Christian Gottlöber

Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen

Grundlagen – Systematik – Modellierung – Prozessgestaltung

2., aktualisierte Auflage

HANSER

Gottlöber

Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen

Bleiben Sie auf dem Laufenden!

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

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Christian Gottlöber

Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen

Grundlagen – Systematik – Modellierung – Prozessgestaltung

2., aktualisierte Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Christian Gottlöber, Technische Universität Dresden, Institut für Naturstofftechnik
E-Mail: christian.gottloeber@tu-dresden.de

MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C083411

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter http://dnb.d-nb.de abrufbar.

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

© 2023 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer
Herstellung: Frauke Schafft
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Titelmotiv: © stock.adobe.com/romaset
Covergestaltung: Max Kostopoulos
Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten
Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck
Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-47769-8
E-Book-ISBN: 978-3-446-47812-1

Vorwort

Seit meinen ersten handwerklichen Versuchen im Schulalter an einer Drechselbank bei meinem späteren Tischlerlehrmeister, meinem Großvater, bis hin zur akademischen Laufbahn an der Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik des Institutes für Holz- und Papiertechnik der Technischen Universität Dresden, hat mich die Einzigartigkeit des Werkstoffes Holz und seine herausfordernden Eigenschaften immer wieder fasziniert. Dabei sind meine handwerklichen Erfahrungen Basis für das Verständnis der Vorgänge bei der Holzzerspanung und meiner wissenschaftliche Arbeit geblieben.

Anders als in der Metallbearbeitung ist die Holzbearbeitung in mancher Hinsicht eher Kunst als Wissenschaft. Die exakte Beschreibung und Vorhersage der Verhaltensweisen und Ergebnisse von Holzzerspanungsprozessen ist zumeist nur ansatzweise möglich. Manchmal ist der Mensch als Handwerker immer noch sehr gefragt und den Maschinen überlegen. Nun könnte man an den dafür sehr oft genannten ursächlichen Gründen, wie dem natürlichen, anisotropen und hygroskopischen Charakter des Bearbeitungswerkstoffes Holz und der großen Streuung seiner Eigenschaften resignieren und sich mit dem Stand der Technik zufrieden geben. Dennoch hat sich in den letzten Jahrzehnten der Stand des Wissens zur Holzzerspanung stetig erhöht. Dies äußert sich in erfolgreich realisierten Forschungs- und Entwicklungsprojekten. Neue Technologien, Maschinen und Werkzeuge, die bspw. materialwissenschaftliche Erkenntnisse und moderne Möglichkeiten des Maschinenbaus sowie der Steuerungs- und Regelungstechnik nutzen, sind Ergebnis dieser Entwicklung.

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Computertechnik zunehmend neue Einsatzbereiche erschlossen und auch im Bereich der Holzbearbeitung Einzug gehalten. Dabei sind Möglichkeiten entstanden, moderne Sensorik, Aktorik und Computer mit speziellen Softwareentwicklungen in Holzzerspanungsmaschinen zu integrieren und damit die Einstell- und Bedienbarkeit oder auch die Sicherheit im Bearbeitungsprozess u. v. m. zu verbessern. Diese zunehmende Annäherung und Verknüpfung von Informationstechnik und Maschine hat den Traum von einer intelligenten, teils selbstlernenden Zerspanungsmaschine, die sich je nach Aufgabenstellung und Zustand im Bearbeitungsprozess automatisch einstellt und auf Ereignisse reagiert, in greifbare Nähe gerückt. Jedoch scheitert die Umsetzung heute immer noch oft an fehlenden Prozessmodellen und vor allem an deren Parametrierung, was die Grundlage für derartige intelligente Systeme ist. Hier ist die Wissenschaft gefragt, die bestehenden Wissenslücken weiter zu füllen und Beschreibungsschwierigkeiten, bspw. beim Qualitätsbegriff von Holzoberflächen, zu verbessern. Vielversprechend erscheint in diesem Zusammenhang auch die Nutzung der Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) zur Kompensation der angesprochenen Defizite.

Eine weitere Tendenz ist ein zunehmend nachhaltiges, „grünes“ Denken, welches sich durch die gesellschaftliche Diskussion im Zuge der weltweiten Ressourcenverknappung und Verteuerung von Energie und vielen wichtigen Rohstoffen in den letzten Jahrzehnten verstärkt hat. Das hat zu technischem Fortschritt und bewusstem, effizienten Umgang mit Energie beim Zerspanen durch bspw. neue Antriebstechnik, effizientere Spanabsaugtechnik und einen Standby-Mode an nicht dauerhaft genutzten Maschinen geführt. Auch Schneidstoffrecycling ist heute mehr denn je Praxis.

Bei allen Innovationen, Veränderungen und zeitgemäßen Anpassungen, die Grundlage für technischen Fortschritt bei der Holzzerspanung ist und bleibt jedoch die Kenntnis der allgemeinen Zerspanungslehre und der vorherrschenden Wirkprinzipien. Auch handwerkliche Kenntnisse im Umgang mit dem Werkstoff Holz und seinen Derivaten (Holzwerkstoffen) sind ein unverzichtbares Fundament bei der stetigen Verbesserung des Wissenstandes und für Problemlösungen. In diesem Zusammenhang sind wissenschaftlich fundierte Bücher, die einen allgemeinen Überblick über die Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen geben, ein wichtiges grundlegendes Lern- und Hilfsmittel. Leider ist derartige Literatur heute immer noch sehr rar bzw. in die Jahre gekommen.

Das vorliegende Buch entstand aus der Idee heraus, ein aktuelles Werk zu schaffen, welches Lernenden, Studierenden, aber auch den Praktikerinnen und Praktikern in Wissenschaft, Forschung und Praxis den allgemeinen Stand des Wissens zur Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen in einer wissenschaftlich fundierten Form systematisch zur Verfügung stellt. Dabei erhebt das Werk nicht den Anspruch einer uneingeschränkten Vollständigkeit. Es soll vielmehr auch Schwachstellen im Wissenstand zeigen und die Basis für zukünftige Forschungsaktivitäten und Untersuchungen in einer sich rasch verändernden Welt mit neuen Möglichkeiten sein.

