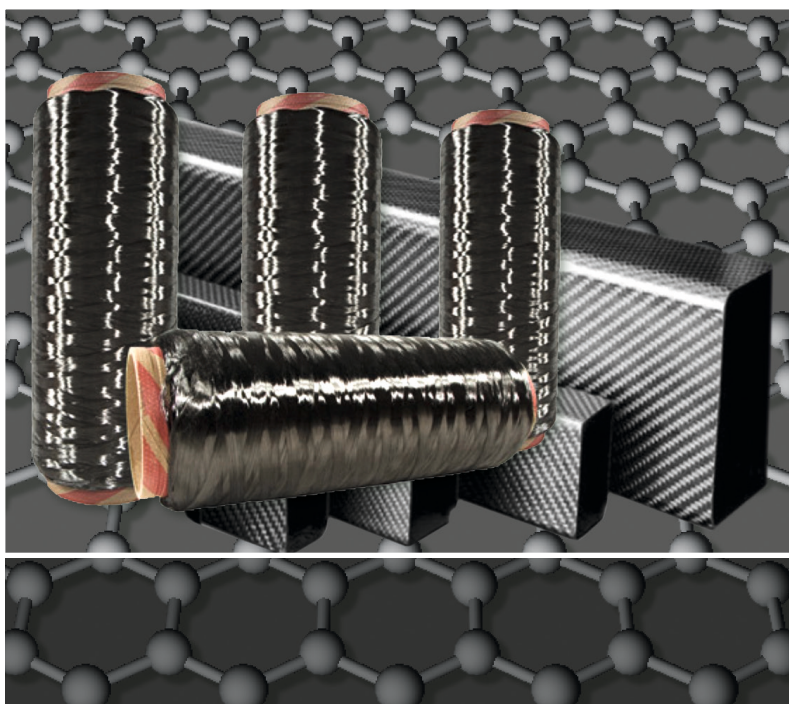


Hauke Lengsfeld  
Hendrik Mainka  
Volker Altstädt

# Carbonfasern

Herstellung, Anwendung, Verarbeitung



HANSER



**Blieben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig  
über neue Bücher und Termine aus den ver-  
schiedensten Bereichen der Technik. Profitieren  
Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven  
Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

**Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

**Richtungsweisend:** Fach- und Brancheninformationen  
stets top-aktuell!

**Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue  
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe*.de**

Hauke Lengsfeld  
Hendrik Mainka  
Volker Altstädt

# Carbonfasern

Herstellung, Anwendung, Verarbeitung

HANSER

Die Autoren:

*Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld*, Schill + Seilacher „Struktol“ GmbH

*Dr.-Ing. Hendrik Mainka*, Volkswagen Group of America

*Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt*, Angewandte Wissenschaften (FAN) an der Universität Bayreuth

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Ulrike Wittmann

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co GmbH und Co KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-45407-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-46080-5

# Die Autoren

## ■ Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld



Nach seinem Chemiestudium in Kiel und der Promotion am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth (Prof. Dr.-Ing. Altstädt) arbeitete Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld bei Airbus Operations GmbH als Material- und Prozessexperte in der Produktion für CFK-Großbauteile. Als Leiter des technischen Marketings und Vertriebs war er bei der Saertex Stade GmbH an der Entwicklung von CFK-Komponenten der A350XWB beteiligt. Bei der Hexcel Composites GmbH arbeitete er als Technical Support Manager für Zentraleuropa. In enger Zusammenarbeit mit weiteren Autoren entstand während dieser Zeit sein erstes

Buch über die Verarbeitung von Prepregs. Seit 2018 arbeitet er als Bereichsleiter für die Entwicklung von Epoxyprodukten bei der Schill+Seilacher „Struktol“ GmbH. Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld hält Vorlesungen zu Faserverbundwerkstoffen an verschiedenen Hochschulen.

## ■ Prof. Dr.-Ing. Volker Altstadt



Nach Abschluss seines Physikstudiums 1987 promovierte Volker Altstadt zum Dr.-Ing., zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Ehrenstein, in dem Fach Maschinenbau in Kassel. Volker Altstadt arbeitete acht Jahre als Leiter der Abteilung für Polymere Physik in der Abteilung Polymer Entwicklung der BASF AG in Ludwigshafen. Seit 1995 ist er Professor für Kunststoff im Maschinenbau und Leiter der Abteilung für Polymere und Kunststoff-Verbunde an der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Seit Oktober 2000 ist Dr.-Ing. Volker Altstadt Professor in der Abteilung Kunststoff Ingenieurwissenschaften in der Fakultät für angewandte Wissenschaften (FAN) an der Universität Bayreuth.

