

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
	Literatur.....	3
<b>2</b>	<b>Einordnung gebräuchlicher Trennverfahren</b> <b>zur Bearbeitung von Faserverbundkunststoffen</b> .....	<b>5</b>
	Literatur.....	8
<b>3</b>	<b>CFK und artverwandte Faserverbundkunststoffe</b> .....	<b>9</b>
3.1	Markt und industrielle Anwendungen .....	10
3.2	Aufbau und bearbeitungsrelevante Eigenschaften von CFK- und FVK-Werkstoffen und -Bauteilen .....	12
3.3	Beschreibung des Werkstoffverhaltens .....	19
3.3.1	Mechanisches Verhalten und Modellierung.....	19
3.3.2	Thermisches Verhalten und Modellierung.....	25
	Literatur.....	25
<b>4</b>	<b>Grundlagen und Modelle der spanenden Bearbeitung</b> <b>von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe</b> .....	<b>27</b>
4.1	Grundbegriffe in der spanenden Bearbeitung .....	27
4.2	Geometrische und kinematische Grundlagen der spanenden Bearbeitung orthotroper Faserverbundwerkstoffe .....	30
4.2.1	Definition orthogonaler Zerspanvorgänge .....	30
4.2.2	Spanende Bearbeitung im schrägen Schnitt: Eingriffsverhältnisse und Kinematik .....	31
4.2.3	Basissystem aus Schneideneingriff und Kinematik im schrägen Schnitt unidirektionaler Faserverbundkunststoffe ...	44
4.3	Grundlagen der spanenden Verfahren: Schneideneingriff und Kinematik .....	45
4.3.1	Eingriffsverhältnisse und Kinematik beim Umfangsfräsen und -schleifen mit Schaftwerkzeugen .....	45

4.3.2	Eingriffsverhältnisse und Kinematik beim Scheibenfräsen und Kreissägen sowie beim Schleifen mit Trennscheiben.....	48
4.3.3	Eingriffsverhältnisse und Kinematik bei Bohr- und Schleifbohrverfahren .....	50
4.4	Technologische Grundlagen der spanenden Bearbeitung .....	54
4.4.1	Trennmechanismus im $\theta$ -Orthogonalschnitt .....	54
4.4.2	Spanpartikel und Emissionen.....	57
4.4.3	Kräfte, Temperaturen und Leistungen im Zerspanprozess mit definierter Schneide.....	62
4.4.4	Grundlagen des Werkzeugverschleißes .....	80
4.4.5	Qualitätsmerkmale .....	91
4.5	Einordnung der trennenden Fertigungsverfahren mit undefinierten Schneiden: Wirkprinzipien und Verfahren .....	110
4.6	Grundlagen der Zerspanung mit undefinierter Schneide .....	110
4.6.1	Trennmechanismus .....	110
4.6.2	Kräfte, Energien, Leistungen und Temperaturen .....	112
4.6.3	Grundlagen des Werkzeugverschleißes .....	117
4.6.4	Grundlagen der Werkstückqualität.....	119
4.7	Messverfahren .....	123
4.7.1	Verfahren zur Charakterisierung spanender Bearbeitungsprozesse und der erzeugten Bauteilqualität.....	123
4.7.2	Beurteilung von Emissionen .....	129
Literatur.	.....	133
<b>5</b>	<b>Technologien zur Zerspanung von CFK, artverwandter Faserverbundkunststoffe und hybrider Schichtverbunde .....</b>	<b>139</b>
5.1	Zerspanbarkeit .....	140
5.1.1	Einflussgrößen auf die Zerspanbarkeit.....	141
5.1.2	Einfluss auf Zerspankräfte, -energien und Temperaturen .....	143
5.1.3	Einfluss auf Werkzeugverschleiß und Schneidhaltigkeit.....	144
5.1.4	Einfluss auf entstehende Spanpartikel und Emissionen.....	146
5.1.5	Einfluss auf die erreichbare Bauteilqualität.....	150
5.1.6	Zusammenfassende Beurteilung der Zerspanbarkeit.....	155
5.2	Schneidstoffe und Beschichtungen .....	158
5.2.1	Schneidstoffe .....	158
5.2.2	Beschichtungen .....	164
5.3	Fräsen .....	169
5.3.1	Umfangsfräsen .....	169
5.3.2	Stirnfräsen .....	188
5.3.3	Sägen und Scheibenfräsen .....	192
5.4	Bohren mit axialer Vorschubbewegung .....	194
5.4.1	Prozesskenngrößen.....	194
5.4.2	Werkzeugverschleiß.....	201

