

1

Einführung: Begriffe und Bedeutung der Fasercharakterisierung

Einleitung

Unter den Begriffen "Faser" und "Fasereigenschaften" werden oft sehr unterschiedliche Dinge verstanden, je nachdem, in welcher Branche Fasern eingesetzt werden. Je nach Ursprung, Verwendung und Charakterisierung gibt es für Fasern tierischer oder pflanzlicher Herkunft verschiedene und vielfach „gewachsene“ Begrifflichkeiten, die zu Missverständnissen und Unklarheiten führen können. Das Buch beginnt daher mit einer ausführlichen Begriffsklärung (Abschn. 1.1).

Exemplarisch werden im Anschluss an das Begriffskapitel zwei wichtige Einsatzgebiete von Naturfasern näher betrachtet: Neben den aus mehr oder weniger großen Holzspänen aufgebauten Holzwerkstoffen werden Plattenwerkstoffe vorgestellt, für die Holz weitgehend zu Einzelfasern zerkleinert wird (Abschn. 1.2). Verbundwerkstoffe aus Naturfasern und einer Kunststoffmatrix finden vielfach Anwendung als Form- oder Spritzgussbauteile (Abschn. 1.3). Beide Arten von Werkstoffen spielen im täglichen Leben eine große Rolle und werden mit zunehmendem Einsatz nachwachsender statt fossiler Rohstoffe noch an Bedeutung gewinnen.

1.1 Begriffe und Definitionen

In diesem Buch greifen die Bereiche Fasern, Textilien, Holzwerkstoffe, Faserverbundwerkstoffe und Prüftechnik übergangslos ineinander. In klar abgegrenzten Bereichen mag die Kommunikation durch Vereinbarungen und Sprachgewohnheiten funktionieren, wenn jedoch unterschiedliche Bereiche betroffen sind und eine transdisziplinäre Zusammenarbeit erfolgt, werden die Unzulänglichkeiten eines derartigen Sprachgebrauchs häufig erst bemerkbar. Da es vor allem bei einer Überschneidung von Wissenschaftsgebieten zu Kommunikationsproblemen kommen kann, ist eine eindeutige und systematische Verwendung von Begriffen zwingend geboten. Aus diesem Grund wird zu Beginn des Buches ein besonderer Wert auf die Terminologie gelegt. Bocheński merkt in diesem Zusammenhang an „Für wissenschaftliche Zwecke muß aber eine perfekte Sprache angestrebt werden, für die genaue Gesetze aufgestellt werden können und müssen.“ [1]. Diese Forderung greift Schnegelsberg in seinen Arbeiten für die Bereiche Fasern und Textilien auf und legt mit seinen Arbeiten *Systematik der Textilien* [2] sowie *Handbuch der Faser* [3] die Grundlage für eine normative Fachsprache,

mit der sich konsistent und wissenschaftlich nachvollziehbar, Zusammenhänge im Bereich der Fasern und Textilien darstellen lassen.

Auf der Grundlage der Arbeiten von Schnegelsberg werden die Begrifflichkeiten – wenn nötig mit Erweiterung und Ergänzung – im Bereich der Fasern, faserförmigen Halbzeugen und Textilien vorgestellt. Weiterhin wird eine systematische Übersicht für die Verstärkungselemente von Holzwerkstoffen vorgeschlagen.

Autor: Jörg Müssig

1.1.1 Faser, Faserbündel, Faserkollektiv

Nach Schnegelsberg ist eine **Faser** ein Gebilde, das elementar und linear ist, eine charakteristische Längs- und Querschnittsform und eine charakteristische chemische Zusammensetzung (Faserstoff) aufweist [3].

Der Begriff **Faserstoff** (Fasersubstanz) beschreibt die „*chemisch-stoffliche Substanz einer Faser*“. Hierbei sind natürlich gegebene Fasersubstanzen, wie Cellulose oder Proteine und industriell geschaffene Fasersubstanzen wie Metalllegierungen oder Polyamide zu unterscheiden [3].

Eine *industriell geschaffene* Polyamidfaser ist eine Polymerfaser, deren Faserstoff aus linearen aliphatischen Polyamiden mit alternierenden –CO–NH–Gruppen aufgebaut ist. Im Gegensatz dazu besteht die *natürlich gegebene* Cottonfaser zum großen Anteil aus der Faserstoff Substanz Cellulose, einem linearen Polysaccharid, das aus $\beta(1-4)$ -verknüpften D-Glucose-Einheiten besteht.

Im Falle von pflanzlichen Naturfasern merkt Vincent [4] an, dass eine Faser die kleinste intakte Einheit in einer Pflanzenstruktur ist und fügt hinzu, dass sich der Begriff Faser nur auf eine einzelne längliche Pflanzenzelle beziehen sollte, z. B. die Cottonfaser. Er weist darauf hin, dass Naturfasern selten als einzelne Zellen vorkommen, sondern meist zu Bündeln zusammengefügt sind [4]. In Abb. 1.1 ist zur Illustration ein pflanzliches Faserbündel gezeigt, das aus einzelnen Fasern zusammengesetzt und je nach Grad des Aufschlusses bis zur einzelnen Faser aufgeschlüsselt werden kann.

Ein **Faserbündel** ist ein zusammengesetztes Faserkollektiv. Die einzelnen Fasern sind miteinander verklebt und verkittet und lassen sich durch biologische, chemische oder mechanische Verfahren aus dem Faserbündel bis zur einzelnen Faser auflösen [3, 6].

Eder und Burgert [7] weisen in ihrer Arbeit auf die Probleme bei der Benennung von „Holzfasern“ hin. Als Startpunkt setzen die Autor:innen die Produkte Zellstoff und Papier,

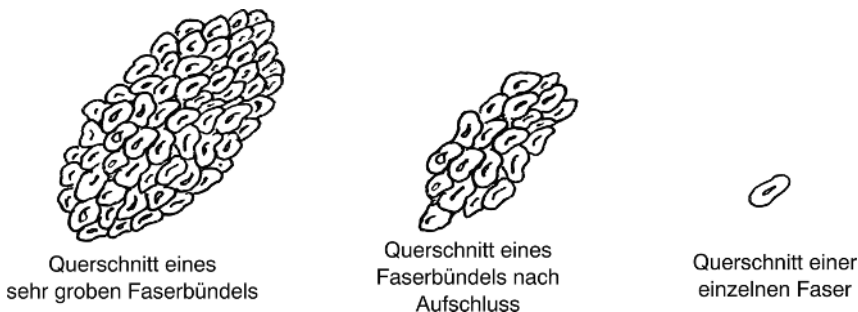


Abb. 1.1 Ein pflanzliches Faserbündel kann bis zur einzelnen Faser aufgeschlüsselt werden [5] (mit freundlicher Genehmigung vom Verlag Scrivener Publisher).

für die hauptsächlich faserförmige Zellen des Holzes verwendet werden. Botanisch gesehen handelt es sich dabei um sekundäre Xylemzellen, wobei das Xylem das Gewebe ist, welches zur Leitung von Wasser und Nährstoffen dient und meist auch zur mechanischen Festigkeit der Struktur dient. Die Autor:innen [7] betonen, dass aus evolutionärer Sicht Holzfasern die Folge einer fortschreitenden Spezialisierung der Gewebetypen sind. Das Holz der evolutionär älteren Nadelhölzer besteht zu ungefähr 95 % aus einem Zelltyp, den sogenannten Tracheiden, die dem Wassertransport dienen und gleichzeitig die Struktur festigen können. In hoch entwickelten Laubhölzern (Angiospermen) übernehmen zwei spezialisierte Zelltypen diese beiden Funktionen, Gefäße mit großem Lumen und dünnen Zellwänden und **Fasern** mit kleinem Lumen und dicken Zellwänden. Eder und Burgert fassen zusammen, dass Weichholztracheiden in botanischer Sicht nicht als Pflanzenfasern bezeichnet werden, allerdings im Bereich der Holzwerkstoffe als sogenannte „*Weichholzfasern*“ eine entscheidende Rolle spielen [7].

Die eingangs vorgestellte Definition für eine Faser widerspricht dem nicht, sodass im Rahmen des vorliegenden Buches neben den Holzfasern (botanisch) im Festigungsgewebe der Laubhölzer auch die anderen Holzzellen der Laubhölzer als „*Hartholzfasern*“ und bei den Nadelhölzern als „*Weichholzfasern*“ bezeichnet werden. Zur weiteren Differenzierung der Zellen bei Nadelhölzern (Koniferen) und Laubhölzern (Angiospermen) sei z. B. auf die Arbeit von Kull [8] verwiesen.

Nach Dunky und Niemz [9] werden Holzwerkstoffe durch Zerkleinern des Baums und anschließendes Zusammenfügen der entstandenen Holzelemente erzeugt (siehe Abb. 1.2). Vergleichbar zu textilen Flächengefügen (siehe Abschn. 1.3.1) können unterschiedliche Arten der Verbindung auftreten. Zu nennen sind Haftung, Verklebung und zusätzlich die Verwendung von Verbindungen zur lagestabilen Fixierung der Elemente.

In der Literatur zu Holzwerkstoffen werden die verwendeten Holzelemente zwar beschrieben, eine systematische Übersicht unter Berücksichtigung von Ordnungsmerkmalen (z. B. der Morphologie) fehlt allerdings häufig. So klassifiziert z. B. Marra in den 1970er-Jahren ([10] und zitiert in [9]) die verwendeten Holzelemente zum Aufbau von Holzwerkstoffen vom Stamm bis zur Cellulose, ordnet diese allerdings nicht systematisch und beschreibt lediglich, dass sich die „grundlegenden Holzelemente vom Größten zum Kleinsten erstrecken“ [10].

Bei der Studie der Literatur zu Holzwerkstoffen fällt zum Teil eine fehlende systematische Verwendung von Begriffen auf. So wird der Holzwerkstoff *Scrimber* den Spanwerkstoffen zugeordnet [9, 11, 12], obwohl das entsprechende Holzelement nicht durch Zerspanung entsteht, sondern die Partikel durch Zerquetschen geschaffen werden. Es wird daher vorgeschlagen, diese Unterschiede auch begrifflich zu verdeutlichen (Span versus **Quetschpartikel**; siehe Abb. 1.2).

Ein anderes Beispiel stellt die Wortung *Holzwohle* dar. Wolle ist der Begriff für ein Kollektiv aus animalischen Fasern, deren Faserstoff aus Keratin besteht [3]. Schnegelsberg merkt an, nicht systemkonforme Begriffe wie Baumwolle, Zellwolle, Glas- oder Steinwolle durch alternative Benennungen zu ersetzen [3]. Für die nicht systemkonforme Benennung Holzwohle wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen: Das Holzelement wird **Hobel-Langspan** genannt, da die bis zu 500 mm langen Holzelemente mit spanabhebenden Hobelmaschinen hergestellt werden. Eine Einordnung in Feinheitssklassen orientiert sich an [13], wobei die Gradierung der Feinheitseinteilung nach Schnegelsberg [3] erfolgt. Das Kollektiv von

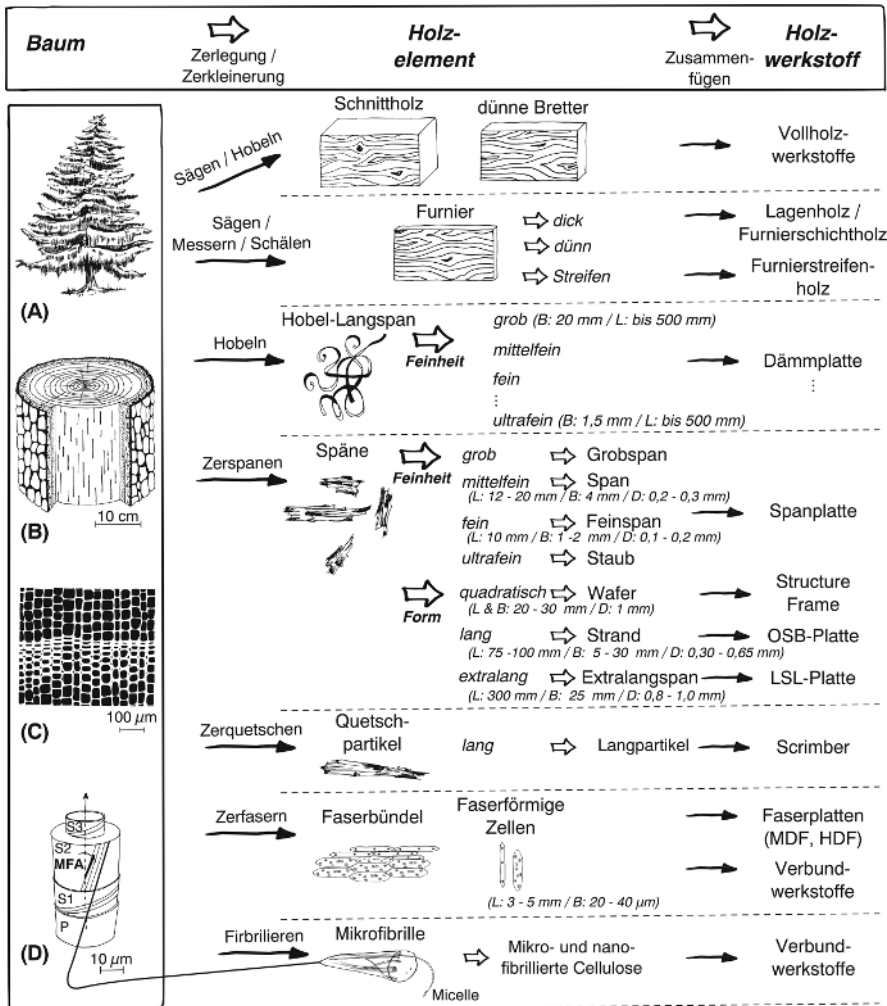


Abb. 1.2 Vom Baum über das Zerlegen und Zusammenfügen der Holzelemente zum Holzwerkstoff – der Versuch einer systematischen Zusammenstellung zur begrifflichen Ordnung. OSB: oriented strand board; LSL: laminated strand lumber; MDF: mitteldichte Faserplatte; HDF: hochdichte Faserplatte.

Langhobelspänen soll als **Holzflocke** bezeichnet werden. Die Umsetzung ist Abb. 1.2 zu entnehmen.

Im Rahmen dieses Buchprojekts wird der Versuch unternommen, den Bereich der Holzelemente für Holzwerkstoffe systematischer zu strukturieren und eine Anpassung von Begriffen vorzunehmen, damit sich keine Widersprüchlichkeiten mit der Systematik der Textilien und Fasern ergeben. Das Ergebnis dieses Ansatzes ist in Abb. 1.2 grafisch umgesetzt. In Teil (A) der Abb. 1.2 findet sich die schematische Darstellung von *Picea abies*, der Gemeinen Fichte, (B) zeigt den Querschnitt durch einen Fichtenstamm. Im Bildteil (C) wird gezeigt, dass sowohl Größe als auch Dicke der Zellwand der Fichtenfasern über einen Jahresring erheblich variieren (Frühholz wird gebildet, um einen effizienten Wassertransport zu gewährleisten; Spätholz mit dicken Zellwänden wird hauptsächlich zur mechanischen Un-

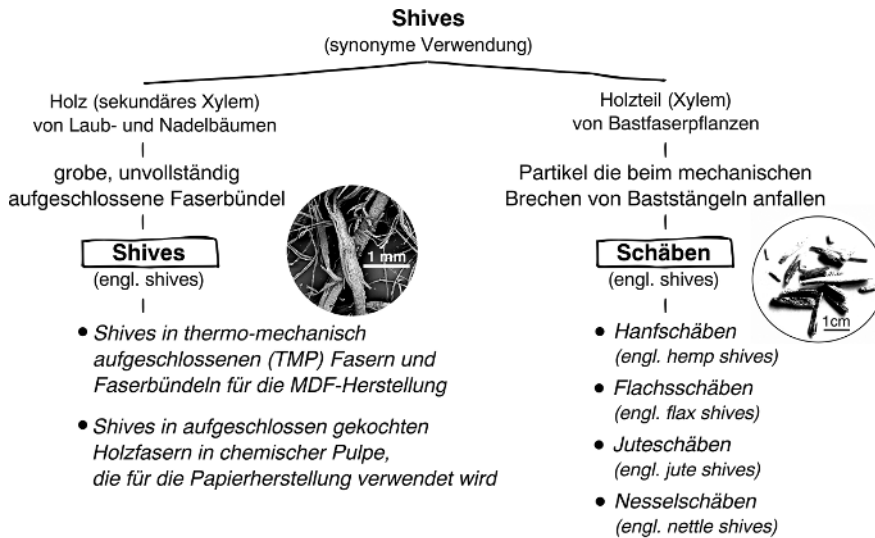


Abb. 1.3 Die synonyme Verwendung der Benennung „Shives“ im Bereich der Papier- und Holzwerkstoffherstellung sowie der Bastpflanzenaufbereitung.

terstützung des Baums gebildet). Bildteil (D) zeigt die Holzfasern, die einem hohlen Rohr mit verjüngten Enden ähneln, das etwa 0,5–4 mm lang und 15–40 µm dick ist; die Zellwände sind 0,5–10 µm dick [7, 9]. Durch Zerlegung und Zerkleinerung des Baums lassen sich unterschiedliche Holzelemente schaffen, die durch Zusammenfügen zum Holzwerkstoff werden. Beispiele und Größenangaben für Holzelemente und Holzwerkstoffe entstammen den Arbeiten aus Marra [10], Kull [11], Dunky und Niemz [12], Niemz [13], Burgert [14], Thole [15], Thömen [16] und Richter et al. [17].

Das vorliegende Buch verknüpft die Bereiche Naturfasern, faserförmige Halbzeuge, Textilien und Verstärkungselemente für Holzwerkstoffe mit naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen. Greifen unterschiedliche Wissenschaftsgebiete ineinander, werden unterschiedliche Sprachgewohnheiten offensichtlich. Zum unmissverständlichen Austausch von Informationen ist eine fachübergreifende Terminologie anzustreben, wie der Ansatz in Abb. 1.2 zeigt.

Bei der Begriffsanalyse im Bereich der Aufbereitung der Bastfaserpflanzen und der Holzwerkstoffherstellung wird die synonyme Verwendung von Benennungen deutlich. Die Abb. 1.3 zeigt ein Beispiel dafür. Sowohl im Bereich der Papier- und Holzwerkstoffherstellung als auch bei Bastpflanzenaufbereitung wird die Benennung „Shive“ verwendet. Vor allem im englischen Sprachgebrauch werden die Schwierigkeiten der synonymen Verwendung der Benennung offensichtlich. Formal handelt es sich in beiden Fällen („Shives“ versus Schäben) um Faserbündel aus dem Holz (Xylem) der Pflanze in unterschiedlichen Aufschlussgraden. Zur begrifflichen Trennung wird vorgeschlagen, bei Schäben aus Bastpflanzen im englischen den Namen der Pflanze voranzustellen (z. B. *hemp shives*).

Unter dem Begriff **Faserkollektiv** werden Fasern geringer, mittlerer oder großer Anzahl verstanden, „die begrifflich eine Einheit bilden“ [3]. Zu den ungeordneten Faserkollektiven gehören z. B. die Flocke, der Faserbrei oder der Flock (begriffliche Zuordnung siehe Abb. 1.35 in Abschn. 1.3). Zu den geordneten Faserkollektiven zählen das Faserbüschel, der Faserflor oder das Faserband [3].

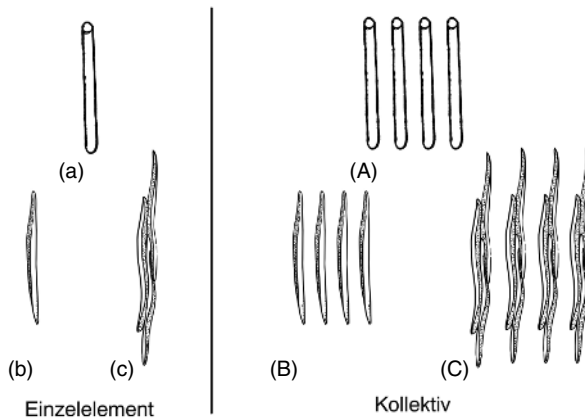


Abb. 1.4 Links: Einzelemente: (a) Chemiefaser, (b) einzelne Pflanzenfaser und (c) einzelnes Faserbündel versus Kollektive; rechts: (A) Chemiefaserkollektiv, (B) einzelnes Pflanzenfaserkollektiv und (C) Faserbündelkollektiv [5] (mit freundlicher Genehmigung vom Verlag Scrivener Publisher).

Neben dem Begriff Faserkollektiv muss im Rahmen des Buches auch der allgemeinere Begriff **Kollektiv** eingeführt werden, da neben Fasern auch andere Einzelemente wie z. B. ein Faserbündel zu einem Kollektiv zusammengefügt werden können. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Kollektivversuche eine wichtige Methode zur Charakterisierung z. B. der Länge (Almeter), der Festigkeit (HVI und Stelometer) sowie der Faser-Matrix-Haftung sind, veranschaulicht Abb. 1.4 verschiedene Arten von Kollektiven aus Einzelementen.

Ein **Faserbüschel** ist nach Schnegelsberg [3] ein geordnetes Faserkollektiv aus wenigen Stapelfasern, die zusammengerafft eingebunden werden. Der Begriff Faserbüschel taucht auch im Rahmen einiger Prüfmethoden von Naturfasern auf. Als Beispiel sei hier die Probenpräparation für das Rasterelektronenmikroskop (REM) genannt, die in Abb. 1.5 schematisch dargestellt ist. Parallelisierte Fasern in Form eines Faserbüschels werden in einen Schrumpfschlauch eingeführt. Die Querschnitte von Fasern werden geschnitten und für die REM-Untersuchung vorbereitet.

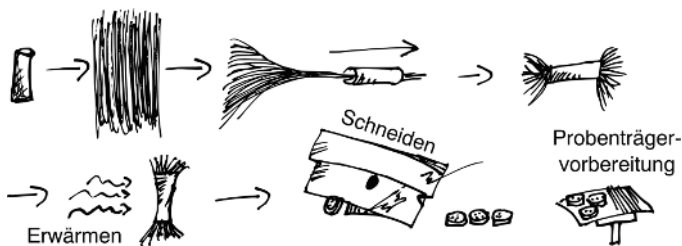


Abb. 1.5 Probenvorbereitungsschritte von Querschnitten für das Rasterelektronenmikroskop (REM) [14] (mit freundlicher Genehmigung vom Verlag John Wiley & Sons).

1.1.2 Faserform

Die Inhalte und Schwerpunkte des vorliegenden Buches zum Thema Fasercharakterisierung liegen u. a. auf der Faserform. Aus diesem Grund werden Begriffe zur Faserform und zu den teilbezogenen Faserformen im Rahmen dieses Abschnittes genauer beschrieben.

Die **Faserform** beschreibt die „*morphologisch bestimmbare Form einer Faser*“ oder eines Faserbündels und lässt sich in Gestalt und Größe gliedern. Besonders relevant für die Charakterisierung im Rahmen dieses Buches sind die teilbezogenen Faserformen: (i) Längsform, (ii) Querschnittsform und (iii) Oberflächenform [3].

Zur Beschreibung der **Längsform** werden der *Faserverlauf* und die *Faserlänge* betrachtet. Die **Querschnittsform** ist zusammengesetzt aus *Faserschnitt* und *Faserfeinheit* und die **Oberflächenform** ist ein „*Korrelat aus Faserstruktur und Strukturfeinheit*“ [3]. Zum besseren Verständnis sind für eine Weichholzfaser (Tracheide) des Spätholzes der Gemeinen Fichte, eine Cotton- und eine Wollfaser in Abb. 1.6–1.8 die Zuordnungen zu den teilbezogenen Faserformen grafisch umgesetzt. Es soll mit den Abbildungen weiterhin gezeigt werden, dass je nach Art des formbezogenen Merkmals unterschiedliche Zuordnungen und Benennungen getroffen werden können.