## ■ Dr.-Ing. Hendrik Mainka



Nach dem Abschluss seines Studium des Chemieingenieurwesens mit Vertiefung Molekulare und Strukturelle Produktgestaltung an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg promovierte Dr.-Ing. Hendrik Mainka an der Universität Bremen im Fach Produktionstechnik (Prof. Dr. Prof. Dr. Axel Herrmann – Faserinstitut Bremen e. V. (FIBRE)).

Ab 2011 arbeitete Dr.-Ing. Hendrik Mainka bei Volkswagen in der Konzernforschung. In der Abteilung Werkstoffe und Fertigungsverfahren lag der Fokus auf alternativen Faserverstärkungen und automobilen Leichtbau. Im Jahr 2015 wechselte er zur Volkswagen Group of America, wo er seit 2016 den Bereich Product Innovation leitet. Hier liegen die Schwerpunkte der Arbeiten im Bereich automobiler Leichtbau in Faserverbundbauweise, Elektromobilität und Additive Manufacturing.

Dr.-Ing. Hendrik Mainka arbeitete zudem für ein Jahr am Oak Ridge National Laboratory, wo er an der Entwicklung von kostengünstigen automobilen Carbonfasern beteiligt war.

# Vorwort

Laut des Composites-Marktberichts von CCEV und AVK wurde für das Jahr 2017 ein globaler Kohlenstofffaser Markt von etwa 70,5 Tsd. Tonnen ermittelt [1]. Mordor Intelligence erwartet für den Zeitraum 2018 bis 2023 eine jährliche Wachstumsrate von 13,45 % für Kohlenstofffasern. Im Vergleich zu anderen Fasern, z. B. Glasfasern mit mehreren Mio. Produktionstonnen pro Jahr bei einer Wachstumsrate von ca. 7,4 % [3], ist die Verbrauchsmenge an Kohlenstofffasern weltweit sehr gering aber das Mengenwachstum sehr hoch. Dafür sind die Anwendungen hoch innovativ und meistens getrieben von dem Ziel der Gewichtsreduktion. Dabei ist der Bedarf in der Luft- und Raumfahrt Industrie (36 %) und in der Automobilindustrie (24 %) am größten. Aber auch Windenergie- und Sportindustrie mit je 13 % und die Bauindustrie (5 %) sind wichtige Absatzmärkte [1].

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieses Fachbuchs erstmalig mit dem Fokus auf moderne Kohlenstofffasern ein Fachbuch zur Faserverbundtechnologie zu präsentieren. Dieses konzentriert sich inhaltlich auf die individuellen Eigenheiten der Kohlenstofffaser vom Precursor für die Faser, dem Stabilisierungs- und Carbonisierungsprozess, über die resultierende atomare Struktur bis zu den Eigenschaften. Die vielfältigen Wege von der Faser über den Roving zum Verbundwerkstoff und dessen Eigenschaften werden an vielen aktuellen Beispielen aus vielfältigen Industriezweigen diskutiert.

Nach einer kurzen Einleitung zur geschichtlichen Entwicklung der Kohlenstofffasern wird nachfolgend im *zweiten Kapitel* des Buchs zunächst das Atommodell für Kohlenstoffverbindungen erklärt, um für den Leser die verschiedenen Kohlenstoffmodifikationen (Diamand, C-Nanofaser, Fullerene etc.) verständlich darzustellen.

Das *dritte Kapitel* beschreibt ausführlich die Prozessschritte Precursor-Herstellung, Oxidative Stabilisierung und Carbonisierung/Graphitisierung. Wichtig für den Leser ist auch die Diskussion der Oberflächenbehandlung und des richtigen Sizing der Fasern. Sehr hilfreich für das Verständnis sind die vielen graphischen Darstellungen, die z. B. C-Fasern mit und ohne Schlichte darstellen, aber auch Vorstellungen zur Interphase anschaulich vermitteln.



An dieses Kapitel schließt sich in logischer Weise *Kapitel vier* an, welches sich mit dem Themengebiet der Analytik von C-Fasern und daraus hergestellten Rovings beschäftigt. Neben einer Darstellung der relevanten Normen werden aktuelle Testverfahren zur Charakterisierung und Klassifizierung des Verarbeitungsverhaltens von Kohlenstoffasergarnen bzw. -filamenten angesprochen. Prüfapparaturen werden anschaulich in Bildern dargestellt und z.B. Drapierfehler durch die Umformung anschaulich anhand von Fotos erklärt.

