

7.3 Verstärkungsfasern und ihre Eigenschaften

Verstärkungsfasern beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften des Verbundwerkstoffs sowie der daraus hergestellten Bauteile, speziell die Steifigkeit, Festigkeit, Schlagzähigkeit, Wärmeformbeständigkeit und das Kriechverhalten. Für den strukturellen Leichtbau sind aufgrund ihrer hohen spezifischen mechanischen Eigenschaften lediglich Kohlenstoff-, Aramid- und Glasfasern technisch relevant. Zunehmend werden auch Basaltfasern vor allem in Entwicklungsprojekten eingesetzt. Der Systemleichtbau geht jedoch weit über die Struktur hinaus, weshalb auch die an Bedeutung zunehmenden Naturfasern hier Erwähnung finden.

7.3.1 Glasfasern

Glasfasern haben einen gleichmäßigen nahezu runden Querschnitt mit einem Durchmesser von ca. 7 bis 24 μm ; sie werden aus geschmolzenem Glas gezogen. Die Zusammensetzung des Glases bestimmt ihre Eigenschaften (Tab. 7.2). Sie sind kostengünstig und finden ihre Anwendung überall dort, wo hohe Festigkeiten und weniger hohe Steifigkeiten gefordert sind. Bei der Herstellung des Textilglases wird auf die gerade gezogene Faser eine Schlichte aufgetragen, die vor allem zum Schutz der Fasern, zum Zusammenhalt und zur Haftungsverbesserung der Fasern an der organischen Matrix dient. Diese Schichten enthalten unter anderem organische Filmbildner, Gleitmittel, Antistatika und Haftvermittler auf Silanbasis, die der jeweiligen organischen Matrix angepasst sind.

Tab. 7.2: Allgemeine Eigenschaften verschiedener Glasfasern

Art	Eigenschaften
E-Glasfasern (electrical)	bestehen aus alkalifreiem Glas und eignen sich als elektrische Isolatoren mit hoher Transparenz für Radiowellen
S-Glasfasern (strength)	weisen höhere Bruchfestigkeit und Zähigkeit auf
C-Glasfasern	haben höheren Borgehalt und höhere chemische Beständigkeit
Borfreie ECR-Glasfasern	sind feste und chemisch beständige E-Glasfasern ohne Bor

Glasfasern sind gekennzeichnet durch eine im Vergleich zu den Metallen geringe Dichte, geringe Kriechneigung, geringe Feuchtigkeitsaufnahme und einen hohen E-Modul. Sie sind isotrop, d.h. ihre Werkstoffkennwerte in Faserrichtung sind gleich denen quer zur Faserrichtung. Ihre Zugfestigkeit ist höher als die aller anderen Verstärkungsfasern und höher als die von Stahl.

Glasfasern werden als Roving (zum Strang zusammengefasste Spinnfasern ohne Drillung), Garn, Zwirn (mit Drillung), oder als flächige oder dreidimensionale Halbzeuge angeboten. Textilglas lässt sich um etwa 3% dehnen und ändert bis zu 250°C Dauerbelastung seine mechanischen Eigenschaften nicht. Es hat einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und ist nicht brennbar.

Glasfasern finden ihren mengenmäßig größten Einsatz als kontinuierliche Verstärkungsfaser beispielsweise in der Fertigung von Leiterplatten oder von Rotorblättern für Windenergieanlagen. Im Bereich der diskontinuierlich faserverstärkten Kunststoffe finden sie vor allem Anwendung im Bereich semi-struktureller Bauteile, wie beispielsweise Sitzscha-

Tab. 7.3: Technische Kennwerte verschiedener Glasfasern

	Dichte in g/cm^2	Zugfestigkeit* in MPa	E-Modul in kN/mm^2	Bruchdehnung* in %	therm. Ausdehnungskoeffizient in $\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$	Erweichungstemperatur in $^\circ\text{C}$
E-Glas	2,6	3400	73	< 4,8	$5,0 \cdot 10^{-6}$	850
S-Glas	2,53	4400	86	< 4,6	$4,0 \cdot 10^{-6}$	980
C-Glas	2,52	2400	70	< 4,8	$6,3 \cdot 10^{-6}$	750
ECR-Glas	2,72	3440	73	< 4,8	$5,9 \cdot 10^{-6}$	880
AR-Glas	2,68	3000	73	< 4,4	$6,5 \cdot 10^{-6}$	770

* Abnahme bis zu 50% bei der Herstellung der Halbzeuge



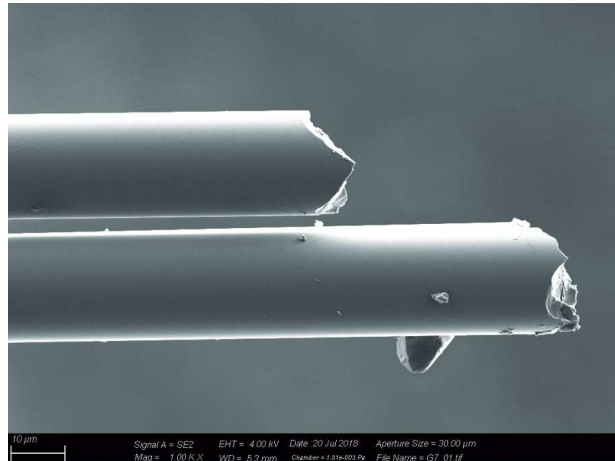
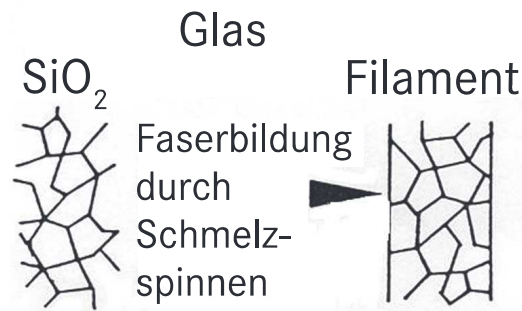


Abb. 7.2: Aufbau von Glasfasern

len, Frontendmontageträger oder Unterbodenabdeckungen.

Wegen ihrer elektrischen Isolationsfähigkeit und ihrer hohen elektromagnetischen Transparenz werden sie ebenfalls im Luftfahrtbereich für die Herstellung von Bugverkleidungen, sog. Radomen, eingesetzt.

Die Grundsubstanz der Glasfaser ist Siliciumdioxid SiO_2 (Kieselsäure) und (ausgenommen von Quarzglas) unterschiedlichsten Metalloxiden wie beispielsweise Al_2O_3 . Glasfasern besitzen somit aufgrund ihres dreidimensionalen Aufbaus isotrope Eigenschaften (Abb. 7.2).

Die Rohstoffzusammensetzung der Glasfasern bestimmt in Kombination mit der nasschemischen Schlichtetechnologie und dem Glasfaserherstellungsverfahren die Eigenschaften der Glasfasern. Deren Art, Menge, Orientierung und Faserlänge bzw. Faserlängenverteilung, bestimmt die Eigenschaften des Bauteils.

Die meist verwendete Faser ist die E-Glasfaser, die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung im Unterschied zu den anderen Glasfaserarten eine deutlich geringere Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit aufweist und somit vorwiegend Einsatz in der Elektroindustrie findet. Darüber wird sie aufgrund ihres geringen Preises auch in der Fertigung von Automobilkomponenten und bei Rotorblättern für die Windenergie eingesetzt.

Wichtige Kenngrößen der Glasfasern sind unter anderem Steifigkeit, Festigkeit, Bruchdehnung,

Filamentdurchmesser, Garnfeinheit, Art, Anteil und Löslichkeit der Schlichte. Die Anzahl der Filamente in einem Roving beeinflusst die Verarbeitbarkeit und die Eigenschaften im Faserverbundbauteil.

