

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Spanende Formung“

von Werner Degner, Hans Lutze, Erhard Smejkal et al.

Print-ISBN: 978-3-446-45032-5  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46063-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45032-5>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Das vorliegende Buch der „Spanenden Formung“, welches in über 50 Jahren unter der Herausgeberschaft von Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Degner, Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Lutze und Dr.-Ing. Erhard Smejkal als ein wichtiges Standardwerk der deutschsprachigen fertigungstechnischen Fachliteratur bekannt geworden ist, erscheint nun in der 18. Auflage mit zusätzlichen Herausgebern und Autoren.

Die Herausgeber der vorangegangenen Auflagen waren angesichts der bisher verbreiteten Exemplare nach ihren eigenen Worten der Auffassung, dass „die gewählte Dreiteilung des Kompendiums in Theorie – Berechnung – Richtwerte bei den Lesern sehr gut angenommen wurde und sich ausgezeichnet bewährt hat. Die kurzgefasste Theorie legt dabei keinen Wert auf eine neue Zerspanungslehre, sie soll die wichtigsten theoretischen Zusammenhänge des Spanens, aufgebaut auf dem neuesten Stand der durch die nationalen und internationalen Normen (DIN, EN und ISO) sowie VDI-Richtlinien belegten Grundlagen und Begriffe, darstellen. Gleichzeitig bildet sie die Basis für den zweiten Teil, die Berechnungsgrundlagen für die wichtigsten spanenden Verfahren. Hier steht neben der Hauptzeitberechnung generell die Schnittkraft- und Leistungsberechnung im Mittelpunkt. Für alle behandelten Verfahren erfolgt die Schnittkraftberechnung nach der bewährten KIENZLESCHEN Grundgleichung.“

Auch diese Auflage hat vor allem textlich eine gründliche Überarbeitung erfahren. Die Reihenfolge der behandelten Fertigungsverfahren des Berechnungsteils und in den Schnittwerttabellen wurde jedoch entsprechend der in der modernen Lehre heute üblicherweise verbreiteten DIN 8589 umgestellt und aktualisiert. Zusätzlich ist das Thema Simulation aufgegriffen und sowohl in der Theorie, als auch in der Berechnung von Dr.-Ing. Rocco Eisseler als Autor behandelt worden. Auch wurde der Abschnitt über die Schneidstoffe im Kapitel Theorie von Dr.-Ing. Immo Garrn mit Blick auf die industrielle Praxis komplett neu verfasst und auf einen zeitgemäßen Stand gebracht.

Das Buch „Spanende Formung“ stellt somit – auch in Zeiten, in denen längst eine Reihe von Berechnungsprogrammen am Markt verfügbar sind – ein für die fertigungstechnische Fachwelt wertvolles Lehr-, Arbeits- und Nachschlagewerk dar, das zum Grundverständnis der zerspanungstechnischen Zusammenhänge anschaulich beitragen und mit den sonst nicht in dieser kompakten Form verfügbaren Richtwerttabellen praxisbezogene Anhaltspunkte geben will.

Die Herausgeber und Autoren danken insbesondere dem Carl Hanser Verlag, dass er auch diese Auflage des Buches in hervorragender Qualität herausgebracht hat. Besonders in den Dank

einschließen möchten wir unsere Lektorin, Frau Natalia Silakova, und die Lektoratsassistentin, Frau Christina Kubiak, die uns bestens unterstützt haben.

Chemnitz und Stuttgart, April 2019

*Uwe Heisel  
Hans Lutze  
Erhard Smejkal  
Johannes Rothmund*

# Geleitwort zur 18. Auflage

Die Basis für den Erfolg in der Fertigung tätiger Personen ist mehr denn je eine fundierte Ausbildung mit einem Mix aus theoretischen und praktischen Anteilen. Nur so können sie den tagtäglichen Anforderungen der technischen Praxis gerecht werden und zugleich technische Weiterentwicklungen bewerten oder selbst Neuentwicklungen anstoßen. Die Nutzung der heute verfügbaren digitalen Technologien bis hin zu auf künstlicher Intelligenz beruhender Prozessoptimierung werden dies nur in sehr beschränktem Umfang leisten können. Daher bleibt die systematische Vermittlung von auf Mechanismen aufbauendem fertigungstechnischem Grundwissen von essenzieller Bedeutung für den Erfolg der Wirtschaft.

Dieses Buch vermittelt dieses Wissen in vorbildlicher Weise, indem es neben der systematischen, an den relevanten Normen orientierten Vermittlung von Grundwissen auch die praktische Anwendung einbezieht. Damit können sich Studierende die Verfahren und Wirkzusammenhänge basierend auf etablierten Theorien und Modellen erarbeiten und finden Ansätze zur Auslegung von Prozessen. Tabellen mit Richtwerten aus der Praxis erlauben es in der Praxis stehenden Ingenieuren, Technikern und Meistern Lösungen für die Arbeiten in der Arbeitsvorbereitung zu finden und sich fundiert und praxisorientiert in neue Verfahren hineinzufinden. Diese Verbindung von Theorie und Praxis ist auch ein wesentliches Anliegen des Vereins Zukunftsorientierte Zerspanung e. V., den die Stuttgarter und Karlsruher Fertigungstechniker gemeinsam mit interessierten Firmenpartnern seit einigen Jahren mitgestalten.

Ergänzend finden sich in dem Buch Hinweise zur Verknüpfung rein technologischer Ansätze mit solchen aus der Betriebswirtschaft, was eine wichtige Bereicherung darstellt und für alle vorgesehenen Lesergruppen von wachsender Bedeutung ist.

Ich wünsche dem Buch erneut eine weite Verbreitung und den Lesern eine bereichernde Lektüre und eine nutzbringende Bereicherung ihres Wissens.

Karlsruhe, im Februar 2019

Prof. Dr.-Ing. habil. *Volker Schulze*  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie

# Geleitwort zur 18. Auflage

Die Produktionstechnik ist von den Technologien der Metallzerspanung stark geprägt. Zerspanungsprozesse sind zumeist maßgeblich für die Produktivität der Bauteilherstellung sowie für die Qualität und Integrität der erzeugten Komponenten. Sie sind daher auch ausschlaggebend für die Gestaltung und Auslegung der Maschinen- und Anlagentechnik für die industrielle Produktion. Die Kenntnis der Zerspanprozesse, deren wissenschaftliche Grundlagen und praktische Umsetzung sind daher von zentraler Bedeutung für eine wirtschaftliche Fertigung, die modernen Bedarfen gerecht wird. Gestiegene Anforderungen an die Genauigkeit, Oberflächengüte und Randzonenintegrität sowie die stete Forderung nach höherer Produktionsleistung, Prozesssicherheit und Kosteneffizienz charakterisieren diese Bedarfssituation. Gleichzeitig tritt außerdem die Notwendigkeit einer deutlich erhöhten Material-, Energie- und Ressourceneinsparung verstärkt in den Fokus der Betrachtungen. Den technologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Herausforderungen kann zukünftig nur mit einer fundierten Fachkompetenz erfolgreich begegnet werden.

Die „Spanende Formung“ nimmt als Lehr- und Nachschlagewerk seit vielen Jahrzehnten eine führende Stellung für Ausbildung, Studium und Praxis ein. Dieses Buch behandelt sowohl die theoretischen Grundlagen des Zerspanungsprozesses, der Schneidstoffe und der Berechnung von Kräften und Leistungen, als auch die Simulationsmodelle, die heute verstärkt in die Anwendung rücken. Beispiele für die konkrete Berechnung der wesentlichen Zerspanungsprozesse runden den theoretischen Teil ab. Einen besonderen Wert stellt die Sammlung von Richtwerten dar, die für die Praktiker eine wesentliche Hilfestellung bei der Bestimmung von Prozessparametern sind.

Diesem Buch kann man daher nur wünschen, dass es so viel Anerkennung und Beachtung findet, wie in der Vergangenheit und auch darüber hinaus.

Stuttgart, Mai 2019

Prof. Dr.-Ing. *Hans-Christian Möhring*  
Institut für Werkzeugmaschinen  
Universität Stuttgart

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b> .....	15
<b>1 Theorie der spanenden Formung</b> .....	17
<b>1.1 Begriffe der spanenden Formung</b> .....	17
1.1.0 Grundlagen .....	17
1.1.1 Kinematik und Geometrie des Spanungsvorgangs .....	19
1.1.1.1 Bewegungen zwischen Werkzeugschneide und Werkstück .....	20
1.1.1.2 Richtungen der Bewegungen (Bewegungsrichtungen) .....	21
1.1.1.3 Wege des Werkzeuges gegenüber dem Werkstück .....	22
1.1.1.4 Geschwindigkeiten .....	22
1.1.1.5 Komponenten der Bewegungen, Richtungen, Wege und Geschwindigkeiten .....	23
1.1.1.6 Hilfsbegriffe .....	23
1.1.1.7 Flächen am Werkstück .....	25
1.1.1.8 Vorschubgrößen .....	25
1.1.1.9 Eingriffsgrößen .....	26
1.1.1.10 Spanungsgrößen .....	28
1.1.2 Geometrie am Schneidteil spanender Werkzeuge .....	31
1.1.2.1 Allgemeine Begriffe .....	32
1.1.2.2 Flächen, Schneiden, Ecken und Rundungen .....	33
1.1.2.3 Werkzeug-Bezugssystem und Werkzeugwinkel .....	34
1.1.2.4 Wirk-Bezugssystem und Wirkwinkel .....	37
1.1.3 Kräfte, Energie, Arbeit und Leistungen .....	39
1.1.3.1 Kräfte beim Spanen .....	39
1.1.3.2 Energie und Arbeit beim Spanen .....	42
1.1.3.3 Leistungen beim Spanen .....	43
1.1.4 Standbegriffe und Werkzeugverschleiß .....	44
1.1.4.1 Standbegriffe .....	44
1.1.4.2 Werkzeugverschleiß .....	46
<b>1.2 Vorgänge bei der Spanbildung</b> .....	48
1.2.1 Mechanik der Spanbildung .....	48
1.2.1.1 Ansätze zur Modellierung der Spanbildung .....	48
1.2.1.2 Geschwindigkeitsverhältnisse .....	54
1.2.1.3 Kräfteverhältnisse .....	55
1.2.2 Spanarten und Spanformen .....	57
1.2.2.1 Spanarten .....	57