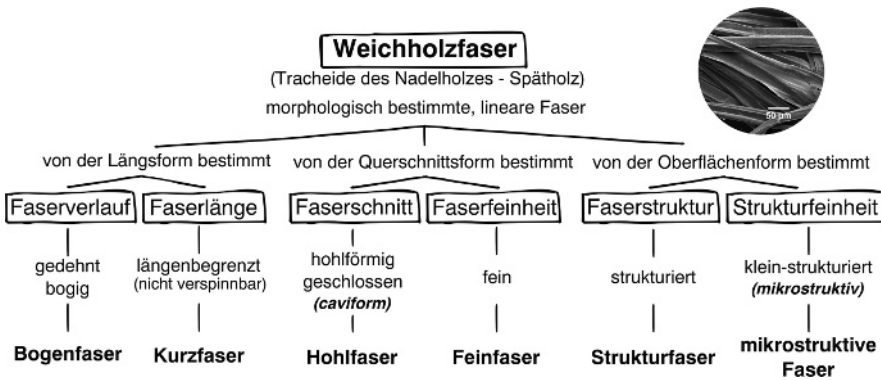


Abb. 1.6 Teilbezogene Faserformen für eine faserförmige Zelle (Tracheide) des Spätholzes der Gemeinen Fichte (*Picea abies*) (Grafik entwickelt auf der Basis der Theorie und Systematik der Faser [3]).

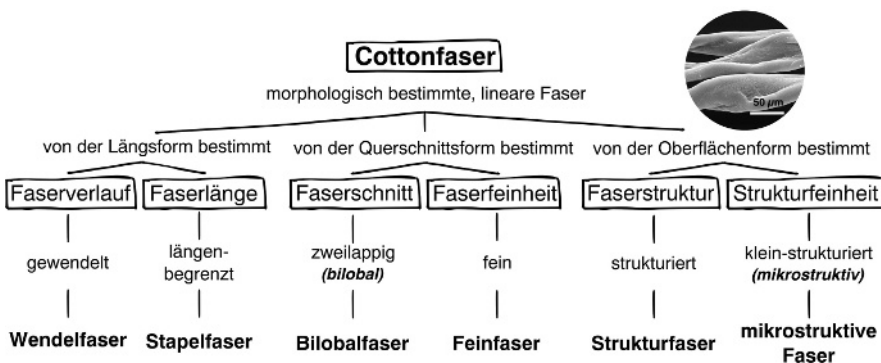


Abb. 1.7 Teilbezogene Faserformen für eine Cottonfaser (Grafik entwickelt auf der Basis der Theorie und Systematik der Faser [3]).

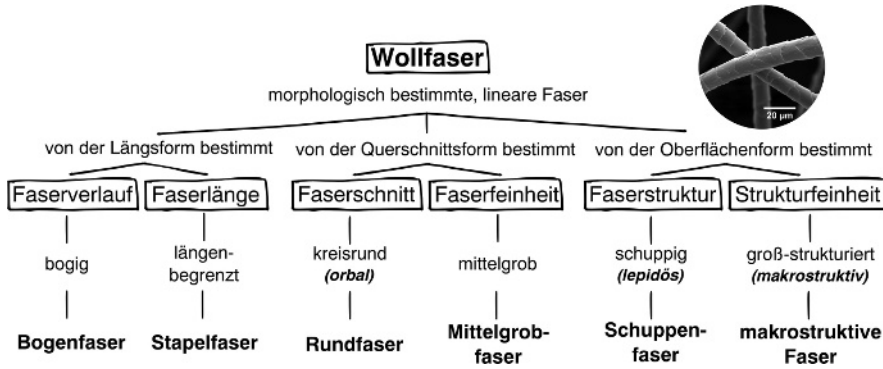


Abb. 1.8 Teilbezogene Faserformen für eine Wollfaser (Grafik entwickelt auf der Basis der Theorie und Systematik der Faser [3]).



Abb. 1.9 Graduierung teilbezogener Faserformen (Faserverlauf, Faserfeinheit und Strukturfeinheit) (Grafik entwickelt auf der Basis der Theorie und Systematik der Faser [3]).

Bezüglich der Fasermesstechnik ist es besonders wichtig, Unterschiede in gemessenen Faserformen begrifflich benennen zu können. Hierzu sind in Abb. 1.9 wichtige Beispiele für graduierbare Fasereigenschaften zum *Faserverlauf*, zur *Faserfeinheit* und zur *Strukturfeinheit* zusammenfassend dargestellt.

Nach dieser kurzen Einführung und Vorstellung der teilbezogenen Faserformen (i) Längsform, (ii) Querschnittsform und (iii) Oberflächenform werden diese im Folgenden detaillierter vorgestellt. Begrifflichkeiten und Zuordnungen werden auch auf die Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Schwerpunkt auf die Fasermesstechnik hin diskutiert.

1.1.2.1 Längsform

In der Arbeit „Systematik und Begrifflichkeit im Bereich der Faserlängenmessung“ [15] wird bereits darauf hingewiesen, dass eine systematische Verwendung von Begriffen hilft, sprachliche Widersprüchlichkeiten im Bereich der Faserlängenmesstechnik aufzulösen.

Die Leser:innen werden im Folgenden eine Systematik finden, die es ihnen erlaubt, Messverfahren, die im weiteren Verlauf des Buches vorgestellt werden, entsprechend ihrer Charakteristik einzuordnen. Als Einstieg sei noch einmal festgehalten, dass zur Beschreibung der **Längsform** der **Faserverlauf** und die **Faserlänge** betrachtet werden (vgl. Abb. 1.6–1.8).

1.1.2.1.1 Faserverlauf

Ein **Faserverlauf** kann grundsätzlich, wie in Abb. 1.10 gezeigt, in **schlicht** und **kraus** unterteilt werden. Im Zusammenhang mit krausen Faserverläufen ist es wichtig, zwei Begriffe klar zu trennen: Krause und Kräuselung (siehe auch [2, 15]). Mit **Kräuselung** ist ein verfahrenstechnischer Vorgang gemeint, mit dem eine Faser mit schlichtem Verlauf in einen krausen Verlauf (**Krause**) überführt wird. „Die Krause ist das Ergebnis einer Kräuselung“ [2].

Mit Abb. 1.10 lässt sich neben der begrifflichen Zuordnung auch ein erster wichtiger Aspekt der Faserlängenmessung beschreiben. Wie in [15] ausgeführt, haben alle Fasern in Abb. 1.10 bei reiner Betrachtung der Erstreckung in eine Richtung etwa den gleichen Längenwert. Wenn die gewendelte Faser langgestreckt wird, ergibt sich im Vergleich zur Faser mit schlichtem Verlauf ein etwa doppelt so großer Wert der Länge. Mit diesem Beispiel soll deutlich werden, wie wichtig die Präparationsmethodik auf das Ergebnis der Längenmessung sein kann [15].

Der Faserverlauf kann sich im Rahmen der Verarbeitung, aber eben auch im Rahmen der Präparation und bei der eigentlichen Messung verändern. Wie in Abb. 1.11 gezeigt, schlägt Matthes [16] eine Verteilung möglicher Anordnungen vor: (i) gekrümmt, (ii) gerichtet, (iii) gestreckt und (iv) gedehnt.

Müssig, Rettig¹⁾ und Harig [15] führen zur Beschreibung eines krausen Faserverlaufs den **Krausefaktor C** ein. Der in Abb. 1.13 dargestellte Faktor errechnet sich aus der Differenz der Werte L_{diskret} (siehe Abb. 1.12; Länge des diskretisierten Faserverlaufes; entspricht der Länge der gestreckten Faser) und Wert $L_{\text{max. gerad}}$ (siehe Abb. 1.12; maximale geradlinige Verbindung zwischen zwei Punkten (P) auf dem diskretisierten Faserverlauf) bezogen auf den Wert von $L_{\text{max. gerad}}$ in Prozent [15]. Bei derartigen Fragestellung ist immer die Maßeinheit zur Messung der Abstände zwischen zwei Punkten zu definieren. Das bekannteste

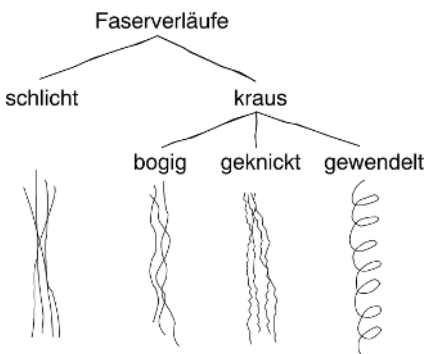


Abb. 1.10 Schematische Darstellung typischer Faserverläufe (Grafik entwickelt auf der Basis der Systematik der Textilien [2]).

1) In Gedenken an Dieter Rettig, †2020.

Gekrümmte Faser: Faser bei gegebenem Faserverlauf, die zusätzlich zur eigenen Krause über einen bogenigen Verlauf verfügt, der z. B. an den Faserenden u- oder v-förmig ausläuft.

Gerichtete Faser: Faser, die unter Beibehaltung ihres gegebenen Faserverlaufs ausgerichtet wird.

Gestreckte Faser: Faser mit schlichtem Faserverlauf. Hierzu muss die Faser mit einer entsprechenden Kraft gestreckt werden, bis ein schlichter Verlauf erreicht ist, ohne dass die Faser jedoch gedehnt wird.

Gedehnte Faser: Die Faser wird mit einer entsprechenden Kraft soweit gestreckt, dass zusätzlich zum schlichten Verlauf eine Dehnung der Faser auftritt.

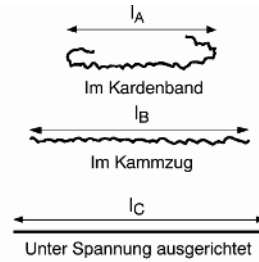


Abb. 1.11 Mögliche Anordnungen von Fasern, die im Verarbeitungsprozess auftreten können [17] (mit freundlicher Genehmigung: Deutscher Fachverlag Frankfurt).

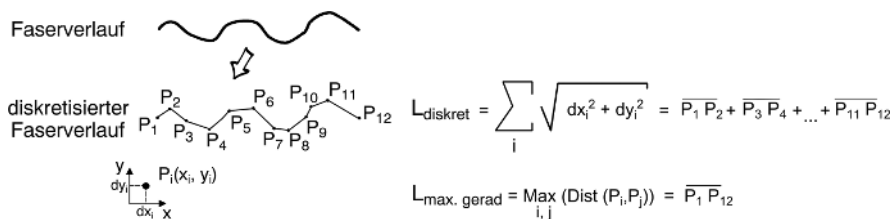


Abb. 1.12 Diskretisierung eines Faserverlaufs zur Ermittlung des Krausefaktors C [15] (mit freundlicher Genehmigung vom Schiele & Schön Verlag, Berlin).

Beispiel in diesem Zusammenhang geht wohl auf den Mathematiker Mandelbrot zurück, der 1967 fragte „Wie lang ist die Küste Englands?“⁽²⁾ [18].

Die in Abb. 1.13 gezeigten gradierten teilbezogenen Faserformen des Faserverlaufs (Bogenformen) wurden mittels bildanalytischer Vermessung analysiert. Bei annähernd gleichen Werten für $L_{\text{max. gerad}}$ ergeben sich deutliche Unterschiede bezüglich L_{diskret} . Mithilfe des **Krausefaktors C** liegt ein geeigneter Kennwert zur quantitativen Beschreibung eines krausen Faserverlaufs vor [15]. Während bei für Textilien verwendeten Fasern alle Formen der Faserverläufe anzutreffen sind, haben Holzfasern einen schlichten bis maximal normalbogigen Faserverlauf, sodass der Krausefaktor für Holzfasern eine untergeordnete Rolle spielt.

1.1.2.1.2 Faserlänge

Eine Faser ist entweder endlos oder längenbegrenzt. Für endlose Fasern sollte nach Schnegelsberg der Begriff **Endlosfaser** verwendet werden [2]. In Abgrenzung zur DIN 60001 [19] und 60900 [20] soll für eine längenbegrenzte Faser nicht die uneindeutige Benennung Spinnfaser, sondern der Begriff **Stapelfaser** verwendet werden [2].

Länge der gesamten Faser In der Literatur wird bei einigen Messmethoden die Benennung „Längenmessung an endengeordneten Fasern“ verwendet. Diese historisch gewachsene Benennung sollte jedoch durch den Begriff **Messung der Länge der gesamten Faser**

²⁾ Er beschreibt in diesem Zusammenhang, wie groß der Einfluss der Auflösung eines Objekts und die Wahl der verwendeten Längenskala ist.

Faserverlauf		Maximale geradlinige Verbindung	Länge des diskretisierten Faserverlaufs	Krausefaktor
		$L_{\text{max. gerad}}$ in mm	L_{diskret} in mm	$C = \frac{L_{\text{diskret}} - L_{\text{max. gerad}}}{L_{\text{max. gerad}}} \cdot 100$ in %
(schlicht)		24,32	24,32	0,00
gedehntbogig		24,41	26,08	6,41
flachbogig		24,32	27,69	12,18
normalbogig		24,41	30,90	21,00
hochbogig		24,50	42,41	42,23
überbogig		24,73	85,56	71,10

Abb. 1.13 Beispiele für die Berechnung des Krausefaktors C für unterschiedliche Faserverläufe [15] (mit freundlicher Genehmigung vom Schiele & Schön Verlag, Berlin).

ersetzt werden, da bei einigen Messmethoden zwar die gesamte Faser vermessen wird, aber auf die Präparation endengeordneter Fasern verzichtet wird [15, 21]. Nach diesem Prinzip arbeiten beispielsweise das AFIS³⁾ [22] und einige Bildanalysemethoden wie FibreShape⁴⁾ [23, 24]. Nach Müssig, Rettig und Harig erlaubt der Begriff **Messung der Länge der gesamten Faser** eine sprachlich eindeutige Abgrenzung gegenüber Längenmessmethoden, bei denen Teilabschnitte einer Faser gemessen werden [15].

Zur Interpretation von Messdaten, die mit Methoden zur *Messung der Länge der gesamten Faser* ermittelt werden, muss unbedingt die Art der Probenpräparation und die Art des Messprinzips beachtet werden. Es ergeben sich erhebliche Unterschiede, wenn bei einer gesamten Faser die maximale geradlinige Verbindung des Faserverlaufs ($L_{\text{max. gerad}}$) oder die Messung entlang des Faserverlaufs (L_{diskret}) gemessen wird (vgl. Abb. 1.14) [15]. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass bei optischen Messungen die gemessene Länge immer auch von der gewählten optischen Auflösung abhängt.

Probleme bei der Bestimmung der „Länge der gesamten Faser“ ergeben sich vor allem bei Faserbündeln, die Abzweigungen einzelner Fasern oder kleinerer Faserbündel aufweisen und/oder durch Verzweigungen im Verlauf der Länge charakterisiert sind.

Länge des Teilabschnitts einer Faser Der wesentliche Unterschied zwischen den Begriffen *Länge der gesamten Faser* und *Länge des Teilabschnitts einer Faser* ist das Bezugssystem. Beim erstgenannten Begriff wird die Frage nach der Rohstoffeigenschaft gestellt „wie ist der Rohstoff?“, während bei der Bestimmung der **Länge des Teilabschnitts einer Faser** ein verfahrenstechnischer Bezug hergestellt wird und die Frage im Raum steht, „wie verhält sich der Rohstoff?“ [15, 21]. Dieser verfahrenstechnische Bezug des Spannlängenbegriffs ist in Abb. 1.15 dargestellt.

3) Nähere Informationen hierzu finden sich im Kapitel *Verfügbare Analytikmethoden und -geräte, AFIS* (Abschn. 4.1.3.4).

4) Nähere Informationen hierzu finden sich im Kapitel *Verfügbare Analytikmethoden und -geräte, FibreShape* (Abschn. 4.1.1.1).

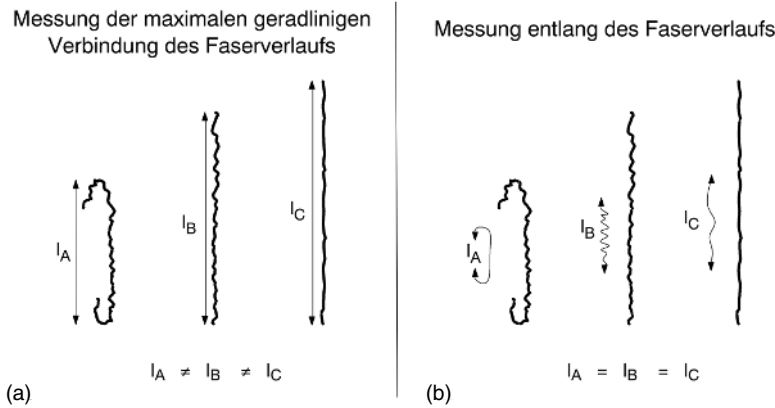


Abb. 1.14 Länge der gesamten Faser gemessen als (a) $L_{\max. \text{gerad}}$ und (b) L_{diskret} [15] (mit freundlicher Genehmigung vom Schiele & Schön Verlag, Berlin).

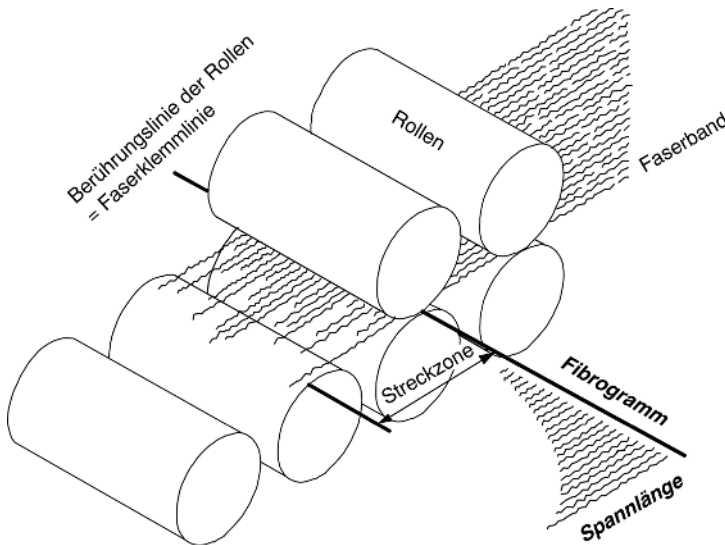


Abb. 1.15 Verfahrenstechnischer Bezug des Spannlängenbegriffs [25] zitiert in [15] (mit freundlicher Genehmigung vom Schiele & Schön Verlag, Berlin).

Die Abb. 1.15 zeigt einen Ausschnitt (Walzenstreckwerk) aus dem Spinnereiprozess, wobei ein Faserband verstreckt wird. Die Analogie zur Vermessung der *Länge des Teilabschnitts einer Faser* besteht darin, dass nicht endengeordnete Fasern zufällig an einer Klemmlinie erfasst werden. Die von der Klemmlinie in die Streckzone orientierten Fasern werden bezüglich ihrer Teillänge gemessen und in Form eines Fibrogramms aufgetragen. Im Fibrogramm werden die Fasern nach ihrer Überstandslänge (Spannlänge) geordnet dargestellt [15].

Die Werte und Häufigkeitsverteilungen aus Messungen der Methoden *Länge des Teilabschnitts einer Faser* und *Länge der gesamten Faser* unterscheiden sich erheblich und die Messwerte sind immer unter Nennung der Methode anzugeben. Die Abb. 1.16 zeigt den Zusammenhang zwischen Histogramm, Stapeldiagramm und Fibrogramm. Die Anwendung

der dargestellten Häufigkeitsverteilungen für den Bereich der Bildanalyse werden im Abschn. 3.4 vorgestellt.

1.1.2.1.3 Bezogene Länge der gesamten Faser

Neben der in Abb. 1.16 gezeigten Häufigkeit nach Anzahl kann die Häufigkeit einer Längenverteilung auch auf andere Größen bezogen werden. In Abb. 1.17 sind die unterschied-

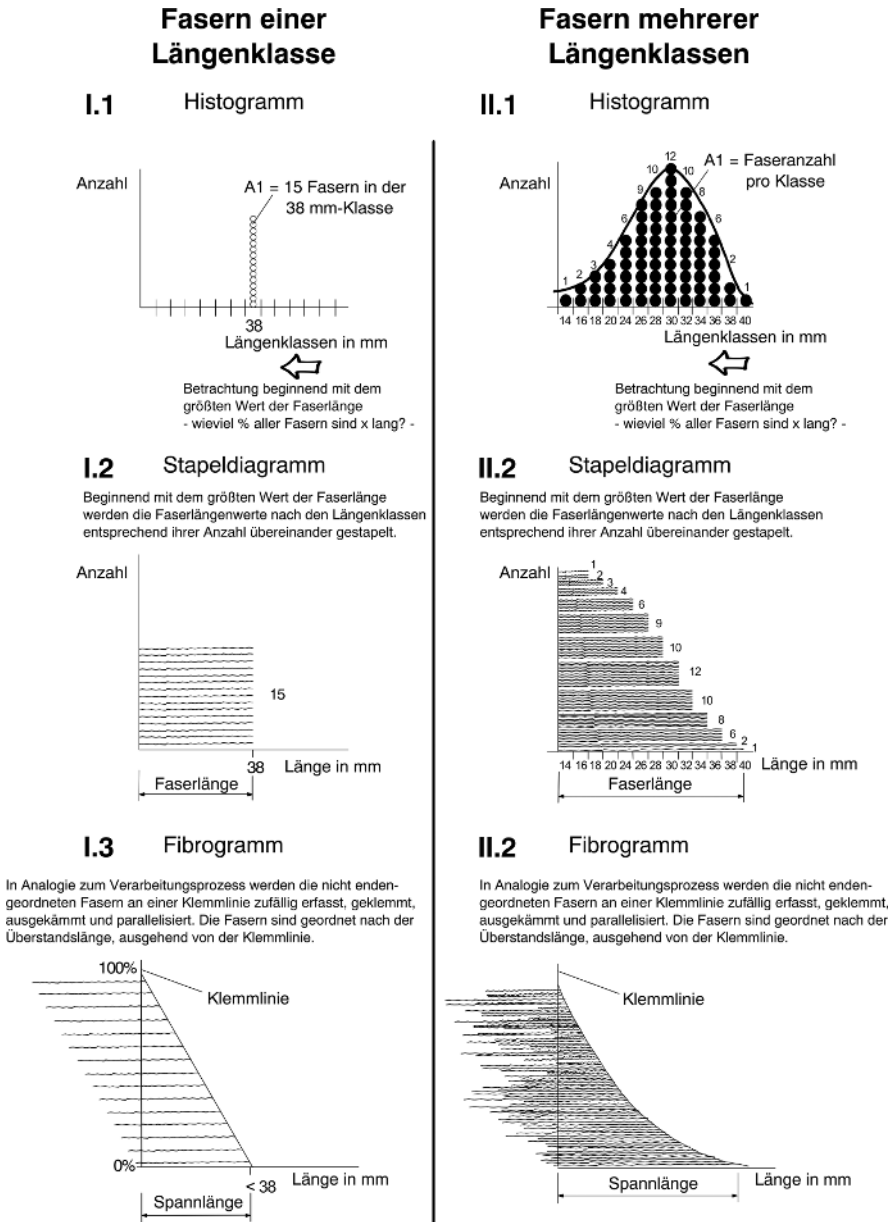
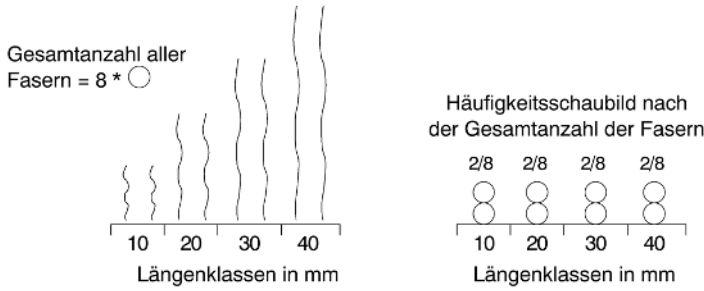
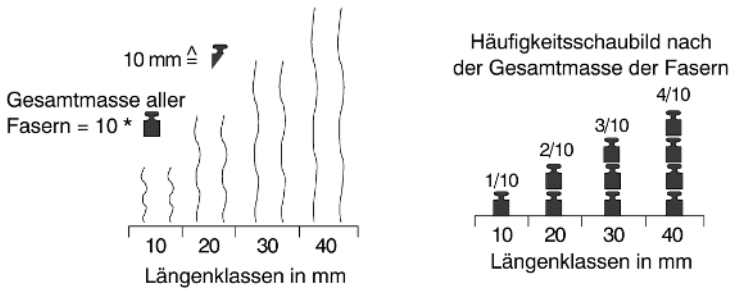


Abb. 1.16 Zusammenhang zwischen Histogramm, Stapeldiagramm und Fibrogramm [21].

