

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Carbonfasern“

von Hauke Lengsfeld, Hendrik Mainka und  
Volker Altstädt

Print-ISBN: 978-3-446-45407-1  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46080-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45407-1>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# 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

# 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

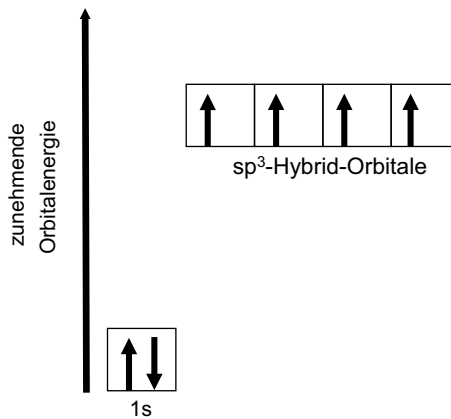
Zukünftige Anwendungen von Carbonfasern liegen im Bereich der additiven Fertigung (z. B. Big-Area-Additive-Manufacturing) aber auch breitere Anwendungen im Automobilbau und in konsumentennahen Bereichen erscheinen denkbar, wenn die Preise für Carbonfasern wie prognostiziert weiter fallen. Voraussetzung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

Jetzt würden dem Kohlenstoffatom zwar vier Bindungselektronen zur Verfügung stehen. Diese Bindungen würden sich jedoch energetisch und in ihrem Überlappungsgrad der Orbitale, also ihrer Bindungslänge zu anderen Atomen in Molekülen, unterscheiden.

Bei der Molekülbildung zum Beispiel des Methans aus seinen Elementen wird eines der beiden 2s-Elektronen durch Energiezufuhr in das unbesetzte 2p-Orbital-Niveau gehoben, wodurch sich nun vier Einzelelektronen ungepaart in vier einzelnen Orbitalen befinden. Die für diesen Vorgang benötigte Energie von etwa 400 kJ/mol wird durch die bei der Bindung mit vier Wasserstoffatomen frei werdende Energie überkompensiert. Nun kommt es zu einer Mischung des einzelnen s-Orbitals mit allen drei p-Orbitalen, was zu vier gleichwertigen Mischorbitalen führt.



**Bild 2.5** sp<sup>3</sup>-Hybrid-Orbitale des Kohlenstoffatoms [2–2]

Diese Orbitale werden Hybridorbitale genannt und für die unterschiedlichen Modifikationen und Erscheinungsformen des Kohlenstoffs verantwortlich gemacht, welche im Folgenden erläutert werden.

## ■ 2.3 Erscheinungsformen des Kohlenstoffs

Diamant und Graphit sind die beiden wichtigsten Erscheinungsformen des Kohlenstoffs in infiniten festen Kohlenstoff-Verbindungen.

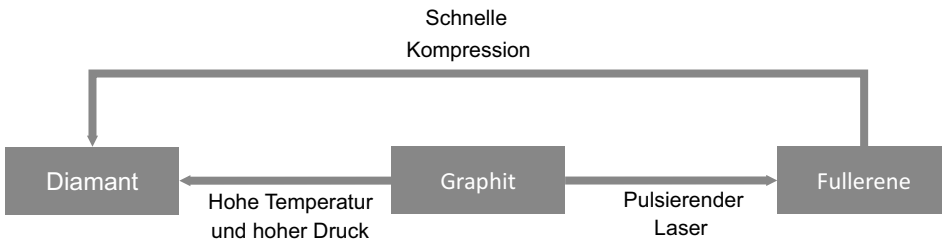
Im Diamanten ist jedes Kohlenstoffatom sp<sup>3</sup> hybridisiert und von vier weiteren Kohlenstoffatomen umgeben. Alle Bindungen im Diamanten sind kovalente Bindungen und haben eine Bindungslänge von 0,154 nm. Auf Grund der sp<sup>3</sup>-Hybridi-

sierung ergibt sich im Diamanten die Grundform als Tetraeder in dem die Kohlenstoffatome angeordnet sind.

Im Graphit ist der Kohlenstoff  $sp^2$  hybridisiert, was zu einer planaren (ebenen) Struktur führt, in dem jedes Kohlenstoffatom mit drei weiteren Kohlenstoffatomen verbunden ist. Die drei kovalenten Bindungen haben eine Bindungslänge von 0,1415 nm. Die einzelnen Schichten des Graphits sind untereinander nur relativ schwach gebunden. Diese Bindung wird als *Van-der-Waals*-Bindung bezeichnet.

1985 wurde mit den Fullerenen eine neue Form des Kohlenstoffs entdeckt, welche sowohl  $sp^2$ - als  $sp^3$ -hybridisierten Kohlenstoff enthält.

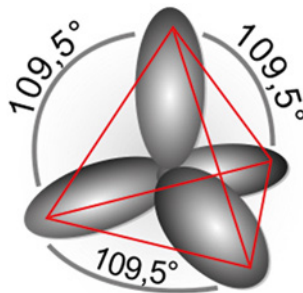
Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Erscheinungsformen des Kohlenstoffs ist in der nachfolgenden Abbildung zusammengefasst [2–14].



**Bild 2.6** Die Erscheinungsformen des Kohlenstoffs

### 2.3.1 Diamant – die Diamant-Struktur ( $sp^3$ )

Im Diamanten sind die Kohlenstoffatome durch kovalente Bindungen dreidimensional verknüpft. Jedes Kohlenstoffatom ist tetraedrisch von vier Kohlenstoffatomen umgeben. Es wird durch vier  $\sigma$ -Bindungen an seine Nachbaratome gebunden. Die C-C-Einfachbindungen (Länge: 1,5445 Å) kommen durch Überlappung tetraedrisch ausgerichteter  $sp^3$ -Hybridorbitale zustande, siehe Bild 2.7.

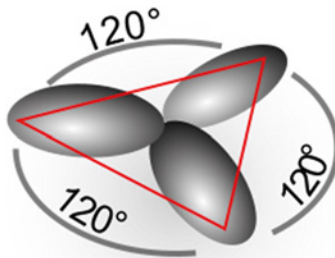


**Bild 2.7** Vier  $sp^3$ -Orbitale – tetraedrisch in gleichem Winkel [2–12]

### 2.3.2 Graphit – die Graphit-Struktur ( $sp^2$ )

Graphit setzt sich aus übereinander gelagerten ebenen Kohlenstoffschichten zusammen.

