



Wolfgang Hintze

CFK-Bearbeitung

Trenntechnologien für
Faserverbundkunststoffe und den hybriden
Leichtbau

 Springer Vieweg

CFK-Bearbeitung

Wolfgang Hintze

CFK-Bearbeitung

Trenntechnologien für
Faserverbundkunststoffe
und den hybriden Leichtbau

Wolfgang Hintze
Institut für Produktionsmanagement
und -technik, TU Hamburg
Hamburg, Deutschland

ISBN 978-3-662-63264-2 ISBN 978-3-662-63265-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63265-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021, korrigierte Publikation 2021
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Eric Blaschke

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Die pflanzliche, tierische und menschliche Natur liefert vielfältige Belege dafür, dass biogene Faserverbundstrukturen vorteilhafte Eigenschaftsprofile besitzen. Evolutionär abgesichert dienen sie als Vorbild bei der technischen Gestaltung von Strukturbauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK). Dabei werden unterschiedliche Werkstoffgattungen derart kombiniert, dass sich die besonders guten Eigenschaften (mechanisch, thermisch, physikalisch, chemisch, ...) der einzelnen Werkstoffe optimal nutzen lassen, während die nachteiligen komplementär ausgeglichen werden. Endlos faserverstärkte Kunststoffe bieten verglichen mit mehrphasigen quasi-isotropen Werkstoffen zudem den Vorteil, dass durch die Anisotropie im textilen Aufbau Strukturbauteile mit richtungsabhängigen Eigenschaften individuell gestaltbar sind.

Die Produktion von Bauteilen orientiert sich stets daran, Kosten- und Produktivitätsziele nach vorgegebenen Qualitätskriterien, Terminen und Mengengerüsten bestmöglich zu erfüllen. Dabei sind vorhandene oder zu beschaffende Produktionsfaktoren wie Personal, Anlagen, Gebäude und Infrastruktur zu berücksichtigen. Die komplementären Funktionseigenschaften der in einem FVK kombinierten Werkstoffe gehen meist einher mit einer gegensätzlichen Bearbeitbarkeit. Diese allein stellt eine besondere Herausforderung für die effiziente Bauteilproduktion dar, die durch den zusätzlichen Freiheitsgrad der bauteilspezifisch optimierten Faseranordnung noch gesteigert wird.

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) als prominenter Hochleistungswerkstoff für Anwendungen im Strukturleichtbau vereint in exemplarischer Weise funktionale Vorteile mit den Herausforderungen der Bauteilproduktion. Damit CFK-Bauteile die konstruierten Funktionseigenschaften zuverlässig erreichen, müssen die vorgegebenen Qualitätsanforderungen strikt eingehalten werden, andernfalls können gravierende Risiken auftreten.

Die Bearbeitung von CFK-Bauteilen im konsolidierten Zustand erfolgt im fortgeschrittenen Stadium der Fertigungsprozesskette auf einer hohen Wertschöpfungsstufe. Ihr kommt im Hinblick auf die Erfüllung der Qualitätsanforderungen sowie die damit verbundenen Herstellkosten eine wesentliche Rolle zu. Nur wenn CFK-Bauteile durch funktionale Vorteile einen Mehrwert bieten und die Herstellkosten dadurch zu rechtfertigen sind, können sie gegenüber alternativen Leichtbaukonzepten am Markt bestehen.

Es ist das Anliegen dieses Buches, für die Bearbeitung von CFK und artverwandten Faserverbundkunststoffen dem Leserkreis aus Industrie, Forschung und Lehre einen Leitfaden an die Hand zu geben, mit dem sich neue Bearbeitungsaufgaben methodisch planen, Bearbeitungsprozesse fundiert auslegen und optimieren sowie Bearbeitungsprobleme systematisch lösen lassen.

Bekanntlich werden durch die Konzeption von Bearbeitungsanlagen und die Technologieauswahl in der Produktionsplanung die Herstellkosten neuer Produkte langfristig festgelegt. Dies gilt auch für CFK-Bauteile und erfordert fundierte Kenntnisse der technologischen Alternativen. Deshalb werden alle zur Bearbeitung von CFK-Bauteilen industriell relevanten Zerspanungs- und Strahltechnologien mit ihren Anwendungsschwerpunkten und -grenzen behandelt und der jeweils erforderliche Aufwand für Anlagen, Betriebsstoffe und Arbeitsschutz aufgezeigt.

Das Buch vermittelt gleichermaßen die von der 1980er Jahren bis heute in der Forschung erarbeiteten Grundlagen der verschiedenen CFK-Bearbeitungstechnologien wie auch die in jüngerer Zeit in Zusammenarbeit mit der Luftfahrt-, Automobil-, Werkzeug- und Werkzeugmaschinenindustrie entwickelten Bearbeitungslösungen. Diese können zudem als methodischer Leitfaden dienen, wenn für neuartige Faserverbundwerkstoffe z. B. auf der Basis natürlich gewonnener Fasern und Harze oder für faserverstärkte hybride Leichtbauwerkstoffe effiziente Bearbeitungslösungen zu entwickeln sind. Physikalisch basierte Modelle und ein grundlegendes Verständnis der potenziell in Frage kommenden Technologien bleiben dabei unverzichtbar, auch wenn zukünftig in der Entwicklung zunehmend auf umfangreiche digitale Produkt- und Prozessdaten zurückgegriffen werden kann sowie verstärkt Methoden der numerischen Simulation und des Maschinellen Lernens zum Einsatz kommen.

Für die redaktionelle Unterstützung bei der Manuskripterstellung und die kritische Durchsicht des Buchmanuskriptes sei Herrn Dr. Carsten Möller gedankt, Herr Falko Kähler, M.Sc. unterstützte mich bei der Anfertigung der Abbildungen. Langjährig haben meine wissenschaftlichen Mitarbeiter durch ihre Forschung zum vorliegenden Buch beigetragen, wobei ich besonders die Herren Melchior Blümm, M.Sc., Dr. Felix Brüggemann, Dr. Marcel Cordes, Dr. Frank Dose, Dr. Tobias Geis, Dr. Dominik Griefahn, Dr. Dirk Hartmann, Dr. Jörg Kindler, Dr. Christian Klingelhöller, Dr. Gregor Körkel, Dr. Simon Kothe, Lars Köttner, M. Sc., Jan Mehnen, M. Sc., Dr. Christoph Schütte, Dipl.-Ing. Stefan Steinbach und Prof. Dr. Enno Stöver hervorheben möchte.