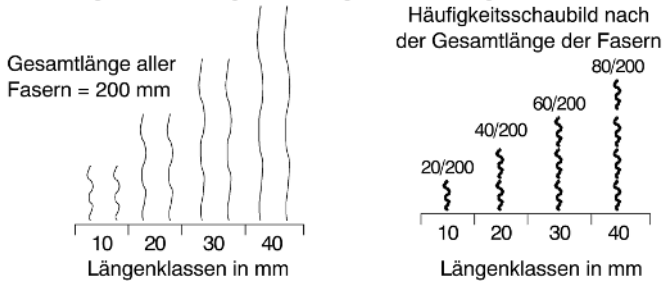
Häufigkeit bezogen auf die Gesamtanzahl der Fasern



Häufigkeit bezogen auf die Gesamtmasse der Fasern - gesamtmassebezogene Häufigkeit -



Häufigkeit bezogen auf die Gesamtlänge der Fasern - gesamt-längenbezogene Häufigkeit -



Häufigkeit bezogen auf den Gesamtquerschnitt der Fasern - gesamtquerschnittbezogene Häufigkeit -

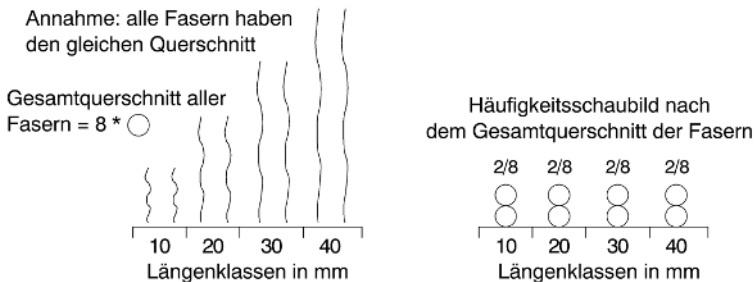


Abb. 1.17 Häufigkeit der Faserlängenverteilung bezogen auf die Gesamtmasse, den Gesamtquerschnitt und die Gesamtfaserlänge [21].

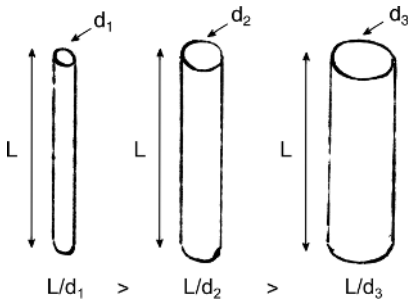


Abb. 1.18 Unterschiedliche Aspektverhältnisse in Abhängigkeit vom Faserdurchmesser [26] (mit freundlicher Genehmigung vom Verlag Scrivener Publisher).

lichen Möglichkeiten beispielhaft dargestellt. Im Abschn. 3.4.2 finden sich weiterführende Betrachtungen zum Thema der *gewichteten Häufigkeit*.

1.1.2.2 Querschnittsform

Für Faserverbundwerkstoffe ist nicht nur die Länge der Faser oder Faserbündel eine wichtige Eigenschaft; das Aspektverhältnis (Länge/Durchmesser) beeinflusst maßgeblich die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs. In Abb. 1.18 ergeben sich für gleiche Faserlängen aufgrund verschiedener Durchmesser unterschiedliche Aspektverhältnisse.

Die Charakterisierung des Durchmessers einer Faser fällt in die Kategorie der teilbezogenen Faserformen und hier im Speziellen in den Bereich der Querschnittsform. Wie im Abschn. 1.1.2 bereits beschrieben, setzt sich die Querschnittsform einer Faser aus Faserschnitt und Faserfeinheit zusammen. Die Cottonfasern (vgl. Abb. 1.7) haben eine bilobale bis amöbale Faserquerschnittsform (Faserschnitt) und sind fein (Faserfeinheit). Wollfasern (vgl. Abb. 1.8) haben eine orbale Faserquerschnittsform (Faserschnitt) und sind mittelfein bis mittelgrob (Faserfeinheit).

1.1.2.2.1 Faserschnitt

Nach Schnegelsberg beschreibt der Faserschnitt die Eigenschaft, die die Querschnittsgestalt der Faser beinhaltet. Bei Fasern lassen sich grob folgende Schnitte unterscheiden [3]:

1. rundförmige Schnitte,
2. sternförmige Schnitte,
3. stabförmige Schnitte,
4. hohlförmige Schnitte,
5. mehrförmige (kombiforme) Schnitte.

Eine umfassende Übersicht der im Bereich der Fasern vorkommenden Querschnittsformen finden sich im *Handbuch der Faser* [3]. Beispielhaft ist die Systematik der Faserschnitte mit ausgewählten Faserquerschnittsformen in Abb. 1.19 dargestellt.

1.1.2.2.2 Faserfeinheit

Die Faserfeinheit ist eine „Eigenschaft, die die morphologisch bestimmte Größe eines einzelnen Faserquerschnitts beschreibt“ [3].

Im Bereich der Textilien stellt die Feinheit Beziehungen zwischen Masse und Länge dar. Im Bereich des für Fasern wichtigen Tex-Systems wird die Feinheit als längenbezogene Masse angegeben (1 tex = 1 g pro 1000 m).

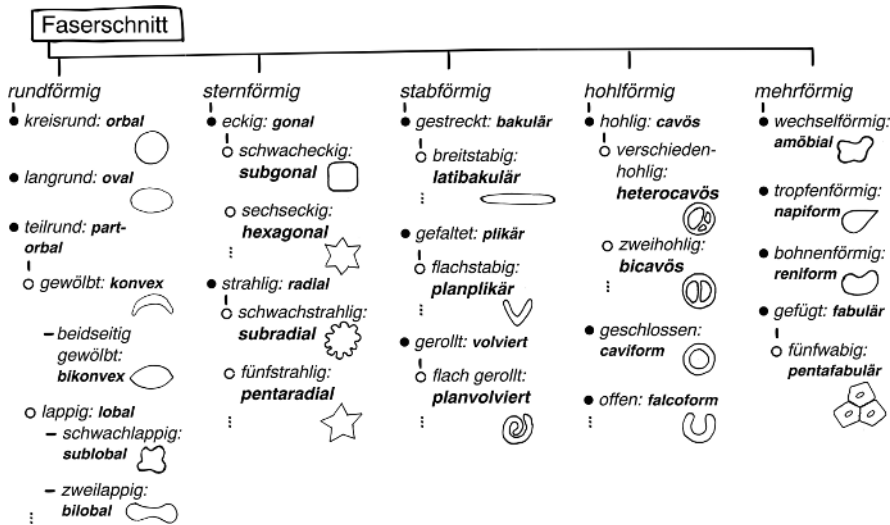


Abb. 1.19 Faserschnitte mit ausgewählten Faserquerschnittsformen (Übersicht entwickelt auf der Basis der Systematik der Textilien [3]; nationale Benennungen: kursiv; internationale Benennungen: kursiv/fett).

Die Faserfeinheit kann:

- gleichmäßig fein (Normalfaser),
- ungleichmäßig fein (Schwankungen der Feinheit entlang des Faserverlaufs) und
- konisch-fein (Grannenhaar) sein [3].

Eine Übersicht gleichmäßig feiner Fasern gibt Abb. 1.20. Eine einzelne Holzfaser ist wegen ihrer zu geringen Länge nicht verspinnbar und kann bezüglich ihrer Feinheit den feinen Fasern zugeordnet werden. Ein einzelnes Holzfaserbündel ist je nach Aufschlussgrad als mittelgrob zu bezeichnen.

Die meisten bildbasierten Methoden verwenden die Längensicht des zu prüfenden Elements, um eine Aussage über die Feinheit zu treffen [23, 27]. Bei kreisrunden (**orbale**) Querschnitten entspricht die gemessene Projektionsbreite dem Durchmesser des Objekts. Bei vom Kreis abweichenden Querschnitten sollte nicht von Durchmesser, sondern vielmehr von der Breite gesprochen werden. Die **Faserbreite** oder **Faserbündelbreite** ist die morphologische Eigenschaft einer Faser oder eines Faserbündels, die die größte messbare Ausdehnung des Objekts in der Querrichtung beschreibt. Für ein Flachfaserbündel ist dies in Abb. 1.21 exemplarisch gezeigt.

1.1.2.3 Oberflächenform

Die **Oberflächenform** ist eine der teilbezogenen morphologischen Faserformen und beschreibt die Oberflächenbeschaffenheit einer Faser oder eines Faserbündels. Wie bereits im Abschn. 1.1.2 erwähnt, setzt sich die **Oberflächenform** aus **Faserstruktur** (Gestalt) und **Strukturfeinheit** (Größe) zusammen [3].

Zur Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit von Faser oder Faserbündel ist es nach Latzke und Hesse [29] wichtig, eine Einteilung vorzunehmen, ob die Oberflächen-

Bestimmtheiten	als Eigenschaft	als Merkmal
	↓	↓
ultragrob	Roßhaare, Borsten	Ultragrofaser (nicht verspinnbar)
grob	Kokosfaserbündel	Grobaserbündel (bedingt verspinnbar)
mittelgrob	Wollfasern F bis A, Fehlhaare	Mittelgrobfaser (verspinnbar)
mittelfein	Wollfasern 2A bis 4A, Cotton, Rohseidenfasern	Mittelfeinfaser (verspinnbar)
fein	Cottonfasern, entbastete Seidenfasern	Feinfaser (verspinnbar)
feinst	Mikrofeinfasern, Spinnenfaser	Feinstfaser (bedingt verspinnbar)
ultrafein	Mikrofibrillenverbundfasern, Mikrocellulose	Ultrafeinfaser (nicht verspinnbar)

Abb. 1.20 Systematik der Faserfeinheiten (Übersicht entwickelt auf der Basis der Systematik der Textilien [3]).

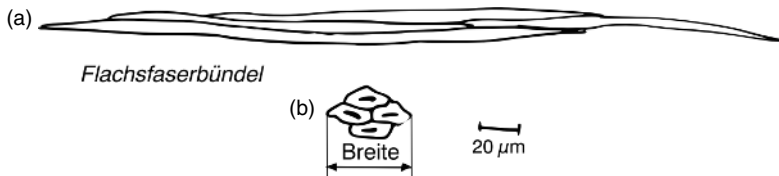


Abb. 1.21 Flachsfaserbündel mit variierendem Querschnitt über dem Faserverlauf (ungleichmäßig fein): (a) Längsansicht; (b) Querschnitt mit Faserbündelbreite [28] (mit freundlicher Genehmigung des Springer-Verlages).

form (i) wachstums- bzw. herstellungsbedingt oder (ii) nachbehandlungsbedingt ist. Als „praktisch wichtigere Klassifizierung“ schlagen sie vor, die Faserstruktur in die Kategorien glatt und strukturiert einzuteilen [29].

1.1.2.3.1 Faserstruktur

Die **Faserstruktur** ist die Oberflächengestalt einer Faser oder eines Faserbündels [3]. Latzke und Hesse [29], Bobeth [30] sowie Sloomaker und Müssig [14] geben einen umfassenden Überblick über Oberflächenbeschaffenheiten von Fasern und Faserbündeln. In Abb. 1.22 findet sich eine Zuordnung charakteristischer Oberflächenbeschaffenheiten ausgewählter Naturfasern zur Systematik der Faserstrukturen nach Schnegelsberg [3]. Auch bei dieser Zuordnung ist die gewählte Auflösung des bildgebenden Verfahrens von großer Bedeutung. Die Zuordnung der Oberflächenbeschaffenheiten in Abb. 1.22 erfolgte anhand der rasterelektronenmikroskopischen (REM) Bilder.

Eine Pappelfaser (Samenhaar) verfügt über eine äußerst glatte (**levale**) Faserstruktur. Alle anderen Beispiele in Abb. 1.22 sind strukturiert. Animalische Haare sind schuppig (**lepidös**), während viele pflanzliche Naturfasern riefig (**rimös**) sind, wobei die Struktur-

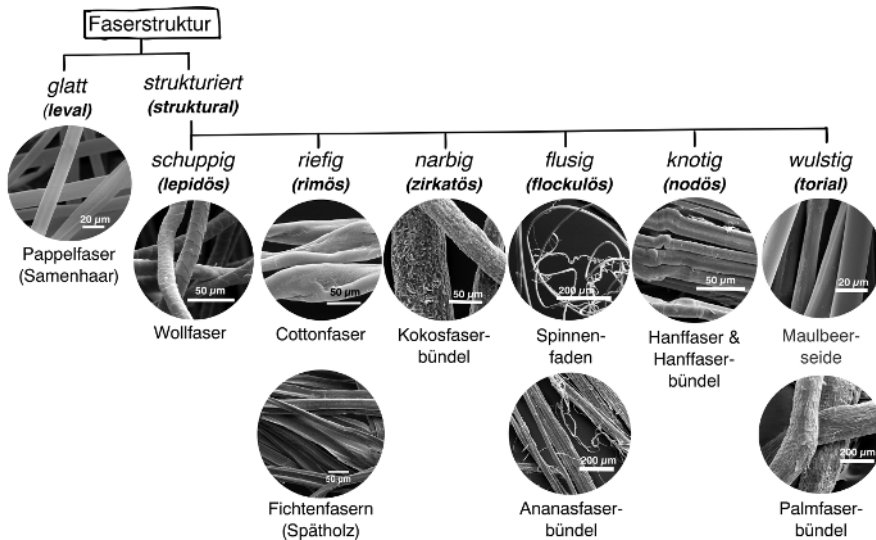


Abb. 1.22 Systematik der Faserstrukturen: Oberflächengestalten ausgewählter Naturfasern in Form von REM-Bildern (nationale Benennungen: kursiv; internationale Benennungen: kursiv/fett).

feinheit sehr unterschiedlich sein kann. Die Oberfläche eines Kokosfaserbündels ist narbig (**zirkatrös**). „Zirkatröse Faserstrukturen können ungleichmäßig wellig, rissig, gerauht, geschält, krustig oder kerbig sein“ [3]. Flusige (**flockulöse**) Faserstrukturen finden sich in Abb. 1.22 bei Spinnenfäden oder Ananasfaserbündeln in Form feiner Abspaltungen und abgeschälter Anteile. Die Querverschiebungen in Bastfasern erlauben eine Zuordnung zu den knotigen (**nodösen**) Faserstrukturen. Wulstige (**toriale**) Faserstrukturen sind durch Feinheitsschwankungen über den Faserverlauf gekennzeichnet. Als Beispiele für wulstige Faserstrukturen finden sich in Abb. 1.22 die Maulbeerseide und Palmfaserbündel.

1.1.2.3.2 Strukturfeinheit

Nach Schnegelsberg [3] wird mit der **Strukturfeinheit** die Größe der Struktur auf der Faseroberfläche zusammengefasst. Bei Fasern oder Faserbündeln lassen sich grob folgende Strukturfeinheiten unterscheiden:

- schwach-strukturiert (**substruktiv**),
- klein-strukturiert (**mikrostruktiv**),
- groß-strukturiert (**makrostruktiv**),
- übergroß-strukturiert (**megastruktiv**),
- klein-groß-strukturiert (**kombi-struktiv**)

So lassen sich z. B. schuppige (**lepidöse**), riefige (**rimöse**) oder narbige (**zirkatröse**) Faserstrukturen durch die Strukturfeinheit ergänzen. Für Schuppenfasern findet sich im *Handbuch der Faser* ein umfassendes Beschreibungssystem der Strukturfeinheiten [3].

Angewendet auf Abb. 1.22 ist die Cottonfaser schwach-riefig (**subrimös**), während die Abacáfaserbündel übergroß-riefig (**megarimös**) sind.

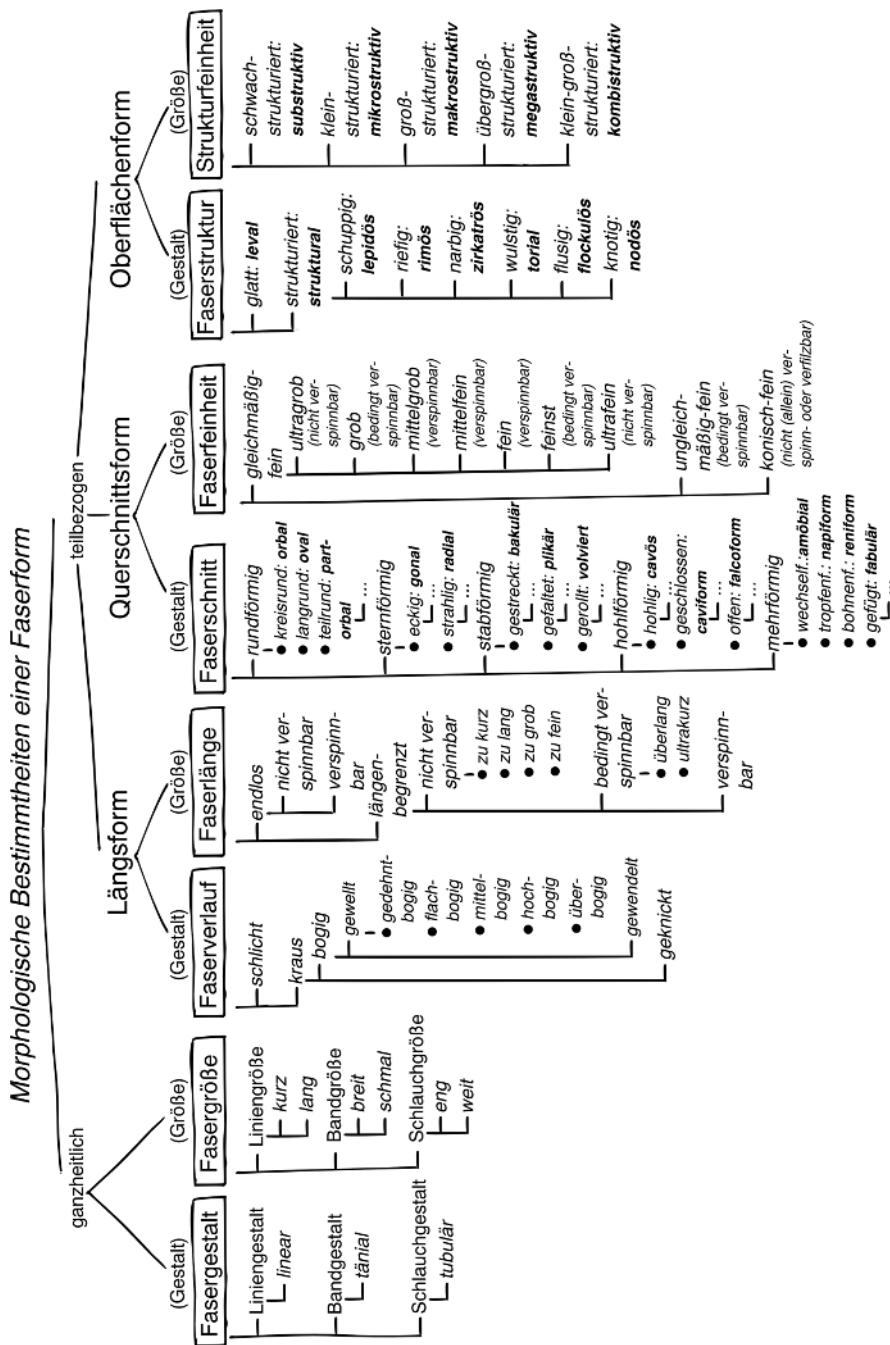


Abb. 1.23 Hierarchische Übersicht der morphologisch bestimmten Faserformen (angepasste Grafik auf der Basis der Systematik der Textilien [3]; mit freundlicher Genehmigung: Deutscher Fachverlag Frankfurt).

1.1.3 Übersicht der morphologisch bestimmten Faserformen

Die Abb. 1.23 zeigt die hierarchische Übersicht der morphologisch bestimmten Faserformen und soll den Leser:innen eine Orientierungshilfe bei der Verwendung einer normativen Fachsprache bieten. Darüber hinaus soll eine schnelle und einfache sprachliche Zuordnung der Gradierungen und Ausprägungen möglich werden.

1.1.4 Schlussfolgerung

Die Ausführungen in diesem Kapitel dienen dazu, den Leser:innen eine eindeutige und systematische Verwendung von Begriffen im Bereich der Fasern an die Hand zu geben. Hiermit soll die Grundlage gelegt werden, die Besonderheiten der im weiteren Verlauf des Buches vorgestellten Messtechniken besser einordnen zu können. Weiterhin wurde der Versuch unternommen, die in der Regel isoliert betrachteten Bereiche „Naturfasern für Textilien“ und „Holzfasern für Holzwerkstoffe“ begrifflich zu verknüpfen.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Malika Müssig für ihre kreative Arbeit mit den handgezeichneten, schematischen Abbildungen sowie Tanja Sloomaker, Faserinstitut Bremen e. V., Bremen für ihre Expertise und Unterstützung bezüglich der REM-Aufnahmen.

Literatur

- 1 Bocheński, J.M. (1969). *Die zeitgenössischen Denkmethode*. Marburg: Francke Verlag.
- 2 Schnegelsberg, G. (1971). *Systematik der Textilien*. (Das Wissenschaftliche Taschenbuch, Abteilung Technik). München: Wilhelm Goldmann Verlag.
- 3 Schnegelsberg, G. (1999). *Handbuch der Faser – Theorie und Systematik der Faser*, 1. Aufl. Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag.
- 4 Vincent, J.F.V. (2000). A unified nomenclature for plant fibres for industrial use. *Appl. Compos. Mater.*, 7 (5–6): 269–271.
- 5 Müssig, J. und Graupner, N. (2017). Textile finishing: Recent developments and future trends. In: *Characterisation of Fibre/Matrix Adhesion in Biobased Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites*, S. 485–556. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. und Beverly: Scrivener Publishing LLC.
- 6 Müssig, J. (2001). *Untersuchung der Eignung heimischer Pflanzenfasern für die Herstellung von naturfaserverstärkten Duroplasten – vom Anbau zum Verbundwerkstoff*, Nummer 630 (ISBN 3-18-363005-2) in Fortschritt-Bericht VDI, Reihe 5, Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- 7 Eder, M. und Burgert, I. (2010). Natural fibres – function in nature. In: *Industrial Applications of Natural Fibres – Structure, Properties and Technical Applications* (Hrsg. J. Müssig), S. 23–39. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- 8 Kull, U. (2000). *Grundriss der Allgemeinen Botanik*. 2, 2. Aufl. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- 9 Dunky, M. und Niemz, P. (2002). *Holzwerkstoffe und Leime – Technologie und Einflussfaktoren*. Berlin: Springer-Verlag.
- 10 Marra, G.G. (1975). The age of engineered wood. *Unasylva* – No. 108 – Wood-based panels, (<https://www.fao.org/3/f6137e/f6137e01.htm>, Abruf am 22.7.2023).

- 11 Niemz, P. (2011). *Holz und Holzwerkstoffe (Vorlesung: Werkstoffe 1)*. Zürich: Institut für Baustoffe, ETH.
- 12 Burgert, I. (2016). *Werkstoffe I, Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe*. Zürich: Institut für Baustoffe, ETH.
- 13 General Services Administration; PPP-E-911D (1973). Federal specification: Excelsior, wood, fabricated pads and bulk form, September 28 1973, Commissioner, Federal Supply Service, General Services Administration, USA, http://www.everyspec.com/FED_SPECS/P/PPP-E-911D_10605.
- 14 Sloomaker, T. und Müssig, J. (2010). SEM catalogue for animal and plant fibres, In: *Industrial Applications of Natural Fibres – Structure, Properties and Technical Applications*, S. 311–336. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- 15 Müssig, J., Rettig, D. und Harig, H. (2000). Systematik und Begrifflichkeit im Bereich der Faserlängenmessung, In: *Taschenbuch für die Textilindustrie* (Hrsg. W. Loy), S. 103–112. Berlin: Schiele & Schön Verlag.
- 16 Matthes, M. (1950). Über die Abhängigkeit der Wollfeinheit von der Haarlänge. *Textil-Rundschau* 5: 186.
- 17 Gringnet, J. (1979). Die Messung der Faserlänge – Bedeutung und Anwendung. *Melliand Textilberichte*, 2, 5 und 6 (2/1979): 119–122 und (5/1979): 372–377 und (6/1979): 457–460.
- 18 Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science* 156: 636–638.
- 19 DIN 60001-2 (1990). Textile Faserstoffe; Faser- und Herstellungsformen, 10.
- 20 DIN 60900-6 (1990). Garne; Spinnfasergarne; Begriffe und Einteilung nach Herstellungsverfahren, 11.
- 21 Müssig, J. (1997). *Entwicklung eines Verfahrens zur Kurzfasermessung bei Baumwollen unter Berücksichtigung einer vereinheitlichten Faserlängenmesstechnik*. Bremen: Faserinstitut Bremen e. V. – FIBRE.
- 22 Shofner, F.M., Chu, Y.-T. und Thibodeaux, D.P. (1990). Überblick über das Faserprüfsystem AFIS. *Proc. 20. Int. Baumwoll-Tagung Bremen, FIBRE, Bremen, DE*, S. 143–149.
- 23 Müssig, J. und Schmid, H. (2004). Quality control of fibers along the value added chain by using scanning technique – From fibers to the final product. *Microsc. Microanal.*, 10 (S02): 1332–1333; <https://doi.org/10.1017/S1431927604884320>.
- 24 Schmid, G.H., Dvorak, M., Müller, J. und Müssig, J. (2004). Characterizing flock fibers using quantitative image analysis. *FLOCK*, 30 (I/04 March): 6–12.
- 25 Spinlab (1981). *High Volume Tests of Staple Fiber Length*. Knoxville: Spinlab Inc.
- 26 Müssig, J. und Graupner, N. (2020). Test methods for fibre/matrix adhesion in cellulose fibre-reinforced thermoplastic composite materials: a critical review. *Rev. Adhes. Adhes.* 8 (2): 68–129, <https://doi.org/10.7569/RAA.2020.097306>.
- 27 Müssig, J. und Amaducci, S. (2018). Scanner based image analysis to characterise the influence of agronomic factors on hemp (*Cannabis sativa* L.) fibre width. *Ind. Crops Prod.* 113: 28–37.
- 28 Haag, K. und Müssig, J. (2016). Scatter in tensile properties of flax fibre bundles: Influence of determination and calculation of the cross-sectional area. *J. Mater. Sci.* 51 (17): 7907–7917.
- 29 Latzke, P.M. und Hesse, R. (1988). *Textile Fasern: Rasterelektronenmikroskopie der Chemie- und Naturfasern: Analysieren, Klassifizieren, Zitieren, Ordnen*. Frankfurt (Main): Deutscher Fachverlag.
- 30 Bobeth, W. (1993). *Textile Faserstoffe – Beschaffenheit und Eigenschaften*. Berlin: Springer-Verlag.

