

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen

von Christian Gottlöber

Print-ISBN: 978-3-446-47769-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-47812-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446477698>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# 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 Holzspannung 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 Holzspanungsprozessen 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 Holzspannung 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 Holzspanungsmaschinen 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, effizientem 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 Holzspannung 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

	<b>Vorwort .....</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Zerspanung – Einordnung der Verfahren .....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Werk- und Schneidstoffe .....</b>	<b>15</b>
	3.1 Holz .....	15
	3.2 Holzwerkstoffe .....	20
	3.3 Schneidstoffe .....	22
	3.4 Schleifmittel .....	26
<b>4</b>	<b>Spanbildung und Trennvorgang .....</b>	<b>28</b>
	4.1 Spanbildung mit geometrisch bestimmter Schneide .....	28
	4.2 Spanbildung mit geometrisch unbestimmter Schneide .....	32
<b>5</b>	<b>Kinematik und Geometrie .....</b>	<b>34</b>
	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
<b>6</b>	<b>Maschine und Werkzeug .....</b>	<b>48</b>

<b>7</b>	<b>Verfahrenstypen .....</b>	<b>52</b>
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	Umfangsfraesen .....	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

<b>8</b>	<b>Systematik verfahrensbeschreibender Größen und Parameter .....</b>	<b>99</b>
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

<b>9</b>	<b>Einflüsse auf den Zerspanungsprozess .....</b>	<b>150</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>208</b>
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>219</b>



# 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<sup>3</sup> Rohholz weltweit stofflich verwertet (FAO, 2019).

Holz ist ein nachwachsender Rohstoff, der eine positive Ökobilanz, nicht zuletzt durch die Möglichkeit CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>, 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<sup>3</sup> Spanplatten und mehr als 12 Mio. m<sup>3</sup> mitteldichte Faserplatten (MDF) produziert und verarbeitet. Im Vergleich dazu können mehr als 110 Mio. m<sup>3</sup> 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

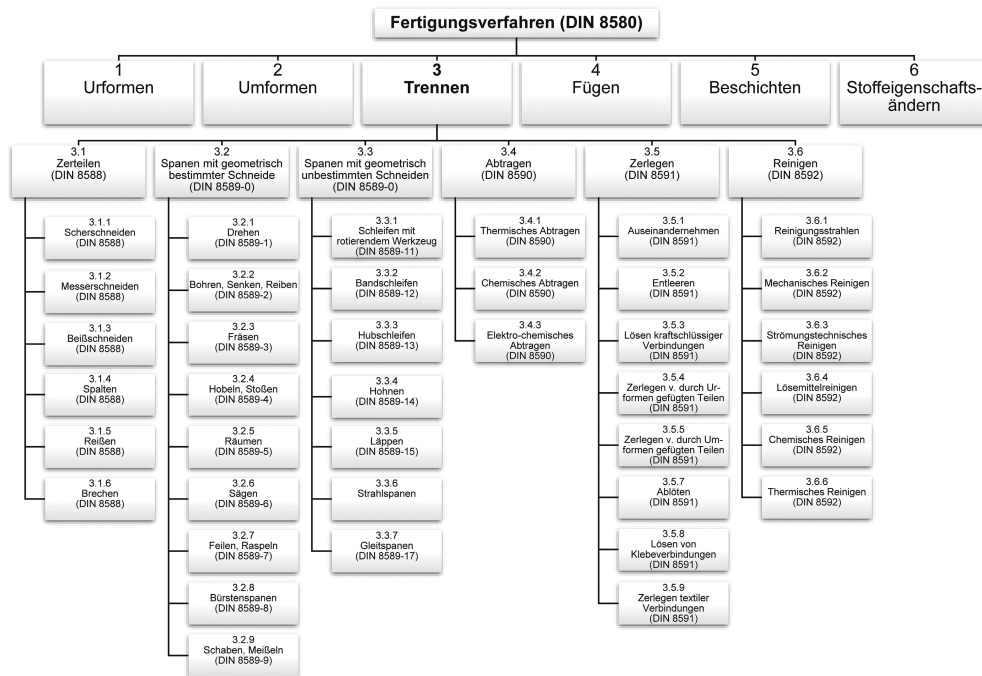
Die Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen hat das Ziel, Werkstücke in ihrer äußeren Form zu fertigen. Dazu werden bestimmte Fertigungsverfahren eingesetzt, die zumeist keilförmige Schneiden verwenden.

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

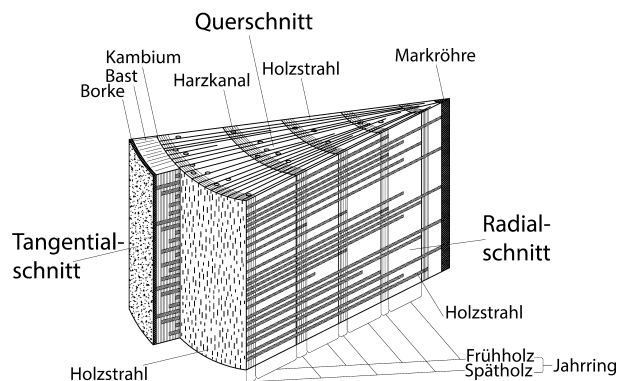
Holz, welches technisch als Vollholz oder Massivholz bezeichnet werden kann, ist ein Werkstoff, welcher durch forstliche Baumernte und den anschließenden Sägewerksprozess durch Quer- und Längsschnitte aus Rohholz erzeugt wird. Dabei wird das Rundholz (Stammware) in prismatische Schnittholzprofile (Bretter, 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 (longitudinalen) 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 wiederkehrender 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 Hof-tüpfeln 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.