Eine besondere Stärke des Buches ist die Darstellung der Anwendungen von Kohlenstofffasern im *Kapitel fünf*. Aufgrund der hervorragenden und vielfältigen Eigenschaften von PAN-basierten Fasern werden diese in den unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt. Im Buch werden Anwendungsbeispiele der verschiedenen Fasertypen (PREOX- und Carbon-Faser) gegeben sowie die unterschiedlichen Aufmachungen (endlos, geschnitten, gemahlen) beispielhaft erläutert, diese findet man an anderer Stelle so praxisnah und reich bebildert kaum. Die Darstellung ist untergliedert nach den verschiedenen Fasertypen und umfasst das breite Spektrum der Fertigungsmethoden, dies sind beispielsweise:

- Anwendungen in der Luftfahrt;
- Automobilstrukturen aus CFK, auf Basis von Multiaxialgelegten;
- Anwendungen PrimeTex-Gewebe für Wintersport-Ski;
- Carbon-Kurzfasern für Estrichbeton oder in einem 3D-gedruckten Lüftergehäuse.

Da die C-Faser Herstellung sehr energieintensiv ist, kann man heute nicht mehr über Werkstoffe reden ohne deren Recycling und deren Carbon-Footprint in der Lifecycle-Analyse anzusprechen. Das *Kapitel sechs* widmet sich daher einer aktuellen Bestandsaufnahme zum C-Faser-Recycling und dem Thema Nachhaltigkeit. Auch hier wird wieder nach den unterschiedlichen Aufmachungen (endlos, geschnitten, gemahlen) bei der Beschreibung der verschiedenen Recyclingwege unterschieden. Neben dem eigentlichen Recyclingkreislauf für C-Fasern werden auch die Herausforderungen bei der Abfallaufbereitung angesprochen und Wege aufgezeigt aus einem Materialmix, aus verschiedenen Reststoffen als Eingangsgröße, durch thermische, chemische oder mechanische Verfahren zu einer energetischen oder besser zu Recyclathalbzeugen (Mehl, Kugeln oder Granulat) zu kommen, die in vielfältigen im Buch aufgezeigten Anwendungen zu einer nachhaltigen Sekundärnutzung führen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass das Recycling von kohlenstoffhaltigen Abfällen aller Art sowie die damit verbundene Rückgewinnung von qualitativ hochwertigen Kohlenstofffasern (rCF) im industriellen Maßstab gelöst ist und im zunehmenden Maße angewandt wird.

Trotzdem bleiben noch Herausforderungen um den Einsatz der C-Fasern erweitern zu können. Diese sind hauptsächlich vom hohen Preis der Faser getrieben. Im *Kapitel sieben* werden unterteilt nach Precursorkosten, Energiekosten und Investitionskosten für Anlagen zukünftige Verbesserungspotentiale aufgezeigt.

Zusammenfassend kann das Fachbuch als Handbuch, als Lehrbuch und als Nachschlagewerk für den Praktiker eingesetzt werden. So werden die physikalischen Grundlagen der Kohlenstofffasern die Herstellungsprozesse, deren werkstoffliche und prozesstechnischen Grundlagen, mit starkem Praxisbezug vermittelt. Das Fachbuch will auch an den Schnittstellen der C-Fasertechnologie zu den Halbzeugen und daraus hergestellten Bauteilen einen Beitrag leisten und hier die erforderlichen Brücken zwischen Struktur/Fertigung und Eigenschaften schlagen. In die Zukunft weisend werden wichtige Entwicklungen im Bereich des Recyclings und der Energieeffizienz der modernen C-Faserverbund-Technologie im Buch aufgezeigt.

Volker Altstädt

Bayreuth, im Februar 2019

#### **Literatur zum Vorwort:**

- [1] Michael Sauer, Michael Kühne: Der globale CF- und CC-Markt, (CCeV), Der GFK-Markt Europa – Dr. Elmar Witten (AVK)
- [2] Mordor Intelligence, Studie Carbon Global Fiber Market: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-carbon-fiber> (Stichwort: market-industry), Abrufdatum Februar 2019
- [3] Report Linker: <https://www.reportlinker.com/p05176097/Global-Glass-Fiber-Market.html>, Abrufdatum: Februar 2019



# Danksagung

Wir bedanken uns sehr herzlich bei allen, die uns bei der Erstellung dieses Buches unterstützt haben.

