut für Eisenhüttenkunde patrick.koehnen@iehk.rwth-aachen.de	III.10	Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut Universität Paderborn – Laboratorium für Werkstoff- und Füge­technik (LWF) meschut@lwf.upb.de	IV.1, IV.5

Dipl.-Ing. Jürgen Michna Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wbk – Institut für Produktionstechnik michna@wbk.uka.de	III.3	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Riedel Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg hermann.riedel@iwm.fraunhofer.de	V.1
Dr.-Ing. Thomas Nitschke-Pagel Technische Universität Braunschweig Institut für Füge- und Schweißtechnik t.pagel@tu-braunschweig.de	IV.3	M. Sc. Vadim Sartisson Universität Paderborn – Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF) vadim.sartisson@lwf.upb.de	IV.1, IV.5
Dr.-Ing. Friedrich Ostermann Aluminium-Technologie-Service – Meckenheim – Paderborn ostermann@aluminiumtechnologie.de	II.3	Dr.-Ing. Andreas Schmid Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung andreas.schmid@kit.edu	I.4
Dr. Hans-Willi Raedt Hirschvogel Automotive Group hans-willi.raedt@hirschvogel.com	III.11	Dr. Hans-Jürgen Schmidt AeroStruc – Aeronautical Engineering, Buxtehude HJB.schmidt@t-online.de	V.6
M.Sc. Sven Revfi Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung sven.revfi@kit.edu	I.6	Bianka Schmidt-Brandecker AeroStruc – Aeronautical Engineering, Buxtehude HJB.schmidt@t-online.de	V.6
M.Sc. Thilo Richter Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung thilo.richter@kit.edu	I.1	Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wbk – Institut für Produktionstechnik volker.schulze@kit.edu	III.3, III.4, III.7
Prof. Dr.-Ing. Jens Ridzewski IMA Institut für Materialforschung und Anwen- dungstechnik GmbH, Dresden jens.ridzewski@ima-dresden.de	IV.6	Dr. Wolfgang Seeliger Leichtbau BW GmbH wolfgang.seeliger@leichtbau-bw.de	VI.3
		Alessandro Selvaggio Technische Universität Dortmund Institut für Umformtechnik und Leichtbau alessandro.selvaggio@iul.tu-dortmund	III.2

Dipl.-Ing. Manuel Serf Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung manuel.serf@kit.edu	I.4	Dr.-Ing. (FH) Georg Wachinger Airbus Senior Expert (Im Ruhestand)	V.7
Dr. Heinz Sibum Im Ruhestand	II.5	Prof. Dr. rer. nat. Alexander Wanner Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde alexander.wanner@kit.edu	II.1
Dr.-Ing. Sushantan Somasundaram ThyssenKrupp AG, Essen sushanthan.somasundaram@thyssenkrupp.com	IV.1, IV.5	Prof. Dr.- Ing. habil. Joachim Warschat Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) joachim.warschat@iao.fraunhofer.de	I.2
Dipl.-Ing. Markus Spadinger Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung markus.spadinger@kit.edu	I.6	Helmut Wehlan Airbus Helicopters Deutschland GmbH helmut.wehlan@helicopters.com	V.7
M. Sc. Benedict Stampfer Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde benedict.stampfer@kit.edu	III.3	Prof. Dr.-Ing. habil. Kay Weidenmann Universität Augsburg Institut für Materials Ressource Management (MRM) kay.weidenmann@mrm.uni-augsburg.de	II.1, II.9, III.9
Dr.-Ing. Dong-Zhi Sun Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg dongzhi.sun@iwf.fraunhofer.de	V.2	Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky Hochschule Pforzheim joerg.woidasky@hs-pforzheim.de	V.8
Prof. Dr.-Ing. Erman Tekkaya Technische Universität Dortmund Institut für Umformtechnik und Leichtbau erman.tekkaya@iul.tu-dortmund.de	III.2, IV.2	Dr.-Ing. Thomas Wurm Georgsmarienhütte GmbH, Georgsmarienhütte	III.11
Dipl.-Ing. (FH) Christian Thum Airbus Helicopters Donauwörth christian.thum@airbus.com	V.7		

7.3 Verstärkungsfasern und ihre Eigenschaften

Verstärkungsfasern beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften des Verbundwerkstoffs sowie der daraus hergestellten Bauteile, speziell die Steifigkeit, Festigkeit, Schlagzähigkeit, Wärmeformbeständigkeit und das Kriechverhalten. Für den strukturellen Leichtbau sind aufgrund ihrer hohen spezifischen mechanischen Eigenschaften lediglich Kohlenstoff-, Aramid- und Glasfasern technisch relevant. Zunehmend werden auch Basaltfasern vor allem in Entwicklungsprojekten eingesetzt. Der Systemleichtbau geht jedoch weit über die Struktur hinaus, weshalb auch die an Bedeutung zunehmenden Naturfasern hier Erwähnung finden.

7.3.1 Glasfasern

Glasfasern haben einen gleichmäßigen nahezu runden Querschnitt mit einem Durchmesser von ca. 7 bis 24 μm ; sie werden aus geschmolzenem Glas gezogen. Die Zusammensetzung des Glases bestimmt ihre Eigenschaften (Tab. 7.2). Sie sind kostengünstig und finden ihre Anwendung überall dort, wo hohe Festigkeiten und weniger hohe Steifigkeiten gefordert sind. Bei der Herstellung des Textilglases wird auf die gerade gezogene Faser eine Schlichte aufgetragen, die vor allem zum Schutz der Fasern, zum Zusammenhalt und zur Haftungsverbesserung der Fasern an der organischen Matrix dient. Diese Schichten enthalten unter anderem organische Filmbildner, Gleitmittel, Antistatika und Haftvermittler auf Silanbasis, die der jeweiligen organischen Matrix angepasst sind.

Tab. 7.2: Allgemeine Eigenschaften verschiedener Glasfasern

Art	Eigenschaften
E-Glasfasern (electrical)	bestehen aus alkalifreiem Glas und eignen sich als elektrische Isolatoren mit hoher Transparenz für Radiowellen
S-Glasfasern (strength)	weisen höhere Bruchfestigkeit und Zähigkeit auf
C-Glasfasern	haben höheren Borgehalt und höhere chemische Beständigkeit
Borfreie ECR-Glasfasern	sind feste und chemisch beständige E-Glasfasern ohne Bor

Glasfasern sind gekennzeichnet durch eine im Vergleich zu den Metallen geringe Dichte, geringe Kriechneigung, geringe Feuchtigkeitsaufnahme und einen hohen E-Modul. Sie sind isotrop, d.h. ihre Werkstoffkennwerte in Faserrichtung sind gleich denen quer zur Faserrichtung. Ihre Zugfestigkeit ist höher als die aller anderen Verstärkungsfasern und höher als die von Stahl.

Glasfasern werden als Roving (zum Strang zusammengefasste Spinnfasern ohne Drillung), Garn, Zwirn (mit Drillung), oder als flächige oder dreidimensionale Halbzeuge angeboten. Textilglas lässt sich um etwa 3% dehnen und ändert bis zu 250°C Dauerbelastung seine mechanischen Eigenschaften nicht. Es hat einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und ist nicht brennbar.

Glasfasern finden ihren mengenmäßig größten Einsatz als kontinuierliche Verstärkungsfaser beispielsweise in der Fertigung von Leiterplatten oder von Rotorblättern für Windenergieanlagen. Im Bereich der diskontinuierlich faserverstärkten Kunststoffe finden sie vor allem Anwendung im Bereich semi-struktureller Bauteile, wie beispielsweise Sitzscha-

Tab. 7.3: Technische Kennwerte verschiedener Glasfasern

	Dichte in g/cm^2	Zugfestigkeit* in MPa	E-Modul in kN/mm^2	Bruchdehnung* in %	therm. Ausdehnungskoeffizient in $\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$	Erweichungstemperatur in $^\circ\text{C}$
E-Glas	2,6	3400	73	< 4,8	$5,0 \cdot 10^{-6}$	850
S-Glas	2,53	4400	86	< 4,6	$4,0 \cdot 10^{-6}$	980
C-Glas	2,52	2400	70	< 4,8	$6,3 \cdot 10^{-6}$	750
ECR-Glas	2,72	3440	73	< 4,8	$5,9 \cdot 10^{-6}$	880
AR-Glas	2,68	3000	73	< 4,4	$6,5 \cdot 10^{-6}$	770

* Abnahme bis zu 50% bei der Herstellung der Halbzeuge

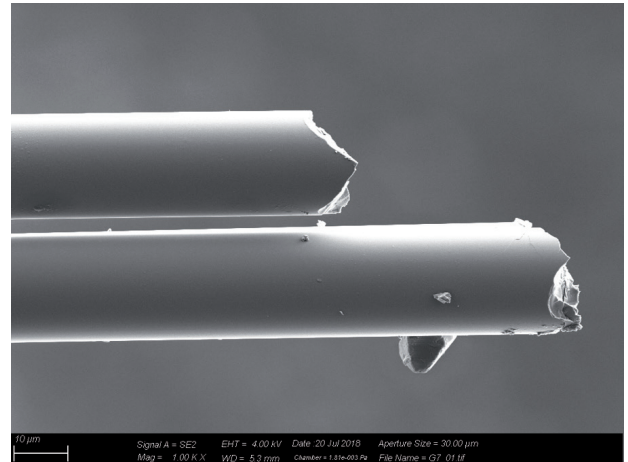
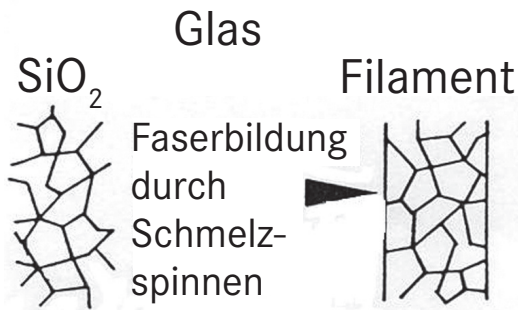


Abb. 7.2: Aufbau von Glasfasern

len, Frontendmontageträger oder Unterbodenabdeckungen.

Wegen ihrer elektrischen Isolationsfähigkeit und ihrer hohen elektromagnetischen Transparenz werden sie ebenfalls im Luftfahrtbereich für die Herstellung von Bugverkleidungen, sog. Radomen, eingesetzt.

Die Grundsubstanz der Glasfaser ist Siliciumdioxid SiO_2 (Kieselsäure) und (ausgenommen von Quarzglas) unterschiedlichsten Metalloxiden wie beispielsweise Al_2O_3 . Glasfasern besitzen somit aufgrund ihres dreidimensionalen Aufbaus isotrope Eigenschaften (Abb. 7.2).