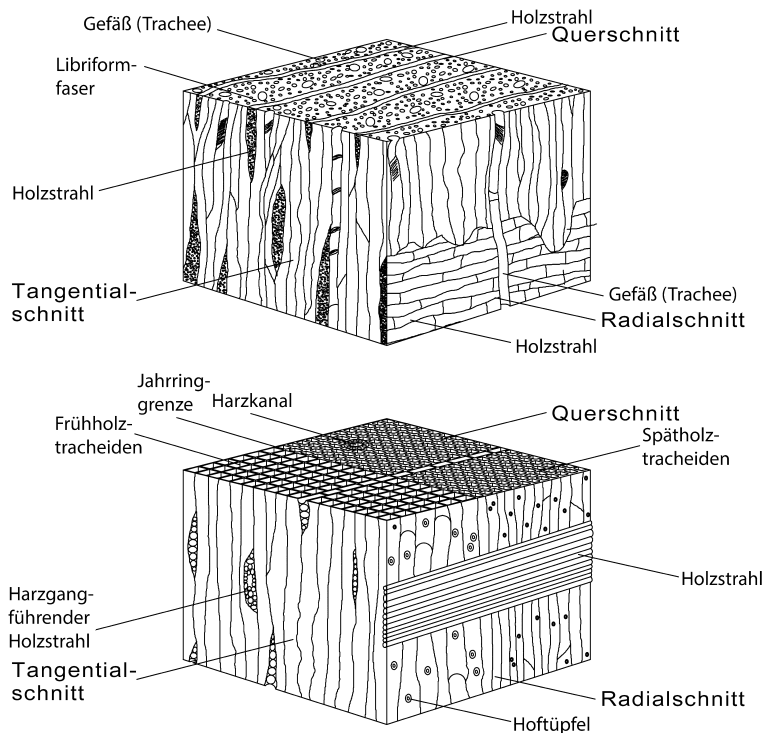
Das Holzparenchym hingegen sind lebende Zellen die beim Nadelholz hauptsächlich radial, beim Laubholz auch axial ausgerichtet sind und die Aufgabe, Nähr- und Wachstoffsstoffe zu leiten bzw. Reservestoffe einzulagern, übernehmen. Diese Holzstrahlzellen sind

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.



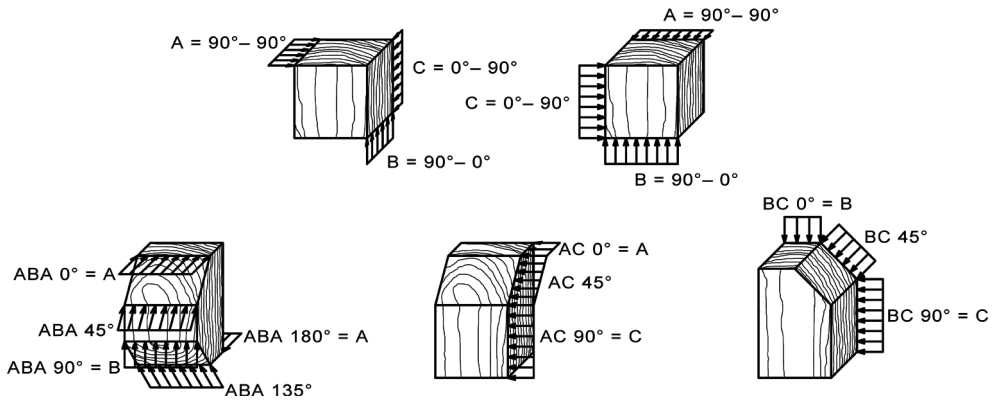
**Bild 3.2** Mikroskopische Ansicht des Holzes (Wagenführ & Scholz, 2012) – oben Laubholz, unten Nadelholz

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 longitudinalen 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.

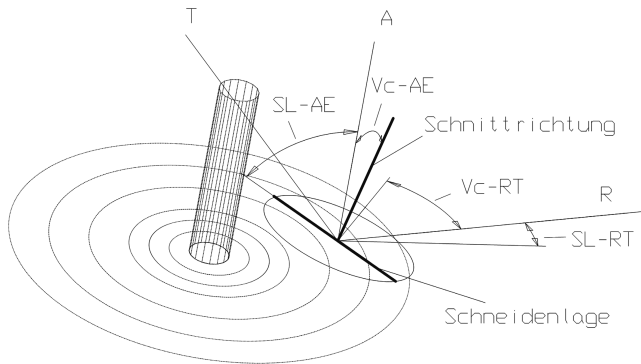
Auf dem Gebiet der Holzbe- und -verarbeitung wurde deshalb seit jeher nach Beschreibungsmöglichkeiten bezüglich der Bearbeitungsrichtung am Holzwerkstück gesucht. Dabei wurden im kartesischen Koordinatensystem bestimmte Richtungen definiert, in denen in etwa gleiche Bearbeitungseigenschaften zu erwarten 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 einführt (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  $90^\circ - 90^\circ$  für die Schnittrichtung A,  $90^\circ - 0^\circ$  für die Schnittrichtung B sowie  $0^\circ - 90^\circ$  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.  $90^\circ - 90^\circ$ ,  $90^\circ - 0^\circ$ ,  $0^\circ - 90^\circ$  nach McKenzie (1961)