Beim Carl Hanser Verlag möchten wir uns für die Möglichkeit zur Veröffentlichung dieses Buches bedanken, insbesondere bei Frau Ulrike Wittmann für die Gestaltung und Formatierung der Kapitel.

Wir danken ganz persönlich:

- Roland Bernicke, Tejin Carbon Europe;
- Jörg Heubischl, AFF;
- Thomas Neumeyer, Neue Materialien Bayreuth und
- Daniel Stelzl, MT Aerospace.

Weiter bedanken wir uns bei den Firmen Karl-Meyer AG, Oak Ridge National Laboratory, Schunk Kohlenstofftechnik GmbH, FACC AG, Airbus Operations GmbH, Hexcel Composites GmbH, den National Oak Ridge Labs und vielen anderen für die sachdienlichen Hinweise, die anregenden Diskussionen und das Bildmaterial.

Ein besonderer Dank gilt den Firmen Tejin Carbon Europe GmbH, Textechno GmbH, Audi AG und Brose Fahrzeugteile GmbH & Co, die wichtige Teile des Bildmaterials zur Verfügung gestellt haben.

Danke sagen wollen wir auch unseren Familien für ihre Geduld.



# Abkürzungsverzeichnis

AFP	Automated-Fiber-Placement
AM-Faser	Advanced-Modulus-Faser
ATL	Automatic-Tape-Laying
BMC	Bulk-Moulding-Compound
CF	Carbonfaser, Kohlenstofffaser
CFC	Kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CPT	Cured-Ply-Thickness, Dicke einer ausgehärteten Einzellage
CSiC	Kohlenstofffaserverstärktes Siliziumcarbid
CVD	Chemical-Vapour-Deposition
DFP	Dry-Fiber-Placement
FAW	Fiber-Aerial-Weight, Faserflächengewicht
Filamente	Feine Einzelfasern in einem Garnbündel
FMA	Faser-Matrix-Haftung
FVC	Fiber-Volume-Content, Faservolumengehalt im Faserverbundbauteil
HT-Faser	High-Tensile-Faser, hochzugfeste Faser
IM-Faser	Intermediate-Modulus-Faser, Zwischenmodul-Faser
K-Zahl	Anzahl Filamente in einem Garnbündel in 1000 Stück
MAG	Multiaxialgelege
MPP	Mesophasenpech
NCF	Non-Crimped-Fabric, siehe auch MAG (Multiaxialgelege)
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PEEK	Polyetheretherketon
PES	Polyethersulfon
PREOX	PPROXidized-Fiber, voroxidierte Faser

Prepreg	Vorimprägniertes Fasermaterial, PREimPREGnated Fibers
rCF	Recycelte Carbonfaser
RTM6	Luftfahrt-qualifiziertes Epoxidharzsystem
SMC	Sheet-Moulding-Compound
Tow	Bündel von Kohlenstoffaser-Filamenten, siehe auch Roving und Filament
UD-	unidirektional-
UHM-Faser	Ultra High Modulus Faser
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy

# Inhaltsverzeichnis

<b>Die Autoren</b> .....	<b>V</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>VII</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Kohlenstoff und seine Eigenschaften</b> .....	<b>5</b>
2.1 Struktur des Kohlenstoffatoms und Atommodell des Kohlenstoffs .....	6
2.1.1 <i>Rutherfordsches</i> und <i>Bohrsches</i> Atommodell .....	6
2.1.2 Atomorbitale und Hybridisierung .....	8
2.2 Modifikationen des Kohlenstoffs .....	10
2.3 Erscheinungsformen des Kohlenstoffs .....	12
2.3.1 Diamant – die Diamant-Struktur ( $sp^3$ ) .....	13
2.3.2 Graphit – die Graphit-Struktur ( $sp^2$ ) .....	14
2.3.3 Dreifachbindung ( $sp^1$ ) .....	14
2.3.4 Weitere Formen des Kohlenstoffs .....	14
2.3.4.1 Fullereene .....	15
2.3.4.2 Carbo-Nano-Tubes .....	15
2.3.4.3 Carbon-Black .....	15
2.3.4.4 Aktivkohle .....	15
2.3.4.5 Kohlenstoff-Fasern .....	16
<b>3 Kohlenstofffasern</b> .....	<b>19</b>
3.1 Precursor-Herstellung .....	20
3.1.1 Nassspinnen (Wet-Spinning) .....	21
3.1.2 Schmelzspinnen (Melt-Spinning) .....	23