1.2.2.2	Spanformen	60
1.2.3	Auswirkungen des Spanbildungsprozesses	63
<b>1.3</b>	<b>Schneidstoffe und ihre Anwendung</b>	<b>63</b>
1.3.0	Allgemeine Betrachtungen	63
1.3.1	Werkzeugstähle, unlegiert und legiert	68
1.3.2	Schnellarbeitsstähle	69
1.3.3	Gegossene Hartlegierungen	72
1.3.4	Sinterhartmetalle	72
1.3.5	Schneidkeramik	75
1.3.5.1	Eigenschaften	75
1.3.5.2	Anwendung und Einsatz	76
1.3.6	Superharte Schneidstoffe (Diamant, Bornitrid)	77
1.3.7	Oberflächenbehandelte Schneidstoffe	80
1.3.8	Schneidstoffauswahl in der Werkzeugauslegung	82
1.3.9	Schleifmittel	83
<b>1.4</b>	<b>Temperatur, Verschleiß und Standzeit</b>	<b>85</b>
1.4.1	Spannungstemperatur	85
1.4.2	Verschleißursachen	87
1.4.3	Verschleißarten	89
1.4.4	Auswirkungen des Verschleißes	90
1.4.5	Verschleißkriterien	90
1.4.6	Standzeit	91
1.4.6.1	Definition des Standzeitbegriffs	91
1.4.6.2	Standzeitdiagramm und Einflussgrößen auf die Standzeit	91
1.4.6.3	Standzeitgleichung	95
<b>1.5</b>	<b>Schnittkraft und Leistung</b>	<b>97</b>
1.5.1	Zerspankraft und ihre Komponenten	97
1.5.2	Schnittkraft und spezifische Schnittkraft	97
1.5.3	Einflussgrößen auf Schnittkraft und spezifische Schnittkraft	98
1.5.4	Berechnung der Schnittkraft	103
1.5.5	Vorschub- und Passivkraft	107
1.5.5.1	Einflussgrößen	107
1.5.5.2	Berechnung der Vorschub- und Passivkraft	107
1.5.5.3	Berechnung der Schnittkraft im Gebiet der spanenden Feinbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide	109
1.5.6	Leistung	112
1.5.7	Zeitspannungsvolumen und spezifisches Spannungsvolumen	113
1.5.8	Maschinenauslastung	114
1.5.9	Energieaufwand	116
1.5.10	Schnittwertoptimierung	120
<b>1.6</b>	<b>Simulation von Zerspanungsvorgängen</b>	<b>121</b>
1.6.1	Einführung	121
1.6.2	Finite-Elemente-Methode (FEM)	122

---

1.6.3	Molekulardynamische Modellierung	124
1.6.4	Materialmodelle	125
1.6.5	Reibungsmodelle	127
1.6.6	Schädigungsmodelle	128
<b>1.7</b>	<b>Oberflächenqualität</b>	<b>129</b>
1.7.1	Oberflächengestalt	129
1.7.2	Oberflächenbeschaffenheit	134
1.7.3	Oberflächenverhalten	137
<b>1.8</b>	<b>Spanbarkeit und Spanbarkeitsprüfung von Stahlwerkstoffen</b>	<b>138</b>
<b>1.9</b>	<b>Kühlschmierstoffe</b>	<b>143</b>
1.9.1	Eigenschaften und Anwendung	143
1.9.2	Auswirkungen der Kühlschmierstoffe auf Standzeit, Oberflächenqualität und Schnittkräfte	146
1.9.3	Auswahl von Kühlschmierstoffen	147
1.9.4	Trockenbearbeitung	148
1.9.5	Vor- und Nachteile der Nass- und Trockenbearbeitung sowie der Minimalmengenschmierung	150
1.9.6	Darstellung der Möglichkeiten der Trockenbearbeitung	154
<b>1.10</b>	<b>Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC – High-speed-cutting)</b>	<b>158</b>
1.10.1	Grundsätzliches zur HSC	158
1.10.2	Praktische Realisierung der HSC	159
<b>2</b>	<b>Berechnung</b>	<b>167</b>
<b>2.1</b>	<b>Drehen</b>	<b>167</b>
2.1.1	Schnittkraft- und Leistungsberechnung	167
2.1.1.1	Technisch-mathematische Zusammenhänge	167
2.1.1.2	Zusammenstellung der Gleichungen	168
2.1.2	Berechnung der Hauptzeit	169
2.1.2.1	Langdrehen	169
2.1.2.2	Gewindedrehen	170
2.1.2.3	Kegeldrehen	171
2.1.2.4	Plandrehen	173
2.1.2.5	Planringdrehen	175
2.1.2.6	Nachformdrehen	176
2.1.2.7	Drehen auf Automaten	179
2.1.3	Berechnungsbeispiel	180
<b>2.2</b>	<b>Bohren, Senken, Reiben</b>	<b>182</b>
2.2.1	Schnittkraft- und Leistungsberechnung	182
2.2.1.1	Technisch-mathematische Zusammenhänge	182
2.2.1.2	Zusammenstellung der Gleichungen	188
2.2.2	Berechnung der Hauptzeit	190
2.2.2.1	Bohren und Aufbohren mit Spiralbohrer	190



2.2.2.2	Senken und Reiben	192
2.2.3	Berechnungsbeispiel	192
<b>2.3</b>	<b>Fräsen</b>	<b>193</b>
2.3.1	Schnittkraft- und Leistungsberechnung	193
2.3.1.1	Technisch-mathematische Zusammenhänge	193
2.3.1.2	Zusammenstellung der Gleichungen	200
2.3.2	Berechnung der Hauptzeit	203
2.3.2.1	Umfangsfraesen	203
2.3.2.2	Stirnfraesen	204
2.3.2.3	Nutenfraesen auf Nutenfraesmaschinen	206
2.3.2.4	Gewindefraesen	207
2.3.3	Berechnungsbeispiele	209
2.3.3.1	Stirnfraesen	209
2.3.3.2	Umfangsfraesen	212
<b>2.4</b>	<b>Hobeln und Stoessen</b>	<b>214</b>
2.4.1	Schnittkraft- und Leistungsberechnung	214
2.4.1.1	Technisch-mathematische Zusammenhänge	214
2.4.1.2	Zusammenstellung der Gleichungen	214
2.4.2	Berechnung der Hauptzeit	215
2.4.3	Berechnungsbeispiel	216
<b>2.5</b>	<b>Räumen</b>	<b>218</b>
2.5.1	Schnittkraft- und Leistungsberechnung	218
2.5.2	Berechnung der Teilung des Räumwerkzeugs	219
2.5.2.1	Berücksichtigung der Aufnahmefähigkeit des Spanraums	219
2.5.2.2	Berücksichtigung der Zug- oder Druckkraft der Maschine	220
2.5.2.3	Berücksichtigung der Festigkeit des Räumwerkzeugs	220
2.5.2.4	Weitere Größen der Zahnung am Räumwerkzeug	221
2.5.3	Zusammenstellung der Gleichungen	223
2.5.4	Berechnung der Hauptzeit	224
2.5.5	Berechnungsbeispiel	224
<b>2.6</b>	<b>Sägen</b>	<b>228</b>
2.6.1	Schnittkraft- und Leistungsberechnung	228
2.6.1.1	Technisch-mathematische Zusammenhänge	228
2.6.1.2	Zusammenstellung der Gleichungen	230
2.6.2	Berechnung der Hauptzeit	231
2.6.3	Berechnungsbeispiel	231
<b>2.7</b>	<b>Schleifen</b>	<b>232</b>
2.7.1	Schnittkraft- und Leistungsberechnung beim Schleifen	233
2.7.2	Berechnung der Hauptzeit	235
2.7.2.1	Rundschleifen	235
2.7.2.2	Flachschleifen	238
2.7.3	Berechnungsbeispiel	240

<b>2.8</b>	<b>Zahnradbearbeitung</b> .....	241
2.8.1	Schnittkraft- und Leistungsberechnung .....	241
2.8.1.1	Wälzfräsen (gerad- und schrägverzahnte Stirnräder) .....	242
2.8.1.2	Wälzstoßen (geradverzahnte Stirnräder) .....	244
2.8.1.3	Zahnflankenschleifen (geradverzahnte Stirnräder) .....	244
2.8.1.4	Berechnungsbeispiele .....	245
2.8.2	Berechnung der Hauptzeit – Verfahrensüberblick .....	246
2.8.2.1	Stirnradbearbeitung .....	247
2.8.2.2	Bearbeitung von Schneckenrieben .....	260
2.8.2.3	Kegelradbearbeitung .....	267
2.8.2.4	Berechnungsbeispiele .....	274
2.8.3	Anmerkungen zu den Verzahnungsverfahren .....	279
<b>2.9</b>	<b>Weitere Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide – Verfahrens- überblick</b> .....	280
2.9.1	Honen .....	281
2.9.1.1	Verfahrenseinführung .....	281
2.9.1.2	Genauigkeit beim Honen .....	282
2.9.1.3	Werkstück und Fertigungsergebnis .....	282
2.9.1.4	Werkzeug und Fertigungsergebnis .....	283
2.9.1.5	Werkzeugmaschine und Fertigungsergebnis .....	285
2.9.1.6	Wirtschaftlichkeit und Entwicklungstendenzen .....	287
2.9.2	Superfinish .....	287
2.9.2.1	Verfahrenseinführung .....	287
2.9.2.2	Genauigkeit beim Superfinish .....	288
2.9.2.3	Werkstück und Fertigungsergebnis .....	289
2.9.2.4	Werkzeug und Fertigungsergebnis .....	290
2.9.2.5	Werkzeugmaschine und Fertigungsergebnis .....	291
2.9.2.6	Wirtschaftlichkeit .....	293
2.9.3	Läppen .....	294
2.9.3.1	Verfahrenseinführung .....	294
2.9.3.2	Genauigkeit beim Läppen .....	298
2.9.3.3	Verfahren und Werkzeugmaschinen .....	299
2.9.3.4	Entwicklungstendenzen .....	305
<b>3</b>	<b>Richtwerte</b> .....	306
3.1	Spezifische Schnittkräfte, Korrektur- und Verfahrensfaktoren (Tabellen 3.1 und 3.2) .....	306
3.2	Drehen (Tabellen 3.3 bis 3.19) .....	310
3.3	Hobeln und Stoßen (Tabellen 3.20 und 3.21) .....	327
3.4	Fräsen (Tabellen 3.22 bis 3.45) .....	328
3.5	Bohren, Senken, Reiben (Tabellen 3.46 bis 3.63) .....	344
3.6	Sägen (Tabellen 3.64 und 3.65) .....	354