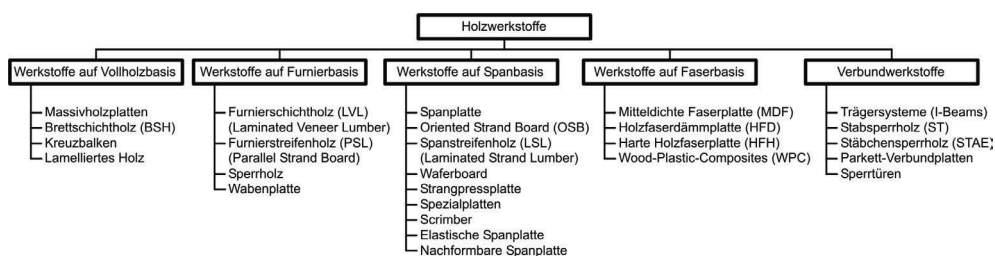
**Bild 3.4** Definition der Schnittrichtung und der Schneidenlage im Zylinderkoordinatensystem zur Holzbeschreibung (Rehm, 2002)

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 lignocellulösen 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

# Sachwortverzeichnis

## A

Abbott-Kurve 113  
Abdrängkraft 123  
Abplatzer 113  
Abrasivmittel 92  
Abrasivschneiden **92**  
Abrichtfräsen 63  
Abrichtfräsmaschinen 64, 66  
Abrieb, mechanischer 130  
Abriebverschleiß 131  
Absätze 107  
Absauganlagen **148**  
Absaugstutzen 148  
Abtrag **105**  
Abtragen **94**  
Abtragen, thermisches 94  
Abtragen von Beschichtungen 96  
Abtragsdicke **98**  
Adhäsion 130  
Aktivkraft **116, 117**  
Andrucksystem 82  
Angenommene Arbeitsebene **36**  
Anisotropie 41  
Anpressdruck 79  
Anriss 113  
Anstellgeschwindigkeit **39**  
Anstellrichtung **39**  
Anstell-/Rückstellbewegung **38**  
Anstellweg **39**  
antistatische Schleifmittel 79  
Antriebselement **49**  
Antriebsenergie, elektrische **114**  
äquivalenter Dauerschallpegel **141**  
Arbeit **127**  
Arbeitseingriff **44**  
Arbeitselement 49  
Arbeitslärm 143  
Arbeitsorgan **49**  
Arbeitsplatzgrenzwerte 148  
Arbeitsschärfe **134**  
Aufbau des Holzes, makroskopischer **16**  
Aufbau des Holzes, mikroskopischer **16**  
Aufbaukante 113  
Aufbauschneide **186**  
Aufbohren 71  
Auffächerungen 93  
Aufladung 79  
Aufflichtmikroskopie 113  
Aufrauen 78  
Aufschlussgrad 20  
Aufstehen der Faser 112

Aufwand und Nutzen **150**  
Aufwölbungen **113**  
Ausbrüche **113**  
Ausbruchspuren 107  
Ausdrehstähle 76  
Ausgangsfläche **42**  
Ausgewählter Schneidenpunkt **34**  
Auslösewerte 144

## B

Bahnkrümmung **157, 178, 191, 201, 207**  
Balligkeit **65**  
Bandabstützung 79  
Bandsägemaschinen 57  
Bandsägen **57**  
Bandschleifen **78, 82**  
Beanspruchungen in der Wirkstelle 29  
Bearbeitungsrauheit **110**  
Beizen 112  
Beschichtungsverfahren 23  
Beschlagslöcher 73  
Betrachtungsmaßstab 153  
Beurteilungspegel **141**  
Bewegungen **37**  
Bewegungsvektor 39  
Bewertungsfiler **141**  
Bezugsflächeninhalt 142  
Bezugssystem **35**  
Blockbandsäge 57  
Blockbandsäge, Duo- 57  
Blockbandsäge, Quadro- 57  
Bohren **71**  
Bohren ins Volle **71**  
Bohrwerke 71  
Bohrwerkzeuge **73**  
Brandschutz 148  
Breitbandgeräusch 140  
Breitbandschleifen 83  
Breitbandschleifmaschinen 84  
Brettschichtholz **21**

## C

Cermets 22  
CNC-Bearbeitungszentren 69, 71  
CO<sub>2</sub>-Laser 97  
CVD-Diamant 25  
CVD-Diamant **24**  
CVD-Verfahren 23, 24

**D**

Dachzahn 54  
 Dehnungsmessstreifen 123  
 Dehnungsschlitze 55  
 Deltaschwingschleifmaschinen 86  
 Diagonalkreissägemaschinen 52  
 Diamant 78  
 Diamant, monokristalliner 25, 26  
 Diamant, polykristalliner 24, 25  
 Diamantschneidstoffe 22, 23  
 Dickenfräsen 63  
 Dickenfräsmaschinen 64, 66  
 Diffusion 130  
 Diodenlaser 97  
 Doppelabkürzkreissägemaschinen 52  
 Doppelwellenkreissägemaschinen 52  
 Douglasbohrer 73  
 Drallmesserwellen 198  
 Drechselmaschinen 74  
 Drechseln 74  
 Drehautomaten 74  
 Drehen 74  
 Drehfräsen 74  
 Drehklang 143  
 Drehmaschinen 74  
 Drehmeißel 76  
 Drehsinn des Werkzeugs 40  
 Drehspuren 110  
 Drehwerkzeuge 76  
 Drehzahl 35, 39, 101, 156  
 Druckbalken 82, 90, 161  
 Druckschuh 82  
 Dübellochbohrmaschinen 71  
 Dübellöcher 71  
 Dunkelfeldbeleuchtung 114  
 Dünnschnittbandsäge 57  
 Dünnschnittgatter 59  
 Dünnschnittkreissägemaschinen 52  
 Durchgangsbohrung 71  
 Durchlaufmaschinen 48  
 Durchmesser, kinematischer 145