3.1.3	Precursor .....	24
3.1.3.1	Polyacrylnitril (PAN) .....	24
3.1.3.2	Mesophasen-Pech .....	26
3.1.3.3	Weitere Precursoren .....	27
3.2	Herstellung von Kohlenstofffasern .....	28
3.2.1	Precursor-Stabilisierung/Stabilisierungsprozess .....	29
3.2.2	Carbonisierung und Graphitisierung .....	33
3.3	Oberflächenbehandlung und Faserschlichte .....	36
3.3.1	Sizing (Präparation) .....	38
3.3.2	Sizing-Level und Sizing-Typen .....	42
3.4	Eigenschaften und Typen .....	45
3.4.1	Eigenschaften von Kohlenstofffasern .....	45
3.4.2	Kohlenstofffaser-Typen .....	54
3.5	Hersteller und Kosten .....	60
3.5.1	Hersteller von Precursoren & Carbonfasern .....	60
3.5.2	Herstellkosten .....	62
3.5.3	Herstellungskapazitäten .....	65
3.5.4	Anbieter von Prozesstechnologien .....	69
<b>4</b>	<b>Charakterisierung von Kohlenstofffasern .....</b>	<b>81</b>
4.1	Prüfverfahren am trockenen Garn .....	83
4.1.1	Dichte-Bestimmung .....	83
4.1.2	Bestimmung der linearen Dichte .....	85
4.1.3	Bestimmung des Filamentdurchmessers .....	86
4.1.4	Bestimmung des Präparationsmassenanteils .....	87
4.1.5	Bestimmung mechanischer Kennwerte am trockenen Garn .....	88
4.1.6	Roving-Test .....	89
4.1.7	Drape-Test .....	90
4.1.8	Oberflächenaktivität und Imprägnierfähigkeit .....	92
4.2	Prüfverfahren am imprägnierten Garn .....	93
4.2.1	Bestimmung der Zugfestigkeit .....	93
4.2.2	Faser-Matrix-Anbindung .....	94
4.2.2.1	Prüfung mittels Pull-Out-Test .....	95
4.2.2.2	Prüfung mittels Push-Out-Test .....	98
4.2.2.3	Fragmentierungstest .....	99
4.2.2.4	Broutman-Test .....	100
4.2.2.5	Prüfung im Rasterelektronen-Mikroskop .....	100

4.3	Spektroskopische Prüfverfahren für Kohlenstofffasern	101
4.3.1	Chemische Charakterisierung von Kohlenstofffasern und ihrer Precursoren	102
4.3.1.1	Elementaranalyse	102
4.3.1.2	Massenspektroskopie	103
4.3.1.3	Kernresonanzspektroskopie – NMR	104
4.3.1.4	Fourier-Transformation-Infrarotspektroskopie, IR-Spektroskopie	105
4.3.2	Chemische Strukturaufklärung von Kohlenstofffasern	106
4.3.2.1	Raman-Spektroskopie	106
4.3.2.2	Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie, XPS	109
<b>5</b>	<b>Anwendungen von Carbonfasern</b>	<b>113</b>
5.1	Einleitung	113
5.2	Trockene Faserhalbzeuge	115
5.2.1	PREOX-Fasern	115
5.2.2	Kohlenstoff-Fasern	117
5.2.2.1	Kohlenstoff-Fasern, endlos	117
5.2.2.2	Kohlenstoff-Fasern, geschnitten oder gemahlen	134
5.3	Vorimprägnierte Faserhalbzeuge	142
5.3.1	Anwendungen UD-Prepreg (Thermoset)	143
5.3.2	Anwendungen Gewebe- und Gelege-Prepreg (Thermoset)	144
5.3.3	Anwendung C-SMC/C-BMC	148
5.3.4	Anwendung Organotapes	150
5.3.5	Anwendung Organoblech	152
<b>6</b>	<b>Recycling &amp; Nachhaltigkeit</b>	<b>155</b>
6.1	Einleitung	155
6.2	Recycling-Kreislauf und Herausforderungen	159
6.2.1	Herausforderungen an Prozess und Anlagen	161
6.2.2	Herausforderung Faserqualität	163
6.3	Herausforderung Abfallaufbereitung	169
6.4	Recyclingverfahren für Kohlenstofffasern und CFK	172
6.4.1	Mechanische Zerkleinerung	172
6.4.2	Pyrolyse-Verfahren	173
6.4.3	Wirbelschicht-Verfahren	175
6.4.4	Solvolyse	177
6.4.5	Chemische Direktnutzung	178
6.4.6	Elektrodynamische Fragmentierung	179