---

<b>3.7</b>	<b>Räumen (Tabellen 3.66 bis 3.68)</b> .....	355
<b>3.8</b>	<b>Schleifen (Tabellen 3.69 bis 3.76)</b> .....	356
<b>3.9</b>	<b>Zahnradbearbeitung (Tabellen 3.77 bis 3.87)</b> .....	361
<b>3.10</b>	<b>Bearbeitung von Sonderwerkstoffen</b> .....	366
3.10.1	Spanende Bearbeitung von Kunststoffen (Tabellen 3.88 bis 3.96) .....	366
3.10.2	Spanende Bearbeitung von hoch legierten Stählen (Tabellen 3.97 bis 3.109) .....	375
3.10.3	Spanen von Titan und Titanlegierungen (Tabellen 3.110 bis 3.112) .....	381
3.10.4	Spanen von partikelverstärktem Aluminium .....	384
<b>3.11</b>	<b>Werkstoffe</b> .....	385
3.11.1	Werkstoffgruppen (Tabellen 3.113 und 3.114) .....	385
3.11.2	Gegenüberstellung von alter (DIN) und neuer (Euro-Norm) Werkstoffbezeichnung .....	388
<b>3.12</b>	<b>Schneidstoffe</b> .....	392
3.12.1	Schnellarbeitsstahl (Tabellen 3.116 bis 3.118) .....	392
3.12.2	Hartmetall (Tabellen 3.119 und 3.121) .....	394
<b>Literaturverzeichnis</b> .....		396
Weiterführende Literatur .....		408
Normen und Richtlinien .....		410
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....		423

# 1 Theorie der spanenden Formung

## 1.1 Begriffe der spanenden Formung

### 1.1.0 Grundlagen

Grundanliegen dieses ersten Abschnittes ist es, Klarheit in den Begriffen der spanenden Formung zu schaffen.

KIENZLE mit seinen grundlegenden Arbeiten [3] und [4] gebührt das besondere Verdienst, dass er zunächst ein Ordnungssystem der Fertigungsverfahren geschaffen hat, aus der DIN 8580 im Wesentlichen entstand. Aus den sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren (Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten, Stoffeigenschaftsändern) wurde die dritte Hauptgruppe Trennen weiter unterteilt in die Gruppen Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmten und unbestimmten Schneiden sowie Abtragen (Bild 1.1).

Ein weiterentwickeltes Ordnungssystem, ebenfalls in der umfangreichen DIN 8589 festgelegt, unterteilt dann weiter in die einzelnen Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide (Drehen, Bohren/Senken/Reiben, Fräsen, Hobeln/Stoßen, Räumen, Sägen, Feilen/Raspeln, Bürstspanen, Schaben/Meißeln) und mit geometrisch unbestimmter Schneide (Schleifen, Bandschleifen, Hubschleifen, Honen, Läppen, Strahlspanen, Gleitspanen). Generell versteht man nach DIN 8589 unter Spanen einen Trennvorgang, bei dem ein Werkstück mithilfe der Schneiden eines Werkzeugs (mit geometrisch bestimmten oder geometrisch unbestimmten Schneiden) Werkstoffschichten in Form von Spänen zu einer Änderung der Werkstückform (meist vorgefertigt durch Ur- oder Umformen) und/oder der Werkstückoberfläche mechanisch abgetrennt werden.

Aufgrund der sehr weiten Verbreitung und Anwendung des Spanens und damit insgesamt der spanenden Verfahren bestand für Forschung, Praxis und Lehre aber auch die Notwendigkeit einer korrekten und konkreten Definition der Begriffe, speziell für die Kinematik und Geometrie des Spanungsvorgangs, die Geometrie des Schneidkeiles und weiterer physikalischer und technologischer Spannungsbegriffe.

Ältere Arbeiten beschränken sich dabei meist auf Definitionen und die Nomenklatur der Winkel, primär beim einschneidigen Werkzeug. Es wurden aber auch Versuche gemacht, diese Begriffsbestimmungen auf alle spanenden Verfahren zu übertragen [5]. Die Begriffe sind heute im Wesentlichen in den DIN 8580, 8581, 8582, 8583 und 8584 festgelegt. Der Vorteil dieser DIN ist, dass sie im hohen Maße auch auf die internationale Norm ISO 3002/1 bis 3002/5 abgestimmt sind.

Auf diese DIN wird nachfolgend näher eingegangen, da sie die Grundlagen für alle spanenden Verfahren bilden.

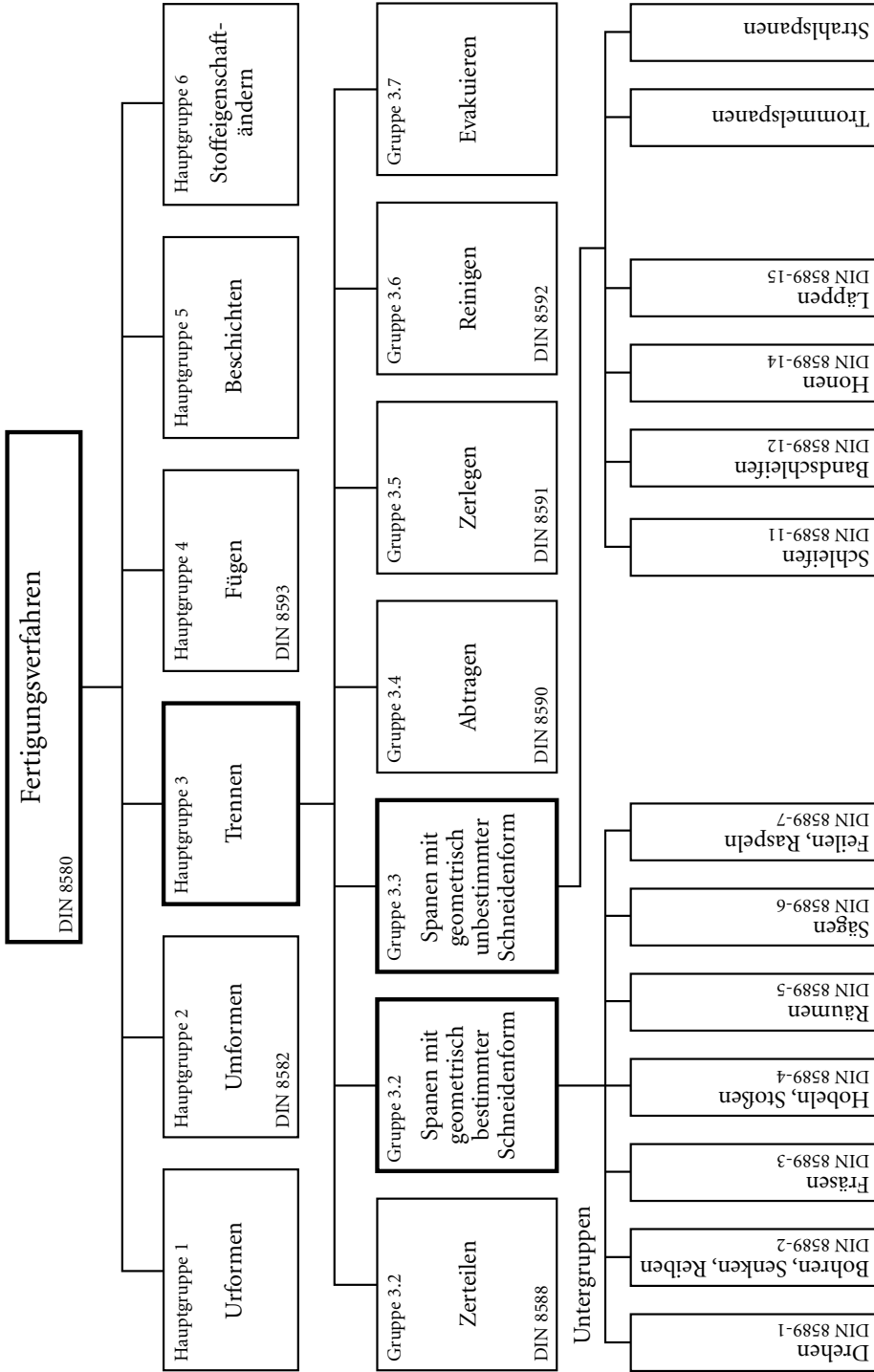


Bild 1.1 Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und Zuordnung spanender Verfahren

Die Begriffe des Spanens müssen folgenden Forderungen Rechnung tragen:

1. Sie müssen auf sämtliche spanende Bearbeitungsverfahren anwendbar und übertragbar sein.
2. Sie müssen in einem logischen geometrischen Zusammenhang stehen.
3. Eingeführte und bestehende Begriffe sollten soweit wie möglich berücksichtigt werden.

Die gleichzeitige Gültigkeit der Begriffe für alle spanenden Verfahren schafft die Möglichkeit, die für die Praxis notwendigen Begriffe auf ein Minimum zu beschränken.

Die Systematik und die Begriffe beruhen darauf, dass von dem allgemeinen Fall des Spannungsvorgangs, bei dem die Vorschubrichtung nicht senkrecht zur Schnittrichtung steht, ausgegangen wurde. Das häufig als Lehrbeispiel dargestellte Drehen stellt dann nur einen Sonderfall dar. Die Betrachtungen dieses allgemeinen Falls führen zur Einführung des entscheidenden Begriffs des Vorschubrichtungswinkels  $\varphi$ . Erst durch ihn ergibt sich der geometrische Zusammenhang zwischen den verschiedenen spanenden Verfahren.

Weiterhin werden die Wirkbewegungen als Resultierende aus Schnittbewegung und Vorschubbewegung in die Betrachtung einbezogen und hieraus die Wirkbegriffe abgeleitet. Wenn auch der Unterschied zwischen Wirkrichtung und Schnittrichtung meist vernachlässigbar klein ist, werden doch durch den Wirkrichtungswinkel  $\eta$ , der den Unterschied zwischen Wirkrichtung und Schnittrichtung angibt, wesentliche geometrische Zusammenhänge deutlich. Da diese Kinematik des Spannungsvorgangs die wesentliche Grundlage für die neue Betrachtungsweise bildet, ergibt sich als entscheidende Bezugsebene für die Spanungsgeometrie diejenige Ebene, die alle Bewegungen enthält. Sie wird Arbeitsebene genannt. Mit den Begriffen Vorschubrichtungswinkel, Wirkrichtungswinkel und Arbeitsebene lassen sich die Grundbegriffe allgemein gültig für alle spanenden Verfahren aufbauen.