Die Rohstoffzusammensetzung der Glasfasern bestimmt in Kombination mit der nasschemischen Schlichtetechnologie und dem Glasfaserherstellungsverfahren die Eigenschaften der Glasfasern. Deren Art, Menge, Orientierung und Faserlänge bzw. Faserlängenverteilung, bestimmt die Eigenschaften des Bauteils.

Die meist verwendete Faser ist die E-Glasfaser, die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung im Unterschied zu den anderen Glasfaserarten eine deutlich geringere Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit aufweist und somit vorwiegend Einsatz in der Elektroindustrie findet. Darüber wird sie aufgrund ihres geringen Preises auch in der Fertigung von Automobilkomponenten und bei Rotorblättern für die Windenergie eingesetzt.

Wichtige Kenngrößen der Glasfasern sind unter anderem Steifigkeit, Festigkeit, Bruchdehnung,

Filamentdurchmesser, Garnfeinheit, Art, Anteil und Löslichkeit der Schlichte. Die Anzahl der Filamente in einem Roving beeinflusst die Verarbeitbarkeit und die Eigenschaften im Faserverbundbauteil.

7.3.2 Kohlenstofffasern

Die für den strukturellen Leichtbau wichtigsten Fasern sind die Kohlenstofffasern, die häufig auch als Carbon-Fasern oder C-Fasern bezeichnet werden, in einem komplexen, mehrstufigen Prozess – je nach gewünschten Eigenschaften – hergestellt werden. Kohlenstofffasern besitzen einen zweidimensionalen, schichtförmigen Aufbau mit kovalenten Bindungen in der Ebene (Abb. 7.3). Ein hoher Orientierungsgrad der Graphitkristalle und 100% Parakristallinität bestimmen zudem die herausragenden Eigenschaften. Neben hohen gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften weisen Kohlenstofffasern eine gute Biokompatibilität auf und sind unempfindlich gegen Korrosion, Lösungsmittel, Laugen und schwache Säuren (unbeständig nur gegen starke Oxidationsmittel/Säuren). C-Fasern sind sowohl elektrisch als auch thermisch gut leitend und körperverträglich.

Kohlenstofffasern sind technische Fasern mit sehr hoher Festigkeit und Steifigkeit, jedoch geringer Bruchdehnung. Zu ihrer Herstellung werden organische Ausgangsmaterialien über eine schmelzbare Zwischenstufe carbonatisiert. Man nutzt z. B. struk-

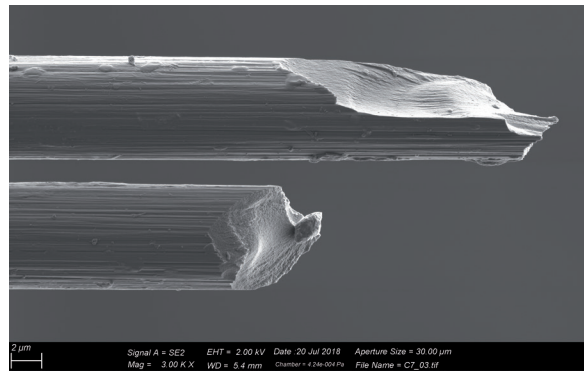
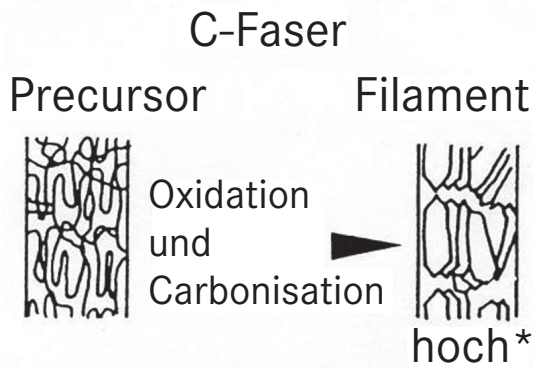


Abb. 7.3: Aufbau der Kohlenstofffasern (links Blumberg 1989, rechts Fraunhofer ICT 2018)

turell vorgeformte hochmolekulare Materialien wie Polyacrylnitril (PAN) (Precursor), organische Fasern oder Pech. Aus Cellulose hergestellte Fasern weisen weniger hochwertige Strukturen auf und werden deshalb überwiegend als thermisch hoch belastbare Isolierwerkstoffe eingesetzt. Heute gelten Fasern auf Basis Polyacrylnitril in drei verschiedenen Modifikationen als Standardfasern für Strukturwerkstoffe:

- PAN-HT – hochzugfest (high tenacity)
- PAN-HM – hochmodulig (high modulus)
- PAN-UHM – ultrahochmodulig (ultrahigh modulus)

Bei UHM-Fasern führt die Zunahme der Steifigkeit zum Abfall von Festigkeit und Dehnung.

Aus preiswertem Pech werden mit hohem Aufwand an Reinigungs- und Aufbereitungsverfahren kostengünstige Fasern hergestellt, die sich durch hohe Steifigkeit sowie gute thermische und elektrische Eigenschaften auszeichnen. Ihre Druckfestigkeit ist, bedingt durch die geringen Wechselwirkungen zwischen den Graphitebenen jedoch deutlich geringer. Pech basierte Fasern besitzen eine geringere Festigkeit und Steifigkeit als PAN basierte, sind elektrisch und wärmeleitend. Im letzten Schritt des Herstellungsprozesses werden die Fasern bei Temperaturen von bis zu 3000 °C verstreckt, sodass die Graphitebenen sich orientieren können. Auf diese Weise werden HT-Kohlenstofffasern mit hochorientierter Struktur (HM-C) hergestellt. Diese Streckgraphitierung wirkt sich auf die Zugfestigkeit und den E-Modul aus.

Kohlenstofffasern haben im Gegensatz zu Kunststoffen ein progressives Spannungs-Dehnungsverhalten, d. h. mit zunehmender Belastung steigt der E-Modul. Im Gegensatz zu Glasfasern sind sie stark anisotrop. Diese Eigenschaft gilt auch für die Wärmeausdehnungskoeffizienten, die in Faserrichtung und senkrecht dazu sehr unterschiedlich sind. Kohlenstofffasern sind normalerweise äußerst spröde und knickempfindlich. Dies erschwert den Herstellungs- und Verarbeitungsprozess. Deshalb werden sie mit einem Oberflächenschutz versehen, der meist zudem als Haftvermittler zur Matrix dient. Die Fasern werden bei langer Lagerung unflexibel, da die Oberflächenschicht aushärtet (Epoxidharz). Die Faser selbst ist fast dauerschwingfest. Sie brennt im Verbund trotz hoher eigener Brennbarkeit nur langsam.

Übergeordnet können beispielweise vier Typen von Kohlenstofffasern unterschieden werden (Abb. 7.4):

- HT-Fasern: hochfeste Kohlenstofffasern (engl. high tenacity), Standardfasern
- ST-Fasern: höhere Festigkeit als HT-Fasern (engl. super tenacity)
- IM-Fasern: höherer Modul als HT-Fasern (engl. intermediate modulus)
- HM-Fasern: hochsteife Fasern (engl. high modulus)

Ein wichtiger Prozessschritt ist die direkte Oberflächenbehandlung der Fasern nach der Carbonisierung bzw. nach der Graphitisierung, um eine entsprechende Weiterverarbeitung der Fasern zu ermöglichen. Wie auch bei den Glasfasern wird

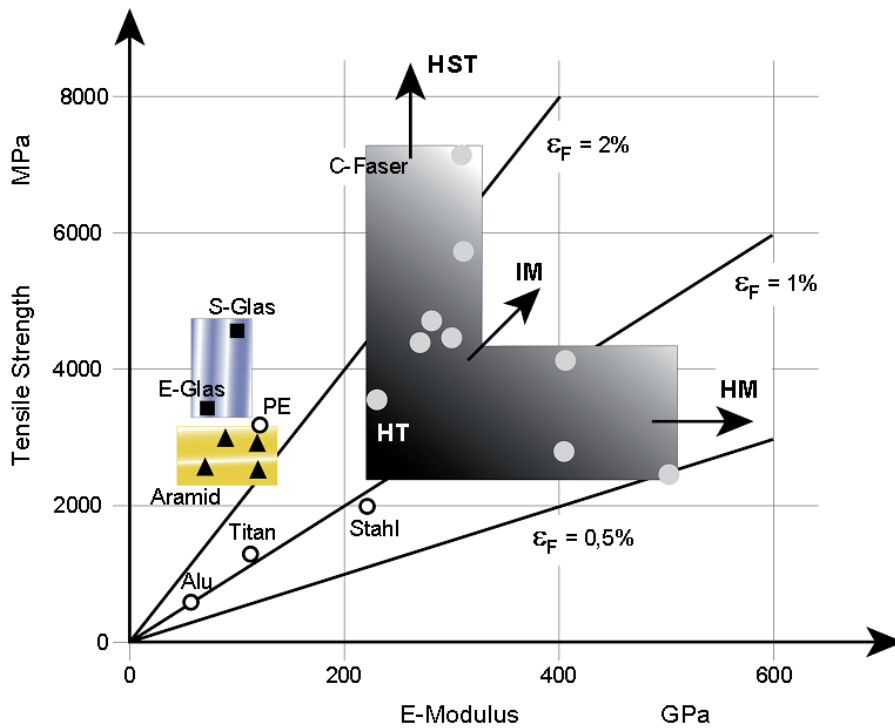


Abb.7.4: Eigenschaften von unterschiedlichen Kohlenstofffasertypen (Drechsler)

eine Schlichte im Herstellungsprozess aufgebracht, um die Handhabung sowie die folgende Benetzung der Fasern mit der Polymermatrix zu verbessern. Die Wahl der Schlichte hat einen entscheidenden Einfluss auf die interlaminaren Eigenschaften des Verbundwerkstoffes. Als Endprodukt entstehen somit unterschiedliche Kohlenstofffaser-Rovings, die in kontinuierlicher Form auf eine Spule aufgewickelt werden und somit zur Weiterverarbeitung mit unterschiedlichen Textiltechniken (Weben, Flechten, etc.) zur Verfügung stehen. Üblicherweise bestehen die Rovings aus unterschiedlich gebündelten Fasereinzelfilamenten. Bei Kohlenstofffasern gibt die sog. K-Zahl die Anzahl der Einzelfilamente eines Rovings an, 1 K = 1 Kilo = 1.000 Filamente).