Den Leserinnen und Lesern des Buches wünsche ich, dass sie aus der Lektüre einen Nutzen für ihre Arbeit ziehen, über Anregungen und ggf. Korrekturhinweise würde ich mich freuen.

Formelzeichen und Abkürzungen

Die Anzahl an Kurzzeichen bedingt eine Mehrfachverwendung, um möglichst genormten Begriffen bzw. dem etablierten Sprachgebrauch der dargestellten Technologien zu folgen. Zur Orientierung sind die teils mehrdeutig verwendeten Formelzeichen und Indizes mit den Kapiteln ihres Vorkommens aufgeführt.

Formelzeichen

Großbuchstaben

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
A	mm	Amplitude	5
A	mm ²	Spanungsquerschnitt	4...5
\dot{A}	mm ² /s	Flächenrate	5, 9
A _{WS}	%	Absorptionsgrad des Werkstückmaterials	10
A ₅	%	Bruchdehnung einer Zugprobe	5
C _T	m/min	Verschleißkonstante, Minutenschnittgeschwindigkeit	5
C _V	–	Konstante des Taylor-Verschleißmodells	5
C _{ply}	–	Gleichförmigkeitsfaktor des Laminataufbaus	5
D _{LF}	mm	Durchmesser des Laserstrahls auf der Linse	10
E	GPa	Elastizitätsmodul	3...5, 8...9
E	J	Energie	5
F	N	Kraft	4...6, 8, 12
F	N	Zerspankraft	4...7, 11
F _L	J/mm ²	Fluenz	10
F _{Lf}	–	Fokussierzahl, Öffnungsverhältnis der Linse	10
F _{L0}	J/mm ²	Schwellfluenz	10
F _i	N	Kraftkomponente in Richtung, i = c, f, p, a, n, r, t, ⊥,	4...7

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
G	MPa	Energiefreisetzungsrate	4...5
G	kN/mm ²	Schubmodul	3
I _{L0}	kW/mm ²	Schwellintensität bei der Laserbearbeitung	10
I _i	kW/mm ²	Intensität, Strahlungsintensität, i = L, WJ, AWJ	8, 10
K _A	µm/m ³	Kennwert für alveolengängigen Staub	4...5
K _E	µm/m ³	Kennwert für einatembaren Staub	4...5
K _{IC}	MPam ^{1/2}	Bruchzähigkeit	4...5
K _L	–	Strahlkennzahl	10
K _P	Partikel/l	Partikelkonzentration	4...5, 10
K _{i,c}	N/mm ²	Scherkraftkoeffizient, i = a, r, t	5
K _{i,e}	N/mm	Reibkraftkoeffizient, i = a, r, t	5
M	Nm	Biegesteifigkeit Laminatschicht	5
M _c	Nm	Schnittmoment	4...5, 7
M _L ²	–	Beugungsmaßzahl, Modenfaktor	10
M _{WZ}	mm	Übermittenstand der Schneiden	4...5
M _r	Nm	Reibmoment	5, 7
N	–	Lastspielzahl	4, 8
N _P	–	Pulszahl	10
N _{SC}	–	Belichtungsanzahl bei Mehrfachbelichtungen	10
P		Betrachteter Schneidenpunkt	4
P	–	Ebene	4
P	kW	Leistung	4...6, 8...11
P	kW	Zerspanleistung	5...6
P _A	kW	Absorbierter Anteil der Laserleitung	10
P _{AJ}	kW	Strahlleistung des Abrasivmediums	8
P _L	kW	Leistung des Laserstrahls	10, 11
P _L ^{''}	kW/mm ²	Leistungsdichte des Laserstrahls	10
P _V	kW	Thermischer Leistungsverlust	10
P _{WJ}	kW	Leistung des Wasserstrahls	8
P _{WS,V,ges}	kW	Erforderliche Leistung zur vollständigen Verdampfung	10
P _c	kW	Schnittleistung, Schleifleistung	4
P _{ch}	kW	Leistungsanteil durch exotherme Reaktion	10
P _µ	kW	Reibleistung	4
Q	kW	Wärmestrom, -leistung, Gesamtwärmestrom	4...5
Q _w	mm ³ /min	Zeitspanvolumen	4...5
Q _i	kW	Anteiliger Wärmestrom, i = WS, WZ, ch, γ, φ	4...5

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
R	–	Massenstromverhältnis	8...9
R _p	µg/m ³	Partikeldichte im Luftvolumen	4...5, 7
R _{WS}	–	Reflexionsgrad	10
R _m	N/mm ²	Zugfestigkeit eines duktilen Werkstoffs	5
R _{p0,2}	N/mm ²	Streckgrenze eines duktilen Werkstoffs	5
R _⊥	N/mm ²	Festigkeitsparameter des Puck-Modells	3
R ^A	N/mm ²	Bruchwiderstand der Wirkebene des Puck-Modells	3
R _a	µm	Arithmetischer Mittenrauwert	5, 8, 10
Re	–	Reynoldszahl	7...8
R _{kin}	µm	Kinematische Rauheit	5
R _t	µm	Maximale Rautiefe	4...6, 8
R _{th}	µm	Theoretische Rauheit	4...5
R _z	µm	Gemittelte Rautiefe	4...5
S	–	Inkubationskoeffizient	10
S _L	kJ/m	Strahlenergie	10
SMW	Mesh	Siebmaschenweite	8...9
SPP	mm mrad	Strahlparameterprodukt	10
SV _γ	µm	Schneidkantenversatz in Spanflächenrichtung	4...5
S _a	µm	Flächenrauwert	6, 10
T	min	Standzeit	5
T	°C	Temperatur, Wirkstellentemperatur	3...5, 7
T		Transformationsmatrix	3
T _G	°C	Glasübergangstemperatur	3...5, 7, 10
T _S	°C	Schmelztemperatur	3...5, 10
T _V	°C	Verdampfungstemperatur	10
T _{WS}	%	Transmissionsgrad	10
T _{WS}	°C	Werkstücktemperatur	4...5
T _{WZ}	°C	Werkzeugtemperatur, Schneidentemperatur	4...5
T _Z	°C	Zersetzungstemperatur	4...5
T _{ch}	°C	Spantemperatur	5
T _{cs}	°C	Schnittflächentemperatur	4
Ü _K	µm	Kornüberstand	4, 6
Ḃ	m ³ /h	Luftvolumenstrom der Staubabsaugung	7
V _w	cm ³	Zerspantes Volumen, Zerspanvolumen	4...6
Ḃ _{WS}	cm ³ /min	Volumenstrom des abgesaugten Werkstoffs	10

