

## 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 Glühfadenslampe 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

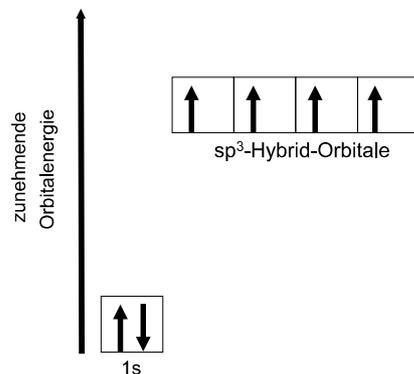
Zukünftige Anwendungen von Carbonfasern liegen im Bereich der additiven Fertigung (z. B. Big-Area-Additive-Manufacturing) aber auch breitere Anwendungen im Automobilbau und in konsumentennahen Bereichen erscheinen denkbar, wenn die Preise für Carbonfasern wie prognostiziert weiter fallen. Voraussetzung 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**  $sp^3$ -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.

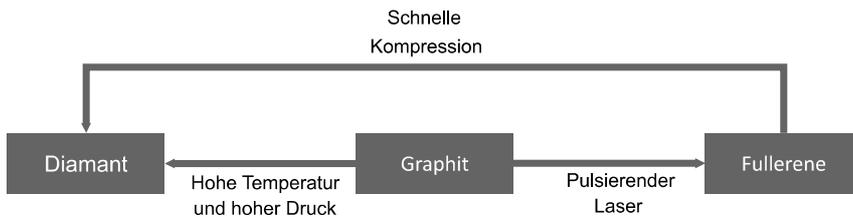
Im Diamanten ist jedes Kohlenstoffatom  $sp^3$  hybridisiert und von vier weiteren Kohlenstoffatomen umgeben. Alle Bindungen im Diamanten sind kovalente Bindungen und haben eine Bindungslänge von 0,154 nm. Auf Grund der  $sp^3$ -Hybridi-

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  $sp^2$ -hybridisierten Kohlenstoff enthält.

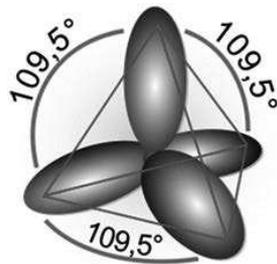
Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Erscheinungsformen des Kohlenstoffs ist in der nachfolgenden Abbildung zusammengefasst [2-14].



**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.

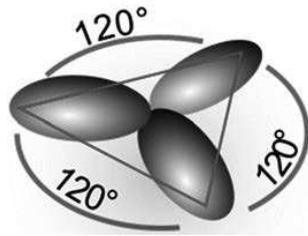


**Bild 2.7** Vier  $sp^3$ -Orbitale – tetraedrisch in gleichem Winkel [2-12]

### 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 Atomnachbarn 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-Atomorbitale 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-

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*.

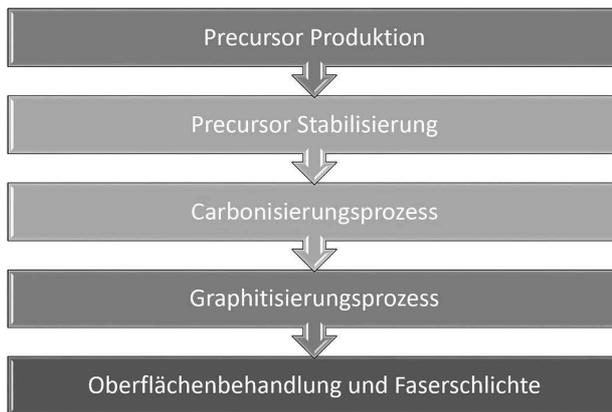
- PAN-basierte Kohlenstofffasern dominieren den Markt und stellen mehr als 90% des Weltmarktes dar. Dieses lässt sich vor allem mit der guten Verfügbarkeit des Precursors PAN und dessen konstanter Qualität begründen.
- Die verbleibenden etwa 10% des Weltmarktes werden von pechbasierten Kohlenstofffasern 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 versponnen, 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].