Die üblichen K-Zahlen für Kohlenstofffasern sind:

1K-Typ, d. h. Roving aus 1.000 Filamenten

3K-Typ, d. h. Roving aus 3.000 Filamenten

6K-, 12K- und neuerdings für Industrieanwendungen

24K- oder auch 50K-Typ.

Bei gleichem Prozessablauf wird ersichtlich, dass beispielsweise die 1K-Typen im Vergleich zu 12K-Typen deutlich teurer sind, da der Durch-

satz in der Produktion entsprechend geringer ist. Üblicherweise finden 1K-Typen Anwendung in der Raumfahrtindustrie, da sie ausgezeichnete mechanische Eigenschaften besitzen und die Herstellung von flächigen Faserhalbzeugen mit entsprechend geringeren Faserflächengewichten ermöglichen. Hierdurch kann eine wesentlich feinere Abstufung der Einzelschichten entsprechend der strukturmechanischen Eigenschaften erfolgen, und somit das größtmögliche Leichtbaupotenzial erzielt werden.

Im Gegensatz dazu finden in der zivilen Luftfahrtindustrie typischerweise Faserhalbzeuge Anwendung, die aus 6- oder 12K-Rovings hergestellt werden. Für die kostensensitiven Bereiche, wie beispielsweise der Automobilindustrie oder dem allgemeinen Transport- und Maschinenwesen, werden üblicherweise 12- oder 24K-Typen verwendet, da hier sowohl der Materialpreis als auch die Produktivität für die Realisierung von Großserien entscheidend sind. Um diesen Anforderungen zu begegnen, werden sogenannte „Low-Cost“-Kohlenstofffasern mit einer K-Zahl von > 24 - meist 50K, auch als „Heavy Tow“ bezeichnet, angeboten.

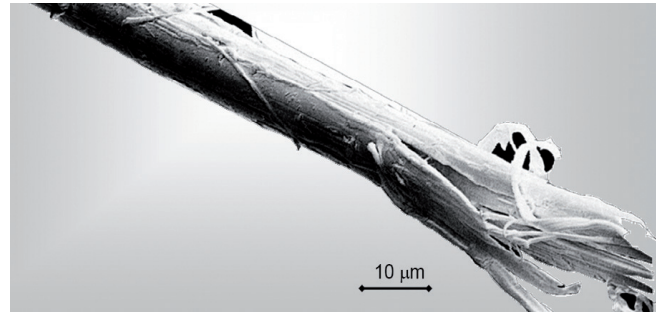
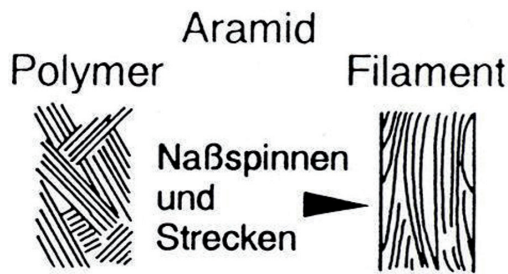


Abb. 7.5: Aufbau der Aramidfaser (Blumberg 1989)

7.3.3 Aramidfasern

Aramidfasern bestehen aus linearen organischen Polymeren (aromatische Polyamide) mit hoher Festigkeit und Steifigkeit, bei denen die kovalenten Bindungen der Polymerkette entlang der Faserachse orientiert sind. Da die Schmelztemperatur des PPTA-Polymers (Polyphenylterephthalamid) oberhalb der thermischen Zersetzungstemperatur liegt, können Polyamidfasern nicht schmelzflüssig, sondern lediglich mit Hilfe von Lösemitteln/Säuren hergestellt werden.

Aramidfasern haben einen nahezu kreisrunden Querschnitt mit um die 12 µm Durchmesser (Abb. 7.5). Die Dichte mit 1,45 g/cm³ ist im Vergleich zu anderen Verstärkungsfasern gering. Sie haben eine hohe gewichtsbezogene Zugfestigkeit und sind stark anisotrop, d. h. die Werkstoffeigenschaften in Faserrichtung unterscheiden sich von denen quer zur Faser (Tab. 7.4).

Aramidfasern können bis zu 7% Feuchtigkeit aufnehmen, wodurch die Festigkeit der Fasern und vor allem die Haftung zwischen Faser und Matrix beeinträchtigt werden. Sie sind im Verbund mit Polymeren bis 300°C temperaturbeständig. Auch bei höherer Temperatur schmelzen sie nicht und sind daher für feuerfeste Schutzkleidung geeignet. Bekannt sind Aramidfasern unter anderem von DuPont unter dem Markennamen Kevlar.

Vorteile von Aramidfasern sind ihre Chemikalienbeständigkeit (ausgenommen gegenüber starken Säuren und Basen), ihre Flammwidrigkeit (selbstverlöschend), die Dimensionsstabilität, ihre geringe elektrische und Wärmeleitfähigkeit. Sie reagieren auf UV-Strahlung mit signifikantem Festigkeitsabfall.

Aramidfasern lassen sich in vor allem mit Duromeren und vereinzelt auch mit Thermoplasten verarbeiten. Bauteile, die mit Aramidfasern verstärkt sind, zeigen Druckempfindlichkeit in Faserrichtung. Dies liegt in ihrem Aufbau begründet. Die Fasern sind für zug- als für druckbeanspruchte Elemente besser geeignet.

Die steifen Fasertypen finden vor allem in Flugzeugstrukturen Anwendung, meist in Kombination mit Kohlenstofffasern, um das Energieaufnahmevermögen des Verbundwerkstoffes zu steigern und das Schädigungsverhalten zu verbessern. Leichtbaurelevant sind Aramidfasern mit geringem Modul vor allem für Schutzzwecke, wie Leichtpanzerungen, Splitterschutzwesten oder Helme. Aramidfasern sind, wie Kohlenstofffasern anisotrop, das bedeutet, die physikalisch/mechanischen Eigenschaften quer und längs der Faser sind signifikant unterschiedlich. Die polymere Struktur ist für das duktile und zähe Verhalten verantwortlich und wirkt sich auf die Knotenfestigkeit zuträglich aus. Folge der Zähigkeit ist eine schlechte mechanische Bearbeitbarkeit. Die

Tab. 7.4: Mechanische Eigenschaften verschiedener Aramidfasern (nach Ehrenstein 2006)

Aramidfaser	Dichte in g/cm ³	Durchmesser in µm	Zug-E-Modul in kN/mm ²	Zugfestigkeit in MPa	Bruchdehnung in %
hochzäh	1,45	12	80	3600	4,0
hochsteif	1,45	12	131	3800	2,8
extrem steif	1,45	12	186	3400	2,0

Tab. 7.5: Eigenschaften von Verstärkungsfasern im Vergleich (Michaeli 2006)

	Glasfaser			Kohlenstofffaser			Aramidfaser	
	E	R/S	C	HT	HST	HM	Normal	HM
Dichte [g/cm ³]	2,6	2,5–2,53	2,45	1,75–1,8	1,78–1,83	1,79–1,91	1,39–1,44	1,45–1,47
Zugfestigkeit [GPa]	2,3	1,9–3,0	2,1	2,7–3,5	3,9–7,0	2,0–3,2	2,8–3,0	2,8–3,4
E-Modul [GPa]	72–73	86–87	71	228–238	230–270	350–490	58–80	120–186
Bruchdehnung bei Zug [%]	2,2–3,2	2,8–3,6	2,3	1,2–1,4	1,7–2,4	0,4–0,8	3,3–4,4	1,9–2,4
Spezifische Zugfestigkeit [GPa·cm ³ /g]	0,9	1,13–1,23	0,9	1,5–2,0	2,2–3,0	1,1–1,7	1,9–2,2	1,9–2,3
Spezifischer E-Modul [GPa·m ³ /g]	27,7–28,2	34–34,9	29	127–134	127–150	190–260	40–56	83–127
Filamentdurchmesser [μm]	3–25			7–8	5–7	6,5–8,0	12	
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	5	4	7,2	-0,1 – -0,7		-0,5 – -1,3	-2,0 – -6,0	

Fasern und Schnittkanten der Lamine sind schnell ausgefranst, und es kann zu Delaminationen kommen, weshalb geeignete Schneidwerkzeuge einzusetzen sind.

Aramidfasern weisen eine ganze Reihe an hervorragenden Eigenschaften wie ein exzellentes Dämpfungs- und Ermüdungsverhalten, eine gute Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit, eine geringe Wärmeleitfähigkeit, eine negative thermische Ausdehnung und eine hohe Energieaufnahme auf. Die Faser hat eine gute elektrische Isolierfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante ist geringer als die von Glas.

In Tabelle 7.5 werden die typischen Eigenschaften der Aramidfasern anderen Verstärkungsfasern gegenübergestellt. Aramidfasern besitzen spezifische Festigkeiten, die im Bereich der Kohlenstofffasern liegen, wohingegen Kohlenstofffasern eine im Vergleich zu Glasfasern zwei- bis dreimal so hohe spezifische Zugfestigkeit und einen bis zu zehnfach höheren spezifischen E-Modul besitzen, worin das enorme Leichtbaupotenzial dieser Verstärkungsfasern deutlich wird.

7.3.4 Naturfasern

Auch natürliche Fasern zur Verstärkung von Kunststoffen werden für den semistrukturellen Leichtbau herangezogen. Dazu gehören vor allem Flachs, Hanf, Jute und Baumwolle. Bei diesen Fasern handelt es sich um nachwachsende Rohstoffe, die zwar ein ausgespro-

chen geringes Gewicht haben, deren entsprechend geringe Belastbarkeit jedoch zu einem vergleichsweise eingeschränkten mechanischen Eigenschaftsniveau führt. Zudem sind eine Reihe von Herausforderungen zu bewältigen, die sich aus der geringen Temperaturbeständigkeit (< 200 °C) und den schwankenden Eigenschaften durch unregelmäßige Wachstums- und Witterungsbedingungen ergeben. Naturfasern werden entsprechend ihrer Wachstumsregion in unterschiedlichen Ländern entsprechend ihrem Vorkommen verwendet, um einen ökologisch und ökonomisch sinnvollen Einsatz zu gewährleisten.

Die Festigkeitswerte von Naturfasern liegen durchschnittlich etwa bei einem Viertel derer von Glasfasern, die spezifischen in etwa bei der Hälfte. Die absoluten E-Module von Pflanzenfasern liegen bei einem Fünftel der Glasfaserkennwerte, die spezifischen bei ca. einem Drittel. Dies verdeutlicht den eingeschränkten Einsatz im strukturellen Leichtbau. Betrachtet man den Leichtbau sinnvoller Weise als System, so bekommen naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe eine zunehmende Bedeutung gerade im Bereich funktionsintegrierter Verkleidungsteile. Tabelle 7.6 zeigt einige Kennwerte unterschiedlicher Naturfasern im Vergleich zu denen der Glasfasern.