7.3.2 Kohlenstofffasern

Die für den strukturellen Leichtbau wichtigsten Fasern sind die Kohlenstofffasern, die häufig auch als Carbon-Fasern oder C-Fasern bezeichnet werden, in einem komplexen, mehrstufigen Prozess – je nach gewünschten Eigenschaften – hergestellt werden. Kohlenstofffasern besitzen einen zweidimensionalen, schichtförmigen Aufbau mit kovalenten Bindungen in der Ebene (Abb. 7.3). Ein hoher Orientierungsgrad der Graphitkristalle und 100% Parakristallinität bestimmen zudem die herausragenden Eigenschaften. Neben hohen gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften weisen Kohlenstofffasern eine gute Biokompatibilität auf und sind unempfindlich gegen Korrosion, Lösungsmittel, Laugen und schwache Säuren (unbeständig nur gegen starke Oxidationsmittel/Säuren). C-Fasern sind sowohl elektrisch als auch thermisch gut leitend und körperverträglich.

Kohlenstofffasern sind technische Fasern mit sehr hoher Festigkeit und Steifigkeit, jedoch geringer Bruchdehnung. Zu ihrer Herstellung werden organische Ausgangsmaterialien über eine schmelzbare Zwischenstufe carbonatisiert. Man nutzt z. B. struk-

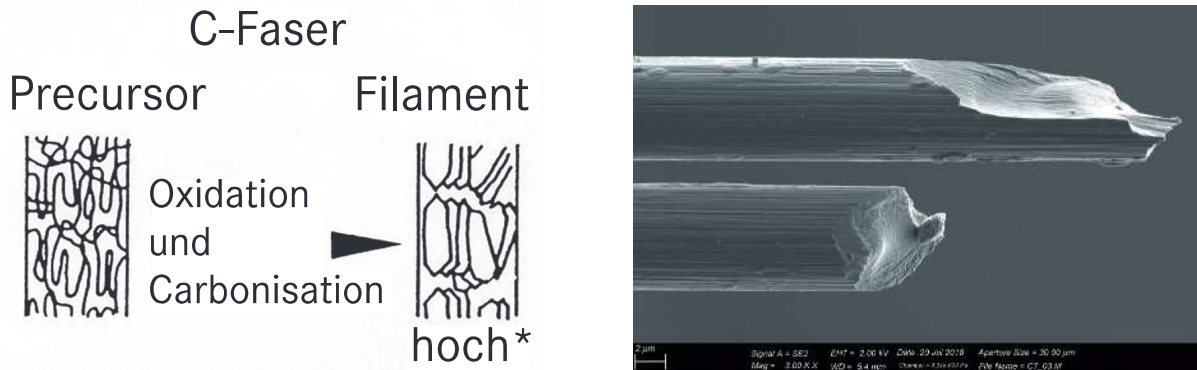


Abb. 7.3: Aufbau der Kohlenstofffasern (links Blumberg 1989, rechts Fraunhofer ICT 2018)

turell vorgeformte hochmolekulare Materialien wie Polyacrylnitril (PAN) (Precursor), organische Fasern oder Pech. Aus Cellulose hergestellte Fasern weisen weniger hochwertige Strukturen auf und werden deshalb überwiegend als thermisch hoch belastbare Isolierwerkstoffe eingesetzt. Heute gelten Fasern auf Basis Polyacrylnitril in drei verschiedenen Modifikationen als Standardfasern für Strukturwerkstoffe:

- PAN-HT – hochzugfest (high tenacity)
- PAN-HM – hochmodulig (high modulus)
- PAN-UHM – ultrahochmodulig (ultrahigh modulus)

Bei UHM-Fasern führt die Zunahme der Steifigkeit zum Abfall von Festigkeit und Dehnung.

Aus preiswertem Pech werden mit hohem Aufwand an Reinigungs- und Aufbereitungsverfahren kostengünstige Fasern hergestellt, die sich durch hohe Steifigkeit sowie gute thermische und elektrische Eigenschaften auszeichnen. Ihre Druckfestigkeit ist, bedingt durch die geringen Wechselwirkungen zwischen den Graphitebenen jedoch deutlich geringer. Pech basierte Fasern besitzen eine geringere Festigkeit und Steifigkeit als PAN basierte, sind elektrisch und wärmeleitend. Im letzten Schritt des Herstellungsprozesses werden die Fasern bei Temperaturen von bis zu 3000 °C verstreckt, sodass die Graphitebenen sich orientieren können. Auf diese Weise werden HT-Kohlenstofffasern mit hochorientierter Struktur (HM-C) hergestellt. Diese Streckgraphitierung wirkt sich auf die Zugfestigkeit und den E-Modul aus.

Kohlenstofffasern haben im Gegensatz zu Kunststoffen ein progressives Spannungs-Dehnungsverhalten, d. h. mit zunehmender Belastung steigt der E-Modul. Im Gegensatz zu Glasfasern sind sie stark anisotrop. Diese Eigenschaft gilt auch für die Wärmeausdehnungskoeffizienten, die in Faserrichtung und senkrecht dazu sehr unterschiedlich sind. Kohlenstofffasern sind normalerweise äußerst spröde und knickempfindlich. Dies erschwert den Herstellungs- und Verarbeitungsprozess. Deshalb werden sie mit einem Oberflächenschutz versehen, der meist zudem als Haftvermittler zur Matrix dient. Die Fasern werden bei langer Lagerung unflexibel, da die Oberflächenschicht aushärtet (Epoxidharz). Die Faser selbst ist fast dauerschwingfest. Sie brennt im Verbund trotz hoher eigener Brennbarkeit nur langsam.

Übergeordnet können beispielweise vier Typen von Kohlenstofffasern unterschieden werden (Abb. 7.4):

- HT-Fasern: hochfeste Kohlenstofffasern (engl. high tenacity), Standardfasern
- ST-Fasern: höhere Festigkeit als HT-Fasern (engl. super tenacity)
- IM-Fasern: höherer Modul als HT-Fasern (engl. intermediate modulus)
- HM-Fasern: hochsteife Fasern (engl. high modulus)

Ein wichtiger Prozessschritt ist die direkte Oberflächenbehandlung der Fasern nach der Carbonisierung bzw. nach der Graphitisierung, um eine entsprechende Weiterverarbeitung der Fasern zu ermöglichen. Wie auch bei den Glasfasern wird

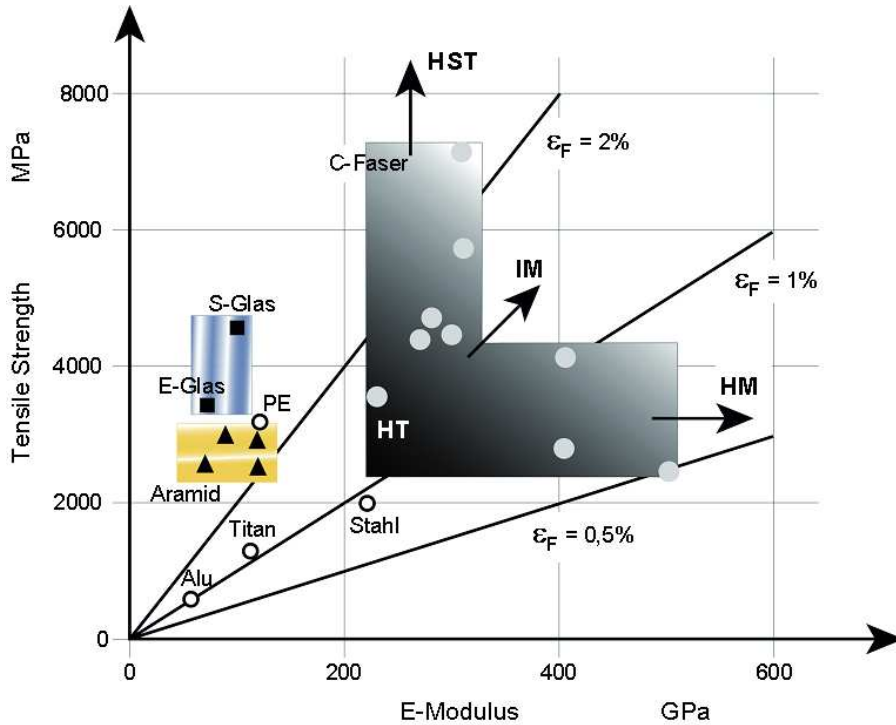


Abb.7.4: Eigenschaften von unterschiedlichen Kohlenstofffasertypen (Drechsler)