**E**

Ebenen 35  
 Ebenen an der geneigten Schneide 188  
 Eckenwinkel 37  
 Edelkorund 26, 78  
 Egalisieren 77  
 Egalsierfräsen 63  
 Einflussgrößen, kinematische 156  
 Einflussgrößen, stoffliche 154  
 Eingangsgrößen 100  
 Eingriffswinkel 44, 157, 168, 192, 193, 201, 207  
 Einlagerungen im Werkstoff 183  
 Einmesserfinish 108  
 Einstellgrößen 100  
 Einstellwinkel 37, 163, 174, 188, 198, 204  
 Elektroenergie 114  
 Emissionsrate 146  
 Endlosspäne 71, 75  
 Energie 114, 127

Energiebedarf 171  
 Energiebegriffe 127  
 Energiemessung 130  
 Energiezähler 130  
 Engineered Wood Products 21  
 Entfernen von Schichten 78  
 Epithelzellen 17  
 EQUAM 114  
 Excimerlaser 97  
 Explosionsschutz 148  
 Exzenterschleifmaschinen 86

**F**

Falzen 66  
 Falzfräser 63  
 Fasefräser 63  
 Faserrichtungswinkel 165  
 Fasertracheiden 17  
 Feinbearbeitung 87  
 Feinbearbeitungsverfahren 77  
 Filzrippenband 84  
 Finieren 87  
 Finiermaschinen 88  
 Finiermesser 89  
 Flächen am Werkstück 42  
 Flachmeißel 76  
 Flachzahn 54  
 Flachzahn, angefaster 54  
 Flüssigkeitsdruck 93  
 Flüssigkeitsstrahl 93  
 Formabweichungen 106  
 Formatkreissägemaschinen 52  
 Formdrehen 74  
 Formfräsen 63  
 Forstnerbohrer 73  
 Fraktion, alveolengängige 146  
 Fraktion, einatembare 146  
 Fraktion, extrathorakale 146  
 Fraktion, thorakale 146  
 Fraktion, tracheobronchiale 146  
 Fräsen 63  
 Frässpuren 110  
 Fräsverfahren 63  
 Fräswerkzeuge 64  
 Freifläche 34  
 Freiflächenverschleiß 132  
 Freiwinkel 37, 162, 173, 187, 198, 204  
 Frequenzgang 141  
 Frühholz 16  
 Fügefräser 63  
 Funkenentladung 79  
 Furnierclipper 90  
 Furnierherstellung 90  
 Furniermessermaschinen 90  
 Furnierschälmaschinen 90  
 Furnierscheren 90  
 Furnierschichtholz (LVL) 21  
 Furnierstreifenholz (PSL) 21  
 Furnierverarbeitung 90  
 Furnierzuschnitt 90  
 Fußbodenlaminat 21

**G**

Gatterrahmen 60  
 Gattersägemaschinen 60  
 Gattersägen **59**  
 Gefahrenpotenziale **138**  
 Gefahrstoffverordnung 148  
 gefertigte Fläche **42**  
 Gegenlauf 31, **40**, 81, 85, 166, 177, 190, 200, 206  
 geometrische Einflussgrößen **155**  
 Gesamtwirkungsgrad **115**  
 Gestaltabweichungen **106**  
 Gewindefräsen **74**  
 Gleichlauf 31, 32, **40**, 81, 85, 166, 177, 190, 200, 206  
 Gleitkufenprinzip 162  
 Gliederdruckbalken 79, 82, 84  
 Granat 26, 27  
 Gravieren 96  
 Gravimetrische Messung 149  
 Grundlärmpegel **143**, 202  
 Güte 105  
 Gütegrad **110**

**H**

Halbedelkorund 26, 78  
 Halbe-Halbe-Zerspanen **167**  
 halboffene Streudichte 78  
 Handbandschleifmaschine 84  
 Handhobeln 88  
 Handkreissägemaschinen 52  
 Hartmetalle 22, **23**, 25  
 Hartstoffbeschichtung **23**  
 Hartverchromungen 23  
 Harz **17**  
 Harzgehalt 183  
 Haupteinschnittaggregat 57  
 Hauptfreiflächen 34  
 Hauptschneide **34**  
 Hauptschnittrichtungen 18, **29**, 41  
 Hauptumsatz 150  
 helixförmiger Schneidenverlauf 65  
 Hellfeldbeleuchtung 114  
 High Performance Cutting 40, 48  
 High Speed Cutting 40, 48  
 Hirnschnitt **30**, 41  
 Hobeln 64, 87  
 Hobelschlag 107  
 Hochgeschwindigkeitsbearbeitung 40  
 Hochleistungsbearbeitung 70  
 Hochleistungsgatter 62  
 Hochleistungsschnellarbeitsstahl (HSS) 22, 25  
 Hohlschaftkegel HSK 49  
 Hohlzahn 54  
 Hohlzahn, angefaster 54  
 Hohnen 78, 86  
 Holz **15**  
 Holzart 107  
 Holzbau 73  
 Holzfeuchte 156, 158, 171, 185, 197, 204  
 Holzhaltstoffe **15**, 183  
 Holzparenchym **16**  
 Holzstaub **148**

Holztemperatur 158, 204  
 Holzwerkstoffe **20**, 32  
 Holzzellstruktur 107  
 Horizontalbohrmaschinen 71  
 Hörschwelle 140  
 Hubschleifen 78, 86  
 Hubverlust **62**  
 Hüllflächenverfahren 144  
 Hydrospannelemente 49