Die *Abacafaser*, auch Manila Hanf genannt, wird auf den Philippinen angebaut und liefert leichte, feste und sehr widerstandsfähige Fasern. Verwendet werden vor allem die bis zu zwei Meter langen Hartfasern der Abacablätter. Die Faser ist relativ grob und weist

Tab. 7.6: Mechanische Eigenschaften (Mittelwert (Mw) und Median (Md)) von Naturfasern getestet im Einzelementtest mit dem System Dia-Stron (AVK)

Faserart		Sisal	Flachs	Hanf	Jute	Baumwolle	Lyocell	Ramie	Abaca	E-Glass
(Anzahl getesteter Elemente)		(84)	(84)	(66)	(93)	(117)	(93)	(158)		
Dichte [g/cm ³]		1,30	1,46	1,50	1,42	1,51	1,54	1,54	1,44	2,60
Festigkeit [MPa]	Mw	428	874	827	571	618	815	1250	1100	3500
	Md	424	790	588	540	561	837	1271		
Spezifische Festigkeit [MPa·cm ³ /g]	Mw	329	599	551	402	409	529	812	765	1346
	Md	326	541	392	380	372	544	825		
E-Modul [GPa]	Mw	4,57	14,58	12,98	17,34	11,84	8,63	35,96	-	72
	Md	4,39	12,84	8,29	16,35	10,49	8,27	35,25		
Spezifischer E-Modul [MPa·cm ³ /g]	Mw	3,52	9,99	8,66	12,21	7,84	5,61	23,35	-	28,24
	Md	3,38	8,80	5,52	11,51	6,95	5,37	22,91		

eine hohe Reißfestigkeit von 45 bis 70 cN/tex auf. Die Farbe reicht von weiß über gelblich bis braun. Abacafasern fanden zum Beispiel in einer Leichtbauunterbodenkapselung der Mercedes A-Klasse Einsatz.

Flachs wird häufig zur Ölgewinnung angebaut, eignet sich jedoch auch hervorragend zur Gewinnung hochwertiger Fasern. Die Flachsfaser wird, aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften und regionalen Verfügbarkeit, vermehrt als Verstärkungsfaser für Naturfaserverbundwerkstoffe eingesetzt. Hinzu kommt der ökonomische Vorteil des geringen Kilopreises für technische Fasern. Eines der wichtigsten Anwendungsgebiete für flachsfaserverstärkte Kunststoffe ist die Automobilindustrie, fast zwei Drittel der hier eingesetzten Naturfasern sind Flachsfasern.

Hanf enthält im Gegensatz zum Flachs stärker verholzte Faserteile. Die langen Faserbündel spalten sich beim Hecheln nicht so stark auf, wodurch die Faser gröber und steifer, aber reißfester als Flachs ist. Die aufbereitete Bastfaser hat eine Länge von ca. 5–55 mm und eine Dicke, die zwischen 16 und 50 µm liegt. Die sehr langen Fasern werden beim Hecheln in drei Teile gerissen. Der mittlere Teil liefert versponnen das gleichmäßigste und qualitativ hochwertigste Garn, das Fußstück wird meist für Werggarne verwendet. Eingesetzt werden Hanfgarne je nach Qualität als Verstärkungsfasern, für Dekorations- und Vorhangstoffe, in der Gurt-, Riemen- und Teppichweberei, für Sattler-, Netz- und Sacknähgarne, Kordeln und Seile. Die Faser ist aufgrund ihrer

hohen Festigkeit, wenig dehnbar, grob und hart, saugfähig, fault auch unter Wasser kaum und ist ziemlich verrottungsfest (Schiffstaue).

Sisal ist die Bezeichnung für die aus den Blättern der Agave sisalana gewonnenen Hartfasern. Sie wird in Yucatán (Mexico), Ost- und Westafrika, Brasilien usw. angebaut. Die Pflanze benötigt bis zur Schnittrufe etwa 5–6 Jahre und kann dann 7–10 Jahre lang geerntet werden. Die Faser hat einen harten Griff, hohe Reiß- und Scheuerfestigkeit, ist glänzend, gut einfärbbar und widerstandsfähig gegen Feuchtigkeit.

Die für die Produktion von naturfaserverstärkten Kunststoffen eingesetzten Fasern sind, preislich bedingt, vor allem Kurz- aber auch Langfasern. Naturfasern liegen im Vergleich zu den technischen Fasern immer in endlicher, oftmals sehr unterschiedlicher Länge vor, weshalb die Herstellung von Kardenbändern oder Spinnrovings erforderlich ist, die wiederum Ausgangsprodukte zur Herstellung technischer Textilien sind.

Grundsätzlich lassen sich Naturfasern wie Glasfasern im Extrusions-, Press- und Spritzgießverfahren verarbeiten. Eines der wichtigsten Verarbeitungsverfahren für Naturfasern ist das Formpressen, bei dem sogenannte Naturfasermatten zusammen mit duromeren oder thermoplastischen Kunststoffen unter Temperatureinwirkung verpresst werden. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch eine geringe Dichte kombiniert mit relativ hohen Festigkeiten und Steifigkeiten aus.

Bei den eingesetzten Verfahren ist es entscheidend, die vollständige Benetzung der Fasern zu gewährleisten, zum einen, um einen optimalen Faser-Matrix-Verbund zu erhalten, und zum anderen, um die Wasseraufnahme der Naturfasern zu verhindern. Maßgebend sind niederviskose Matrixmaterialien, die die Fasern vollständig benetzen, ohne diese thermisch zu schädigen. Da beim Pressen mit geeigneten Matrixmaterialien geringere Verarbeitungstemperaturen (ca. 180–210 °C) als beim Spritzgießen (ca. 230 °C) benötigt werden, sind bei Naturfasermaterialien bisher vorwiegend die Pressverfahren im Serieneinsatz.

7.4 Textile Halbzeuge

Textile Vorformlingtechnologien haben ein hohes Potenzial zur automatisierten Herstellung von belastungsgerechten, endkonturnahen Faserstrukturen, die in einem nachfolgenden Arbeitsschritt mit dem Matrixsystem imprägniert werden. Hierzu wurden verschiedene Harzinjektionstechnologien entwickelt (s. Kap. III.6). Eine Alternative bei der Herstellung thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe ist die Hybridgarntechnik (Comingling), bei der die Verstärkungsfasern und die Thermoplastfäden schon im Textilprozess miteinander kombiniert werden. Die Faserstruktur wird anschließend unter hohem Druck und bei Temperaturen über der Schmelz- oder Fließtemperatur des Thermoplasten konsolidiert.

In den letzten 30 Jahren wurden aus den klassischen Textiltechnologien Verfahren entwickelt, die an die

Erfordernisse der Verarbeitung der Glas-, Aramid- und Kohlenstofffaser angepasst oder speziell für die Anforderungen der Faserverbundtechnologie ausgelegt wurden, z. B.

- Gewebe, Gelege, Geflechte
- Gestricke, Gesticke
- Fibre Patch Preforming
- Nähetechnologie.

Einige dieser Verfahren basieren auf flächigen Halbzeugen, die in einem zweiten Arbeitsgang zugeschnitten und schichtweise in ein Werkzeug eingelegt werden (sequentielle Preformherstellung). Bei anderen Verfahren werden die Fasern direkt in die endgültige Kontur eingebracht (direkte Preformherstellung). Der Weg von der Faser zum textilen Halbzeug ist für die verschiedenen Ansätze in Tabelle 7.7 dargestellt.

Die einzelnen Technologien unterscheiden sich deutlich in Bezug auf die Produktivität und die möglichen Faserorientierungen bzw. Vorformlinggeometrien. Ergänzt wird die Textiltechnologie häufig durch sogenannte Bindertechnologien, die eine Stabilisierung bzw. eine Verbindung mehrerer biegeschlaffer textiler Halbzeuge ermöglichen und damit die Handhabung verbessern.

7.4.1 Matten und Vliese

Die einfachsten und vergleichbar günstigsten Halbzeuge sind die Matten (Abb. 7.6), die sich durch ihre Herstellungsweise unterscheiden. Eine Variante wird aus einem Endlosfaden hergestellt (Endlosmatte), die andere aus geschnittenen Spinnfäden mit Längen

Direkte Preformherstellung		Sequentielle Preformherstellung	
Verstärkungsfaser direkt vom Hersteller		Zusätzliche Halbzeugherstellung (Gewebe, Gelege, Fließ, ...)	
Bindertechnologie	Textile Verfahren	Bindertechnologie	Textile Verfahren
Faserspritzen (und Varianten)	<ul style="list-style-type: none"> • 2D/3D Flechten • Stricken • Fiberplacement Technologien (TFP) • 3D Weben 	<ul style="list-style-type: none"> • Binderumformtechnik (Presspreformen, Diaphragma) • Tapelegen • FPP 	2D/3D Nähen
Herstellung der Preform mit nur einem Arbeitsschritt möglich		Mindestens zwei Arbeitsschritte zur Herstellung einer Preform	

Tab. 7.7: Gegenüberstellung direkter und sequentieller Preformherstellung



Abb. 7.6: Glasfasermatte (Quelle: Carbon Werke)

zwischen 25 und 50 mm (Schnittmatte). Durch die ungerichtete flächige Faserablage wird ein quasi-isotropes Verstärkungsgebilde erzeugt.

Die Anbindung der Fasern kann einerseits durch Binder erfolgen, der vor der Ablage aufgebracht wird und während der Trocknung die Fasern miteinander verklebt. Zur besseren Durchtränkung ist der Binder meist in der Matrix löslich. Der Binder kann in flüssiger oder fester Form (Pulver) vorliegen. Eine zweite Variante ist das Vernadeln. Dabei werden die Fasermatten mit Stiften in Form von Nadeln mit zusätzlichen Widerhaken durchstoßen, und es entsteht eine mechanische Verbindung (physikalische Verschlaufung) ähnlich dem Vernähen.

Durch die quasi-isotropen Eigenschaften und die relativ geringen Faservolumengehalte von Matten (ca. 20 bis 30%) sind diese nicht für hochbeanspruchte Bauteile geeignet und werden deshalb fast aus-



Abb. 7.7: Kohlenstofffilamentvlies (Quelle: Carbon Werke)

schließlich aus Glasfasern angeboten. Die Flächen-gewichte sind in einem großen Bereich einstellbar. Vliese sind eine Sonderform der Matten, die sich durch deutlich geringere Flächengewichte auszeichnen (Abb. 7.7). Anwendung finden sie oft als Oberflächenvlies für Bauteile mit hochwertigen Oberflächen, zum Beispiel im Automobilbau. Hier finden auch Kohlenstofffasern Anwendung.