Ein Großteil des Buches basiert auf meiner bisherigen akademischen Arbeit in Forschung und Lehre am früheren Institut für Holz- und Papiertechnik und jetzigem Institut für Naturstofftechnik der TU Dresden. Hierbei möchte ich mich vor allem beim ehemaligen Inhaber der Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Roland Fischer, für die langjährigen Inspirationen, Diskussionen und die fachliche Begleitung im Themengebiet recht herzlich bedanken.

Die zweite Auflage dieses Buches wurde vor allem genutzt, um kleinere Fehler in Text und Abbildungen zu korrigieren und den allgemeinen Stand der Technik zu überprüfen und anzupassen. Außerdem wurden Verweise auf Normen, Regeln und Gesetze aktualisiert.

Dresden, Juni 2023 *Christian Gottlöber*

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 5

1 Einleitung 11

2 Zerspanung – Einordnung der Verfahren 13

3 Werk- und Schneidstoffe 15

3.1 Holz 15
3.2 Holzwerkstoffe 20
3.3 Schneidstoffe 22
3.4 Schleifmittel 26

4 Spanbildung und Trennvorgang 28

4.1 Spanbildung mit geometrisch bestimmter Schneide 28
4.2 Spanbildung mit geometrisch unbestimmter Schneide 32

5 Kinematik und Geometrie 34

5.1 Bezugsebenen und Winkel an der Werkzeugschneide 34
5.2 Bewegungen 37
5.3 Flächen am Werkstück 42
5.4 Vorschub-, Eingriffs- und Spanungsgrößen 42
5.4.1 Vorschubgrößen 42
5.4.2 Eingriffsgrößen 44
5.4.3 Spanungsgrößen 45

6 Maschine und Werkzeug 48

7 Verfahrenstypen ... 52

7.1 Sägen ... 52
7.1.1 Kreissägen ... 52
7.1.2 Bandsägen ... 57
7.1.3 Gattersägen ... 59
7.2 Fräsen ... 63
7.2.1 Umfangsfräsen ... 63
7.2.2 Stirnfräsen ... 66
7.2.3 Profilfräsen ... 69
7.3 Bohren ... 71
7.4 Drehen ... 74
7.5 Schleifen ... 77
7.5.1 Schleifen mit rotierendem Werkzeug ... 79
7.5.2 Bandschleifen ... 82
7.5.3 Schwingschleifen ... 86
7.6 Finieren ... 87
7.7 Zerteilen ... 90
7.8 Strahltrennen ... 91
7.8.1 Wasserstrahlspanen ... 92
7.8.2 Trennen mit Laserstrahl ... 94

8 Systematik verfahrensbeschreibender Größen und Parameter ... 99

8.1 Prozesseinstell- und Wirkpaarungseingangsgrößen ... 100
8.2 Prozess- und Wirkpaarungsausgangsgrößen ... 101
8.2.1 Quantität ... 103
8.2.2 Qualität ... 105
8.2.2.1 Oberflächenqualität ... 106
8.2.2.2 Kantenqualität ... 113
8.2.3 Energie ... 114
8.2.3.1 Zerspankraft ... 115
8.2.3.2 Leistung ... 124
8.2.3.3 Energie und Arbeit ... 127
8.2.4 Verschleiß ... 130
8.2.5 Schutzgüte ... 138
8.2.5.1 Gefahrenpotenziale an bewegten Werkzeugen und Werkstücken ... 138
8.2.5.2 Lärmemission ... 140
8.2.5.3 Staubemission ... 145

9 Einflüsse auf den Zerspanungsprozess ... 150

9.1 Systematisierung der Einflussgrößen ... 153
9.2 Einflüsse auf die Quantität ... 156
9.2.1 Stoffliche Einflussgrößen ... 156
9.2.2 Geometrische Einflussgrößen ... 157
9.2.3 Kinematische Einflussgrößen ... 157
9.3 Einflüsse auf die Qualität ... 158
9.3.1 Stoffliche Einflussgrößen ... 158
9.3.2 Geometrische Einflussgrößen ... 160
9.3.3 Kinematische Einflussgrößen ... 163
9.3.4 Modellvorstellungen ... 169
9.4 Einflüsse auf die Energie ... 171
9.4.1 Stoffliche Einflussgrößen ... 171
9.4.2 Geometrische Einflussgrößen ... 172
9.4.3 Kinematische Einflussgrößen ... 175
9.4.4 Modellvorstellungen ... 180
9.5 Einflüsse auf den Verschleiß ... 183
9.5.1 Stoffliche Einflussgrößen ... 183
9.5.2 Geometrische Einflussfaktoren ... 186
9.5.3 Kinematische Einflussfaktoren ... 189
9.5.4 Modellvorstellungen ... 192
9.6 Einflüsse auf die Schutzgüte ... 196
9.6.1 Einflüsse auf die Lärmemission ... 196
9.6.1.1 Stoffliche Einflussfaktoren ... 197
9.6.1.2 Geometrische Einflussfaktoren ... 197
9.6.1.3 Kinematische Einflussfaktoren ... 199
9.6.1.4 Modellvorstellungen ... 201
9.6.2 Einflüsse auf die Staubemission ... 203
9.6.2.1 Stoffliche Einflussfaktoren ... 203
9.6.2.2 Geometrische Einflussfaktoren ... 204
9.6.2.3 Kinematische Einflussfaktoren ... 205
9.6.2.4 Modellvorstellungen ... 207

Literaturverzeichnis ... 208

Sachwortverzeichnis ... 219

1 Einleitung

Das Trennen von Holz und Holzwerkstoffen hat eine lange Tradition, welche zum einen mit der seit jeher bestehenden Verfügbarkeit und zum anderen mit den äußerst positiven Bearbeitungs- und Gebrauchseigenschaften von Holz nahezu weltweit begründet werden kann. Es ist davon auszugehen, dass ungefähr seit der Altsteinzeit (2,4 Mio. bis etwa 8000 v. Chr.) Holz neben der thermischen Verwertung stofflich be- und verarbeitet wird. Damit zählt Holz zu den ältesten Werkstoffen der Menschheit. Gegenwärtig werden jährlich ca. 2 Mrd. m^3 Rohholz weltweit stofflich verwertet (FAO, 2019).

