

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 Holzspannungsprozessen 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 Holzspannungsmaschinen 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 Zerspannungsmaschine, 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 Holzzerlegung ist und bleibt jedoch die Kenntnis der allgemeinen Zerlegungslehre 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 Zerlegung 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 Zerlegung 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 | 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 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 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. m³ Rohholz weltweit stofflich verwertet (FAO, 2019).

Holz ist ein nachwachsender Rohstoff, der eine positive Ökobilanz, nicht zuletzt durch die Möglichkeit CO₂ 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 CO₂, 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. m³ Spanplatten und mehr als 12 Mio. m³ mitteldichte Faserplatten (MDF) produziert und verarbeitet. Im Vergleich dazu können mehr als 110 Mio. m³ 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)

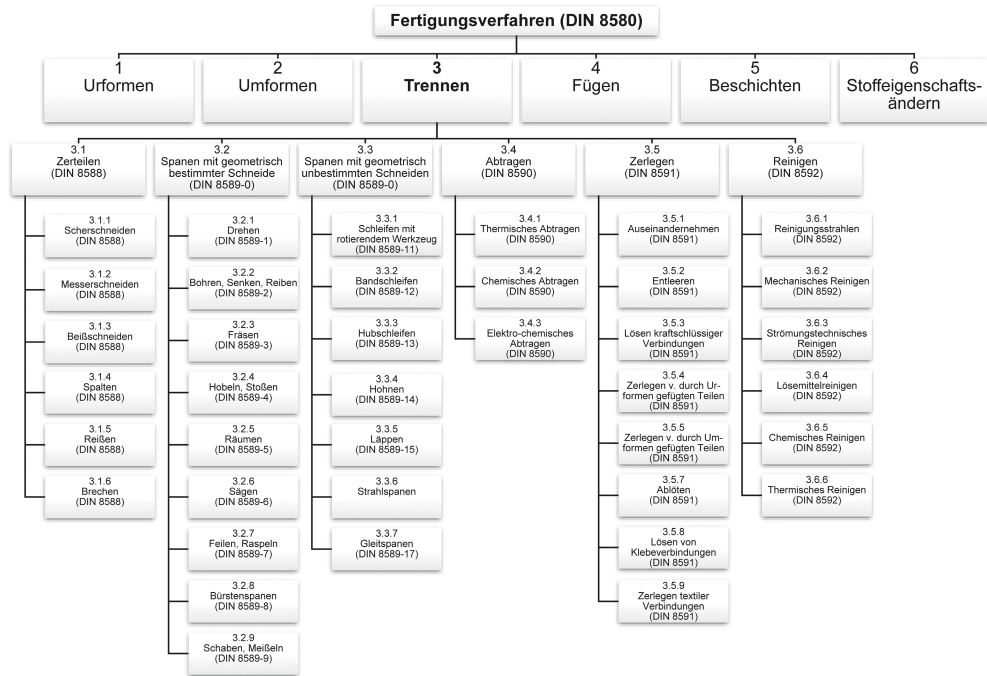


Bild 2.1 Einordnung der Trennverfahren der Holzbe- und -verarbeitung in die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (2022)

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)

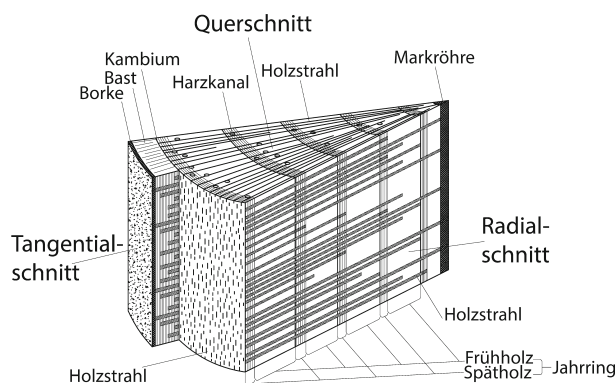


Bild 3.1 Makroskopischer Aufbau des Nadelholzes (nach Straßburger) (Roland, 1988)

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.