6.4.7	Neue Verfahren	180
6.4.8	Übersicht und Vergleich der Verfahren	181
6.4.9	Gefährdungen und Gesundheitsaspekte	182
6.5	rCF-Produkte und Anwendungen	183
6.6	Anbieter	188
6.7	Herausforderungen und Trend	189
<b>7</b>	<b>Neue Entwicklungen</b>	<b>193</b>
7.1	Alternative Precursoren	195
7.1.1	Polyethylen	195
7.1.2	Zellulose	196
7.1.3	Lignin	198
7.1.4	Textiles PAN	202
7.1.5	Lignin/PAN-Blends	202
7.1.6	Nanofasern und Kohlenstoff-Nanoröhrchen	203
7.2	Alternative Prozesse	203
7.2.1	Plasma-Oxidation	204
7.2.2	Einsatz von Additiven	204
7.2.3	Erdgas-Brenner	205
7.3	Ausblick	205
<b>Index</b>		<b>209</b>

# 1

## Einleitung

### **Einzigartigkeit**

Kohlenstofffasern oder Carbonfasern zeichnen sich durch hervorragende Eigenschaften aus. Ihre Festigkeit ist vergleichbar mit Hochleistungsstahl; ihre Steifigkeit ist höher als die von allen bekannten Metallen, Keramiken oder Polymeren. Selbst ihre thermische und elektrische Leitfähigkeit übertrifft die vergleichbarer Materialien (vgl. *Kapitel 3*). Die Einzigartigkeit der Eigenschaften von Carbonfasern wird umso deutlicher, wenn man die Festigkeit oder Steifigkeit durch die Materialdichte dividiert und so die spezifischen Eigenschaften erhält. Kein anderes bekanntes Material kann derzeit mit diesem Ergebnis konkurrieren [1 - 1].

### **Geschichte**

Carbonfasern sind ein synthetisches Produkt, deren Geschichte im Jahr 1879 mit der Erfindung der ersten Glühfadenlampe durch *Thomas Edison* begann. In der Absicht die bereits bekannte Lichtbogenlampe zu verbessern, hatte Edison mit feinen Baumwoll- und Bambusfasern experimentiert und diese unter hohen Temperaturen pyrolysiert (carbonisiert). Die entstandenen Kohlefäden wiesen eine gute elektrische Leitfähigkeit und Stabilität für die Anwendung in Glühlampen aus, wurden aber aufgrund der einfacheren Herstellbarkeit bald durch Wolframfäden für diese Anwendung abgelöst, so dass das Interesse zunächst wieder sank [1 - 2].

Die moderne Ära der Carbonfasern begann erst in den 1950iger und 1960iger Jahren, in denen grundlegende Arbeiten zur Entwicklung Charakterisierung erster Kohlenstofffasern auf Polyacrylnitril (PAN)-, Pech-, Viskose- und Rayon-Basis vor allem in den Entwicklungslaboren von Union Carbide und DuPont durchgeführt wurden. Man hatte entdeckt, dass durch die Pyrolyse kohlenstoffreicher Materialien eine orientierte Graphitstruktur entstand, die sehr hohe E-Modul und Festigkeitswerte aufwies, was sich in praktischen Versuchen an sogenannten Graphitwhiskern nachweisen ließ. Unter Whiskern versteht man fadenförmige Einzelkristalle mit anisotropem Gitteraufbau [1 - 3]. Bald wurde von mehreren Entwicklern voneinander unabhängig die Notwendigkeit der Verstreckung der Faser unter hohen Temperaturen ( $> 2800\text{ °C}$ ) erkannt, um die Eigenschaften, insbesondere das E-Modul, weiter zu

verbessern. Hierdurch ließen sich bis zu 10-fach höhere Steifigkeiten als ohne den Streckprozess erzielen. Eine der ersten kommerziellen Fasern von Union Carbide war die „Thornel-25“. Dieser Handelsname leitet sich von der nordischen Gottheit *Thor* („Stärke“) ab.