**I**

Impulsfrequenz **97**  
 Impulslaser **97**  
 Irwinbohrer 73

**J**

Jahrringe **16**  
 Joints **65**, 108

**K**

Kalibrieren 77  
 Kalibrierfräsen 63  
 Kaltwalzbahnen 58, 61  
 Kannelieren **74**  
 Kanneliermaschinen 74  
 Kantenausbruch 65, 70, **167**  
 Kantenbearbeitungsmaschinen 67, 69  
 Kantenfasrigkeit **114**  
 Kantenqualität 73, **113**, 166  
 Kantenqualität, ausbruchbezogene **114**  
 Kantenqualitätsmessung **114**  
 Kantenschartigkeit **113**  
 Kantenverrundung 24  
 Kapazität 103, 156  
 Kappsägemaschinen 52  
 Kegelsenken **71**  
 Kehlen **69**  
 Kehlfräsmaschinen 69  
 Keilmessebene 36  
 Keilwinkel **37**, 162, 173, 187, 198, 204  
 Keilwinkel, kritische 185, 187  
 Keramik 22  
 Kernholz **16**  
 Kernrautiefe **113**  
 Klebstoffanteile 183  
 Kolkverschleiß 132  
 Kommaspäne 31, 47, 64, 70  
 Konischer Zahn 54  
 Kontaktwalze 82  
 Kopierdrehen **74**  
 Kopierdrehmaschinen 74  
 Kopierfräsen **63**  
 Körnungen 79  
 Körper **51**  
 Korunde 26, 78  
 Kraftbegriffe **116**  
 Kraftkomponenten 116  
 Kraft, leistungsführende **117**

Kraftmessung **123**  
 Kraftschumpffutter 50  
 Kratzspuren 110  
 Kreissägeblätter **53**  
 Kreissägemaschinen 52  
 Kreissägen **52**  
 Kreissägenüberstand 44  
 Kreuzbandschleifmaschine 84  
 Kühlelemente 55  
 Kurzhubplanhohnen 86  
 Kurzhubprofilhohnen 86

## L

Lackieren 112  
 Lackschleifen 78  
 Lageabweichungen **106**  
 Lamellen 78  
 Lamellenbänder 82  
 Langbandschleifen 83  
 Langbandschleifmaschinen 84  
 Langholzdrehen 74  
 Langlochbohren **71**  
 Langlochbohrmaschinen 71  
 Langlochfräsen **71**  
 Längsabtastungen 137  
 Längsdrehen 74  
 Längsschleifverfahren 28  
 Längsschnitt **30, 41, 52**  
 Lärm **140**  
 Lärm-Arbeitsschutzverordnung 144  
 Lärmemission **140, 196**  
 Lärmmessung **144**  
 Lärminderung 198  
 Lärmpegelzuwachs 202  
 Lärmschutz **143**  
 Laser, kontinuierlicher **94, 98**  
 Laserlichtvorhänge 114  
 Laserornamente 55, 197  
 Laserstrahlauffächerung 96  
 Laserstrahlen **96**  
 Laserstrahlentstehung 97  
 Laserstrahlgröße 96  
 Laserstrahlschneiden 94, 98  
 Laserstreulichtmessung 149  
 Lasertypen 97  
 Lasieren 112  
 Lasthub 60  
 Laubholz **16**  
 Lautheit 142  
 Lautstärkepegel 141  
 Leerhub 60  
 Leerlaufärm 143  
 Leerlaufleistung **115, 127**  
 Leichtbau 21  
 Leimholz **21**  
 Leistung 124  
 Leistungsaufnahme, elektrische **115**  
 Leistungsbegriffe **124**  
 Leistungsmessung 126  
 Lewinbohrer 73  
 Librifasern **17**  
 Lichtschnitte 114

Linearspanungsverfahren 87  
 Lochreihenbohrmaschinen 71  
 Löffelbohrer 73  
 Luftdurchsatz **146**  
 Lufrückführungen 148

## M

Makrokörnungen 79  
 Markröhre **16**  
 Maschine 48  
 Maschineneinhausungen 139  
 Maschinengestell 48  
 Massivholz **15**  
 Massivwerkzeuge **50**  
 Materialtraganteilkurve 113  
 Mäusezahn 54  
 Maximale-Arbeitsplatz-Konzentration-Werte-Liste 148  
 Mehrblattkreissägemaschinen 52  
 Mehrseitenfräsmaschinen 64, 69  
 Meißel 75  
 Mengenleistung 103, 156  
 Messerköpfe 63  
 Messerschlagbild 109  
 Messerschläge 64, 70, **107**  
 Messerschlagtiefe **108**  
 Messerschlagweite **107**  
 Messerschneiden 90  
 Messerschnitt 107  
 Messerwellen 63  
 Messflächeninhalt 142  
 Messflächenmaß **142**  
 Metallkarbide 23  
 Metallzerspanung 28  
 Mikrofasen 24  
 Mikrofone 144  
 Mikrofreiwinkel **133, 185, 195**  
 Mikrokörnungen 79  
 Mikroprozessebene **153**  
 Mikroskopie 114  
 Mindestluftgeschwindigkeit 148  
 Mitteldichte Faserplatte (MDF) **20**  
 Mittenrauhwert, arithmetischer **113**  
 Mittenrauhwert, quadratischer **113**  
 Modellbildung **152, 169, 180, 192, 193, 201, 207**  
 Modifikationsmittelanteile 183

## N

Nachschnittmarkierungen 107  
 Nachstellbewegung **38**  
 Nachstellgeschwindigkeit **39**  
 Nachstellrichtung **39**  
 Nachstellweg **39**  
 Nadelholz **16**  
 NC-Steuerung 93, 96  
 Nebenfleiflächen 34  
 Nebenschneide 31, **34**  
 Neigungswinkel **37, 162, 173, 187, 198, 205**  
 Niederhalter 139  
 Normalkorund 26  
 Nuten 66