1.2 Holzfaserwerkstoffe

Aus Holzfasern aufgebaute Holzwerkstoffe werden aus zerkleinertem Massivholz (Hack-schnitzel) gewonnen, die zunächst auf Faserbündel bzw. einzelne Holzfasern aufgeschlossen und danach wieder zu Plattenwerkstoffen umgeformt werden. Die Plattenprodukte umfassen einen großen Bereich von Werkstoffeigenschaften und finden Anwendungen als Möbelplatten, Dämmstoffe, Ausbauplatten und Träger für Fußböden. Die Stufen der jeweiligen Herstellungsprozesse werden hier mit dem Schwerpunkt der Fasereigenschaften kurz dargestellt.

Autor: Burkhard Plinke

1.2.1 Holzwerkstoffe auf der Basis von Holzfasern

Gemeinsam ist den Holzfaserwerkstoffen, dass Holzfasern und Faserbündel den wesentlichen Masseanteil darstellen und sich daraus insbesondere ihre Eigenschaften ergeben. Der Anteil des Bindemittels beträgt weniger als 10 Masse-%, während faserverstärkte Kunststoffe aus einer Kunststoffmatrix bestehen, in der weitgehend vereinzelte Fasern und Faserbündel eingebettet sind. Im Sinne der Einteilung aus Abschn. 1.1 handelt es sich beim Rohstoff für Holzfaserwerkstoffe um Fasern, die

- durch Zerfasern aus Rundholz (oder auch Recyclingholz) hergestellt werden,
- ein Faserkollektiv bilden,
- in der Regel längenbegrenzt, mittelfein und klein-strukturiert sind,
- einen runden oder ovalen Querschnitt und eine mehr oder weniger glatte Oberfläche zeigen,
- einen schlichten oder flachbogigen Faserverlauf aufweisen,
- einen Längsbereich von etwa 500 μm (Fasern) bis 50 mm (Faserbündel) umfassen.

Die Klasse der Holzfaserwerkstoffe umfasst viele Spezialprodukte für sehr unterschiedliche Zwecke. Das Schema in Abb. 1.24 geht zurück auf Niemz (1993) [2] und verdeutlicht einen Teil der Vielfalt von Plattentypen und Eigenschaften. Da Dichte und Härte bei Holzwerkstoffen eng zusammenhängen, sind die Bezeichnungen MDF für mitteldichte Faserplatten und HDF für hochverdichtete Faserplatten sowie die Skalierung von „weich“ bis „hart“ gebräuchlich. Auch die Oberflächenbehandlung („pressblank“ ohne Behandlung, „geschliffen“ auf Maß oder „beschichtet“ z. B. durch Lackierung oder Papier) wird hier zu den Werkstoffeigenschaften gezählt, ebenso wie Produkte mit Sonderausstattung wie Lochplatten oder profilierte Oberflächen.

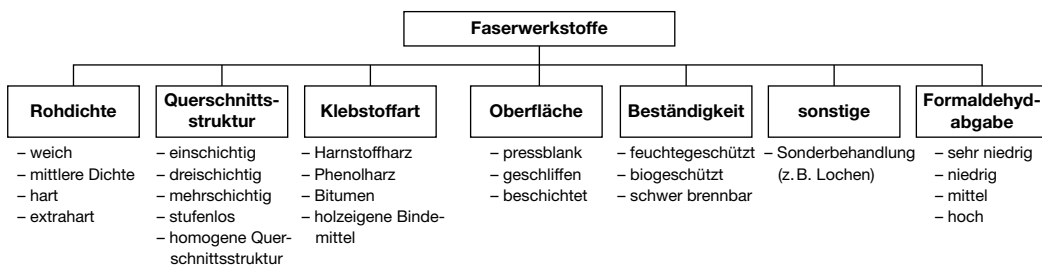


Abb. 1.24 Eigenschaften von Holzfaserwerkstoffen (Schema nach Wagenführ (2008) [1] und Niemz (1993) [2]).

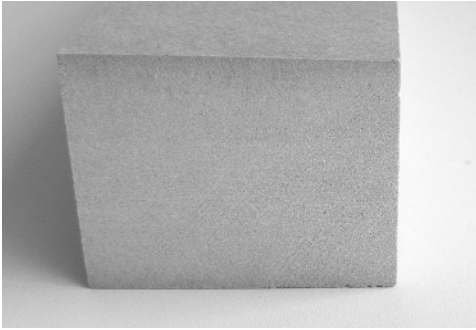


Abb. 1.25 Mitteldichte Faserplatte (MDF): Blick auf die Schmalfläche einer MDF (Dicke 40 mm).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die verschiedenen Typen von Holzfaserwerkstoffen einzuteilen, z. B.

- nach dem Herstellverfahren („nass“ bei einer Faserfeuchte $> 20\%$, „trocken“ bei $< 20\%$),
- nach der „Dichte“ (HDF bei einer Dichte $> 800 \text{ kg/m}^3$, Leicht-MDF bei einer Dichte $< 650 \text{ kg/m}^3$ usw.),
- nach den Anwendungsbedingungen (trockene oder feuchte Umgebung, Außenbereiche o. Ä.), wie in der ehemaligen Fassung der DIN EN 316 beschrieben [3].

Es gibt weitere, durchaus unterschiedliche Einteilungen und Bezeichnungen für Holzfaserwerkstoffe – im Folgenden werden die immer noch gebräuchlichen Begriffe aus der o. g. Norm verwendet, auch wenn sie nicht genau mit den standardisierten Bezeichnungen übereinstimmen. Auch Holzfaserdämmplatten sind aus Fasern aufgebaut, weisen aber wesentlich geringere Dichten und keine geschlossene Oberfläche auf.

Für Faserplatten gibt Statista (<http://statista.com>) eine Jahresproduktion in Deutschland (2021) von ca. 6 Mio. m^3 an, in Europa liegt sie nach Angabe der European Panel Federation (EPF) bei 12 Mio. m^3 . Etwa 20 % der Produktion sind Platten für Fußböden, etwa 50 % werden als Möbelplatten verwendet.

Die Holzfaserwerkstofftypen mit der größten wirtschaftlichen Bedeutung sind:

- **Mitteldichte Faserplatten (MDF)** – Dieser Plattentyp (Abb. 1.25) ist weit verbreitet als Möbelplatte. Das Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene wird gezielt so eingestellt, dass die Außenlagen höher verdichtet sind. Bei Biegebelastung in Plattenebene ergibt sich daher eine höhere Biegesteifigkeit und die Tragfähigkeit für Möbelbeschläge verbessert sich. Die typische Rohdichte liegt für Möbelplatten bei Werten um 700 kg/m^3 , für andere Verwendungszwecke mit geringeren Anforderungen (z. B. Verpackungen) oder im Bauwesen sind aber auch Platten mit niedrigeren Dichten gebräuchlich.
- **Hochverdichtete Faserplatten (HDF)** – Die wichtigste Verwendung – etwa zur Hälfte der hergestellten Faserplatten – ist diejenige als Trägerplatte für Laminatfußböden. Dazu werden die Rohplatten mit einer gleichzeitig dekorativen und hochfesten Nutzschicht auf der Oberseite, einem Gegenzugpapier auf der Unterseite und optional mit einer Geh- und Trittschall mindernden Dämmschicht beschichtet (Abb. 1.26). Die Kanten werden mit einem speziellen Profil versehen, das eine leimlose Verlegung ermöglicht. Daher erfordern HDF ein flacheres Rohdichteprofil und eine geringe Wasseraufnahme.
- **Dämmplatten** – Gegenüber Dämmstoffen aus Gesteins- und Glasfasern bzw. geschäumten Polymeren haben Holzfaserdämmplatten (Abb. 1.27) zwar nur einen Marktanteil

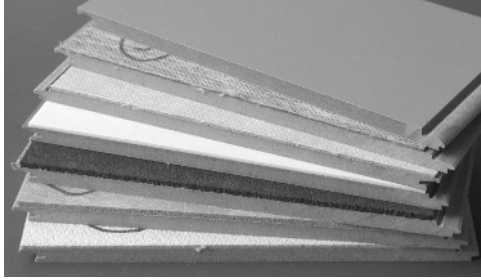


Abb. 1.26 Fußbodenpaneele aus HDF: Unterseiten mit schalldämmender Beschichtung, Schmalflächen mit Profil für leimlose Verbindungen; Breite der Paneele jeweils 195 mm, Dicke der HDF ohne Beschichtung 7–9 mm.

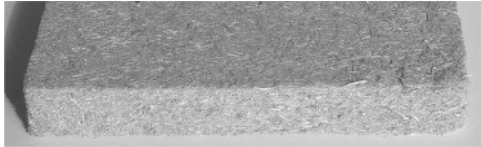


Abb. 1.27 Dämmstoff: Versuchsplatte aus Balsaholzfasern; Plattenbreite 295 mm, Dicke 40 mm.

von weniger als 10 %, bieten aber ökologische Vorteile wegen ihrer Herkunft aus nachwachsenden Rohstoffen. Die übliche Rohdichte liegt im Bereich von 50 bis 250 kg/m³. Wichtigste Platteneigenschaft ist eine geringe Wärmeleitfähigkeit bzw. ein hoher Wärmedurchlasswiderstand. Fast ebenso wichtig sind aber mechanische Eigenschaften wie Druck- und Biegefestigkeit, um den Werkstoff noch als Plattenwerkstoff verwenden zu können, sowie das Brand- und Glimmverhalten. Anforderungen und Prüfverfahren für den Einsatz von Holzfaserdämmplatten in Gebäuden legt DIN EN 13171 [4] fest.

Holzfaserwerkstoffe sind immer wieder Gegenstand von Weiterentwicklungen. Dies sind z. B.

- **MDF aus Altholz** – In der Spanplattenindustrie wird außer Wald- und Sägerestholz auch Altholz eingesetzt. Auch für MDF ist das möglich [5], allerdings muss es sich um kontrollierte bzw. von Störstoffen wie z. B. von Kunststoffanteilen befreite Sortimente handeln.
- **Holzschaum** – Holzeigene Bindekräfte können genutzt werden, um ohne Bindemittelzusatz aus stark fibrillierten Fasern durch Aufschäumen und nachfolgendes Trocknen sehr leichte und ökologisch vorteilhafte Platten herzustellen [6]. Einfluss auf die Eigenschaften des Grundwerkstoffs hat u. a. die Faserlängenverteilung in der Suspension vor dem Aufschäumen.

1.2.1.1 Herstellung von Holzfaserwerkstoffen

Der gesamte Prozess der Herstellung umfasst die Herstellung, Aufbereitung und Beleimung von Fasern, die Vliesbildung, das Heißpressen und die Endbearbeitung. Eine Übersicht (nach [7]) für MDF zeigt Abb. 1.28.

Der gesamte Prozess von der Entrindung und Zerkleinerung der Stämme bis zur fertigen Rohplatte benötigt eine thermisch/elektrische Energie von etwa 1500 kWh je m³ fertiger Platte [8].

Faserherstellung und -aufbereitung

Ausgangsstoff für eine Produktionslinie für Faserplatten ist meist auf Partikeldurchmesser kleiner als etwa 5 cm vorzerkleinertes Massivholz (Hackschnitzel), in Europa vorwiegend

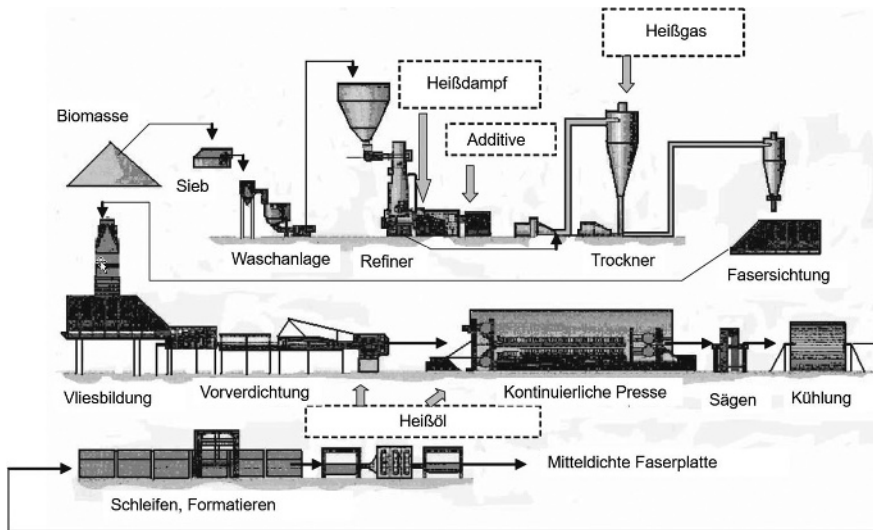


Abb. 1.28 Herstellungsprozess mitteldichter Faserplatten: Gesamtprozess der MDF-Herstellung, schematisch.

aus Nadelholz. Je nach Verfügbarkeit und Rohstoffkosten werden in anderen Regionen die dort vorhandenen Holzarten oder auch Altholz genutzt. Der **Zerkleinerung** vorgeschaltet ist bei Nadelholz eine Entrindung, bei Altholz ein Sortierprozess, um Störstoffe wie z. B. Kunststoffanteile oder Metall auszusondern. Nach der Zerkleinerung passieren die Hackschnitzel Waschanlagen, um Sand und Feingut abzutrennen.

Der für die Qualität der Fasern wichtigste Prozess ist der Aufschluss der Hackschnitzel möglichst weitgehend zu einzelnen Fasern (**Refining**). Die gereinigten Hackschnitzel werden vorverdichtet und vorgedämpft und dann über einen Kocher (Digester) unter Druck einem Refiner zugeführt, um das Lignin, das natürliche „Bindemittel“ zwischen den Holz-zellen, zu erweichen, und dann zwischen zwei Mahlscheiben (Rotor und Stator, Abb. 1.29) zerrieben. Dabei entstehen nicht nur einzelne Holzfasern, sondern je nach Prozessbedingungen sowohl Faserbruchstücke als auch nicht vollständig aufgeschlossene kleine Faser-verbünde (*Shives*), die aus mehreren noch an ihrer Längsseite zusammenhängenden Ein-zelfasern bestehen. Ihr mit dem bloßen Auge gut erkennbarer Anteil wird in der Praxis gern zur Beurteilung des Refining-Prozesses herangezogen (vgl. Abb. 1.30 und 1.31). Der Begriff „Shives“ ist in der Holzwerkstoffindustrie die übliche Bezeichnung für Faserbündel, wird aber auch bei der Verarbeitung von Flachs und Hanf verwendet, jedoch dort für gebrochene Holzpartikel (Schäben; vgl. Abb. 1.3 in Abschn. 1.1).

Wichtige Parameter beim Refining sind die Temperatur (ca. 150–180 °C) und Verweil-zeit (z. B. 5 min) im Kocher. Dabei wird allein Energie in der Größenordnung von einigen Hundert Kilowattstunden je Tonne Hackschnitzel aufgewendet. Der thermo-mechanische Aufschluss (engl. *thermo-mechanical pulping*, **TMP**) findet nur unter Druck- bzw. Tempera-tureinwirkung und durch Mahlen statt. Durch Zusatz von Chemikalien wie z. B. Natrium-hydroxid, Natriumsulfit oder schwefliger Säure (engl. *chemical thermomechanical pulping*, **CTMP**) können der Energieverbrauch gesenkt und die Faserqualität verbessert werden.

Einen wichtigen Einfluss auf die Beschaffenheit der Fasern bzw. Faserbündel und den Energieverbrauch haben der verschleißbedingte Zustand der Mahlscheiben und deren ein-

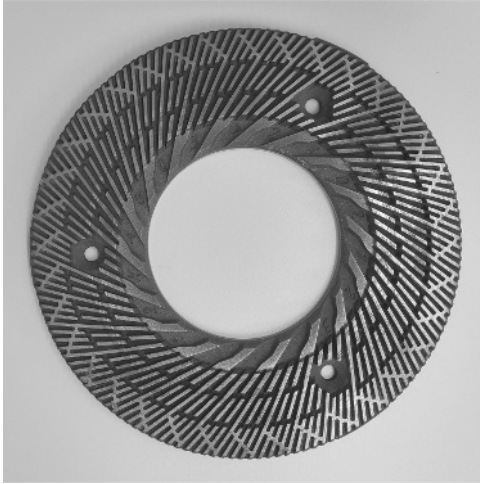


Abb. 1.29 Refiner: Mahlscheibe (Stator) eines Labor-Refiners, Durchmesser ca. 30 cm.



Abb. 1.30 Fasern aus Refiner-Aufschluss, makroskopische Ansicht. Fichtenholzfasern und -bündel (Shives), Aufschluss im Labor-Refiner, Bildfeld ca. $50 \times 50 \text{ mm}^2$, drei der sichtbaren Shives (vgl. Abb. 1.3 in Abschn. 1.1) sind exemplarisch markiert.

stellbarer Abstand (**Spaltweite**). Ein größerer Mahlscheibenabstand wirkt sich als geringerer Energieverbrauch, aber auch als höherer Anteil unvollständig aufgeschlossener Faserbündel aus. Der Refining-Prozess wird daher so gesteuert, dass je nach Zustand der Mahlscheiben sowohl der Energieverbrauch als auch die Faserqualität akzeptabel sind.

Der Refining-Prozess für Holzfaserplatten ähnelt dem Papieraufschluss, aber mit dem Unterschied, dass die Verweilzeit im Kocher dort wesentlich länger ist und in wässriger Suspension mit nur wenigen Masse-% Faseranteil stattfindet. Um Hartfaserplatten im Nassverfahren herzustellen, werden die Fasern nach dem Refining ebenfalls nicht getrocknet, sondern abgesiebt und direkt ohne Beleimung verpresst.

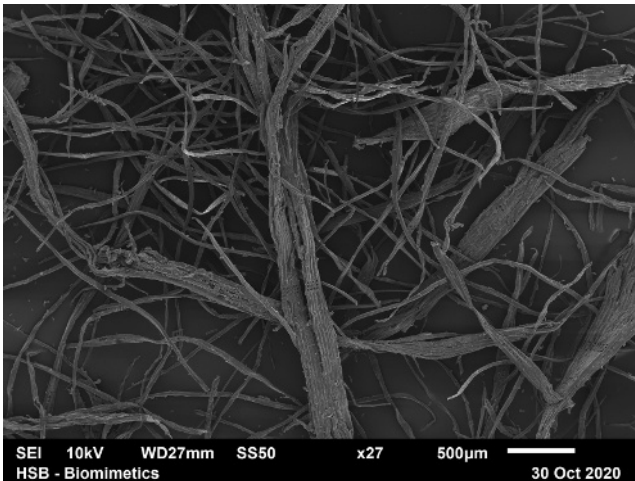


Abb. 1.31 Fasern, Faserbündel und Shives aus Refiner-Aufschluss, mikroskopische Ansicht. Fichtenholzfasern (einzelne Fasern und Faserbündel), Aufschluss im Labor-Refiner, Bildfeld ca. 5.0 mm × 3.2 mm (REM-Aufnahme: N. Graupner).

Beleimung und Vliesbildung

Den Holzfasern wird meist bereits vor einer Trocknung eine Klebstoffsuspension zugeführt. Als Klebstoffe für MDF werden je nach Holzart und Verwendungszweck Harnstoff-Formaldehyd-Harz (UF), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (MUF), Phenolharz (PF) oder polymeres Methylen-Diisocyanat (PMDI) eingesetzt. In einer verengten Stelle der Rohrleitung, die der Stoffstrom passiert (**Blowline**), befinden sich Sprühdüsen, durch die der Klebstoff sehr effektiv und genau dosiert eingebracht wird. Auch die Beleimung in einer Mischkammer oder einem Mischturm oder die Kombination mehrerer Beleimungsstufen sind möglich. Die richtige Kombination aus Holzart, Klebstofftyp und Dosierung (gemessen in Masse-% als Feststoffanteil des Klebstoffes bezogen auf die Trockenmasse der Fasern) ist ein wichtiger Faktor sowohl für die spätere Plattenqualität als auch für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses, weil die Kosten für das Bindemittel einen beträchtlichen Anteil an den gesamten Kosten für die Rohstoffe ausmachen. Bei Dämmplatten werden die Holzfasern zunächst getrocknet und dann in einem Beleimungsturm mit PMDI oder Polyurethanharz (PUR) versetzt. Hartfaserplatten werden im Nassverfahren hergestellt, dabei findet keine Beleimung statt, sondern die Fasern werden als Suspension weiterverarbeitet.

Im **Trockenverfahren** wie bei MDF und Dämmstoffen werden die Holzfasern anschließend aerodynamisch zu einem planaren, ungeordneten Fasergelege (häufig auch bezeichnet als Vlies oder „Fasermatte“⁵⁾, engl. mat) auf eine gleichförmig bewegte Unterlage (Formband) gestreut und der Presse zugeführt. Dies geschieht aus einem Dosierbunker heraus über pneumatisch oder mechanisch arbeitende Streuköpfe, wobei der Neigung von Holzfasern, sich zu agglomerieren, entgegengewirkt werden muss. Für MDF-Vliese wird ein hoher Aufwand betrieben, um durch Verteilwalzen und einen Scraper (ähnlich einem Kamm) eine gleichmäßige Dichte und Höhe zu erzielen.

⁵⁾ Bei den Benennungen sind die Abweichungen zur Systematik der textilen Flächengefüge (Abb. 1.35 in Abschn. 1.3) zu beachten.

Stand der **Prozessmesstechnik** ist die Überwachung der horizontalen Dichteverteilung (in der Branche „Flächenmasse“ genannt) im Vlies: Das System Dieffensor [9] bestimmt diese Größe radiometrisch und kontinuierlich mit einem Röntgenstrahler oberhalb und einem Zeilendetektor unterhalb des Formstrangs. Metallische Fremdkörper und Klebstoffagglomerationen werden detektiert und vor der Presse ausgeschleust, die Homogenität der Dichteverteilung unterhalb der Warnschwellen dient als Maß für die Qualität der Vliesbildung.

Eine weitere, noch nicht zufriedenstellend gelöste Aufgabe für die **prozessnahe Faseranalytik** ist die Bestimmung von Fasergrößen und Faserorientierungen. Dies ist im laufenden Prozess (*inline*) bisher nur schwer möglich. Lediglich an Proben aus dem Refiner ist die Verschiebung der Faserlängenverteilung mit größerer Spaltweite bildanalytisch gut nachweisbar [10, 11]. Die Abb. 1.32 zeigt dies am Beispiel von Buchenfasern, die im Refiner bei Spaltenweiten von 0,4 bzw. 1,0 mm hergestellt wurden. Im Bereich der Längen von ca. 5–10 mm ergeben sich deutliche Änderungen in der Größenverteilung, sowohl im Histogramm als auch in der Summenhäufigkeitskurve. Zur Erläuterung der Größendarstellungen siehe Abschn. 3.4.