Zu Beginn der 1960iger Jahre konnten japanische Wissenschaftler in einer Studie erfolgreich die Herstellung von Hochmodulfasern bzw. hochsteifen Fasern auf Basis von Polyacrylnitril (PAN) als sogenannte Precursoren zeigen. Frühere Versuche US-amerikanischer Wissenschaftler waren hier gescheitert. Das Geheimnis hinter dieser Entwicklung waren verbesserte PAN-Precursoren, deren chemische Struktur (sogenannte Backbone) nach der Carbonisierung Grund für die exzellenten Eigenschaften war. In der gleichen Zeit gelang es englischen Wissenschaftlern ebenfalls hochmodulige Fasern auf PAN-Basis zu entwickeln, die alsbald kommerzialisiert wurden. All diese Entwicklungen sind die Grundlage für die heute verwendeten Carbonfasern. Durch die zunehmende Anwendung und Weiterentwicklung konnten die Herstellungskosten in den vergangenen 35 Jahren durch neue Verfahren und Rohstoffe drastisch reduziert werden [1–4].

Seit etwa dem Jahre 2010 fokussieren sich Forschung und auch anschließende Kommerzialisierung auf neue Precursoren wie z.B. Lignin und textiles PAN auf der einen Seite, wie auch Maßnahmen zur Energieeffizienz auf der anderen Seite (Plasma-Oxidation, Mikrowellen-Ofen) [1–5]. Die Kommerzialisierung dieser neuen Technologien treiben innovative Startups voran, wie z.B. *LeMond Composites*, *RMX* und *4M* [1–6] [1–7] [1–8].

### **Aktuelle Anwendungen**

Carbonfasern werden aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften in verschiedensten Industriebereichen eingesetzt. Die Beispiele reichen hier von Siliziumcarbid-Bremsscheiben für Flugzeuge und Sportwagen, über Tanks für Feststoffraketen für die Raumfahrt, Wasserstoff-Tanks und strukturelle Bauteile für Automobile, bis hin zu Anwendungen in der Bauindustrie und Sportartikeln. Ausführlich werden diese und weitere Beispiele in Kapitel 5 behandelt.

### **Recycling**

Kohlenstofffaserhaltige Abfälle fallen entlang der Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Carbonfasern und daraus hergestellten CFK-Bauteilen in unterschiedlichen Stadien und Erscheinungsformen an. Verfahren für das Recycling sind z.B. die Pyrolyse, das Wirbelschichtverfahren sowie die Solvolyse und die chemische Direktnutzung. Die dabei auftretenden Herausforderungen und der erzielbare Nutzen sind in Kapitel 6 ausführlich beschrieben.

## Zukünftige Trends

Zukünftige Anwendungen von Carbonfasern liegen im Bereich der additiven Fertigung (z. B. Big-Area-Additive-Manufacturing) aber auch breitere Anwendungen im Automobilbau und in konsumentennahen Bereichen erscheinen denkbar, wenn die Preise für Carbonfasern wie prognostiziert weiter fallen. Voraussetzung dafür wird aber die erfolgreiche Kommerzialisierung von neuen Precursoren und Konversions-technologies für die Herstellung von Carbonfasern sein.

## Literatur zu Kapitel 1

- [1-1] *Handbook of Composites*, 2. Auflage, edited by S.T. Peters, Chapman&Hall 1998, ISBN 0-412-54020-7
- [1-2] T. Edison; US 470925 1880-03-15
- [1-3] *Faserverbundbauweisen*, M. Flemming, G. Ziegmann, S. Roth, Springer Verlag 1995, ISBN3-540-58645-8
- [1-4] *High Performance Carbon Fibers*, National Historic Chemical Landmarks of American Chemical society, September 2003, <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/carbonfibers.html>
- [1-5] H. Mainka, O. Täger, E. Körner, L. Hilfert, S. Busse, F.T. Edelman, A.S. Herrmann, *Lignin - an alternative precursor for sustainable and cost-effective automotive carbon fiber*; Journal of Materials Research and Technology; Volume 4, Issue 3, July-September 2015, Pages 283-296
- [1-6] Le Mond: <http://lemond.cc/>, Abrufdatum Februar 2019
- [1-7] RMX Technologies: <http://www.rmstechnologies.net/>, Abrufdatum Februar 2019
- [1-8] 4M: <http://4mio.com/>, Abrufdatum Februar 2019



# 2

## Kohlenstoff und seine Eigenschaften

Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Kohlenstoff. Dazu werden die Struktur des Kohlenstoffatoms und sein Atommodell erläutert, sowie die drei möglichen Modifikationen des Kohlenstoffs erklärt. Eine kurze Übersicht der Erscheinungsformen des Kohlenstoffs verknüpft die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Kohlenstoff auf molekularer Ebene mit den makroskopischen Eigenschaften der jeweiligen Erscheinungsform.