eine Schlichte im Herstellungsprozess aufgebracht, um die Handhabung sowie die folgende Benetzung der Fasern mit der Polymermatrix zu verbessern. Die Wahl der Schlichte hat einen entscheidenden Einfluss auf die interlaminaeren Eigenschaften des Verbundwerkstoffes. Als Endprodukt entstehen somit unterschiedliche Kohlenstofffaser-Rovings, die in kontinuierlicher Form auf eine Spule aufgewickelt werden und somit zur Weiterverarbeitung mit unterschiedlichen Textiltechniken (Weben, Flechten, etc.) zur Verfügung stehen. Üblicherweise bestehen die Rovings aus unterschiedlich gebündelten Fasereinzelfilamenten. Bei Kohlenstofffasern gibt die sog. K-Zahl die Anzahl der Einzelfilamente eines Rovings an, 1 K = 1 Kilo = 1.000 Filamente).

Die üblichen K-Zahlen für Kohlenstofffasern sind:

- 1K-Typ, d. h. Roving aus 1.000 Filamenten
- 3K-Typ, d. h. Roving aus 3.000 Filamenten
- 6K-, 12K- und neuerdings für Industrieanwendungen 24K- oder auch 50K-Typ.

Bei gleichem Prozessablauf wird ersichtlich, dass beispielsweise die 1K-Typen im Vergleich zu 12K-Typen deutlich teurer sind, da der Durch-

satz in der Produktion entsprechend geringer ist. Üblicherweise finden 1K-Typen Anwendung in der Raumfahrtindustrie, da sie ausgezeichnete mechanische Eigenschaften besitzen und die Herstellung von flächigen Faserhalbzeugen mit entsprechend geringeren Faserflächengewichten ermöglichen. Hierdurch kann eine wesentlich feinere Abstufung der Einzelschichten entsprechend der strukturmechanischen Eigenschaften erfolgen, und somit das größtmögliche Leichtbau-potenzial erzielt werden.

Im Gegensatz dazu finden in der zivilen Luftfahrt-industrie typischerweise Faserhalbzeuge Anwendung, die aus 6- oder 12K-Rovings hergestellt werden. Für die kostensensitiven Bereiche, wie beispielsweise der Automobilindustrie oder dem allgemeinen Transport- und Maschinenwesen, werden üblicherweise 12- oder 24K-Typen verwendet, da hier sowohl der Materialpreis als auch die Produktivität für die Realisierung von Großserien entscheidend sind. Um diesen Anforderungen zu begegnen, werden sogenannte „Low-Cost“-Kohlenstofffasern mit einer K-Zahl von > 24 – meist 50K, auch als „Heavy Tow“ bezeichnet, angeboten.

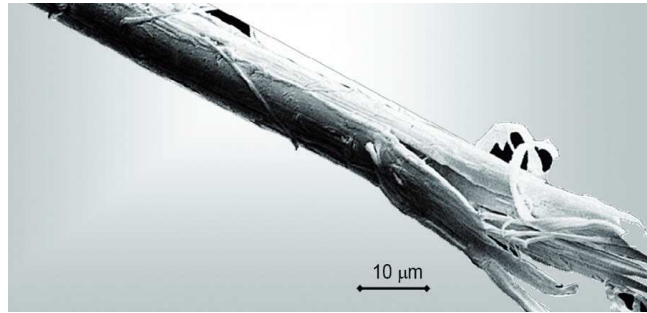
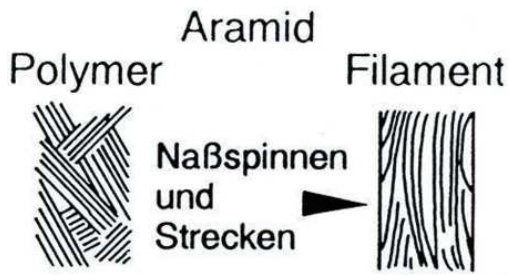


Abb. 7.5: Aufbau der Aramidfaser (Blumberg 1989)

7.3.3 Aramidfasern

Aramidfasern bestehen aus linearen organischen Polymeren (aromatische Polyamide) mit hoher Festigkeit und Steifigkeit, bei denen die kovalenten Bindungen der Polymerkette entlang der Faserachse orientiert sind. Da die Schmelztemperatur des PPTA-Polymers (Polyphenylenterephthalamid) oberhalb der thermischen Zersetzungstemperatur liegt, können Polyamidfasern nicht schmelzflüssig, sondern lediglich mit Hilfe von Lösemitteln/Säuren hergestellt werden.

Aramidfasern haben einen nahezu kreisrunden Querschnitt mit um die 12 µm Durchmesser (Abb. 7.5). Die Dichte mit 1,45 g/cm³ ist im Vergleich zu anderen Verstärkungsfasern gering. Sie haben eine hohe gewichtsbezogene Zugfestigkeit und sind stark anisotrop, d.h. die Werkstoffeigenschaften in Faserrichtung unterscheiden sich von denen quer zur Faser (Tab. 7.4).

Aramidfasern können bis zu 7 % Feuchtigkeit aufnehmen, wodurch die Festigkeit der Fasern und vor allem die Haftung zwischen Faser und Matrix beeinträchtigt werden. Sie sind im Verbund mit Polymeren bis 300 °C temperaturbeständig. Auch bei höherer Temperatur schmelzen sie nicht und sind daher für feuerfeste Schutzkleidung geeignet. Bekannt sind Aramidfasern unter anderem von DuPont unter dem Markennamen Kevlar.

Vorteile von Aramidfasern sind ihre Chemikalienbeständigkeit (ausgenommen gegenüber starken Säuren und Basen), ihre Flammwidrigkeit (selbstverlöschend), die Dimensionsstabilität, ihre geringe elektrische und Wärmeleitfähigkeit. Sie reagieren auf UV-Strahlung mit signifikantem Festigkeitsabfall.

Aramidfasern lassen sich in vor allem mit Duromeren und vereinzelt auch mit Thermoplasten verarbeiten. Bauteile, die mit Aramidfasern verstärkt sind, zeigen Druckempfindlichkeit in Faserrichtung. Dies liegt in ihrem Aufbau begründet. Die Fasern sind für zug- als für druckbeanspruchte Elemente besser geeignet.

Die steifen Fasertypen finden vor allem in Flugzeugstrukturen Anwendung, meist in Kombination mit Kohlenstofffasern, um das Energieaufnahmevermögen des Verbundwerkstoffes zu steigern und das Schädigungsverhalten zu verbessern. Leichtbaurelevant sind Aramidfasern mit geringem Modul vor allem für Schutzzwecke, wie Leichtpanzerungen, Splitterschutzwesten oder Helme. Aramidfasern sind, wie Kohlenstofffasern anisotrop, das bedeutet, die physikalisch/mechanischen Eigenschaften quer und längs der Faser sind signifikant unterschiedlich. Die polymere Struktur ist für das duktile und zähe Verhalten verantwortlich und wirkt sich auf die Knotenfestigkeit zuträglich aus. Folge der Zähigkeit ist eine schlechte mechanische Bearbeitbarkeit. Die

Tab. 7.4: Mechanische Eigenschaften verschiedener Aramidfasern (nach Ehrenstein 2006)

Aramidfaser	Dichte in g/cm ³	Durchmesser in µm	Zug-E-Modul in kN/mm ²	Zugfestigkeit in MPa	Bruchdehnung in %
hochzäh	1,45	12	80	3600	4,0
hochsteif	1,45	12	131	3800	2,8
extrem steif	1,45	12	186	3400	2,0