Allerdings kann nach der Vliesbildung die Konzentration von Faserbündeln (Shives, vgl. Abb. 1.30) in der Vliesoberfläche *inline* gemessen werden. Das Verfahren und das System *FiberView* werden in Abschn. 6.1 dargestellt. Auch eine verfahrenstechnische Optimierung des MDF-Prozesses wäre möglich: Wenn es gelingt, bei der Vliesbildung die Fasern parallel zur Plattenebene zu orientieren, könnten bei gleichem Rohstoff- und Bindemiteleinsatz höhere Festigkeiten erzielt werden, wenn die Fasern bei der Vliesbildung orientiert werden [12]. Mit der Analyse und Simulation von MDF mit orientierten Fasern befasst sich Abschn. 5.2. Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften von Holzfaserdämmplatten insbesondere der Wärmeleitfähigkeit einerseits und den Herstellparametern und Größenverteilungen von Refiner-Fasern wurden umfassend im Projekt „Low-Lambda“ untersucht [13].

Heißpressen

Die auf ein Formband gestreuten Fasern werden in zwei Stufen um den Faktor 30–40, bezogen auf das ursprüngliche Vliesvolumen, verdichtet. Die Fasern werden lagestabil fixiert und so erst zu einem festen Plattenwerkstoff. Zunächst wird das Vlies zwischen zwei umlaufenden Blechen bzw. Rollenteppichen vorverdichtet und dann in der eigentlichen Heißpresse mit Druck (im Bereich 0,5–5 MPa) und Wärme (um 200 °C) beaufschlagt. Üblich ist das kontinuierliche Verpressen in einer Doppelbandpresse, die aus getrennt steuerbaren Transportwalzen, Druckzylindern und Heizzonen aufgebaut ist. Im Durchlauf entsteht im Vliesquerschnitt je nach Abstand von der Plattenoberfläche ein unterschiedlicher Druck-/Zeit-Verlauf, der die Aushärtung des Klebstoffes bewirkt. Ein Pressvorgang dauert etwa 12 s je mm Plattendicke, für eine 18 mm dicke MDF wären das etwa 3,5 min. Nach dem Passieren der Presse ist das Vlies zu einem endlosen Strang mit der gewünschten Dicke verfestigt, der außerdem quer zur Plattenebene einen typischen Verlauf der Dichte (Rohdichteprofil) aufweist. In den oberflächennahen Bereichen kann die lokale Dichte Werte um 1000 kg/m³ annehmen, im Kern z. B. nur 600 kg/m³. Dadurch wird der Biegeelastizitätsmodul der Platten bei gleichem Rohstoffeinsatz gesteigert, weil die unter höheren Biegespannungen stehenden Zonen des Querschnittes auch höher verdichtet sind. Bei einschichtigen MDF wird dieses Dichteprofil allein durch die auf Faserrohstoff und Beleimung abgestimmte Pressensteuerung erzeugt. Mehrschichtige MDF können hergestellt werden, indem vor dem Ver-

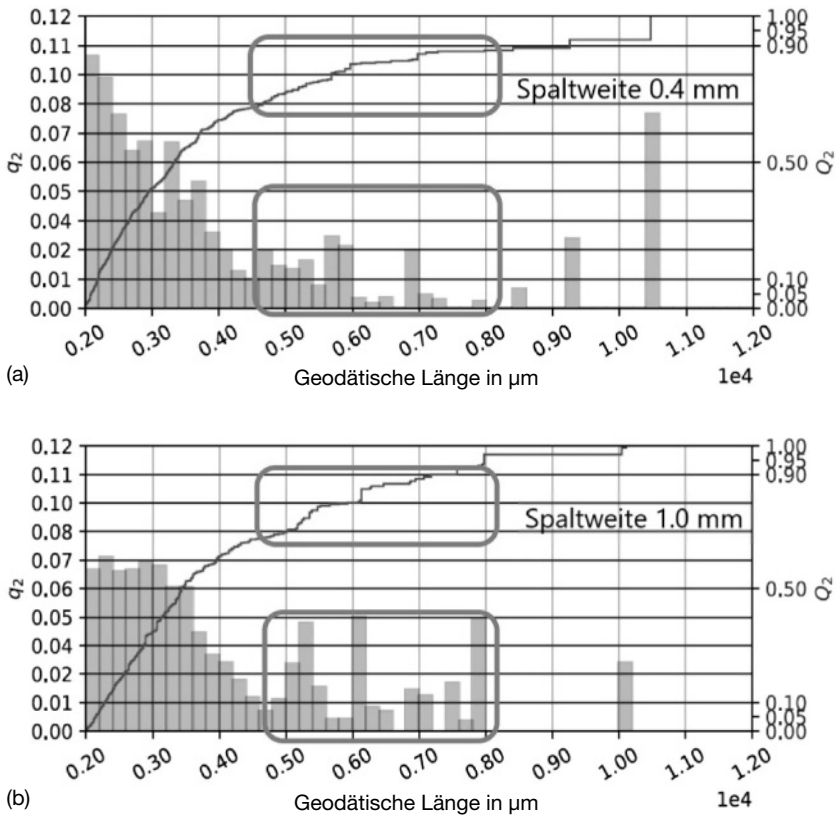


Abb. 1.32 Faserlängenverteilungen bei unterschiedlichen Spaltweiten. Größenverteilung (gewichtete Faserlängen) von bei unterschiedlichen Spaltweiten erzeugten Buchenfasern; (a) Spaltweite 0,4 mm, (b) 1,0 mm; horizontale Achsen: geodätische Länge (engl. geodesic length), gezeigtes Längenintervall 2–12 mm; vertikale Achsen: mit der Partikelfläche gewichtete Verteilungsdichte (Grafiken: B. Plinke; Bilder zur Vermessung mit FibreShape gescannt, Größenanalyse mit Xshape; vgl. Abschn. 4.1.1.1 und 3.4).

pressen mehrere Lagen von Faservliesen übereinander auf das Formband abgelegt werden, sodass auch unterschiedliche Fasern und Klebstoffe zur Ausprägung des Rohdichteprofiles beitragen.

Während des Verpressens des Vlieses und des Aushärtens des Klebstoffs ergeben sich Wechselwirkungen zwischen Wärmeleitung, Dampfdiffusion, Temperatur und Druck, die vielfach Gegenstand mathematischer Simulationen sind. Modelle auf der Basis eines Kontinuums wurden beispielsweise von P.E. Humphrey und A.J. Bolton [14] aufgestellt und später von H. Thömen [15] weiterentwickelt. Diese Modelle liefern allerdings keinen direkten Zusammenhang zwischen Fasergeometrien und Werkstoffeigenschaften. Mit einer morphologischen Simulation der Faserorientierung beim Pressvorgang und den Werkstoffeigenschaften befasst sich Abschn. 5.2.

Beim Trockenverfahren zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen verläuft der Vorgang prinzipiell ähnlich, jedoch mit wesentlich weniger verfahrenstechnischem Aufwand als bei der Herstellung von MDF. Das Vlies wird lediglich auf die Solldicke komprimiert und kann unter Heißluft aushärten. Dämmstoffe, die im Nassverfahren ohne Bindemittel hergestellt

werden, werden als Faserbrei in eine Presse gefahren, dort ausgepresst und danach getrocknet. Dabei reichen die holzeigenen Bindekräfte aus, sodass sie als Dämmplatten oder -vliese zugeschnitten und weiterverarbeitet werden können.

Konditionieren, Oberflächen- und Endbearbeitung

Nach dem Pressvorgang müssen die Platten auf Maß zugeschnitten und verpackt werden. Bei MDF folgt aber auf das Pressen zunächst noch ein definierter Abkühlvorgang, da die Aushärtung des Bindemittels noch einige Stunden andauert, sowie eine Prüfung der Plattenqualität (u. a. auf unsichtbare innere Delaminationen mithilfe von Ultraschalldurchstrahlung), der Oberflächen (auf Verfärbungen und Verschmutzungen, Einschlüsse von Fremdkörpern sowie auffällige Faserbündel und Rindenpartikel) und der Maßhaltigkeit (z. B. auf gleichmäßige Dicke).

Abschließende Schritte der Oberflächenbearbeitung sind zunächst das Schleifen der Platten auf das gewünschte Maß sowie bei Möbelpplatten eine Beschichtung mit Folie bzw. bei Laminatfußböden einem Hochdrucklaminat (HPL) als Nutzschicht auf der Oberseite und einem Gegenzugpapier auf der Unterseite (vgl. Abb. 1.26).

Zusammenhang zwischen Fasergrößen und Produkteigenschaften

Wichtige und bei standardisierten Tests an Prüfkörpern routinemäßig erfasste Eigenschaften bei MDF sind

- die Änderungen der Dimensionen (Dickenquellung, engl. thickness swelling, TS) und der Masse (Wasseraufnahme, engl. water absorption, WA) nach einer 2- bzw. 24-stündigen Lagerung in Wasser sowie
- Festigkeitskennwerte wie die Querkzugfestigkeit (engl. internal bond, IB), Abhebefestigkeit (engl. surface soundness, SS), der Biegeelastizitätsmodul (engl. modulus of elasticity, MOE) und die Biegefestigkeit (engl. Flexural strength, auch bekannt als *modulus of rupture*, MOR).

Sie stehen in engem Zusammenhang mit den Bedingungen des Faseraufschlusses und sind die Zielgrößen der Qualitätssicherung bei der Plattenherstellung. Bei einer systematischen Untersuchung [16] – vgl. Abb. 1.33 – wurden unterschiedliche Bedingungen beim Refining (Faser B: Standardparameter, Faser A: höherer Druck, größere Verweildauer, Faser C: niedrigerer Druck, kürzere Verweildauer) gewählt und optisch die Verteilungen der Faserlängen gemessen. Erwartungsgemäß ergaben „schärfere“ Aufschlussbedingungen (höherer Druck, größere Verweildauer) in der Tendenz eine deutliche Verschiebung der Faserlängenverteilung zu kleineren Längen. Die Auswirkungen auf die o. g. Eigenschaften zeigt die Abb. 1.33 – bis auf die Biegefestigkeit nehmen alle Eigenschaften tendenziell ab, wenn die Aufschlussbedingungen „schärfer“ werden. Die Zusammenhänge und ihre Ursachen sind jedoch noch wesentlich komplexer, als es hier dargestellt werden kann. Beispielsweise spielt der Anteil an optisch nicht messbaren Faserbruchstücken (Feingut, engl. fines) eine Rolle: Feingut absorbiert mehr Bindemittel als Fasern, trägt aber weniger zur Festigkeit bei.

Mitnahmebotschaft

Holzfaserverwerkstoffe gibt es in vielen Varianten, von denen hier nur mitteldichte und hochverdichtete Faserplatten sowie Dämmstoffe betrachtet wurden. Die Herstellungsprozesse sind großindustriell organisiert. Ein grundsätzlicher ökologischer Vorteil ist, dass keine fos-

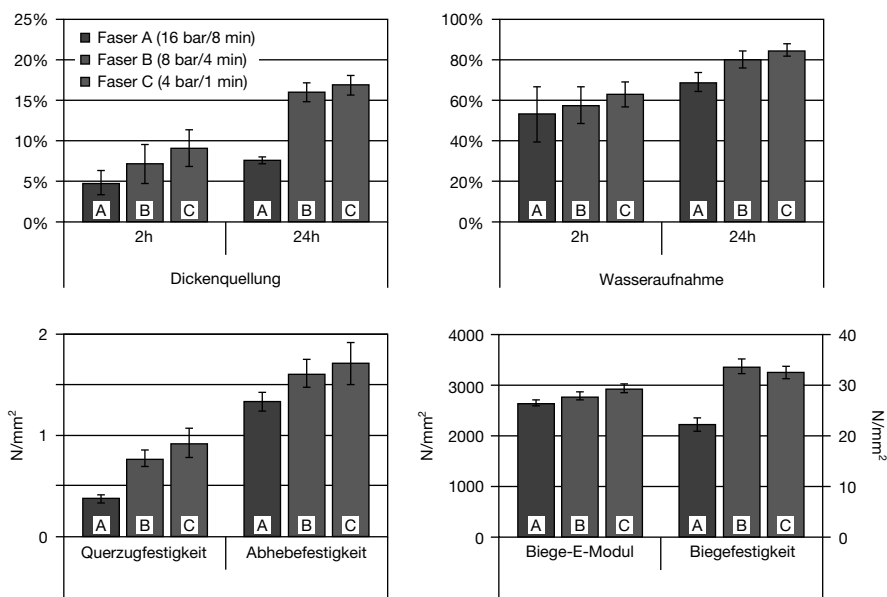


Abb. 1.33 Zusammenhang zwischen Faser- und Platteneigenschaften bei MDF. Mechanisch-physikalische Platteneigenschaften für MDF, deren Fasern bei unterschiedlichen Aufschlussbedingungen hergestellt wurden. Darstellung nach [11], weitere Erläuterungen und Übersetzungen der Begriffe im Text.

sile, sondern maximal ca. 100 Jahre alte Biomasse und zunehmend auch Altholz eingesetzt wird und dabei „gewachsene“ Festigkeitsstrukturen genutzt werden. Dem steht auf der anderen Seite ein gewisser Aufwand an Mess- und Prüftechnik gegenüber, der erforderlich ist, um die Herstellungsprozesse und Produktqualitäten stabil zu halten.

Literatur

- 1 Wagenführ, A. und Scholz, F. (2008). *Taschenbuch der Holztechnik*. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag.
- 2 Niemz, P. (1993). *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner.
- 3 DIN EN 316:1999-12. Holzfaserplatten – Definition, Klassifizierung und Kurzzeichen.
- 4 EN 13171:2012+A1:2015. Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) – Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13171:2012+A1:2015
- 5 Erbreich, M. (2004). Die Aufbereitung und Wiederverwendung von Altholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF). Dissertation. Hamburg: Universität Hamburg, Fachbereich Biologie.
- 6 Bunzel, F., Ritter, N. und Scholtyssek, J. (2017). Holzschaum – eine Alternative zu petrochemischen Schaumstoffen. *Holztechnologie* 58: 46–51.
- 7 Rivela, B., Moreira, M.T. und Feijoo, G. (2006). Life cycle inventory of medium density fibreboard. *Int. J. Life Cycle Assess.* 12: 143–150, <https://doi.org/10.1065/lca2006.12.290>.
- 8 Feddersen, J. (2003). Prozessenergieverbrauch in der Holzwerkstoffindustrie. Diplomarbeit Holzwirtschaft. Ordinariat für Holztechnologie – Holzphysik. Hamburg: Universität Hamburg.

- 9 Könekamp, U. (2003). DIEFFENSOR. Fremdkörpererkennung in Holzwerkstoffmatten. Holzwerkstoff-Symposium der Sasol Wax GmbH (Karlsruhe).
- 10 Plinke, B., Schirp, A. und Weidenmüller, I. (2012). Review: Methoden der Holzpartikelgrößenmessung – Von der technologischen Fragestellung zur aussagefähigen Statistik. *Holztechnologie* 53: 11–17.
- 11 Benthien, J.T., Heldner, S. und Ohlmeyer, M. (2017). Investigation of the interrelations between defibration conditions, fiber size and medium-density fiberboard (MDF) properties. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 75: 215–223.
- 12 Plinke, B., Dix, B., Andrä, H. und Schneider, M. (2017). MDF mit Faserorientierung – Simulation der Mikrostruktur zeigt Möglichkeiten zur Festigkeitssteigerung. *Holztechnologie* 58: 5–11.
- 13 Treml, S., Andrä, H., Makas, M., Engelhardt, M., Staub, S., Rief, S., Schladitz, K., Mercier, C. und Trawka, K. (2021). *Mikrostrukturmodellierung zur Optimierung holzfaserbasierter Wärmedämmstoffe*. Steico, Forschungsinstitut für Wärmeschutz, Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22002717.pdf>.
- 14 Humphrey, P.E. und Bolton, A.J. (1989). The hot pressing of dry-formed wood-based composites [Part 2]: A simulation model for heat and moisture transfer und typical results. *Holzforschung* 43: 199–206.
- 15 Thömen, H. (2001). Modeling the physical processes in natural fiber composites during batch and continuous pressing. Dissertation, Oregon State University.
- 16 Benthien, J.T., Bähnisch, C., Heldner, S. und Ohlmeyer, M. (2014). Effect of fiber size distribution on medium-density fiberboard properties caused by varied steaming time and temperature of defibration process. *Wood Fiber Sci.* 46: 175–185.

1.3 Naturfaser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe

Das folgende Kapitel dient dazu, den Leser:innen zu zeigen, wie die in Abschn. 1.1 beschriebenen teilbezogenen Faserformen die Eigenschaften eines Faserverbundwerkstoffs beeinflussen. Hierzu werden an ausgewählten Beispielen die Einflüsse der *Längsform*, der *Querschnittsform* sowie der *Oberflächenform* beschrieben. Weiterhin wird der Einfluss der Orientierung von Verstärkungselementen im Faserverbundwerkstoff diskutiert.

Um den Einfluss der Veränderung einer teilbezogenen Eigenschaft auf das Verbundwerkstoffverhalten zeigen zu können, bietet sich die Verwendung von Modellwerkstoffen und Modellrechnungen an, da es bei Naturfasern häufig äußerst schwierig ist, nur eine einzige teilbezogene Faserform zu ändern. So ändern sich z. B. bei der Verfeinerung eines Flachsfaserbündels hin zur einzelnen Faser sowohl die Querschnittsfläche und die Länge des Objekts als auch das Aspektverhältnis, die Festigkeit sowie die Oberfläche. Obwohl der Fokus der Ausführungen auf Modellwerkstoffe und Modellrechnungen gelegt wird, werden zusätzlich ausgewählte Beispiele aus dem Bereich der naturfaserverstärkten Werkstoffe aufgeführt.

Die Beschreibung der Einflüsse der teilbezogenen Faserformen auf die Eigenschaften eines Faserverbundwerkstoffs soll den Leser:innen zudem verdeutlichen, warum die Schwerpunkte in dem vorliegenden Buch auf die Charakterisierung der *Längsform*, der *Querschnittsform*, der *Oberflächenform* und die *Faserorientierung* gelegt wurden.

Autor: Jörg Müssig

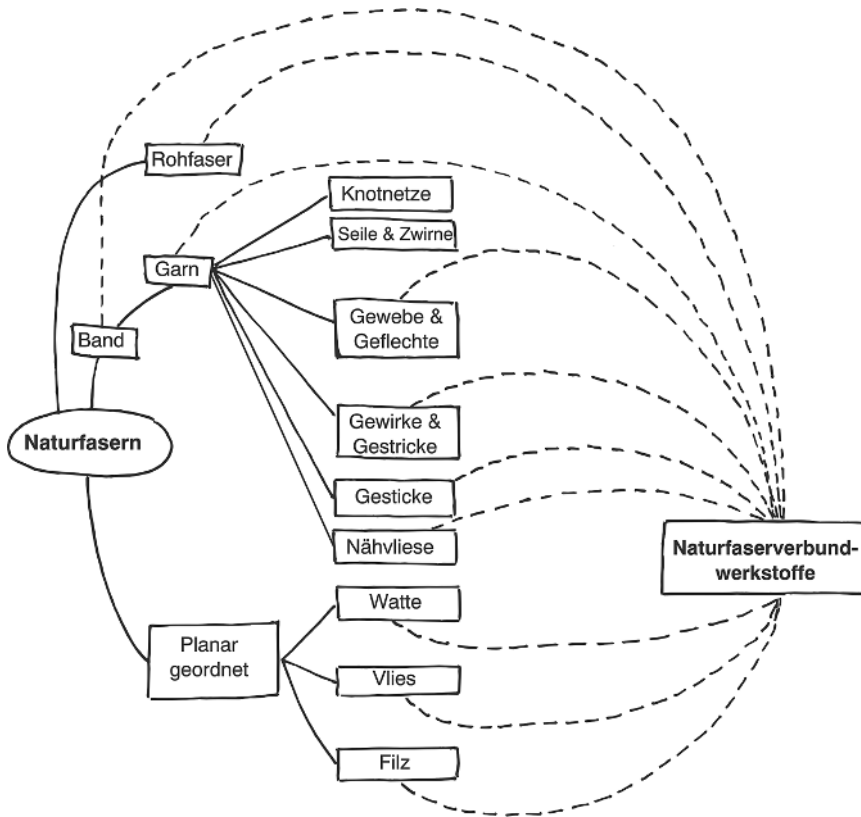


Abb. 1.34 Unterschiedliche Verwendungen von Naturfasern für Faserverbundwerkstoffe (angepasste und erweiterte Abbildung nach Graupner und Müssig [1]).

1.3.1 Naturfasern und textile Halbzeuge für Faserverbundwerkstoffe

Naturfasern lassen sich in unterschiedlichster Form und Abwandlungsstufe zu Verbundwerkstoffen verarbeiten (siehe Abb. 1.34). So können Naturfasern als Einzelfasern oder Faserbündel direkt mit einer Kunststoffmatrix zusammengebracht oder mithilfe textiler Fertigungstechniken zu textilen Halbzeugen verarbeitet werden. In der Abb. 1.34 sind neben den Textilien, die aktuell schon zu Verbundwerkstoffen verarbeitet werden, auch klassische textile Produkte gezeigt. So lassen sich Naturfasergarne zu Geweben, Geflechten, Gewirken oder Gestricken verarbeiten. Geknüpfte Netze aus Naturfasergarnen finden Anwendungen z. B. in Transportnetzen. Watte aus Cotton oder Kapok wird in der Möbelindustrie für Polsterungen eingesetzt. Vliese und Nadelfilze aus Hanf oder Flachs finden in Wärmedämmprodukten und in Geotextilien Verwendung. Nadelfilze aus Kokosfasern können als Trittschalldämmung eingesetzt werden [1].

Die Textilindustrie zählt zu einem der ältesten Industriezweige und ist durch historisch gewachsene Benennungen gekennzeichnet. So ist es kaum verwunderlich, dass in diesem Bereich eine Vielzahl zum Teil widersprüchlicher Benennungen zu finden sind. Für unmissverständliche, wissenschaftliche Informationen muss „die Umgangssprache zu einer Fachsprache entwickelt werden“ [2].

Im Rahmen des vorliegenden Fachbuchs werden Begriffe verwendet, die in der *Systematik der Textilien* [3] und dem *Handbuch der Faser* [4] definiert sind. Mit den genannten Arbeiten entwickelte Schnegelsberg ein System für eine Fachsprache im Bereich der Fasern und Textilien und schlägt eine systemkonforme Verwendung von Begriffen vor. Durch die Wahl eines morphologisch und tektonisch bestimmten Merkmalsystems gelingt es Schnegelsberg, für den Bereich der Textilien eine klare und unmissverständliche Ausdrucksweise zu entwickeln [3].

Besonders hervorzuheben ist die Unterscheidung zwischen **Textilgefügen** (wirtschaftlich: Textilwaren) – Dinge in tektonischer Sicht⁶⁾ – und **Textilgebilden** – Dinge in morphologischer Sicht⁷⁾. Letztere gehen als Bauglieder in Gefüge ein, wie z. B. der *Faden* als Nähfaden im Bekleidungsstück oder als Kettfaden im Gewebe. Mit dieser Unterscheidung lassen sich ohne Probleme auch die Begriffe Garn (Textilgefüge) und Faden (Textilgebilde) unterscheiden (vgl. hierzu [2]).

Im Folgenden werden nur die für das Verständnis dieses Buchs wichtigsten Begriffe aufgeführt. Für eine vertiefende Betrachtung sei auf die angegebene Literatur verwiesen. Die Abb. 1.35 zeigt eine Abgrenzung von textilen Fasern (verspinnbar) und nicht textilen Fasern⁸⁾ sowie eine Übersicht von Band- und Flächengebilden (Dinge in morphologischer Sicht).

Die im Bereich der Naturfasern wichtigen Flächengebilde, die als Bauglied in Textilgefügen oder in Verbundwerkstoffen genutzt werden können, sind in Abb. 1.35 durch Unterstreichungen hervorgehoben. Durch gezielte Faserverbindung lassen sich *Gebilde* (erstrangig morphologisch bestimmt) in *Gefüge* (erstrangig tektonisch bestimmt) überführen. Die Abb. 1.36 zeigt die Stufen von der Faser über ein planares *Fasergebilde* zum planaren *Fasergefüge*. Eine Watte aus Naturfasern ist hierbei bezüglich der Art der Verbindung durch das Merkmal der Reibung bestimmt. Ein Faserflor aus Cottonfasern wird durch eine lagestabile Fixierung der Fasern (z. B. durch Verklebung) zum Vlies oder kann durch Faserverschlauungen zum Nadelfilz verarbeitet werden. Werden die Fasern in einer Fasermatte (planar geordnetes Fasergebilde aus Endlosfasern, siehe Abb. 1.35) durch Klebepunkte lagestabil fixiert, entsteht ein Fasergefüge, was als Düsenvlies bezeichnet wird [3].