7.4.2 Gewebe

Weben ist die älteste Textiltechnik, die für die Herstellung von Faserverbundstrukturen eingesetzt wird. Das Grundprinzip besteht darin, dass zwei Fadensysteme, Kette und Schuss, miteinander verwebt werden. Je nach Webart entstehen ebene Halbzeuge, die sich durch ihre Bindungsart unterscheiden (Abb.7.8).

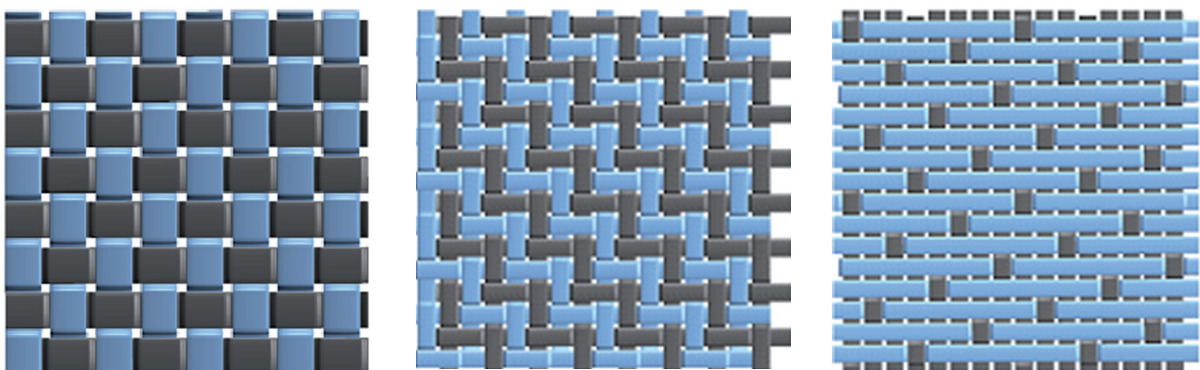


Abb. 7.8: Leinwand-, Köper- und Atlasbindung (Quelle: IFB Universität Stuttgart)

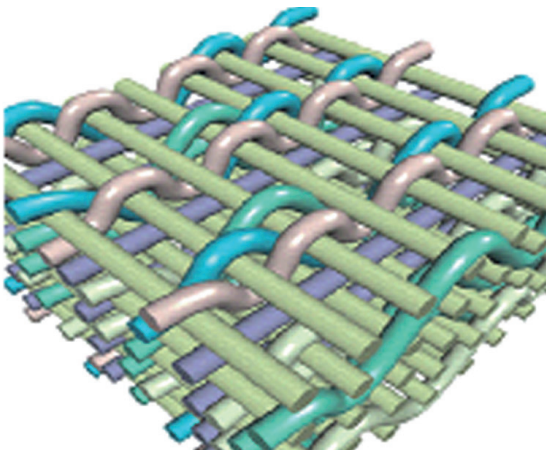
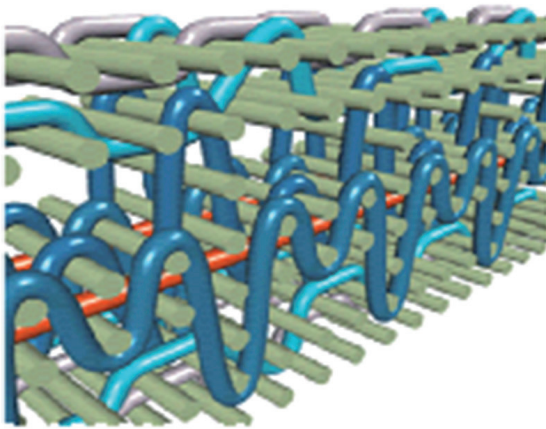


Abb. 7.9: Dreidimensionale Faserverstärkung (Quelle: Scottweave)

Durch die Überkreuzung von Kett- und Schussfäden ergeben sich Faserondulationen, die insbesondere bei Druckbelastung zu einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften von Laminaten führen.

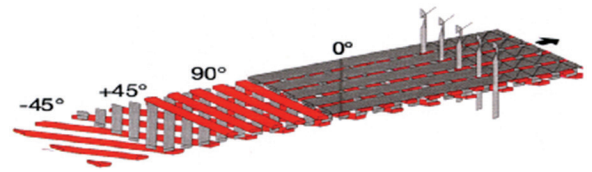


Abb. 7.10: Multiaxialgelege (Quelle: Saertex GmbH)

Andererseits ergeben sich durch die Webstruktur interessante optische Designvarianten. Gewebe werden daher häufig für kohlenstofffaserverstärkte Sichtbauteile eingesetzt. Große Herausforderung hierbei ist die ungleichmäßige Verteilung von Faserfilamenten und Matrix in den Knotenpunkten die durch Nahtanhaftung und entsprechende Schwindung zu Oberflächenmarkierungen führen. Neben diesen klassischen 2D-Geweben gibt es verschiedene Webarten, die entweder zu einer dreidimensionalen Faserverstärkung oder zu einer dreidimensionalen Faserstruktur führen (Abb. 7.9).

7.4.3 Gelege

Die wichtigsten flächigen Halbzeuge werden im sogenannten Multiaxial-Gelegeverfahren (MAG) hergestellt, bei dem im Gegensatz zu den Geweben bis zu neun Faserrichtungen in einem Halbzeug kombiniert werden können (Abb. 7.10).

Die einzelnen Faserlagen sind außerdem nicht miteinander verwoben, sondern liegen aufeinander, wodurch Faserondulationen signifikant reduziert werden. MAGs haben daher bessere mechanische

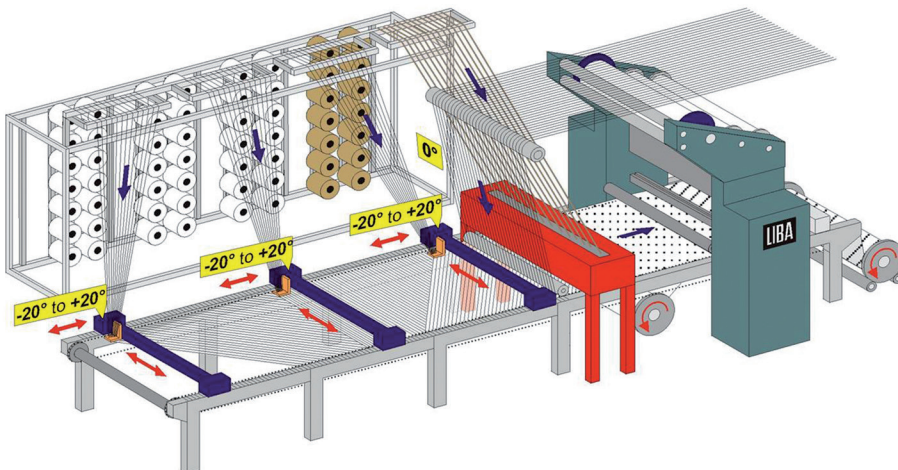


Abb. 7.11: Gelegemaschine (Quelle: Saertex GmbH)



Abb. 7.12: Drapierung einer Druckkalotte (Quelle: Airbus)

Eigenschaften als Gewebe. Damit ein handhabbares Halbzeug entsteht, werden die einzelnen Lagen nach dem Ablegen auf der Maschine durch ein Vielnadelnähsystem mit einem dünnen Faden vernäht (Abb. 7.11). Wie bei Geweben erfolgt die Klassifizierung der MAGs über das Flächengewicht, das sich zum einen aus dem Titer der Fasern und zum anderen aus der Anzahl der Lagen ergibt. Multiaxialgelege sind auf dem Markt als zwei-, drei-, vier- oder mehrlagige Faserstrukturen verfügbar. Sie können somit entsprechend der spezifischen Anforderungen in einem weiten Bereich variiert werden. Durch die Anzahl der Lagen und der Nähart ergibt sich ein mehr oder weniger gutes Drapierverhalten bei der Herstellung sphärisch gekrümmter Bauteile. In Abbildung 7.12 ist die Drapierung eines vernähten Geleges am Beispiel der Druckkalotte für einen Airbus dargestellt.

7.4.4 Geflechte

Ein Verfahren, das immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist die Flechttechnik. Seit langem sind Geflechschläuche als Halbzeuge zur Herstellung von rohrförmigen Bauteilen bekannt. Das Grundprinzip besteht darin, dass die auf Klöppeln aufgespulten Fasern gegenläufig auf sogenannten Flügelrädern auf einer Kreisbahn geführt werden (Abb. 7.13). Ein großer Vorteil der Flechttechnik ist die kontinuierliche

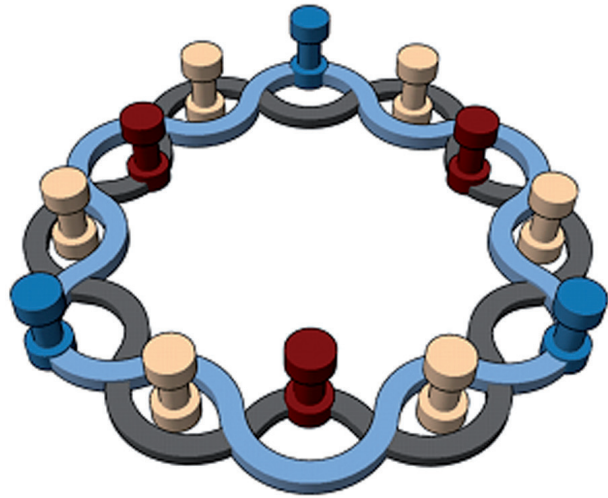


Abb. 7.13: Flechtprinzip

Anpassungsfähigkeit an Querschnittsänderungen, die allerdings mit einer Änderung des Flechtwinkels einhergeht.

Ähnlich wie beim Weben entsteht das Geflecht unter Zusammenführung aller sich überkreuzender Fasern im Flechtpunkt im Zentrum der Anlage. Hier entstehen zwei sich überkreuzende Faserrichtungen. Diese können durch das Verhältnis von Flecht- und Abzugsgeschwindigkeit in einem weiten Bereich von ca. 25° bis 80° variiert werden. Bei Bedarf kann ein drittes Fadensystem, das Stehfadensystem, das gerade in Längsrichtung durch das Geflecht verläuft, integriert werden. Auf diese Weise entsteht ein triaxiales in sich geschlossenes Geflecht (Abb. 7.14).