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
VB	mm	Verschleißmarkenbreite	4...5
W	J	Eingebrachte Gesamtenergie bei der Zerspanung	5
W_{OB}	–	Volumenverhältnis beim Orbitalbohren	5
ZI_E	–	Emissionsindex	5
ZI_V	–	Werkzeugverschleißindex	5

Kleinbuchstaben

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit	4, 10
a_{OB}	m/s^2	Radialbeschleunigung beim Orbitalbohren	5
a_e	mm	Arbeitseingriff, Bahnabstand	4...5, 10
a_p	mm	Schnittbreite, Schnitttiefe	4...5
b	mm	Spanungsbreite	4...5
b_K	μm	Einzelkornspanungsbreite	6
b_{WEZ}	μm	Thermische Schädigungstiefe	10
b_{WS}	$Ws^{0,5}/m^2K$	Wärmeeindringfähigkeit	4
b_{ch}	mm	Spanbreite	5
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit	10
c_{SB}	$N/\mu m$	Axiale Systemsteifigkeit beim Spechtbohren	5
$c_{W,PL}$	–	Widerstandsbeiwert eines Partikels	7
c_d	–	Ausflussziffer	8
c_p	kJ/kgK	Spezifische Wärmekapazität	4.5, 7, 10
d	mm	Durchmesser	
$d_{A,P}$	μm	Aerodynamischer Durchmesser des Staubpartikels	4...5, 7
d_F	μm	Faserdurchmesser	4, 10, 12
d_K	μm	Korngröße, -durchmesser von Schneidstoff, Abrasivmedium	4...6, 8...9
d_L	mm	Durchmesser des Laserstrahls	10
d_{Lf}	mm	Fokusbereich	10...11
d_{L0}	mm	Durchmesser der Strahlmitte, minimaler Fokusbereich	10
d_{WZ}	mm	Werkzeugdurchmesser	4...5, 7
d_j	mm	Durchmesser des Wasser- bzw. Abrasivwasserstrahls	8...9
d_m	mm	Fokussierrohrdurchmesser	8...9
d_n	mm	Düsendurchmesser	8...9

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
\vec{e}	–	Einheitsvektor	4
e_{\max}	μm	Formabweichung der Schnittfläche	6
e_{melt}	J/cm^3	Spezifische Schmelzenergie	9
f	mm	Vorschub	4...7
f_{Lf}	mm	Brennweite	10
f_{P}	kHz	Pulsfrequenz	10
f_{SB}	–	Frequenzverhältnis beim Spechtbohren	5
f_{SC}	Hz	Scanfrequenz	10
f_{fp}	–	Faserfaktor	4
f_{gp}	–	Gratfaktor	4
f_z	mm	Zahnvorschub	4...5
f_{Δ}	%	Delaminationskoeffizient	4...5
g	m/s^2	Erdbeschleunigung	7
h	mm	Spanungsdicke	4...6
h_{B}	mm	Bohrungstiefe	5
h_{G}	mm	Grathöhe	5
h_{K}	μm	Einzelkornspanungsdicke	4
h_{V}	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie	10
h_{WZ}	mm	Achshöhe des Werkzeugs, Spitzenhöhe des Werkzeugs	4...6
h_{ch}	mm	Spandicke	5
h_{eq}	mm	Äquivalente Spannungsdicke	4...5
h_{idr}	mm	Schädigungstiefe an der Strahleintrittsseite	8
h_{ip}	mm	Höhe des Faserüberstands oder Grates, $i = f, g$	4
h_{m}	mm	Mittenspannungsdicke	4, 6
k	N/mm^2	Auf den Spanungsquerschnitt bezogene Zerspankraft	5
k	–	Exponent des Taylor-Verschleißmodells	5
k	–	Formfaktor der Schneidenmikrogeometrie, Schneidkantenformparameter	4...5
k_{OB}	–	Durchmesser Verhältnis beim Orbitalbohren	5
k_{S}	N/mm^2	Schneidwiderstand	12
k_{c}	N/mm^2	Spezifische Schnittkraft	4...5
$k_{\text{i},1}$	N/mm^2	Spezifische Schnittkraft des Kienzle-Modells für $i = c, f, p$	5
l_{F}	μm	Faserlänge	3...4, 10
$l_{\text{WZ},a}$	mm	Ausraglänge des Werkzeugs	5
l_{ci}	mm	Einzelschnittweg der Schneide oder des Kornes, $i = S, K$	4, 6
$l_{\text{c,WS,WZ}}$	mm	Kinematische oder thermische Kontaktlänge	4...5