Innerhalb der Schichten ist jedes Kohlenstoffatom von drei Nachbarn in Form eines Dreiecks umgeben. Jedes Kohlenstoffatom ist  $sp^2$ -hybridisiert und bildet mit drei seiner vier Außenelektronen drei lokalisierte  $\sigma$ -Bindungen zu seinen drei Atommachbarn aus. Die vierten Valenzelektronen der Kohlenstoffatome sind in delokalisierten  $\pi$ -Molekülorbitalen untergebracht, die aus einer Kombination der an der Hybridisierung nicht beteiligten, zu den  $sp^2$ -Hybridorbitalen senkrecht orientierten p-Atomorbitalen der Kohlenstoffatome resultieren. Somit sind die Kohlenstoffatome des Graphits, sowohl durch  $\sigma$ -Bindungen als auch  $\pi$ -Bindungen miteinander verknüpft. Im Graphit sind alle C-C-Bindungen gleich lang.



**Bild 2.8** Drei  $sp^2$ -Orbitale sind in einer Ebene symmetrisch (trigonal) [2-13]

### 2.3.3 Dreifachbindung ( $sp^1$ )

Wenn nur ein p-Orbital mit dem s-Orbital hybridisiert, ergeben sich zwei linear angeordnete  $\pi$ -Bindungskeulen. Orientieren wir sie entlang der x-Achse, liegen die verbliebenen p-Orbitale auf den y- und z-Achsen. Zwei  $sp^1$ -hybridisierte Atome können eine Kohlenstoff-Dreifachbindung formen. Ein Beispiel ist das Gas Ethin (Acetylen)  $HC\equiv CH$ . Während  $sp^3$ -Bindungen dreidimensionale Strukturen formen und  $sp^2$  zweidimensionale, bilden  $sp^1$ -Bindungen höchstens eindimensionale (lineare) Ketten, wie zum Beispiel beim Acetylen  $H-C\equiv C-H$ .

### 2.3.4 Weitere Formen des Kohlenstoffs

Elementarer Kohlenstoff existiert in den drei vorgestellten Modifikationen, basierend auf den Bindungsstrukturen  $sp^3$  und  $sp^2$ : Diamant, Graphit sowie  $sp^1$  Dreifach-



# 3

## Kohlenstofffasern

Eine Kohlenstofffaser, auch Carbonfaser genannt, ist ein endlos langer, sehr dünner Materialstrang mit einem Durchmesser von ca. 5 bis 10  $\mu\text{m}$ , im Wesentlichen bestehend aus reinem Kohlenstoff. Die Kohlenstoffatome sind in einer Graphitstruktur weitgehend parallel zur Faserachse angeordnet, was die hohe Stabilität der Faser ausmacht. Viele tausend dieser Kohlenstofffilamente zusammengenommen, formen ein Faserbündel, das auch als Roving oder Tow bezeichnet wird.

Die Basis und damit der Ausgangsstoff einer jeden Kohlenstofffaser ist ihr Precursor. Seit den frühen Arbeiten von *Thomas Edison* und der Verwendung von Zellulose-basierten Kohlenstofffasern in Glühlampen, wurde eine Vielzahl von Precursoren für die Herstellung von Kohlenstofffasern getestet [3-1]. Heute gibt es zwei kommerziell verfügbare Precursoren: *Polyacrylnitril (PAN)* und *Pech*.

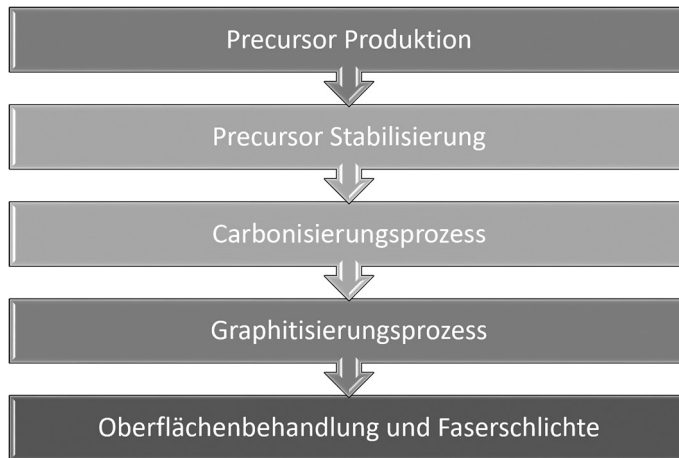
- PAN-basierte Kohlenstofffasern dominieren den Markt und stellen mehr als 90 % des Weltmarktes dar. Dieses lässt sich vor allem mit der guten Verfügbarkeit des Precursors PAN und dessen konstanter Qualität begründen.
- Die verbleibenden etwa 10 % des Weltmarktes werden von pechbasierten Kohlenstofffasern besetzt. Neben den klassischen PAN- und Pech-basierten Precursor gibt es einige vielversprechende neue Ansätze auf anderer chemischer Basis geeignete Ausgangsverbindungen zu erhalten (siehe Kapitel 7).

Wärmebehandlung ist der konventionelle Prozess, mit dem Kohlenstofffasern heute hergestellt werden. Bild 3.1 zeigt schematisch den mehrstufigen Herstellungsprozess für Kohlenstofffasern auf Basis von Polyacrylnitril – ein Prozess, der sowohl chemische wie auch mechanische (Verstrecken der Fasern) Anteile enthält. Dabei werden drei charakteristische Prozessschritte durchlaufen:

1. Precursor-Herstellung
2. Oxidative Stabilisierung
3. Carbonisierung/Graphitisierung

Das Schema lässt erahnen wie aufwendig und kostenintensiv die Produktion von Kohlenstofffasern, insbesondere durch die energieintensive Wärmebehandlung

ist. Es handelt sich dabei um ein quasi-kontinuierliches Verfahren mit mehreren Wochen Produktionsdauer für ein Fertigungslos.