Eine besondere Flechtart, welche die Ondulation durch die Überkreuzung der Flechtfadensysteme vermeidet, ist das sogenannte UD-Flechten, bei dem eines der beiden Fadensysteme durch einen sehr dünnen Faden ersetzt wird und so pro Lage nur eine Faserrichtung erzeugt wird. Die mechanischen Eigenschaften können so deutlich verbessert werden und das Niveau von Prepreg-Bauteilen erreichen.

In den letzten Jahren wurde das roboterunterstützte Flechten entwickelt. Bei diesem Verfahren wird ein Flecht kern durch einen Roboter im Flechtpunkt manipuliert und automatisiert umflochten (7.15). Auf diese Weise können sehr komplexe, endkonturnahe, rohrförmige Faserstrukturen hergestellt werden,

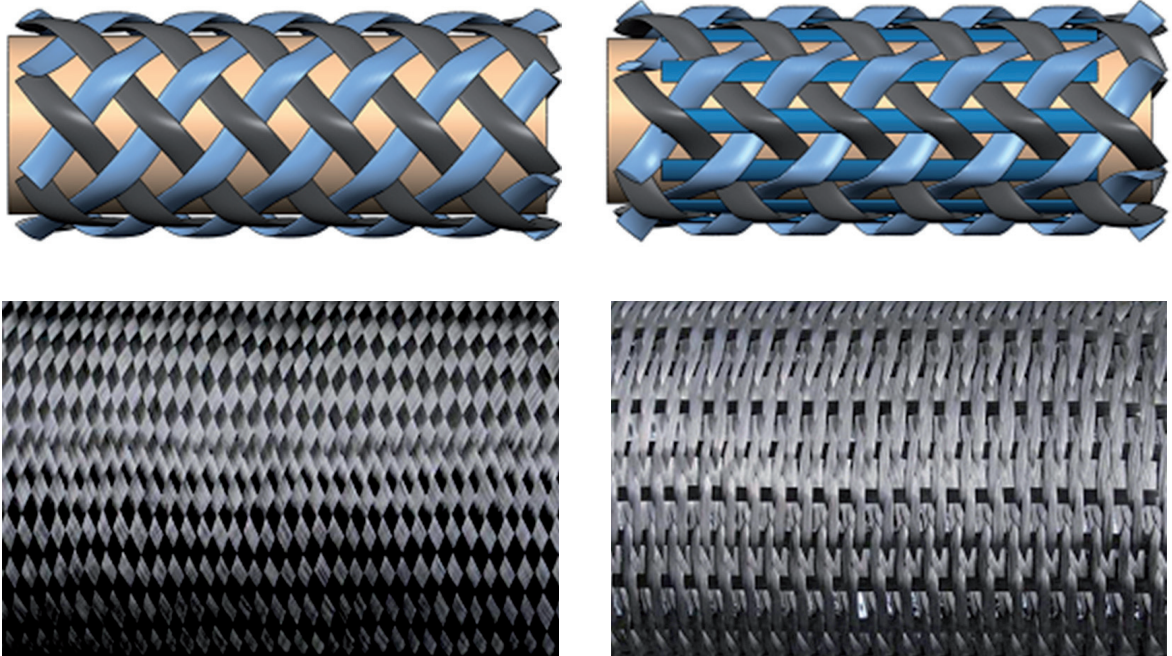


Abb. 7.14: Biaxiales (links) und triaxiales (rechts) Geflecht (Quelle: IFB Universität Stuttgart)

die gleichzeitig eine optimale, belastungsgerechte Faserarchitektur aufweisen. Beispiele dafür zeigt Abbildung 7.16.

Wird die Flechttechnik von Beginn an für die Herstellung eines Produktes in Betracht gezogen, kann das Potenzial durch eine fertigungsgerechte Gestaltung optimal genutzt werden. Eine sehr komplexe Geometrie stellt ein Fahrradrahmen dar, der aus vier Bauteilen besteht, wobei drei mit der Umflechttechnik hergestellt werden (Abb. 7.17). Im Gegensatz zu bekannten Rahmenkonzepten wurde die Anzahl der

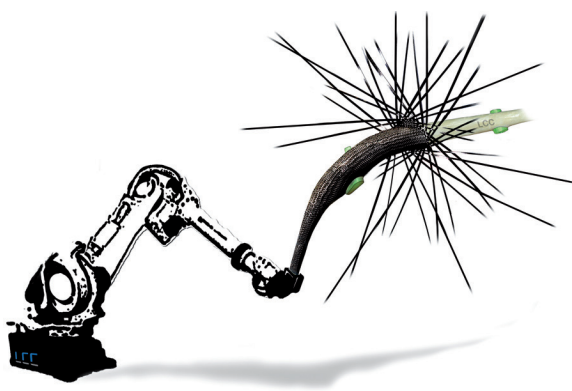


Abb. 7.15: Umflecht-Prinzip (Quelle: LCC, TU München)

Einzelteile, die nach der Injektion und Aushärtung gefügt werden, halbiert.

Eine besondere Variante der Flechttechnik ist das sogenannte 3D-Flechten. Bei diesem Verfahren sind die Klöppel und die Flügelräder nicht in einem Ring, sondern einer flachen Matrix angeordnet. Somit können die Fasern fast beliebig bewegt werden, wodurch sich im Flechtpunkt sehr komplexe Faserstrukturen ergeben. Durch die hohe Flexibilität können voll automatisiert selbst Profile mit variablem Querschnitt hergestellt werden. Das 3D-Flechten hat bisher dennoch nur eine Anwendung in Nischen, z. B. bei der Herstellung von Zwickelfüllern profilverstärkter Platten, gefunden, da die Produktivität und die realisierbaren Profilquerschnitte vergleichsweise gering sind.

7.4.5 Gesticke

Gesticke ermöglichen eine sehr hohe Flexibilität der Faserorientierung und bieten sich daher für die Herstellung von Vorformlingen für Ausschnittsverstärkungen, Krafteinleitungen oder für komplexe, kleine Bauteile an. Das Prinzip beruht darauf, dass die Ver-

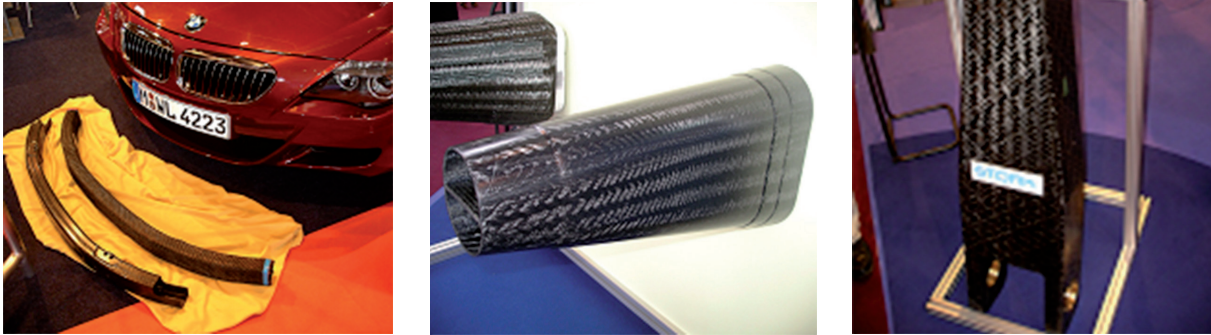


Abb. 7.16: Beispiele für Umflechtbauteile
 BMW M6 Stoßfängerträger (Quelle: SGL Kümpers GmbH), SLR Crashbox (Quelle: Eurocarbon, McLaren Mercedes),
 Flugzeugfahrwerksbein (Quelle: NLR)

stärkungsfasern auf komplexen Bahnen geführt und auf ein Basistextil aufgenäht werden (Abb. 7.18).

Der Vorteil der Sticktechnik liegt neben der Automatisierbarkeit darin, dass die Faserorientierungen den Belastungen und den Geometrien optimal angepasst werden können. Dies führt zu einer hohen Nutzung der Fasern bezüglich gerichteter mechanischer Eigenschaften und Formteilkonturtreue bzw. Verschnittfreiheit. Die Produktivität ist durch den Aufwand der gezielten Ablage geringer als bei Multi-axialgelegen oder Geweben. Neue Entwicklungen bieten durch den Einsatz von Großstickmaschinen jedoch interessante Zykluszeiten.



Abb. 7.17: Flechtfahrrad (Quelle: IFB Universität Stuttgart)

Ein interessantes Beispiel zur Veranschaulichung der Möglichkeiten der Sticktechnik ist der in Abbildung 7.19 dargestellte Fahrrad-Bremssattel im Vergleich mit einem Aluminiumbauteil und einem herkömmlichen Faserverbundbauteil, das aus einer quasi-isotropen Platte aufgebaut ist, dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die Sticktechnik annähernd eine Verdreifachung der gewichtsspezifischen Steifigkeit möglich ist.

Eine große Herausforderung stellt die Auslegung von Gesticken dar. Die klassische Laminattheorie kann hierbei keine Hilfe leisten. Interessante Ansätze basieren auf dem Prinzip des bionischen Wachstums. Hierbei werden in einem iterativen Prozess

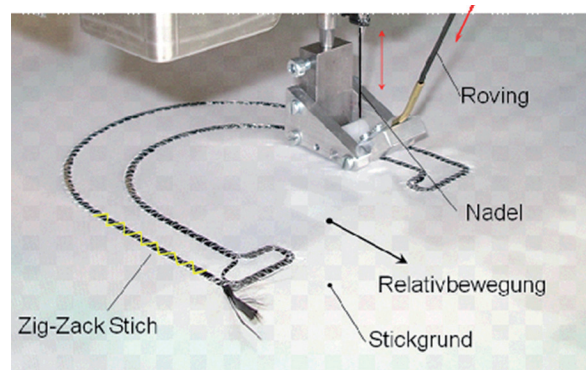


Abb. 7.18: Prinzip der Sticktechnologie (Quelle: IFB Universität Stuttgart)

Aluminium - gestanz

Gewicht: 52 g
 Steifigkeit absolut: 116 N/mm
 Steifigkeit spezif.: 2,26 N/mm/g

**Kohlenstofffaser - TFP**

Gewicht: 28 g
 Steifigkeit absolut: 180 N/mm
 Steifigkeit spezif.: 6,4 N/mm/g

**CF - Gewebe - Prepreg**

Gewicht: 29 g
 Steifigkeit absolut: 65 N/mm
 Steifigkeit spezif.: 2,25 N/mm/g



Abb. 7.19: Vergleich eines gestickten Brakeboosters mit einem Brakebooster aus Aluminium und aus CFK-Prepreg (Quelle: IFB Universität Stuttgart)

die Hauptspannungsrichtungen in einem Bauteil aufgrund der geometrischen Randbedingungen und der aufgetragenen äußeren Lasten berechnet. Mit Hilfe von Optimierungsprogrammen werden ideale Fasereinzellagen berechnet und fertigungsgerecht platziert. Dieses Verfahren kann mit Topologie- und Formoptimierungsverfahren kombiniert werden.