Wie lässt sich ein mit Polypropylen verfestigtes Klebevlies (textil) von einem gewebeverstärkten Polypropylen (nicht textil) unterscheiden?

Zur Beantwortung der Frage ist folgende Definition hilfreich: „**Textilien** sind morphologisch bestimmbare, gestaltete – meist biegeschlaflfe – Gefüge aus verspinnbaren, längenbegrenzten Fasern und/oder gezogenen, endlosen Fasern, die die Verspinnbarkeit als Eigenschaft aufweisen“ [3].

Beide zuvor genannten Produkte setzen sich anteilmäßig aus biegeschlaflfen textilen Gefügen zusammen, das Gewebe ist aber nur textiler Bestandteil des Kunststoffprodukts (Faserverbundwerkstoff). Beim gewebeverstärkten Kunststoffprodukt ist das äußere Erscheinungsbild vom Kunststoff definiert. Beim Klebevlies ist das Polypropylen lediglich als Kleber anzusehen und darf nicht allein die Form und Gestalt des Endprodukts prägen.

6) Im Sinne des Zusammenfügens von Bauteilen zu einem Gefüge.

7) Zur Analyse der geometrisch bestimmbaren Form der Gebilde.

8) Hierbei sind Fasern gemeint, die nicht verspinnbar sind. Beispiele sind Holzfasern im Papier oder Flockfasern auf beflockten Textilien.

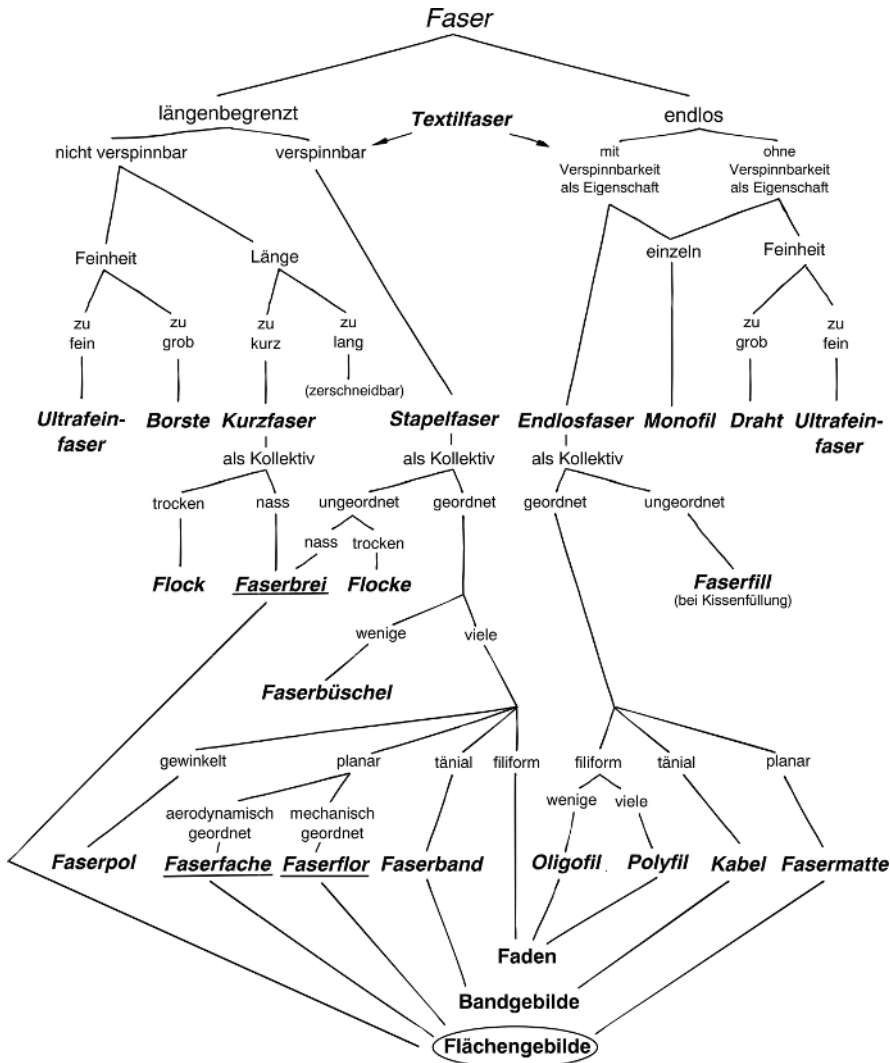


Abb. 1.35 Übersicht von textilen und nicht textilen Fasern sowie von Band- und Flächengebilden (Dinge in morphologischer Sicht) (angepasste und erweiterte Grafik auf der Basis der Systematik der Textilien [5, 6]; mit freundlicher Genehmigung: Deutscher Fachverlag Frankfurt).

Das Klebevlies muss über Eigenschaften verfügen, die zum überwiegenden Teil von den Eigenschaften der Faser bestimmt werden.

Der Volumenanteil an Fasern in einem Kunststoff beeinflusst maßgeblich die mechanischen Eigenschaften eines Faserverbundwerkstoffs. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 1.37 dargestellt. Nach Goh [7] zeigt die Abb. 1.37 die Spannungs-Dehnungs-Kurven⁹⁾ eines diskontinuierlichen Faserverbundwerkstoffs (Kurzfaserverbundwerkstoff; steife Faser in duktiler Matrix) bei variierendem Faservolumenanteil. Hierbei steht $V_F = 100\%$ für einen Werkstoff, der nur aus Fasern besteht (Textil), während $V_F = 0\%$ für die unver-

9) Das Gewöhnliche ist nicht immer das Richtige.

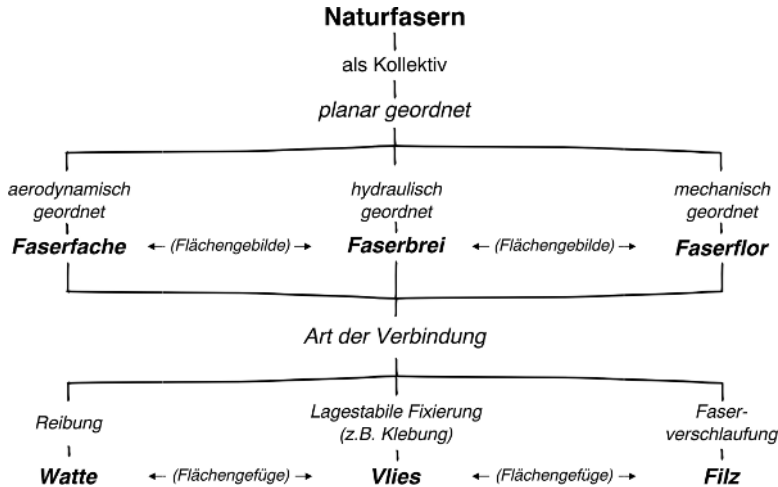


Abb. 1.36 Von der Faser zum Fasergebilde und zum Fasergefüge.

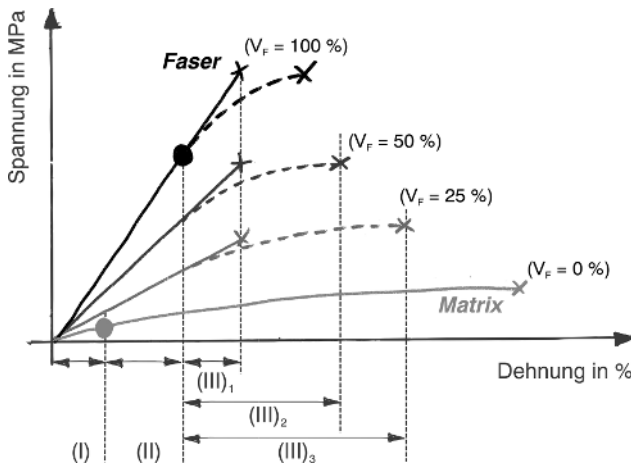


Abb. 1.37 Spannung über Dehnung für diskontinuierliche Faserverbundwerkstoffe bei verschiedenen Faservolumenanteilen [7]. Veränderte Darstellung (mit freundlicher Genehmigung des Springer-Verlages).

stärkte Matrix steht. Für $V_F = 100\%$ können zwei Fälle unterschieden werden: (i) spröde Faser (durchgezogene Linie) und (ii) duktile Faser (gestrichelte Linie). Während der reine Faserwerkstoff (reines Textil; $V_F = 100\%$) die höchste Steifigkeit und Festigkeit aufweist, zeigt die reine Matrix (reiner Kunststoff; $V_F = 0\%$) eine deutlich höhere Dehnung, eine geringere Festigkeit und einen geringeren E-Modul. Werden Fasern in die Matrix eingebracht, erhöhen sich die Festigkeit sowie der E-Modul bei einer gleichzeitigen Abnahme der Bruchdehnung. Dies ist in Abb. 1.37 für die Fälle $V_F = 50$ und 25% dargestellt [7]. In Abb. 1.37 stellt das Symbol $\times$ Bruchstellen dar. Die römischen Ziffern stehen für: I (elastische Lastübertragung), II (plastische Lastübertragung) und (III) den plastischen Verbundwerkstoff; Index 1 bezeichnet den Fall einer spröden Faser, während Index 2 und 3 den Fall von duktilen Fasern bezeichnen. Durchgezogene Linien stellen die Verwendung spröder und gestrichelte Linien die Verwendung duktiler Fasern dar.

Zusätzlich unterscheidet Goh [7] in Abb. 1.37 die Fälle (i) *spröder Faserverbundwerkstoff* und (ii) *duktiler Faserverbundwerkstoff*. Für den ersten Fall zeigt der Faserverbundwerkstoff bis zum Versagen einen linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung [8]. Der duktile Faserverbundwerkstoff reagiert bis zum Bruch nicht linear. Die Reaktion des Faserverbundwerkstoffs umfasst eine Reihe von Mechanismen, die die Spannungsübertragung von der Anfangsbelastung bis zum Bruch bestimmen. Bei diesen Mechanismen handelt es sich um elastische sowie plastische Spannungsübertragung, das Fließen der Matrix, die Ablösung der Grenzschicht, die Bildung von Rissen in der Matrix, den Faserauszug und die Fragmentierung der Faser [9].

Fu und Lauke [10] berichten, dass der E-Modul von kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen neben dem Faservolumenanteil u. a. auch vom mittleren Faserorientierungswinkel, dem modalen¹⁰⁾ Faserorientierungswinkel, dem Faserorientierungskoeffizienten¹¹⁾ und der mittleren und der modalen Faserlänge bestimmt wird. Sie betonen, dass es zu falschen Vorhersagen führen kann, wenn nur eine der genannten Eigenschaften berücksichtigt wird [10].

Um die Einflüsse der teilbezogenen Faserformen auf die Eigenschaften eines Faserverbundwerkstoffs für alle Faserformen (Längs-, Querschnitts- und Oberflächenform) und zusätzlich für die Faserorientierung vorzustellen und Brücken zu den Kapiteln der Fasermesstechnik zu bauen, wird im Folgenden der Schwerpunkt auf Kurzfaserverbundwerkstoffe gelegt, die üblicherweise im Spritzgussverfahren hergestellt werden. Um Naturfasern im Spritzguss verarbeiten zu können, müssen die Fasern in einem ersten Verfahrensschritt mit dem thermoplastischen Kunststoff zu Granulaten verarbeitet werden. Eine Übersicht über unterschiedliche Methoden zur Granulatherstellung am Beispiel Flachs finden sich in [12]. Das thermoplastische Granulat wird anschließend im Spritzgussverfahren zu Formkörpern urgeformt. In Abb. 1.38 ist das Verfahren des Spritzgießens schematisch dargestellt. Das thermoplastische Granulat wird durch Heizelemente und die Scherkräfte aufgeschmolzen und mittels der Förderschnecke transportiert. Die Förderschnecke wird über einen Motor angetrieben und kann zusätzlich hydraulisch verfahren werden. Die thermoplastische Masse wird in die Kavität des Werkzeuges gespritzt, nachverdichtet und abgekühlt. Wenn das Bauteil abgekühlt ist, kann es dem Werkzeug entnommen werden. Für die Spritzgussherstellung ergeben sich u. a. folgende Vorteile: (i) Herstellung geometrisch komplexer Bauteile, (ii) sehr wirtschaftliches Verfahren für hohe Stückzahlen in schneller Zykluszeit, (iii) die hergestellten Bauteile können in der Regel ohne weitere Bearbeitung verwendet werden, (iv) das Verfahren ist im hohen Maße automatisierbar und (v) die Bauteile weisen eine hohe Reproduziergenauigkeit mit hoher Oberflächengüte auf. Beispiele für naturfaserverstärkte Spritzgussbauteile finden sich in Abb. 1.39.

Für spritzgegossene cellulosefaserverstärkte Verbundwerkstoffe sind in den letzten Jahren Arbeiten erschienen, die diese unterschiedlichen Einflüsse berücksichtigen. So berichten z. B. Graupner et al. [13, 14] über verfahrenstechnische Einflüsse auf spritzgegossene cellulosefaserverstärkte PLA-Verbundwerkstoffe und untersuchen den Einfluss von Faservolumenanteil, Faserlänge, Faserorientierung und Porenanteil. Es werden in der Literatur erste Modellansätze für cellulosefaserverstärkte thermoplastische Kunststoffe [15, 16] vorgeschlagen.

10) Der Modalwert ist der häufigste Wert, der in einer Stichprobe vorkommt.

11) Weiterführende Informationen zur Berechnung des Faserorientierungsfaktors finden sich in Krenchel [11].

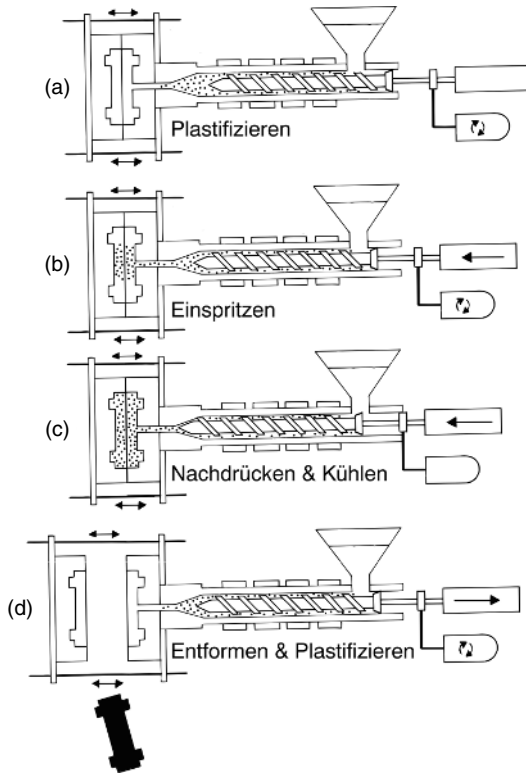


Abb. 1.38 Herstellung von thermoplastischen Naturfaserverbundwerkstoffen mittels Spritzguss.



Abb. 1.39 Beispiele für Naturfaserspritzgussbauteile.

Fu und Lauke [10] konnten mit ihren Ergebnissen zeigen, dass die Faserpackungsanordnung¹²⁾ nur einen geringen Einfluss auf den E-Modul von diskontinuierlichen kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen hat.

Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die Einflüsse der *Längsform*, der *Querschnittsform*, der *Oberflächenform*, des *Aspektverhältnisses* sowie der *Orientierung* von Verstärkungselementen im Verbundwerkstoff vorgestellt.

12) Vergleiche Abb. 1.43

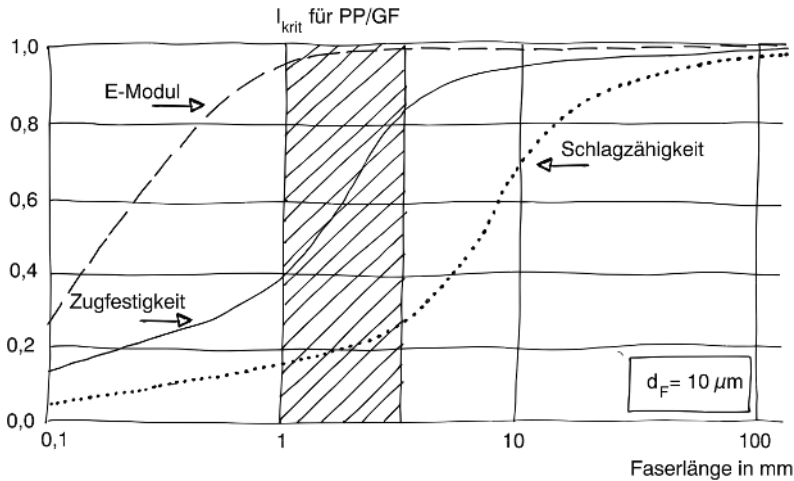


Abb. 1.40 Einfluss der Faserlänge auf die mechanischen Eigenschaften von glasfaserverstärktem Polypropylen (PP); Faserdurchmesser $10 \mu\text{m}$ (angepasste und erweiterte Abbildung nach [17]; mit freundlicher Genehmigung vom Hanser Verlag).

1.3.2 Einfluss der Längsform

Um sicherzustellen, dass eine Faser eine optimale Verstärkungswirkung aufweist, muss die Länge der Faser größer als die sogenannte *kritische Faserlänge*¹³⁾ sein. Ein Kunststoff kann effektiv verstärkt werden, wenn Fasern verwendet werden, deren Länge die kritische Länge überschreitet. Einen Zusammenhang zwischen Faserlänge und ausgewählten Verbundwerkstoffeigenschaften (E-Modul, Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit; normierte Werte) zeigen Bürkle et al. [17] für glasfaserverstärktes Polypropylen (siehe Abb. 1.40). Aus der Abb. 1.40 wird deutlich, dass bereits sehr kurze Fasern oder gar Partikel zu einem Anstieg des E-Moduls führen, während zur Steigerung der Zugfestigkeit eine Faserlänge über der kritischen Faserlänge nötig ist. Um die Schlagzähigkeit zu verbessern, müssen die Fasern Längenwerte aufweisen, die deutlich über der kritischen Faserlänge liegen.

Im Zusammenhang mit Abb. 1.40 ist zu beachten, dass sich die Länge der Fasern oder Faserbündel während der Verarbeitung z. B. bei der Compoundierung oder dem Spritzgießen in der Regel verändert. Loken et al. [18] geben in ihrer Arbeit einen Überblick, welche Faktoren bei der Verarbeitung eine Schädigung und Einkürzung der Fasern bewirken.

Bei Naturfasern sind diese Faktoren ebenfalls zu berücksichtigen. So zeigen Albrecht et al. [19], wie sich die Längen und Breiten von Flachs- und Sisalfaserbündeln während des Compoundierens und Spritzgießens verändern. Zusätzlich konnten die Autor:innen zeigen, dass ein Faserbruch von Flachs und Sisal während des Spritzgießens mithilfe eines mikromechanischen Modells modelliert werden kann [19]. Castellani et al. [20] beschreiben mit ihrer Arbeit, wie wichtig die Kenntnis der Längeneinkürzung für die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von Naturfaserbündwerkstoffen ist. Sie konnten für Hanf, Flachs, Sisal und Miscanthus zeigen, dass Naturfasern während der Verarbeitung sehr unterschiedliche Bruchmechanismen aufweisen [20]. Bourmaud et al. [21] fassen in einem

¹³⁾ Eine detaillierte Beschreibung zum Thema *kritische Faserlänge* und *Faser-Matrix-Haftung* findet sich im Abschn. 4.2.4 „Messung der Faser-Matrix-Haftung“.

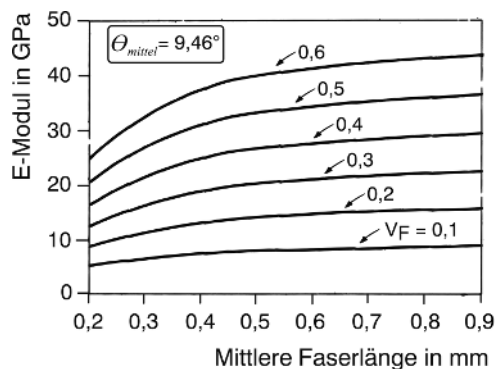


Abb. 1.41 Einfluss der mittleren Faserlänge auf den E-Modul von Kurzglasfaserverbundwerkstoffen mit wirrer Faserausrichtung für den Fall einer geringen mittleren Faserlänge [10]. Veränderte Darstellung (mit freundlicher Genehmigung des Elsevier Verlags).

umfassenden Übersichtsartikel die Eigenschaftsveränderungen von Pflanzenfasern bei der Verarbeitung zu biobasierten Verbundwerkstoffen zusammen. Aus morphologischer Sicht können Pflanzenfasern während der Einarbeitung in den Kunststoff beachtlich ihre Länge ändern, vor allem wenn Extrusions- und Spritzgussverfahren bei hohen Scherkräften zur Anwendung kommen. Die Abnahme der Länge kann häufig bis zu 90 % betragen [21]. Bei einem Naturfaserbündel ist zu beachten, dass sich in der Regel nicht nur die Länge ändert, sondern das Faserbündel auch längs gespalten wird. Hierdurch kann das Aspektverhältnis sogar vergrößert werden, was sich positiv auf das Verstärkungspotenzial auswirkt.

Fu und Lauke [10] zeigen mit ihren Arbeiten den Einfluss der mittleren Faserlänge auf den E-Modul von Kurzglasfaserverbundwerkstoffen mit wirrer Faserausrichtung, wobei die Längenverteilungen durch geeignete Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen modelliert werden. Die Autoren verwenden den LAA-Ansatz (engl. laminate analogy approach), um den E-Modul unter Berücksichtigung der Faserlängen- und Faserorientierungsverteilungen vorherzusagen. Die Autoren konnten zeigen, dass bei einer großen mittleren Faserlänge und einem Aspektverhältnis größer 100 der E-Modul sich kaum mehr ändert. Ist die mittlere Faserlänge allerdings klein, steigt, wie in Abb. 1.41 gezeigt, der E-Modul des Kurzfaserverbundwerkstoffs mit Vergrößerung der mittleren Faserlänge an [10]. Die Faserlängenwahrscheinlichkeitsdichtefunktion wurde mit $f(l) = a \cdot b \cdot l^{(b-1)} \exp(-a \cdot l^b)$ ermittelt, wobei a und b Maßstabs- und Formparameter sind ($a = 5$ und verschiedene Werte für b) [10]. Φ_{mittel} stellt die mittlere Faserorientierung ($9,46^\circ$) dar.

Bos et al. [22] konnten für flachfaserverstärktes Polypropylen zeigen, dass auf der Basis gemessener Längen- und Breitenverteilungen¹⁴⁾ die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe mit guter Übereinstimmung mit den experimentellen Werten berechnet werden konnten. E-Modul und Zugfestigkeit der flachfaserverstärkten Verbundwerkstoffe wurden nach Kelly und Tyson [23] als Funktion der Länge für Faservolumenanteile von 20 und 40 % berechnet [22].

1.3.3 Einfluss der Querschnittsform

Wie im Abschn. 1.1 ausgeführt, setzt sich die *Querschnittsform* aus dem *Faserschnitt* und der *Faserfeinheit* zusammen. Zur Verdeutlichung des Einflusses der Faserfeinheit auf Verbundwerkstoffeigenschaften werden im Folgenden die Untersuchungen an glasfaserverstärktem

14) Vergleiche hierzu Definition in Abschn. 1.1 „Begriffe und Definitionen“ und im Abschn. 4.1.1.1 „FibreShape“.

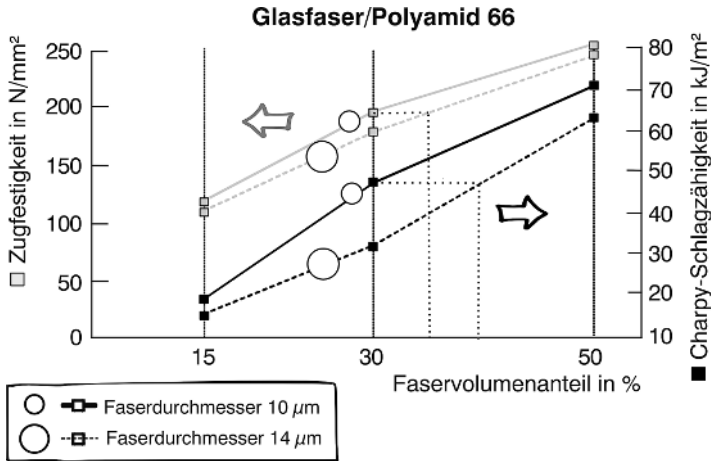


Abb. 1.42 Einfluss der Faserfeinheit auf die Eigenschaften von glasfaserverstärkten Polyamid (PA66) Verbundwerkstoffen (angepasste und erweiterte Abbildung nach [24]; mit freundlicher Genehmigung von Vetrotex).