Nutfräsen 168  
 Nutfräser 63  
 Nutsägen 53

## O

Oberflächenbeschichtung, korundhaltige 183  
 Oberflächendefekte 110  
 Oberflächenkennwerte 106  
 Oberflächenqualität 106  
 Oberflächenqualitätsmessung 112  
 Oberflächenscanner 113  
 Oberfläche, spezifische 182  
 Oberfräsen 63  
 Oberfräsmaschinen 67, 69  
 Optimierungsprozess 152  
 Oriented Strand Board (OSB) 21  
 Ovaldrehen 74

## P

Papageizahn 54  
 Partikel 145  
 Partikeldurchmesser, aerodynamische 145  
 Partikelgröße 145  
 Passigdrehen 74  
 Passivkraft 116, 117, 123, 174, 175  
 Piezo-elektrischer Sensor 123  
 Planbandschleifen 82  
 Planfräsen 63  
 Planhobeln 64, 87  
 Planhubschleifen 86  
 Planschleifen 79  
 Planschleifmaschine 84  
 Planschleifverfahren 79, 82  
 Plasmaschärfverfahren 24  
 Plastifizierung 158  
 Plattenaufteilsägemaschinen 52  
 Porigkeit 107  
 Profilbandschleifen 82  
 Profilbandschleifmaschine 84  
 Profilbohren 71  
 Profilfräsen 63, 69  
 Profilfräser 63  
 Profilfräswerkzeug 70  
 Profilhubschleifen 86  
 Profilschleifen 77, 79  
 Profilschleifmaschinen 80  
 Profilschleifverfahren 79, 82  
 Profilschwingschleifen 86  
 Profilverlauf 69  
 Prozessausgangsgrößen 101  
 Prozessebene 153  
 Prozesseffizienz 151  
 Prozesseinstellgrößen 100  
 Purwasserstrahlschneiden 92  
 PVD-Verfahren 23

## Q

Qualität 105, 158  
 Qualitätsbeschreibung 19  
 Qualitätsklassen 105  
 Qualitätsmerkmale 106  
 Quantität 103, 156  
 Querabastungen 137  
 Querdrehen 74  
 Querschleifverfahren 82  
 Querschnitt 31, 41, 52, 75

## R

Rabenschnabelzahn 54  
 Rasterelektronenmikroskopie 113  
 Rauheit 106  
 Rauheit, kinematische 107  
 Rauheit, mittlere 113  
 Rauschen 143  
 Reifendrehen 74  
 Reifholz 16  
 Reinigen 78, 96  
 Reinwasserstrahlschneiden 92  
 Relativbewegungen 37  
 Richtkonzentration, maximale 148  
 Riefentiefe, reduzierte 113  
 Rippenbänder 82  
 Rissbildungen 111  
 Rohdichte 156, 158, 171, 184, 197, 203  
 Rohdichteprofil 20, 184  
 Röhren 76  
 Rotationsclipper 91  
 Rotoles-Prinzip 66  
 Rückschlagsicherungen 139  
 Rückstellbewegung 38  
 Rückstellgeschwindigkeit 39  
 Rückstellrichtung 39  
 Rückstellweg 39  
 Rundbohren 71  
 Rundlauf 50

## S

Sacklochbohrung 71  
 Sägebänder 57  
 Sägeblätter 60  
 Sägeblattquerschnitte 55  
 Sägeblattvorspannung 55  
 Sägen 52  
 Sägespuren 110  
 Sandgehalt 185  
 Schaftfräser 63  
 Schaftwerkzeuge 49, 73  
 Schalldruck 140  
 Schalldruckpegel 140  
 Schalldruckpegel, A-bewerteter 140  
 Schalldruckpegelmesser 144  
 Schallintensitätspegel 141  
 Schallleistungspegel 142  
 Schallleistungspegelzuwachs, A-bewerteter 143