7.4.6 Fiber Patch Preforming

Das Fiber Patch Placement Verfahren (FPP) ist genommen kein textiles Verfahren, sondern den

Fiber Placement Verfahren zuzuordnen. Es soll jedoch kurz beschrieben werden, da es neben der Prepreg-Verarbeitung auch trockene Faserhalbzeuge herstellt und damit das flexibelste Verfahren in Bezug auf die realisierbare Geometrie, Bauteildicke und Faserorientierung ist.

Das Prinzip besteht darin, dass definierte Stücke, sogenannte Patches, vollautomatisch aus einem Faserband geschnitten und mit Hilfe von zwei Robotern und einem flexiblen Patchgreifer schnell und positionsgenau auf komplexe 3D-Formen aufgebracht werden (Abb. 7.20).

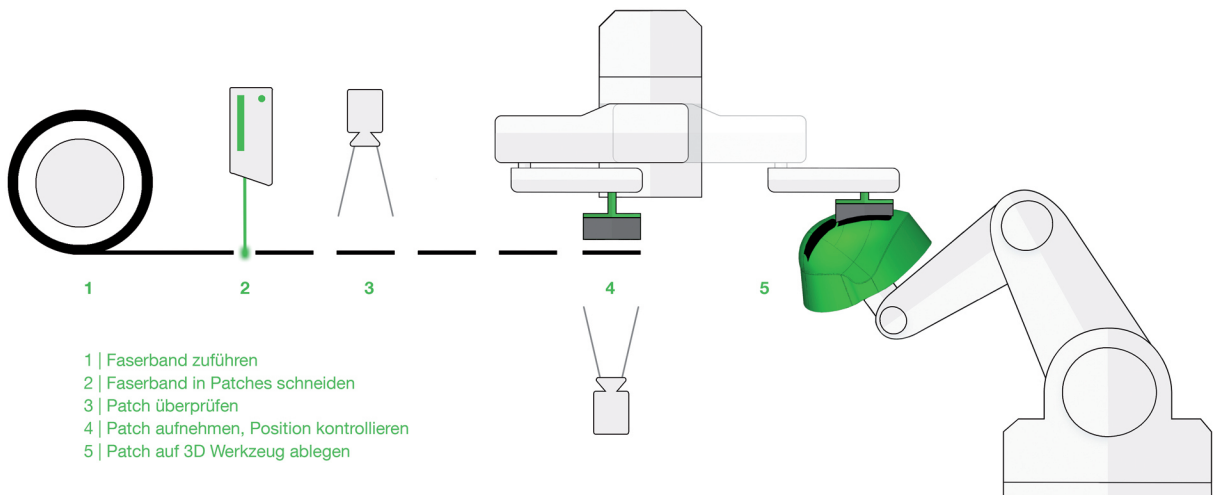


Abb. 7.20: Prinzip des Fiber Patch Placement Verfahrens (Quelle: Cevotec, München 2018)

Sachregister

A

Abrasive Wasserstrahltechnik
- Reparaturverfahren 1125
Abtragen
- Trennen 510
Additive
- Kunststoffe 330
Aluminiumbleche
- Zerteilen 496
Aluminiumdruckguss
- Kleben 887
Aluminiumhalbzeuge 241
Aluminiumlegierungen 230
- gießbar 430
- Trennen und Spanen 243
- Zerspanung 506
Aluminiumwerkstoffe 225
- Anwendungen 249
- Crashsimulation 995
- Fertigung 237
- Lötten 862
Aramidfasern 347
Ausscheidungshärtung
- Aluminiumlegierung 527
Autoklavverfahren 597
Automated Tape Laying (ATL) 593

B

Bake-Hardening-Stähle 205
Bänder, Bleche und Platten
- Aluminium 239
Bauteilauslegung 1026
Bauteilsimulation 959
Bauweisen 66
Bedingungsleichtbau 59
Betriebsfestigkeit 1017
Betriebslastenerfassung - SHM 1096
Betriebslastensimulation 1041
Betriebswirtschaftliche Aspekte 1209
Biegen
- Rohre und Profile 479
Biegeumformung 472

Biologische Vorbilder 1199
Bionik 1189
- Strategien zur Anwendung 1197
Bionische Materialien 1193
Bleche in größeren Dicken
- Stahl 210
Blechformteile 457
Blechhalbzeuge 460
Blechumformung 453
Blitzthermographie
- CFK 1085
Bruchmechanik 972, 981
Bruchverhalten
- FVK 978
Bulk Moulding Compound (BMC) 361

C

CAIRe-Schäftroboter 1121
Carbonfaserhaltige Abfälle 1155
Cash Flow 1223
Closed mouldAusführungen
- (LCM-Technologie) 603
CMC-Werkstoffe 392
- Eigenschaften 395
CMT-Prozess (cold Metal Transfer) 843
ColdArc-Prozess 841
Composite Spray Moulding (CSM) 571
Computer Aided Design (CAD) 77
Computer Aided Engineering CAE 79
Crashverhalten
- FVK 1014
- Metalle 987
- polymere Werkstoffe 1007

D

Delaminationen
- Reparatur 1116
Design for Life Cycle 1175
Differentialbauweise 66
Drähte
- hochfeste Stähle 220
Druckgießverfahren 441

Drucksackverfahren 598
 Dualphasenstähle (DP-, DH-Stähle) 208
 Durchgehender Schaden
 - Reparatur 1137
 Duromere 321
 Duromere Formmassen 569
 Duromerprepregs
 - faserverstärkt 363
 Duroplast-Spritzgießen 550

E

Eigenschaftsänderungen
 - Fertigungsverfahren 515
 Einsatzhärten
 - Stahl 526
 Elastomere 170
 Elastomer-Spritzgießen 550
 Elastomerwerkstoffe 323
 EndofLifeKonzept 1141
 Epoxidharzklebstoffe 877
 Erweiterter Target Weighing Ansatz (ETWA) 137
 Extrusion
 - Kunststoffe 543
 Extrusionsblasformen
 Extrusionsschäumen 554

F

Faser-Direct-Compoundieren (FDC) 578
 Faserverbundwerkstoffe
 - Anwendungen 621
 - Fertigung 567
 - Kleben 893
 Faserverstärkte Kunststoffe 335
 - Anwendungen 373
 - Eigenschaften 369
 - Fertigung 565
 - Prüfverfahren 937
 Faserwickeln 619
 Feinblech
 - Stahl 202
 Feingussverfahren 443
 Feinschneiden 495
 Feinstblech
 - Stahl 199
 FEM-Analyse 83

FEM-Programme 82
 Fertigungsleichtbau 63
 Fertigungsverfahren 421
 Fiber Composite Spraying (FCS) 571
 Fiber Patch Preforming 356
 Finite-Elemente-Methode (FEM) 80
 Flachprodukte
 - Stahl 199
 Fließpressen
 - Direktverfahren 574
 - langfaserverstärkte Thermoplastgranulate 580
 - SMC 573
 - Thermoplaste 580, 581
 Flüssigharz-Imprägnierverfahren 601
 Footprinting-Methoden 1173
 Formfaktor
 - Werkstoffauswahl 187
 Formgießen
 - Aluminium 237
 Formleichtbau 62
 Formoptimierung 94
 - CAD-basiert 94
 - FE-Netz basiert 95
 - mit Sicken 102
 Fräsen
 - Reparaturverfahren 1121
 Free-Size-Optimierung 108
 Fügen
 - Aluminiumwerkstoffe 244
 - Magnesiumwerkstoffe 273
 - Titanwerkstoffe 296
 Fügeverbindungen
 - Crashesimulation 1001
 Füllstoffe
 - Kunststoffe 330
 Funkenerosives Abtragen 511
 Funktion-Aufwand-Matrix 139
 Funktionsintegration
 - Entwicklung 1046
 Funktionssemantische Methode (FSM) 43
 Fuzzy-Stage-Gate-Ansatz 15

G

Ganzheitliche Bilanzierung 1163
 Gasinnendrucktechnik (GIT) 552

Geflechte
 - für FVK 353
 Gefügegradienten einstellen 534
 Gelege
 - FVK 352
 Geschäumte Polymere 326
 Gesticke
 - FVK 354
 Gesenkschmieden 471
 Gewebe
 - FVK 351
 Gewichtseinsparung
 - Grundsätze 245
 Gewichtsreduzierung 113
 - SHM 1102
 Gießen
 - Metalle 427
 Gießereitechnik 428, 433
 Gläser 171
 Glasfasen 343
 Gologanu-Modell 975
 Gussbauteil 427
 Gusseisenwerkstoffe 431
 Gusslegierungen
 - Aluminium 230, 236

H

Haftung
 - Matrix und Faser 371
 Halbharte Schaumstoffe 328
 Halbzeugherstellung
 - Titanwerkstoffe 303
 Handlaminieretechnik 585
 Härbarkeit
 - Stahl 524
 Härten 520
 - Aluminiumlegierungen 527
 - Titanlegierungen 532
 Harte Schaumstoffe 328
 Harzimpregierverfahren (LCM-Technologie) 605
 Heizpressenverfahren 598
 Herstellkosten 1213
 HLFVWHalbzeuge 626
 Hochdruckinjektionsverfahrens (Hochdruck-
 RTM) 607

Hochleistungspolymere 320
 HSLA-Stähle Siehe Mikrolegierte Stähle
 Hybridbauweisen
 - Blechhalbzeuge 460
 Hybride kontinuierlich faserverstärkte Thermo-
 plaste
 - Fertigung 627
 Hybride Werkstoffverbunde 403
 - Gießverfahren 432
 Hybridfügen 909
 Hybridisierung 407
 Hybridkonzepte
 - leichtbaurelevant 409

I/J

IF-Stähle 207
 In-Line-Compoundieren 578
 Input-Output-Ökobilanz 1171
 Inspektion
 - SHM 1105
 Integralbauweise 66
 Integriertes Produktentstehungsmodell (iPEM)
 20
 Investitionsrechnung 1213
 - Beispiel 1226
 JectbondingTechnologie
 - Kunststoffe 547