Polyamid (PA66) vorgestellt [24]. Es konnte in den genannten Arbeiten gezeigt werden, dass sich die Schlagzähigkeit bei Verringerung des Faserdurchmessers weit stärker ändert als die Zugfestigkeit (siehe Abb. 1.42). Durch die Vergrößerung des Glasfaserdurchmessers von 10 auf 14 µm wird die Schlagzähigkeit bei einem Faseranteil von 30 % im glasfaserverstärkten Polyamid um 35 % reduziert. Die Werte der Zugfestigkeit ändern sich um 10 % [24].

Goh [7] merkt in diesem Zusammenhang an, dass ein kleinerer Faserdurchmesser auch eine hohe Packungsdichte und ein hohes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis ermöglicht, was wiederum zu einer erhöhten Wechselwirkung zwischen Faser und Matrix führt [7]. Es sei in diesem Zusammenhang angemerkt, dass der maximale Faservolumenanteil im Spritzguss limitiert ist und bei einer zu hohen Packungsdichte Fehlstellen, Agglomerationen und eine unzureichende Faser-Matrix-Haftung entstehen, was eine Verringerung der mechanischen Eigenschaften zur Folge hat.

Wie in Abschn. 1.3.3. beschrieben, hängen die mechanischen Eigenschaften eines Verbundwerkstoffs deutlich vom Faservolumenanteil ab. Goh [7] betont, dass die Eigenschaften des Faserverbundwerkstoffs von einer weiteren Größe, dem Abstand zwischen den Fasern beeinflusst werden, der je nach Faserpackungskonfiguration variieren kann.

Obwohl Fu und Lauke [10] mit ihren Ergebnissen zeigen konnten, dass die Faserpackungsanordnung nur einen geringen Einfluss auf den E-Modul von kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen hat, soll hier auf die unterschiedlichen Packungsanordnungen eingegangen werden. Dies erscheint insoweit notwendig, da es bisher kaum fundierte Studien zum Einfluss der Packungsanordnung von Naturfasern mit nicht kreisrundem (orbalem) Faserquerschnitt gibt.

Goh [7] beschreibt ganz allgemein den Einfluss unterschiedlicher Faseranordnungen in einem Kunststoff auf die erzielbaren maximalen Faservolumenanteile für kreisrunde (orbitale), zylindrische Fasern. Er unterscheidet in Abb. 1.43a die (i) hexagonale (Dreieckskanten-) Packungskonfiguration, (ii) die Packungskonfiguration mit quadratischer Kante sowie (iii) die quadratisch-diagonale Packungskonfiguration. Dunkle Kreise zeigen die Fasern an, die für die Berechnung von Interesse sind. So befinden sich für die

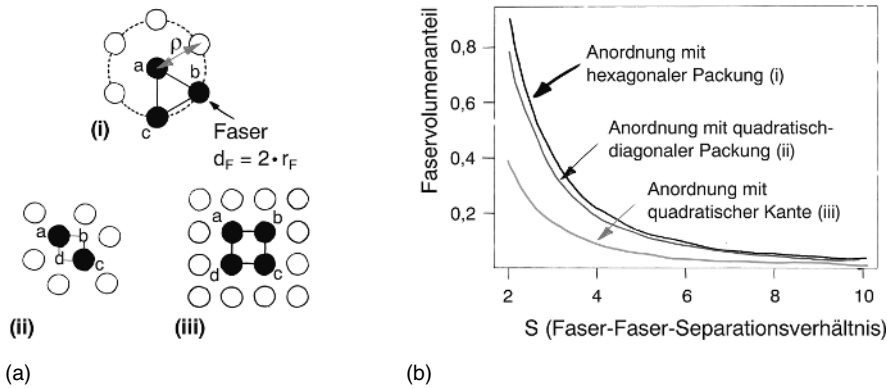


Abb. 1.43 Faseranordnung in der Matrix: (i) hexagonale (Dreiecksseiten-) Packungskonfiguration, (ii) Packungskonfiguration mit quadratischer Kante sowie (iii) quadratisch-diagonale Packungskonfiguration [7]. Veränderte Darstellung (mit freundlicher Genehmigung des Springer-Verlages).

hexagonale Packung in dem mit abc bezeichneten Bereich drei Fasern. Aus der Fläche des aufgespannten Dreiecks und der Fläche aller Fasern im Dreieck kann der Faservolumenanteil errechnet werden. Das Symbol r_F bezeichnet den Radius der Faser, ρ den Faser-Faser-Separationsabstand [7]. Der Faservolumenanteil V_F steigt mit abnehmendem Faser-Faser-Separationsabstand ρ [7]. In Abb. 1.43b ist der Faservolumenanteil über dem Faser-Faser-Separationsverhältnis S ($S = \rho/r_F$) dargestellt. Für alle dargestellten Fälle nimmt der Faservolumenanteil V_F mit zunehmendem Wert von S nicht linear ab. Der Fall $S = 1$ entspricht dem Zustand, dass eine Faser mit einer anderen Faser im direkten Kontakt steht. Der Abb. 1.43 ist zu entnehmen, dass der erreichbare Faservolumenanteil für die hexagonale Packung (i) bei einem gegebenen Wert von S immer geringfügig größer ist als die der Packung mit quadratisch-diagonaler Packung (ii) und deutlich größer ist als die Anordnung mit quadratischer Kante (iii) [7].

Madsen und Lilholt [25] berücksichtigen den Einfluss der Packungsordnung bei Naturfaserverbundwerkstoffen in Form der Vergrößerung des Porenanteils und führen einen Kennwert für die strukturelle Porosität ein. Sie schlagen eine modifizierte Mischungsregel zur Berechnung des E-Moduls von naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen vor [25].

Wie bereits in Abschn. 1.1 beschrieben wurde, kann die Faserfeinheit:

- gleichmäßig fein (Normalfaser),
- ungleichmäßig fein (Schwankungen der Feinheit entlang des Faserverlaufs) und
- konisch-fein sein [4].

Die Einflüsse der Faseranordnung auf den Faservolumenanteil wurden zuvor für gleichmäßig feine, kreisrunde (orbale) Faserschnitte beschrieben. Der Einfluss von ungleichmäßig feinen oder konisch-feinen Faserfeinheiten auf die Verbundwerkstoffeigenschaften ist nicht zu unterschätzen. Beispiele für unterschiedliche Formen der Faserfeinheit (konisch-fein: a–c) sind in Abb. 1.44 gezeigt.

Goh et al. [26] untersuchen analytisch mögliche Einflüsse konisch feiner Fasern und kommen zu dem Ergebnis, dass die axiale Spannung in der konischen Faser (Abb. 1.44c) in der Fasermittte ein Minimum aufweist und auf einen Maximalwert nahe der Faserenden ansteigt. Dieses Ergebnis war am ausgeprägtesten für kleine Werte von q (Faserachsenver-

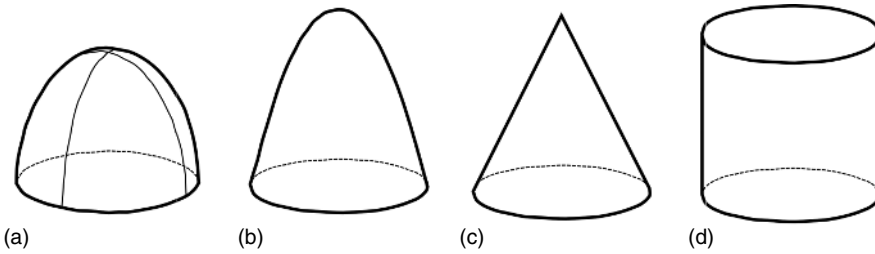


Abb. 1.44 Unterschiedliche Formen der Faserfeinheit: (a) ellipsoid, (b) paraboloid, (c) kegelförmig (konisch), (d) gleichmäßig fein (zylindrisch).

hältnis d/L) und bei großen Verhältniswerten der E-Module Faser/Matrix (E_F/E_M). Die Spannungsverteilungen für die paraboloiden und die ellipsoide Faser lagen zwischen denen für die zylindrische und kegelförmige Faser. Bei zylindrischen Fasern (Abb. 1.44d) war das Maximum für die axiale Spannung in der Fasermitte zu finden. Diese verringert sich über den Verlauf der Faser und fällt zum Faserende auf einen Wert von null ab [26].

Auf der Basis von Modellrechnungen konnten Ng et al. [27] zeigen, dass die Energie, die zum Herausziehen einer symmetrisch zu den Enden dünner werdenden konischen Faser aus dem Kunststoff aufgewandt werden muss, klein ist, da die Energieübertragung zur Überwindung der Reibung an der Faser-Matrix-Grenzschicht gering ist. Im Unterschied dazu ist bei einer gleichmäßig feinen zylindrischen Faser die Energieübertragung an der Faser-Matrix-Grenzschicht zur Überwindung der Reibung groß. Nach Ng et al. liegen die Auszugsenergien für eine paraboloiden und ellipsoide Faser zwischen den Werten der zylindrischen und kegelförmigen (konischen) Faser [27].

Andere Möglichkeiten, um mit ungleichmäßig feinen Fasern die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes zu beeinflussen, wurden beispielsweise durch vergrößerte Faserenden [28] oder durch flache Faserenden [29] erreicht. Beyerlein et al. konnten durch knochenförmige kurze Fasern, die an beiden Enden vergrößert sind, Festigkeit und Zähigkeit der Verbundwerkstoffe im Vergleich zu gleichmäßig feinen (zylindrischen) Fasern bei gleichem Aspektverhältnis verbessern [28]. Mit bionisch optimierten ungleichmäßig feinen Fasern verbesserten Humburg et al. [30] Kurzfaserverbundwerkstoffe. Auf der Basis von „Pull-out“-Versuchen¹⁵⁾ an ungleichmäßig feinen Stahlfasern in Epoxidharz konnte bis zu 27-mal mehr Energie absorbiert werden als bei gleichmäßig feinen Fasern. Nach den Ausführungen der Autor:innen gibt es einen optimalen Konuswinkel, bei dem einerseits die Auszugsarbeit maximiert und andererseits ein Spröbruch der Matrix verhindert wird [30].

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Zähigkeit besteht in der Verwendung von Fasern, die an den Enden verzweigt sind. Fe et al. [31] untersuchten theoretisch und experimentell den Einfluss von Faserverzweigungen an den Faserenden. Sie konnten zeigen, dass sich der Widerstand gegen Rissöffnung während des Bruchs erhöht [31]. Fu et al. zeigen, dass die Auszugskraft und die Auszugsenergie von verzweigten Fasern größer sind als die Kräfte und Energien bei gleichmäßig feinen Fasern [32]. Diese Ansätze bieten sich vor

¹⁵⁾ Eine detaillierte Beschreibung zum „Pull-out“-Versuch findet sich im Abschn. 4.2.4 „Messung der Faser-Matrix-Haftung“.

allem auch für Naturfasern und regenerierte Cellulosefasern an, die sich z. B. durch chemische Behandlung fibrillieren lassen [33].

1.3.4 Einfluss aus Längs- und Querschnittsform (Faser-Aspektverhältnis)

Tian et al. [34] untersuchen in ihren Arbeiten die Auswirkungen des Faser-Aspektverhältnisses auf die mechanischen Eigenschaften eines kohlenstofffaserverstärkten Magnesiumverbundwerkstoffs. Auf der Basis von Finite-Elemente-Berechnungen (FEM) konnte gezeigt werden, dass die Zugfestigkeit der Kurzfaserverbundwerkstoffe bei Erhöhung des Aspektverhältnisses von $l/d = 5$ auf $l/d = 15$ deutlich gesteigert werden konnte (vgl. Abb. 1.45a). Für Aspektverhältnisse größer $l/d = 20$ blieb die Zugfestigkeit nahezu konstant. Gleiches konnte für die Veränderung der E-Modul-Werte gezeigt werden (vgl. Abb. 1.45b) [34]. Die Ergebnisse sind abgeleitet aus der FEM-Berechnung dreidimensionaler Volumenelementmodelle [34].

Das Aspektverhältnis von Fasern/Faserbündeln ist auch bezüglich möglicher Interaktionen dieser Objekte während der Verarbeitung zum Verbundwerkstoff von großer Wichtigkeit. Von Turkovich und Erwin [35] definieren einen maximalen Faservolumenanteil für zufällig orientierte Fasern als Funktion des durchschnittlichen Faser-Aspektverhältnisses (vgl. Abb. 1.46). Faservolumenanteile, die über dem angegebenen Maximum liegen, führen u. a. dazu, dass Fasern gebogen, gebrochen oder anders ausgerichtet werden [35].

Für Naturfaserverbundwerkstoffe zeigen Bourmaud et al. [21, 37], dass es sich bei Flachs und anderen Bastfasern um Faserbündel handelt, die während der Verarbeitung nicht nur eingekürzt, sondern auch zu feineren Faserbündeln oder gar zu einzelnen Fasern aufgeschlossen werden. Hierdurch kann sich das Aspektverhältnis (l/d) vergrößern, was einen positiven Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Bourmaud et al. zeigen, dass dies ein Vorteil von thermoplastischen Kurzfaserverbundwerkstoffen mit Bastfaserbündeln im Vergleich zu kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten ist. Beim mehrfachen Rezyklieren der Glasfaserverbundwerkstoffe kürzen die Fasern in der Regel immer stärker ein; das Aspektverhältnis wird immer kleiner und die Verstärkungswirkung geringer. Gleiche Ef-

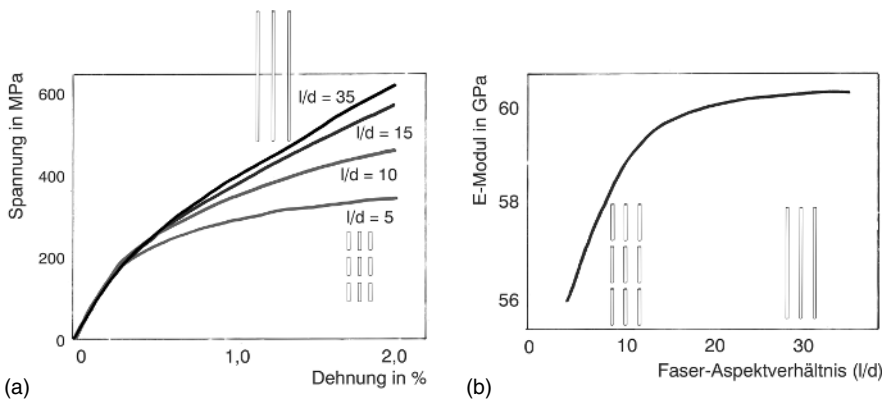


Abb. 1.45 (a) Spannungs-Dehnungs-Kurven als Funktion des Faser-Aspektverhältnisses (kohlenstofffaserverstärktes Magnesium). (b) E-Modul in Abhängigkeit von l/d in Längsrichtung (Kurvenverlauf als logistische Regression der ermittelten Werte) [34] zitiert in [7] (veränderte Darstellung; mit freundlicher Genehmigung des Elsevier Verlages).

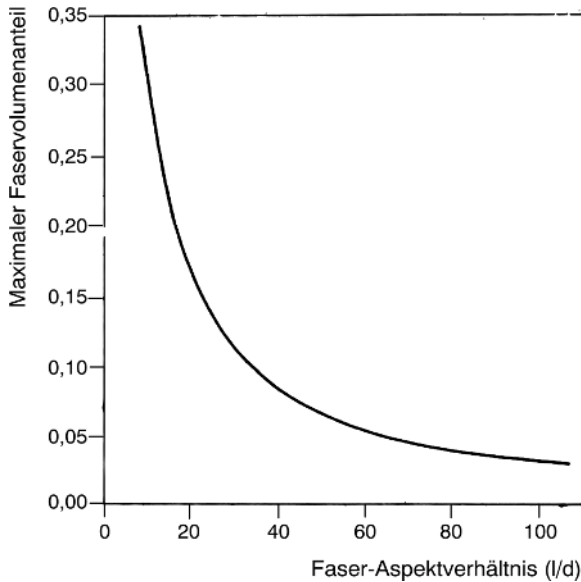


Abb. 1.46 Maximaler Faservolumenanteil als Funktion des durchschnittlichen Faser-Aspektverhältnisses oberhalb dessen Fasern im Prozess gebogen, gebrochen oder anders ausgerichtet werden (von Turkovich und Erwin [35] nach Milewski [36]; veränderte Darstellung mit freundlicher Genehmigung des John Wiley Verlages).

fekte beschreiben Graupner et al. [14] beim Rezyklieren von Regeneratcellulosefasern zur Verstärkung des Kunststoffes PLA. Werden hingegen Bastfaserbündel rezykliert, kann sich das Aspektverhältnis vergrößern und der Abbau der Eigenschaften des thermoplastischen Rezyklats nach mehreren Rezyklierungsschritten fällt geringer aus als bei einem Kurzglasfaserverbundwerkstoff [21].

1.3.5 Einfluss der Oberflächenform

Wie in Abschn. 1.1 beschrieben, setzt sich die Oberflächenform aus der Faserstruktur und der Strukturfeinheit zusammen [4]. Der Einfluss der Oberflächenform auf die Verbundwerkstoffeigenschaften ist insbesondere im Zusammenhang mit der Faser-Matrix-Haftung¹⁶⁾ zu sehen. So konnten Mackin et al. [38] zeigen, dass die Energiedissipation bei einem Faserauszug aus dem Kunststoff maßgeblich von der Rauigkeit der Grenzschicht zwischen Faser und Matrix abhängt. Die Autoren zeigen, dass eine Erhöhung der Rauigkeitsamplitude die Möglichkeit des Fasergleitens verändert, was insgesamt zu einer deutlich höheren Energiedissipation beim Faserauszug führt [38].

Song et al. zeigen für kohlenstofffaserverstärktes Epoxidharz, dass die Veränderung der Oberflächenrauigkeit der Fasern zu einer stärkeren mechanischen Verzahnung zwischen Faser und Matrix führt. Dies trägt zu einem signifikanten Anstieg der scheinbaren interlaminaeren Scherfestigkeit¹⁷⁾ bei [39].

16) Detaillierte Ausführungen finden sich in Abschn. 4.2.4 „Messung der Faser-Matrix-Haftung“.

17) Vergleiche Abschn. 4.2.4 „Messung der Faser-Matrix-Haftung“.

Bei der Interpretation von Untersuchungen der Faser-Matrix-Haftung an Cellulosefasern sind nach Müssig und Graupner [40] folgende Aspekte zu berücksichtigen. Regenerierte Cellulosefasern wie Lyocell weisen im Gegensatz zu Bastfaserbündeln eine glatte (levale) Faserstruktur auf. Die größere Rauigkeit von Bastfaserbündeln führt zu einer höheren Grenzflächenreibung, die allerdings nicht mit der theoretischen Adhäsion zu verwechseln ist [40].

1.3.6 Einfluss der Orientierung

Nach Fu und Lauke [10] hat neben dem Faservolumenanteil und der Faserlänge vor allem auch die Faserorientierung einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffs.

Ein Orientierungszustand kann sich zwischen den Zuständen *wirr* und *gerichtet* einstellen. Zur Verdeutlichung unterschiedlicher Orientierungszustände in kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen dient Abb. 1.47.

Goh [7] beschreibt den Einfluss der Faserorientierung auf die mechanischen Eigenschaften eines kurzfaserverstärkten Modellverbundwerkstoffs (siehe Abb. 1.48). Für den E-Modul und die Bruchfestigkeit treten die Maxima bei 0° und bei $3,1416 \text{ rad}$ (180°) auf. Von den Maximalwerten nehmen der E-Modul und die Bruchfestigkeit ab und erreichen bei 90° ein Minimum [7].

Tian et al. [34] erhalten für kohlenstofffaserverstärktes Magnesium vergleichbare Ergebnisse. Auf der Basis von Finite-Elemente-Modellen bestimmen sie für unterschiedliche Faserorientierungen die Spannungs-Dehnungs-Kurven (Abb. 1.49a). Die Zugfestigkeit der kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffe ist in Abb. 1.49b als Funktion der Faserorientierung dargestellt. Bei einem Faserorientierungswinkel von 0° zeigen die kurzen Kohlenstofffasern den größten Verstärkungseffekt und führen zum höchsten Wert der Zugfestigkeit. Steigt der Faserorientierungswinkel auf 60° , verringert sich die Zugfestigkeit, was nach Tian et al. auf eine Reduzierung der Spannungsübertragung von der Matrix auf die Fasern zurückzuführen ist. Erreichen die Fasern einen Orientierungswinkel von 60° , wird der Wert der Zugfestigkeit minimal. Steigt der Orientierungswinkel weiter auf 90° , erhöht sich die Zugfestigkeit geringfügig. Tian et al. erklären diesen Effekt durch eine bessere Grenz-

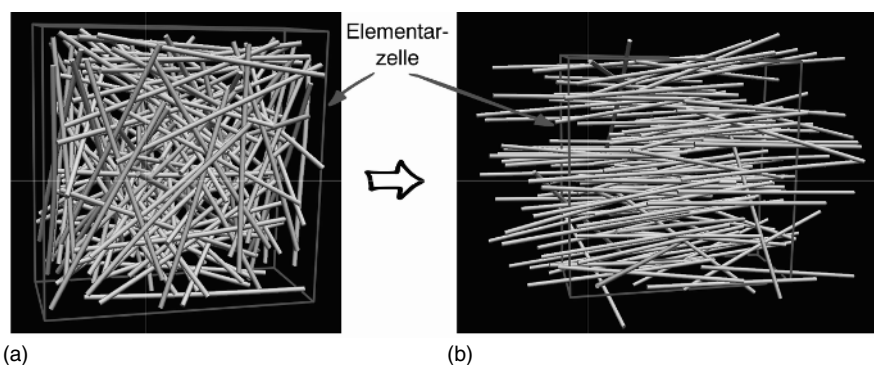


Abb. 1.47 Wirre Faserorientierung in der Elementarzelle (a) im Ausgangszustand und (b) weitestgehend ausgerichtete Kohlenstofffasern nach Erreichen des stabilen Faserorientierungszustands (veränderte Darstellung nach [41]; mit freundlicher Genehmigung der Autorin).

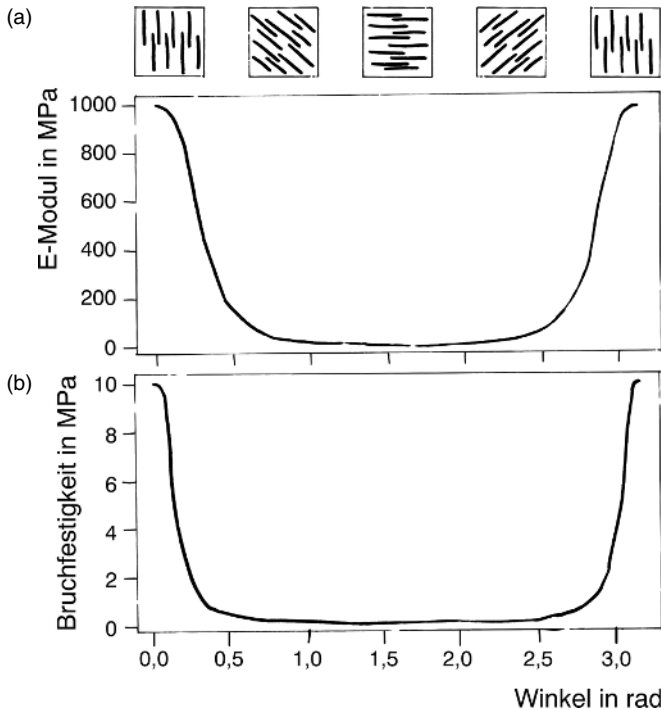


Abb. 1.48 (a) E-Modul und (b) Bruchfestigkeit eines kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffs in Abhängigkeit vom Orientierungswinkel ($1 \text{ rad} = 180^\circ/\pi$; $90^\circ = 1,5708 \text{ rad}$; $180^\circ = 3,1416 \text{ rad}$). Grafische Elemente zeigen die Fasern unter verschiedenen Orientierungswinkeln. Die Belastung wirkt vertikal auf den Faserverbundwerkstoff [7] (veränderte Darstellung; mit freundlicher Genehmigung des Springer-Verlages).

schichthaftung (mechanische Verzahnung¹⁸⁾) durch die Kohlenstofffasern, die das Deformationsverhalten des gesamten Verbundwerkstoffs einschränkt. Insgesamt kommt es dadurch zu einer leicht besseren Spannungsübertragung, wenn der Orientierungswinkel von 60° auf 90° ansteigt [34].