Holz ist ein nachwachsender Rohstoff, der eine positive Ökobilanz, nicht zuletzt durch die Möglichkeit CO_2 aus der Atmosphäre zu binden, hat. Beim Einsatz von Holz in Halb- und Fertigprodukten wird ein aktiver Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasen in der Luft geleistet, wenn die Produkte viele Jahre im Einsatz sind. Erst die mögliche Verbrennung (Kaskadennutzung) bzw. der Abbau der Holzsubstanz durch Mikroorganismen bzw. Pilze bringt wieder eine Freisetzung des CO_2, welches in der Wachstumsphase gebunden wurde. Nur wenige andere Werkstoffe können eine derartige annähernd neutrale Umweltbilanz vorweisen.

Die Beliebtheit von Holz resultiert in erster Linie aus den natürlichen Eigenschaften, der ansprechenden Oberflächenästhetik und der relativ einfachen Bearbeitbarkeit. Beim Trennen von Holz wird im Vergleich zu Stahl nur etwa ein Zehntel der Kraft benötigt. Das macht eine handwerkliche Bearbeitung möglich, die in den letzten Jahrhunderten, ja wenn nicht Jahrtausenden, zu einer Vielzahl an Produkten und Einsatzgebieten und die dazugehörigen Berufsstände geführt hat. Neben Kunstobjekten sind vor allem Bauteile von Bauwerken, Transportmittel und Gegenstände des täglichen Lebens hier beispielgebend zu nennen.

Holz als natürlicher Werkstoff bringt nun eine bestimmte Anatomie und stoffliche Zusammensetzung mit sich, die vor allem durch eine Zellstruktur, Anisotropie und Hygroskopizität gekennzeichnet ist. Daraus resultieren bestimmte Problemstellungen bei der Bearbeitung, die Handwerkerinnen und Handwerker durch angepasste Bearbeitungstechniken seit jeher lösen.

In den letzten beiden Jahrhunderten hat sich zunehmend aus der Handwerkskunst eine von Maschinen geprägte Bearbeitungstechnik durchgesetzt, die aus handwerklichen Unikaten und Einzelprodukten durch eine hohe Wiederholgenauigkeit geprägte Werkstücke und Erzeugnisse für einen Massenmarkt geschaffen hat. Dabei ergaben sich durch extreme Mengenleistungen und fehlende handwerkliche Behandlungen der Werkstücke Probleme, die bisher unbekannt waren. In diesem Zusammenhang sind hohe Staub- und Lärmemissionen sowie Probleme bezüglich der Oberflächenqualität bekannt. Deshalb wurden in den letzten Jahrzehnten verstärkt Anstrengungen unternommen, durch neu-

artige Trennverfahren, Maschinen, Werkzeuge und Bearbeitungstechniken die genannten Probleme zumindest teilweise zu lösen.

Ungefähr seit der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg haben sich verschiedene Holzwerkstoffe wie die Span- oder Faserplatte rasant entwickelt, sodass bspw. ein großer Anstieg der Möbelproduktion verzeichnet werden konnte. Diese neuartigen Verbundwerkstoffe besitzen teilweise andere Eigenschaften als das native Holz. Dafür sind veränderte Maschinen und Werkzeuge notwendig. Heute werden in Europa mehr als 32 Mio. m^3 Spanplatten und mehr als 12 Mio. m^3 mitteldichte Faserplatten (MDF) produziert und verarbeitet. Im Vergleich dazu können mehr als 110 Mio. m^3 Schnittholz als europäische Jahresproduktionsmenge herangezogen werden (Eurostat, 2023). Somit stellt die Werkstoffkategorie der Holzwerkstoffe einen zunehmend größeren Anteil an den in der Holzbe- und -verarbeitung eingesetzten Werkstoffen. Erwähnt werden muss an dieser Stelle auch der Trend hin zu spezialisierten Verbundwerkstoffen, bestehend aus unterschiedlichsten Materialien, und vergüteten bzw. modifizierten Hölzern. Ressourcenprobleme und die Tendenz zur Gewichtseinsparung haben in den letzten Jahren zu einem Entwicklungsschub auf dem Gebiet der Leichtbauwerkstoffe geführt, die zumeist als Sandwichkonstruktionen aufgebaut sind.

Die Vielzahl unterschiedlichster Materialien, die heute in den Unternehmen der Holz- und Möbelbranche bearbeitet werden müssen, und der hohe Mechanisierungs- und Automatisierungsgrad setzen genaue Kenntnisse über deren Aufbau und Bearbeitungseigenschaften voraus. Die Wirkung von maßgebenden Einflussgrößen auf die Prozessgrößen, wie Qualität, Quantität, Energie, Verschleiß, Lärm- und Staubemission, muss bei der Auswahl und Einstellung der Trennprozesse beachtet werden und führt in der Regel immer zu einem Optimierungsproblem. Dieses Buch soll dem ambitionierten praktisch und/oder theoretisch erfahrenen Lesenden einen wissenschaftlich fundierten, systematischen Überblick über die Begriffe, Einflussgrößen und Prozess- und Verfahrenskonstellationen beim Trennen von Holz und Holzwerkstoffen liefern. Dabei ist es unabdingbar, auch Begriffe aus der Praxis zu verwenden.