### 1.1.1 Kinematik und Geometrie des Spannungsvorgangs

Die für jeden spanenden Vorgang wichtigen Bewegungen sowie die Geometrie des Spannungsvorgangs sind in DIN 6580 festgelegt. Sie stimmen inhaltlich mit ISO 3002-1 und 3002-3 überein.

Die folgenden Teilabschnitte 1.1.1.1 bis 1.1.1.5 behandeln die Spanungs kinematik als Grundlage der Festlegungen. Die hieraus abgeleiteten notwendigen Hilfsbegriffe sind in 1.1.1.6 erläutert. Teilabschnitt 1.1.1.7 definiert die Flächen am Werkstück, während in 1.1.1.8 bis 1.1.1.10 die Vorschubgrößen, Eingriffsgrößen und Spanungsgrößen definiert und erläutert sind.

Besonders die Begriffs festlegung der Schnitttiefe bzw. Schnittbreite  $a_p$  im Teilabschnitt 1.1.1.9 ist zu beachten, um Verwechslungen mit dem Arbeitseingriff  $a_e$ , zu vermeiden. Die Größe  $a_p$  ist immer diejenige, die, mit dem Vorschub  $f$  multipliziert, den Spanungsquerschnitt  $A$  ergibt. Da der Vorschub in der Arbeitsebene bzw. parallel dazu gemessen wird, muss die Größe  $a_p$  senkrecht dazu gemessen werden. Sie erscheint als Schnitttiefe oder als Schnittbreite und führt deshalb wahlweise die eine oder andere Benennung, aber immer das gleiche Zeichen  $a_p$ . Beim Fräsen und Schleifen ist zusätzlich der Arbeitseingriff  $a_e$ , von Interesse. Er steht senkrecht zur Größe  $a_p$  und zur Vorschubrichtung und ist nicht zu verwechseln mit der Schnitttiefe  $a_p$ .

Die im Abschnitt 1.1.1.10 erläuterten Spanungsgrößen sind nicht identisch mit den Abmessungen der abgehobenen Späne (siehe Unterabschnitt 1.2.1.1). In den Begriffen der spanenden Formung werden die „Einstellgrößen“, d. h. die Größen, die für den Arbeitsgang unmittelbar an der Maschine einzustellen sind, nicht besonders behandelt.

Selbstverständlich können je nach Kinematik der Werkzeugmaschine z. B. auch Geschwindigkeiten, Vorschubgrößen oder Eingriffsgrößen „Einstellgrößen“ sein.

Die definierten Begriffe beziehen sich immer auf den jeweils betrachteten Schneidenpunkt.

### 1.1.1.1 Bewegungen zwischen Werkzeugschneide und Werkstück

Die Bewegungen bei einem Spanungsvorgang sind Relativbewegungen zwischen Werkzeugschneide und Werkstück. Sie werden auf das ruhend gedachte Werkstück bezogen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen solchen Bewegungen, die unmittelbar das Entstehen von Spänen bewirken (Wirkbewegung, Schnittbewegung und Vorschubbewegung), und solchen, die nicht unmittelbar am Entstehen von Spänen beteiligt sind (Zustellbewegung, Nachstellbewegung, Ausstellbewegung und Rückstellbewegung).

Die Bewegungen können gerade, kreisförmig oder beliebig sein. Es sind Bewegungen an der Wirkstelle, die durch die Werkzeugmaschine erzeugt werden.

Unmittelbar entstehen Späne durch die Wirkbewegung, die sich meist aus einer Schnittbewegung und einer Vorschubbewegung zusammensetzt, nach einer vorangegangenen Zustellbewegung.

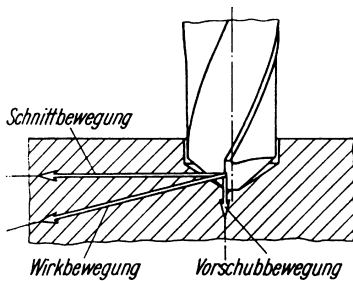


Bild 1.2 Schnitt-, Vorschub- und Wirkbewegung beim Bohren (nach DIN 6580)

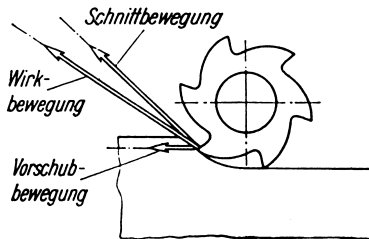


Bild 1.3 Schnitt-, Vorschub- und Wirkbewegung beim Fräsen (nach DIN 6580)

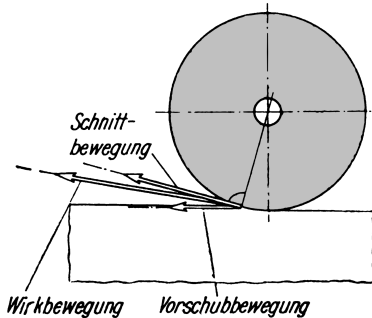


Bild 1.4 Schnitt-, Vorschub- und Wirkbewegung beim Schleifen (nach DIN 6580)

## Wirkbewegung

Die Wirkbewegung ist die Bewegung zwischen Werkzeugschneide und Werkstück, die den Zerspanvorgang bewirkt. Sie ist in der Regel eine aus Schnitt- und Vorschubbewegung resultierende Bewegung. Erfolgt keine gleichzeitige Vorschubbewegung, so ist die Wirkbewegung identisch mit der Schnittbewegung (Bilder 1.1 bis 1.3).

## Schnittbewegung

Die Schnittbewegung ist diejenige Bewegung zwischen Werkzeugschneide und Werkstück, die ohne Vorschubbewegung nur eine einmalige Spanabnahme während einer Umdrehung oder eines Hubs bewirken würde. Die Schnittbewegung kann sich aus mehreren Komponenten zusammensetzen.

## Vorschubbewegung

Die Vorschubbewegung ist diejenige Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, die zusammen mit der Schnittbewegung eine mehrmalige oder stetige Spanabnahme während mehrerer Umdrehungen oder Hübe ermöglicht. Sie kann schrittweise oder stetig vor sich gehen. Die Vorschubbewegung kann sich aus mehreren Komponenten zusammensetzen (Bild 1.5).

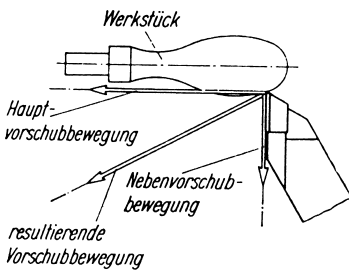


Bild 1.5 Beispiel für eine zusammengesetzte Vorschubbewegung (nach DIN 6580)

Die nicht unmittelbar an der Spanentstehung beteiligten Bewegungen sind trotzdem bedeutungsvoll, weil sie zur Bearbeitung des Werkstücks zwingend notwendig sind. Die Zustellbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück bestimmt im Voraus die Dicke der jeweils abzuhebenden Schicht (Schnitttiefe  $a_p$ ).

*Anmerkungen:* Bei einigen Fertigungsverfahren – z. B. Einstechdrehen, Bohren, Räumen – gibt es verfahrensbedingt keine Zustellbewegung. Ferner ist auch die Nachstellbewegung als Korrekturbewegung bedeutsam, z. B. um den Werkzeugverschleiß mit Blick auf die geforderte Maßgenauigkeit des Werkstücks auszugleichen.

Die Anstellbewegung ist erforderlich, um das Werkzeug vor dem Spanen an das Werkstück heranzuführen, während die Rückstellbewegung das Werkzeug in die Ausgangslage zurückführt.

### 1.1.1.2 Richtungen der Bewegungen (Bewegungsrichtungen)

Unter den Bewegungsrichtungen versteht man die momentane Richtung der Wirkbewegung (Wirkrichtung), der Schnittbewegung (Schnittrichtung) und der Vorschubbewegung (Vorschubrichtung) im ausgewählten Schneidenpunkt.

Entsprechend kann unterschieden werden zwischen Zustell-, Nachstell-, Anstell- und Rückstellrichtung.



### 1.1.1.3 Wege des Werkzeuges gegenüber dem Werkstück

Den einzelnen Bewegungen lassen sich die entsprechenden Wege zuordnen. So sind im Bild 1.6 am Beispiel des Walzfräsens der Wirkweg  $l_e$ , der Schnittweg  $l_c$  und der Vorschubweg  $l_f$  dargestellt.

Zum Beispiel ist der Vorschubweg  $l_f$  derjenige Weg, den der betrachtete Schneidenpunkt durch die Vorschubbewegung spanend zurücklegt. Der auf die Umdrehung oder den Hub bezogene Vorschubweg wird als „Vorschub“ bezeichnet und bedeutet folglich immer Vorschub pro Umdrehung bzw. pro Hub (siehe Abschnitt 1.1.1.8). Zustellweg  $l_z$ , Nachstellweg  $l_n$ , Anstellweg  $l_a$  und Rückstellweg  $l_r$  sind die jeweils den o. g. Bewegungen zugeordneten Wege.

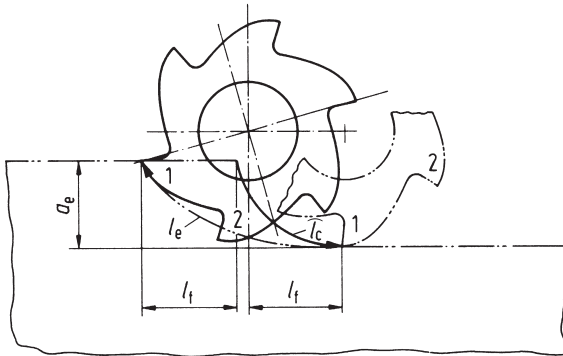


Bild 1.6 Schnittweg  $l_c$ , Vorschubweg  $l_f$  und Wirkweg  $l_e$  beim Gegenlaufräsen (nach DIN 6580)  
Die Zahlen 1 und 2 zeigen die Bewegung der Fräserzähne.