**Bild 3.1** Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses für Kohlenstofffasern

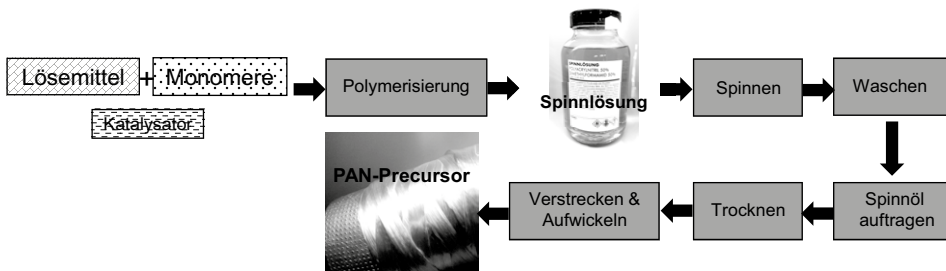
Nach der ersten Carbonisierung erhält man sogenannte Standardfasern oder hochfeste Fasern (HS- und HT-Typen). Für Hochmodul-Fasern (IM, HM, UHM-Typen) folgt noch ein weiterer Schritt, die Graphitisierung. Am Ende des Produktionsprozesses besteht die erhaltene Kohlenstofffaser aus > 95 % reinem Kohlenstoff.

## ■ 3.1 Precursor-Herstellung

Fundamentale Voraussetzung zur Herstellung von Kohlenstofffasern sind geeignete Precursoren. Bei diesen handelt es sich um langkettige, organische Polymere mit charakteristischen Eigenschaften, die die späteren Eigenschaften der daraus erhaltenen Kohlenstofffaser wesentlich bestimmen. Die exakte chemische Zusammensetzung der Precursor variiert von Hersteller zu Hersteller und ist i. d. R. ein streng gehütetes Geheimnis, da die Entwicklung einer neuen Fasertypen 10 Jahre und mehr Entwicklungsarbeit bedeuten kann. Die meisten Hersteller von Kohlenstofffasern produzieren auch ihren eigenen Precursor oder mehrere verschiedene, je nach Angebotspalette. Typische variable Einflussparameter bei der Precursor-Herstellung sind die verwendeten Lösungsmittel, Typen und Mengen von verwendeten Co-Monomeren, Grad des Precursor-Garnschrumpfs und Verstreckung des Garns im Prozess. Ein Precursor sollte so ökonomisch und ökologisch wie möglich sein, da auf dem Weg zur Kohlenstofffaser rund 50 % der Ausgangsmasse des Precursors in Folge

der chemischen Umwandlungsprozesse als gasförmige Nebenprodukte verloren gehen. Ein idealer Precursor für Kohlenstofffasern weist bereits einen hohen Kohlenstoffgehalt auf und kann zu einem dünnen Precursor-Garn verspinnen, mechanisch verstreckt und anschließend in eine Kohlenstofffaser konvertiert werden. Durch die mechanische Verstreckung wird die Feinheit des Garns weiter erhöht, also der Faserdurchmesser reduziert. Die Verstreckung sorgt zudem für eine vorteilhafte Ausrichtung der Molekülketten entlang der Faserachse, was für die mechanischen Eigenschaften der späteren Kohlenstofffaser wichtig ist.

Es existieren zwei wesentliche Prozesse zur Herstellung eines Precursor-Filaments: der *Nassspinn- und Schmelzspinn-Prozess*. Nassspinnen ist der am häufigsten genutzte, kommerzielle Prozess zur Herstellung PAN-Precursor [3-2]. Dies beruht auf der Tatsache, dass die Zersetzungstemperatur von PAN unterhalb dessen Schmelztemperatur liegt. Der Schmelzspinnprozess wurde für PAN zwar auch entwickelt, aber bisher nicht großtechnisch umgesetzt [3-3].



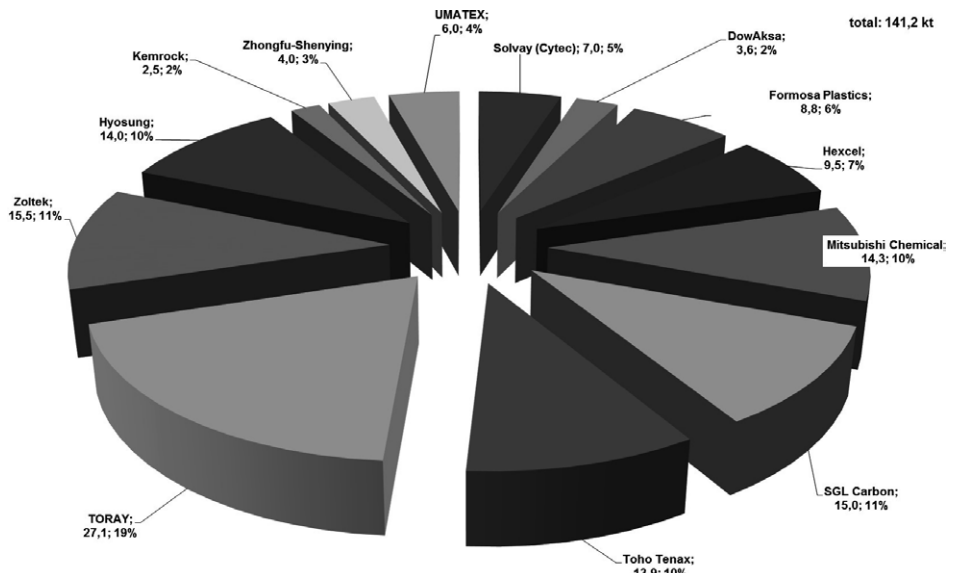
**Bild 3.2** Schematischer Ablauf Precursor-Herstellung

### 3.1.1 Nassspinnen (Wet-Spinning)

Bild 3.3 zeigt den typischen Prozessablauf einer kontinuierlichen Lösungsmittelpolymerisation mit anschließendem Nassspinnen. Dieser umfasst die zwei wesentlichen Schritte der sogenannten DOPE-Präparation (Polymerisation zum Polyacrylnitril) und der Koagulation (Verspinnen des PAN).