- Schallquellenumgebung 142  
Schallschnelle 141  
Scharten 184  
Schartenfläche **114**  
Scherschneiden 90  
Schlangenbohrer 73  
Schleifautomaten 84  
Schleifbandabstützung 82  
Schleifbänder **78, 82**  
Schleifbesätze 79  
Schleifen 77  
Schleifen mit rotierendem Werkzeug 79  
Schleifkörner 32  
Schleifmittel 22, **26**  
Schleifqualität 79  
Schleifscheiben 78  
Schleifschuhe 86  
Schleifspuren **110**  
Schleifstaub 33  
Schleifwerkzeuge **78**  
Schlichtstähle 76  
Schmalflächenbearbeitung 65  
Schmerzschwelle 140  
Schneckenbohrer 73  
Schneide **34**  
Schneidenecke 110  
Schneidenformen 131  
Schneidenkontur 137  
Schneidenlage 18  
Schneidenversatz **133**  
Schneidenwinkel 157  
Schneidenzahl **34, 157**  
Schneidenzahl, effektive **104**  
Schneide, spiralförmige 65  
Schneidfähigkeit **131**  
Schneidhaltigkeit **131**  
Schneidkantengüte 24  
Schneidkantenzurücksetzung 132  
Schneidkeil **34**  
Schneidstoff 22, 25, 159, 172, 185, 197, 204  
Schneidstoffverlust 130  
Schneidstoffverlustvolumen **136, 194**  
Schneidteil **34**  
Schnittarbeit **127, 128**  
Schnittbewegung **38**  
Schnittbreite **44**  
Schnittenergie **127, 128**  
Schnittfläche **42**  
Schnittgeschwindigkeit **39, 157, 163, 175, 189, 199, 205**  
Schnittkraft **116, 118**  
Schnittkraftkonstante **120**  
Schnittkraftminimum 175  
Schnittkraft, mittlere **118**  
Schnittkraftmodell nach Fischer 181  
Schnittkraftmodell nach Sitkei 181  
Schnittkraftparameter 118  
Schnittkraft, spezifische **119**  
Schnittkraft, totale mittlere **118**  
Schnittkraftverlauf 118  
Schnittleistung **115, 124**  
Schnittleistungsmodelle 182  
Schnitt-Normalkraft **116, 121**  
Schnittqualität 56  
Schnittrichtung 18, 29, **39, 157, 165, 176, 190, 200, 206**  
Schnitttrichtungsmodell 41  
Schnitttiefe **44**  
Schnittvorschub **42**  
Schnittweg **39, 157, 178, 191, 200, 206**  
Schnittwinkel **37**  
Schnüre 78  
Schränken 55  
Schutzgas 97  
Schutzgüte **138, 196**  
Schwingmuster **110**  
Schwingrahmengatter 62  
Schwingschleifen 78, **86**  
Schwingschleifmaschinen 86  
Schwingtexturen **110**  
Segmentmesserwellen 198  
Seitenbandschleifen 82  
Seitenplanbandschleifen 82  
Seitenschleifen 79, 84  
Seitenschleifverfahren 82  
Senkköpfe 73  
Siliziumcarbid 26, 27, 78  
Sinterprozess 24  
Sol-Gel-Korund 26  
Spalten 90  
Spaltkeile 139  
Spaltmaschinen 90  
Spaltprojektionen 114  
Spanbildung **28, 29, 32**  
Spanbrecher **51, 89, 161**  
Spandickenbegrenzung 65, 139  
Späne 38  
Spanen gegen die Faser **30, 165, 177**  
Spanen mit der Faser **30, 165, 177**  
Spanfläche **34**  
Spanformen **29**  
Spangemisch 31  
Spanloses Trennen 90  
Spannzangenfutter 49  
Spanplatte **20**  
Spanschläge 107  
Spanstreifenholz (LSL) **21**  
Spanungsbreite **46**  
Spanungsdicke **46, 112, 157, 164, 176, 190, 200, 206**  
Spanungsdicke, mittlere **47, 112**  
Spanungsprozess 99  
Spanungsquerschnitt **46**  
Spanwinkel **37, 160, 173, 186, 198, 204**  
Spätholz **16**  
Sperrholz **20**  
Spezialfräsen 63  
Spitzenhöhe, reduzierte **113**  
Spitzenschalldruck **144**  
Spitzenschalldruckpegel **144**  
Spitzwinkelzahn 54  
Spitzzahn 54  
Splintholz **16**  
Stähle **22**  
Standbedingungen **131**  
Standgrößen **131**  
Standkriterien **131**  
Standschnittweg **135**  
Standvermögen **131**  
Standvorschubweg **135**  
Standzeit **135**

Standzeitende **134**  
 Stanzmaschinen **90**  
 Stationärrmaschinen **48**  
 Staub **145**  
 Staubanteil, prozentualer **146, 147**  
 Staubemission **145, 203**  
 Staubemissionsrate **146**  
 Staubentstehung **146**  
 Staubimmission **149**  
 Staubkonzentration **146**  
 Staubmessung **149**  
 Staubschutz **148**  
 Stauchen **55**  
 Steilkegel SK **49**  
 Stellit **22, 23, 25**  
 Stirnfräsen **66**  
 Stirnplanfräsen **66**  
 Stirnplanschleifen **79**  
 Stoßen **87**  
 Strahlablenkungen **93**  
 Strahldurchmesser **93**  
 Strahlfalle **96**  
 Strahlgeschwindigkeit **93**  
 Streudichte, geschlossene **78**  
 Streudichte, offene **78**  
 Struktureigenschaften **169**  
 Strukturrauheit **107**  
 Strukturzahl, holzartenabhängige **169**  
 Stufenbohren **71**  
 Stufenbohrer **73**  
 Synchronsteuerung **61**

## T

Tageslärmexpositionspegel **144**  
 Talquotient **109**  
 Taschen **66**  
 Tastschnittverfahren **113, 114, 137**  
 Teilausbruch **113**  
 Teilchengrößenverteilungen **145**  
 Tellerschleifen **79**  
 Tellerschleifmaschinen **80**  
 Temperatur **156, 185, 197**  
 Temperaturschwingungen **192**  
 Thermoschrumpffutter **50**  
 Tischfräsen **63**  
 Tischfräsmaschinen **67, 69**  
 Tischkreissägemaschinen **52**  
 Tischlerplatten **21**  
 Tracheen **17**  
 Tracheiden **16**  
 Trapez Zahn **54**  
 Trennbandsäge **57**  
 Trennen **13**  
 Trennprozess **28**  
 Trennvorgang **91**  
 Triboelektrischer Effekt **149**  
 Trumsäge **59**

## U

Überbeanspruchung, mechanische **130**  
 Überbeanspruchung, thermische **130**  
 Überhang **60, 62**  
 Überschärfe **134**  
 Überschneidmarkierungen **107**  
 Überstand **44**  
 Überstandswinkel **44**  
 Übertragungselemente **49**  
 Umfangsbandschleifen **82**  
 Umfangsfräsen **63**  
 Umfangsplanbandschleifen **83**  
 Umfangsplanfräsen **63**  
 Umfangsschleifen **84**  
 Umfangsschleifverfahren **82**  
 Umlenkbewegung **58**  
 Umlenkrollen **82**  
 Umsatzarten **150**  
 Universalbohrmaschinen **71**  
 Unterfräsen **63**  
 Untergruppen des Trennens **13**