Im Periodensystem steht Kohlenstoff mit einer molaren Masse von 12,011 g/mol an sechster Stelle. Kohlenstoff hat 7 Isotope, von denen  $^{12}\text{C}$  mit 98,89% und  $^{13}\text{C}$  mit 1,108% die beiden häufigsten und einzig stabilen Isotope sind. Die Isotope  $^{10}\text{C}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{15}\text{C}$  und  $^{16}\text{C}$  sind radioaktiv, d. h. sie zerfallen unter Emission von  $\beta$ -Strahlung, welche entweder negativ (Elektron) oder positiv (Positron) sein kann [2-1].

Kohlenstoff kommt in der Natur sowohl in gediegener (reiner) Form (z. B. Diamant, Graphit, Fullerene) als auch chemisch gebunden (z. B. in Form von Carbiden, Carbonaten, Kohlenstoffdioxid, Erdöl, Erdgas und Kohle) vor. Aufgrund seiner besonderen Elektronenkonfiguration (Abschnitt 2.1.2) besitzt Kohlenstoff die Fähigkeit zur Bildung komplexer Moleküle und weist von allen chemischen Elementen die größte Vielfalt an chemischen Verbindungen auf. Diese Komplexität zeigt sich auch in der Allotropie des Kohlenstoffs mit seiner Vielzahl an Verbindungen und ihren spezifischen Eigenschaften (Abschnitt 2.3). So ist zum Beispiel Diamant das härteste bekannte Material, während Graphit relativ weich ist.

Verbindungen von Kohlenstoff und Wasserstoff bilden mit einer Variantenvielfalt von über sechs Millionen bekannten Verbindungen die Grundlage der organischen Chemie [2-2].



## ■ 2.1 Struktur des Kohlenstoffatoms und Atommodell des Kohlenstoffs

Im Laufe der Geschichte wurde das Atommodell des Kohlenstoffs ständig verbessert und erweitert. Die Bandbreite reicht angefangen vom *Thomsonschen* Atommodell, nach dem das Atom aus gleichmäßig verteilter Masse und positiver Ladung besteht, in denen sich die Elektronen bewegen, bis hin zum Hybridorbitalmodell, welches rechnerisch aus einer Linearkombination der Wellenfunktionen der grundlegenden Atomorbitale abgeleitet wurde.

In diesem Kapitel werden daher das *Rutherfordsche* sowie *Bohrsche* Atommodell und das Hybridorbitalmodell kurz betrachtet, um die möglichen Modifikationen des Kohlenstoffs verständlicher zu machen.

Das *Rutherfordsche* Atommodell ist ein Atommodell, das 1911 von *Ernest Rutherford* aufgestellt wurde. Es korrigiert das bis dahin gültige *Thomsonsche* Atommodell.

Das *Bohrsche* Atommodell wiederum baut auf dem *Rutherfordschen* auf und bildet damit die Grundlage für die Atomorbitale und Hybridisierung des Kohlenstoffs, welche in Abschnitt 2.1.2 erläutert werden.

### 2.1.1 *Rutherfordsches* und *Bohrsches* Atommodell

Unter Verwendung der nach ihm benannten Streuformel leitete *Rutherford* aus Experimenten Werte für die Größe und Ladungsverteilung verschiedener Elemente ab. Dabei kam er zu dem Schluss, dass die enorme elektrische Feldstärke, die für die gemessene starke Ablenkung von Alpha-Teilchen erforderlich ist, nur unter der Annahme erklärbar ist, dass die positive Ladung des Atoms vollständig in einem kompakten Atomkern konzentriert ist, dessen Radius um ca. einen Faktor 3000 kleiner als der Atomradius ist.

Zur Erklärung der elektrischen Neutralität von Atomen ging *Rutherford* davon aus, dass der Atomkern von Elektronen umgeben wird, wobei die Gesamtanzahl der Elektronen pro Atom genau der Kernladungszahl entspricht. Über die räumliche Verteilung der Elektronen ließen sich allerdings aus den Experimenten keine Informationen ableiten, da die Elektronen aufgrund ihrer geringen Masse nicht in nachweisbarem Umfang zur Ablenkung der Alphastrahlen beitragen [2–3].

*Rutherford* entwickelte kein eigenes Modell der elektronischen Struktur von Atomen, er zitierte lediglich *Nagaokas* „Saturnmodell des Atoms“, um seine Abschätzung der Kernladungszahl zu plausibilisieren [2–4].