#### DOPE-Präparation

Zur Herstellung des *DOPE* wird pulverförmiges Acrylnitril mit weiteren Co-Monomeren, wie z. B. Methylacrylat und Methylmethacrylat, unter Verwendung eines Katalysators in Lösungsmitteln wie Dimethylformamid (DMF) oder Dimethylsulfoxid (DMSO) gelöst zu Polyacrylnitril umgesetzt. Statt einer lösemittelunterstützten Reaktion ist auch eine Umsetzung der Ausgangsstoffe in Suspension möglich. Um eine Verfestigung des Gemisches in Folge der Polymerisationsreaktion zu verhindern, wird bei Temperaturen zwischen 25 bis 120 °C gearbeitet. Die Dope-



**Bild 3.34** Jährliche, theoretische Herstellungskapazitäten für Kohlenstofffaser, Stand 09/2017 (nach [3-29] [3-34])

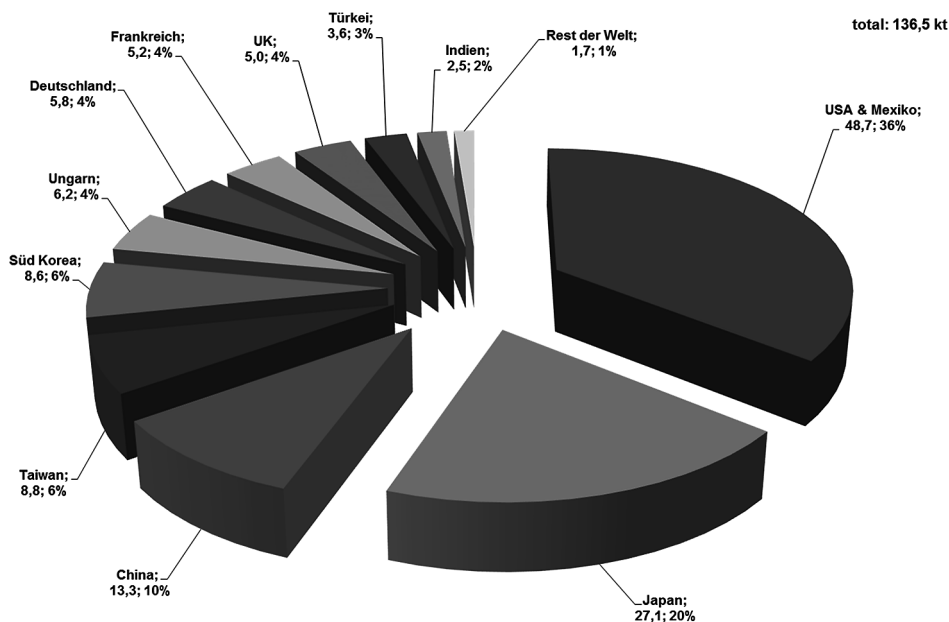
Diese auf Herstellerangaben basierenden Zahlen drücken nur die theoretisch herstellbare Menge, nicht aber den tatsächlichen Bedarf an Kohlenstofffasern am Weltmarkt aus. Es wird hierbei auch nicht zwischen unterschiedlichen Fasertypen, K-Zahl oder Anwendungsbereichen (Aerospace- oder Industrie-Faser) unterschieden. In Tabelle 3.11 sind die absoluten und prozentualen Kapazitäten je Hersteller aufgelistet. Bild 3.35 verdeutlicht die globale Kapazitätsverteilung noch einmal im Ländervergleich.

**Tabelle 3.11** Hersteller, Markenname und theoretische Herstellkapazitäten, Stand 09/2017

Hersteller	Typenbezeichnung	Kapazität in kt	Kapazität in %
Solvay (Cytec)	Thorne1®	7,0	5%
DowAksa	k. A.	3,6	3%
Formosa Plastics	Tairyfil	8,8	6%
Hexcel	Magnamite, HexTow®	9,5	7%
Mitsubishi Chemical	DIALED®, Pyrofil, Grafil	14,3	10%
SGL Carbon	SIGRAFIL®	15	11%
Tejin Carbon	Tenax®-E, Tenax®-J	13,9	10%
TORAY	TORAYCA®	27,1	19%
Zoltek	PANEX®	15,5	11%

Hersteller	Typenbezeichnung	Kapazität in kt	Kapazität in %
Hyosung	TANSOME®	14	10%
Kemrock	JAITEC®	2,5	2%
Zhongfu-Shenyng	SYT45	4	3%
Umatex (ROSATOM)	UMT®	6	4%
	<b>Total kt</b>	<b>141,2</b>	

Die Grafik in Bild 3.35 zeigt die nach Herstellungsländern unterteilte theoretische Produktionskapazität. Mehr als 60 % der Kapazitäten entfallen dabei auf drei große Regionen: Nord- und Mittelamerika (36 %), Japan (20 %) und China (10 %).



**Bild 3.35** Theoretische Produktionskapazität je Herstellungsland, Stand 09/2017 (nach: [3–23])

Den theoretischen Herstellkapazitäten gegenüber steht der globale Bedarf an Carbonfasern. Hier haben sich die Mengen seit 2010 etwa verdoppelt. Es wird ein Anstieg bis 2020 auf mehr als 100 000 t/pa erwartet, was etwa einer Verdreifachung des Bedarfs seit 2010 entspräche [3–23]. Neben der jährlichen Entwicklung des globalen Gesamtbedarfs zeigt Bild 3.36 auch die Prognose der prozentualen Steigerung bis 2020. Hier wird eine jährliche Zunahme von rund 11 % erwartet [3–23].

## 4.1.2 Bestimmung der linearen Dichte

### Gravimetrische Bestimmung

Das Prinzip zur Bestimmung der linearen Dichte beruht auf der gravimetrischen Bestimmung einer Faserbündelprobe definierter und bekannter Länge. Die Messung kann an Kohlenstofffasergarn mit oder ohne Präparationsauftrag (Sizing) erfolgen. Die Probe wird vor der Messung unter Normklima konditioniert bzw. getrocknet. Das Sizing kann vorher mittels Lösemittlextraktion, Pyrolyse oder durch einen chemischen Aufschluss entfernt werden. In diesem Fall entfällt die Trocknung der Probe.

Zunächst wird das Leergewicht eines geeigneten Spulenkörpers, wie z.B. einer Garnweife, bestimmt. Dieser wird dann mit einer beschädigungsfreien Faserprobe definierter Länge bewickelt. Die Probenlänge richtet sich gemäß Tabelle 4.3 nach der nominellen, linearen Dichte der Faser.