### 1.1.1.4 Geschwindigkeiten

#### Wirkgeschwindigkeit $v_e$

Die Wirkgeschwindigkeit  $v_e$  ist die momentane Geschwindigkeit der Wirkbewegung im betrachteten (ausgewählten) Schneidenpunkt (Bilder 1.2 bis 1.4 und 1.7 bis 1.9).

$$v_e = \frac{v_c \sin \varphi}{\sin(\varphi - \eta)} = \frac{v_f + v_c \cos \varphi}{\cos(\varphi - \eta)} \quad (1.1)$$

In vielen Fällen ist das Verhältnis  $v_f/v_c$  so klein, dass die Näherung gilt

$$v_e \approx v_c \quad (1.2)$$

#### Schnittgeschwindigkeit $v_c$

Die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  ist die momentane Geschwindigkeit der Schnittbewegung im betrachteten Schneidenpunkt (Bilder 1.2 bis 1.4 und 1.7 bis 1.9). Sie ist z. B. bedeutungsvoll für das Standvermögen und die Standzeitberechnung der Werkzeuge sowie für die Leistungsberechnung der Werkzeugmaschine.

### Vorschubgeschwindigkeit $v_f$

Die Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  ist die momentane Geschwindigkeit der Vorschubbewegung im betrachteten Schneidenpunkt (Bilder 1.2 bis 1.4 und 1.7 bis 1.9). Sie ist besonders für das Fräsen von Bedeutung und dient zur Leistungsberechnung von Vorschubantrieben.

Zustellgeschwindigkeit  $v_z$ , Nachstellgeschwindigkeit  $v_n$ , Anstellgeschwindigkeit  $v_a$  und Rückstellgeschwindigkeit  $v_r$  sind jeweils die momentanen Geschwindigkeiten im betrachteten Schneidenpunkt.

#### 1.1.1.5 Komponenten der Bewegungen, Richtungen, Wege und Geschwindigkeiten

Die in den vorstehenden Abschnitten definierten Bewegungen Richtungen (1.1.1.2), Wege (1.1.1.3) und Geschwindigkeiten (1.1.1.4) können auch aus verschiedenen Komponenten erzeugt werden.

1. Komponenten, bezogen auf das rotierende Werkzeug bzw. Werkstück
2. Komponenten, bezogen auf lineare Bewegungen von Werkzeug bzw. Werkstück
3. Komponenten, bezogen auf die Werkzeugmaschine.

Anmerkung: Weitere Begriffe siehe DIN 66 217.

#### 1.1.1.6 Hilfsbegriffe

Die einheitliche Betrachtung der verschiedenen Spanungsverfahren erfordert die Einführung einiger Hilfsbegriffe:

#### Vorschubrichtungswinkel $\varphi$

Der Vorschubrichtungswinkel  $\varphi$  ist der Winkel zwischen Vorschubrichtung und Schnittrichtung (Bilder 1.7 bis 1.11).

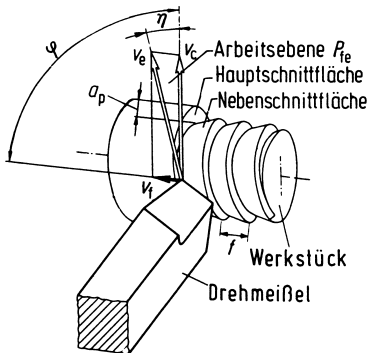


Bild 1.7 Arbeitsebene  $P_{fe}$ , Vorschubrichtungswinkel  $\varphi$  und Wirkrichtungswinkel  $\eta$  beim Drehen (nach DIN 6580)

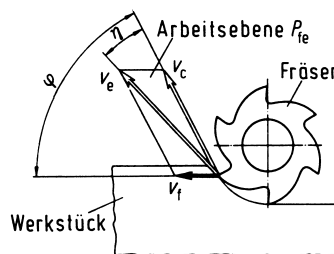


Bild 1.8 Arbeitsebene  $P_{fe}$ , Vorschubrichtungswinkel  $\varphi$  und Wirkrichtungswinkel  $\eta$  beim Gegenlaufräsen mit Walzenfräser ( $\varphi < 90^\circ$ ) (nach DIN 6580)

Bei manchen Spanungsvorgängen, z. B. beim Fräsen, ändert sich  $\varphi$  laufend während des Schneidens (Bilder 1.8 bis 1.9). Dagegen ist bei anderen Spanungsvorgängen  $\varphi$  konstant =  $90^\circ$

(siehe Bild 1.7), was bei diesen Vorgängen eine vereinfachte Berechnung des Wirkrichtungswinkels  $\eta$  nach sich zieht (siehe Gl. 1.4).

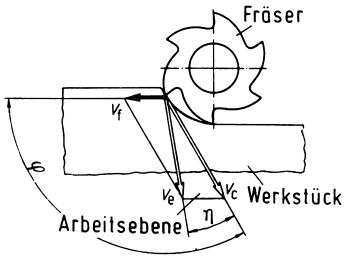


Bild 1.9 Arbeitsebene  $P_{fe}$ , Vorschubrichtungswinkel  $\varphi$  und Wirkrichtungswinkel  $\eta$  beim Gleichlaufräsen mit Walzenfräser ( $\varphi > 90^\circ$ ) (nach DIN 6580)

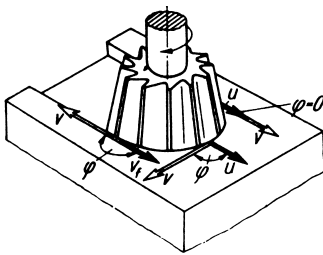


Bild 1.10 Vorschubrichtungswinkel  $\varphi$  beim Fräsen mit Stirnfräser (nach DIN 6580)

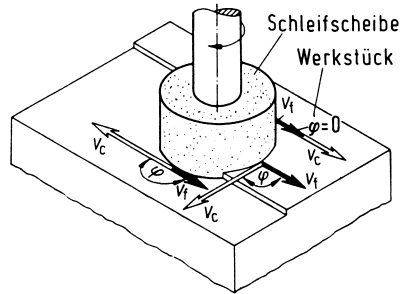


Bild 1.11 Vorschubrichtungswinkel  $\varphi$  beim Schleifen mit Stirnfräser (nach DIN 6580)

### Wirkrichtungswinkel

Der Wirkrichtungswinkel  $\eta$  ist der Winkel zwischen Wirkrichtung und Schnitttrichtung (Bilder 1.7 bis 1.9):

$$\tan \eta = \frac{\sin \varphi}{\frac{v_c}{v_f} + \cos \varphi} \quad (1.3)$$

Bei

$$\varphi = 90^\circ \quad \text{ist} \quad \tan \eta = \frac{v_f}{v_c} \quad (1.4)$$

### Arbeitsebene $P_{fe}$

Die Arbeitsebene  $P_{fe}$  ist eine gedachte Ebene, die die Schnitttrichtung und die Vorschubrichtung (in dem jeweils betrachteten Schneidpunkt) enthält. In ihr vollziehen sich die Bewegungen, die an der Spanentstehung beteiligt sind (Bilder 1.7 bis 1.9).

*Anmerkung:* Es gibt immer nur eine Arbeitsebene, auch dann, wenn die Vorschubbewegung aus mehreren Komponenten erzeugt wird, weil es momentan immer nur eine Vorschubrichtung gibt.

### 1.1.1.7 Flächen am Werkstück

Man unterscheidet die Ausgangsfläche, die Schnittfläche und die gefertigte Fläche. Während man unter der Ausgangsfläche die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks vor dem Spanen versteht (Bild 1.12), ist die Schnittfläche die am Werkstück von der Werkzeugschneide erzeugte Fläche (Bild 1.12).

Ein Teil dieser Schnittfläche wird bei der nächsten Umdrehung bzw. beim nächsten Hub wieder abgespannt. Die am Werkstück verbleibenden Teile bilden die gefertigte Fläche, d. h. im Endeffekt diejenige Fläche am Werkstück, die durch den Spanungsvorgang erzeugt wurde (Bild 1.12).

*Anmerkung:* Entsprechend der Unterscheidung von Haupt- und Nebenschneide kann zwischen Haupt- und Nebenschnittflächen unterschieden werden, siehe auch Bild 1.12 und DIN 6580.

### 1.1.1.8 Vorschubgrößen

#### Vorschub $f$

Der Vorschub  $f$  ist der Vorschub je Umdrehung oder je Hub (Bild 1.12) gemessen in der Arbeitsebene.

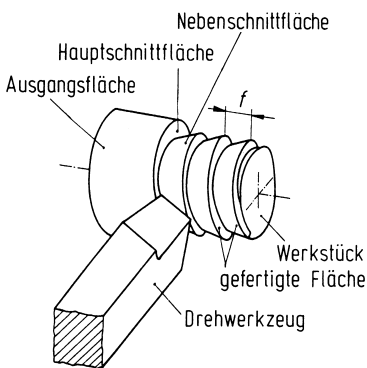


Bild 1.12 Flächen und Vorschub  $f$  beim Drehen (nach DIN 6580)

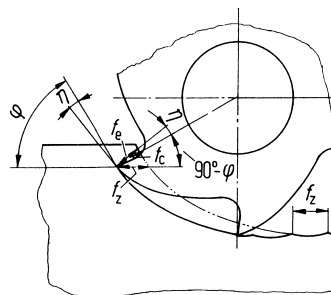


Bild 1.13 Zahnvorschub  $f_z$ , Schnittvorschub  $f_c$  und Wirkvorschub  $f_e$  beim Gegenlaufräsen (nach DIN 6580)

#### Zahnvorschub $f_z$

Der Zahnvorschub  $f_z$  ist der Vorschubweg zwischen zwei unmittelbar nacheinander entstehenden Schnittflächen, also der Vorschub je Zahn oder je Schneide (Bild 1.13), gemessen in der Arbeitsebene. Es ist

$$f_z = \frac{f}{z} \quad z \text{ Anzahl der Schneidenträger (Zähne).} \quad (1.5)$$

Ist  $z = 1$ , z. B. beim Fräsen mit einem Einzahnfräser oder beim Drehen, so wird damit

$$f_z = f \quad (1.6)$$

Beim Räumen entspricht dem Zahnvorschub die Zahnstaffelung. Vom Zahnvorschub  $f_z$  abgeleitet sind der Schnittvorschub  $f_c$  und der Wirkvorschub  $f_e$ .