## V

Verbundwerkstoffe **20**  
 Verbundwerkzeuge **50**  
 Verdichtung oberflächennaher Zellstrukturen **111**  
 Verdichtungstiefe **112**  
 Verfahrenstypen **52**  
 Verkernung **16**  
 Verrundungsverschleiß **132**  
 Verschleiß **20, 183**  
 Verschleiß **130**  
 Verschleißbegriffe **131**  
 Verschleißentstehung **192**  
 Verschleißfaser **132**  
 Verschleißfortschritt **134, 192, 194**  
 Verschleiß, inhomogener **184**  
 Verschleißmarkenbreite **133**  
 Verschleißmaß **133**  
 Verschleißmechanismen **130**  
 Verschleißmessung **136**  
 Verschleißmodell nach Fischer **193, 194**  
 Verschleiß, stochastischer **131**  
 Verschleißverlauf **134**  
 Verschleißvolumen, schnittflächenspezifische **136, 195**  
 Verschleißzustand **121**  
 Vertikalbohrmaschinen **71**  
 Verzunderung **130**  
 Vibrations-Arbeitschutzverordnung **144**  
 Vibrationsschleifmaschinen **86**  
 Vollausruch **113**  
 Volleingriff **168**  
 Vollholz **15**  
 Voreilzeit **61**  
 Vorgänge, elektrochemische **185**  
 Vorritzsägen **166**  
 Vorschneider **73**  
 Vorschub **42**  
 Vorschubantriebe **122**  
 Vorschubarbeit **122, 128**  
 Vorschubbewegung **38**



Vorschub, diskontinuierlicher 61  
 Vorschubeingriff 44  
 Vorschubenergie 122, 128  
 Vorschubgeschwindigkeit 39, 104  
 Vorschubgrößen 42  
 Vorschub, kontinuierlicher 62  
 Vorschubkraft 116, 122  
 Vorschubkraftkonstante 122  
 Vorschubkraft, mittlere 122  
 Vorschubkraft, mittlere totale 122  
 Vorschubkraft, spezifische 122  
 Vorschubleistung 115, 124, 125  
 Vorschubmodus 40  
 Vorschub-Normalkraft 116, 123  
 Vorschubrichtung 31, 39, 190  
 Vorschubrichtungswinkel 40, 117  
 Vorschubweg 39  
 Vorspaltung 28, 160

## W

Waschbrettschnitt 110  
 Wasserstrahlspanen 92  
 Wechseldruck 140  
 Wechselwirkungsprinzip 115  
 Wechselzahn 54  
 Wellenlänge 140  
 Welligkeit 106, 110  
 Wendeplatten 73  
 Werkstoffstruktur 159  
 Werkstofftemperatur 172  
 Werkstückmaterial 158, 171, 183, 197, 203  
 Werkstückrückschläge 139  
 Werkzeugachse 51  
 Werkzeugaggregate 49  
 Werkzeugberührungen 139  
 Werkzeug-Bezugsebene 36  
 Werkzeug-Bezugssystem 35  
 Werkzeugbohrung 51  
 Werkzeugbruch 139  
 Werkzeugdurchmesser 35, 101, 156, 157  
 Werkzeug, einteiliges 50  
 Werkzeuge mit Aufnahmebohrung 49  
 Werkzeuge mit zentrischer Durchgangsbohrung 49  
 Werkzeuge, zusammengesetzte 50  
 Werkzeuggestalt 197  
 Werkzeugkühlmittel 22  
 Werkzeug-Orthogonalebene 36  
 Werkzeugschaft 51  
 Werkzeug-Schneidenebene 36  
 Werkzeug-Schneidennormalebene 36, 133  
 Werkzeugverschleiß 183

Werkzeugwechselzyklen 130  
 Winkel am Schneidteil 37  
 Wirkarbeit 127  
 Wirkbewegung 38  
 Wirk-Bezugssystem 35  
 Wirkenergie 127  
 Wirkgeschwindigkeit 39  
 Wirkkraft 116  
 Wirkleistung 124  
 Wirk-Normalkraft 116  
 Wirkpaarungen 15, 100, 185  
 Wirkpaarungsausgangsgrößen 102  
 Wirkpaarungsebene 153  
 Wirkpaarungseingangsgrößen 100  
 Wirkrichtung 39  
 Wirkrichtungswinkel 40  
 Wirkvorschub 42  
 Wirkweg 39  
 Wirkwegdiagramme 61  
 Wolframkarbid-Kobald-Hartmetalle 23  
 Wolfszahn 54

## Z

Zahnformen 53, 59, 61  
 Zahnteilung 43  
 Zahnvorschub 42  
 Zeitspannungsvolumen 104, 199, 200  
 Zellstruktur 15  
 Zentrierspitze 73  
 Zentrumbohrer 73  
 Zerspanbarkeit 131  
 Zerspanerwerkzeuge 63, 64  
 Zerspankraft 115, 116  
 Zerspanung 13  
 Zerspanungslärm 143  
 Zerspanwerkzeug 50  
 Zerteilen 90  
 Zerteilmaschinen 90  
 Ziehender Schnitt 65, 70, 73, 76, 89, 90, 123, 162, 173, 198, 205  
 Ziehklingenmaschinen 88  
 Zielgrößen, technologische 150  
 Zirkonkorund 26  
 Zustellbewegung 38  
 Zustellgeschwindigkeit 39  
 Zustellrichtung 39  
 Zustellweg 39  
 Zwischenschleifvorgänge 112  
 Zykloide, verlängerte 53  
 Zylinderkopfböhrer 73  
 Zylinderschleifen 78