**Tabelle 4.3** Übersicht Probenlängen vs. nomineller lineare Dichte

Faserart	Nominelle lineare Dichte $T_f$ in tex	Probenlänge in m
Kohlenstofffaser	$T_f < 50$	Länge so wählen, dass Masse $\geq 0,25$ g
	$50 < T_f < 125$	5
	$125 < T_f < 250$	2
	$250 < T_f$	1

Die Masse  $m$  der Faserprobe berechnet sich aus der Differenz der beiden Wägungen (Gewicht Leerspule bzw. bewickelte Spule).

Die lineare Dichte  $T_f$  in g/Kilometer der Faser ergibt sich anhand folgender Gleichung und wird in der Einheit tex angegeben:

$$T_f = \frac{1000 * m}{L}$$

$m$  = Masse der Probe in g

$L$  = Probenlänge in m

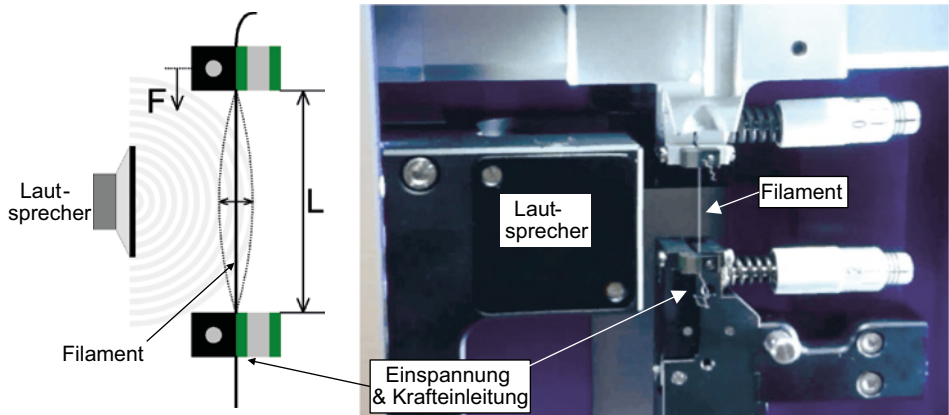
### Vibrationsmethode

Eine weitere Methode zur Bestimmung der linearen Dichte beruht auf dem Prinzip der vibroskopischen Messung (ISO 1973). Bild 4.1 zeigt einen von der Firma *Textecho GmbH* entwickelten Aufbau, der die Messung weitgehend automatisiert [4-3]. Hierzu wird ein Filament aus einem Garnbündel in die Messapparatur eingelegt und über einen Lautsprecher durch einen sinusförmigen Frequenzsweep in Schwingung versetzt. Aus der bei konstanter Messlänge  $L$  und bekannter Vorspan-

nung  $F_V$  gemessenen Resonanzfrequenz  $f$  des Filaments kann nach folgender Gleichung die lineare Dichte berechnet werden:

$$T_f = \frac{F_V}{4 * f^2 * L^2} \quad (4.2)$$

$T_f$  = lineare Dichte  
 $F_V$  = Vorspannkraft  
 $f$  = Resonanzfrequenz  
 $L$  = freie Probenlänge



**Bild 4.1** Messanordnung zur vibroskopischen Bestimmung der linearen Dichte [Textechno GmbH]

#### Normative Verweise:

- ISO 1889: Verstärkungsfasern – Bestimmung der linearen Dichte
- ISO 1973:1995-12: Textilien – Fasern – Bestimmung der Feinheit – Gravimetrisches Verfahren und Schwingungsverfahren
- ASTM D 1577: Standardtest-Methode zur Bestimmung der linearen Dichte von Textilfasern
- ISO 291: Kunststoffe – Standard-Atmosphäre zur Konditionierung und Prüfen
- ISO 10548:2002: Bestimmung des Präparationsmassenanteils

#### 4.1.3 Bestimmung des Filamentdurchmessers

Der Filamentdurchmesser kann gemäß ISO 1973 mit derselben vibroskopischen Messanordnung (Bild 4.1) wie der zur Bestimmung der linearen Dichte ermittelt werden. Aus der bei konstanter Messlänge  $L$  und bekannter Vorspannung  $F_V$  sowie Resonanzfrequenz  $f$  des Filaments kann nach der unten stehenden Gleichung die

# 5

## Anwendungen von Carbonfasern

### ■ 5.1 Einleitung

Aufgrund der hervorragenden und vielfältigen Eigenschaften von PAN-basierten Fasern werden diese in den unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt. Im Folgenden werden Anwendungsbeispiele der verschiedenen Fasertypen (PREOX- und Carbon-Faser) gegeben sowie die unterschiedlichen Aufmachungen (endlos, geschnitten, gemahlen) beispielhaft erläutert.

Das Schema in Bild 5.1 zeigt exemplarisch die Vielfalt an trockenem wie auch an vorimprägnierten Faserhalbzeugen, ausgehend von der PAN-Faser als Precursor über die PREOX-Faser bis hin zur Kohlenstofffaser. Ferner werden die verschiedenen möglichen Verarbeitungstechnologien auf dem Weg zu einem Endprodukt aufgezeigt.

Ausgehend von einem endlosen PAN-Precursor, dessen *K-Zahl* je nach Endanwendung variiert werden kann (siehe auch Kapitel 3), wird auf dem Weg zur Carbonfaser im ersten Produktionsschritt eine sogenannte PREOX-Faser hergestellt. Diese kann entweder direkt zur Carbonfaser weiterverarbeitet werden, oder – wie auch die aus der nächsten Herstellungsstufe gewonnene Carbonfaser – weiteren textilen Verarbeitungsprozessen in Form von Endlos- oder Kurzschnittfaser bzw. Fasermehl zugeführt werden. Die jeweilige *K-Zahl* des Precursors richtet sich vor allem nach der späteren Anwendung der Faser. Sie beeinflusst das Eigenschaftsniveau und damit auch erheblich den Faserpreis. Während beispielsweise für Luftfahrtanwendung ausschließlich niedrige *K-Zahlen* von 3 bis 24 K verwendet werden, sind für Industrie- und Automobilanwendungen Garnfeinheiten von 50 bis 400 K üblich.