### Schnittvorschub $f_c$

Der Schnittvorschub  $f_c$  ist der Abstand zweier unmittelbar nacheinander entstehenden Schnittflächen, gemessen in der Arbeitsebene und senkrecht zur Schnittrichtung (Bild 1.13). Es ist

$$f_c \approx f_z \sin \varphi \quad (1.7)$$

Bei Spannungsvorgängen mit  $\varphi = 90^\circ$  (z. B. beim Drehen und Hobeln) ist

$$f_c = f_z \quad (1.8)$$

### Wirkvorschub $f_e$

Der Wirkvorschub  $f_e$  ist der Abstand zweier unmittelbar nacheinander entstehenden Schnittflächen, gemessen in der Arbeitsebene und senkrecht zur Wirkrichtung (Bild 1.13). Es ist

$$f_e \approx f_z \sin(\varphi - \eta) \quad (1.9)$$

In vielen Fällen ist das Verhältnis  $v_f/v_c$  so klein, dass  $\eta$  vernachlässigbar ist. Dann ist mit genügender Genauigkeit

$$f_e \approx f_z \sin \varphi \approx f_c \quad (1.10)$$

## 1.1.1.9 Eingriffsgrößen

Die Eingriffsgrößen beschreiben geometrisch das Ineinandergreifen von Werkzeug und Werkstück, also des Wirkpaares.

### a) Eingriffsgrößen des Werkzeuges, bezogen auf die Arbeitsebene

#### Schnitttiefe bzw. Schnittbreite $a_p$

Die Schnitttiefe bzw. Schnittbreite  $a_p$  ist die Tiefe bzw. Breite des Eingriffs der Hauptschneide, senkrecht zur Arbeitsebene gemessen (Bilder 1.14 bis 1.18).

Beim Langdrehen und Plandrehen, Stirnfräsen und Seitenschleifen entspricht  $a_p$  der Tiefe des Eingriffs (Schnitttiefe).

Beim Einstechen, Räumen, Walzfräsen und Umfangsschleifen entspricht  $a_p$  der Breite des Eingriffs, also der Schnittbreite.

Beim Bohren ins Volle entspricht  $a_p$  dem halben Bohrerdurchmesser.

#### Arbeitseingriff $a_e$

Der Arbeitseingriff  $a_e$  ist die Größe des Eingriffes des Werkzeuges, gemessen in der Arbeitsebene und senkrecht zur Vorschubrichtung.

# Sachwortverzeichnis

## A

Abklingkurven der Verfestigung 136  
abrasiver Verschleiß 87  
Abwälzfräser 248  
adhäsiver Verschleiß 88  
Aktivkraft 39  
Alterungsschutzstoff 144  
Aluminium, partikelverstärktes 384  
analytischer Ansatz 49  
angenommene Arbeitsebene 35  
Anlaufweg 362  
Ansätze zur Modellierung der Spanbildung 48  
–, analytischer Ansatz 49  
–, empirischer Ansatz 48  
–, mechanistischer Ansatz 53  
Anstellbewegung 21  
Anstellgeschwindigkeit 23  
Antriebsleistung 113  
Arbeitsebene 24  
–, angenommene 35  
Arbeitseingriff 26  
– der Schneide 27  
Arbeitshöchstumfangsgeschwindigkeit, Schleifkörper 356  
arbeitscharfe Schneide 106  
arithmetischer Mittenrauhwert 131  
Aufbauschnaide 58  
Aufbauschnaidenbildung 58  
Aufbohren, mit Spiralbohrer 190, 347  
Auflagefläche 32  
Aufnahmefähigkeit des Spanraums 219  
Außenrundlappen 301  
außermittiges Stirnfräsen 205  
Ausgangsfläche 25  
Axialkraft, beim Fräsen 329  
Axialvorschub 361

## B

Bandsäge 354  
Bearbeitungsrandschicht 135  
Bearbeitungsrestspannung 135 f.  
Berechnungsbeispiel 180, 192, 209, 216, 224, 231, 240, 245, 274  
Bewegungen zwischen Werkzeugschneide und Werkstück 20

Bewegungsrichtung 21  
Bewertungsgrößen für das Standvermögen 45  
Bindung, Art 284  
–, Porosität 284  
Biozid 144  
Bogenschneide 109  
Bohren 182, 369  
– hoch legierter Stähle 379  
– ins Volle 348  
– mit Spiralbohrer 190, 345 f.  
– mit SS-Spiralbohrer 348  
– mit Vollhartmetallbohrsenkern 347  
– von Titan und Titanlegierungen 383  
Bohrerdurchmesser für Gewindekerndurchmesser 347  
Bornitrid 79, 84  
Bornitridkörnungsgröße 359  
Brammertz'sche Spanziffeltheorie 132  
Bröckelspan 57  
Bruchdehnung 58

## C

chemische Dampfphasenabscheidung 80

## D

Dampfphasenabscheidung, chemische 80  
–, physikalische 81  
Diamant 84  
–, monokristalliner 78  
–, polykristalliner 78  
Diamantkörnungsgröße 359  
Diamantschleifkörper 84  
Diffusionsverschleiß 87  
Drallrichtung, beim Fräsen 329  
Drangkraft 55 f., 107  
Drehen 167, 368  
– auf Automaten 179  
– hoch legierter Stähle 378  
– mit Bornitrid 326  
– mit Hartmetall, Richtwerte 316  
– mit Schneidkeramik 325  
– von Titan und Titanlegierungen 383  
Druckeigenspannung 138  
Druckkraft der Maschine 220

**E**

Eckenfase 34  
 Eckenrundung 34  
 Eigenschaften gebräuchlicher Schneidstoffe 65  
 Einflussgröße 139 ff.  
 Eingriffsgröße 26  
 Einlippenbohrer 353  
 Einstechschleifen 237  
 Einstellwinkel, Umrechnungsfaktoren 310  
 Einstellwinkeleinfluss 100  
 Einwälzzähnezahl 363  
 empirischer Ansatz 48  
 Emulgator 144  
 Endenergie 117  
 Energie, kumulierte 119  
 Energieaufwand 116  
 – beim Spanen 116  
 –, kumulierter 119  
 –, spezifischer 116  
 –, spezifischer End- 118  
 –, spezifischer Primär- 118  
 Entschäumer 144  
 Entwicklungstendenzen 287, 305  
 externe technologische Optimierung 116

**F**

Feinbearbeitungsbedingung 110  
 Feinbearbeitungsverfahren, mit geometrisch unbestimmter Schneide 280  
 Feindrehen 132  
 – mit Diamantwerkzeugen 325  
 – mit Hartmetallwerkzeugen 325  
 Fertigungskosten 164  
 Fertigungsverfahren, Ordnungssystem 17  
 Festigkeit 220  
 Fettschmierstoff 144  
 Finite-Elemente-Methode (FEM) 122  
 Flachläppen, einseitiges 299  
 Flachsleifen 238  
 – mit dem Schleifkörperumfang 238  
 – mit der Schleifkörperstirnfläche 239  
 Fließspan 59  
 Formabweichung 129  
 Formfräser 247, 266, 332  
 Fräsdornbelastung, zulässige 341  
 Fräsen 193, 332, 370  
 –, Axialkraft 329  
 –, Drallrichtung 329  
 –, hoch legierter Stähle 380  
 – mit Formfräser 247, 266  
 – mit hartmetallbestückten Fräsköpfen, gelötete Ausführung 337

– mit Schneidkeramik 325  
 –, Schneidrichtung 329  
 – von Titan und Titanlegierungen 383  
 Fräser, aus Schnellarbeitsstahl 329 f.  
 – aus Schnellarbeitsstahl (SS) und Hartmetall-schneiden (HM), Richtwerte 340  
 Fräserdurchmesser 362  
 Fräskopffräsen 337  
 freier Schnitt 48, 55  
 Freifläche 33  
 Freiflächen-Orthogonalebene 35  
 Freiflächenverschleiß 46, 89

**G**

Gebrauchsenergie 117  
 gefertigte Fläche 25  
 Gefügestruktur, veränderte 135  
 Geometrie, am Schneidteil 31  
 – der Oberfläche 129  
 – des Spannungsvorgangs 19  
 geometrisch bestimmte Schneide 109  
 geschichtliche Entwicklung der Schneidstoffe 68  
 Geschwindigkeitsverhältnis 356  
 Geschwindigkeitsverhältnisse 54  
 Gestaltabweichung 130  
 Gewindebohren, Schnittkraftberechnung 186  
 Gewindebohrer 349  
 Gewindedrehen 170  
 Gewindefräsen 207  
 Gewindegewindeschlagfräsen 208  
 –, Außengewinde mit Hartmetall 342  
 –, Innengewinde mit Hartmetall 343  
 Gewindegewindeschneiden 326  
 – hoch legierter Stähle 380  
 Grundgleichung nach KIENZLE 103

**H**

harter Schneidstoff 394  
 Härtetemperatur 70  
 Hartlegierung, gegossene 72  
 Hartmetall, wolframcarbidfreies 74  
 –, Zusammensetzung und Eigenschaften 74  
 hartmetallbestückte Reibahle 350 f.  
 Hartmetall-drehmeißel, Temperaturverteilung 86  
 Hartmetall-Wendepplattenbohrer 348  
 Hartmetallwerkzeug 359  
 Hartschaben 258  
 Hartschalen 258  
 Hartstoffanteil 67, 101  
 Hauptschneide 34

Hauptzeit, Berechnung 169, 190, 203, 215, 224, 231, 235  
–, Berechnung, Verfahrenüberblick 246  
High-speed-cutting (HSC) 158  
Hobeln 214  
– hoch legierter Stähle 379  
– mit Hartmetall 327  
– mit Schnellarbeitsstahl 327  
Hochgeschwindigkeitsbearbeitung 158  
– beim Fräsen 160  
Hochleistungs-Sägeblatt 354  
hohe Schnittgeschwindigkeit, Spanbildungsprozess 161  
Honen 281  
–, Genauigkeit 282  
–, Verfahrenseinführung 281  
HSC 158  
–, praktische Realisierung 159

## I

Innendrehen, Korrekturwerte 314  
Innenfeindrehen 112  
Innenlappen 301

## K

Kammrisbildung 89  
Kantenversetzung an der Spanfläche 46  
Kegeldrehen 171  
Kegelradbearbeitung 267  
Kegelradfertigung 278  
– mittels Messerköpfen 273  
Kinematik des Spannungsvorgangs 19  
Koeffizienten der Standzeitbeziehung für Fräskopffräsen 337  
Kolkbreite 47  
Kolkklippenbreite 47  
Kolktiefe 47  
Kolkverhältnis 47  
Kolkverschleiß 47, 89  
Komponenten der Zerspankraft 40  
Korrekturfaktor 105  
– für den Spanwinkel (kurz spanende Werkstoffe) 306  
– für den Spanwinkel (lang spanende Werkstoffe) 306  
– für die Schnittgeschwindigkeit 306  
Korrosionsschutzzusatz 144  
Kraft beim Spanen 39  
Kräfteverhältnisse 55  
– beim Spanen im freien Schnitt 56  
Kühlmitteleinfluss 101

Kühlschmierstoff 143, 358  
–, Auswahl 147  
–, Auswirkungen 146  
– für das Spanen 145  
Kühlschmierstoffmenge, Richtwerte 147  
Kühlschmierung 105  
kumulierte Energie 119  
kumulierter Energieaufwand 119  
Kunststoff, Sägen 372  
–, Schleifen 372  
–, spanende Bearbeitung 367–370  
–, thermoplastischer 373  
Kurzgewindefräsen 207, 342  
Kurzprüfverfahren 139 ff.