Tab. 7.5: Eigenschaften von Verstärkungsfasern im Vergleich (Michaeli 2006)

	Glasfaser			Kohlenstofffaser			Aramidfaser	
	E	R/S	C	HT	HST	HM	Normal	HM
Dichte [g/cm ³]	2,6	2,5–2,53	2,45	1,75–1,8	1,78–1,83	1,79–1,91	1,39–1,44	1,45–1,47
Zugfestigkeit [GPa]	2,3	1,9–3,0	2,1	2,7–3,5	3,9–7,0	2,0–3,2	2,8–3,0	2,8–3,4
E-Modul [GPa]	72–73	86–87	71	228–238	230–270	350–490	58–80	120–186
Bruchdehnung bei Zug [%]	2,2–3,2	2,8–3,6	2,3	1,2–1,4	1,7–2,4	0,4–0,8	3,3–4,4	1,9–2,4
Spezifische Zugfestigkeit [GPa·cm ³ /g]	0,9	1,13–1,23	0,9	1,5–2,0	2,2–3,0	1,1–1,7	1,9–2,2	1,9–2,3
Spezifischer E-Modul [GPa·m ³ /g]	27,7–28,2	34–34,9	29	127–134	127–150	190–260	40–56	83–127
Filamentdurchmesser [μm]	3–25			7–8	5–7	6,5–8,0	12	
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	5	4	7,2	-0,1 – -0,7		-0,5 – -1,3	-2,0 – -6,0	

Fasern und Schnittkanten der Lamine sind schnell ausgefranst, und es kann zu Delaminationen kommen, weshalb geeignete Schneidwerkzeuge einzusetzen sind.

Aramidfasern weisen eine ganze Reihe an hervorragenden Eigenschaften wie ein exzellentes Dämpfungs- und Ermüdungsverhalten, eine gute Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit, eine geringe Wärmeleitfähigkeit, eine negative thermische Ausdehnung und eine hohe Energieaufnahme auf. Die Faser hat eine gute elektrische Isolierfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante ist geringer als die von Glas.

In Tabelle 7.5 werden die typischen Eigenschaften der Aramidfasern anderen Verstärkungsfasern gegenübergestellt. Aramidfasern besitzen spezifische Festigkeiten, die im Bereich der Kohlenstofffasern liegen, wohingegen Kohlenstofffasern eine im Vergleich zu Glasfasern zwei- bis dreimal so hohe spezifische Zugfestigkeit und einen bis zu zehnfach höheren spezifischen E-Modul besitzen, worin das enorme Leichtbaupotenzial dieser Verstärkungsfasern deutlich wird.

7.3.4 Naturfasern

Auch natürliche Fasern zur Verstärkung von Kunststoffen werden für den semistrukturellen Leichtbau herangezogen. Dazu gehören vor allem Flachs, Hanf, Jute und Baumwolle. Bei diesen Fasern handelt es sich um nachwachsende Rohstoffe, die zwar ein ausgespro-

chen geringes Gewicht haben, deren entsprechend geringe Belastbarkeit jedoch zu einem vergleichsweise eingeschränkten mechanischen Eigenschaftsniveau führt. Zudem sind eine Reihe von Herausforderungen zu bewältigen, die sich aus der geringen Temperaturbeständigkeit (< 200 °C) und den schwankenden Eigenschaften durch unregelmäßige Wachstums- und Witterungsbedingungen ergeben. Naturfasern werden entsprechend ihrer Wachstumsregion in unterschiedlichen Ländern entsprechend ihrem Vorkommen verwendet, um einen ökologisch und ökonomisch sinnvollen Einsatz zu gewährleisten.

Die Festigkeitswerte von Naturfasern liegen durchschnittlich etwa bei einem Viertel derer von Glasfasern, die spezifischen in etwa bei der Hälfte. Die absoluten E-Module von Pflanzenfasern liegen bei einem Fünftel der Glasfaserkennwerte, die spezifischen bei ca. einem Drittel. Dies verdeutlicht den eingeschränkten Einsatz im strukturellen Leichtbau. Betrachtet man den Leichtbau sinnvoller Weise als System, so bekommen naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe eine zunehmende Bedeutung gerade im Bereich funktionsintegrierter Verkleidungsteile. Tabelle 7.6 zeigt einige Kennwerte unterschiedlicher Naturfasern im Vergleich zu denen der Glasfasern.

Die *Abacafaser*, auch Manila Hanf genannt, wird auf den Philippinen angebaut und liefert leichte, feste und sehr widerstandsfähige Fasern. Verwendet werden vor allem die bis zu zwei Meter langen Hartfasern der Abacablätter. Die Faser ist relativ grob und weist

Tab. 7.6: Mechanische Eigenschaften (Mittelwert (Mw) und Median (Md)) von Naturfasern getestet im Einzelementtest mit dem System Dia-Stron (AVK)

Faserart		Sisal	Flachs	Hanf	Jute	Baumwolle	Lyocell	Ramie	Abaca	E-Glass
(Anzahl getesteter Elemente)		(84)	(84)	(66)	(93)	(117)	(93)	(158)		
Dichte [g/cm ³]		1,30	1,46	1,50	1,42	1,51	1,54	1,54	1,44	2,60
Festigkeit [MPa]	Mw	428	874	827	571	618	815	1250	1100	3500
	Md	424	790	588	540	561	837	1271		
Spezifische Festigkeit [MPa·cm ³ /g]	Mw	329	599	551	402	409	529	812	765	1346
	Md	326	541	392	380	372	544	825		
E-Modul [GPa]	Mw	4,57	14,58	12,98	17,34	11,84	8,63	35,96	-	72
	Md	4,39	12,84	8,29	16,35	10,49	8,27	35,25		
Spezifischer E-Modul [MPa·cm ³ /g]	Mw	3,52	9,99	8,66	12,21	7,84	5,61	23,35	-	28,24
	Md	3,38	8,80	5,52	11,51	6,95	5,37	22,91		

eine hohe Reißfestigkeit von 45 bis 70 cN/tex auf. Die Farbe reicht von weiß über gelblich bis braun. Abacafasern fanden zum Beispiel in einer Leichtbauunterbodenkapselung der Mercedes A-Klasse Einsatz.

Flachs wird häufig zur Ölgewinnung angebaut, eignet sich jedoch auch hervorragend zur Gewinnung hochwertiger Fasern. Die Flachsfasern werden, aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften und regionalen Verfügbarkeit, vermehrt als Verstärkungsfaser für Naturfaserverbundwerkstoffe eingesetzt. Hinzu kommt der ökonomische Vorteil des geringen Kilopreises für technische Fasern. Eines der wichtigsten Anwendungsgebiete für flachsfaserverstärkte Kunststoffe ist die Automobilindustrie, fast zwei Drittel der hier eingesetzten Naturfasern sind Flachsfasern.

Hanf enthält im Gegensatz zum Flachs stärker verholzte Faserteile. Die langen Faserbündel spalten sich beim Hecheln nicht so stark auf, wodurch die Faser gröber und steifer, aber reißfester als Flachs ist. Die aufbereitete Bastfaser hat eine Länge von ca. 5–55 mm und eine Dicke, die zwischen 16 und 50 µm liegt. Die sehr langen Fasern werden beim Hecheln in drei Teile gerissen. Der mittlere Teil liefert versponnen das gleichmäßigste und qualitativ hochwertigste Garn, das Fußstück wird meist für Werggarne verwendet. Eingesetzt werden Hanfgarne je nach Qualität als Verstärkungsfasern, für Dekorations- und Vorhangstoffe, in der Gurt-, Riemen- und Teppichweberei, für Sattler-, Netz- und Sacknähharne, Kordeln und Seile. Die Faser ist aufgrund ihrer

hohen Festigkeit, wenig dehnbar, grob und hart, saugfähig, fault auch unter Wasser kaum und ist ziemlich verrottungsfest (Schiffstaue).