Ausgehend von einer allgemeinen Einordnung und Abgrenzung der zerspanenden Trennverfahren über eine Beschreibung der relevanten Werk- und Schneidstoffe, des Vorganges der Spanbildung an Holz und Holzwerkstoffen, der Maschinen, der Werkzeuge und der Verfahrenstypen sollen schließlich die verfahrensbeschreibenden Größen und Parameter und das allgemeine Prozess- und Wirkpaarungsverhalten analytisch beschrieben werden.

2 Zerspanung – Einordnung der Verfahren

Die Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen hat das Ziel, Werkstücke in ihrer äußeren Form zu fertigen. Dazu werden bestimmte Fertigungsverfahren eingesetzt, die zumeist keilförmige Schneiden verwenden.

Die speziellen Verfahren der Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen ordnen sich in das Fertigungsverfahren Trennen (Hauptgruppe 3 nach DIN 8580, 2022), welches ein fertigungstechnischer Grundprozess ist, ein (Bild 2.1). Allen diesbezüglichen Unterverfahren ist gemein, dass ein Fertigen durch Aufheben des Zusammenhaltens von Körpern stattfindet, wobei der Zusammenhalt des Stoffes teilweise oder im Ganzen vermindert wird. Hierbei ist die Endform in der Ausgangsform enthalten. Auch das Zerlegen zusammengesetzter Körper und das Reinigen werden dem Trennen zugeordnet. (DIN 8580, 2022)

Das Fertigungsverfahren Trennen als sogenannte Hauptgruppe der Trennverfahren wird hierarchisch in verschiedene Gruppen und Untergruppen unterteilt. So unterscheidet man das Zerteilen, das Spanen mit geometrisch bestimmten oder unbestimmten Schneiden, das Abtragen, das Zerlegen und das Reinigen. Die jeweiligen Untergruppen sind zumeist detailliert in den Normen DIN 8588 ff dargestellt. Nicht alle Gruppen und Unterverfahren besitzen eine Bedeutung für die Holzbe- und -verarbeitung. So sind das Zerlegen und das Reinigen hier generell nicht relevant. Bei genauer Betrachtung haben folgende Untergruppen des Trennens holztechnologische Relevanz:

- Scherschneiden (Untergruppe 3.1.1)
- Messerschneiden (Untergruppe 3.1.2)
- Spalten (Untergruppe 3.1.4)
- Drehen (Untergruppe 3.2.1)
- Bohren, Senken, Reiben (Untergruppe 3.2.2)
- Fräsen (Untergruppe 3.2.3)
- Hobeln, Stoßen (Untergruppe 3.2.4)
- Sägen (Untergruppe 3.2.6)
- Feilen, Raspeln (Untergruppe 3.2.7)
- Bürstenspanen (Untergruppe 3.2.8)
- Schaben, Meißeln (Untergruppe 3.2.9)
- Schleifen mit rotierendem Werkzeug (Untergruppe 3.3.1)
- Bandschleifen (Untergruppe 3.3.2)
- Hubschleifen (Untergruppe 3.3.3) bzw. Hohnen (Untergruppe 3.3.4)

- Strahlspanen (Untergruppe 3.3.6)
- Gleitspanen (Untergruppe 3.3.7)
- Thermisches Abtragen (Untergruppe 3.4.1)

(DIN 8588, 2013; DIN 8589-0, 2003; DIN 8590, 2003)

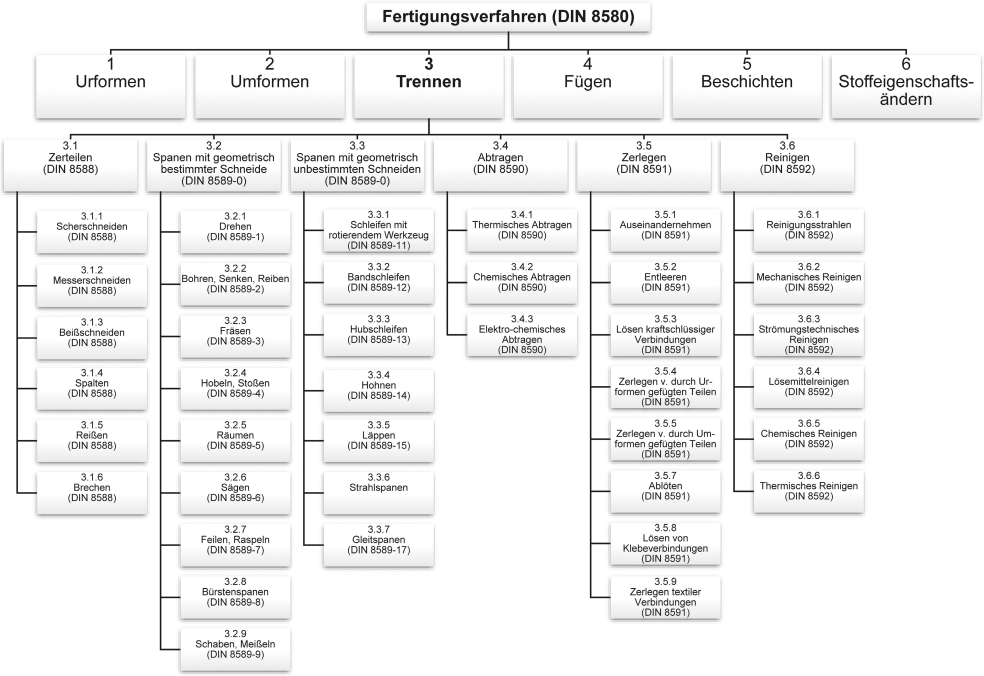

Bild 2.1 Einordnung der Trennverfahren der Holzbe- und -verarbeitung in die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (2022)

Da eine Zerspanung wörtlich genommen eine Spanbildung im Prozess voraussetzt, können nicht alle Untergruppen des Trennens dem Begriff zugeordnet werden. Diesbezüglich nehmen die Unterverfahren Scherschneiden, Messerschneiden, Spalten und thermisches Abtragen eine Sonderposition ein. Während beim Schneiden und Spalten ein sogenannter spanloser Trennvorgang stattfindet, wird beim thermischen Abtragen durch Pyrolyse das Abprodukt (Spanmaterial) thermisch zersetzt.