## L

Lageabweichung 129  
Lamellenspan 57 f.  
Langdrehen 169  
Langgewindefräsen 207, 342  
Langnachformdrehen 176  
Längsschleifen 235  
Lappen 294  
–, Genauigkeit 298  
– mit formübertragendem Gegenstück 299  
– ohne formübertragendes Gegenstück 303  
–, Verfahren und Werkzeugmaschinen 299  
–, Verfahrenseinführung 294  
Leistung, vom Motor aufgenommene 113  
Leistungsberechnung 182  
– bei der Zahnradbearbeitung 241  
– beim Drehen 167  
– beim Fräsen 193  
– beim Hobeln und Stoßen 214  
– beim Räumen 218  
– beim Reiben 186  
– beim Sägen 228  
– beim Schleifen 233  
Leistungsermittlung, verkürztes grafisch-rechnerisches Verfahren 198

## M

Makroriss 135  
Maschinenauslastung 114  
Maschinenauslastungsdiagramm 114 f.  
Maschinengerade 114  
Materialanteilkurve 131  
Materialausnutzung 117  
Materialeinsparung 117  
Materialmodell 125  
Mechanik der Spanbildung 48



mechanistischer Ansatz 53  
 Mehrspindeldrehautomat 323  
 Messmethode 139 ff.  
 Mikroriss 135  
 Minimalmengenschmierung (MMS) 150  
 Mittenrauhwert, arithmetischer 131  
 mittiges Stirnfräsen 204  
 Modellierung, molekuldynamische 124  
 molekuldynamische Modellierung 124  
 monokristalliner Diamant 78

## N

Nachformdrehen 176  
 Nachformfräsen 341  
 – hoch legierter Stähle 380  
 Nachstellgeschwindigkeit 23  
 Nassbearbeitung 148, 150  
 Nebenschneide 34  
 nominelle mittlere Spannungsdicke 112  
 nominelle Schnitttiefe 111  
 Nutenfräsen 206  
 – auf Nutenfräsmaschinen 206  
 Nutenfräsmaschine 206  
 Nutenschnittfräsen 206  
 Nutentauchfräsen 207

## O

oberflächenbehandelte Schneidstoffe 80  
 Oberfläche, Geometrie 129  
 Oberflächenbeschaffenheit 134 f.  
 Oberflächengestalt 129  
 Oberflächenqualität 129  
 Oberflächenrauheit 129  
 Oberflächenschicht, beim Spanen, schematischer Aufbau 135  
 Oberflächenschnitt 130  
 Oberflächenverfestigung 102  
 Oberflächenverhalten 137  
 Oberflächenwelligkeit 129  
 Optimierung, externe technologische 116  
 –, technologische 97  
 Ordnungssystem der Fertigungsverfahren 17  
 Oxidationsverschleiß 88

## P

Palloid-Spiralkegelräder 271  
 partikelverstärktes Aluminium 384  
 Passivkraft 39, 55, 107, 109  
 –, Berechnung 107  
 –, spezifische, Hauptwert 108  
 physikalische Dampfphasenabscheidung 81

Plan- und Eckfräsköpfe, Richtwerte 338 f.  
 Plandrehen 173  
 –, Korrekturwerte 314  
 Plannachformdrehen 178  
 Planringdrehen 175  
 plastische Verfestigung 135  
 plastische Verformung 135  
 polykristalliner Diamant 78  
 Porosität 284  
 Primärenergie 117  
 Primärenergieaufwand 117  
 Prinzip der Minimalmengenschmierung 150  
 Profilläppen 301

## R

Radialvorschub 260  
 Radius der Schneidkantenrundung 134  
 Rauheit, erreichbare 133  
 Räumen 218  
 – hoch legierter Stähle 379  
 – mit Schnellarbeitsstahl 355  
 –, Schnittgeschwindigkeit 355  
 –, Werkzeugwinkel 355  
 –, Zahnvorschub 355  
 Räumwerkzeug, Berechnung der Teilung 219  
 –, Festigkeit 220  
 –, Zahnung 221  
 Rautiefe, theoretische 132  
 Reiben 182, 192, 371  
 – hoch legierter Stähle 379  
 –, Leistungsberechnung 186  
 –, Schnittkraftberechnung 186  
 Reibungsmodell 127  
 Reibuntermaß 350  
 Reißspan 57  
 Revolverdrehautomat 323  
 Revolverdrehmaschine 319–322  
 Rückstellgeschwindigkeit 23  
 Rundschleifen 235

## S

Sägen 228  
 – von Kunststoffen 372  
 Schädigungsmodell 128  
 Schafffräser 332  
 – aus Vollhartmetall, Richtwerte 339  
 Scheibenfräser 247, 332  
 schematische Einteilung der Schneidstoffe 65  
 Schergeschwindigkeit 54 f.  
 Scherspan 57  
 Scherzone 59

- Schleifen 232  
 – mit Diamant und Bornitrid 357 f.  
 – von Hartmetallwerkzeugen 359  
 – von Kunststoffen 372
- Schleifkörper, Arbeitshöchstumfangsgeschwindigkeit 356  
 –, keramisch gebundener 357
- Schleifmittel 83  
 –, Zusammensetzung und Anwendung 84
- Schleifscheibe, Umfangsgeschwindigkeit 356
- SCHLESINGER-Kriterium 107
- Schlichtbarkeit 139–142
- Schlichtbearbeitung 63
- Schlichten 142
- Schmiermitteleinfluss 101
- Schmierölzusatz 144
- Schneckenbearbeitung 266
- Schneckenradbearbeitung 260
- Schneckentrieb 260  
 –, Fertigung 276
- Schneidbarkeit 142
- Schneiddiamant 78
- Schneide 33  
 –, arbeitsscharfe 106  
 –, geometrisch bestimmte 109
- Schneidenecke 34
- Schneidenkantenrundung 34
- Schneiden-Normalebene 35
- Schneidfähigkeit des Werkzeuges 44
- Schneidhaltigkeit des Werkzeuges 44
- Schneidkantenrundung 132  
 –, Radius 134
- Schneidkantenverschleiß 46, 89
- Schneidkeil 32
- Schneidkeramik 75
- Schneidrichtung, beim Fräsen 329
- Schneidstoff 392  
 –, Anwendung 63  
 –, Eigenschaften gebräuchlicher 65  
 –, geschichtliche Entwicklung 68  
 –, harter 394  
 –, schematische Einteilung 65  
 –, superharter 77  
 –, Zerspanungshauptgruppen und Anwendungsgruppen 394
- Schneidstoffauswahl 82
- Schneidstoffe, oberflächenbehandelte 80
- Schneidstoffeinfluss 101
- Schneidstoffkorrektur 104
- Schneidteil 32  
 –, Geometrie 31
- Schnellarbeitsstahl 69, 323, 392  
 –, Analyse 392  
 –, Anwendungsrichtlinien 393  
 –, Legierungs- und Leistungsgruppen 70  
 –, Wärmebehandlung 392  
 –, Wärmebehandlung und Anwendung 71  
 –, Warmformgebung 392  
 –, Warmhärte 71
- Schnellarbeitsstahlreibahle 350 f.  
 –, Werkzeugwinkel 350
- Schnitt, freier 48, 55
- Schnittarbeit 42
- Schnittbewegung 21
- Schnittbreite 26  
 – der Schneide 27
- Schnittenergie 42
- Schnittfläche 25  
 –, spezifische 354
- Schnittgeschwindigkeit 22, 54, 160, 164  
 – beim Räumen 355  
 – für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung beim Fräsen 160  
 –, hohe, Spanbildungsprozess 161  
 –, Richtwerttabellen 310  
 –, ultrahohe 159
- Schnittgeschwindigkeitseinfluss 100
- Schnittgeschwindigkeitskorrektur 104
- Schnittkraft 41, 55 f., 97 f., 109  
 –, Berechnung 103, 109  
 –, Einflussgrößen 98  
 –, spezifische 98, 104, 112, 306, 367  
 –, spezifische, Einfluss von Vorschub und Schnitttiefe 102  
 –, spezifische, Einflussgrößen 98  
 –, spezifische, Hauptwert 104, 108  
 –, spezifische, Streuung 309
- Schnittkraftberechnung 182  
 – bei der Zahnradbearbeitung 241  
 – beim Drehen 167  
 – beim Fräsen 193  
 – beim Gewindebohren 186  
 – beim Hobeln und Stoßen 214  
 – beim Räumen 218  
 – beim Reiben 186  
 – beim Sägen 228  
 – beim Schleifen 233
- Schnittkraftgleichung 103
- Schnittleistung 43, 113
- Schnittnormalkraft 41
- Schnitttiefe 26, 102  
 – der Schneide 27