Faser-Halbzeug-Herstellung			weitere Verarbeitung					
			Ablage, Handhabung, Zuschnitt		Matrixzugabe	Aushärtung / Konsolidierung		
trockenes Faser-Halbzeuge	vorimprägniert mit TS / TP Matrix	trockene Halbzeuge	Halbzeug mit Matrix		trockene Halbzeuge	Halbzeug mit Matrix		
			TS-Matrix	TP-Matrix		TS-Matrix	TP-Matrix	
PAN-Precursor Pre-OX Faser Kohlenstofffaser-Roving	endlos Gewebe		Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen					
	geschnittene Schnittfaser ca. 60-100 mm			(teil)automatisiertes Ablegen		CFC, CSiC	Pressen	
			Wickeln, Pultrusion			Harz-Infusionsverfahren	AKL, Presse, Ofen, RT	
		UD-Prepreg		ATL, AFP			AKL, Presse, Ofen	
		UD-Roving	UD-Thermoplast-Tape		ATL, AFP		AKL, Presse	
			DPP-Material	ATL, AFP		Harz-Infusionsverfahren	AKL, Ofen	
				Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen		Infusionsverfahren (TS / TP), Handlaminiieren	AKL, Presse, Ofen, RT	
		endlos Gewebe	Gewebe-Prepreg		Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen		AKL, Presse, Ofen, RT	
			Gewebe-Organoblech		Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen		AKL, Presse	
				Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen		Infusionsverfahren (TS / TP), Handlaminiieren	AKL, Presse, Ofen, RT	
		MAG / NCF	NCF-Prepreg		Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen		AKL, Presse, Ofen, RT	
			NCF-Organoblech		Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen		AKL, Presse	
		geschnittene Schnittfaser ca. 1-100 mm	SMC / BMC Massen		Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen		Pressen, Extrusion	
			TP-Granulate				Spritzguss, Extrusion	
		gemahlene Fasermehl ca. 30-150 µm	TP-Granulate			Extrusion FDM-Filamente u. Herstellung SLS-Pulver	Spritzguss, Extrusion, ALM Lasersintern	

**Bild 5.1** Vom Precursor zur Anwendung

Die Weiterverarbeitung der Fasern erfolgt je nach Anwendung entweder als Trockentextil (mit späterer Matrixzugabe) oder als mit Matrix vorimprägniertes Halbzeug (z.B. Thermoset, Thermoplast). Das Schema in Bild 5.1 zeigt wie die zuvor erhaltene große Bandbreite an Zwischenhalbzeugen dann auf unterschiedlichste Weise zum fertigen Bauteil verarbeitet werden kann.

Im Folgenden werden Beispiele für die Anwendung von Carbonfasern sowie deren Verarbeitung zu Bauteilen gegeben.

# Index

## Symbole

3D-Drucktechnologie 137

## A

### Abfall

- Aufbereitung 169
- Prepregreste 155
- Restspulen 155
- Vermeidung Aufbereitung 157
- Verschnittreste 155

Airlaid-Verfahren 184

Aktivkohle 15

Alternative Precursoren 195

*Siehe Precursor*

### Anbieter

- Recyclingprodukte 188
- Recyclingverfahren 188

Anbieter von Prozesstechnologien 69

Anbieter von rCF 189

### Anwendungen 113

- 3D-Drucktechnologie 137
- Automobilstruktur 134
- Bauwesen 131
- CFC-Transportkette 124
- CFK-Lamellen 123
- CFK-Schwungscheibe 120
- C-SMC 148
- DFP-Tapes 125
- Druckkalotte 131
- Dry-Fiber-Placement-Tapes 125
- Estrichbeton 140

- Flächenheizung 140
- Flugzeug-Spoiler 130
- hybride B-Säule 146
- Karosserieleichtbau 146
- Organoblech 152
- Organotape 150
- Pullwinding-Profile 122
- Pultrusionsprofile 121
- Rumpfanschlussbeschlag 145
- Seitenaufprallträger 121
- Seitenleitwerk 144
- Skis und Snowboards 145
- Spritzguss 136, 137
- Tanks für Feststoffraketen 118
- Verbindungsclip 149
- Wellenerdung 124