Sisal ist die Bezeichnung für die aus den Blättern der Agave sisalana gewonnenen Hartfasern. Sie wird in Yucatán (Mexiko), Ost- und Westafrika, Brasilien usw. angebaut. Die Pflanze benötigt bis zur Schnittreife etwa 5–6 Jahre und kann dann 7–10 Jahre lang geerntet werden. Die Faser hat einen harten Griff, hohe Reiß- und Scheuerfestigkeit, ist glänzend, gut einfärbbar und widerstandsfähig gegen Feuchtigkeit.

Die für die Produktion von naturfaserverstärkten Kunststoffen eingesetzten Fasern sind, preislich bedingt, vor allem Kurz- aber auch Langfasern. Naturfasern liegen im Vergleich zu den technischen Fasern immer in endlicher, oftmals sehr unterschiedlicher Länge vor, weshalb die Herstellung von Kardenbändern oder Spinnrovings erforderlich ist, die wiederum Ausgangsprodukte zur Herstellung technischer Textilien sind.

Grundsätzlich lassen sich Naturfasern wie Glasfasern im Extrusions-, Press- und Spritzgießverfahren verarbeiten. Eines der wichtigsten Verarbeitungsverfahren für Naturfasern ist das Formpressen, bei dem sogenannte Naturfaserplatten zusammen mit duromeren oder thermoplastischen Kunststoffen unter Temperatureinwirkung verpresst werden. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch eine geringe Dichte kombiniert mit relativ hohen Festigkeiten und Steifigkeiten aus.



Bei den eingesetzten Verfahren ist es entscheidend, die vollständige Benetzung der Fasern zu gewährleisten, zum einen, um einen optimalen Faser-Matrix-Verbund zu erhalten, und zum anderen, um die Wasseraufnahme der Naturfasern zu verhindern. Maßgebend sind niederviskose Matrixmaterialien, die die Fasern vollständig benetzen, ohne diese thermisch zu schädigen. Da beim Pressen mit geeigneten Matrixmaterialien geringere Verarbeitungstemperaturen (ca. 180–210°C) als beim Spritzgießen (ca. 230°C) benötigt werden, sind bei Naturfasermaterialien bisher vorwiegend die Pressverfahren im Serieneinsatz.

7.4 Textile Halbzeuge

Textile Vorformlingtechnologien haben ein hohes Potenzial zur automatisierten Herstellung von belastungsgerechten, endkonturnahen Faserstrukturen, die in einem nachfolgenden Arbeitsschritt mit dem Matrixsystem imprägniert werden. Hierzu wurden verschiedene Harzinjektionstechnologien entwickelt (s. Kap. III.6). Eine Alternative bei der Herstellung thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe ist die Hybridgarntechnik (Comingling), bei der die Verstärkungsfasern und die Thermoplastfäden schon im Textilprozess miteinander kombiniert werden. Die Faserstruktur wird anschließend unter hohem Druck und bei Temperaturen über der Schmelz- oder Fließtemperatur des Thermoplasten konsolidiert. In den letzten 30 Jahren wurden aus den klassischen Textiltechnologien Verfahren entwickelt, die an die

Erfordernisse der Verarbeitung der Glas-, Aramid- und Kohlenstofffaser angepasst oder speziell für die Anforderungen der Faserverbundtechnologie ausgelegt wurden, z. B.

- Gewebe, Gelege, Geflechte
- Gestricke, Gesticke
- Fibre Patch Preforming
- Nähtechnologie.

Einige dieser Verfahren basieren auf flächigen Halbzeugen, die in einem zweiten Arbeitsgang zugeschnitten und schichtweise in ein Werkzeug eingelegt werden (sequentielle Preformherstellung). Bei anderen Verfahren werden die Fasern direkt in die endgültige Kontur eingebracht (direkte Preformherstellung). Der Weg von der Faser zum textilen Halbzeug ist für die verschiedenen Ansätze in Tabelle 7.7 dargestellt.

Die einzelnen Technologien unterscheiden sich deutlich in Bezug auf die Produktivität und die möglichen Faserorientierungen bzw. Vorformlinggeometrien. Ergänzt wird die Textiltechnologie häufig durch sogenannte Bindertechnologien, die eine Stabilisierung bzw. eine Verbindung mehrerer biegeschlaffer textiler Halbzeuge ermöglichen und damit die Handhabung verbessern.

7.4.1 Matten und Vliese

Die einfachsten und vergleichbar günstigsten Halbzeuge sind die Matten (Abb. 7.6), die sich durch ihre Herstellungsweise unterscheiden. Eine Variante wird aus einem Endlosfaden hergestellt (Endlosmatte), die andere aus geschnittenen Spinnfäden mit Längen

Direkte Preformherstellung		Sequentielle Preformherstellung	
Verstärkungsfaser direkt vom Hersteller		Zusätzliche Halbzeugherstellung (Gewebe, Gelege, Fließ, ...)	
Bindertechnologie	Textile Verfahren	Bindertechnologie	Textile Verfahren
Faserspritzen (und Varianten)	<ul style="list-style-type: none"> • 2D/3D Flechten • Stricken • Fiberplacement Technologien (TFP) • 3D Weben 	<ul style="list-style-type: none"> • Binderumformtechnik (Presspreformen, Diaphragma) • Tapelegen • FPP 	2D/3D Nähen
Herstellung der Preform mit nur einem Arbeitsschritt möglich		Mindestens zwei Arbeitsschritte zur Herstellung einer Preform	

Tab. 7.7: Gegenüberstellung direkter und sequentieller Preformherstellung



Abb. 7.6: Glasfasermatte (Quelle: Carbon Werke)

zwischen 25 und 50 mm (Schnittmatte). Durch die ungerichtete flächige Faserablage wird ein quasi-isotropes Verstärkungsgebilde erzeugt.

Die Anbindung der Fasern kann einerseits durch Binder erfolgen, der vor der Ablage aufgebracht wird und während der Trocknung die Fasern miteinander verklebt. Zur besseren Durchtränkung ist der Binder meist in der Matrix löslich. Der Binder kann in flüssiger oder fester Form (Pulver) vorliegen. Eine zweite Variante ist das Vernadeln. Dabei werden die Fasermatten mit Stiften in Form von Nadeln mit zusätzlichen Widerhaken durchstochen, und es entsteht eine mechanische Verbindung (physikalische Verschlaufung) ähnlich dem Vernähen.

Durch die quasi-isotropen Eigenschaften und die relativ geringen Faservolumengehalte von Matten (ca. 20 bis 30%) sind diese nicht für hochbeanspruchte Bauteile geeignet und werden deshalb fast aus-



Abb. 7.7: Kohlenstofffilamentvlies (Quelle: Carbon Werke)

schließlich aus Glasfasern angeboten. Die Flächengewichte sind in einem großen Bereich einstellbar.

Vliese sind eine Sonderform der Matten, die sich durch deutlich geringere Flächengewichte auszeichnen (Abb. 7.7). Anwendung finden sie oft als Oberflächenvlies für Bauteile mit hochwertigen Oberflächen, zum Beispiel im Automobilbau. Hier finden auch Kohlenstofffasern Anwendung.

7.4.2 Gewebe

Weben ist die älteste Textiltechnik, die für die Herstellung von Faserverbundstrukturen eingesetzt wird. Das Grundprinzip besteht darin, dass zwei Fadensysteme, Kette und Schuss, miteinander verwebt werden. Je nach Webart entstehen ebene Halbzeuge, die sich durch ihre Bindungsart unterscheiden (Abb.7.8).