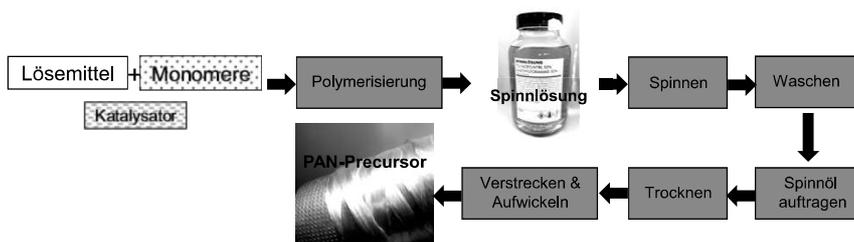


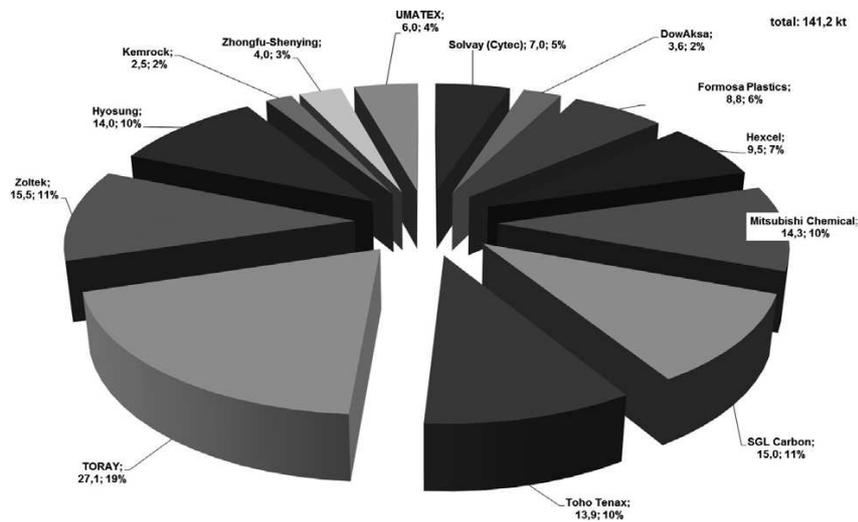
Bild 3.2 Schematischer Ablauf Precursor-Herstellung

### 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])

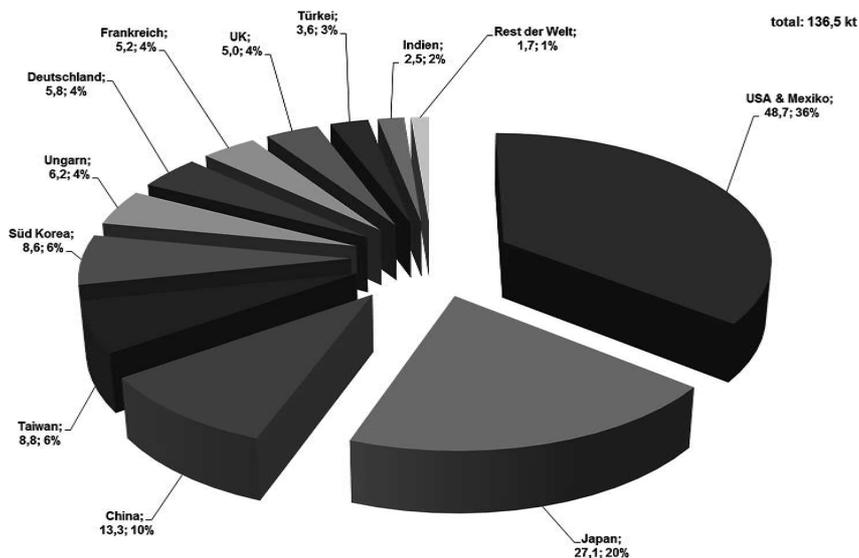
Diese auf Herstellerangaben basierenden Zahlen drücken nur die theoretisch herstellbare Menge, nicht aber den tatsächlichen Bedarf an Kohlenstofffasern am Weltmarkt aus. Es wird hierbei auch nicht zwischen unterschiedlichen Fasertypen, K-Zahl oder Anwendungsbereichen (Aerospace- oder Industrie-Faser) 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)	Thornel®	7,0	5%
DowAksa	k. A.	3,6	3%
Formosa Plastics	Tairafil	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-Shenyang	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 Lösemittelextraktion, 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

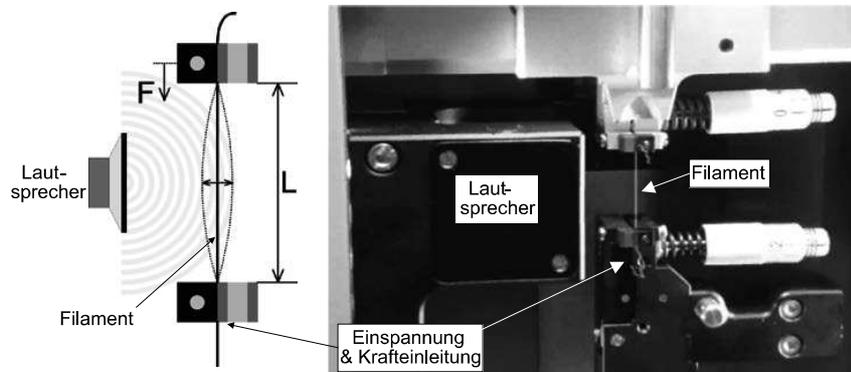
#### Vibrationsmethode

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 *Textechno 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

## ■ 5.1 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		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					
	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	
		DFP-Material	ATL, AFP		Harz-Infusionsverfahren	AKL, Ofen	
			Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen		Infusionsverfahren (TS / TP), Handlaminieren	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), Handlaminieren	AKL, Presse, Ofen, RT	
		MAG / NCF	NCF-Prepreg		Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen	AKL, Presse, Ofen, RT	
			NCF-Organoblech		Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen	AKL, Presse	
	geschnitten	SMC / BMC Massen		Zuschnitt, (teil)automatisiertes Ablegen		Pressen, Extrusion	
		TP-Granulate				Spritzguss, Extrusion	
	gemahlen	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.