## B

BMC-Pressmasse 185

Broutman-Test 100 *Siehe Prüfverfahren*

## C

Carbo-Nano-Tubes 15

Carbon-Black 15

Carbonfaser 19, 113

*Siehe Kohlenstofffaser*

Carbonfaservlies 140

*Siehe Flächenheizung*

Carbonisierung 28, 194

*Siehe Herstellung Kohlenstofffasern*

Carbonpapier 184 *Siehe Wirrfaservliese*

C-BMC 148

Chemische Direktnutzung 178

„Closed-Loop“-Konzept 160

C-SMC 148

## D

Denier 51 *Siehe Titer*

Deponierung 157

Dichte-Bestimmung 83

*Siehe Prüfverfahren*

DOPE 21 *Siehe Precursor-Herstellung*

Drape-Test 82

Drapierbarkeit 82

Dreher im Garnbündel 82

Druck-Filament 137

## E

Eigenschaften von Kohlenstofffasern 45

– allg. Eigenschaften 50

– Carbonfaser-Typen 50

– chemische u. physikalische Eig. 50

– elektrische Eig. 50

– elektromagnetische Eig. 50

– Faserflächengewicht 53

– Faserpreis und Titer 65

– Filamente 52

– Garnfeinheit 51

– Kohlenstoff-Einkristall 46

– K-Zahl 52

– mechanische Eig. 50

– Parakristallinität 47

– Roving 52

– Schichtstruktur 45

– thermische Eig. 50

– theoretisches Modul 45

– Titer 51

– Tow 52

– Vergleich kommerzieller Kohlenstoff-faser 58

– Vergleich mechanischer Eig. 56

Elektrodynamische Fragmentierung 179,  
182

Elektropolymerisation 36

*Siehe Oberflächenbehandlung*

Elementaranalyse 102

*Siehe Prüfverfahren*

End-of-Life-(EoL)-Bauteile 155

Engelshaar 162

Entwicklungen

– neue Precursor 193

– neue Rohstoffe 193

– neue Verfahren 193

EoL-Bauteile 157

Erdgas-Brenner 205

Erscheinungsformen des Kohlen-  
stoffs 12

Estrichbeton 140

## F

Falschdraht 89

*Siehe Prüfverfahren Roving-Test*

Faserbruch 82

Faserflächengewicht 53 *Siehe Eigen-  
schaften von Kohlenstofffasern*

Faserknäuel 161, 165

Faserlängenbestimmung 164

Faser-Matrix-Anbindung 94

*Siehe Prüfverfahren*

Faser-Matrix-Haftung 35

Fasermehl 184

Faseroberfläche 163

Faserqualität 163

– 95%-Level 163

– defektfreie Faseroberfläche 163

– Matrixanhaftung 163

Faserreinheit 165

Faserschlichte 36

Faservermessung 164

Filamentdurchmesser 86

*Siehe Prüfverfahren*

Filamente 52 *Siehe Eigenschaften von  
Kohlenstofffasern*

Fourier Transformation Infrarotspektro-  
skopie 102 *Siehe Prüfverfahren*

Fragmentierungstest 99

*Siehe Prüfverfahren*

Fremdstoffe  
 – Aramidfaser 171  
 – Holz 171  
 – Kunststofffolien 171  
 – Metall 171  
 – Papier 171  
 – Polyesterfäden 171  
 – Waben 171  
 Fullerene 15

## G

Garnfeinheit 51 *Siehe Eigenschaften von Kohlenstofffasern*  
 Garnspreizung 82  
 Gefährdung  
 – Einatmen 182  
 – elektrisch 183  
 Gesundheitsaspekte 182  
 Gewebe 126  
 – Bauwesen 131  
 – Crimp-Faktor 127  
 – Leinwandbindung 128  
 – Ondulation 127  
 – Preform 133  
 – Prepreg 143  
 – Spreizgewebe 128  
 Graphitisierung 28 *Siehe Herstellung Kohlenstofffasern*

## H

Hersteller 60  
 – Anbieter von Prozesstechnologien 69  
 – Carbonfasern 60  
 – globaler Kohlenstofffaser-Bedarf 69  
 – Markennamen 66  
 – Precursoren 60  
 – tabellarische Übersicht Fasertypen 72  
 – theoretische Produktionskapazitäten 66  
 Herstellung Kohlenstofffaser 28  
 – alternative Prozesse 203  
 – Carbonisierung 19, 33, 194  
 – Einsatz von Additiven 204

– Energieverbrauch 194  
 – Erdgas-Brenner 205  
 – Graphitisierung 19, 33  
 – oxidative Stabilisierung 19  
 – Plasma-Oxidation 203  
 – Precursor-Herstellung 19  
 – Precursor-Stabilisierung 29  
 – Stabilisierung 194  
 Hybridgarn 186

## I

Imprägnierfähigkeit 82

## K

Kernresonanzspektroskopie 102  
*Siehe Prüfverfahren*  
 Klassifizierung 157  
 Kohlenstofffasern 16  
 – Anwendungen 113  
 – endlos 117  
 – gemahlen 134  
 – geschnitten 134  
 – UD-Rovings 118  
 Kohlenstofffaser-Typen 54  
 – AM-Fasern 55  
 – HM-Fasern 55  
 – HMS-Fasern 55  
 – HT/HS-Fasern 55  
 – IM-Fasern 55  
 – tabellarische Übersicht Fasertypen 72  
 – UHM-Fasern 55  
 – UHT/UTS-Fasern 55  
 – UMS-Fasern 55  
 Kohlenstoff-Nanoröhrchen 203  
 Kohlenstoff und seine Eigenschaften  
 – Aktivkohle 15  
 – Atommodell 6  
 – Atomorbitale 8  
 – Carbo-Nano-Tubes 15  
 – Carbon-Black 15  
 – chemisch 5  
 – Diamant-Struktur 13  
 – Dreifachbindung 14

- Fullerene 15
- Graphit-Struktur 14
- Hybridisierung 8
- Kohlenstofffasern 16
- Modifikationen 10
- physikalisch 5
- sp<sup>1</sup>-Hybridisierung 14
- sp<sup>2</sup>-Hybridisierung 14
- sp<sup>3</sup>-Hybridisierung 13
- Kontaktwinkelmessung 82
- Kosten 60
  - Energie 193
  - Faserpreis und Faserfestigkeit 65
  - Faserpreis und Titer 65
  - Herstellung Carbonfaser 62
  - Investition 193
  - Kostenverteilung 62
  - Precursor 193
- Kurzschnittfaser 183
- K-Zahl 52, 113, 127 *Siehe Eigenschaften von Kohlenstofffasern*

## L

- LFT-Granulat 136
- Lignin 195, 198
- Lignin/PAN-Blends 195, 202
- linearen Dichte, Bestimmung 85  
*Siehe Prüfverfahren*

## M

- Massenspektroskopie 102  
*Siehe Prüfverfahren*
- Materialmix 169, 171
- Matrixanhaftung 163
- Mechanisches Trennen 181
- Mehrfachnutzung 160
- Melt-Spinning 23 *Siehe Precursor-Herstellung, Schmelzspinnen*
- Mesophasen-Pech 26 *Siehe Precursor*
- Modifikationen des Kohlenstoffs 10
- Multiaxialgelege 126, 129

## N

- Nachhaltigkeit 155
- Nanofasern 203
- Nassspinnen 21
- nicht-oxidative Verfahren 36  
*Siehe Oberflächenbehandlung*

## O

- Oberflächenaktivität 92  
*Siehe Prüfverfahren*
- Oberflächenbehandlung 36
  - Anodische Oxidation 36
  - Elektropolymerisation 36
  - Nassoxidation 36
  - nicht-oxidative Verfahren 36
  - oxidative Verfahren 36
  - Pyrokohlenstoff 36
  - Thermische Oxidation 36
  - Whiskerbildung 36
- Oberflächenschädigung 166
- ökologischer Footprint 157
- Organoblech 143, 152
- Organotape 150
- Oxidationsöfen 29  
*Siehe Precursor-Stabilisierung*
- oxidative Stabilisierung 28  
*Siehe Herstellung Kohlenstofffasern*
- oxidative Verfahren 36  
*Siehe Oberflächenbehandlung*
- oxidative Zyklisierung 31  
*Siehe Precursor-Stabilisierung*

## P

- PAN-Precursor 113
- Parakristallinität 47 *Siehe Eigenschaften von Kohlenstofffasern*
- Plasma-Oxidation 204
- Polyacrylnitril 24 *Siehe Precursor*
- Polyethylen 195
- Präparation 38 *Siehe Sizing*
- Präparationsauftrag 177
- Präparationsmassenanteil 87  
*Siehe Prüfverfahren*