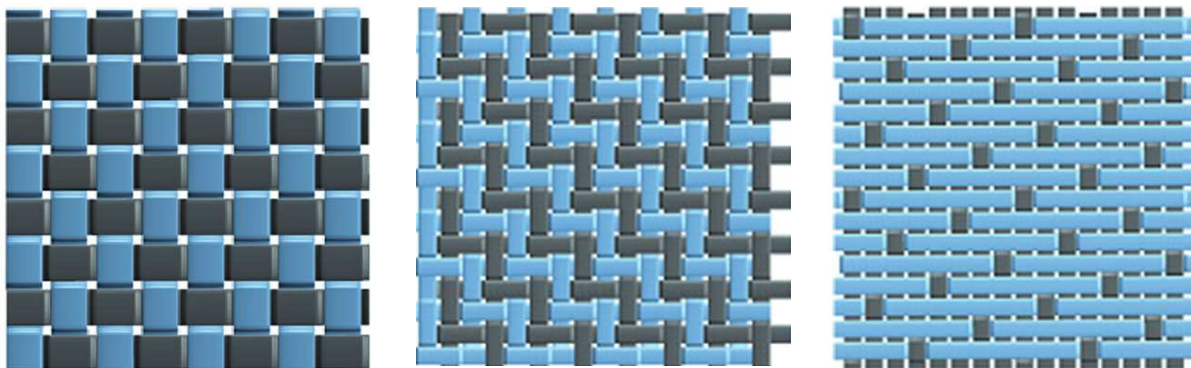


Abb. 7.8: Leinwand-, Körper- und Atlasbindung (Quelle: IFB Universität Stuttgart)

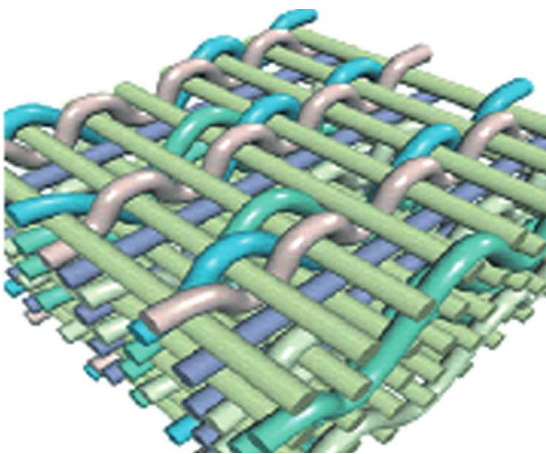
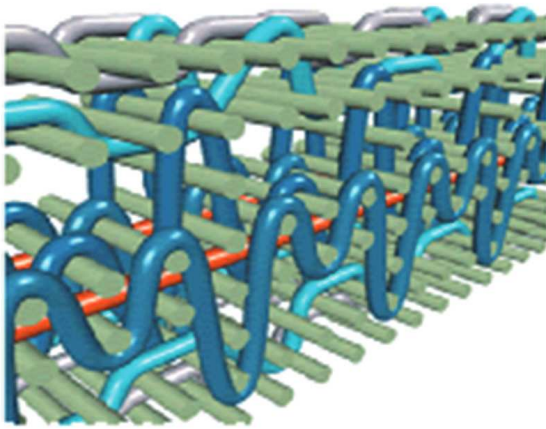


Abb. 7.9: Dreidimensionale Faserverstärkung (Quelle: Scottweave)

Durch die Überkreuzung von Kett- und Schussfäden ergeben sich Faserondulationen, die insbesondere bei Druckbelastung zu einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften von Laminaten führen.

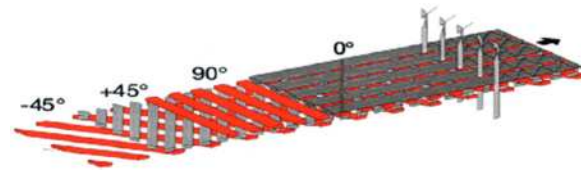


Abb. 7.10: Multiaxialgelege (Quelle: Saertex GmbH)

Andererseits ergeben sich durch die Webstruktur interessante optische Designvarianten. Gewebe werden daher häufig für kohlenstofffaserverstärkte Sichtbauteile eingesetzt. Große Herausforderung hierbei ist die ungleichmäßige Verteilung von Faserfilamenten und Matrix in den Knotenpunkten die durch Nahtanhaftung und entsprechende Schwindung zu Oberflächenmarkierungen führen.

Neben diesen klassischen 2D-Geweben gibt es verschiedene Webarten, die entweder zu einer dreidimensionalen Faserverstärkung oder zu einer dreidimensionalen Faserstruktur führen (Abb. 7.9).

7.4.3 Gelege

Die wichtigsten flächigen Halbzeuge werden im sogenannten Multiaxial-Gelegeverfahren (MAG) hergestellt, bei dem im Gegensatz zu den Geweben bis zu neun Faserrichtungen in einem Halbzeug kombiniert werden können (Abb. 7.10).

Die einzelnen Faserlagen sind außerdem nicht miteinander verwoben, sondern liegen aufeinander, wodurch Faserondulationen signifikant reduziert werden. MAGs haben daher bessere mechanische

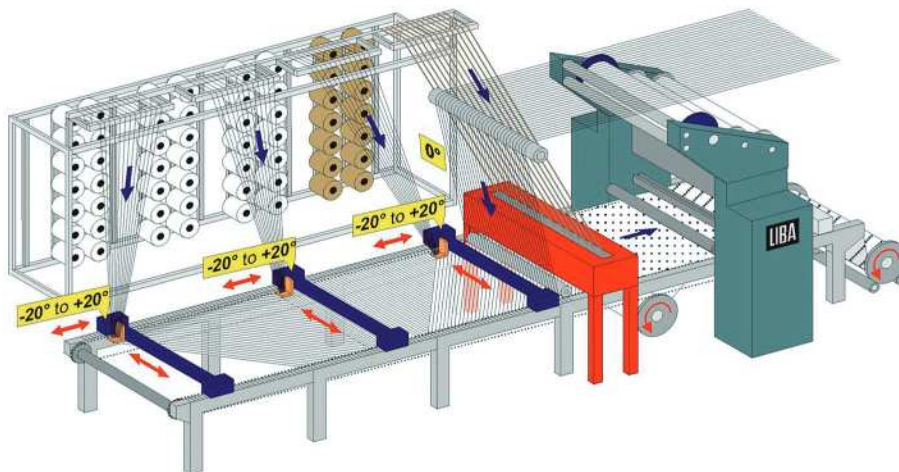


Abb. 7.11: Gelegemaschine (Quelle: Saertex GmbH)



Abb. 7.12: Drapierung einer Druckkalotte (Quelle: Airbus)

Eigenschaften als Gewebe. Damit ein handhabbares Halbzeug entsteht, werden die einzelnen Lagen nach dem Ablegen auf der Maschine durch ein Vielnadelnähsystem mit einem dünnen Faden vernäht (Abb. 7.11). Wie bei Geweben erfolgt die Klassifizierung der MAGs über das Flächengewicht, das sich zum einen aus dem Titer der Fasern und zum anderen aus der Anzahl der Lagen ergibt. Multiaxialgelege sind auf dem Markt als zwei-, drei-, vier- oder mehrlagige Faserstrukturen verfügbar. Sie können somit entsprechend der spezifischen Anforderungen in einem weiten Bereich variiert werden. Durch die Anzahl der Lagen und der Nähart ergibt sich ein mehr oder weniger gutes Drapierverhalten bei der Herstellung sphärisch gekrümmter Bauteile. In Abbildung 7.12 ist die Drapierung eines vernähten Geleges am Beispiel der Druckkalotte für einen Airbus dargestellt.