Im Rahmen dieses Buches sollen vor allem die Verfahren der Spanung mit geometrisch bestimmten und unbestimmten Schneiden (Untergruppe 3.2 und 3.3) im Mittelpunkt stehen. Am Rande soll jedoch auch auf bestimmte, für die Holzbranche typische, Trennverfahren eingegangen werden, die eigentlich nicht als Zerspanungsverfahren bezeichnet werden können.

3 Werk- und Schneidstoffe

Die Zerspanung und die dabei zu beobachtenden Vorgänge hängen unmittelbar mit dem Aufbau und den Eigenschaften der interagierenden Werkstoffe der Wirkpaarung zusammen. Darunter sind zum einen das zu bearbeitende Material (Werkstück) – Holz und Holzwerkstoffe – und zum anderen das zur Spanerzeugung eingreifende Material des Schneidteils (Schneidenwerkstoff) – Schneidstoff oder Schleifmittel – zu verstehen.

3.1 Holz

Holz, welches technisch als Vollholz oder Massivholz bezeichnet werden kann, ist ein Werkstoff, welcher durch forstliche Baumernte und den anschließenden Sägewerksprozess durch Quer- und Längsschnitte aus Rohholz erzeugt wird. Dabei wird das Rundholz (Stammware) in prismatische Schnittholzprofile (Bretter, Bohlen, Leisten, etc.) fast ausschließlich durch Sägen zerlegt. Bei diesen Trennaufgaben ändert das Holz seine äußere Gestalt. Der ursprünglich kegelstumpfförmige, vereinfacht zylinderförmige, Grundaufbau, der sich über ein orthogonales Zylinderkoordinatensystem mit der radialen, tangentialen und axialen (longitutinalen) Richtung beschreiben lässt, wechselt zu einer quaderförmigen mit kartesischen Koordinaten zu beschreibende Gestalt der Schnittholzprodukte. Hier wird die natürliche Struktur entsprechend angeschnitten.

Holz als Bestandteil des Baumes ist eine natürlich gebildete komplexe Zellstruktur unterschiedlicher Zelltypen. Diese Struktur ist optimal von der Natur dimensioniert, ausgerichtet und an die Lebensbedingungen des Baumes, d. h. dessen Eigengewicht und die wirkenden Umwelteinflüsse, angepasst. Die verschiedenen Zelltypen erfüllen dabei verschiedene Funktionen im Holz. Man unterscheidet lokal unterschiedlich verteiltes Festigkeits-, Leit- und Speichergewebe. Bedingt durch alternierende Wachstumsphasen und die damit einhergehende Strukturbildung resultiert eine große Anisotropie und Inhomogenität im Rohstoff Holz. Die natürlich optimierte Struktur bringt in der Stammlängsrichtung maximale Reißlängen, die Stahl und Aluminium bei weitem übertreffen. Somit hat Holz richtungsabhängig ein hervorragendes Masse-Festigkeit-Verhältnis und kann sich mit Recht als natürlicher poröser Leichtbauwerkstoff bezeichnen.

Chemisch gesehen ist Holz ein natürliches, heterogenes, kolloides System vieler chemischer Verbindungen (Roland, 1988) bestehend aus den Hauptbestandteilen Zellulose, Hemizellulose und Lignin, die wiederum aus den Grundelementen der organischen Chemie Kohlen-, Sauer-, Wasser- und Stickstoff aufgebaut sind. Besondere Beachtung müssen eine Reihe zusätzlicher Holzinhaltstoffe finden, die als organische und anorganische Begleitbestandteile (Extraktstoffe) in die Holzstruktur eingelagert sind. Den Zerspanungsprozess beeinflussende Stoffe sind Harze, gummiartige Stoffe, Gerbstoffe, organische und anorganische Säuren sowie vor allem mineralische Stoffe.

Der makroskopische Aufbau (Bild 3.1) wird in radialer Richtung ausgehend von der axial, zentrischen Markröhre durch Bereiche periodisch widerkehrender Struktur, den Jahrringen, bestimmt. Die Jahrringe werden entsprechend den jährlich alternierenden klimatischen Wachstumsbedingungen von innen nach außen gebildet und lassen sich in Früh- und Spätholzzonen unterteilen. Die Zellen des Frühholzes sind zumeist großlumig und dünnwandig, die des Spätholzes kleinlumig und dickwandig. Daraus resultieren große Dichteschwankungen innerhalb kleiner Bereiche und eine starke strukturelle Inhomogenität. Bei Hölzern der subtropischen und tropischen Hemisphäre sind die Unterschiede in den Jahrringen entsprechend weniger ausgeprägt und man spricht dann von sogenannten Zuwachszonen, da innerhalb eines Jahres mehrere Regen- und Trockenzeiten, eine kalte und heiße Jahreszeit sich abwechseln können (Wagenführ, 1989). In radialer Richtung werden die Jahrringe von Holzstrahlen durchdrungen, die zu Lebzeiten des Baumes für den radialen Stofftransport und die Stoffspeicherung zuständig sind.