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
l_f	mm	Vorschubweg	4...5
l_j	mm	Charakteristische Länge der Strahlaufweitung	8
l_{ip}	mm	Breite des Faserüberstands oder Grates, $i = f, g$	4...5
l_m	mm	Fokussierrohrlänge	8...9
$l_{opt,WS}$	μm	Absorptionslänge des Werkstückmaterials, optische Eindringtiefe	10
$l_{th,WS}$	μm	Thermische Eindringtiefe, Wärmeeindringtiefe	10
$l_{0,WS,WZ}$	mm	Kontaktlänge durch elastische Deformation	4
m	–	Weibullmodul	5
\dot{m}	g/s	Massenstrom	8
m_{ch}	G	Spanmasse	5
$1-m_i$	–	Anstiegswert des Kienzle-Modells für Kraftkomponenten, $i = c, f, p$	5
n	min^{-1}	Drehzahl	4...5
\vec{n}	–	Normalenvektor	4
n_{WS}	–	Brechungsindex eines Werkstoffs	10
p	J/cm^3	Bezogene Zerspanleistung pro Zeitspanvolumen	5...6
p_p	MPa	Pumpendruck	8...9
$p_{\perp }$	–	Neigungsparameter des Puck-Modells	3
q	N/mm^2	Flächenlast	3
q	kW/m^2	Wärmestromdichte	4
\dot{q}_L	l/min	Luftvolumenstrom	8
\dot{q}_{WJ}	l/min	Volumenstrom des Wasserstrahls	8
r_{WZ}	mm	Werkzeugaradius	5
$r_{WZ,c,min}$	mm	Aufsetzradius	5
r_{min}	mm	Minimaler Biegeradius	4
r_n	mm	Verrundungsradius der Düse	8
r_p	mm	Radius des betrachteten Schneidenpunktes	4
r_s	mm	Seitwärtskrümmungsradius	5
r_u	mm	Aufwärtskrümmungsradius	5
r_β	μm	Schneidkantenradius, -verrundung	4...5, 7
r_ϵ	mm	Eckenradius	5
s	μm	Abstandsparameter der Schneidenmikrogeometrie	4...5
s	mm	Arbeitsabstand des Strahls zur Oberfläche	7...8, 10
s_a	mm	Bohrtiefe	5
t	mm	Bauteildicke, Materialdicke, Schichtdicke	4...12

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
t	s	Zeit	
t _{Li}	s	Einwirkzeit des Laserstrahls	10
t _p	µs	Pulsdauer des Laserstrahls	10
t _{PL}	min	Verweildauer von Staubpartikeln in der Luft	7
t _{p0}	µs	Pausenzeit zwischen einzelnen Pulsen	10
t _{SC0}	s	Pausenzeit zwischen Scans bei Mehrfachbelichtung	10
t _v	s	Wechselwirkungszeit	10
t _{WZ}	mm	Durchtauchtiefe des Werkzeugs	4...5, 11
t _{wz}	mm	Zahnteilung des Werkzeugs	5
t _c	s	Hauptzeit, Kontaktzeit	4...7, 12
t _{ci}	s	Einzeleingriffszeit, i = WS, WZ	4...6
t _{c,SB}	s	Zeit eines einzelnen Schneideneingriffs beim Spechtbohren	5
t _{0,SB}	µs	Totzeit zwischen Schneideneingriffen beim Spechtbohren	5
u	µm	Schneidspalt	12
v	m/s	Geschwindigkeit	4...5, 7...8
v _L	m/s	Schneidgeschwindigkeit	10
v _{PL}	cm/s	Partikelsinkgeschwindigkeit in Luft, Fallgeschwindigkeit	7
v _s	m/min	Spotgeschwindigkeit	10
v _c	m/min	Schnittgeschwindigkeit	4...7, 10
v _e	m/min	Wirkgeschwindigkeit	4
v _f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit	4...10
w	mm	Schnittfugenbreite	8, 10
w	J/cm ³	Spezifische Gesamtenergie pro zerspantem Volumen	5
x _{d,max}	mm	Flottierungsmaß	5
z _{Le}	mm	Gegenstandsweite	10
z _R	mm	Rayleighlänge	10
z _{WZ}	–	Zähnezahl	4...5, 7

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
Δ	mm	Elastische Deformation	4
Δ	mm	Tiefenschädigungslänge, Schädigungstiefe	4...5
Δd	mm	Bohrungsdurchmesserabweichung	5
Δh _{v,ges}	kJ/kg	Enthalpieänderung	10

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
Δr	mm	Radiale Deformation, Rundheitsabweichung	5
Δr_{WZ}	mm	Radiale Werkzeugauslenkung	5
Δr_{β}	μm	Schneidenabflachung	4...5
Θ_L	mrad	Divergenz	10
Φ_z	Grad	Ondulationswinkel	5
T_i	Grad	Raumwinkel des Zerspanverfahrens, $i = D, T, M$	4
Ω	Grad	Rotationswinkel des Werkzeugs	4
α	Grad	Richtung der Flächenlast	3
α	$1/^{\circ}\text{C}$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	3...4, 7
α_{WS}	Grad	Neigungswinkel der Schnittfläche	8...9
$\alpha_{WS,opt}$	m^{-1}	Absorptionskoeffizient des Werkstückmaterials	10
α_{ch}	Grad	Spangradmaß	5
α_{cu}	Grad	Spanungsgradmaß	5
α_i	Grad	Freiwinkel des Werkzeugs in Ebene, $i = f, n, o, p$	4...5
β_i	Grad	Keilwinkel in Ebene, $i = f, n, o$	4...5
γ_i	Grad	Spanwinkel des Werkzeugs in Ebene, $i = f, n, o, p$	4...6
δ_p	Grad	Drallwinkel des Werkzeugs	4...5, 7
ε	–	Emissionsgrad	10
ε_c	%	Bruchdehnung	3...5
ζ	Grad	Vorschubrichtungswinkel in der gefertigten Fläche	4
η	–	Effizienz der Impulsübertragung	8
η_A	–	Einkoppelgrad	10
η_W	m^2/s	Kinematische Viskosität von Wasser	8
η_f	Grad	Wirkrichtungswinkel	4...5
η_{ges}	–	Prozesswirkungsgrad	10
η_h	Grad	Steigungswinkel der Vorschubhelix	5
η_{th}	–	Thermischer Wirkungsgrad	10
θ	Grad	Fasertrennwinkel	4...5
θ_L	mrad	Divergenzwinkel	10
θ_0	Grad	Räumlicher Fasertrennwinkel bei orthotropem Faserverbundkunststoff	4
κ_{WS}	–	Absorptionsindex des Werkstückmaterials	10
κ_r	Grad	Einstellwinkel des Werkzeugs	4...5
λ_L	μm	Wellenlänge der Laserstrahlung	10
λ_M	Grad	Seitenneigungswinkel beim Fräsen	4
λ_S	Grad	Schneidenneigungswinkel	4...5