7.4.4 Geflechte

Ein Verfahren, das immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist die Flechttechnik. Seit langem sind Geflechschläuche als Halbzeuge zur Herstellung von rohrförmigen Bauteilen bekannt. Das Grundprinzip besteht darin, dass die auf Klöppeln aufgespulten Fasern gegenläufig auf sogenannten Flügelrädern auf einer Kreisbahn geführt werden (Abb. 7.13). Ein großer Vorteil der Flechttechnik ist die kontinuierliche

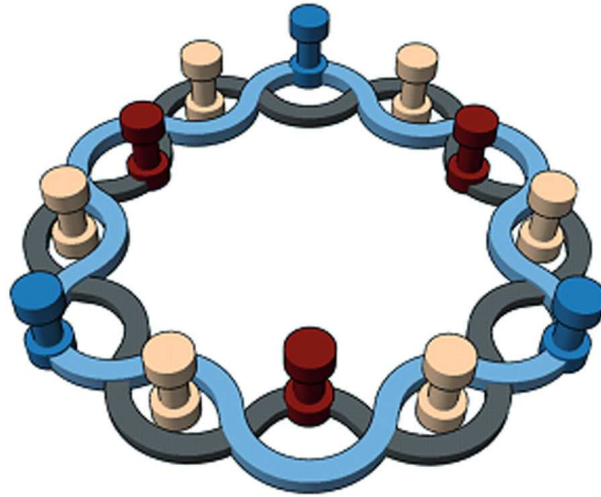


Abb. 7.13: Flechtprinzip

Anpassungsfähigkeit an Querschnittsänderungen, die allerdings mit einer Änderung des Flechtwinkels einhergeht.

Ähnlich wie beim Weben entsteht das Geflecht unter Zusammenführung aller sich überkreuzender Fasern im Flechtzentrum im Zentrum der Anlage. Hier entstehen zwei sich überkreuzende Faserrichtungen. Diese können durch das Verhältnis von Flecht- und Abzugsgeschwindigkeit in einem weiten Bereich von ca. 25° bis 80° variiert werden. Bei Bedarf kann ein drittes Fadensystem, das Stehfadensystem, das gerade in Längsrichtung durch das Geflecht verläuft, integriert werden. Auf diese Weise entsteht ein triaxiales in sich geschlossenes Geflecht (Abb. 7.14).

Eine besondere Flechtart, welche die Ondulation durch die Überkreuzung der Flechtfadensysteme vermeidet, ist das sogenannte UD-Flechten, bei dem eines der beiden Fadensysteme durch einen sehr dünnen Faden ersetzt wird und so pro Lage nur eine Faserrichtung erzeugt wird. Die mechanischen Eigenschaften können so deutlich verbessert werden und das Niveau von Prepreg-Bauteilen erreichen.

In den letzten Jahren wurde das roboterunterstützte Flechten entwickelt. Bei diesem Verfahren wird ein Flechtzentrum durch einen Roboter im Flechtzentrum manipuliert und automatisiert umflochten (7.15). Auf diese Weise können sehr komplexe, endkonturnahe, rohrförmige Faserstrukturen hergestellt werden,

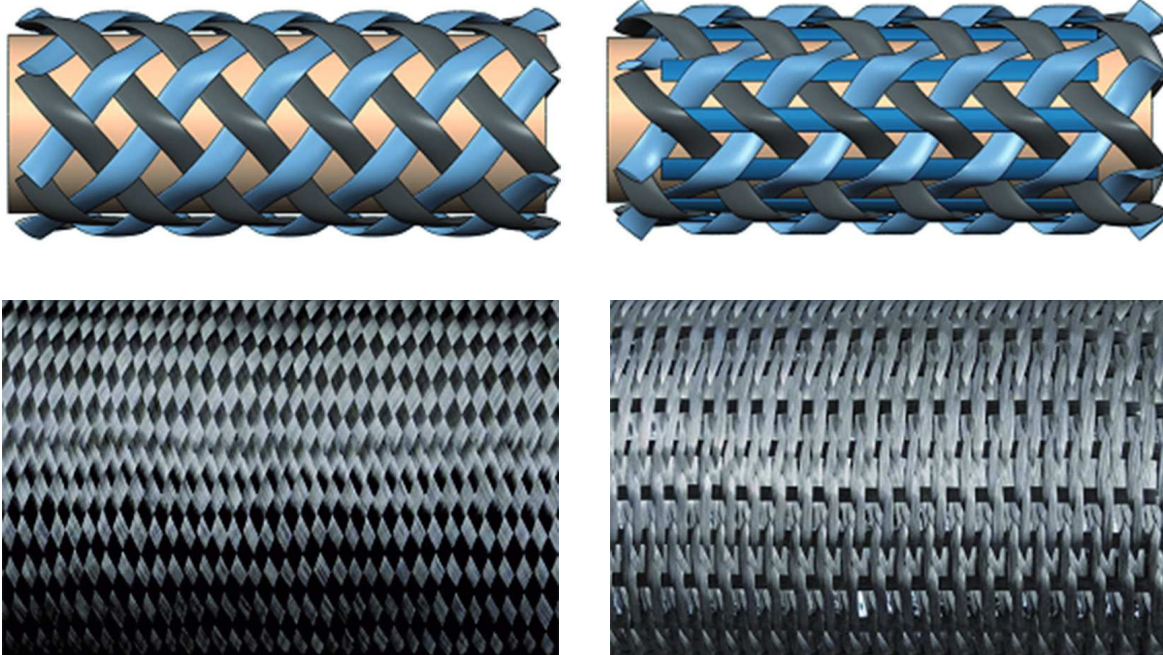


Abb. 7.14: Biaxiales (links) und triaxiales (rechts) Geflecht (Quelle: IFB Universität Stuttgart)

die gleichzeitig eine optimale, belastungsgerechte Faserarchitektur aufweisen. Beispiele dafür zeigt Abbildung 7.16.

Wird die Flechttechnik von Beginn an für die Herstellung eines Produktes in Betracht gezogen, kann das Potenzial durch eine fertigungsgerechte Gestaltung optimal genutzt werden. Eine sehr komplexe Geometrie stellt ein Fahrradrahmen dar, der aus vier Bauteilen besteht, wobei drei mit der Umflechttechnik hergestellt werden (Abb. 7.17). Im Gegensatz zu bekannten Rahmenkonzepten wurde die Anzahl der

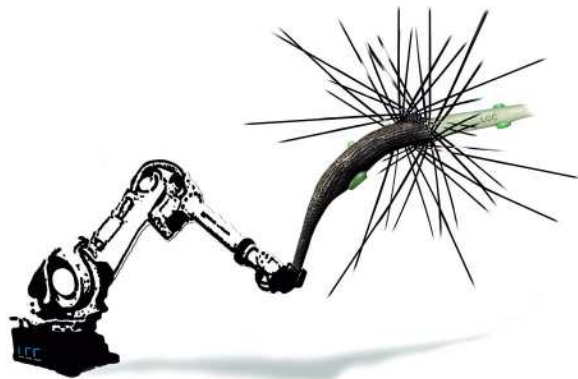


Abb. 7.15: Umflecht-Prinzip (Quelle: LCC, TU München)

Einzelteile, die nach der Injektion und Aushärtung gefügt werden, halbiert.

Eine besondere Variante der Flechttechnik ist das sogenannte 3D-Flechten. Bei diesem Verfahren sind die Klöppel und die Flügelräder nicht in einem Ring, sondern einer flachen Matrix angeordnet. Somit können die Fasern fast beliebig bewegt werden, wodurch sich im Flechtpunkt sehr komplexe Faserstrukturen ergeben. Durch die hohe Flexibilität können voll automatisiert selbst Profile mit variablem Querschnitt hergestellt werden. Das 3D-Flechten hat bisher dennoch nur eine Anwendung in Nischen, z. B. bei der Herstellung von Zwickelfüllern profilverstärkter Platten, gefunden, da die Produktivität und die realisierbaren Profilquerschnitte vergleichsweise gering sind.