Viele Holzarten neigen im natürlichen Alterungsprozess zur sogenannten Kernbildung. Die Verkernung beginnt sobald die zum Stofftransport erforderliche Breite des übrigen äußeren Jahrringbereiches, des Splintholzes, vorliegt. Das Kernholz hebt sich zumeist durch eine farblich dunkle Veränderung vom helleren Splintholz ab. Kernholz ist trockener, schwerer, härter, dauerhafter und besitzt meistens weniger mineralische Bestandteile. Liegt helles Kernholz vor, so spricht man von Reifholz. (Wagenführ, 1989)

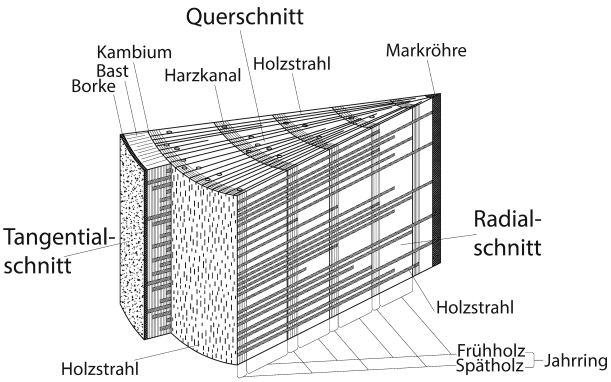

Bild 3.1 Makroskopischer Aufbau des Nadelholzes (nach Straßburger) (Roland, 1988)

Ein Blick auf den mikroskopischen Aufbau des Holzes verrät, weshalb Nadelholz stammesgeschichtlich bedeutend älter als Laubholz ist (Bild 3.2). Während das Laubholz aus vielen verschiedenen spezialisierten, besser an unterschiedliche Funktionen angepasste Zellarten aufgebaut ist, besteht Nadelholz lediglich aus Tracheid- und Parenchymzellen.

Die Tracheiden sind im Nadelholz mehrheitlich vertretene (90 – 94 %), langgestreckte, hauptsächlich axial gerichtete, nicht perforierte, gegen gleichartige Elemente mit Hoftüpfeln versehene, schon im Entstehungsjahr absterbende tote Zellen, die nur noch Wasser und Luft führen (Wagenführ, 1989). Im Laubholz, auch wenn nicht so dominant, sind ebenfalls Tracheiden anzutreffen.

Das Holzparenchym hingegen sind lebende Zellen die beim Nadelholz hauptsächlich radial, beim Laubholz auch axial ausgerichtet sind und die Aufgabe, Nähr- und Wuchsstoffe zu leiten bzw. Reservestoffe einzulagern, übernehmen. Diese Holzstrahlzellen sind

in ihrer rechteckig-prismatischen oder rhombischen Form untereinander und auch an den Berührungsflächen mit den Tracheiden mit Tüpfeln versehen (Wagenführ, 1989). In sogenannten Epithelzellen als parenchymatische Exkretzellen kommt es zur Bildung von Harz, das in bestimmten Bahnen, den Harzkanälen, die durch diese Zellen ausgekleidet werden, abgeleitet wird.

Die Gefäße der Laubhölzer, die auch als Tracheen bezeichnet werden, dienen vorwiegend der Wasserleitung und -speicherung zwischen Baumwurzel und -krone. Sie bestehen aus toten, verholzten Zellen. Je nach Verteilung der Gefäße über den Jahrring unterscheidet man ring-, halbring- und zerstreutporige Laubhölzer.

Die Fasertracheiden als Übergangsform und vor allem die Libriformfasern dienen hauptsächlich der Festigung im Laubholz. Sie bestehen aus axial langgestreckten, zugespitzten, mehr oder weniger dickwandigen, meist englumigen, mit Tüpfeln versehenen, überwiegend toten Zellen, die Luft oder Wasser führen. Die Libriformfasern sind an den Enden in den Überlappungsbereichen miteinander verzahnt. Mit 60 % bis 65 % bilden sie den Hauptanteil an der Laubholzmasse. Das Verhältnis Zellwandstärke zu Lumen beeinflusst somit maßgeblich die Rohdichte des Laubholzes. (Wagenführ, 1989)

Die dargestellten anatomischen und chemischen Gegebenheiten wirken sich direkt auf die Prozesse der Be- und Verarbeitung von Holz aus. Der Trenn- bzw. der Zerspanungsprozess verändert sich maßgeblich im Gegensatz zur Metall- oder Gesteinsbearbeitung.

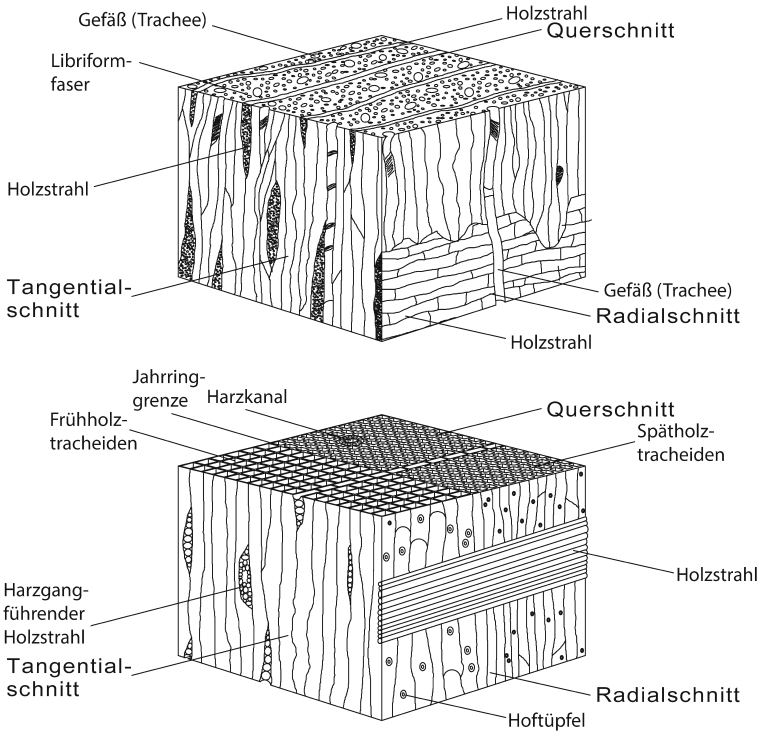

Bild 3.2 Mikroskopische Ansicht des Holzes (Wagenführ & Scholz, 2012) – oben Laubholz, unten Nadelholz