- , nominelle 111
- , Umrechnungsfaktoren 314
- Schnitttiefeinfluss 99
- Schnittvolumen 30
- Schnittvorschub 26
- Schnittweg 22
- Schnittwertoptimierung 120
  - , Regeln 120
- Schnittzahl 361
- Schrägschnitt 130
- Schrägahnstirnrad 364
- Schraubwälzfräsen, von Palloid-Spiralkegelrädern 271
- Schraubwälzschleifen 255
- Schrupbarkeit 139–142
- Schruppbearbeitung 63
- Schruppen 142
- Schrupp-Wälzfräsen 362
- Seitenspanwinkel, Spiralbohrer 344
- Senken 182, 192, 371
  - , Ableitung der Gleichungen 185
  - mit Hartmetallwerkzeugen 350
  - mit HSS-Werkzeugen 349
- Senkrechtschnitt 130
- Simulation 121
- Sinterhartmetall 72
- Smoothed Particle Hydrodynamics 124
- Spanart 57
- Spanbarkeit 138, 142
  - des Werkstoffs 44
  - des Werkstücks 44
  - von Stahl 138
- Spanbarkeitsprüfung 138
- Spanbildung, Ansätze zur Modellierung 48
  - , Mechanik 48
  - , Modellvorstellung 52
- Spanbildungsprozess, Auswirkungen 63
- Spanbildungszone 59
- Spanbreitung 50
- Spanndickung 49
- Spanen, von partikelverstärktem Aluminium 384
  - von Titan und Titanlegierungen 381
- spanende Bearbeitung, von hoch legierten Stählen 375
  - von Kunststoffen 367–370
- Spanfläche 33
  - , Kantenversetzung 46
- Spanflächen-Orthogonalebene 35
- Spanflächenverschleiß 89
- Spanform 60 f., 324
- Spanformklasse 61 f.
- Spangeschwindigkeit 54 f.
- Spankürzung 50
- Spanleitstufe 62
- Spanraum, Aufnahmefähigkeit 219
- Spanstauchung 160
- Spanungsbreite 29, 104
- Spanungsdicke 29, 104
  - , nominelle mittlere 112
- Spanungsgröße 28
- Spanungsquerschnitt 28, 104
- Spanungsschicht 30
- Spanungstemperatur 85
- Spanungsverhältnis, Einfluss 99
- Spanungsvolumen 31
  - , spezifisches 113
- Spanungsvorgang, Geometrie 19
  - , Kinematik 19
- Spanwinkeleinfluss 100
- Spanwinkelkorrektur 104
  - spezifische Passivkraft, Hauptwert 108
  - spezifische Schnittfläche 354
  - spezifische Schnittkraft 98, 104, 112, 306
  - , Einfluss von Vorschub und Schnitttiefe 102
  - , Einflussgrößen 98
  - , Hauptwert 104, 108
  - , spanende Bearbeitung von Kunststoffen 367
  - , Streuung 309
  - spezifische Vorschubkraft, Hauptwert 108
  - spezifischer Endenergieaufwand 118
  - spezifischer Energieaufwand 116
  - spezifischer Primärenergieaufwand 118
  - spezifisches Spanungsvolumen 113
- Spiralbohrer 345 f.
  - , Aufbohren 347
  - , Seitenspanwinkel 344
  - , Spitzenwinkel 344
  - Spitzenverschleiß 89
  - Spitzenwinkel, Spiralbohrer 344
- Stahl, hoch legierter 378 ff.
  - , hoch legierter, Einteilung 377
- Standbedingung 44
- Standbegriffe 44
- Standgröße 45
- Standkriterium 45
- Standmenge 45
- Standvermögen 44
  - , Bewertungsgrößen 45
- Standvolumen 45
- Standweg 45
- Standzeit 45, 91
  - , Einflussgrößen 91
- Standzeitbegriff, Definition 91
- Standzeitdiagramm 91 f.

Standzeitgleichung 95  
Standzeitschnittgeschwindigkeit 114  
Stirnfräsen 204, 209  
–, außermittiges 205  
– mit Bornitrid 341  
–, mittiges 204  
– unter Feinbearbeitungsbedingungen 110  
Stirnrad, gerad- und schrägverzahnt 242  
–, geradverzahnt 244  
Stirnradbearbeitung 247  
Stirnradfertigung 274  
Stirnradwälzstoßen, System Maag 363  
Stoßen 214  
– mit Hartmetall 327  
– mit Schnellarbeitsstahl 327  
Stoßlappen 302  
Strahl-Läppen 303  
Streuung der spezifischen Schnittkraft 309  
Strukturänderung 135  
Strukturlinie 59  
Superfinish 287  
–, Genauigkeit 288  
–, Verfahrenseinführung 287  
superharter Schneidstoff 77

## T

Tangentialvorschub 261  
Tauchlappen 305  
technologische Optimierung 97  
Teilung 219  
Temperaturverteilung in einem Hartmetalldreh-  
meißel 86  
theoretische Rautiefe 132  
thermoplastischer Kunststoff 373  
Tieflochbohren 352  
Titan 381, 383  
Titanlegierung 381, 383  
Trockenbearbeitung 148, 152  
–, Darstellung der Möglichkeiten 154

## U

ultrahohe Schnittgeschwindigkeit 159  
Umfangsfräsen 203, 212  
–, Berechnungsform 197  
Umfangsgeschwindigkeit, Schleifscheibe 356

## V

Verfahrensfaktor 106  
verfestigte Schicht, Tiefe 135  
Verfestigung, Abklingkurven 136  
–, Intensität 135  
–, plastische 135

Verfestigungsgrad 135  
Verfestigungstiefe 135  
Verformung, plastische 135  
Verkürztes grafisch-rechnerisches Verfahren der  
Leistungsermittlung 198  
Verschleißursache 87  
Verschleiß, abrasiver 87  
–, adhäsiver 88  
–, Auswirkungen 90  
–, Diffusions- 87  
–, Oxidations- 88  
Verschleißart 89  
–, Freiflächenverschleiß 89  
–, Kammrissbildung 89  
–, Kolkverschleiß 89  
–, Schneidkantenverschleiß 89  
–, Spanflächenverschleiß 89  
–, Spitzenverschleiß 89  
Verschleißdiagramm 91 f.  
Verschleißeinfluss 102  
Verschleißgrößen am Drehmeißel 47  
Verschleißkorrektur 104  
Verschleißkriterium 90  
Verzahnungsverfahren 279  
Vollbohrkopf 352  
Vollhartmetallbohrsenker 347  
Vorbohrdurchmesser 347  
Vorschub 25, 102  
Vorschubarbeit 43  
Vorschubbewegung 21  
Vorschubeinfluss 99  
Vorschubeingriff 27  
– der Schneide 28  
Vorschubenergie 43  
Vorschubgeschwindigkeit 23  
Vorschubgröße 25  
Vorschubkraft 41, 55, 107, 109  
–, Berechnung 107  
–, spezifische, Hauptwert 108  
Vorschubleistung 44, 113  
Vorschubnormalkraft 41  
Vorschubrichtungswinkel 23  
Vorschubweg 22

## W

Walzenfräser 332  
Walzenstirnfräser 332  
Wälzfräsen 242, 245  
– mit Abwälzfräser 248  
– mit Radialvorschub 260  
– mit Schlagmesser 263

– mit Tangentialvorschub 261  
 – von Stirnrädern 361 f.  
 Wälzhonen 259  
 Wälzschalen 265  
 Wälzstoßen 244, 249  
 – mit Kammmeißel, System Maag 250  
 – mit Schneidrad 249  
 – von Schräg Zahnstirn rädern 364  
 Wärmebehandlung 392  
 Wärmeentstehungszone 85  
 Warmformgebung 392  
 Welligkeit 130  
 Wendeschneidplatte 62  
 Werkstück 20  
 Werkstoffeinfluss 98  
 Werkstoffgruppe 385  
 Werkstück und Fertigungsergebnis 282, 289  
 Werkstückgeschwindigkeit 356  
 Werkzeug und Fertigungsergebnis 283, 290  
 Werkzeugabmessungen 283  
 Werkzeugachse 32  
 Werkzeug-Bezugsebene 35  
 Werkzeug-Bezugssystem 34  
 Werkzeugbohrung 32  
 Werkzeug-Eckenwinkel 36  
 Werkzeug-Einstellergänzungswinkel 36  
 Werkzeug-Einstellwinkel 36  
 Werkzeug-Freiwinkel 36  
 Werkzeuggerade 114  
 Werkzeuggestaltung 283  
 Werkzeug-Keilwinkel 36  
 Werkzeugmaschine und Fertigungsergebnis 285, 291  
 Werkzeug-Neigungswinkel 36  
 Werkzeug-Orthogonalebene 35  
 Werkzeug-Rückebene 35  
 Werkzeugschaft 32  
 Werkzeugschneide 20  
 Werkzeug-Schneidenebene 35  
 Werkzeug-Spanwinkel 36  
 Werkzeugstahl, legiert 68  
 –, unlegiert 68  
 Werkzeugstandzeit, Beeinflussung 93 f.  
 Werkzeugtyp 328, 344  
 Werkzeugverschleiß 46  
 Werkzeugwinkel 34, 330  
 – am Drehmeißel 36

– beim Räumen 355  
 –, Drehen mit Hartmetall 315  
 –, Drehen mit Schnellarbeitsstahl 316  
 –, hartmetallbestückte Fräser 331  
 –, Schnellarbeitsstahlreibahle 350  
 Wirkarbeit 42  
 Wirkbewegung 21  
 Wirk-Bezugssystem 37  
 Wirkenergie 42  
 Wirkgeschwindigkeit 22  
 Wirkkraft 41  
 Wirkleistung 43  
 Wirknormalkraft 41  
 Wirkrichtungswinkel 24  
 Wirkspanungsbreite 29  
 Wirkspanungsdicke 29  
 Wirk-Spanungsgröße 29  
 Wirkspanungsquerschnitt 29  
 Wirkungsgrad 113  
 Wirkvorschub 26  
 Wirkweg 22  
 Wirkwinkel 37  
 – am Drehmeißel 38  
 Wirtschaftlichkeit 287, 293  
 wolframcarbidgefreies Hartmetall 74

## Z

Zähnezahl 329 ff.  
 Zahnflankenschleifen 244, 246, 254  
 –, System Niles 254, 364  
 Zahnradbearbeitung 241  
 Zahnradschaben 257, 364  
 Zahnung 221  
 Zahnvorschub 25  
 – beim Räumen 355  
 Zeitspannungsvolumen 113  
 Zerspanbarkeit, der Stahlwerkstoffe 376  
 Zerspankraft 39 f., 97  
 –, Komponenten 40  
 Zugeigenspannung 138  
 Zugkraft der Maschine 220  
 zulässige Fräsdornbelastung 341  
 Zustellbewegung 21  
 Zustellgeschwindigkeit 23  
 Zweimeißelwälzhobeln, System Heidenreich und Harbeck 267  
 – von Kegelrädern 365