7.4.5 Gesticke

Gesticke ermöglichen eine sehr hohe Flexibilität der Faserorientierung und bieten sich daher für die Herstellung von Vorformlingen für Ausschnittsverstärkungen, Krafteinleitungen oder für komplexe, kleine Bauteile an. Das Prinzip beruht darauf, dass die Ver-

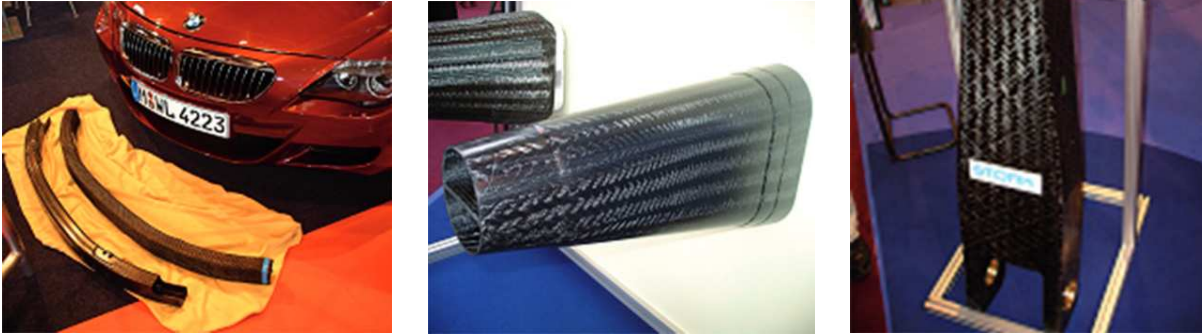


Abb. 7.16: Beispiele für Umflechtbauteile
 BMW M6 Stoßfängerträger (Quelle: SGL Kümpers GmbH), SLR Crashbox (Quelle: Eurocarbon, McLaren Mercedes),
 Flugzeugfahrwerksbein (Quelle: NLR)

stärkungsfasern auf komplexen Bahnen geführt und auf ein Basistextil aufgenäht werden (Abb. 7.18).

Der Vorteil der Sticktechnik liegt neben der Automatisierbarkeit darin, dass die Faserorientierungen den Belastungen und den Geometrien optimal angepasst werden können. Dies führt zu einer hohen Nutzung der Fasern bezüglich gerichteter mechanischer Eigenschaften und Formteilkonturtreue bzw. Verschnittfreiheit. Die Produktivität ist durch den Aufwand der gezielten Ablage geringer als bei Multi-axialgelegten oder Geweben. Neue Entwicklungen bieten durch den Einsatz von Großstickmaschinen jedoch interessante Zykluszeiten.



Abb. 7.17: Flechtfahrrad (Quelle: IFB Universität Stuttgart)

Ein interessantes Beispiel zur Veranschaulichung der Möglichkeiten der Sticktechnik ist der in Abbildung 7.19 dargestellte Fahrrad-Bremssattel im Vergleich mit einem Aluminiumbauteil und einem herkömmlichen Faserverbundbauteil, das aus einer quasi-isotropen Platte aufgebaut ist, dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die Sticktechnik annähernd eine Verdreifachung der gewichtsspezifischen Steifigkeit möglich ist.

Eine große Herausforderung stellt die Auslegung von Gesticken dar. Die klassische Laminattheorie kann hierbei keine Hilfe leisten. Interessante Ansätze basieren auf dem Prinzip des bionischen Wachstums. Hierbei werden in einem iterativen Prozess

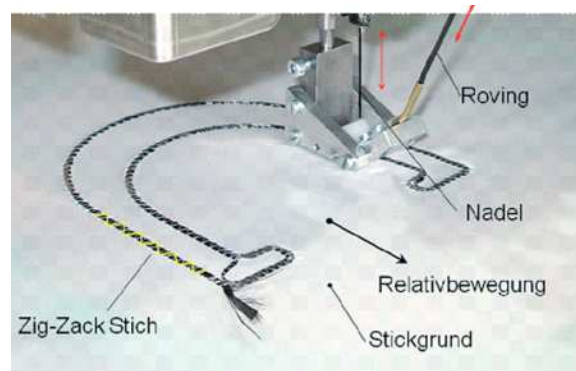


Abb. 7.18: Prinzip der Sticktechnologie (Quelle: IFB Universität Stuttgart)



Aluminium - gestanz

Gewicht: 52 g
 Steifigkeit absolut: 116 N/mm
 Steifigkeit spezif.: 2,26 N/mm/g

**Kohlenstofffaser - TFP**

Gewicht: 28 g
 Steifigkeit absolut: 180 N/mm
 Steifigkeit spezif.: 6,4 N/mm/g

**CF - Gewebe - Prepreg**

Gewicht: 29 g
 Steifigkeit absolut: 65 N/mm
 Steifigkeit spezif.: 2,25 N/mm/g



Abb. 7.19: Vergleich eines gestickten Brakeboosters mit einem Brakebooster aus Aluminium und aus CFK-Prepreg (Quelle: IFB Universität Stuttgart)

die Hauptspannungsrichtungen in einem Bauteil aufgrund der geometrischen Randbedingungen und der aufgetragenen äußeren Lasten berechnet. Mit Hilfe von Optimierungsprogrammen werden ideale Fasereinzellagen berechnet und fertigungsgerecht platziert. Dieses Verfahren kann mit Topologie- und Formoptimierungsverfahren kombiniert werden.

7.4.6 Fiber Patch Preforming

Das Fiber Patch Placement Verfahren (FPP) ist genau genommen kein textiles Verfahren, sondern den

Fiber Placement Verfahren zuzuordnen. Es soll jedoch kurz beschrieben werden, da es neben der Prepreg-Verarbeitung auch trockene Faserhalbzeuge herstellt und damit das flexibelste Verfahren in Bezug auf die realisierbare Geometrie, Bauteildicke und Faserorientierung ist.

Das Prinzip besteht darin, dass definierte Stücke, sogenannte Patches, vollautomatisch aus einem Faserband geschnitten und mit Hilfe von zwei Robotern und einem flexiblen Patchgreifer schnell und positionsgenau auf komplexe 3D-Formen aufgebracht werden (Abb. 7.20).

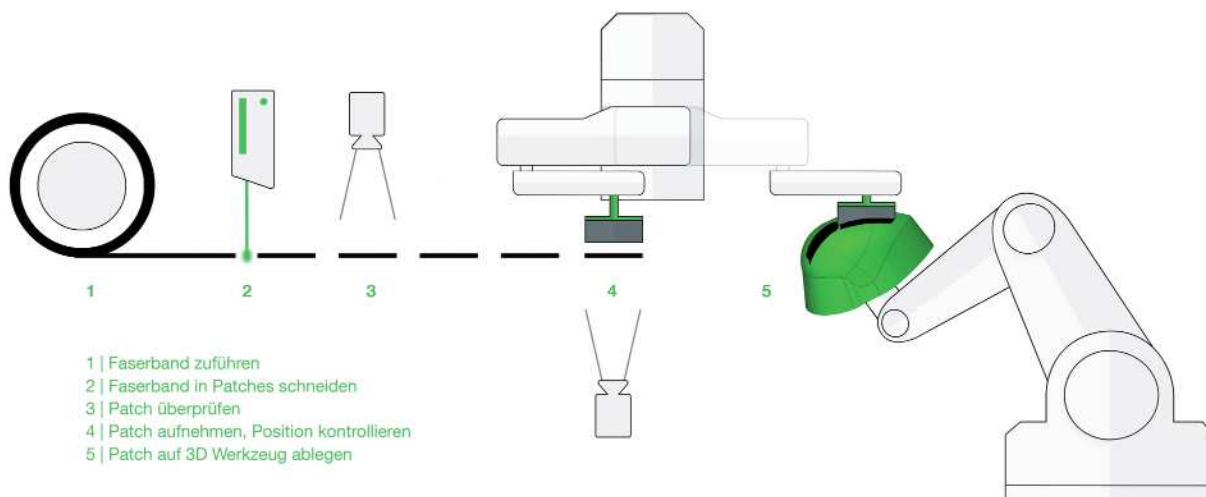


Abb. 7.20: Prinzip des Fiber Patch Placement Verfahrens (Quelle: Cevotec, München 2018)