Symbol	Einheit	Erläuterung	Kapitel
λ_h	–	Spanstauchung	4...5
λ_i	W/cm°C	Wärmeleitfähigkeit, $i = \text{WS, WZ}$	3..5, 7, 10
λ_0	Grad	Räumlicher Schneideneigungswinkel bei orthotropem Faserverbundkunststoff	4
μ	–	Coulombscher Reibwert	4...5
ν	–	Querkontraktionszahl	3
ν	Grad	Spanablaufwinkel	5
ν	Grad	Winkel der gefertigten Fläche beim unidirektionalen Laminat	4
ξ	Grad	Schnitttrichtungswinkel in der Schnittfläche	4
ρ	g/cm ³	Dichte	5, 7...8, 10, 12
ρ	–	Reibwinkel	5
ρ_M	Grad	Sturzwinkel beim Fräsen	4
σ	MPa	Normalspannung	3...4
σ_b	N/mm ²	Biegebruchfestigkeit	5
σ_e	MPa	Eigenspannung	3...5
σ_r	Grad	Spitzenwinkel des Werkzeugs	4...5
τ	MPa	Schubspannung	3...5
τ_ϕ	MPa	Scherspannung	5
τ_{21c}	N/m ²	Bruchwiderstandsparameter des Puck-Modells	3
φ	Grad	Eingriffswinkel	4...5
φ_F	%	Faservolumengehalt	3, 5, 8...11
φ_0	Grad	Räumlicher Eingriffswinkel bei orthotropem Faserverbundkunststoff	4
ϕ	Grad	Faserorientierungswinkel	4, 5, 8, 12
ϕ	Grad	Scherwinkel	5
ϕ_i^l	N	Komplexe Spannungsfunktion, $i = 1, 2, 3$	3
χ	Grad	Winkel der Schnittfläche beim unidirektionalen Laminat	4
$\dot{\chi}$	s ⁻¹	Umformgeschwindigkeit	5
ψ	–	Kompressionskoeffizient	8

Indizes

Index	Erläuterung	Kapitel
A	Abrasiv	7...8
A	Bezogen auf eine Fläche	5
AWJ	Abrasivwasserstrahl	8...9

Index	Erläuterung	Kapitel
B	Bohrung	4...5, 7
D	Bohren	4
F	Faser	3...5, 10, 12
FB	Faserbündel	4...5
IC	Nach Schädigungsmoder I	5
K	Korn	4...6, 8...9
L	Laser	10...11
L	Lateral zum unidirektionalen Laminat	4
M	Fräsen	4
N	Normal zum unidirektionalen Laminat	4
P	Partikel	4...5, 7
P	Puls	10...11
S	Scherschneiden	12
S	Schneide	4
SB	Spechtbohren	5
SC0	Pause zwischen Mehrfachbelichtung	10
T	Drehen	4
T	Transversal zum unidirektionalen Laminat	4
US	Ultraschallschwingung	5
W	Wasser	8...9
WJ	Wasserstrahl	8...9, 11
WS	Werkstück	4...5, 8...10
WZ	Werkzeug	4...7
a	Aktivkomponente einer Kraft	4...6
a	In Axialrichtung	4...6
c	In Schnittrichtung	4...7, 11
ch	Span	5
el	Elastisch	5
f	Bezogen auf Arbeitsebene oder in Vorschubrichtung	4...6, 8...9
ges	Zur Bearbeitung, gesamt	10
krit	Kritisch	10
n	In Normalenrichtung	4...6
o	Bezogen auf Orthogonalebene	4
o	Räumlich, bezogen auf die Faserlängsachse	4
p	Bezogen auf Rückebene oder in Passivrichtung	4...5
r	Bezogen auf Referenzebene oder in Radialrichtung	4...5

Index	Erläuterung	Kapitel
s	Bezogen auf Schneidenebene	4
t	In Tangentialrichtung	4...5
th	Theoretisch	4...5
α	Bezogen auf die Freifläche	4...5
γ	Bezogen auf die Spanfläche	4...5
ϕ	Bezogen auf die Scherebene	5
\wedge	Aufprallkraft	4
	In Faserlängsrichtung	3...5
\perp	In Faserquerrichtung	3...5
(+)	In Zugrichtung	3
(-)	In Druckrichtung	3

Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Erläuterung</i>
A-Staub	Alveolengängiger Staub
BMC	Bulk Moulding Compound
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CVD	Chemical Vapour Deposition
cw	Dauerstrichbetrieb (Continuous Wave)
E-Staub	Einatembare Staub
EP	Epoxid
FML	Fiber Metal Laminate
FVK	Faserverbundkunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HM	Faser mit hohem Elastizitätsmodul (High Modulus)
HM	Hartmetall
HSC	Hochgeschwindigkeitszerspanung (High Speed Cutting)
HT	Faser mit hoher Zugfestigkeit (High Tensile Strength)
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
IM	Faser mit mittlerem Elastizitätsmodul (Intermediate Modulus)
MAG	Multiaxiales Gelege
MMKS	Minimalmengenkühlschmierung
MMS	Minimalmengenschmierung
NCF	Multiaxiales Gelege (Non Crimped Fabric)
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril-Faser
PCBN	Polykristallines kubisches Bornitrid (Polycrystalline Cubic Boron Nitride)

Peck Feed	Spechtvorschub beim Bohren
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyethylenimin
PKD	Polykristalliner Diamant
PPS	Polyphenylensulfid
Prepreg	Pre-impregnated Fabric
RTM	Harzinfusionsverfahren (Resin Transfer Moulding)
SMC	Sheet Moulding Compound
TGA	Thermogravimetrische Analyse
TRGS	Technische Regeln Gefahrstoffe
TVOC	Total Volatile Organic Compounds
UD	Unidirektional
UHM	Faser mit sehr hohem Elastizitätsmodul (Ultra-high Modulus)
UP	Polyesterharz
WASC	Wärmeakkumulation durch aufeinanderfolgende Scans
WAP	Wärmeakkumulation durch aufeinanderfolgende Pulse
WHO	World Health Organisation