Die anisotrope, inhomogene Struktur bedingt, dass in den unterschiedlichen Hauptrichtungen des Holzes das Trennverhalten signifikant differiert. Inhomogene Rohdichteverteilungen durch wechselnde Zellstrukturen sowie inhomogene Verteilungen der chemischen Substanzen im Holz führen zu sehr stark schwankenden richtungsabhängigen Be- und Verarbeitungseigenschaften. Ein Problem besteht darin, dass am hölzernen Werkstück die Lage der gewachsenen Hauptrichtungen mit der Orientierung der entstehenden Schnittflächen nicht übereinstimmt. Das bedeutet, dass an jedem individuellen Werkstück das zumeist kartesische Koordinatensystem der Bearbeitungsrichtungen von der Lage des orthogonalen Zylinderkoordinatensystems des nativen Holzstammstücks differiert. Die Kenntnis, dass bestimmte zerspanungsrelevante Holzeigenschaften (Schnittkraft, Festigkeiten, Spaltbarkeit, E-Modul) zwischen der radialen, tangentialen und longitutinalen Richtung des Zylinderkoordinatensystems um mehrere 100 % schwanken können, ergibt eine fast unlösbare Aufgabe der Prozessvorhersage und -berechenbarkeit. Nimmt man weitere Besonderheiten, wie beispielsweise die natürliche Abholzigkeit des Holzstammes oder die Feuchteabhängigkeit vieler Holzeigenschaften hinzu, erscheint eine Modellierung bzw. Prozesssystematisierung nahezu unmöglich. Es ist also notwendig, über sinnvolle Vereinfachungen nachzudenken, um überhaupt in gewissen Grenzen praktikable Modelle zu generieren.

Auf dem Gebiet der Holzbe- und -verarbeitung wurde deshalb seit jeher nach Beschreibungsmöglichkeiten bezüglich der Bearbeitungsrichtung am Holzwerkstück gesucht. Dabei wurden im kartesischen Koordinatensystem bestimmte Richtungen definiert, in denen in etwa gleiche Bearbeitungseigenschaften zu erwarten sind.

Als wegweisend stehen bis heute die Arbeiten von Kivimaa (1950, 1952) da, der als erster in der Mitte des 20. Jahrhunderts die Hauptschnittrichtungen A, B und C am nativen Vollholz einführte (Bild 3.3) und bezüglich des Zerspanungsverhaltens auch in Zwischenrichtungen untersuchte. Dabei beschreibt das System die Schnittrichtung in Bezug auf die Holzstruktur. Das definierte System ist zumeist hinreichend genau und wird bis heute von vielen Forschenden sowie Anwenderinnen und Anwendern verwendet. Eine begriffliche Abweichung zu den Hauptschnittrichtungen A, B und C nach Kivimaa (1950) stellt die bekannte Nomenklatur nach Koch (1964) dar, die durch McKenzie (1961) ursprünglich definiert wurde. Hierbei werden die Bezeichnungen 90° – 90° für die Schnittrichtung A, 90° – 0° für die Schnittrichtung B sowie 0° – 90° für die Schnittrichtung C verwendet. Die erste Zahl drückt den Winkel zwischen Schneidenlage und Faserrichtung, die zweite Zahl den Winkel zwischen Schnittbewegungsvektor und Faserrichtung aus. Die Winkelangabe erfolgt in Grad.

Mit der Einführung der modernen CNC-Technik und den fast unbegrenzten Möglichkeiten der Schnittführung (Freiformfräsen) am hölzernen Werkstück bestand die Notwendigkeit ein neues, genaueres System zur Beschreibung des Spanungsvorganges zu definieren. Neben der Schnittrichtung sollte auch die Lage der Werkzeugschneide zur Holzstruktur Beachtung finden. Rehm (2002) beschreibt ein solches System (Bild 3.4), bei dem über die Angabe von vier Winkeln zwischen Schneidenlage und Schnittrichtungsvektor im Verhältnis zum orthogonalen Koordinatensystem des Holzes eine eindeutige Beschreibung möglich ist. Er stellt aber auch fest, dass das vorgeschlagene System recht kompliziert und aufwendig in der Handhabung und gegenwärtig unüblich ist.

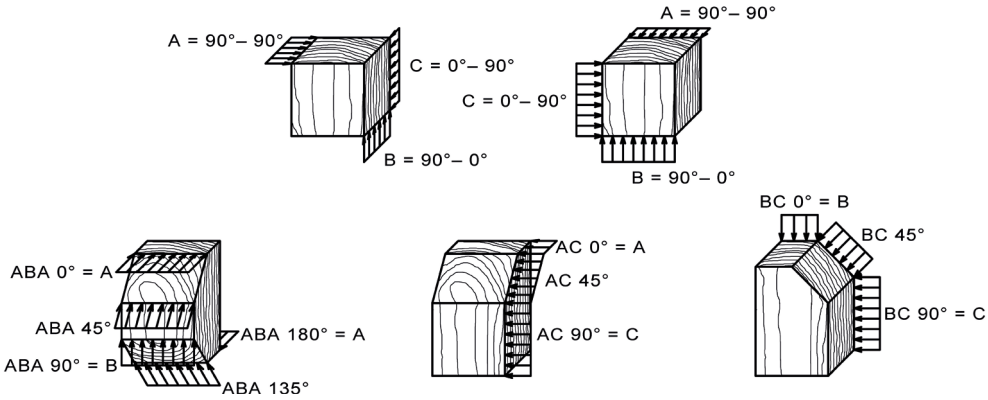

Bild 3.3 Hauptschnittrichtungen A, B, C nach Kivimaa (1950) bzw. 90° – 90°, 90° – 0°, 0° – 90° nach McKenzie (1961)