- Precursor 24
    - alternative 193
    - Hersteller 60
    - Kohlenstoff-Nanoröhrchen 203
    - Lignin 195, 198
    - Lignin/PAN-Blends 195, 202
    - Mesophasen-Pech 26
    - Nanofasern 203
    - Polyacrylnitril 24
    - Polyethylen 195
    - textiles PAN 195, 202
    - weitere Precursoren 27
    - Zellulose 195, 196
  - Precursor-Herstellung 20
    - DOPE-Präparation 21
    - Koagulation 22
    - Nassspinnen 21 *Siehe Precursor-Herstellung*
    - Schmelzspinnen 23
    - Spinnbad 22
    - Spinneret 22
  - Precursor-Stabilisierung 29
    - Siehe Herstellung Kohlenstofffasern*
    - Oxidationsofen 29
    - oxidative Zyklisierung 31
  - PREOX-Faser 33, 115
    - CFC 116
    - PANOX 115
    - PYROMEX 115
    - ZOLTEK OX 115
  - Prepreg 142
    - Gewebe-Prepreg 145
    - NCF-Prepreg 145
    - Slittape 143
    - Towpreg 143
  - Prüfverfahren
    - Broutman-Test 100
    - chemische Charakterisierung 102
    - Dichte-Bestimmung 83
    - Dichte-Gradienten-Säule 84
    - Drape-Test 90
    - Drapierbarkeit 90
    - Elementaranalyse 102
    - Faserbruch 89
    - Faser-Matrix-Anbindung 94
    - Filamentdurchmesser 86, 87
    - Fourier-Transformation-Infrarotspektroskopie 105
    - Fragmentierungstest 99
    - Gravimetrische Bestimmung 85
    - Imprägnierfähigkeit 92
    - Kernresonanzspektroskopie 104
    - Kontaktwinkelmessung 92
    - lineare Dichte 85
    - Massenspektroskopie 103
    - Oberflächenaktivität 92
    - Pull-Out-Test 95, 98
    - Raman-Spektroskopie 106
    - Rasterelektronen-Mikroskop 100
    - Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie 109
    - Roving-Test 89
    - Schwimm-Sink-Verfahren 84
    - spektroskopische 101
    - Verdrängungsverfahren 83
    - Vibrationsmethode 85
    - vibroskopische Messung 88
    - Zugfestigkeit 93
  - Pull-Out-Test 95, 98
    - Siehe Prüfverfahren*
  - Push-Out-Test *Siehe Prüfverfahren*
  - Pyrokohlenstoff 36
    - Siehe Oberflächenbehandlung*
  - Pyrolyse 181
    - Heißluft 174
    - induktive Erwärmung 180
    - Mikrowellen 174
  - Pyrolysetemperatur 173
  - Pyrolyse-Verfahren 173
- R**
- Raman-Spektroskopie 106
    - Siehe Prüfverfahren*
  - Rasterelektronen-Mikroskop 100
    - Siehe Prüfverfahren*
  - rCF 157
  - rCF-Halbzeuge 183
  - rCF-Kurzschnitt 184
  - rCF-Mehl 184

- rCF-Produkte 183
- BMC-Masse 185
  - Carbonpapier 184
  - Hybridgarn 186
  - Kurzschnittfaser 183
  - rCF-Fiberballs 184
  - rCF-Halbzeuge 183
  - rCF-Mehl 184
  - rCP-Kurzschnitt 184
  - rC-Stapelfasertape 186
  - SMC-Masse 185
  - Stapelfasergarn 185
  - Wirfaservliese 184
- rCP-Kurzschnitt 184
- rC-Stapelfasertape 186
- Recycling 155
- pyrolytisch 169
- Recyclingfirmen 189
- Recycling-Kreislauf 159
- Recyclingverfahren
- chemisch 172
  - mechanisch 172
  - thermisch 172
- Ressourcenschonung 155
- Rezyklatfaser 162
- Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie 109 *Siehe Prüfverfahren*
- Roving 52 *Siehe Eigenschaften von Kohlenstofffasern*
- Roving-Test 82
- S**
- Schmelzspinnen 23
- Siehe Precursor-Herstellung*
- Sizing 38
- Funktionales Sizing 43
  - nicht-permanentes Verarbeitungsizing 43
  - permanentes Verarbeitungsizing 43
  - Präparation 38
- Slittape 143
- SMC-Masse 185
- Solvolyse 159, 182
- Alkoholyse 177
  - Ammonolyse 177
  - Hydrolyse 177
- Spektroskopische Prüfverfahren 101
- Siehe Prüfverfahren*
- Spinnbad 22
- Siehe Precursor-Herstellung*
- Spinneret 22
- Siehe Precursor-Herstellung*
- Spritzgusstechnik 136
- Stabilisierung 194
- Stapelfasergarn 185
- Superkritische Fluide 178
- T**
- Tex 51 *Siehe Titer*
- Textiles PAN 195, 202
- Thermische Verwertung 157
- Titer 51
- Tow 52 *Siehe Eigenschaften von Kohlenstofffasern*
- Towpreg 143
- Trockene Faserhalbzeuge 115
- Trockenfaserabfall
- Verwertung 171
- U**
- UD-Organotape 143
- V**
- Verfahren
- Airlaid-Verfahren 184
  - chemische Direktnutzung 178
  - elektrodynamische Defragmentierung 179
  - mechanische Zerkleinerung 172
  - Nass-Verfahren 184
  - neue Verfahren 180
  - Pyrolyse 173
  - Solvolyse 177

- Vergleich 181
- Wirbelschicht 175
- Verunreinigungen
  - Feinanteile 162
  - Fremdfasern 162
  - Matrixreste 162
  - Pyrolysekoks 162
- Vibrationsmethode 85
  - Siehe Prüfverfahren*
- Vorimprägnierte Faserhalbzeuge 142
  - Siehe Prepreg*

## W

- Wet-Spinning 21 *Siehe Precursor-Herstellung, Nassspinnen*
- Whiskerbildung 36
  - Siehe Oberflächenbehandlung*
- Wirbelschichtverfahren 175, 182
- Wirrfaservliese 184

## Z

- Zellulose 195, 196
- Zerkleinerung
  - mechanisch 172