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Literatur.....	3
2	Einordnung gebräuchlicher Trennverfahren zur Bearbeitung von Faserverbundkunststoffen	5
	Literatur.....	8
3	CFK und artverwandte Faserverbundkunststoffe	9
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
4	Grundlagen und Modelle der spanenden Bearbeitung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe	27
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 θ -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
5	Technologien zur Zerspanung von CFK, artverwandter Faserverbundkunststoffe und hybrider Schichtverbunde	139
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
6	Technologien zur Zerspanung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe mit undefinierter Schneide	277
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
7	Zusatzeinrichtungen zur Zerspanung von CFK, artverwandter Faserverbundkunststoffe und hybrider Schichtverbunde	289
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
8	Grundlagen und Modelle der Hochdruck-Wasserstrahl- und Hochdruck-Abrasivwasserstrahlbearbeitung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe	305
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- Abrasive-Wasserstrahlbearbeitung	312
8.3	Trennmechanismus bei der Hochdruck- Abrasive-Wasserstrahlbearbeitung	315
8.4	Verschleiß von Systemkomponenten und Medienverbrauch bei der Hochdruck-Abrasive-Wasserstrahlbearbeitung 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- Abrasive-Wasserstrahlbearbeitung	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
9	Technologien zur Hochdruck-Wasserstrahl- und Hochdruck-Abrasive-Wasserstrahlbearbeitung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe	335
9.1	Übersicht der Wasserstrahltechnologien: Einteilung und Verfahrensvarianten	336
9.2	Umfangs- und Konturbearbeitung mit Injektor-Hochdruck- Abrasive-Wasserstrahlen	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- Abrasive-Wasserstrahl 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
10	Laserstrahlbearbeitung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe	351
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
11	Hybride Bearbeitungsverfahren für CFK und artverwandte Faserverbundkunststoffe	389
11.1	Hybride Bearbeitung mittels Laser- und Hochdruck-Wasserstrahl	389
11.2	Hybride Bearbeitung mittels Zerspanverfahren und Laserstrahl	391
	Literatur	394
12	Scherschneiden von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe	395
	Literatur	398
	Erratum zu: Technologien zur Hochdruck-Wasserstrahl- und Hochdruck-Abrasivwasserstrahlbearbeitung von CFK und artverwandter Faserverbundkunststoffe	E1
	Stichwortverzeichnis	401



Zusammenfassung

Die Einleitung umreißt die betrachtete Werkstoffgattung der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (CFK) sowie der artverwandten, endlos faserverstärkten Kunststoffe (FVK) und ihre Bedeutung für den Leichtbau. Im Fokus des Buches steht die für die Qualität von CFK- und FVK-Bauteilen notwendige Bearbeitung im konsolidierten Zustand mit ihren werkstoffspezifischen Besonderheiten. Das Buch richtet sich an Fachleute der Industrie, Wissenschaftler*innen der Produktions- und Kunststofftechnik sowie an Studierende dieser Fachrichtungen.

CFK (kohlefaserverstärkter Kunststoff) bezeichnet Hochleistungsverbundwerkstoffe, die aus einer Kunststoffmatrix mit zur Verstärkung eingebetteten, quasi endlosen Kohlenstofffasern (Carbonfasern) bestehen. CFK gehört zur Werkstoffgruppe der faserverstärkten Kunststoffe bzw. Faserverbundkunststoffen (FVK), von der CFK heute lediglich einen kleinen Anteil ausmacht. Durch seine besonderen Eigenschaften ist CFK allerdings für einige Güter des industriellen und des privaten Bedarfs ein attraktiver, teils sogar ein unverzichtbarer Werkstoff.

Im Gegensatz zu den vorteilhaften Werkstoffeigenschaften von CFK gestaltet sich die Herstellung von CFK-Bauteilen aufwendig. Innerhalb des Herstellungsprozesses müssen CFK-Bauteile nach der Konsolidierung bearbeitet werden, um die durch die Anwendung festgelegten Qualitäts- und Funktionsanforderungen zu gewährleisten. Das zu bearbeitende Werkstoff- und Teilespektrum oder das im Einzelfall vorliegende CFK-Bauteil spielt für die Auswahl und Gestaltung der Bearbeitungstechnologie eine zentrale Rolle. Andererseits werden durch die gewählte Bearbeitungstechnologie neben der Bauteilqualität erheblich die Flexibilität, Wirtschaftlichkeit und Produktivität des gesamten

Herstellungsprozesses beeinflusst, die letztendlich darüber entscheiden, ob CFK-Bauteile unter den Bedingungen des Marktes gegenüber alternativen Werkstoff- und Designkonzepten bestehen können. Dies gilt im Besonderen für den Einsatz von CFK in Massenmärkten zum Zweck des Leichtbaus. So liegen die für eine Gewichtseinsparung akzeptierten Mehrkosten bei Automobilen und Schienenfahrzeugen nach Friedrich (2017) und Neitzel et al. (2014) bei 1 bis 15 €/kg, während in der Luft- und Raumfahrt 500 bis 5000 €/kg akzeptiert werden.

Während die verfahrensspezifischen Grundlagen der Bearbeitungstechnologien den einschlägigen Fachbüchern entnommen werden können, steht für die Auswahl und Auslegung von CFK-Bearbeitungsprozessen bislang nicht ausreichend werkstoffspezifisches Technologiewissen in strukturierter und gebündelter Form zur Verfügung. Dies erklärt sich unter anderem aus der Vielfalt von CFK-Werkstoffen, die nicht nur durch die Wahl der Ausgangsstoffe Faser und Kunststoffmatrix, sondern auch durch den textilen Aufbau für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert werden.

Die für die Bearbeitung von CFK aufgezeigten Wissensdefizite gelten abgeschwächt auch für die mengenmäßig sehr viel größere Werkstoffgruppe der Kunststoffe mit Endlos- und Langfaserverstärkung aus Glas (GFK). Zwischen CFK- und diesen GFK-Werkstoffen besteht eine Artverwandtschaft in den bearbeitungsrelevanten Eigenschaften sowie in den Bauteildimensionen und -formen. Deswegen schließt das Buch die Bearbeitung von endlos- bzw. langfaserverstärkten GFK mit ein.