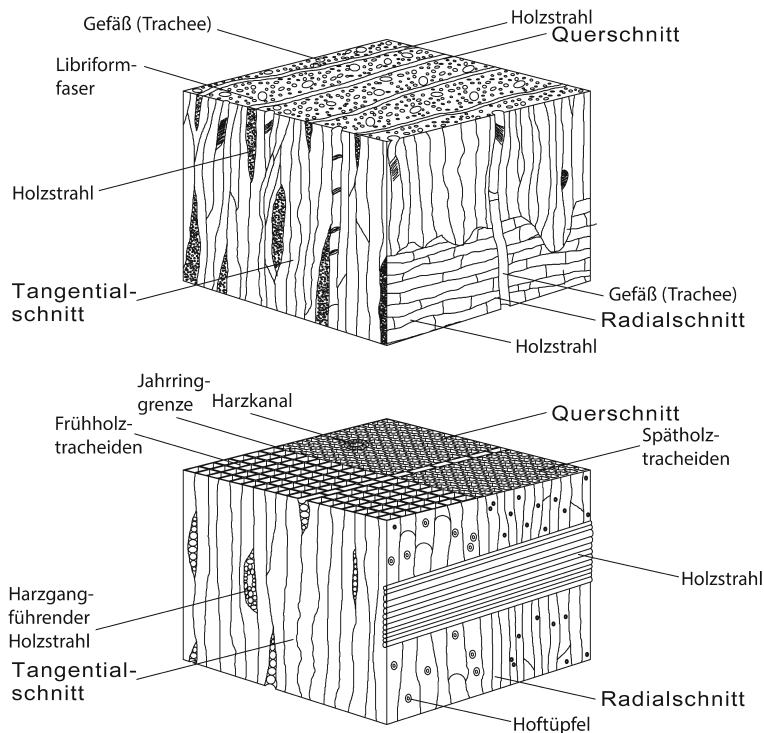


Bild 3.2 Mikroskopische Ansicht des Holzes (Wagenführ & Scholz, 2012) – oben Laubholz, unten Nadelholz

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.

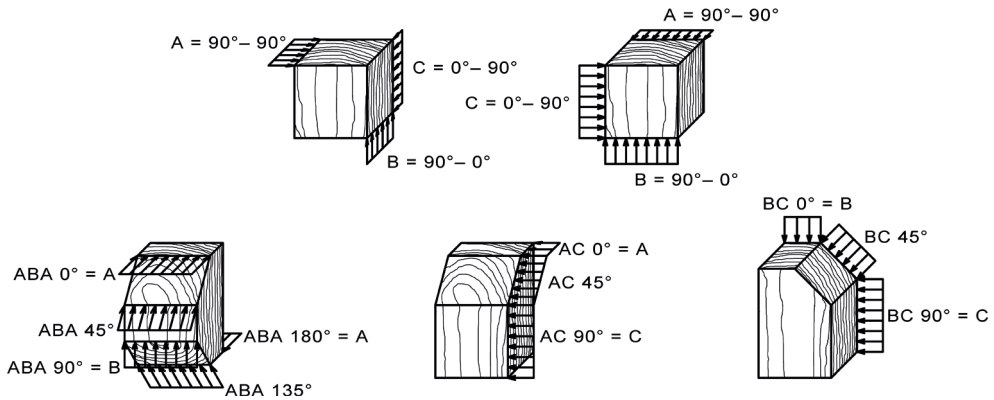


Bild 3.3 Hauptschnittrichtungen A, B, C nach Kivimaa (1950) bzw. $90^\circ-90^\circ$, $90^\circ-0^\circ$, $0^\circ-90^\circ$ nach McKenzie (1961)

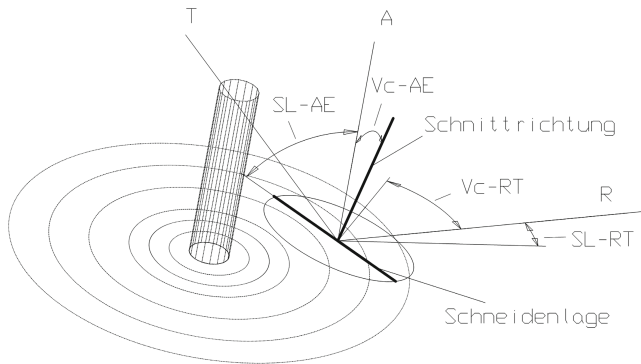


Bild 3.4 Definition der Schnittrichtung und der Schneidenlage im Zylinderkoordinatensystem zur Holzbeschreibung (Rehm, 2002)

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 Oberflächenprofilsschrieb 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).

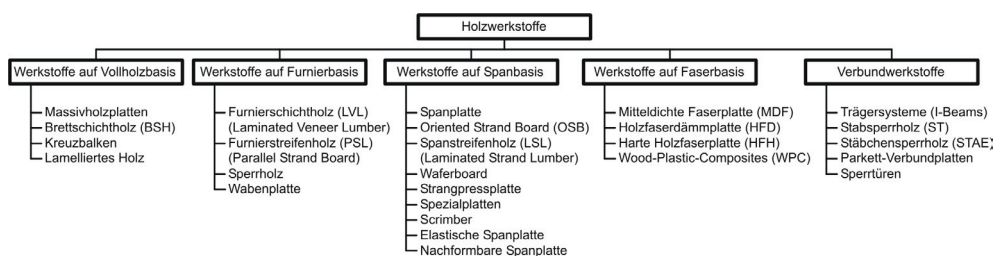


Bild 3.5 Übersicht über die Holzwerkstoffe nach Niemz (Anonymus, 2009)

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
CO₂-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
 Grundlärmpiegel **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**
 Kantенbearbeitungsmaschinen 67, 69
 Kantенfasrigkeit **114**
 Kantенqualität 73, **113**, 166
 Kantенqualität, ausbruchbezogene **114**
 Kantенqualitätsmessung **114**
 Kantenschartigkeit **113**
 Kantенverrundung 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**
 Kraftschruppfutter 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
 Messerschritt 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
 Querab tastungen 137
 Querdrehen 74
 Querholzdrehen 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
 Scharfen 184
 Scharfenfläche **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**
 Schnitarbeit **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