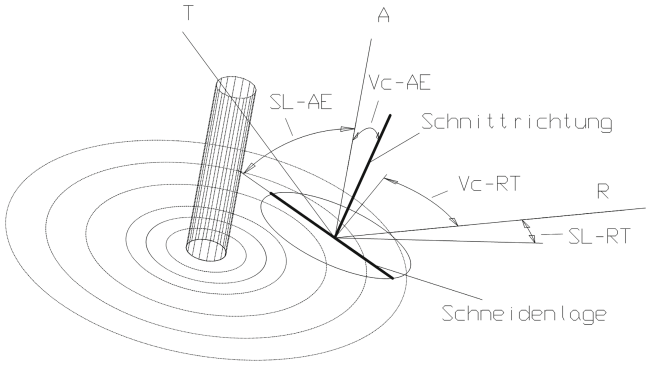

Bild 3.4 Definition der Schnittrichtung und der Schneidenlage im Zylinderkoordinatensystem zur Holzbeschreibung (Rehm, 2002)

Durch die Zellstruktur, aus der Holz aufgebaut ist, ergeben sich bezüglich der Qualitätsbeschreibung bearbeiteter Holzoberflächen Schwierigkeiten. So genügt es nicht nur, wie bei der Metallbearbeitung üblich, die sich aus einem Oberflächenprofilschrieb eines abtastenden Messverfahrens ergebenden Kennwerte zur Güteeinschätzung heranzuziehen. Die anisotrope, inhomogene Zellstruktur macht selbst einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Werkstücken einer Holzart teilweise sehr schwer. Durch die Nachgiebigkeit der oberflächennahen Zellschichten können äußerlich nicht erkennbare, irreversible und teils auch reversible Verdichtungen entstehen, die die Qualität mitbestimmen. Hinzu kommen in das Werkstück hineinlaufende Risse durch ungünstige und wechselnde Konstellationen bezüglich der Vorspaltung im Holz während der spanenden Bearbeitung. (Gottlöber, 2003)

3.2 Holzwerkstoffe

Lignocellulose Verbundwerkstoffe, zumeist als Holzwerkstoffe bezeichnet, sind technisch hergestellte Konstruktionswerkstoffe auf der Basis lignocelluloser Stoffe, wie z. B. Holz oder Ein- und Mehrjahrespflanzen. Dabei kommt es zum Verbund von flächigen, spanförmigen, faserförmigen oder strang-/stabförmigen Strukturelementen unter Einsatz organischer oder anorganischer Bindemittel (Bild 3.5).

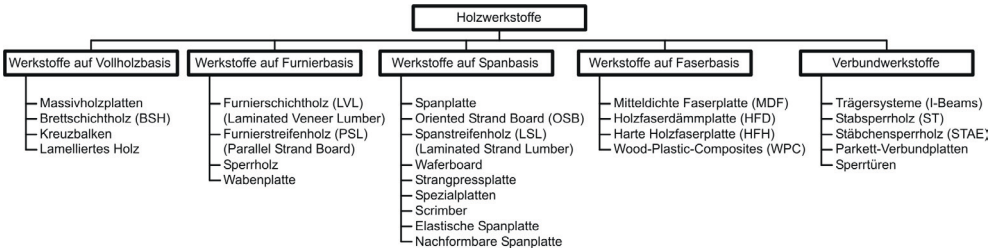

Bild 3.5 Übersicht über die Holzwerkstoffe nach Niemz (Anonymus, 2009)

Strukturell sind Holzwerkstoffe so aufgebaut, dass zumeist die Anisotropie des nativen Holzes durch Zerkleinerung und Rekombination abgebaut wird und der Werkstoff dadurch homogener ist. Es können formstabile Werkstoffe in anwendungsgerechten Dimensionen sowie unter stofflicher Nutzung von Reststoffen der Holzindustrie erzeugt werden. Durch spezielle Rohstoffsortimente, Bindemittel und Additive lassen sich gezielte Eigenschaften im Verbundwerkstoff einstellen. Sehr oft kommt es im Werkstoff zu einem ausgeprägten Rohdichteprofil über dem Plattenquerschnitt, welches hochdichte, glatte Oberflächen und eine hohe Biegefestigkeit der Plattenmaterialien gewährleistet. Die Plattenmaterialien sind so beschaffen, dass im Verarbeitungsprozess nur noch an den Schmalflächen bzw. beim Zuschnitt eine spanende Bearbeitung erfolgen muss. Die Breitflächen werden über Beschichtungsvorgänge mit flüssigen oder festen Stoffen bspw. Lacken, Lasuren, Folien oder Furnieren veredelt.

Bedingt durch hohe Rohdichten und den Einsatz von Zuschlagstoffen und Bindemitteln sowie durch die rohstoff- und prozesstechnische Verunreinigung mit mineralischen und metallischen Stoffen, bis hin zum Einsatz hochharter Beschichtungsstoffe, kommt es bei der späteren Holzwerkstoffverarbeitung außerdem generell zu erhöhtem Verschleiß. Die Werkzeug- und Verfahrensgestaltung muss diesen Umständen im Gegensatz zur Massivholzbearbeitung unbedingt Rechnung tragen.

Die hauptsächlichen Holzwerkstoffgruppen lassen sich anhand der Größe der lignozellulosen Strukturelemente (Fasern, Späne, Furniere, Vollholzelemente) charakterisieren. Man spricht vom sogenannten Aufschlussgrad, der mit Verringerung der Elementgröße steigt. Verbunden damit ist eine steigende Homogenisierung des erzeugten Holzwerkstoffes im Gegensatz zum nativen Holz.

Wichtigste Holzwerkstoffe sind heute vor allem die Spanplatte, die mitteldichte Faserplatte (MDF) und das Sperrholz. In den letzten Jahren haben weitere Werkstoffe Anwendungen