Kennzeichnend für den Leichtbau ist die funktionsorientierte Auswahl, Optimierung und Kombination unterschiedlicher Werkstoffe, weshalb häufig Teilstrukturen aus CFK und artverwandten Faserverbundkunststoffen mit Leichtmetallkomponenten zu hybriden Gesamtstrukturen gefügt und dafür zusammen bearbeitet werden müssen. Die Bearbeitung hybrider Werkstoffverbunde und Werkstoffe mit ihren zusätzlichen Herausforderungen findet daher ebenfalls Berücksichtigung.

Das Buch richtet sich an Fachleute in der Industrie aus den Bereichen Fertigung, Werkstofftechnik und Entwicklung, an die in der Produktions- und Werkstoffforschung tätigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie an Studierende dieser Fachrichtungen, die sich vertieft mit Bearbeitungsfragen von CFK- und artverwandten Werkstoffen befassen wollen und mit den Grundlagen der Bearbeitungstechnologien und der Werkstofftechnik vertraut sind.

Die Stoffauswahl des Buches orientiert sich vorrangig an der industriellen Bedeutung der unterschiedlichen Bearbeitungstechnologien für endlos- bzw. langfaserverstärkte CFK und GFK, folglich haben die spanenden Verfahren das größte Gewicht. Dabei werden gleichermaßen die werkstoffspezifischen Grundlagen der jeweiligen Technologie und ausgewählte Verfahrensvarianten behandelt. Weiterhin werden Fragen der zugehörigen Anlagenperipherie und des Arbeitsschutzes diskutiert. Angesichts der unbegrenzten Werkstoffvielfalt hat die Bearbeitbarkeit des einzelnen CFK oder GFK durch spanende und durch Strahlverfahren für die Industriepraxis einen hohen Stellenwert und nimmt entsprechenden Raum ein. Jüngste Forschungsarbeiten haben deutlichen Erkenntnisfortschritt und Wissenszuwachs in der Bearbeitungstechnologie von CFK

hervorgebracht und wurden berücksichtigt. Schließlich werden aktuelle Technologieentwicklungen mit ihren absehbaren Anwendungspotenzialen und Grenzen aufgezeigt.

Es ist das Anliegen des Buches, für die Bearbeitungstechnologien von CFK ein modellhaftes Verständnis der relevanten Mechanismen zu vermitteln, das den Leserkreis dazu befähigt, zukünftige Bearbeitungsaufgaben strukturiert lösen und auftretende Bearbeitungsprobleme methodisch analysieren zu können. Im Hinblick auf experimentelle Untersuchungen und Prozesssimulationen wird daher auch auf erprobte Messverfahren und Prozessmodelle eingegangen.

Literatur

Friedrich HE (Hrsg) (2017) Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden
Neitzel M, Mitschang P, Breuer U (Hrsg) (2014) Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. Hanser, München



Einordnung gebräuchlicher Trennverfahren zur Bearbeitung von Faserverbundkunststoffen

2

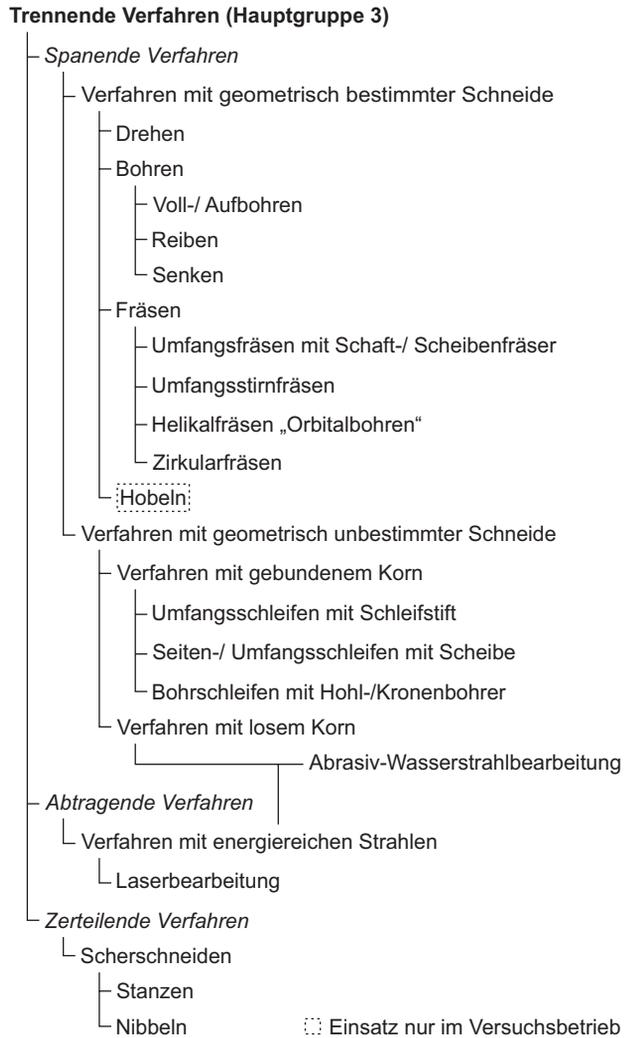
Zusammenfassung

Bauteile aus CFK und artverwandten faserverstärkten Kunststoffen müssen im ausgehärteten Zustand bearbeitet werden, um die geforderten Toleranzen zu erreichen. Dies gilt auch für Bauteile aus hybriden Werkstoffen, die anteilig aus faserverstärktem Kunststoff und Metall bestehen, sowie für die gemeinsame Bearbeitung von Faserverbund- und Metallbauteilen, um hochbelastete Fügeverbindungen, speziell um Nietverbindungen herzustellen. Die gebräuchlichen Bearbeitungstechnologien Drehen, Bohren, Fräsen, Sägen, Schleifen, Wasserstrahlschneiden, Laserstrahlschneiden und Scherschneiden gehören zur Hauptgruppe der trennenden Fertigungsverfahren. Nach dem vorherrschenden Wirkprinzip werden spanende und spanlose Verfahren sowie abtragende Verfahren unterschieden.