Fu und Lauke [10] stellen auf der Basis analytischer Methoden fest, dass der E-Modul wirrer kurzfaserverstärkter Kunststoffe entscheidend von der Längenverteilung und der Faserorientierungsverteilung abhängt. Der Laminat-Analogie-Ansatz (LAA) wird in ihrer Arbeit zur Vorhersage des E-Moduls verwendet. In Abb. 1.50 sind die berechneten E-Modul-Werte kurzfaserverstärkter Verbundwerkstoffe für unterschiedliche Faserorientierungsverteilungen und unterschiedliche Faservolumenanteile dargestellt. Sowohl der Faservolumenanteil als auch der mittlere Faserorientierungswinkel haben einen signifikanten Einfluss auf den E-Modul. Der E-Modul der Verbundwerkstoffe nimmt mit zunehmendem mittleren Faserorientierungswinkel langsam ab, wenn der Faservolumenanteil klein ist ($V_F = 0-0,1$). Bei großen Werten des Faservolumenanteils (z. B. $V_F = 0,5$) nimmt der E-Modul mit zunehmendem mittleren Faserorientierungswinkel dramatisch ab [10].

Die Ermittlung der Faserorientierung in einem Verbundwerkstoff wird im Abschn. 4.1.2.2 „Dreidimensionale Bildverarbeitung von μ -CT-Daten“ genauer beschrieben. Für Naturfa-

18) Vergleiche Abschn. 1.3.5 „Einfluss der Oberflächenform“.

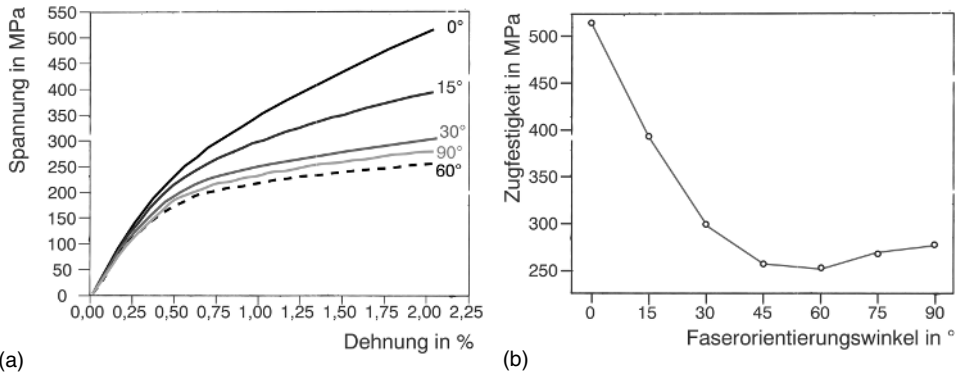


Abb. 1.49 Durch die Simulationen vorhergesagte Spannungs-Dehnungs-Kurven von (a) kohlenstofffaserverstärkten Magnesiumverbundwerkstoffen und (b) durch die Simulationen vorhergesagte Zugfestigkeit (Bruchfestigkeit) [34] (veränderte Darstellung; mit freundlicher Genehmigung des Elsevier Verleges).

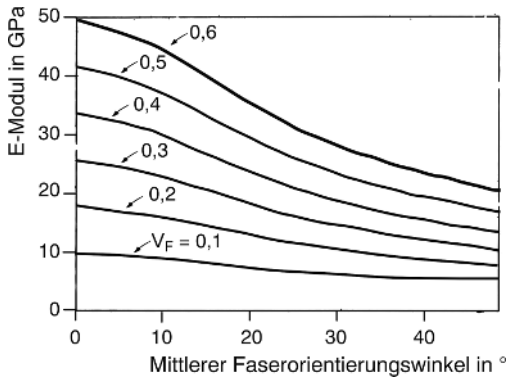


Abb. 1.50 Der mit dem Laminat-Analogie-Ansatz (LAA) berechnete E-Modul kurzglasfaserverstärkter Verbundwerkstoffe für unterschiedliche Faserorientierungsverteilungen und unterschiedliche Faservolumenanteile [10] (veränderte Darstellung; mit freundlicher Genehmigung des Elsevier Verleges).

serverbundwerkstoffe untersuchten Albrecht et al. [42] unterschiedliche experimentelle Methoden zur Messung der Faserorientierung an spritzgegossenem sisalfaserverstärktem Polypropylen (PP): Terahertz-Spektroskopie, μ -CT und lichtmikroskopische Messungen (LMM) von Mikrotomschnitten. Mithilfe der Terahertz-Spektroskopie kann die Hauptfaserorientierung als Mittelwert über der Plattendicke bestimmt werden, allerdings erlaubt die Methode nicht die Bestimmung einer Verteilungsangabe der Faserorientierung an einer definierten Position. Die Verwendung von μ -CT und LMM ermöglicht die Messung der Faserorientierung an verschiedenen Schichten über der Plattendicke und erlaubt die Messung der Rand- und Kernschichteffekte. Da beim μ -CT- und LMM-Verfahren unterschiedlich dicke Schichten vermessen werden, ist beim direkten Vergleich der Ergebnisse Vorsicht geboten [42].

In kommerziellen Spritzgussprogrammen existieren in der Regel nur Werkzeuge für glasfaserverstärkte Thermoplaste, nicht aber für Naturfasern. Albrecht et al. [42] konnten mit ihrer Arbeit zeigen, dass eine Anpassung der Simulationsalgorithmen für sisal-

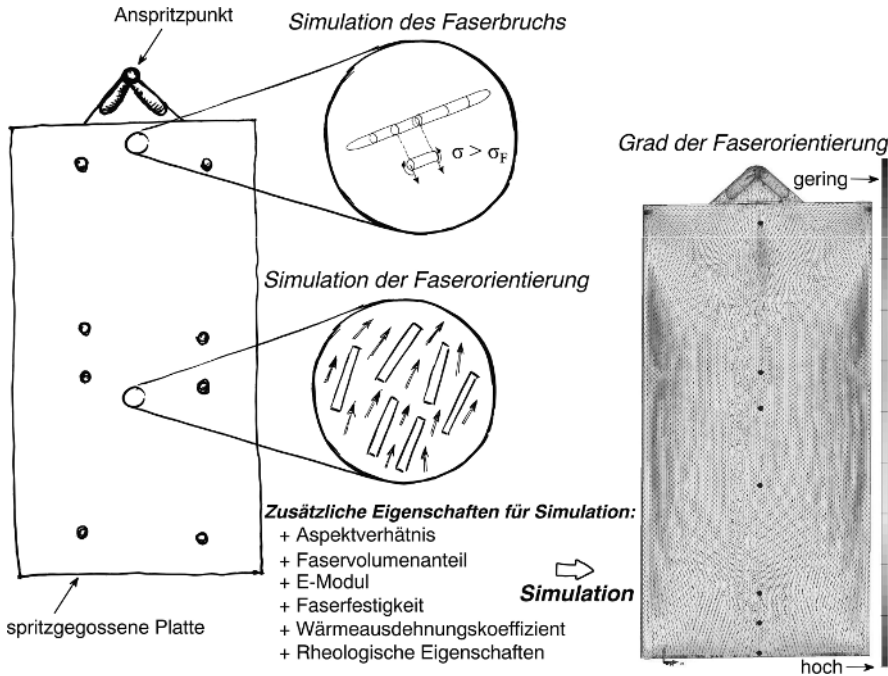


Abb. 1.51 Faserorientierungsmodell sowie Modellierung des Faserbruchs von sisalfaserverstärktem Polypropylen (PP), die in einer Spritzguss-Simulation integriert werden (angepasste und erweiterte Abbildung nach [43]).

faserverstärktes Polypropylen möglich ist. Zur Evaluation der Simulationsergebnisse wurden diese mit den Ergebnissen experimenteller Methoden verglichen. Die mit der Methode des μ -CT gefundenen Orientierungen korrelieren gut mit einer durchgeführten Spritzguss-Simulation, die für sisalfaserverstärktes Polypropylen entwickelt wurde [42]. Der Ansatz ist in Abb. 1.51 schematisch dargestellt.

Die Orientierung der Fasern in einem kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoff hat auch einen erheblichen Einfluss auf die Schädigungsmechanismen beim Versagen des Werkstoffs. Schoßig [44] fasst die Ergebnisse unterschiedlicher Autor:innen zu zähigkeitssteigernden Mechanismen als Funktion der Faserorientierung zusammen (vgl. Abb. 1.52). Besonders effektiv zur Steigerung der Zähigkeit gestaltet sich eine Faserorientierung, die parallel zur Belastungsrichtung verläuft. In diesem Szenario können, abhängig von der Faser-Matrix-Haftung, folgende Prozesse ablaufen: (i) Faser-Matrix-Ablösung, (ii) Faserauszug, (iii) Fasergleiten und (iv) Faserbruch. Treten alle Effekte auf, ist in der Folge die Zähigkeit des Verbundwerkstoffs maximiert und der Riss breitet sich zickzackförmig aus. Ist die Faser-Matrix-Haftung extrem hoch, können die zuvor genannten Mechanismen nur bedingt ablaufen und die Zähigkeit des Verbundwerkstoffs verringert sich (vgl. Abb. 1.52a unten) [44].

Die Abb. 1.52a illustriert die Fälle für senkrecht bzw. schräg orientierte Fasern. Schoßig [44] beschreibt, dass es bei geringer Faser-Matrix-Haftung zur Separation der Grenzschicht kommen kann und sich Löcher zwischen den Fasern bilden können. Die Matrix

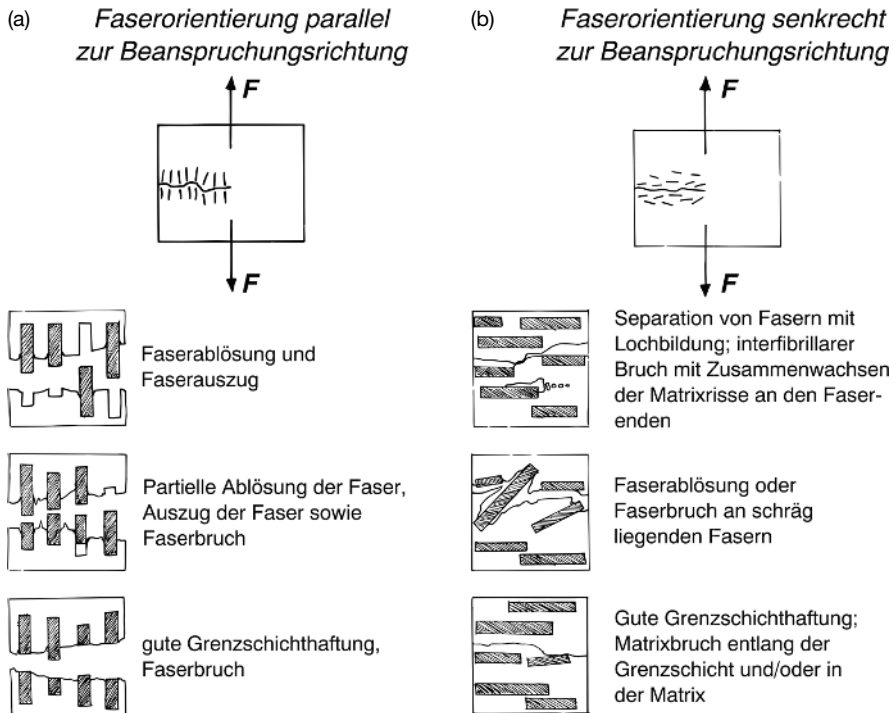


Abb. 1.52 Schädigungsmechanismen in kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen in Abhängigkeit von der Faserorientierung und der Faser-Matrix-Haftung (nach Schoßig [44] u. a. – veränderte Darstellung; mit freundlicher Genehmigung des Springer-Verlages).

kann spröde brechen und es kann zur Scherung und zum Craze-Mechanismus¹⁹⁾ in der Matrix kommen. Nicht perfekt senkrecht liegende Fasern können herausgezogen werden oder brechen. Für den Fall einer gut ausgebildeten Faser-Matrix-Grenzschicht breitet sich der Riss entweder innerhalb der Matrix oder teilweise entlang der Grenzschicht aus, die Bruchfläche im Verbundwerkstoff ist in diesem Fall relativ glatt (vgl. Abb. 1.52b unten) [44].

Die Steigerung der Zähigkeit von cellulosefaserverstärkten spritzgegossenen Verbundwerkstoffen kann neben den zuvor beschriebenen Möglichkeiten durch die Wahl der Faser gesteuert werden. So berichten Bax und Müssig [45] über den Einsatz von duktilen, regenerierten Cellulosefasern in PLA. Im Vergleich zu festem und eher sprödem Flachs konnte durch den Einsatz der Regeneratcellulosefasern die Zähigkeit der PLA-Verbundwerkstoffe deutlich gesteigert werden [45].

1.3.7 Mitnahmebotschaft

Die Ausführungen in diesem Kapitel sollen dazu führen, dass die möglichen Einflüsse teilbezogener Faserformen auf die Eigenschaften eines Faserverbundwerkstoffs verständlicher werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die *Längsform*, die *Querschnittsform*,

¹⁹⁾ Ein mikromechanischer Deformationsmechanismus bei Kunststoffen.

die *Oberflächenform* und die *Faserorientierung* erheblichen Einfluss auf die Verbundwerkstoffeigenschaften haben. Wichtig ist es in diesem Zusammenhang zu betonen, dass es nicht ausreicht, eine teilbezogene Faserform isoliert zu betrachten, da sich die Faserverbundwerkstoffeigenschaften meist multifaktoriell aus den teilbezogenen Faserformen sowie weiteren Einflussfaktoren ergeben.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Malika Müssig für ihre kreative Arbeit mit den handgezeichneten, schematischen Abbildungen.

Literatur

- 1 Graupner, N. und Müssig, J. (2010). *Technical Applications of Natural Fibres: An Overview* (Hrsg. J. Müssig), 1. Aufl., Kap. 3.2, S. 63–72. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- 2 Schnegelsberg, G. (1973). Informatik und Textilien – dargestellt am Beispiel: Vergleichende Gegenstandsexplikation „Garn“ und „Faden“. *Textil Praxis Int.* 1973, Oktober: 591–593.
- 3 Schnegelsberg, G. (1971). *Systematik der Textilien*. Das Wissenschaftliche Taschenbuch, Abteilung Technik. München: Wilhelm Goldmann Verlag.
- 4 Schnegelsberg, G. (1999). *Handbuch der Faser – Theorie und Systematik der Faser*, 1. Aufl. Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag.
- 5 Schnegelsberg, G. (1993). Textilwarenlehre. Mönchengladbach, Fachhochschule Niederrhein, Abteilung Mönchengladbach, Fachbereich Textil- und Bekleidungstechnik, Vorlesungsmanuskript.
- 6 Müssig, J. (1997). Herstellung von technischen „Non-woven“-Produkten (Vliesen) unter Einsatz von Naturfasern. Bremen: Faserinstitut Bremen e. V. – FIBRE, (Projekt FV 057, Abschlussbericht Teilprojekt FIBRE, Projektkurztitel: NANO), Autorenmanuskript, 119 Seiten.
- 7 Goh, K.L. (2017). Physical properties of fibres and matrix. In: *Discontinuous-Fibre Reinforced Composites*, S. 21–48. Springer.
- 8 Kelly, A. (1970). Interface effects and the work of fracture of a fibrous composite. *Proc. R. Soc. Lond. A* 319 (1536): 95–116.
- 9 Goh, K.L., Aspden, R.M. und Hukins, D.W.L. (2004). Review: Finite element analysis of stress transfer in short-fibre composite materials. *Compos. Sci. Technol.* 64 (9): 1091–1100.
- 10 Fu, S.-Y. und Lauke, B. (1998). The elastic modulus of misaligned short-fiber-reinforced polymers. *Compos. Sci. Technol.* 58 (3–4): 389–400.
- 11 Krenchel, H. (1964). Fibre reinforcement; theoretical and practical investigations of the elasticity and strength of fibre-reinforced materials. Dissertation. Akademisk Forlag, Technical University of Denmark.
- 12 Müssig, J. und Haag, K. (2015). The use of flax fibres as reinforcements in composites. In: *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*, S. 35–85. Elsevier.
- 13 Graupner, N., Ziegmann, G., Wilde, F., Beckmann, F. und Müssig, J. (2016). Procedural influences on compression and injection moulded cellulose fibre-reinforced polylactide (PLA) composites: Influence of fibre loading, fibre length, fibre orientation and voids. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 81: 158–171.
- 14 Graupner, N., Albrecht, K., Ziegmann, G.,ENZLER, H. und Müssig, J. (2016). Influence of reprocessing on fibre length distribution, tensile strength and impact strength of injection moulded cellulose fibre-reinforced polylactide (PLA) composites. *Express Polym. Lett.* 10 (8): 647.

- 15 El-Sabbagh, A., Steuernagel, L. und Ziegmann, G. (2009). Processing and modeling of the mechanical behavior of natural fiber thermoplastic composite: Flax/polypropylene. *Polym. Compos.* 30 (4): 510–519.
- 16 Graupner, N., Ziegmann, G. und Müssig, J. (2017). Composite models for compression moulded long regenerated cellulose fibre-reinforced brittle polylactide (PLA). *Compos. Sci. Technol.* 149: 55–63.
- 17 Bürkle, E., Sieverdink, M. und Mitzler, J. (2003). Spritzgießverarbeitung von langfaserverstärktem PP. *Kunststoffe* 93 (3): 47–50.
- 18 Loken, T., Osswald, T., Gramann, P. und Ziaee, S. (2013). The effects of injection molding process parameters on final fiber length of a short-fiber composite. SPE Automotive Division (Organizer), Hrsg., *13th-Annual SPE Automotive Composites Conference & Exhibition*, Novi, MI, USA. Troy, MI, USA: SPE Automotive Division, (11.–13. September 2013).
- 19 Albrecht, K., Osswald, T., Baur, E., Meier, T., Wartzack, S. und Müssig, J. (2018). Fibre length reduction in natural fibre-reinforced polymers during compounding and injection moulding – Experiments versus numerical prediction of fibre breakage. *J. Compos. Sci.* 2 (2): 20.
- 20 Castellani, R., Di Giuseppe, E., Beaugrand, J., Dobosz, S., Berzin, F., Vergnes, B. und Budtova, T. (2016). Lignocellulosic fiber breakage in a molten polymer. Part 1. Qualitative analysis using rheo-optical observations. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 91: 229–237.
- 21 Bourmaud, A., Shah, D.U., Beaugrand, J. und Dhakal, H.N. (2020). Property changes in plant fibres during the processing of bio-based composites. *Ind. Crops Prod.* 154: 112705.
- 22 Bos, H.L., Müssig, J. und van den Oever, M.J.A. (2006). Mechanical properties of short-flax-fibre reinforced compounds. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 37 (10): 1591–1604.
- 23 Kelly, A. und Tyson, W.R. (1965). Tensile properties of fibre-reinforced metals: Copper/tungsten and copper/molybdenum. *J. Mech. Phys. Solids* 13 (6): 329–350.
- 24 Anonymus (1995). Verstärkte Thermoplaste: Einfluß des Glasfilamentdurchmessers. *Vetrotex Glasfilament Report* 1995/1: 8–9.
- 25 Madsen, B. und Lilholt, H. (2003). Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibre composites – An evaluation of the influence of porosity. *Compos. Sci. Technol.* 63 (9): 1265–1272.
- 26 Goh, K.L., Aspden, R.M., Mathias, K.J. und Hukins, D.W.L. (2004). Finite-element analysis of the effect of material properties and fibre shape on stresses in an elastic fibre embedded in an elastic matrix in a fibre-composite material. *Proc. R. Soc. Lond.* 460 (2048): 2339–2352.
- 27 Ng, X.W., Hukins, D.W.L. und Goh, K.-L. (2010). Influence of fibre taper on the work of fibre pull-out in short fibre composite fracture. *J. Mater. Sci.* 45 (4): 1086–1090.
- 28 Beyerlein, I.J., Zhu, Y.T. und Mahesh, S. (2001). On the influence of fiber shape in bone-shaped short-fiber composites. *Compos. Sci. Technol.* 61 (10): 1341–1357.
- 29 Bagwell, R.M. und Wetherhold, R.C. (2003). Improvement in fracture toughness of an epoxy/copper composite through the use of various end shaped fibers. *Mater. Sci. Eng. A* 361 (1–2): 294–301.
- 30 Humburg, H., Zhu, D., Beznia, S. und Barthelat, F. (2012). Bio-inspired tapered fibers for composites with superior toughness. *Compos. Sci. Technol.* 72 (9): 1012–1019.
- 31 S. Fe, Zhou, B. und Lung, C. (1992). On the pull-out of fibers with fractal-tree structure and the interference of strength and fracture toughness of composites. *Smart Mater. Struct.* 1 (2): 180.
- 32 Fu, S.Y., Li, S.H., He, G.H., Zhou, B.L., Lung, C.W. und Li, S.X. (1993). A study on branched structure fiber-reinforced composites. *Scr. Metall. Mater. (US)* 29 (12): 1541–1546.

- 33 Karlsson, J.O., Gatenholm, P., Blachot, J.-F. und Peguy, A. (1996). Improvement of adhesion between polyethylene and regenerated cellulose fibers by surface fibrillation. *Polym. Compos.* 17 (2): 300–304.
- 34 Tian, W., Qi, L., Zhou, J. und Guan, J. (2014). Effects of the fiber orientation and fiber aspect ratio on the tensile strength of Csf/Mg composites. *Comput. Mater. Sci.* 89: 6–11.
- 35 Von Turkovich, R. und Erwin, L. (1983). Fiber fracture in reinforced thermoplastic processing. *Polym. Eng. Sci.* 23 (13): 743–749.
- 36 Milewski, J.V. (1973). A study of the packing of milled fibreglass and glass beads. *Composites* 4 (6): 258–265.
- 37 Nuez, L., Gautreau, M., Mayer-Laigle, C., D'Arras, P., Guillon, F., Bourmaud, A., Baley, C. und Beaugrand, J. (2020). Determinant morphological features of flax plant products and their contribution in injection moulded composite reinforcement. *Compos. Part C Open Access*, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100054>.
- 38 Mackin, T.J., Warren, P.D. und Evans, A.G. (1992). Effects of fiber roughness on interface sliding in composites. *Acta Metall. Mater.* 40 (6): 1251–1257.
- 39 Song, W., Gu, A., Liang, G. und Yuan, L. (2011). Effect of the surface roughness on interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy resin composites. *Appl. Surf. Sci.* 257 (9): 4069–4074.
- 40 Müssig, J. und Graupner, N. (2020). Test methods for fibre/matrix adhesion in cellulose fibre-reinforced thermoplastic composite materials: A critical review. *Rev. Adhes. Adhes.* 8 (2): 68–129, <https://doi.org/10.7569/RAA.2020.097306>.
- 41 Albrecht, K. (2019). *Nachhaltige faserverstärkte Kunststoffe im Spritzguss – Faserorientierung und Faserschädigung in Experiment und Simulation*. Erlangen: FAU University Press.
- 42 Albrecht, K., Baur, E., Endres, H.-J., Gente, R., Graupner, N., Koch, M., Neudecker, M., Osswald, T., Schmidtke, P., Wartzack, S., Webelhaus, K. und Müssig, J. (2017). Measuring fibre orientation in sisal fibre-reinforced, injection moulded polypropylene – Pros and cons of the experimental methods to validate injection moulding simulation. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 95: 54–64.
- 43 Müssig, J. (2014). Simulation of bio-based composites – NFC-simulation. In: *Flax and Hemp fibres: A natural solution for the composite industry – What's new in 2014?* (Hrsg. F. Reux und I. Verpoest), S. 37–39. Paris, France, JEC composites, co-publiziert CELC/JEC GROUP. Mitwirkende: the experts of the European Scientific Committee of CELC, ISBN 978-2-9526276-2-7.
- 44 Schoßig, M. (2011). *Schädigungsmechanismen in faserverstärkten Kunststoffen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, Springer.
- 45 Bax, B. und Müssig, J. (2008). Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/Flax composites. *Compos. Sci. Technol.* 68 (7–8): 1601–1607.