K

Keilschneiden 495
 Keramiken 170
 Keramische Verbundwerkstoffe 391
 Keramische Werkstoffe
 - Systemleichtbau 158
 Klebbarkeit
 - Leichtbauwerkstoffe 879
 Kleben 869
 - Beispiele 903
 - und Schrauben 919
 Klebstoffe 877
 Klebverbindungen
 - Berechnung 895
 Knetlegierungen
 - Aluminium 230
 Kohlenstofffasern 344

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
 - ZfP 1083
 Kontinuierlich faserverstärkte Duromere
 - Fertigung 585
 Kontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste 623
 Konzeptleichtbau 60
 Korrosionsschutz
 - Magnesium 267
 Kostenmodell
 - CFK- vs. Blechbauteil 1218
 - Herstellkosten 1214
 Kraftverformungskurven
 - Hybride 410
 Künstliche Intelligenz 37
 Kunststoffe 309
 - faserverstärkt 335
 - Kleben 892
 - Verarbeitung 539
 Kunststoff-Holz-Hybride 416
 Kunststoff-Keramik-Hybride 415
 Kunststoff-Kunststoff-Hybride 412
 Kunststoff-Metall-Hybride 409

L

Lackierte Bleche
 - Kleben 890
 Laminierprozess 587
 Laserbasiertes Schäften 1127
 Laserbearbeitung 510
 Lastenermittlung 127
 Lastenheft 1027
 LCM-Technologien 601
 Lebenszyklusanalyse 1167
 Leichtbau
 - versus Kosten 63
 Leichtbaukonstruktionen
 - Anforderungen 55
 Leichtbaustrategie
 - Bauweise 53
 Leichte Produkte
 - funktionsbasierte Entwicklung 133
 Leichtmetalldruckguss
 - Schweißen 847
 Legierungselemente
 - Einfluss auf Magnesium 261

LFTD Technologie 582
 Long Fiber Injection (LFI) 572
 Lösungsglühn 527
 Lötten 856

M

Magnesiumbleche
 - Zerteilen 497
 Magnesiumlegierungen 260
 - Anwendungen 274
 - Kleben 890
 - Zerspanung 505
 Magnesiumwerkstoffe
 - Crashsimulation 995
 - gießbare 429
 - Lötten 862
 Maraging-Stähle 222
 Martensitische Stähle (MS-Stähle) 209
 Martensitische Umwandlung 520
 Massivumformung 462
 Matten und Vliese
 - FVK 350
 Mechanische Fügungen
 - ZfP 1082
 Mehrkomponentenspritzgießen
 - Kunststoffe 551
 Metallschutzgasschweißen 830
 Micro-MIG-Prozess 844
 Mikrolegierte Stähle (HSLA-Stähle) 207
 Mikromagnetische Inline-Bestimmung
 - Festigkeit 1070
 Mischverbindungen
 - Lötten 863
 Modellbasierte Systementwicklung (MBSE) 145
 Modulbauweise 67
 Monolithische Keramik 387
 MSG-Schweißen 836
 MuCell-Verfahren
 - Kunststoffe 553
 Multi-Kaskaden Spritzgießen 607
 Multiparameter-Konzept 3MA 1069

N

Nachhaltigkeit 1163, 1167, 1178
 Nachhaltigkeitsorientierung 1145

- Nähtechnologie
 - Faserverstärkung 357
 Nasspress-Verfahren 609
 Naturfasern 348
 Nibbeln 496
 Nichtoxidische CMC-Werkstoffe 393
 Niederdruck-Kokillengießverfahren 440
 Nitrieren
 - Stahl 526
- O**
- Oberflächenbehandlung
 - Aluminium 243
 - Magnesium 268
 - Titanwerkstoffe 301
 - zum Kleben 879
 Oberflächenschutz
 - Reparaturverfahren 1115
 Ökobilanz 1169
 Ökologischen Beurteilung 1173
 Open mouldAusführung (LCM-Technologie)
 604
 Organobleche 625
- P**
- Parameteroptimierung 107
 Partikelschäumen 554
 Patchherstellung 1132
 Physikalische Prüfverfahren
 - FVK 939
 Plastizitätsmodelle 963
 Ply-Stack-Optimierung 109
 Polymere 171
 Polyurethan
 - Fasersprühen 570
 Polyurethanschäumen 556
 Prepreg
 - imprägnierte Halbzeuge 359
 Prepreg-Technologien 590
 Pressen
 - Kunststoffe 558
 Pressformen 214
 Presshärten
 - Blechformteile 458
 Produktentstehung 5
 Produktentstehungsprozess
 - Modellierung 9
 - Validierung 153
 Produktentwicklung 9
 - virtuelle 73
 Profildbiegeverfahren 481
 Prüfung
 - Ausgangswerkstoffe 1067
 Pultrusion 617
 Punktschweißkleben 1003
- Q**
- Qualitätssicherung 925
 Qualitätssicherungsmaßnahmen 931
 - Bauwesen 935
- R**
- Rechnergestützte Methoden
 - Systemleichtbau 123
 Recycling
 - Aluminium 249
 - chemische Verfahren 1154
 - FVK 1151
 - Leichtbauwerkstoffe 1148
 - mechanische Verfahren 1152
 - Stahl 224
 - thermische Verfahren 1153
 - Titanwerkstoffe 302
 Recyclingfähigkeit 1141
 Reibelementschweißen 922
 Reibschweißen 833
 Reinforced-Reaction Injection Moulding (R-
 RIM) 570
 Reparaturen
 - FVK-Strukturen 1113
 Reparaturkonzepte
 - FVK 1109
 Reparaturmöglichkeiten
 - Aluminium 245
 Reparaturverfahren
 - monolithische Werkstoffe 1115
 Resin Infusion (RI) 615
 Resin Liquid Infusion (RLI) 615
 Resin Transfer Moulding (RTM)-Verfahren 606
 Ressourcenverbrauch 1180

Rheologische Prüfverfahren
 - FVK 938
 Rohr- und Profilextrusion
 - Kunststoffe 544
 Rotationsformen
 - Kunststoffe 560
 RTM-Verfahren (LCM-Technologie) 606
 Rührreischweißen 834

S

Sandwichstrukturen
 - Reparatur 1135
 Sandwichverbunde 407
 Schäden
 - FVK-Strukturen 1113
 Schadensakkumulation 1044
 Schadensdetektion 1091
 Schädigungsmodelle 972
 Schäften
 - Reparaturverfahren 1118
 Schäumverfahren 554
 Schleifen 509
 - Reparaturverfahren 1116
 Schmieden 470
 Schmiedestücke
 - Stähle für 217
 Schneidstoffe 500
 Schrauben
 - und Kleben 919
 Schweißen 825
 Schwerkraftguss 436
 Schwerkraftsandguss 439
 SHM-Methoden 1094
 Sickenbilder 104
 Siliciumnitrid
 - Anwendung 390
 Size-Optimierung 109
 SPALTEN
 - Produktentstehungsprozess 24
 Spanen
 - Trennen 498
 Spritzgießen
 - faserverstärkte Thermoplaste 576
 - Kunststoffe 547
 Stage-Gate-Modell von Cooper 15

Stahlbleche
 - Kleben 881
 Stähle
 - gießbar 431
 - höchstfeste 221
 - Lötten 859
 - Maraging-Stähle 222
 Standardkunststoffe 319
 Stanzen 495
 Stoffeigenschaften ändern 517
 Stoffleichtbau 61
 Strangpressen 463
 Strangpressprofile
 - Aluminium 239
 Structural Component Spraying (SCS) 572
 Structural Health Monitoring (SHM) 1093
 Strukturkeramik 387
 Strukturoptimierung 87
 - SHM 1099
 Strukturwerkstoffe, mittelfeste
 - Aluminium 233
 Systemleichtbau 113
 Systemtechnik
 - Produktentstehung 12

T

Tapelegetechnologien 623
 Technische Keramik 383
 - Anwendungen 390
 Technology Intelligence 37
 Textile Halbzeuge
 - für FVK 350
 Text-Mining-Systeme 49
 Texturmodelle 967
 Thermische Eigenschaften 949
 Thermisches Fügen 823, 869
 Thermischmechanische Fügeverfahren 920
 Thermochemische Verfahren
 - Stahlumwandlung 526
 Thermographie
 - FVK 1074
 Thermomechanisches Behandeln
 - Titanlegierungen 532
 Thermoplaste 316
 - faserverstärkt 365

- mechanische Eigenschaften 1009
- Thermoplastische Elastomere (TPE) 325
- Thermoplast-Spritzgießen 548
- Tiefziehen
 - Kunststoffe 559
- Titanbleche
 - Zerteilen 498
- Titanlegierungen 286
 - Eigenschaften 289
 - Formguss 430
 - Kleben 890
 - Zerspanung 501
- Titanwerkstoffe 281
 - Lötten 863
 - Verarbeitung 293
- Topologieoptimierung 87
- Trennen
 - faserverstärkte Kunststoffe 633
 - Fertigungsverfahren 491
 - und Spanen 243
- TRIP-Stähle 209
 - Crashsimulation 998

U

- Ultraschallprüfung
 - FVK 1073
- Umformen
 - Magnesium 272
 - Metalle 449
 - Titanwerkstoffe 300
- Umformverfahren 451
- Urformen 425
 - Aluminium 237
 - Magnesium 271
 - Metalle 423

V

- Vakuuminfusionsverfahren 609
- Vakuumsackverfahren 598
- VAP-Verfahren 612
- VARI-Verfahren 611
- VARTM-Verfahren 609
- Verbundbauweise 68
- Verbundwerkstoffe 172, 405
 - Prinzip 339

- ZfP 1078
- Verbundstrangpressen 469
- Verfestigungsstrahlen 519
- Verfestigte Werkstoffe
 - Schweißen 849
- Vergütungsstähle 525
 - höchstfeste 221
- Vernetzte Polyurethane 321
- Versagensformen
 - Beispiele 1029
- Versagensmodelle 972
 - Crashsimulation 992
- Verstärkungsfasern
 - für Keramik 392
 - für Kunststoffe 343
- Virtuelle Produktentwicklung 73
- V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 16
- von Mises-Modell 964

W

- Walzprofilieren 475
- Wärmebehandlung 520
- Wasserstrahlschneiden 508
- Weichelastische Schaumstoffe 327
- Werkstoffauswahl
 - Diagramme 183
 - Leichtbau 167
 - Werkstoffindices 177
- Werkstoffe
 - Eigenschaften 169
- Werkstoffindices
 - leichtbaurelevant 181
 - Werkstoffauswahl 177
- Werkstoffverbund 405
- Werkstoffverbunde
 - Aluminium 240
 - ZfP 1078

Z

- Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder 522
- Zerspanen 498
- Zerstörungsfreie Prüfung 1063
 - FVK 1072
- Zerteilen 495