---

5.4.3	Bauteilqualität . . . . .	202
5.4.4	Prozess- und Werkzeuggestaltung . . . . .	219
5.5	Bohren hybrider Schichtverbunde und Werkstoffe . . . . .	222
5.5.1	Zerspanbarkeit von Leichtmetalllegierungen. . . . .	223
5.5.2	Technologische Grundlagen zum Bohren von Leichtmetalllegierungen. . . . .	224
5.5.3	Wirkmechanismen beim Bohren hybrider Schichtverbunde und Werkstoffe . . . . .	239
5.5.4	Werkzeug- und Prozessgestaltung zum Bohren in hybride Schichtverbunde . . . . .	246
5.5.5	Orbitalbohren von CFK und hybriden Schichtverbunden . . . . .	249
5.5.6	Schwingungsunterstütztes Bohren. . . . .	258
Literatur. . . . .		269
<b>6</b>	<b>Technologien zur Zerspanung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe mit undefinierter Schneide . . . . .</b>	<b>277</b>
6.1	Übersicht der gebräuchlichen Schleiftechnologien . . . . .	277
6.2	Werkzeug- und Prozessgestaltung zum Trennschleifen mit Schleifstiften . . . . .	278
6.3	Werkzeug- und Prozessgestaltung zum Trennschleifen mit Schleifscheiben . . . . .	281
6.3.1	Trennschleifen mit geraden Schleifscheiben . . . . .	281
6.3.2	Gekurvtes Trennschleifen gekrümmter Bauteilkonturen . . . . .	284
Literatur. . . . .		287
<b>7</b>	<b>Zusatzeinrichtungen zur Zerspanung von CFK, artverwandter Faserverbundkunststoffe und hybrider Schichtverbunde . . . . .</b>	<b>289</b>
7.1	Kühlschmiertechnologien und -medien . . . . .	289
7.2	Arbeits- und Anlagenschutz in der spanenden Bearbeitung . . . . .	296
7.3	Grundlagen und Systeme zur Entstaubung . . . . .	297
Literatur. . . . .		303
<b>8</b>	<b>Grundlagen und Modelle der Hochdruck-Wasserstrahl- und Hochdruck-Abrasivwasserstrahlbearbeitung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe . . . . .</b>	<b>305</b>
8.1	Hochdruck-Wasserstrahl und Hochdruck-Abrasivwasserstrahl: Erzeugung und Charakterisierung . . . . .	305
8.1.1	Hochdruck-Wasserstrahl: Erzeugung und Charakterisierung . . . . .	306
8.1.2	Hochdruck-Abrasivwasserstrahl: Erzeugung nach dem Injektorprinzip und Strahlcharakterisierung . . . . .	308

8.2	Kräfte und Leistungen bei der Hochdruck-Abrasivwasserstrahlbearbeitung .....	312
8.3	Trennmechanismus bei der Hochdruck-Abrasivwasserstrahlbearbeitung .....	315
8.4	Verschleiß von Systemkomponenten und Medienverbrauch bei der Hochdruck-Abrasivwasserstrahlbearbeitung nach dem Injektorprinzip .....	317
8.4.1	Verschleiß des Abrasivmediums .....	318
8.4.2	Verschleiß der Hochdruckdüse, des Fokussierrohrs und bei der Reststrahlabsorption .....	319
8.5	Werkstückqualität bei der Hochdruck-Abrasivwasserstrahlbearbeitung .....	322
8.5.1	Schnittkantenqualität .....	323
8.5.2	Oberflächengüte der Schnittfläche .....	325
8.5.3	Randzonenausbildung und Auswirkung auf die Betriebsfestigkeit .....	326
8.5.4	Präzision der Schnittfuge .....	329
	Literatur .....	332
<b>9</b>	<b>Technologien zur Hochdruck-Wasserstrahl- und Hochdruck-Abrasivwasserstrahlbearbeitung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe .....</b>	<b>335</b>
9.1	Übersicht der Wasserstrahltechnologien: Einteilung und Verfahrensvarianten .....	336
9.2	Umfangs- und Konturbearbeitung mit Injektor-Hochdruck-Abrasivwasserstrahlen .....	339
9.2.1	Einfluss des Werkstoffs auf erreichbare Produktivität und Präzision .....	339
9.2.2	Prozessauslegung zum Schneiden .....	342
9.3	Zusatzeinrichtungen zur Bearbeitung mit Hochdruck-Abrasivwasserstrahl und zum Emissionsschutz .....	347
9.3.1	Einrichtungen zur Absorption der Restenergie des Hochdruckstrahls .....	347
9.3.2	Schallemission bei der Hochdruck-Wasserstrahlbearbeitung und Emissionsschutz .....	348
	Literatur .....	348
<b>10</b>	<b>Laserstrahlbearbeitung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe .....</b>	<b>351</b>
10.1	Grundlagen und Modelle der Lasertechnik .....	352
10.1.1	Grundbegriffe der Lasertechnik .....	352
10.1.2	Strahlformung, Strahlfokussierung und Strahlführung zur Laserstrahlbearbeitung .....	357

10.1.3	Energieeinkopplung von Laserstrahlung und Wärmeleitung . . . . .	359
10.1.4	Zeitliche und energetische Kenngrößen bei der Laserstrahlbearbeitung . . . . .	362
10.1.5	Abtragsmechanismen bei der Laserstrahlbearbeitung . . . . .	363
10.1.6	Einfluss der Laserstrahlbearbeitung auf die Bauteilqualität . . . . .	369
10.2	Bearbeitbarkeit von Faserverbundkunststoffen . . . . .	373
10.3	Technologien und Verfahrensvarianten . . . . .	377
10.4	Arbeitsschutz . . . . .	383
	Literatur. . . . .	385
<b>11</b>	<b>Hybride Bearbeitungsverfahren für CFK und artverwandte Faserverbundkunststoffe . . . . .</b>	<b>389</b>
11.1	Hybride Bearbeitung mittels Laser- und Hochdruck-Wasserstrahl . . . . .	389
11.2	Hybride Bearbeitung mittels Zerspanverfahren und Laserstrahl . . . . .	391
	Literatur. . . . .	394
<b>12</b>	<b>Scherschneiden von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe . . . . .</b>	<b>395</b>
	Literatur. . . . .	398
	<b>Stichwortverzeichnis. . . . .</b>	<b>401</b>