Die in diesem Buch erläuterten Bearbeitungstechnologien für CFK und artverwandte faserverstärkte Kunststoffe behandeln deren Trennung im ausgehärteten Zustand. Die Endbearbeitung ist bei den meisten Faserverbundbauteilen notwendig, um die Toleranzanforderungen zu erfüllen. Zugleich sind damit erhebliche Kosten verbunden. Nach Friedrich (2017) entfallen auf die Endbearbeitung ca. 40 % der Bauteilkosten.

Die gebräuchlichen Trennverfahren gehören nach DIN 8580 (2003) zur Hauptgruppe der trennenden Fertigungsverfahren. Die Hauptgruppe Trennen ist nach dem vorherrschenden Wirkprinzip unterteilt in spanende und spanlose Verfahren sowie abtragende Verfahren. Bei den spanenden und spanlosen Verfahren erfolgt die örtliche Abtrennung des Materials auf mechanischem Weg, bei den abtragenden Verfahren auf nicht-mechanischem Weg, Abb. 2.1.

Abb. 2.1 Übersicht der trennenden Bearbeitungsverfahren in Anlehnung an DIN 8580 (2003)



Die Zerspanung beschreibt das örtliche Abtrennen von Werkstoffschichten oder -teilchen von einem Bauteil durch den Eingriff von Schneiden eines Werkzeugs (DIN 8580 (2003), DIN 8589 Teil 3 (2003)). Zerspanungsverfahren mit definierter Schneide zeichnen sich dadurch aus, dass man die Geometrie der eingreifenden Schneiden sowie die Spanungsdicke und -breite eindeutig angeben kann. Demgegenüber unterliegen bei Zerspanungsverfahren mit undefinierter Schneide die Schneidengeometrie sowie die Spanungsdicke und Spanungsbreite statistischen Streuungen, die durch die verwendeten Schneidkörner selbst bedingt sind.

Zerspanungsverfahren mit undefinierter Schneide untergliedern sich in Verfahren mit gebundenen und solche mit ungebundenen, losen Körnern. Für die Faserverbund-

bearbeitung sind aus der ersten Gruppe die Schleifverfahren bedeutsam, aus der zweiten Gruppe insbesondere die Abrasivwasserstrahltechnologie. Der Zerspanvorgang mit gebundenen Körnern resultiert im Fall des Schleifens vorrangig aus ihrer kinematischen Zwangsführung auf einer vorgegebenen Bewegungsbahn und der Einwirkung von Kräften von den Schneidkörnern auf das Werkstück und ähnelt insoweit der Zerspannung mit definierter Schneide. Demgegenüber resultiert die Materialtrennung bei losen Körnern im Fall des Abrasivwasserstrahls aus ihrer kinetischen Energie.

Die Zerspanungsverfahren mit geometrisch definierten Schneiden und diejenigen mit gebundenen geometrisch undefinierten Schneiden unterteilen sich weiter nach ähnlichen kinematischen Kriterien (DIN 8589 Teil 3 (2003)):

- Geradlinige bzw. rotatorische Schnittbewegung,
- Schnittbewegung durch Werkzeug oder durch Werkstück ausgeführt,
- Kontinuierliche oder diskontinuierliche Schnitt- und Vorschubbewegung,
- Richtung der Vorschubbewegung quer oder beliebig zur Schnittichtung.

Industriell dominieren spanende Verfahren mit rotierenden Werkzeugen, bei rotations-symmetrischen Bauteilen kommt Drehen zum Einsatz. Hobeln wird für experimentelle Grundsatzuntersuchungen genutzt.

Die Darstellung der technologischen Grundlagen und Modelle orientiert sich an den spezifischen Wirkprinzipien für Verfahren mit definierten Schneiden und für solche mit bahngelassenen Körnern undefinierter Schneidengeometrie. Zweckmäßigerweise werden zuvor die grundlegenden Zusammenhänge des Schneideneingriffs und der Kinematik für entsprechende Verfahren beider Verfahrensgruppen gemeinsam betrachtet (vgl. Kap. 4). Denn diese ändern sich bei der spanenden Bearbeitung langfaserverstärkter Faserverbundkunststoffe mit rotierenden Werkzeugen infolge des orthotropen Werkstoffverhaltens periodisch über dem Werkzeugdrehwinkel Ω . Die Grundlagen des Schneideneingriffs und der Kinematik sind die Basis für das Verständnis der verfahrensspezifischen Besonderheiten und Herausforderungen. Sie gelten unabhängig davon, ob im kontinuierlichen oder unterbrochenen Schnitt gearbeitet wird.

Die spanenden Verfahren bilden wegen ihrer industriellen Bedeutung den Schwerpunkt des Buches. Die abtragenden Verfahren folgen grundlegend anderen Wirkprinzipien: Bei der Laserstrahlbearbeitung liegt eine thermische Materialtrennung durch einen energiereichen Strahl vor. Die Abrasivwasserstrahlbearbeitung nimmt eine Mittelstellung zwischen den Verfahrensgruppen ein, da das Wirkprinzip einerseits auf der Zerspannung mit Hilfe von losem Korn und andererseits auf dessen Führung durch einen energiereichen Wasserstrahl beruht. Die Abrasivwasserstrahlbearbeitung und das Laserstrahlschneiden werden daher gesondert in den Kap. 8 und 9 sowie in Kap. 10 behandelt. Die spanlosen Trennverfahren sind zur Bearbeitung ausgehärteter CFK-Bauteile und artverwandter Faserverbundkunststoffe bisher wenig verbreitet und teils noch Gegenstand der Forschung. Allerdings sind sie für den Zuschnitt unausgehärteter Faserhalbzeuge und kurzfaserverstärkter Kunststoffbauteile geringer Dicke wichtig.

Literatur

DIN 8580 (2003) Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth, Berlin

DIN 8589 Teil 3 (2003) Fertigungsverfahren Spanen. Teil 3: Fräsen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth, Berlin

Friedrich HE (Hrsg) (2017) Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden