



Leseprobe

Handbuch Spanen

Herausgegeben von Günther Spur

ISBN (Buch): 978-3-446-42826-3

ISBN (E-Book): 978-3-446-43699-2

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-42826-3>

sowie im Buchhandel.

Vorwort der Bandherausgeber

Das produzierende Gewerbe ist ein wesentlicher Treiber für Wachstum und Wohlstand. Außerdem ist das produzierende Gewerbe eng mit den Entwicklungen im Dienstleistungsgewerbe verbunden. Produzierende Unternehmen in hochindustrialisierten Ländern positionieren und differenzieren sich im Markt häufig über eine Technologieführerschaft. Um diese Strategie nachhaltig zu gestalten, sind kontinuierliche Produkt- und Prozessinnovationen notwendig. Diese werden wiederum in vielen Fällen durch die Verwendung neuer Werkstoffe eingeleitet.

In diesem Umfeld sind spanende Fertigungsverfahren einzuordnen und zu bewerten. Sie sind in der Anwendung einerseits sehr flexibel, andererseits werden sie auch in der Massenfertigung wirtschaftlich angewendet. Gründe hierfür sind die durch Forschung und Entwicklung kontinuierlich fortschreitende Weiterentwicklung von Werkzeugen, Schneidstoffen und Fertigungsstrategien und auch die durch Grundlagenforschungen gewonnenen tiefgehenden Erkenntnisse zu den fertigungsphysikalischen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück. Dies zeigt, dass sich Entwicklungen in der spanenden Fertigungstechnik mit hoher Dynamik vollziehen und dass es auch für den Fachmann immer schwieriger wird, den Stand der Technik zu überblicken und das vorhandene Wissen zur Lösung des eigenen Fertigungsproblems zielorientiert anzuwenden.

Fundierte Kenntnisse über die Möglichkeiten und Grenzen spanender Fertigungstechniken gehören zum elementaren Rüstzeug im Produktdesign, in der Produktauslegung, in der Planung von Prozessketten und Technologien sowie von Betriebsmitteln. Auch der verantwortliche Betriebsingenieur und Fertigungsleiter muss Kenntnisse der spanenden Fertigungstechnik besitzen. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass Fragen zur Ressourcenschonung, Materialeffizienz und zur Energieeffizienz neue Bedeutung gewinnen. Eine Vielzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und auch praktischen Leitfäden und Ratgebern machen es dem Fachmann, den Studierenden und auch den Lehrenden nicht leicht, den Überblick zu behalten. Alle Zielgruppen benötigen Orientierungen in dem speziellen Fachgebiet der spanenden Technologien und auch Hilfen bei der Einordnung der spanenden Fertigungstechnik in das Gesamtgebiet der industriellen Produktionstechnik.

Den Herausgebern ist es ein Bedürfnis, den interessierten Lesern einen fundierten Überblick über spanende Fertigungsprozesse zu verschaffen und eine Einordnung in die Produktionstechnik vorzunehmen. Dieses Buch soll dem erfahrenen Fachmann als Nachschlagewerk dienen und den noch unentschlossenen Studierenden begeistern, physikalische Wirkzusammenhänge in der Fertigungstechnik zu erkennen und anschaulich zu lernen, wie durch den geschickten Einsatz von Fertigungsprozessen Industrieproduktion global wettbewerbsfähig gestaltet werden kann. Um diesem Anspruch nahe zu kommen, werden zunächst die fertigungstechnisch dominierenden Wirkzusammenhänge mit der gebotenen Tiefe, aber auch mit der notwendigen Praxisnähe dargestellt. Mit einer Vielzahl praktisch realisierter Anwendungen wird gezeigt, wie spanende Fertigungstechnik in der Praxis angewandt wird. Dazu konnte eine Vielzahl anerkannter Fachleute aus Praxis und Wissenschaft gewonnen werden, die den Stand der Technik in der spanenden Fertigung an aktuellen Beispielen darstellen und fachkompetent diskutieren. Die Bearbeitung von Metallen steht dabei entsprechend ihrer wirtschaftlichen Bedeutung im Vordergrund.

Um Gesamtzusammenhänge über Verfahrensgrenzen hinausgehend zu erkennen, wurden Fachbegriffe und Formelzeichen in Anlehnung an die einschlägigen DIN-Normen, VDI-Richtlinien und aus dem CIRP Dictionary verwendet. Damit soll auch gewährleistet werden, dass durch eine möglichst einheitliche Verwendung von Fachbegriffen und Formelzeichen zu einer Standardisierung der Fachsprache beigetragen wird. Hierzu war es aber dennoch notwendig, Kompromisse zu finden; die genannten Standardisierungswerke waren hierfür eine große Hilfe.

Das Handbuch der Fertigungstechnik, Band Spanen, wendet sich an den Produktdesigner und an den Konstrukteur, die bereits in frühen Phasen der Produktentstehung die Herstellbarkeit von Produkten berücksichtigen müssen. Es gibt dem Fertigungsplaner eine wertvolle Hilfe, geeignete Prozesse auszuwählen und Prozessketten zu gestalten. Für den Betriebsingenieur ist das Handbuch der Fertigungstechnik, Band Spanen, eine wertvolle Hilfe bei der Auswahl von Fertigungsprozessen und der Planung von Erweiterungs-

und Ersatzinvestitionen. Es zeigt außerdem Möglichkeiten, Betriebsabläufe zu optimieren und Fertigungskosten einzusparen. Darüber hinaus dient das Handbuch den Studierenden der Ingenieurwissenschaften und der Betriebswissenschaften als Nachschlagewerk und als Lehrbuch zum vertiefenden Studium.

Die geschichtliche Einordnung des Spanens und die Diskussion der Bedeutung spanender Fertigungsprozesse helfen, die Technologien im Gesamtzusammenhang zu sehen. Mit den Grundlagen zur Kosten- und Investitionsrechnung werden Hilfen zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von Fertigungsprozessen zur Verfügung gestellt. Die Steuerungs- und Programmierertechnik ist ebenfalls ein Querschnittsthema, das auf Fertigungsprozesse im Allgemeinen angewendet werden kann, hier aber auch Besonderheiten der spanenden Fertigungstechnik berücksichtigt. Mit den Grundlagen zum Zerspanen, der Vorstellung von Bezugssystemen und genormten Werkzeuggeometrieelementen sowie ausgewählten Fragen zur Zerspanungskinematik, zur Spanbildung und zum Verschleiß schließen sich die Fachkapitel an, die die wichtigsten spanenden Fertigungsprozesse im Detail behandeln. Es werden sowohl die Zerspanungsvorgänge als auch wichtige Aspekte der Werkzeugauslegung und Werkzeugauswahl sowie die Leistungsmerkmale der zugehörigen Werkzeugmaschinen vorgestellt und diskutiert. Mit einer Vielzahl von praktisch ausgeführten Technologiebeispielen werden Anwendungen gezeigt, und es wird die Leistungsfähigkeit der Prozesse illustriert.

Unserem verehrten Lehrer und dem Gesamt-Herausgeber des mehrbändigen „Handbuch der Fertigungstechnik“, Herrn Professor em. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr.-Ing. Günter Spur, blieb das Erscheinen der Neuauflage dieses Bandes verwehrt. Professor Spur verstarb plötzlich und unerwartet im August 2013. Innerhalb der Vielzahl technisch-wissenschaftlicher Veröffentlichungen, die Professor Spur während seiner beruflichen Tätigkeit verfasst und herausgegeben hat, nahm das Handbuch der Fertigungstechnik immer einen besonderen Stellenwert ein. Günter Spur hatte Mitte der 1970er Jahre erkannt, dass die stürmischen Entwicklungen und wechselseitigen Verflechtungen in der Produktionstechnik es auch für Fachleute immer schwieriger werden ließen, einen Überblick zu behalten. Er fasste damals zusammen mit seinem Kollegen Professor Dr.-Ing. Theodor Stöferle aus Darmstadt den Entschluss, eine Buchreihe zu konzipieren, die gleichermaßen als Lehrbuch und als Nachschlagewerk für den in der Praxis arbeitenden Ingenieur dienen sollte. Als Ordnungsrahmen wählte er die Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580. Mit Vision und hohem persönlichen Engagement ging er dieses Vorhaben an. 1978 erschien das erste Buch dieses Werkes: Spanen 3/1. Das Handbuch der Fertigungstechnik wurde in den Folgejahren zum unverzichtbaren Nachschlagewerk im In- und Ausland. Nicht selten findet sich die gesamte Buchreihe in der produzierenden Industrie sichtbar und griffbereit wieder, um aktuelle Fragen zu klären oder Gedankenanstöße zu bekommen. Jetzt war es an der Zeit, den Inhalt zu überarbeiten und zu aktualisieren. Trotz seines fortgeschrittenen Alters initiierte Professor Spur mit temperamentvoller Dynamik und unerschöpflicher Schaffenskraft die Erstellung der zweiten Auflage dieses Standardwerkes. Band 2 „Umformen“ ist bereits im November 2012 erschienen, die Fertigstellung und Veröffentlichung der anderen, sich zu dieser Zeit noch in Arbeit befindlichen Bände konnte er leider nicht mehr erleben. In Würdigung und in Anerkennung seiner großen Verdienste für die Produktionswissenschaften, die er sich als Forscher, Hochschullehrer und Ingenieur erworben hat, sprechen wir ihm unseren aufrichtigen Dank aus. Mitherausgeber, Verlag, Autoren und alle sonstigen eingebundenen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen werden Professor Spur ein ehrendes Andenken bewahren. Es ist den Verantwortlichen eine ehrende Verpflichtung, die Arbeiten am Handbuch der Fertigungstechnik in seinem Sinne weiterzuführen und zu vollenden.

Die Herausgeber bedanken sich bei allen Autoren aus der Wissenschaft und der Praxis für die Verfassung der Manuskripte, das umfangreiche Bildmaterial und viele persönlich geführte Diskussionen, durch die der reichhaltige Stoff in angemessener Form verdichtet und kommentiert wurde. Die redaktionelle Bearbeitung der Manuskripte war nicht minder anspruchsvoll. Hier möchten wir uns insbesondere bei unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Frau Dipl.-Verw. Simone Zirkelbach, Herrn Dr.-Ing. Martin Arft und Dipl. Ing. Sven Lung für die organisatorische und inhaltliche Mitarbeit bedanken. Ohne dieses Engagement wäre die Erstellung dieses Bandes nicht möglich gewesen. Herrn Dipl.-Ing. Volker Herzberg vom Carl Hanser Verlag gebührt unser Dank für die positive und konstruktive Zusammenarbeit.

Stuttgart, Berlin, Aachen im Juli 2014

Uwe Heisel Fritz Klocke Eckart Uhlmann

Inhaltsverzeichnis

Vorwort der Bandherausgeber.....	V
Die Herausgeber.....	XXIX
Autorenverzeichnis.....	XXXI
I Spanen	1
1 Einführung in die Zerspantechnik	3
1.1 Geschichtliche Entwicklung.....	5
1.2 Bedeutung der Zerspantechnik.....	10
1.2.1 Bedeutung der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie im internationalen Vergleich	10
1.2.2 Vergleich Zerspanung, Umformen und Urformen.....	11
1.2.3 Aufgabe der Zerspanungstechnik	13
1.2.4 Begriffsdefinition	14
1.2.5 Werkstoffe und Werkzeuge.....	14
1.2.6 Optimierung von Zerspanprozessen	15
1.2.7 Simulation von Zerspanprozessen	16
1.2.8 Automatisierung und Verkettung	16
1.2.9 Entwicklungstendenzen und Zusammenfassung	17
1.3 Grundbegriffe und Einteilung der spanenden Fertigungsverfahren	19
2 Kosten und Investitionsrechnung	25
2.1 Kostenrechnung	27
2.1.1 Grundlagen	27
2.1.1.1 Gewinn, Verlust, Erlös, Kosten	27
2.1.1.2 Auszahlungen, Ausgaben, Kosten, Aufwand.....	28
2.1.1.3 Einzahlungen, Einnahmen, Leistung, Ertrag	28
2.1.1.4 Einzel- und Gemeinkosten, fixe und variable Kosten.....	29
2.1.2 Verfahren der Kostenrechnung	30
2.1.2.1 Kostenartenrechnung.....	30
2.1.2.2 Kostenstellenrechnung	32
2.1.2.3 Kostenträgerrechnung	35
2.1.3 Kostenrechnungssysteme.....	42
2.1.3.1 Ist-, Normal- und Plankostenrechnung.....	43
2.1.3.2 Vollkosten- und Teilkostenrechnung.....	43
2.1.3.3 Prozesskostenrechnung.....	45
2.1.3.4 Zielkostenrechnung.....	46
2.1.3.5 Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung.....	48
2.2 Technische Investitionsrechnung	49
2.2.1 Definition und Begriffsabgrenzung.....	49
2.2.1.1 Ablauf der technischen Investitionsrechnung	49
2.2.1.2 Einzelentscheidungen und Programmentscheidungen	50
2.2.2 Verfahren mit sicherer Erwartung.....	51
2.2.2.1 Statische Verfahren	51
2.2.2.2 Dynamische Verfahren	54
2.2.3 Methoden der unsicheren Erwartung	60
2.2.3.1 Sensitivitätsanalyse.....	60
2.2.3.2 Szenario-Technik.....	61
2.2.4 Berücksichtigung des Nutzwertes von Investitionen.....	61
2.2.4.1 Nutzwertanalyse	62
2.2.4.2 Portfoliodarstellung.....	63

2.2.5	Praxis der Investitionsrechnung	65
2.2.5.1	Erweiterungsinvestition in eine Teilereinigungsanlage	65
2.2.5.2	Ersatzinvestition in ein fahrerloses Transportsystem (FTS)	68
2.2.5.3	Fazit	69
3	Grundlagen des Zerspanens	71
3.1	Werkzeuggeometrie, Kinematik und Spanbildung	73
3.1.1	Begriffe und Bezeichnungen	73
3.1.2	Bezugssysteme	74
3.1.3	Parameter zum Festlegen der Geometrie des Schneidteils	76
3.1.4	Verfahrens-Grundvarianten	77
3.1.5	Spanbildung	77
3.1.6	Spanarten	79
3.1.7	Spanformen	80
3.1.8	Mindestspanungsdicke, Mindestvorschub und Mindestschnitttiefe	81
3.2	Mechanische und thermische Beanspruchung des Schneidteils	81
3.2.1	Mechanische Beanspruchung, Berechnung der Zerspankraft	81
3.2.2	Thermische Beanspruchung	84
3.2.3	Verschleiß am Schneidteil	87
3.2.3.1	Verschleißformen	87
3.2.3.2	Verschleißursachen und -mechanismen	90
3.3	Schneidstoffe und Beschichtungen	97
3.3.1	Generelle Anforderungen an Schneidstoffe	97
3.3.2	Werkzeug- und Schnellarbeitsstähle	98
3.3.2.1	Unlegierte Werkzeugstähle	98
3.3.2.2	Legierte Werkzeugstähle	98
3.3.2.3	Schnellarbeitsstähle	98
3.3.3	Hartmetalle und Cermets	99
3.3.3.1	Hartmetalle auf Basis WC-Co mit geringen Beimengungen an VC, Cr ₃ C ₂ und/oder TaC	100
3.3.3.2	Hartmetalle auf Basis von WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co	100
3.3.3.3	Hartmetall auf Basis von Ti(C,N)-Co-Ni (sogenannte Cermets)	101
3.3.4	Schneidkeramiken	101
3.3.4.1	Oxidische Schneidkeramik	101
3.3.4.2	Nichtoxidische Schneidkeramik	102
3.3.4.3	Mischkeramik	102
3.3.5	Ultrahartstoffe (pcBN und PKD)	102
3.3.5.1	Polykristalliner Diamant	102
3.3.5.2	Polykristallines, kubisches Bornitrid	103
3.3.6	Verschleißschutzschichten	103
3.3.6.1	Hartschichten	103
3.3.6.2	Weichschichten	105
3.3.6.3	Beschichtungstechnik	105
3.3.7	Normung der Schneidstoffe	105
3.4	Kühl- und Schmierstoffe	108
3.4.1	Einleitung	108
3.4.2	Anforderungen	108
3.4.3	Aufbau	108
3.4.4	Anwendung	109
3.4.5	Randbedingungen	110
4	Steuerung und Programmierung	113
4.1	Steuerung	115
4.2	Einteilung der Steuerungstechnik	115
4.3	System zur Steuerung von Werkzeugmaschinen	118

4.4	Feldbusse für Steuerungssysteme.....	121
4.5	Komponenten einer NC-Werkzeugmaschine	122
4.6	Numerische Steuerungen für Werkzeugmaschinen	123
4.6.1	Arbeitsweise und Funktionsumfang einer numerischen Steuerung	123
4.6.2	Interner Aufbau und Informationsfluss numerischer Steuerungen	124
4.6.3	Ausführungsformen	127
4.7	NC-Programmierung	128
4.7.1	Achsbezeichnungen und Koordinatensysteme	129
4.7.2	Aufbau eines NC-Programms	130
4.7.3	Manuelle Programmierung	132
4.7.4	Rechnerunterstützte NC-Programmierung	133
4.8	Speicherprogrammierbare Steuerungen.....	136
4.8.1	SPS-Aufbau und Ausführungsformen	137
4.8.2	SPS-Arbeitsweise	139
4.9	SPS-Programmierung.....	140
4.9.1	Softwaremodell und Begriffe	140
4.9.2	SPS-Programmaufbau	141
4.9.3	Die Programmiersprachen der DIN EN 61131-3	142
4.9.4	SPS-Programmierungsumgebung	142
5	Drehen.....	145
5.1	Entwicklung der Drehmaschinen.....	147
5.2	Übersicht der Verfahren	150
5.3	Übersicht der Drehmaschinen	154
5.3.1	Einteilungsgesichtspunkte	154
5.3.2	Universaldrehmaschinen	155
5.3.3	Produktionsdrehmaschinen	155
5.3.4	Drehzentren und Drehzellen.....	156
5.3.5	Ein- und Mehrspindeldrehautomaten	156
5.3.6	Langdrehautomaten.....	156
5.3.7	Plandrehmaschinen.....	156
5.3.8	Senkrechtdrehmaschinen.....	157
5.3.9	Karusselldrehmaschinen	157
5.3.10	Fein- und Präzisionsdrehmaschinen.....	157
5.3.11	Mittelantriebsdrehmaschinen.....	157
5.3.12	Drehmaschinen für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung	158
5.3.13	Sonderdrehmaschinen	158
5.4	Berechnungsverfahren.....	159
5.4.1	Kinematik.....	159
5.4.2	Zerspankraftkomponenten	159
5.4.3	Zerspanleistung.....	160
5.4.4	Hauptzeit	161
5.5	Werkzeuge und Schneidstoffe zum Drehen.....	164
5.5.1	Die Auswahl von Drehwerkzeugen	164
5.5.2	Schneiden für Drehwerkzeuge.....	165
5.5.2.1	Schneidengeometrien.....	165
5.5.2.2	Schneidstoffe	168
5.5.2.3	Beschichtungen	171
5.5.3	Halter von Drehwerkzeugen	172
5.5.3.1	Anforderungen	172
5.5.3.2	Anbindung: Schneidenträger -Werkzeugschaft	174
5.5.3.3	Anbindung: Werkzeugschaft - Maschinenaufnahme	175
5.5.4	Längsnutenbearbeitung auf Drehmaschinen.....	177

5.5.4.1	Keine speziellen Anforderungen an die Drehmaschine.....	178
5.5.4.2	Standardwerkzeuge für breite Anwendungen.....	178
5.5.4.3	Schnittwerte aus der Praxis	180
5.5.4.4	Angetriebene Nutstoßaggregate oder Werkzeuge	181
5.5.4.5	Bearbeitungsverfahren auch auf Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren einsetzbar	182
5.6	Werkstückaufnahmen und Spanneinrichtungen.....	183
5.6.1	Allgemeine Forderungen	183
5.6.2	Spannmöglichkeiten umlaufender Werkstücke.....	183
5.6.3	Handspannfutter	185
5.6.4	Kraftspannfutter.....	186
5.6.5	Spannzangen	189
5.6.6	Spanndorne	190
5.6.7	Mitnehmer.....	192
5.6.8	Sonderspanneinrichtungen	192
5.6.8.1	Hebelausgleichfutter	193
5.6.8.2	Spannlösungen zur Rüstzeitoptimierung.....	193
5.6.9	Betätigungselemente für Kraftspanneinrichtungen.....	194
5.6.10	Arbeits- und Unfallsicherheit.....	195
5.6.11	Berechnungsgrundlagen.....	196
5.6.12	Anwendungsbreite neuzeitlicher Spanntechnik.....	199
5.6.13	Energieeffiziente Spannmittel für die Drehbearbeitung.....	199
5.7	Bearbeitung auf Drehmaschinen	204
5.7.1	Universaldrehmaschinen.....	204
5.7.1.1	Aufbau der Maschinen	205
5.7.1.2	Spanneinrichtungen.....	207
5.7.1.3	Werkzeugsysteme.....	207
5.7.1.4	Lünetten.....	208
5.7.1.5	Steuerung und Bedienung	208
5.7.1.6	CNC-Universaldrehmaschine.....	209
5.7.2	Produktionsdrehmaschinen	210
5.7.2.1	Konstruktiver Aufbau.....	211
5.7.2.2	Produktionsdrehmaschine in der Weichbearbeitung (Grünfertigung)	214
5.7.2.3	Produktionsdrehmaschinen für die Hartbearbeitung	215
5.7.2.4	Abnahmekriterien für Produktionsdrehmaschinen	217
5.7.3	Drehzellen und Drehzentren	218
5.7.3.1	Erkennungsmerkmale und Auswahlkriterien.....	218
5.7.3.2	Konstruktiver Aufbau der Maschinen und Ausführung	220
5.7.3.3	Werkzeuge und Spannmittel.....	224
5.7.3.4	Automatisierungseinrichtungen.....	226
5.7.3.5	Ausführungs- und Bearbeitungsbeispiel	227
5.7.4	Ein- und Mehrspindeldrehautomaten	228
5.7.4.1	Einspindeldrehautomaten.....	228
5.7.4.2	Kurvengesteuerte Mehrspindeldrehautomaten	230
5.7.4.2.1	Konstruktiver Aufbau.....	231
5.7.4.2.2	Zusatzeinrichtungen.....	233
5.7.4.3	CNC-gesteuerte Mehrspindeldrehautomaten	235
5.7.4.3.1	Konstruktiver Aufbau.....	235
5.7.4.3.2	Zusatzeinrichtungen.....	239
5.7.5	Langdrehautomaten	243
5.7.6	Plandrehmaschinen	248
5.7.7	Senkrechtdrehmaschinen.....	251
5.7.7.1	Einführung	251
5.7.7.2	Vertikaldrehmaschinen mit feststehender Spindel.....	253
5.7.7.3	Vertikaldrehmaschinen mit beweglicher Spindel	254
5.7.7.3.1	Einspindler für Futterdrehteile.....	257
5.7.7.3.2	Einspindler für Wellen	257

5.7.7.3.3	Zweispindler	258
5.7.7.3.4	Gegenspindelmaschine	259
5.7.7.3.5	Multifunktionsmaschinen	259
5.7.7.4	Automation für Pick-up-Drehmaschinen.....	262
5.7.7.5	Qualitätssicherung an Vertikaldrehmaschinen	262
5.7.7.6	Spannmittel für die Drehbearbeitung	263
5.7.7.7	Fortentwicklung des Drehprozesses	264
5.7.7.8	Ausblick.....	268
5.7.8	Karusselldrehmaschinen	268
5.7.8.1	Bauformen und Arbeitsweise.....	268
5.7.8.2	Konstruktive Gestaltung - der Untersatz	270
5.7.8.3	Konstruktive Gestaltung - der Werkzeugträger	271
5.7.8.4	Werkzeugwechselsysteme und Werkstückhandling	273
5.7.9	Fein- und Präzisionsdrehmaschinen.....	275
5.7.9.1	Allgemein	275
5.7.9.2	Einsatzbereich und Anwendungsgebiete	276
5.7.9.3	Typische Werkstücke für Fein- und Präzisionsdrehmaschinen	277
5.7.9.4	Aufbau von Fein- und Präzisionsdrehmaschinen	278
5.7.9.5	Sonderbauformen von Fein- und Präzisionsdrehmaschinen	279
5.7.9.6	Automatisierung.....	280
5.7.9.7	Ultrapräzisionsdrehmaschinen	280
5.7.10	Mittelantriebsdrehmaschinen.....	283
5.7.10.1	Bauformen von Mittelantriebsdrehmaschinen	283
5.7.10.2	Konstruktive Merkmale des Mittelantriebs.....	284
5.7.10.3	Ausführungsbeispiel	284
5.7.11	Drehmaschinen für Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.....	285
5.7.11.1	Hochgeschwindigkeitsdrehprozesse.....	285
5.7.11.2	Maschinen für Hochgeschwindigkeitsdrehprozesse.....	285
5.7.11.2.1	Grundaufbau	285
5.7.11.2.2	Maschinenbett	286
5.7.11.2.3	Werkzeugträger.....	286
5.7.11.2.4	Werkstückspindeln für Hochgeschwindigkeitsdrehprozesse	286
5.7.11.2.5	Spannmittel.....	287
5.7.11.2.6	Maschinenverhaubung.....	288
5.7.11.2.7	Zusammenfassung	288
5.7.12	Sonderdrehmaschinen	289
5.7.12.1	Bearbeitung von Eisenbahnradsätzen, Eisenbahnrädern und Radsatzwellen	289
5.7.12.1.1	Rahmenbedingungen.....	289
5.7.12.1.2	Sonderdrehmaschinen zur Durchführung von Servicemaßnahmen an Radsätzen.....	290
5.7.12.1.3	Sonderdrehmaschinen zur Neuerstellung und zum Austausch von Radsätzen	294
5.7.12.2	Sondermaschinen zur Bearbeitung von Powertrain-Komponenten in der Automobilindustrie	297
5.7.12.2.1	Drehräummaschine/Drehdrehräummaschine	297
5.7.12.2.2	Dreh-Drehräumen oder Drehschälens.....	298
5.7.12.3	Kombinierte Dreh-Fräs-Bearbeitungsmaschinen.....	298
5.7.12.3.1	Komplettbearbeitung auf Dreh-Fräscentren	298
5.7.12.3.2	Dreh-Fräscentrum für Großkurbelwellen.....	300
5.7.12.3.3	Dreh-Fräscentrum mit separatem Bohrstangenschlitten und Magazin	301
5.7.12.3.4	Dreh-Fräscentrum mit separatem Bohrpinnolenschlitten	302
5.7.12.4	Walzendrehmaschinen.....	302
5.7.12.5	Rohrbearbeitungsmaschinen	302
5.8	Zusatz- und Verkettungseinrichtungen bei vertikalen Drehmaschinen.....	304
5.8.1	Einsatz	304
5.8.2	Zusatzeinrichtungen.....	304
5.8.2.1	Werkstücktragende Zusatzeinrichtungen.....	304
5.8.2.2	Werkzeugtragende Zusatzeinrichtungen	304
5.8.3	Verkettungseinrichtungen	308

6	Bohren, Senken und Reiben	309
6.1	Allgemeines	311
6.2	Übersicht der Bohrverfahren	313
6.2.1	Begriffe und deren Erklärung	313
6.2.2	Richtlinien für die Herstellung von Bohrungen	315
6.3	Maschinen und Systeme	315
6.4	Berechnungsverfahren.....	317
6.4.1	Schneidengestalt	317
6.4.2	Zerspankräfte beim Bohren.....	318
6.5	Werkzeuge und Werkzeugaufnahmen	322
6.5.1	Werkzeuge für die Bohrungsbearbeitung	322
6.5.1.1	Werkzeuge zum Vollbohren	322
6.5.1.1.1	Einschneidige Werkzeuge	322
6.5.1.1.2	Zweischneidige Bohrwerkzeuge.....	326
6.5.1.2	Werkzeuge zum Aufbohren, Spindeln, Reiben.....	328
6.5.1.2.1	Aufbohren.....	328
6.5.1.2.2	Spindeln.....	328
6.5.1.2.3	Reiben	330
6.5.1.3	Lagegeregelte Werkzeuge für die Bohrungsbearbeitung.....	331
6.5.2	Werkzeugaufnahme beim Bohren	333
6.5.2.1	Schnittstelle der Werkzeugaufnahme.....	333
6.5.2.2	Bohrfutter	334
6.5.2.3	Spannzangenfutter.....	335
6.5.2.4	Hydraulisches Dehnspannfutter.....	335
6.5.2.5	Tribos-Spannfutter	336
6.5.2.6	Warmschrumpf-Spannfutter	337
6.5.2.7	Weitere Spannsysteme.....	338
6.6	Werkstückaufnahmen, Bohrvorrichtungen	338
6.6.1	Einsatz von Bohrvorrichtungen	338
6.6.1.1	Allgemein	339
6.6.1.2	Gliederung von Bohrvorrichtungen	339
6.6.2	Funktionen und Funktionselemente von Bohrvorrichtungen.....	339
6.6.3	Lösungsbeispiele	340
6.7	Bohrmaschinen	344
6.7.1	Ständerbohrmaschinen	344
6.7.2	Radialbohrmaschinen.....	346
6.7.3	Feinbohrmaschinen	350
6.7.3.1	Feinbohrprozess	350
6.7.3.2	Maschinenaufbau.....	352
6.7.3.3	Spindeln.....	353
6.7.3.4	Werkzeuge	355
6.7.3.4.1	Einschneidige Werkzeuge	355
6.7.3.4.2	Mehrschneidige Werkzeuge.....	356
6.7.3.4.3	Mehrschneidige Schieber-Werkzeuge	357
6.7.3.4.4	Feinbohrwerkzeuge für Pleuelbearbeitung.....	358
6.7.3.5	Spannvorrichtungen.....	359
6.7.3.6	Zusammenfassung.....	359
6.7.4	Koordinatenbohrmaschinen	360
6.7.5	Tiefbohrmaschinen	362
6.7.5.1	Tiefbohren	362
6.7.5.1.1	Einlippenbohren.....	362
6.7.5.1.2	BTA-Bohren	365
6.7.5.1.3	Ejektorbohren	366
6.7.5.1.4	Bohren mit spiralisierten Tiefbohrwerkzeugen	367
6.7.5.2	Aufbau von Tiefbohrmaschinen.....	367

6.7.5.2.1	Standard-Tiefbohrmaschinen.....	367
6.7.5.2.2	Kühlschmierstoff-Anlage.....	370
6.7.5.2.3	Steuerung/Prozesskontrolle.....	371
6.7.5.2.4	Automatisierungseinrichtungen.....	372
6.7.5.2.5	Sondertiefbohrmaschinen.....	373
6.7.5.3	Typische Anwendungsbeispiele.....	379
6.7.6	HSC-Maschinen.....	382
6.7.7	Bohrzentren.....	384
6.7.7.1	Einsatz in Fertigungssystemen.....	386
6.7.7.2	Adapterplatten in Fertigungssystemen.....	387
6.8	Zusatz- und Verkettungseinrichtungen bei Bohrmaschinen.....	389
6.8.1	Einsatz.....	389
6.8.2	Zusatzeinrichtungen.....	389
6.8.2.1	Werkstücktragende Zusatzeinrichtungen.....	389
6.8.2.2	Rundtische, Wendespanner.....	389
6.8.2.3	Lünetten, Rollenböcke, Reitstöcke.....	390
6.8.2.4	Palettwechselsysteme.....	391
6.8.2.5	Werkzeugtragende Zusatzeinrichtungen.....	392
6.8.2.6	Fräsköpfe.....	392
6.8.3	Verkettungseinrichtungen.....	395
7	Fräsen.....	397
7.1	Grundlagen.....	399
7.2	Übersicht über die Fräsverfahren.....	401
7.2.1	Stirn-Umfangsplanfräsen.....	402
7.2.2	Umfangsplanfräsen.....	402
7.2.3	Umfangsprofilfräsen.....	402
7.2.4	Schafffräsen.....	403
7.3	Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren.....	404
7.3.1	Allgemeines und Aufbau.....	404
7.3.2	Bearbeitungszentren.....	407
7.3.2.1	Allgemeines und Definition von Bearbeitungszentren.....	407
7.3.2.2	Werkzeugspeicher, Werkzeug- und Werkstückwechselsystem.....	407
7.3.2.3	Anzahl und Art der Bewegungsachsen.....	407
7.3.2.4	Auswahl der Bauform.....	408
7.3.2.5	Werkstoffe für Gestelle und Gestell-Bauteile.....	408
7.3.2.6	CNC-Steuerungen.....	409
7.3.2.7	Haupt- und Arbeitsspindel.....	409
7.3.2.8	Achsantriebe für Vorschubachsen.....	409
7.3.2.9	Führungen und Lagerungen.....	410
7.3.2.10	Positions-Messsysteme.....	411
7.3.3	Einsatz von Bearbeitungszentren nach Bearbeitungsaufgaben.....	412
7.3.3.1	Horizontale Bearbeitungszentren.....	412
7.3.3.2	Vertikale Bearbeitungszentren.....	413
7.3.3.3	Sonderanwendungen.....	415
7.3.4	Entwicklungstendenzen.....	416
7.4	Werkzeuge.....	416
7.4.1	Spezifisches zu Schneidstoffen für Fräser.....	416
7.4.2	Schaftwerkzeuge.....	418
7.4.3	Wendeschneidplattenwerkzeuge.....	420
7.4.3.1	Planfräser.....	421
7.4.3.2	Eckfräser.....	422
7.4.3.3	Scheibenfräser.....	423
7.4.4	Fräser für ausgewählte Anwendungen.....	425
7.4.4.1	Fräser für den Werkzeug- und Formenbau.....	425
7.4.4.2	Verzahnungsfräser.....	427

7.4.4.3	Fräser für Luft- und Raumfahrtanwendungen.....	428
7.4.4.4	Kurbelwellenfräser	430
7.4.4.5	Gewindefräser	431
7.4.5	Minimalmengenschmierung (MMS) und Kühlschmierstoffversorgung	432
7.5	Werkzeugschnittstellensysteme in Fräsmaschinen.....	435
7.6	Prozessgestaltung auf Fräsmaschinen	440
7.6.1	Allgemeines	440
7.6.2	Auswahl von Schnittstrategien	441
7.6.3	Störgrößen und Möglichkeiten zur Vermeidung	447
7.6.3.1	Störgrößen.....	447
7.6.3.2	Strategien zur Reduktion von Störgrößeneinflüssen.....	448
7.6.3.2.1	Allgemeines	448
7.6.3.2.2	Gestalterische Maßnahmen.....	448
7.6.3.2.3	Prozessmodellierung und Prozesssimulation.....	450
7.6.3.2.4	Prozessüberwachung und Prozessregelung	451
8	Hobeln, Stoßen	453
8.1	Allgemeines	455
8.2	Übersichten über die Hobel- und Stoßverfahren sowie über die Maschinenbauarten.....	455
8.3	Kraft- und Leistungsberechnung.....	458
8.4	Bearbeitung auf Hobel- und Stoßmaschinen.....	461
8.4.1	Stoßmaschinen	461
8.4.2	Hobelmaschinen	461
8.4.3	Bearbeitungsgenauigkeiten.....	462
9	Räumen.....	465
9.1	Grundlagen	467
9.2	Übersicht der Verfahren	467
9.3	Werkstückstoffe	468
9.4	Werkzeuge	469
9.4.1	Schneidengeometrie.....	469
9.4.1.1	Span- und Freiwinkel	470
9.4.1.2	Spannungsdicke	470
9.4.1.3	Teilung	470
9.4.2	Staffelung, Gefälle, Vollformschnitt.....	471
9.4.3	Ausführungsformen von Räumwerkzeugen	473
9.4.4	Befestigung von Räumwerkzeugen.....	474
9.4.5	Erreichbare Qualität und Oberflächen	475
9.4.6	Werkzeugverschleiß.....	475
9.4.7	Werkzeuginstandhaltung	476
9.4.8	Schneidstoffe, Hart- und Trockenbearbeitung.....	478
9.5	Berechnungsgrundlagen.....	479
9.5.1	Zerspankräfte	479
9.5.2	Zerspanleistung.....	480
9.5.3	Erregerfrequenz	481
9.6	Maschinen und Systeme.....	481
9.6.1	Innenräummaschinen	483
9.6.2	Sonderformen von Innenräummaschinen.....	486
9.6.3	Außenräummaschinen	486
9.6.4	Sonderformen von Außenräummaschinen	489
9.6.5	Steuerungstechnik.....	490
9.6.6	Zusatz- und Verkettungseinrichtungen.....	491

10	Sägen	493
10.1	Grundlagen und Einordnung des Sägeverfahrens.....	495
10.2	Sägeverfahren.....	495
10.2.1	Bügelsägen.....	496
10.2.2	Kreissägen.....	496
10.2.3	Bandsägen.....	497
10.2.4	Maschinenausstattung für Höchstleistung.....	497
10.2.5	Maschinensteuerung und Zerspanungstechnologie.....	498
10.3	Sägewerkzeuge.....	499
10.3.1	Übersicht Schneidstoffe.....	499
10.3.1.1	Werkzeugstahl.....	500
10.3.1.2	Bi-Metall (Schnellarbeitsstahl).....	500
10.3.1.3	Hartmetall (hartmetallbestückte Sägebänder).....	500
10.3.1.4	Diamant (diamantbestreute Sägebänder).....	500
10.3.1.5	Beschichtungen.....	501
10.3.2	Einsatz von Hartmetall-Sägewerkzeugen.....	501
10.4	Auswahl des Sägeverfahrens.....	501
10.5	Berechnungsgrundlagen.....	503
10.5.1	Formelzeichen und Formeln für das Sägen mit Kreissägen.....	503
10.5.2	Formelzeichen und Formeln für das Sägen mit Bandsägen.....	503
10.6	Automatisierungsgrad von Sägemaschinen.....	503
10.6.1	Manuelle und halbautomatische Säge.....	504
10.6.2	Vollautomat.....	504
10.6.3	Spezielle Bauformen.....	504
10.6.3.1	Kontursägen.....	504
10.6.3.2	Großbearbeitung.....	505
10.6.3.3	Universalsägen.....	505
10.6.3.4	Träger- und Profilmbearbeitung.....	506
10.6.3.5	Mengensägen in der Großserienfertigung.....	506
10.6.3.6	Flexible hochproduktive Auftragsfertigung.....	507
10.7	Abschnittentsorgung.....	507
10.7.1	Sortierung.....	507
10.7.2	Zusatzoperationen.....	508
10.7.3	Verkettungen.....	508
10.7.4	Palettieren.....	508
10.8	Lagerintegration.....	509
10.8.1	Langgutlager.....	509
10.8.2	Automatische Vereinzelnung.....	510
10.8.3	Sägezentrum.....	510
10.8.4	Vollintegration in Langgutlager.....	510
11	Feilen	513
11.1	Feilverfahren.....	515
11.2	Feilwerkzeuge und Raspeln.....	515
12	Schaben	519
12.1	Allgemeines.....	521
12.2	Übersicht der Schabverfahren.....	521
12.3	Werkzeuge und Zubehör.....	522
12.3.1	Handwerkzeuge.....	522
12.3.2	Maschinenwerkzeuge.....	522
12.3.3	Zubehör und Messzeuge.....	523

12.4	Schabbearbeitung	524
12.5	Kosten der Schabbearbeitung	526
13	Schleifen	529
13.1	Allgemeines	531
13.2	Übersicht der Schleifverfahren	536
13.2.1	Schleifen mit rotierendem Werkzeug	536
13.2.1.1	Planschleifen	536
13.2.1.2	Rundschleifen	538
13.2.1.3	Schraub schleifen	539
13.2.1.4	Wälzschleifen	539
13.2.1.5	Profilschleifen	540
13.2.1.6	Formschleifen	540
13.2.2	Bandschleifen	540
13.2.3	Hubschleifen	541
13.2.4	Gleitschleifen	542
13.2.5	Sonderschleifverfahren	542
13.2.5.1	Führungsbahnenschleifen	542
13.2.5.2	Schleifen von Nocken- und Kurbelwellen	542
13.3	Übersicht der Schleifmaschinen	543
13.4	Berechnungsverfahren	546
13.4.1	Definition der Schleifkenngrößen	546
13.4.2	Zerspankraftkomponenten	548
13.4.3	Mechanik des Schleifvorgangs	549
13.4.4	Zerspanntemperatur	552
13.4.5	Verschleiß der Schleifscheibe und Einfluss des Kühlschmierstoffs	554
13.4.6	Oberflächenrauheit	556
13.5	Schleifwerkzeuge und Werkzeugaufnahme	561
13.5.1	Einleitung	561
13.5.2	Konditionieren	569
13.5.3	Auswuchteinrichtungen	584
13.6	Werkstücke und Werkstückaufnahmen	590
13.6.1	Anspruch an die Aufnahmen beim Schleifen	591
13.6.2	Auswahl der beschriebenen Aufnahmen und Werkstücke	591
13.6.3	Wellenförmige Werkstücke	591
13.6.3.1	Aufnahmen von wellenförmigen Werkstücken mit dem Längen/Durchmesser Verhältnis < 3	592
13.6.3.2	Aufnahmen von wellenförmigen Werkstücken mit dem Längen/Durchmesser Verhältnis > 3	594
13.6.4	Kubische Werkstücke auf Flachsleifmaschinen	597
13.6.5	Spannmittel auf Verzahnungsschleifmaschinen	598
13.7	Bearbeitung auf Schleifmaschinen	600
13.7.1	Plan- und Profilschleifmaschinen	600
13.7.1.1	Einführung	600
13.7.1.1.1	Verwendete Schleifverfahren	600
13.7.1.1.2	Generelle Anforderungen	600
13.7.1.1.3	Führungen	601
13.7.1.1.4	Antriebe	601
13.7.1.1.5	Achsantriebe	601
13.7.1.1.6	Hauptantriebe	601
13.7.1.1.7	Messsysteme	601
13.7.1.1.8	Weitere Maschinenanforderungen	602
13.7.1.2	Längs-Umfangs-Planschleifen (Flachsleifen)	602
13.7.1.2.1	Technologien	602

13.7.1.2.2	Bauformen	604
13.7.1.2.3	Anwendungsbeispiele.....	606
13.7.1.3	Längs-Seiten-Planschleifen (Stirnschleifen, Seitenschleifen).....	608
13.7.1.3.1	Technologie.....	608
13.7.1.3.2	Bauformen	608
13.7.1.3.3	Anwendungsbeispiele.....	610
13.7.1.4	Profilschleifen	611
13.7.1.4.1	Technologien	611
13.7.1.4.2	Bauformen	611
13.7.1.4.3	Anwendungsbeispiele.....	612
13.7.1.5	Schleifzentren und -anlagen.....	613
13.7.1.5.1	Technologien	613
13.7.1.5.2	Bauformen	614
13.7.1.5.3	Anwendungsbeispiele.....	615
13.7.1.6	Steuerungstechnik	615
13.7.1.7	Zubehöre.....	617
13.7.2	Rundschleifmaschinen	620
13.7.2.1	Maschinengrundaufbau von Rundschleifmaschinen.....	620
13.7.2.1.1	Maschinenbetten	620
13.7.2.1.2	Führungen und Achsantriebe.....	623
13.7.2.1.3	Steuerungs- und Programmiersysteme	624
13.7.2.2	Außenrundschleifmaschinen.....	627
13.7.2.3	Innenrundschleifmaschinen.....	634
13.7.2.4	Unrundschleifmaschinen	639
13.7.2.5	Spitzenlose Außenrundschleifmaschinen	643
13.7.2.5.1	Verfahrensbeschreibung	643
13.7.2.5.2	Die Rundheit beim spitzenlosen Schleifen.....	643
13.7.2.5.3	Durchgangsschleifen	648
13.7.2.5.4	Einstechschleifen.....	650
13.7.2.5.5	Klassifikation spitzenloser Außenrundschleifmaschinen	653
13.7.2.5.6	Maschinenaufbau	655
13.7.2.5.7	Arbeitsbereich und Genauigkeit.....	658
13.7.2.5.8	Automatisierung	658
13.7.3	Schraubschleifen	662
13.7.3.1	Schleifprogramme	662
13.7.3.2	Schleifscheibenprofil	662
13.7.3.3	Schleifscheibenspezifikation	663
13.7.3.4	Außenschraubschleifen	664
13.7.3.5	Innenschraubschleifen	664
13.7.4	Zahnflanken-schleifmaschinen	665
13.7.4.1	Einleitung	665
13.7.4.2	Maschinen für das diskontinuierliche Wälzschleifen (Teilwälzschleifen)	665
13.7.4.3	Maschinen für diskontinuierliches Profilschleifen.....	666
13.7.4.4	Maschinen für das kontinuierliche Wälzschleifen.....	667
13.7.4.5	Maschinen zum Verzahnungshonen (Schabschleifen).....	670
13.7.5	Bandschleifen mit Schleifmitteln auf Unterlagen	670
13.7.5.1	Allgemeines.....	670
13.7.5.2	Die Schleifbänder	671
13.7.5.2.1	Die Schleifmittel auf Unterlage	671
13.7.5.2.1.1	Der Herstellungsprozess von Schleifmitteln auf Unterlage	672
13.7.5.2.1.2	Das Schleifkorn als Komponente der Schleifmittel auf Unterlage.....	674
13.7.5.2.1.3	Die Schleifmittelkörnungen.....	678
13.7.5.2.2	Die Trägerwerkstoffe für Schleifmittel auf Unterlage.....	680
13.7.5.2.3	Die Bindemittelsysteme für Schleifmittel auf Unterlage.....	681
13.7.5.2.3.1	Die Schleifbänder	683
13.7.5.3	Das Bandschleifen	685
13.7.5.3.1	Das Werkstück	686
13.7.5.3.2	Das Wirkprinzip des Bandschleifens	687
13.7.5.3.3	Das Bandschleifverfahren	688

13.7.5.3.3.1	Die Arten des Schleifverfahrens	688
13.7.5.3.3.2	Die Kontaktflächen des Schleifverfahrens.....	691
13.7.5.3.3.3	Die Parameter der Bandschleifverfahren	692
13.7.5.3.4	Die Übersicht der Einfluss-faktoren auf das Arbeitsergebnis beim Bandschleifen	693
13.7.5.3.5	Die Störungsursachen beim Bandschleifen	693
13.7.5.4	Die Bandschleifmaschinen.....	695
13.7.5.4.1	Der Aufbau von Bandschleifmaschinen	695
13.7.5.4.1.1	Die Umlenk- und Spannrolle	696
13.7.5.4.1.2	Die Gegendruck- und Niederhalterrollen	696
13.7.5.4.1.3	Die Antriebsmotoren	696
13.7.5.4.1.4	Der Aufbau und die Bedeutung der Stützelemente.....	697
13.7.5.4.2	Die Zerspanbedingungen	700
13.7.5.4.2.1	Die kinematischen Einflussgrößen.....	700
13.7.5.4.2.2	Die schleifaktiven Wirkstoffe und Kühlschmierstoffe	704
13.7.5.5	Praxisbeispiele für das Schleifen mit Schleifbändern	707
13.7.5.5.1	Das Plan-Bandschleifen	708
13.7.5.5.1.1	Das Plan-Bandschleifen von Brennschnittteilen	708
13.7.5.5.1.2	Das Planschleifen von breiten Titanblechen.....	708
13.7.5.5.1.3	Das Planschleifen von Edelstahlcoils vor dem Kaltwalzen.....	710
13.7.5.5.1.4	Das Planschleifen von Platten aus Massivholz und Holzwerkstoffen.....	714
13.7.5.5.2	Das Formschleifen von komplexen Werkstückformen	715
13.7.5.5.2.1	Das Formschleifen von Wasserarmaturen	715
13.7.5.5.2.2	Das Nachformschleifen von Turbinenschaufeln.....	716
13.7.5.5.3	Das Rundschleifen.....	717
13.7.5.5.3.1	Der spitzenlose Rundschliff von Rohren und Stangen	718
13.7.5.5.3.2	Das Außenrundschleifen von Zylindern zwischen den Spitzen	720
13.7.5.5.3.3	Die Schleiffeinstbearbeitung nach dem Außenrundschliff von Tiefdruckzylindern zwischen den Spitzen mit dem „Superfinishverfahren“	721
13.7.5.5.3.4	Das Bandschleifen als Reparaturbearbeitung von Zylindern für die Papierherstellung ...	721
13.7.5.5.3.5	Das Innen- und Außenrundschleifen von Behältern	722
13.7.5.5.3.6	Das Außenrundschleifen von Draht	723
13.7.5.6	Fazit.....	724
13.7.6	Trennschleifmaschinen.....	729
13.7.6.1	Allgemeines.....	729
13.7.6.2	Die Maschine.....	729
13.7.6.3	Das Werkzeug	731
13.7.6.4	Anwendungen des Trennschleifens.....	732
13.7.6.5	Theoretische Kennwerte und Einstellgrößen	734
13.7.6.6	Anforderungen an den Trennprozess	735
13.7.6.6.1	Wirtschaftliche Anforderungen.....	735
13.7.6.6.2	Qualitative Anforderungen	736
13.7.6.6.3	Sicherheitsanforderungen.....	736
13.7.6.7	Umwelt/Lärm und Staubemissionen	737
13.7.6.8	Praxisbeispiele.....	738
13.7.6.9	Aktuelle Trends und Entwicklungen.....	738
13.7.7	Werkzeugschleifen, Werkzeugschleifmaschinen	741
13.7.7.1	Werkzeugschleifmaschinen	741
13.7.7.2	Software	746
13.7.7.3	Bohrerschleifen	746
13.7.7.4	Fräuserschleifen	747
13.7.7.5	Sägeblattschleifen	749
13.7.7.6	Schleifen von Wälzfräsern	750
13.7.7.7	Räumwerkzeugschleifen	751
13.7.7.8	Schleifen von Wendeschneidplatten	752
13.7.7.9	Schleifscheiben und Prozessbedingungen beim Werkzeugschleifen	753
13.7.8	Schleif- und Feinbearbeitungszentren	756
13.7.8.1	Einleitung	756
13.7.8.2	Allgemeine konstruktive Anforderungen.....	756
13.7.8.3	Schleif- und Feinbearbeitungszentren für große und schwere Werkstücke	757

13.7.8.4	Schleif- und Feinbearbeitungszentren für Turbinenschaufeln	760
13.7.8.5	Verfahrensalternativen und -kombinationen für die Hartfeinbearbeitung zylindrischer Werkstücke	762
13.7.8.6	Schleif- und Feinbearbeitungszentren für Wellen und Futterteile	763
13.7.8.7	Verfahrenskombinationen in Werkzeugschleifmaschinen	767
13.7.8.8	Zusammenfassung	769
13.7.9	Sonderschleifmaschinen	772
13.7.9.1	Walzenschleifmaschinen	772
13.7.9.1.1	Bearbeitungsaufgaben von Walzenschleifmaschinen	772
13.7.9.1.2	Maschinenaufbau	773
13.7.9.1.3	Fundamentierung und Aufstellung von Walzenschleifmaschinen	776
13.7.9.1.4	Messtechnik	777
13.7.9.1.5	Vollautomatische Walzenwerkstätten (Roll Shop).....	778
13.7.9.2	Nockenwellenschleifmaschinen.....	778
13.7.9.2.1	Allgemeines.....	778
13.7.9.2.2	Verfahrensspezifische Grundlagen.....	779
13.7.9.2.3	Maschinentechnische Grundlagen	782
13.7.9.3	Kurbelwellenschleifmaschinen	785
13.7.9.3.1	Einleitung	785
13.7.9.3.1.1	Einhübige Kurbelwellen.....	785
13.7.9.3.1.2	Mehrhübige Kurbelwelle.....	785
13.7.9.3.1.3	Besonderheiten bei der Schleifbearbeitung von mehrhübigen Kurbelwellen.....	785
13.7.9.3.2	Einteilung der Kurbelwellenschleifmaschinen.....	785
13.7.9.3.3	Schleifaufgaben an der Kurbelwelle.....	786
13.7.9.3.4	Technologien zum Schleifen von mehrhübigen Kurbelwellen	786
13.7.9.3.4.1	Schleifen der zentrisch angeordneten Mittellager	786
13.7.9.3.4.2	Schleifen der exzentrisch angeordneten Hublager	786
13.7.9.3.4.3	Schleifen der Planschultern und Radien an Hub- und Hauptlagern	787
13.7.9.3.4.4	Schleifen der Planflächen am Passlager	787
13.7.9.3.4.5	Schleifen der Kurbelwellenenden.....	788
13.7.9.3.5	Ausführungen von Maschinen	788
13.7.9.3.5.1	Maschinen für die Mittellagerbearbeitung.....	788
13.7.9.3.5.2	Maschinen für das Hublagerschleifen.....	789
13.7.9.3.5.3	Schleifmaschinen für Großkurbelwellen.....	790
13.7.9.3.6	Messtechnik in Kurbelwellenschleifmaschinen.....	791
13.7.9.3.6.1	In-Prozess-Messen der Hublagerdurchmesser	791
13.7.9.3.6.2	Rundheitsmessung.....	791
13.7.9.3.6.3	Längsausrichten	791
13.7.9.3.6.4	Ermittlung der Winkellage und der Hubhöhe.....	791
13.7.9.3.6.5	Höhenausrichten	791
13.8	Sicherheitseinrichtungen	792
13.8.1	Trennende Schutzeinrichtungen.....	792
13.8.1.1	Arbeitssicherheit	792
13.8.1.2	Gefährdungen an Schleifmaschinen.....	792
13.8.1.3	Dimensionierung	793
13.8.1.4	Fazit	794
13.8.2	Grundlagen Brandschutz an Maschinen.....	795
13.8.2.1	Reduzierung und Vermeidung von Brandschäden	795
13.8.2.2	Aufbau einer Objektlöschanlage	795
13.8.2.3	Funktionsweise einer LA.....	796
13.8.2.4	Zusätzliche Maßnahmen an den Werkzeugmaschinen	797
13.8.3	Emissionsschutz bei WZM durch Öl- und Emulsionsnebelabscheidung im Mikrometerbereich.....	798
13.8.3.1	Bewährte Kompaktabscheider.....	798
13.8.3.2	Flexible Kombinationen.....	799
13.8.3.3	Mehrstufige Elektrostate	799
13.8.3.4	Zentral oder dezentral	800
13.8.3.5	Sonderfall Minimalmengenschmierung	801

13.8.3.6	Fazit.....	802
13.8.4	Spindel- und Achsüberwachung (Kollisionsüberwachung)/sichere Steuerung	803
13.8.4.1	Überwachungsfunktionen: Spindel- und Achsüberwachung.....	803
13.8.4.2	Konturüberwachung/Schleppabstandsüberwachung.....	803
13.8.4.3	Positionierüberwachung (Genauhalt grob/fein), Verzögerungszeit t_v	804
13.8.4.4	Stillstandsüberwachung, Verzögerungszeit t_s	805
13.8.4.5	Klemmungsüberwachung.....	805
13.8.4.6	Drehzahlsollwertüberwachung.....	805
13.8.4.7	Istgeschwindigkeitsüberwachung.....	805
13.8.4.8	Messsystemüberwachung	805
13.8.4.9	Software-Endschalterüberwachung	806
13.8.4.10	Kollisionsvermeidung	807
13.8.4.11	Sichere Steuerung – Safety Integrated	808
14	Honen	811
14.1	Allgemeines	813
14.1.1	Geschichtliches	813
14.1.2	Einleitung und Übersicht der Honverfahren	814
14.2	Langhubhonen.....	816
14.2.1	Langhubhonorvarianten mit Bauteilcharakteristika.....	817
14.2.1.1	Innenrundhonen	817
14.2.1.2	Innenprofilhonen	817
14.2.1.3	Außenrundhonen	817
14.2.1.4	Hybridverfahren.....	818
14.2.2	Verfahrensmerkmale.....	818
14.2.3	Maschinenarten.....	819
14.2.3.1	Vertikal-Langhubhonormaschinen	820
14.2.3.1.1	Baugrößenordnung 1: Maschinen für Kleinserien – Ausführung A: Ø 25 – 370 mm, Ausführung B: Ø 60 – 110 mm.....	820
14.2.3.1.2	Baugrößenordnung 2: Maschinen für Kleinteile Ø 0,6 bis 10 mm.....	821
14.2.3.1.3	Baugrößenordnung 3: Maschinen für kleinere bis mittlere Ø von 8 bis 45 mm.....	823
14.2.3.1.4	Baugrößenordnung 4: Maschine für mittlere bis große Durchmesser von 30 bis 250 mm	823
14.2.3.1.5	Baugrößenordnung 5: Modulare Honbearbeitungszentren von Ø 70 bis 125 mm	824
14.2.3.1.6	Baugrößenordnung 6: Großhonormaschinen für große Ø von 60 bis 1.500 mm.....	826
14.2.3.2	Horizontal-Langhubhonormaschinen	827
14.2.4	Honsysteme: Werkzeug-, Werkstück-Zuordnungen.....	827
14.2.4.1	Verbindungselemente mit Werkzeugaufnahme	829
14.2.4.2	Werkstückaufnahme (Vorrichtung).....	829
14.2.4.2.1	Beispiele von „starrten“ Werkstückaufnahmen gemäß Honsystem A	830
14.2.4.2.2	Beispiele von „schwimmenden“ Werkstückaufnahmen gemäß Honsystem B.....	832
14.2.4.2.3	Beispiele von „kardanischen“ Werkzeugaufnahmen gemäß Honsystem C.....	833
14.2.5	Werkzeugarten	835
14.2.5.1	Innenhonor-Werkzeuge	835
14.2.5.1.1	Leisten-Honorwerkzeuge, zustellbar während des Honens.....	836
14.2.5.1.2	Vollmantelwerkzeuge.....	840
14.2.5.1.3	Honorwerkzeuge für Kleinstbohrungen.....	841
14.2.5.2	Außenhonor-Werkzeuge.....	842
14.2.5.3	Honor-Schneidbeläge	843
14.2.5.3.1	Schneidbeläge mit Diamant und CBN.....	844
14.2.5.3.2	Konstruktive Auslegung von Honorbelägen.....	846
14.2.5.3.3	Aufbereitung von Honorwerkzeugen mit Diamant- und CBN-Leisten-Systemen.....	846
14.2.5.3.4	Konventionelle Schneidstoffe.....	847
14.2.6	Kühlschmierstoff (KSS).....	848
14.2.6.1	Kühlschmierstoffe beim Honen	849
14.2.6.2	Anforderungen an die Kühlschmierstoffe	849

14.2.6.2.1	Prozessanforderungen	850
14.2.6.2.2	Anforderungen und Handling	851
14.2.7	Vertikal-Innenrundhohmaschinen	852
14.2.7.1	Honleisten-Zustellsysteme	852
14.2.7.1.1	Hydraulische Zustellung (kraftschlüssig)	853
14.2.7.1.2	Mechanische Schrittzustellung (formschlüssig)	853
14.2.7.1.3	Doppelzustellsysteme	854
14.2.7.2	Messsysteme an Honmaschinen	854
14.2.7.2.1	Direkt Messsysteme	854
14.2.7.2.2	Indirekt Messsysteme	858
14.2.7.3	Formregelungseinrichtungen	859
14.2.7.4	Berechnungsverfahren	860
14.2.7.4.1	Schnittgeschwindigkeit	860
14.2.7.4.2	Hublänge und Honleistenlänge	862
14.2.7.4.3	Schnittkräfte	862
14.2.7.4.4	Anpressdruck	863
14.2.7.4.5	Oberflächenrauheit	864
14.2.7.4.6	Bearbeitungszugaben und Honzeiten	864
14.2.7.4.7	Zerspanungskennwerte	868
14.2.7.5	Werkstoff- und Bauteilspektrum beim Honen	869
14.2.7.6	Verfahrensvarianten mit Arbeitsbeispielen	870
14.2.7.6.1	Honen kleiner Bohrungen	871
14.2.7.6.2	Dornhonen	873
14.2.7.6.3	Peak-Honen	875
14.2.7.6.4	Plateau-Honen	876
14.2.7.6.5	Koaxialhonen	879
14.2.7.6.6	FMF-Hybridhohverfahren: Honen-Fluidstrahlen-Microfinishes	880
14.2.7.6.7	LH-Hybridhohverfahren: Laserhonen	883
14.2.7.6.8	Positionshonen am Beispiel der Zylinderbohrung	885
14.2.7.6.9	Formhonen am Beispiel Zylinderlaufbahn eines Verbrennungsmotors	886
14.3	Kurzhubhonen	887
14.3.1	Kurzhubhohvarianten nach Bearbeitungsgeometrien und spezifischen Bauteilen	888
14.3.2	Verfahren	889
14.3.2.1	Verfahrensmerkmale	889
14.3.2.2	Berechnungsgrundlagen	889
14.3.2.3	Verfahrensvarianten	890
14.3.2.3.1	Oszillationsfinishes als Einstechverfahren mit Beispielen	890
14.3.2.3.2	Oszillationsfinishes als Durchlauf- und Längsbearbeitung	892
14.3.2.3.3	Rotationsfinishes als Einstechverfahren für Plan- und sphärische Flächen	892
14.3.3	Maschinen	893
14.3.3.1	Zustellsysteme, Werkzeuge mit Schneidmittel	893
14.3.3.2	Kühlschmierstoff (KSS) mit Aufbereitung	894
14.3.3.3	Rotationsfinish-Maschine für Planflächen als Vertikalbearbeitung	895
14.3.3.4	Modulare Rotations-Finishmaschine auch als Feinstbearbeitungszentrum	896
14.3.3.5	Finishmaschine mit Band-Technologie	896
14.3.4	Bearbeitungsbeispiele	898
14.3.5	Kurzhubhoh-Anbaugeräte	898
14.4	Verzahnungshonen	898
14.4.1	Einleitung	898
14.4.2	Geschichtliches	898
14.4.3	Verfahrensvarianten	899
14.4.4	Qualitätsmerkmale	901
14.4.5	Wirtschaftlichkeit	901
14.4.6	Leistungshohmaschine für Verzahnungen	901
14.4.7	Zusammenfassung und Teilespektrum	903

15	Läppen und Polieren	905
15.1	Läppen	907
15.1.1	Grundlagen	907
15.1.2	Trennmechanismen	908
15.1.3	Läppverfahren	910
15.1.3.1	Planläppen	910
15.1.3.2	Rundläppen	911
15.1.3.3	Wälzläppen	912
15.1.3.4	Schraubläppen	912
15.1.3.5	Profilläppen	912
15.1.3.6	Sonderläppverfahren	913
15.1.4	Läppmaschinen	914
15.1.4.1	Einscheiben-Läppmaschinen	914
15.1.4.2	Zweischeibenläppmaschinen	915
15.1.5	Verbrauchsmittel	916
15.1.5.1	Läppscheiben	916
15.1.5.2	Läppmittelträgerflüssigkeit	917
15.1.5.3	Läppmittel (Granulat)	918
15.1.6	Beispiel-Läpp-Prozesse	919
15.1.6.1	Läppen von Hartmetall und kubischem Bornitrid (CBN)	919
15.1.6.2	Doppelseitenläppen von Silicium-Wafern	920
15.1.7	Vor-/Nachteile gegenüber anderen Verfahren	921
15.2	Polieren	921
15.2.1	Grundlagen	921
15.2.1.1	Abrasives Polieren	923
15.2.1.2	Laserpolieren	924
15.2.1.3	Magneto-rheologisches Polieren (MRF)	924
15.2.1.4	Chemo-mechanisches Polieren (CMP)	924
15.2.1.5	Chemisches Polieren	925
15.2.1.6	Elektropolieren	925
15.2.1.7	Strömungspolieren	926
15.2.1.8	Ionenstrahlpolieren	926
15.2.1.9	Ultrapräzisionspolieren/Float Polishing	927
15.2.2	Verbrauchsmittel	928
15.2.2.1	Poliermittelträger	928
15.2.2.2	Poliermittel	929
15.2.3	Polieren von großen, flächigen Bauteilen	930
16	Spanende Verzahnungsfertigung	933
16.1	Allgemeines	935
16.2	Bestimmungsgrößen und Benennungen	938
16.2.1	Zylinderräder	938
16.2.2	Kegelräder	941
16.2.3	Schnecken	944
16.2.4	Schneckenräder	946
16.3	Übersicht über die spanenden Verzahnmaschinen	947
16.3.1	Wälzfräsmaschinen	947
16.3.2	Profilfräsmaschinen	951
16.3.3	Wälzhobel- und Wälzstoßmaschinen	951
16.3.4	Zahnradräummaschinen	954
16.3.5	Wälzschälmaschinen	956
16.3.6	Zahnradschabmaschinen	957
16.3.7	Wälzschleifmaschinen	959
16.3.8	Profilschleifmaschinen	965

16.3.9	Zahnradhonmaschinen	968
16.3.10	Maschinen zur Herstellung von Kegelrädern.....	970
16.3.11	Maschinen zur Herstellung von Schnecken	976
16.4	Bearbeitung auf Fräsmaschinen.....	979
16.4.1	Wälzfräsen von Zylinderrädern	979
16.4.1.1	Werkzeuge	979
16.4.1.2	Technologien.....	981
16.4.2	Profilfräsen von Zylinderrädern	987
16.4.2.1	Werkzeuge	988
16.4.2.2	Technologien.....	989
16.4.3	Fräsen von Kegelrädern	989
16.4.3.1	Grundlagen	989
16.4.3.2	Fräsverfahren und Werkzeuge	991
16.4.4	Herstellen von Schnecken	995
16.4.5	Herstellen von Schneckenrädern	998
16.5	Bearbeitung auf Hobel- und Stoßmaschinen.....	1001
16.5.1	Herstellen von Zylinderrädern.....	1001
16.5.2	Herstellen von Kegelrädern.....	1001
16.6	Bearbeitung auf Schabmaschinen	1002
16.6.1	Werkzeuge	1003
16.6.2	Technologien.....	1003
16.7	Bearbeitung auf Schleifmaschinen.....	1006
16.7.1	Herstellen von Zylinderrädern.....	1006
16.7.1.1	Teilwälzschleifen.....	1006
16.7.1.2	Kontinuierliches Wälzschleifen.....	1009
16.7.1.3	Profilschleifen.....	1013
16.7.1.3.1	Technologie.....	1014
16.7.1.3.2	Werkzeuge	1015
16.7.1.3.3	Maschinenaufbau.....	1017
16.7.1.4	Verzahnungshonen.....	1019
16.7.2	Herstellen von Kegelrädern.....	1022
17	Spanende Gewindefertigung	1025
17.1	Grundlagen und Berechnung von Gewinden	1027
17.2	Verfahren der Gewindefertigung.....	1034
17.2.1	Gewindebohren	1034
17.2.1.1	Gewindebohren: Technologie.....	1034
17.2.1.2	Gewindebohren: Werkzeuge	1038
17.2.1.3	Schneidstoffe	1041
17.2.2	Gewindefurchen	1042
17.2.2.1	Gewindefurcher: Technologie	1042
17.2.2.2	Gewindefurcher: Werkzeuge.....	1044
17.2.2.3	Sonderverfahren Cut&Form.....	1045
17.2.3	Gewindefräsen.....	1047
17.2.3.1	Profilkorrektur am Gewindefräser	1048
17.2.3.2	Gewindefräsertypen	1048
17.2.3.3	Gewindefräsfurchen	1052
17.2.4	Gewindewirbeln	1053
17.2.4.1	Außenwirbeln	1053
17.2.4.2	Innenwirbeln	1054
17.2.4.3	Werkzeuge	1054
17.2.4.4	Praxisbeispiele	1055
17.2.5	Gewindedrehen	1057
17.2.6	Gewindestrehlen	1060

17.3	Maschinen zur Gewindefertigung.....	1061
17.4	Gewindeschneidfutter und -schneidapparate sowie deren Werkzeugspannsysteme.....	1064
17.4.1	Allgemeines	1064
17.4.2	Gewindeschneidfutter mit Längenausgleich	1064
17.4.3	Gewindeschneidfutter mit achsparalleler Pendelung	1065
17.4.4	Gewindeschneidfutter mit Längenausgleich und zusätzlichem Druckpunktmechanismus.....	1065
17.4.5	Gewindeschneidfutter mit Längenausgleich und zusätzlichem Zugaurastungsmechanismus.....	1065
17.4.6	Gewindeschneidfutter mit Minimallängenausgleich von einigen Zehntelmillimetern	1067
17.4.7	Gewindeschneidapparate	1067
17.4.8	Werkzeugspannsysteme für Gewindeschneidfutter und Gewindeschneidapparate.....	1068
18	Fertigen auf getakteten und flexiblen Maschinensystemen.....	1071
18.1	Einführung.....	1073
18.1.1	Zur Entwicklung flexibler Fertigungssysteme.....	1073
18.1.2	Agile Systeme, Hybridsysteme und rekonfigurierbare Maschinensysteme.....	1076
18.1.2.1	Agile Systeme	1076
18.1.2.2	Hybridsysteme.....	1076
18.1.2.3	Rekonfigurierbare Maschinensysteme.....	1076
18.2	Rundtaktmaschinen.....	1077
18.2.1	Vergleich klassischer und flexibler Rundtaktmaschinen.....	1078
18.2.2	Typische Werkstücke für Rundtaktmaschinen	1080
18.2.3	Konstruktiver Aufbau von Rundtaktmaschinen	1080
18.2.3.1	Bearbeitungseinheiten	1080
18.2.3.2	Mittenbaugruppe.....	1084
18.2.4	Werkstückbe- und -entladung.....	1086
18.2.5	Steuerungstechnik.....	1086
18.2.6	Integration von Sondertechnologien	1087
18.2.7	Rundtaktmaschinen in verketteten Systemen	1088
18.3	Transfermaschinen.....	1089
18.3.1	Aktueller Einsatzbereich von Transfermaschinen	1089
18.3.2	Konstruktiver Aufbau von Transfermaschinen.....	1090
18.3.2.1	Werkstücktransport.....	1090
18.3.2.2	Bearbeitungseinheiten	1092
18.3.2.3	Spindeleinheiten	1093
18.4	Transferzentren.....	1094
18.4.1	Allgemeines	1094
18.4.2	Kinematik und konstruktiver Aufbau.....	1095
18.4.3	Mehrspindelköpfe und andere Baueinheiten	1096
18.4.4	Varianten.....	1097
18.4.5	Technologieintegration	1098
18.4.6	Prozesse.....	1098
18.4.7	Automatisierung.....	1098
18.4.8	Einsatzbereiche	1100
18.4.9	Ressourcenschonung.....	1100
18.4.10	Wirtschaftlichkeit	1100
18.5	Verkettete Mehrmaschinensysteme	1101
18.5.1	Verkettungsarchitekturen	1101
18.5.1.1	Sequenzielle Architektur	1102
18.5.1.2	Parallele Architektur	1102
18.5.1.3	Vergleich sequenzielle/parallele Architektur	1102
18.5.1.4	Flexible Architektur	1105
18.5.2	Bearbeitungseinheiten	1106
18.5.2.1	1-spindlige Bearbeitungszentren.....	1106

18.5.2.2	2-spindlige Bearbeitungszentren.....	1109
18.5.2.3	Prozess-Bearbeitungsmodule.....	1110
18.5.2.4	Sonderbearbeitungsstationen.....	1110
18.5.3	Beladungskonzepte.....	1111
18.5.3.1	Beladung mit Palettenwechsler.....	1111
18.5.3.2	Beladung mit Werkstückwechsler.....	1112
18.5.3.3	Beladung direkt in den Arbeitsraum.....	1112
18.5.4	Spannen von Werkstücken.....	1113
18.5.4.1	Direktes Spannen.....	1114
18.5.4.2	Spannen mit Adaptern.....	1114
18.5.4.3	Spannen mit 0-Punkt-Spannsystemen.....	1115
18.5.5	Handhabung von Werkstücken.....	1116
18.5.5.1	Manuelle Handhabung.....	1116
18.5.5.2	Automatische Handhabung.....	1117
18.5.6	Qualitätsmanagement.....	1120
18.5.7	Simulation von Fertigungssystemen.....	1121
18.5.7.1	NC-Simulation.....	1122
18.5.7.2	Materialfluss-Simulation.....	1123
18.6	Industrie 4.0.....	1124
II	Abtragen.....	1127
1	Grundlagen zum Abtragen.....	1129
1.1	Geschichtliche Entwicklung.....	1131
1.2	Einteilung der abtragenden Fertigungsverfahren.....	1133
2	Thermisches Abtragen, thermisches Trennen.....	1141
2.1	Funkenerosion.....	1143
2.1.1	Allgemeines.....	1143
2.1.2	Übersicht der Verfahren.....	1144
2.1.2.1	Funkenerosives Senken.....	1145
2.1.2.2	Funkenerosives Schneiden.....	1149
2.1.3	Oberflächenbeschaffenheit.....	1151
2.1.4	Anwendung.....	1154
2.2	Laser.....	1155
2.2.1	Laserstrahlung.....	1155
2.2.2	Laserprinzip.....	1156
2.2.2.1	Aktives Medium.....	1156
2.2.2.2	Optische Resonatoren.....	1158
2.2.3	Laser-Moden.....	1159
2.2.3.1	Der Gauß'sche Strahl.....	1159
2.2.3.2	Moden höherer Ordnung.....	1160
2.2.3.3	Strahlqualität.....	1160
2.2.3.4	Fokussierung Gauß'scher Strahlen.....	1160
2.2.4	Wärmeleitung.....	1163
2.2.5	Lasertypen.....	1163
2.3	Ionenstrahlverfahren in der Fertigungstechnik.....	1166
2.3.1	Grundlagen von Ionenstrahlverfahren.....	1167
2.3.1.1	Wechselwirkung von Ionenstrahlen mit Materialoberflächen.....	1167
2.3.1.2	Übersicht zu Ionenstrahlquellen.....	1168
2.3.2	Anwendungen von Ionenstrahlverfahren in der Fertigungstechnik.....	1173
2.3.2.1	Einsatz von Breitstrahlionenquellen in Mikrosystemtechnik, Sensorik und Optik.....	1174
2.3.2.1.1	Verfahren zur Mikrostrukturierung mit Ionenstrahlen.....	1175
2.3.2.1.2	Scanverfahren zur lokalen Korrektur von Oberflächeneigenschaften.....	1176
2.3.2.1.3	Ionenstrahlverfahren zur Abscheidung von Mehrlagen-Präzisionsschichten.....	1177

2.3.2.2	Fokussierte Ionenstrahlen zur Nachbearbeitung von Schneidkanten	1178
2.3.2.3	Anwendung von fokussierten Ionenstrahlverfahren in Präparation und Analytik	1181
2.3.3	Ausblick.....	1183
3	Elektrochemisches Abtragen	1185
3.1	Senken	1187
3.1.1	Allgemeines, fertigungstechnische Grundlagen	1187
3.1.1.1	Verfahrenseinordnung	1187
3.1.1.2	Fertigungstechnische Grundlagen	1189
3.1.2	Verfahrensvarianten.....	1193
3.1.2.1	Profilabtragen an prismatischen Werkstücken.....	1193
3.1.2.2	Profilabtragen an rotationssymmetrischen Teilen	1196
3.1.2.3	Elektrochemisches Bohren	1199
3.1.3	Elektrolyte	1200
3.1.4	Werkzeuge und Vorrichtungen	1203
3.1.5	Anlagentechnik	1204
3.1.5.1	Aufbau und Ausstattung	1204
3.1.5.2	Elektrochemisches Abtragen an prismatischen Werkstücken	1207
3.1.5.3	Elektrochemisches Abtragen an rotationssymmetrischen Werkstücken	1208
3.1.6	Generatoren	1208
3.1.6.1	Grundlagen	1208
3.1.6.2	Generatorentypen	1209
3.1.6.2.1	Stromversorgung.....	1209
3.1.6.2.2	Frequenzumrichtertechnologie.....	1210
3.1.6.2.3	Geregelte und ungeregelte Generatoren	1210
3.1.6.2.4	Generatoren im Pulsbetrieb	1211
3.1.6.2.5	Generatorenkonzepte	1212
3.1.6.2.6	Elektrochemische Generatoren mit geregelten und gesteuerten Achsen.....	1212
3.1.7	Messtechnik	1213
3.1.8	Werkstückhandling, Peripherie.....	1214
3.1.9	Umweltbeeinflussung, Arbeitsschutz	1216
3.2	Entgraten.....	1218
3.2.1	Allgemeines, wirtschaftliche und fertigungstechnische Grundlagen.....	1218
3.2.2	Verfahrensprinzip.....	1219
3.2.3	Vorteile des Verfahrens und Einsatzmöglichkeiten	1220
3.2.4	Wesentliche Verfahrensparameter	1221
3.2.5	Elektrolyte	1222
3.2.6	Vorrichtungen	1222
3.2.7	Anlagentechnik	1224
3.2.8	Peripherie.....	1226
3.3	Polieren.....	1228
3.3.1	Elektrochemisches Polieren	1228
3.3.2	Plasmaelektrolytisches Polieren.....	1230
III	Sonderverfahren	1235
1	Bearbeiten von schwer zerspanbaren Werkstoffen	1237
1.1	Einleitung.....	1239
1.2	Trennen von faserverstärkten Kunststoffen	1241
1.2.1	Bearbeitungsfehler und Bearbeitungsqualität.....	1241
1.2.2	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide.....	1242
1.2.2.1	Verschleiß und Schneidstoffe.....	1242
1.2.2.2	Fräsen	1242
1.2.2.2.1	Einfluss der Faserorientierung	1243
1.2.2.2.2	Einfluss der Prozessparameter	1243

1.2.2.2.3	Werkzeuge	1243
1.2.2.3	Bohren.....	1244
1.2.2.3.1	Delamination.....	1244
1.2.2.3.2	Bestimmung der Schädigung	1245
1.2.2.3.3	Strategien zur Reduzierung der bearbeitungsinduzierten Schädigungen.....	1245
1.2.2.4	Drehen	1247
1.2.2.5	Einspannen von faserverstärkten Kunststoffen bei der Zerspanung	1248
1.2.3	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	1248
1.2.3.1	Schleifen.....	1248
1.2.3.2	Wasserstrahlschneiden.....	1248
1.2.4	Abtragen.....	1250
1.2.4.1	Abtragen mit Laserstrahlen.....	1250
1.2.4.2	Funkenerosives Abtragen (EDM).....	1250
1.2.5	Zusammenfassung.....	1251
1.3	Schwermetalle	1253
1.3.1	Vorbemerkungen	1253
1.3.2	Wolfram.....	1253
1.3.2.1	Werkzeugauslegung	1254
1.3.2.2	Materialwahl.....	1255
1.3.2.3	Schneidstrategie.....	1255
1.3.2.4	Kühlschmierstrategie.....	1255
1.3.3	Wolframlegierungen.....	1255
1.3.3.1	Werkzeugauslegung	1256
1.3.3.2	Schneidstrategien	1256
1.3.3.3	Anwendung.....	1257
1.3.4	Molybdän und seine Legierungen	1257
1.3.4.1	Werkzeugauslegung	1257
1.3.4.2	Materialwahl.....	1257
1.3.4.3	Schneidstrategien	1258
1.3.4.4	Kühlschmierstrategie.....	1258
1.3.4.5	Anwendung.....	1259
1.3.5	Tantallegierungen	1259
1.3.5.1	Werkzeugauslegung	1259
1.3.5.2	Materialwahl.....	1259
1.3.5.3	Schneidstrategien	1259
1.3.5.4	Kühlschmierstrategie.....	1259
1.3.5.5	Anwendung.....	1259
1.4	Nickelbasislegierungen	1260
1.4.1	Hauptgruppen der Nickellegierungen	1260
1.4.2	Anwendungen der Nickelbasislegierungen.....	1261
1.4.3	Zerspanbarkeit von Nickellegierungen	1263
1.4.4	Schneidstoffe und Einsatz-parameter für das Drehen.....	1263
1.4.5	Fräsen und Bohren von Nickellegierungen	1267
1.4.6	Räumen von Nickellegierungen.....	1269
1.4.7	Schleifen von Nickellegierungen.....	1269
1.5	Titanwerkstoffe	1271
1.5.1	Reines Titan	1271
1.5.2	Titanlegierungen.....	1272
1.5.3	Zerspanbarkeit von Titanlegierungen und Titanaluminiden.....	1274
1.5.4	Fräsen und Bohren von Titanlegierungen.....	1277
1.5.5	Räumen von Titanlegierungen.....	1279
1.5.6	Schleifen von Titanlegierungen und Titanaluminiden.....	1280
1.6	Keramische Werkstoffe.....	1283
1.6.1	Oxide.....	1283
1.6.1.1	Aluminiumoxid.....	1283
1.6.1.2	Zirkonoxid.....	1284

1.6.2	Nichtoxide	1284
1.6.2.1	Carbide.....	1284
1.6.2.2	Nitride.....	1284
1.6.3	Herstellverfahren der Hochleistungskeramik.....	1284
1.6.3.1	Pulversynthese	1284
1.6.3.2	Masseaufbereitung	1285
1.6.3.3	Formgebung.....	1285
1.6.3.4	Grünbearbeitung.....	1286
1.6.3.5	Weißbearbeitung.....	1286
1.6.3.6	Sintern	1286
1.6.4	Endbearbeitung	1286
1.6.4.1	Schleifen	1286
1.6.4.2	Übersicht der Industriell eingesetzten Hartbearbeitungsverfahren.....	1289
1.6.4.3	Rundschleifverfahren	1294
1.6.4.4	Bohrungsbearbeitung.....	1295
1.6.4.5	Steigerungen der Oberflächengüte und der Ebenheit	1297
1.6.4.6	Erreichbare Genauigkeiten und Oberflächengüten	1298
1.6.4.7	Beispiele von Bauteilen.....	1298
1.6.4.8	Ausblick.....	1299
2	Mikrofertigung	1301
2.1	Grundlagen	1303
2.1.1	Einführung.....	1303
2.1.2	Mikrozerspanung.....	1304
2.2	Verfahren in der Mikrofertigung.....	1305
2.2.1	Mikrodrehen	1305
2.2.1.1	Hochpräzisionsdrehen	1305
2.2.1.2	Ultrapräzisionsdrehen.....	1308
2.2.2	Mikrofräsen.....	1310
2.2.2.1	Anwendung.....	1310
2.2.2.2	Werkzeugmaschinen.....	1311
2.2.2.3	Werkzeuge und bearbeitbare Werkstückwerkstoffe.....	1312
2.2.2.4	Bearbeitungsstrategien	1313
2.2.2.5	Spanbildung.....	1314
2.2.2.6	Hilfsmittel zur Beurteilung der Fertigungsqualität.....	1315
2.2.3	Mikroschleifen.....	1315
2.2.3.1	Anwendungen.....	1316
2.2.3.2	Werkzeugmaschinen.....	1316
2.2.3.3	Werkzeuge	1317
2.2.3.4	Technologie	1318
2.2.4	Mikroerodieren.....	1320
2.2.4.1	Einleitung	1320
2.2.4.2	Werkzeugmaschinen.....	1320
2.2.4.3	Mikrodrahterosion	1321
2.2.4.4	Mikrosenkerosion	1322
2.2.4.5	Mikrobohrosion	1322
2.2.4.6	Mikrobahnerosion.....	1323
2.2.4.7	Mikrodrahterosion mit rotierender Werkstückelektrode (WEDG).....	1324
2.2.5	Laserbearbeitung	1328
2.2.6	LIGA-Technik.....	1332
2.2.6.1	Überblick	1332
2.2.6.2	Tiefenlithografie mit Synchrotronstrahlung.....	1333
2.2.6.3	Galvanoformung.....	1338
2.2.6.4	Abformung	1343
2.2.6.5	Ausblick.....	1345
	Index.....	1347

13.7.2.5 Spitzenlose Außenrundsleifmaschinen

Karsten Otto

13.7.2.5.1 Verfahrensbeschreibung

Das spitzenlose Außenrundsleifen ist nach DIN 8589, Teil 11 ein Verfahren zur Serien- und Massenfertigung von zylindrischen, konischen und balligen Werkstücken (Abb. 13.175). Man unterscheidet beim spitzenlosen Schleifen grundsätzlich zwischen zwei Verfahrensvarianten, dem Durchgangsschleifen (auch Durchlaufschleifen genannt) und dem Einstechschleifen. Letzteres wird für die Bearbeitung von Werkstücken mit abgesetzten oder profilierten Mantelflächen wie z. B. Düsenadeln, Zapfenkreuze, Ventile, Getriebewellen und Kompressorkurbelwellen eingesetzt. Im Durchgangsschleifen werden nicht profilierte Werkstücke, wie z. B. Ringe, Stangen, Zylinder und Kegelrollen sowie Hydraulikschieber bearbeitet.

Im Gegensatz zu den anderen Rundsleifverfahren wird das Werkstück hierbei nicht kraftschlüssig eingespannt. Stattdessen befindet es sich im sogenannten Schleifspalt zwischen der Schleifscheibe und der Regelscheibe auf einer Werkstückauflage (Abb. 13.176). Schleif- und Regelscheibe haben die gleiche Rotationsrichtung, jedoch unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten. Die Schleifscheibe ist im Schleifprozess für die Zerspanung und den Antrieb der Werkstücke ursächlich. Die Werkstückauflage und die langsam rotierende Regelscheibe bremsen durch ihren Reibkontakt das Werkstück soweit ab, dass, von einem geringen Schlupf abgesehen, die Umfangsge-



Abb. 13.175: Werkstückbeispiele für das spitzenlose Außenrundsleifen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

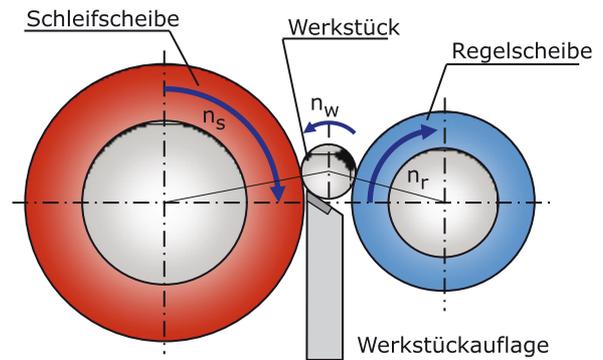


Abb. 13.176: Prinzip des spitzenlosen Außenrundsleifens

schwindigkeiten von Regelscheibe und Werkstück gleich sind. Das spitzenlose Schleifen erfolgt im Gleichlauf. Somit wird eine ausreichend hohe Tangentialkraft zwischen Werkstück und Regelscheibe erzeugt und dadurch das rotatorische Durchrutschen der Werkstücke verhindert. Besonders positiv wirken sich hierbei Regelscheiben mit einem hohen Reibkoeffizienten aus (z. B. Normalkorund in Gummibindung).

Werkstückauflage und Regelscheibe stützen das Werkstück auf seiner Länge bzw. einem wesentlichen Teil seiner Länge ab und nehmen die auftretenden Zerspanungskräfte auf. Durch diese stabile Abstützung können selbst biegeschlanke Werkstücke mit hohen Zeitspanvolumina in sehr guter Qualität bearbeitet werden.

Das spitzenlose Schleifen ermöglicht gegenüber anderen Rundsleifverfahren einen Vorteil in der Fertigungsgenauigkeit. Der eingestellte Zustellbetrag entspricht beim spitzenlosen Schleifen der Durchmesserabnahme des Werkstückes. Beim Schleifen zwischen den Spitzen bzw. im Futter entspricht der Zustellbetrag der doppelten Durchmesserabnahme. Setzt man eine gleiche Zustellgenauigkeit der Maschinenachsen voraus, so ist die Grundgenauigkeit des Verfahrens doppelt so hoch (Abb. 13.177). Demzufolge wirken sich Zustellfehler, welche z. B. durch Schleifscheibenverschleiß oder thermische Verlagerungen der Maschine auftreten, nur halb so stark aus.

13.7.2.5.2 Die Rundheit beim spitzenlosen Schleifen

Durch die gleichzeitige Bearbeitung und Lagerung am Mantel des Werkstückes treten beim spitzenlosen Schleifen sogenannte Polygoneffekte auf. Darunter versteht man die Ausbildung von Rundheitsfehlern auf dem Werkstückumfang. Dieser regenerative Effekt wird durch Schnitttiefenänderungen an der Schleifscheibe bewirkt. Die Ursachen des Rundheitsfehlers sind geometrische

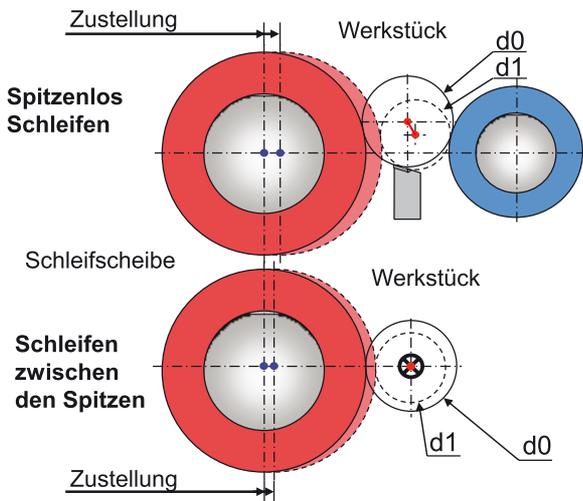


Abb. 13.177: Hohe Grundgenauigkeit des Verfahrens (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

und dynamische Instabilitäten. Dynamische Instabilitäten können durch die Maschine, die Werkzeuge, das Werkstück selbst, die Prozessparameter sowie durch äußere Störeinflüsse erzeugt werden. Rundheitsfehler bilden sich nie als Folge einer Instabilität aus. Es liegen immer mehrere Ursachen vor, die zusammen wirken und sich gegenseitig beeinflussen.

Die Schleifmaschine sollte einen stabilen Nachgiebigkeitsfrequenzgang (Abb. 13.178), möglichst ohne Reso-

nanzstellen, haben. In der heutigen Zeit wird dies durch FEM Simulationen während der Konstruktion und durch Modalanalysen an der Maschine und anschließender Optimierungen realisiert. Optimierte Frequenzgänge weisen keine ausgeprägten Maxima in der Nachgiebigkeit bei gleichzeitigem Abfall im Phasengang durch -90° auf.

Bei zu hohen Zeitspannungsvolumen oder falsch ausgelegten bzw. falsch abgerichteten Schleifscheiben treten Schwingungen beim Schleifen auf. Die sich dadurch periodisch ändernde Zustellung am Werkstück erzeugt Unrundheiten. Auch das Werkstück selbst kann durch seine Geometrie die Ursache für Rundheitsfehler sein. Unrundheiten können beim Überschleifen von Verzahnungen, Querbohrungen und Nuten sowie beim Bearbeiten von Werkstücken mit Unwucht entstehen.

Um den Einfluss der geometrischen Rundheitsfehlerausbildung näher zu erläutern, kann man sich ein Werkstück vorstellen, welches auf seinem Umfang nur eine Erhebung hat (Abb. 13.179). Beginnt das Werkstück im Schleifspalt zu drehen (Position 1), wird eine solche Erhebung zu einem gewissen Zeitpunkt in Kontakt mit der Werkstückauflage (Position 2) kommen. Die Erhebung bewirkt, dass das Werkstück im Schleifspalt nach oben angehoben wird. Das führt unweigerlich zu einer abrupten Zustellungsänderung an der Schleifscheibe. Wenn sich die Erhebung an der Werkstückauflage vorbei gedreht hat, sinkt das Werkstück wieder ab und die Zustellung

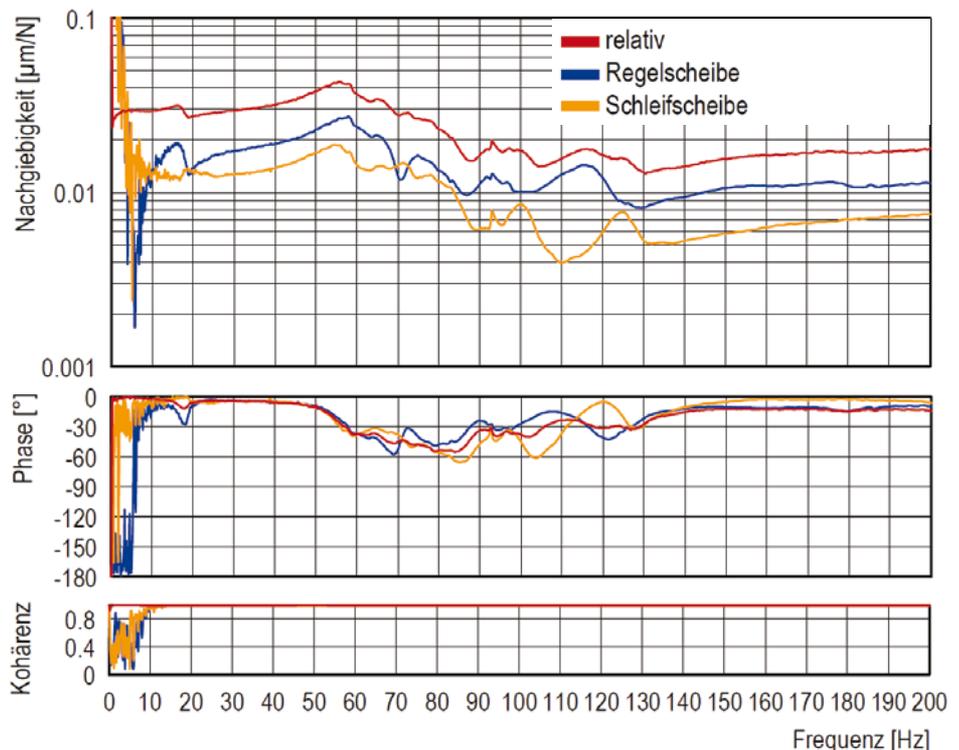


Abb. 13.178: Nachgiebigkeitsfrequenzgang (Quelle: Planlauf GmbH)

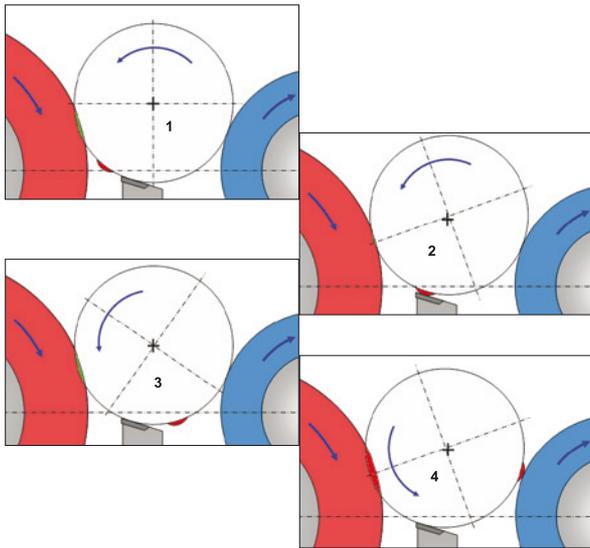


Abb. 13.179: Entstehung von Polygoneffekten (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

ändert sich erneut. Das Werkstück hat auf Grund dieser Zustellungsänderung an der Schleifscheibe auf seinem Umfang einen Rundheitsfehler erhalten. Dreht sich das Werkstück weiter, kommt die Erhebung mit der Regelscheibe (Position 4) in Kontakt. Das Werkstück wandert in Richtung Schleifscheibe. Dadurch wird eine erneute Zustellungsänderung hervorgerufen und ein weiterer Rundheitsfehler entsteht. Somit kommt es bei nur einer angenommenen Erhebung auf dem Werkstückumfang innerhalb einer einzigen Werkstückumdrehung zu mindestens zwei neuen Rundheitsfehlern. Die neu entstandenen Rundheitsfehler bewirken die gleichen zuvor beschriebenen Effekte.

Der Rundheitsfehler stellt sich als Überlagerung von Polygonen dar (Abb. 13.180). Die Amplitude der Polygone ist abhängig von der Schleifscheibeneindringtiefe und ih-



Abb. 13.180: Überlagerung von Polygonen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

rer Wellenzahl. Polygone mit niedriger Wellenzahl bilden die größten Rundheitsfehler aus.

Um diesen Rundheitsfehler abzubauen, sind spezielle geometrische Einstellungen im Schleifspalt notwendig. Entscheidend hierfür ist die Größe der Winkelverhältnisse der Kontaktpunkte zwischen Werkstück und Schleifscheibe, zwischen Werkstück und Werkstückauflage sowie zwischen Werkstück und Regelscheibe (Abb. 13.181), die als Winkel φ_1 und φ_2 definiert sind. Mit Hilfe dieser Winkel lässt sich der Stabilitätsindex SI für jedes Polygon und jede Einstellung berechnen. Der Stabilitätsindex gibt Auskunft, ob sich ein Polygon einer bestimmten Ordnung beim Schleifen verbessert (abbaut) oder verschlechtert (Abb. 13.182).

Eine geometrisch stabile Einstellung ist erreicht, wenn der Stabilitätsindex aller betrachteten Polygone positiv ist. In der Praxis werden dabei vorzugsweise die Polygone von 2 bis 30 überprüft. Häufig weisen jedoch ein oder mehrere Polygone negative Werte auf. Das Polygon mit dem kleinsten Stabilitätsindex (im Folgenden mit w bezeichnet) sollte sich dementsprechend am stärksten ausprägen. Jedoch haben Versuche und energetische Überlegungen gezeigt, dass häufig die energetisch günstigeren niedrigen Polygonordnungen mit negativem Stabilitätsindex dominieren. Dementsprechend ist eine geometrisch instabile Einstellung mit $w > 15$ einer Einstellung mit

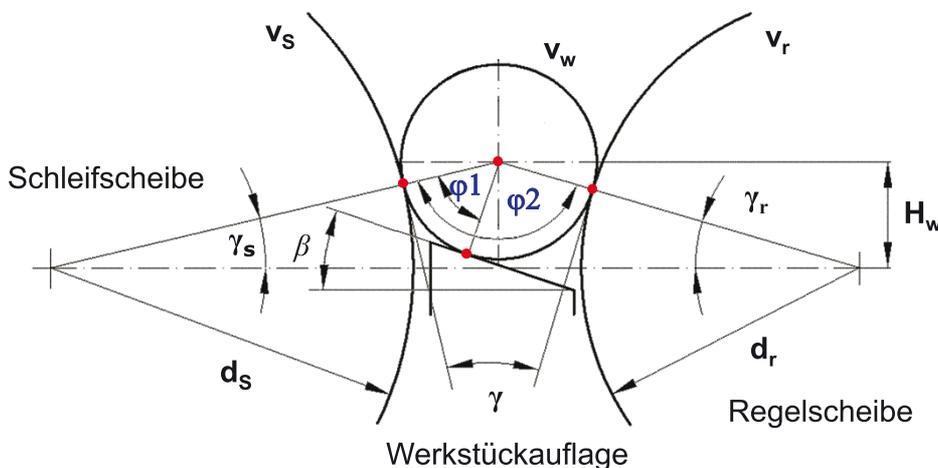
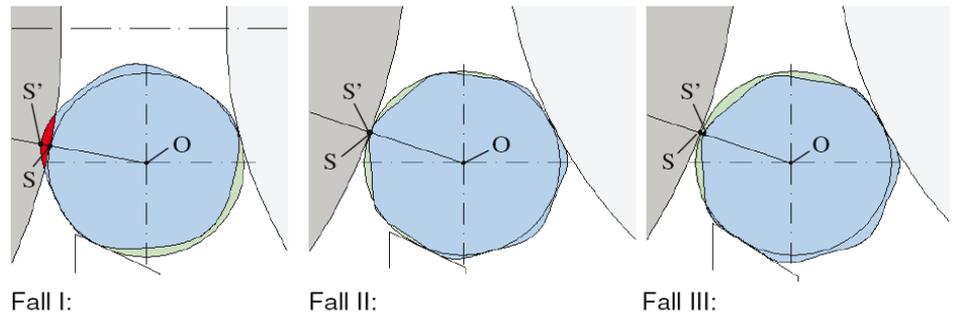


Abb. 13.181: Kontaktverhältnisse im Schleifspalt (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



- Fall I $SI(z) > 0 \rightarrow$ Polygon wird abgebaut
- Fall II $SI(z) = 0 \rightarrow$ Polygon wird nicht abgebaut
- Fall III $SI(z) < 0 \rightarrow$ Polygon wird größer

Abb. 13.182: Der Stabilitätsindex (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

$w < 15$ vorzuziehen, da der Einfluss kleinerer Polygonformen auf den Rundheitsfehler wesentlich höher ist. Der Stabilitätsindex berechnet sich wie folgt (Reeka 1967):

$$SI_{(z)} = 1 + \frac{\sin(\varphi_1) \cdot \cos(z \cdot \varphi_2) - \sin(\varphi_2) \cdot \cos(z \cdot \varphi_1)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (13.53).$$

Z steht für die Eckenzahl des jeweils einzeln zu berechnenden Polygons. Zur besseren Übersicht können die Ergebnisse in einem Diagramm dargestellt werden (Abb. 13.183).

Eine solche Darstellung zeigt jedoch nur die Auswertung einer geometrischen Konfiguration. Um einen besseren Gesamtüberblick zu erreichen, kommen Stabilitätskarten zum Einsatz. Diese enthalten eine große Anzahl von geometrischen Einstellungen und Ergebnissen. Auf Grund der Übersichtlichkeit muss der Informationsgehalt der Stabilitätskarten im Vergleich zu dem in Abbildung 13.183 gezeigten Säulendiagramm reduziert wer-

den. Zusätzlich wird nur das Polygon mit dem niedrigsten Stabilitätsindex dargestellt. Somit wird sichtbar, ob die jeweilige geometrische Einstellung stabil oder instabil ist. Im Laufe der Zeit wurden mehrere Arten von Stabilitätskarten entwickelt, wobei sich deren Nutzungsmöglichkeiten und Auswertung erheblich unterscheiden. Die wichtigsten universellen Karten sind die von Reeka (Reeka 1967) und Mais (Mais 1980). Spezielle Stabilitätskarten wurden durch die Softwaresysteme „Cegris“ und „Heureka“ generiert (Abb. 13.184). So zeigt die Färbung der Stabilitätskarte „Heureka“ die Größe des minimalen Stabilitätsindex an. Die roten Bereiche sind instabil ($SI < 0$), der gelbe Bereich hat einen Stabilitätsindex von Null und die grünen und blauen Bereiche zeigen Einstellungen mit einem positiven Stabilitätsindex.

Nach der Auswahl eines geeigneten Arbeitspunktes kann man die notwendigen Einstellparameter für die Maschine, den Winkel der Werkstückauflage β und die Höhenlage des Werkstückes H_w , aus der Stabilitätskarte entnehmen.

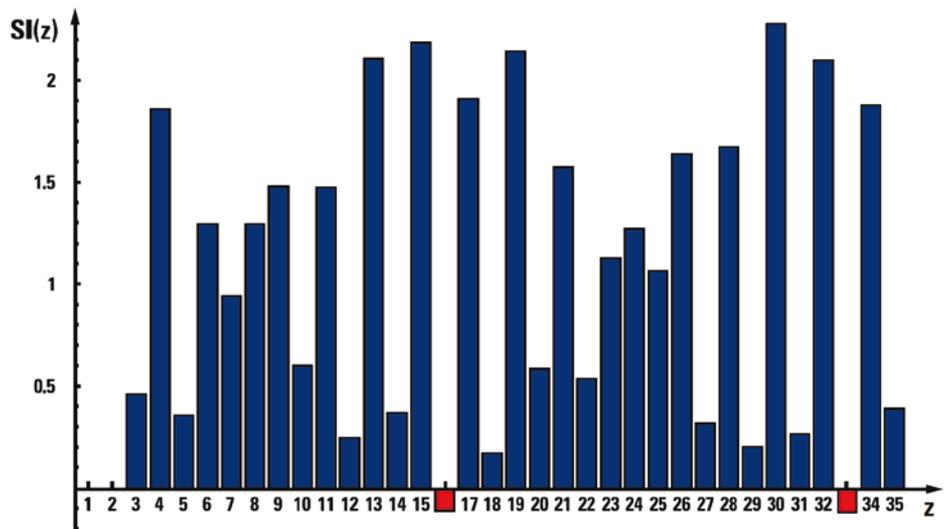


Abb. 13.183: Stabilitätsindex über die Polygonordnung z (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

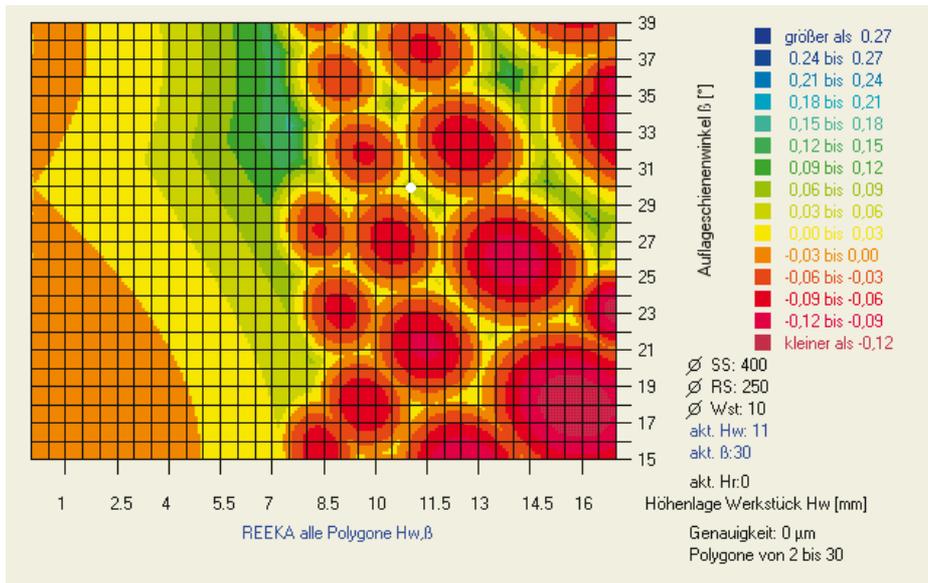


Abb. 13.184: Stabilitätskarte Heureka (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Hat die gewählte Höhenlage H_w einen positiven Wert spricht man vom „Schleifen über Mitte“. In diesem Fall befindet sich der Werkstückmittelpunkt oberhalb der Verbindungslinie der Mittelpunkte von Schleif- und Regelscheibe (Abbildung 69). Schleift man unterhalb dieser Verbindungslinie hat die Höhenlage H_w einen negativen Wert und man spricht man vom „Schleifen unter Mitte“. Die Eigenschaften beider Schleifverfahren sind in Tabelle 13.8 aufgezeigt.

Stehen keine Stabilitätskarten zur Ermittlung von Höhenlage H_w und Werkstückauflagewinkel β zur Verfügung, kann unter der Randbedingung $d_r / d_s = 0,6$ für die in Abbildung 13.181 dargestellte Schleifspaltgeometrie, mit Richtwerten gearbeitet werden (Tab. 13.9):

Mit Hilfe der Gleichung 13.54 wird dann die Höhenlage H_w berechnet.

$$H_w = \frac{\gamma}{2 \cdot \left(\frac{1}{d_s + d_w} + \frac{1}{d_r + d_w} \right)} \quad (13.54).$$

Tab. 13.8: Eigenschaften Schleifen über und unter Mitte

Schleifen über Mitte	Schleifen unter Mitte
mehr und große geometrisch stabile Bereiche	wenige und kleine geometrisch stabile Bereiche
Kräfte auf die Werkstückauflage gering	hohe Kräfte auf die Werkstückauflage
Werkstück besitzt einen Freiheitsgrad → weniger stark anfällig für dynamische Einflüsse	Werkstück besitzt keinen Freiheitsgrad → sehr anfällig für dynamische Einflüsse
Werkstück kann nach oben aus dem Schleifspalt herauspringen → Oberführung für Durchgangsschleifen notwendig	Werkstück kann nicht nach oben aus dem Schleifspalt herauspringen
Werkstücke laufen beim Durchgangsschleifen bei konischer Regelscheibenform auseinander → keine Beeinflussung durch Stirnflächenqualität der Werkstücke	Werkstücke laufen beim Durchgangsschleifen bei konischer Regelscheibenform nicht auseinander → Werkstücke können nicht kippen

Tab. 13.9: Richtwerte

Winkel der Werkstückauflage β	geometrisch stabile Tangentenwinkel γ
30°	6°... 6° 40' oder 7° 20'... 8° 30'
40°	7°... 7° 40' oder 8° 30'... 10°
45°	6°... 6° 40' oder 8°... 9°

Die Werkstückauflage hat auf Grund der großen Auskraglänge und der geringen Dicke eine relativ geringe Steifigkeit. Die horizontalen Kräfte (F_{xa}), die auf die Werkstückauflage wirken, sollten möglichst gering sein. Wichtig ist daher die Auswahl des richtigen Aufwinkels β . Dieser wird aus dem Reibwert an der Werkstückauflage μ_a nach folgender Gleichung 13.55 berechnet:

$$\tan(\beta) = \mu_a \quad (13.55).$$

Der Reibwert, welcher in einem Bereich von $\mu_a = 0,12 \dots 0,4$ variiert, ist abhängig von der

- Werkstoffpaarung Material der Werkstückauflage - Werkstück
- Art des Kühlschmierstoffes
- Rauheit der Reibpartner
- Umfangsgeschwindigkeit des Werkstückes.

Auf Grund der vielen Einflussgrößen liegt der Reibwert für den jeweiligen Einsatzfall meist nicht vor. Deshalb werden überwiegend Werkstückauflagen mit einem Winkel von 30° , unabhängig vom Reibwert, verwendet.

13.7.2.5.3 Durchgangsschleifen

Kurzbeschreibung

Das spitzenlose Durchgangsschleifen gehört zu den komplexesten aber auch zu den rentabelsten Schleifverfahren innerhalb der Außenrundbearbeitung (Abb. 13.185). Die Werkstücke werden infolge der Neigung der Regelscheibe und ihrer Umfangsgeschwindigkeit in Achsrichtung durch den Schleifspalt transportiert und dabei bearbeitet.

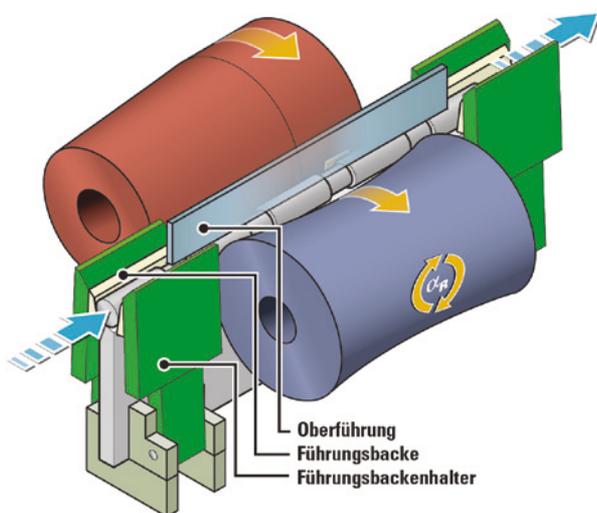


Abb. 13.185: Durchgangsschleifen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Die Beschickung der Maschine erfolgt während der Bearbeitung, also in der Hauptzeit. Geführt werden die Werkstücke im Ein- und Auslauf mit Führungsbacken. Der Materialabtrag erfolgt ab dem Eintritt in den Schleifspalt. Auch das Schleifen profilierter Werkstücke ist möglich, sofern sie nur am größten Durchmesser bearbeitet werden. Werkstücke, welche die Schleifspaltlänge deutlich überschreiten (z. B. Stangen und Rohre), lassen sich ebenfalls äußerst effektiv bearbeiten.

Die Antriebskraft am Regelscheibenumfang teilt sich auf Grund der Neigung in eine axiale und eine vertikale Komponente. Die vertikale Kraftkomponente übernimmt dabei die Aufgaben der Regelscheibe wie Führen und Abbremsen der Werkstücke im Schleifprozess. Die axiale Kraftkomponente führt zur Vorschubbewegung der Werkstücke im Schleifspalt. Je mehr man eine Regelscheibe neigt, umso größer wird der axiale Kraftanteil und desto schneller werden die Werkstücke durch den Schleifspalt befördert. Erhöht man zusätzlich die Regelscheibendrehzahl, so kann eine weitere Steigerung der Vorschubbewegung erzielt werden. Die maximal mögliche Vorschubgeschwindigkeit ist vor allem vom Werkstückdurchmesser, dem Aufmaß und der zu erzielenden Oberflächenqualität abhängig. Die Vorschubgeschwindigkeit v_d berechnet sich aus der Drehzahl der Regelscheibe n_r , dem Regelscheibendurchmesser d_r und dem Neigungswinkel der Regelscheibe α_r nach folgender Formel:

$$v_d = n_r \cdot d_r \cdot \pi \cdot \sin(\alpha_r) \quad (13.56).$$

Regelscheibenform

Um eine gerade Berührungslinie zwischen Werkstück und Regelscheibe über den gesamten Schleifspalt zu gewährleisten, muss die Regelscheibe eine besondere Form aufweisen. Diese wird durch das Abrichten erzeugt und Hyperboloid genannt (Abb. 13.186). Die Form der Regelscheibe hängt vom Neigungswinkel der Regelscheibe α_r ,

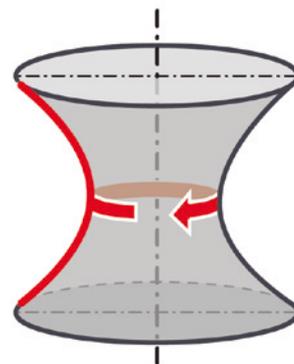


Abb. 13.186: Hyperboloid (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

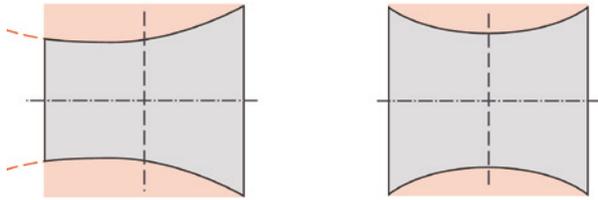


Abb. 13.187: Konische und symmetrische Regelscheibenform (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

von der Höhenlage des Werkstückes H_w , vom Regelscheibendurchmesser d_r und vom Werkstückdurchmesser d_w ab. Grundsätzlich muss zwischen der konischen und der symmetrischen Regelscheibenform unterschieden werden (Abb. 13.187). Beide werden in der Praxis genutzt, wobei der Anteil der konischen Form deutlich überwiegt. Die konische Regelscheibenform wird durch Schwenken des Regelscheibenabrichters um den Abrichtwinkel α'_r und den Einsatz einer Diamantschuhverstellung erzeugt (Abb. 13.188). Das ist eine tangentielle Verstellung des Abrichtdiamanten um den Wert h . Mit der Diamantschuhverstellung wird nicht die Form des Hyperboloids sondern nur die Lage von dessen Kehlkreis geändert. Wird der Diamant nicht in der Höhe verstellt, erhält man eine symmetrische Regelscheibenform. Für das Abrichten einer konischen Regelscheibenform gelten folgende Gleichungen:

$$\alpha'_r = \alpha_r \cdot \sqrt{\frac{d_r}{d_r + d_w}} \quad h = \frac{H_w}{\left(\frac{d_w}{d_r} + 1\right) \cdot \sqrt{\frac{d_w}{d_r} + 1}} \quad (13.57).$$

Auf modernen CNC-Maschinen kann das komplette Regelscheibenprofil NC-gesteuert abgerichtet werden. In die Steuerungen sind dafür komplexe mathematische Pro-

gramme integriert, welche die Form der Regelscheibe für den jeweiligen Anwendungsfall berechnen können und die Ergebnisse als NC-Programme generieren. Dadurch entfällt sowohl das Einstellen der Diamantschuhverstellung als auch das Schwenken des Regelscheibenabrichters.

Prozessführung

Für das Schleifen wird die Schleifscheibe in mehrere Profilstufen unterteilt (Abb. 13.189). CNC-Steuerungen erlauben dieses Profilieren komfortabel über das Abrichtprogramm. Die Berührungslinie an der Regelscheibe bleibt gerade. Die Einlaufzone dient zum Ausgleich von Werkstückdurchmessertoleranzen. In der Schleifzone findet die eigentliche Zerspanung statt. Innerhalb der Auslaufzone werden die Unrundheiten und Rauheiten auf ein Minimum reduziert.

Beim Durchgangsschleifen muss das Werkstück während des gesamten Schleifvorgangs, einschließlich Ein- und Auslauf, auf einer Linie liegen. Dafür wird die Werkstückauflage über die Scheibenbreite hinaus verlängert (Abb. 13.190). Die Führungsbacken setzen am Ein- und Auslauf die Linie der Regelscheibe fort. Während die schleifscheibenseitig angebrachten Führungsbacken einen gewissen Abstand zum Werkstück haben, müssen die Führungsbacken auf der Regelscheibenseite sehr genau eingestellt werden. Besonders an der Auslaufseite muss die Berührungslinie der Regelscheibe exakt durch die Führungsbacke verlängert werden. Ansonsten erzeugt die Schleifscheibenkante am Auslauf Formfehler und Vorschubmarkierungen auf der Werkstückoberfläche.

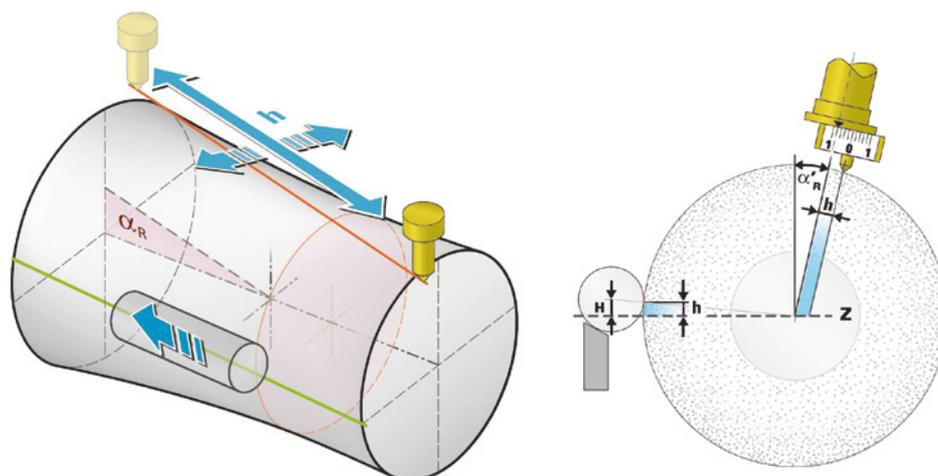


Abb. 13.188: Konische Regelscheibenform, Neigungswinkel, Abrichtwinkel, Diamantschuhverstellung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

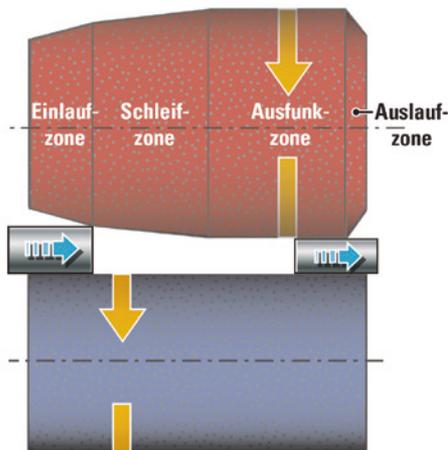


Abb. 13.189: Mehrstufiger Schleifprozess (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

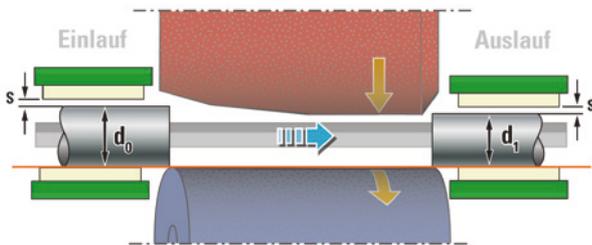


Abb. 13.190: Einstellung der Führungsbacken (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

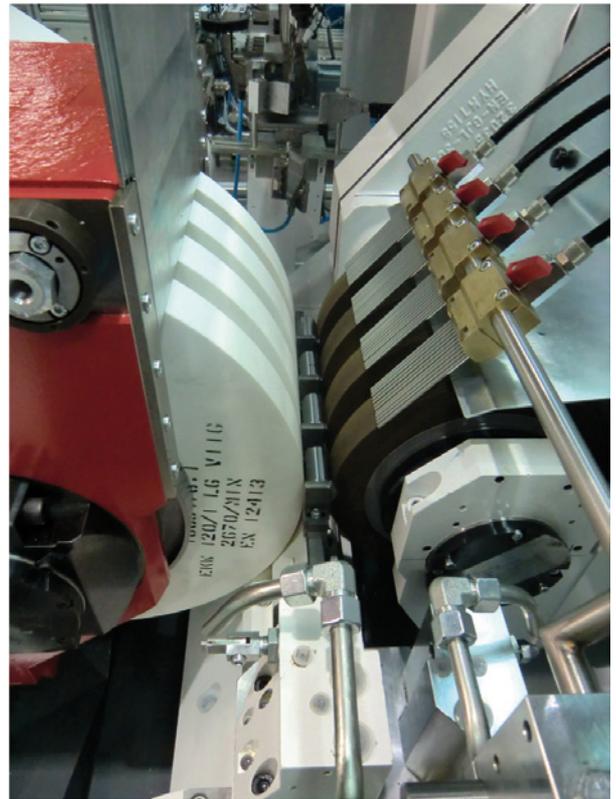


Abb. 13.192: Einstechschleifen in 4-fach Produktion (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

13.7.2.5.4 Einstechschleifen

Kurzbeschreibung

Beim Einstechschleifen werden die Werkstücke dem Schleifspalt einzeln zugeführt. Geschliffen wird das Werkstück durch die radiale Zustellung der Schleifscheibe mit Hilfe der Achse X1. Nach dem Schleifvorgang öffnet der Schleifspalt wieder und das Werkstück kann abgeführt werden (Abb. 13.191).

Schleif- und Regelscheibe besitzen im Allgemeinen ein Negativprofil des Werkstückes, das ihnen mit Hilfe der Abrichter verliehen wird. Neben unterschiedlichen

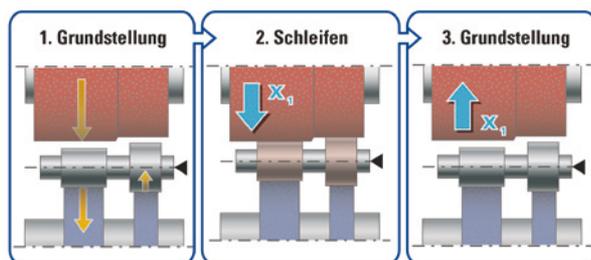


Abb. 13.191: Schleifzyklus (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Durchmessern können auch Fasen und Verrundungen in einem einzigen Einstich bearbeitet werden.

Neben der Einfachproduktion können bei ausreichender Scheibenbreite auch mehrere Werkstücke gleichzeitig geschliffen werden. In diesem Fall spricht man von Mehrfachproduktion (Abb. 13.192).

Die rotierende Regelscheibe wird beim Einstechschleifen nur minimal geneigt (ca. $0,1^\circ \dots 0,2^\circ$). Durch die dabei entstehende Axialkraft läuft das Werkstück gegen einen Axialanschlag und ist in dieser Lage für den Schleifvorgang positioniert.

Prozessführung

Der Schleifzyklus besteht aus mehreren aufeinander folgenden Schritten. Man spricht deshalb von einem mehrstufigen Schleifprozess (Abb. 13.193). Er besteht mindestens aus den Prozessschritten Schruppen, Schlichten und Ausfunken. Die Zustellbeträge und die Zustellgeschwindigkeiten können für jeden Schritt in der Steuerung hinterlegt werden. Um kurze Schleifzeiten zu erreichen, muss in der Schruppphase mit hohen Zustellgeschwindigkeiten und folglich mit hohem Zeitspanvolumen Q_w gearbeitet werden. In der Schlicht- und Ausfunkphase

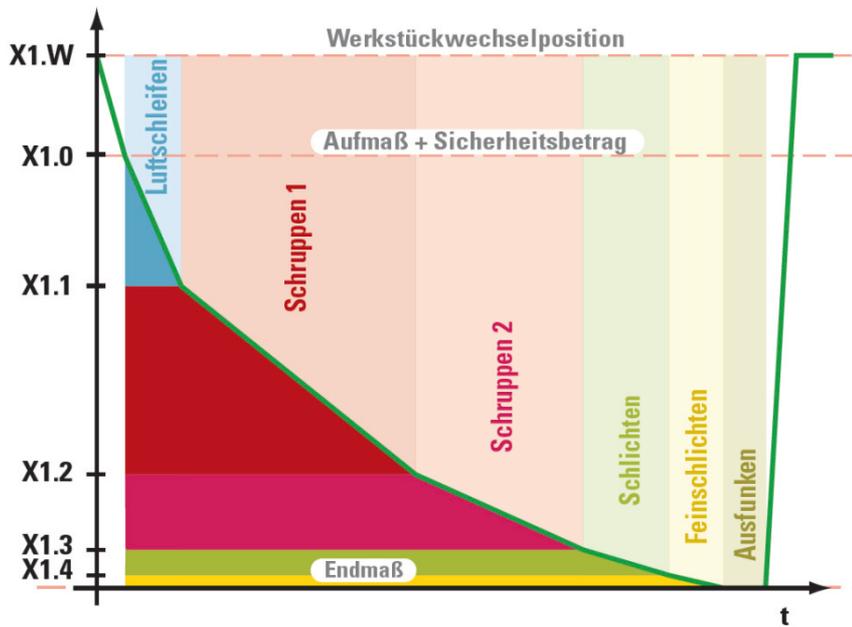


Abb. 13.193: Mehrstufiger Schleifprozess (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

wird die Werkstückqualität erzeugt. Die Zustellgeschwindigkeit wird beim Schlichten reduziert und das Ausfunken erfolgt ohne Zustellung. Beim Ausfunken wird nur noch durch den Abbau von elastischen Verformungen der Maschine und der Werkzeuge geschliffen. Damit werden die Rundheit und die Oberfläche des Werkstückes und die Maßstabilität des Prozesses verbessert.

Beim Zerspanen großer Aufmaße kommt die Technologie „Schleifen aus dem Vollen“ zur Anwendung (Abb. 13.194). Durch die starke Reduktion des Durchmessers verschiebt sich der Werkstückmittelpunkt in Richtung Werkstückauflage und Regelscheibe. Dadurch kann der Überstand des Werkstückes über die Werkstückauflage verloren gehen und es besteht die Gefahr, in die Werkstückauflage zu schleifen. Um dieser Verschiebung entgegenzuwirken, wird die Regelscheibe durch die X4-Achse während des Einstechvorgangs der X1-Achse an die Werkstückauflage herangefahren. Die Umschaltpunkte der X4-Achse werden dabei zeitgleich mit denen der X1-Achse erreicht.

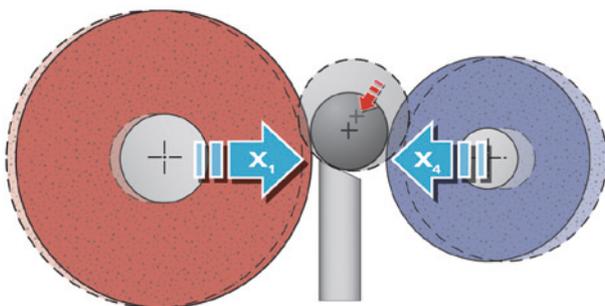


Abb. 13.194: Schleifen aus dem Vollen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Die Anschliffsituation

Beim spitzenlosen Schleifen ist die stabile Lage des Werkstückes zu jedem Zeitpunkt des Schleifprozesses sehr wichtig. Die Werkstückauflage besitzt, wie die Regel- und Schleifscheibe, ein Negativprofil der Stufensprünge des zu schleifenden Werkstückes. Besonders bei profilierten Werkstücken mit unterschiedlichen Aufmaßen auf den Sitzen, muss die Anschliffsituation beachtet werden. Es ist zu prüfen, an welchen Sitzen die Schleifscheibe zuerst mit dem Werkstück in Kontakt kommt. Man sollte darauf achten, dass möglichst an mehreren Sitzen gleichzeitig angeschliffen wird. An Fasen oder an Stirnflächen sollte keinesfalls angeschliffen werden.

Weiterhin ist die Anlage des Werkstückes an der Regelscheibe zu beurteilen. Liegt zu Beginn des Schleifprozesses nur ein schmaler Sitz an der Regelscheibe an, wird die Regelscheibe nicht in der Lage sein, das Werkstück abzubremesen.

Schleifen mit Andruckrolle

Andruckrollen werden für das konzentrische Schleifen zu einem vorhandenen Durchmesser sowie bei der Bearbeitung kleiner Teilbereiche eines Werkstückes eingesetzt (Abb. 13.195). Die Andruckrolle hat die Funktion, das Werkstück sicher im Schleifspalt zu halten.

Dieser Schleifvorgang entspricht dem Prismenschleifen, welches man von herkömmlichen Rundschleifmaschinen kennt. Hier bildet der nicht zu schleifende Mantel des Werkstückes die Führungsbasis. Die vorhandenen Rundheitsfehler werden sich auf die zu schleifenden

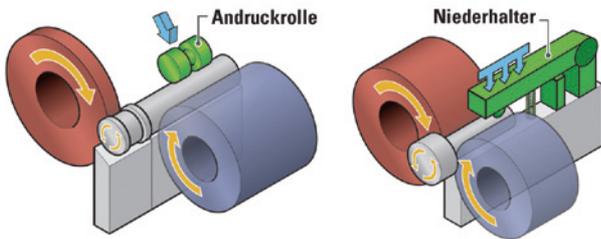


Abb. 13.195: Andruckrolle und Niederhalter (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Werkstückpartien übertragen. Deshalb muss sichergestellt werden, dass die Rundheit auf dem Mantel besser ist, als die Rundheit, die man mit dem Schleifen erreichen möchte.

Schleifen mit Niederhalter

Als „kopplastig“ bezeichnet man Werkstücke, deren Schwerpunkt dazu führt, dass sie nicht auf der Werkstückauflage liegen bleiben. Für die Bearbeitung solcher Werkstücke werden Niederhalter Abbildung 13.195 eingesetzt. Diese werden meist durch eine Feder betätigt und halten das kopplaste Werkstück auf der Werkstückauflage. Außerdem wird durch die Federkraft das Andrehen des Werkstückes vor dem eigentlichen Schleifprozess verbessert.

Spitzenlose Stirnflächenbearbeitung

Neben der Mantelfläche eines Werkstückes kann gleichzeitig dessen Stirnfläche geschliffen werden. Dabei ist zu beachten, dass grundsätzlich an der Mantelfläche angeschliffen werden muss. Erst wenn das Werkstück stabil zwischen Schleifscheibe, Regelscheibe und Werkstückauflage „eingespannt“ ist, kann mit der Bearbeitung der Stirnfläche begonnen werden. Das radiale Aufmaß sollte

bei solchen Schleifoperationen mindestens 1,5-mal so groß sein als das axiale Aufmaß. Für die Stirnflächenbearbeitung bieten sich, je nach Konfiguration der Maschine, die folgenden drei Verfahrensvarianten an (Abb. 13.196):

- Schrägstellung der Werkstückauflage
- Schrägstellung der Schleifscheibe
- Geradeinstich mit zusätzlicher Bewegung in Z-Richtung.

Beim Schleifen von Stirnflächen hat die Gestaltung des Axialanschlages der Werkstückauflage eine besondere Bedeutung. Um gute Stirnflächenqualitäten zu erreichen, muss eine hohe Axialruhe bei der Werkstückrotation gewährleistet sein. Diese wird durch einen punktuellen Kontakt (Abb. 13.197) zwischen Werkstückzentrum und Axialanschlag erzeugt. Andere Kontaktformen, z.B. Flächenanschlag auf Kreisringfläche oder Flächenanschlag auf Stirnfläche, führen auch bei optimaler Gestaltung immer zu geringfügigen Axialbewegungen des Werkstückes im Schleifprozess. Das führt unweigerlich zu Form- (Ebenheit) und Lagefehlern (Planlauf) an der zu schleifenden Stirnfläche.

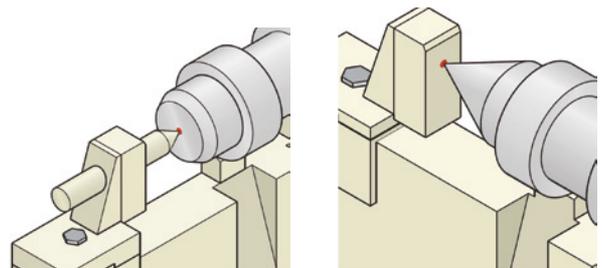


Abb. 13.197: Axialanschlüsse mit Punktkontakt (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

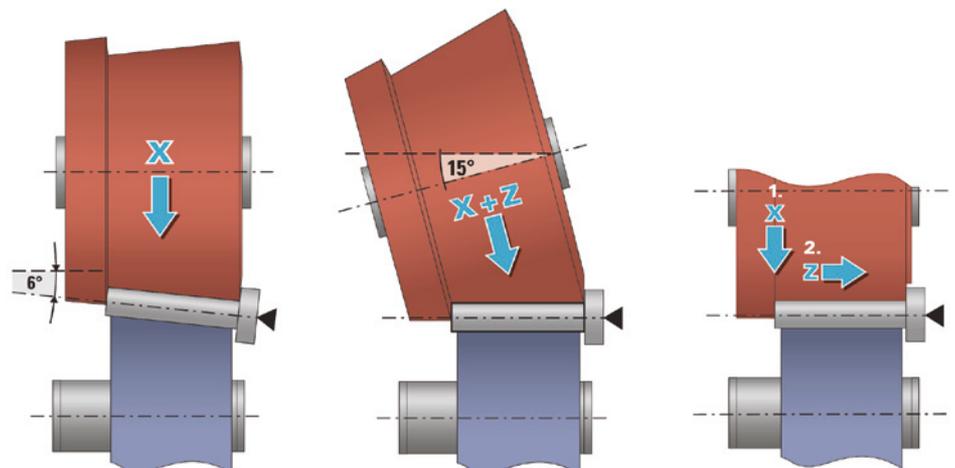


Abb. 13.196: Verfahrensvarianten zur Stirnflächenbearbeitung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

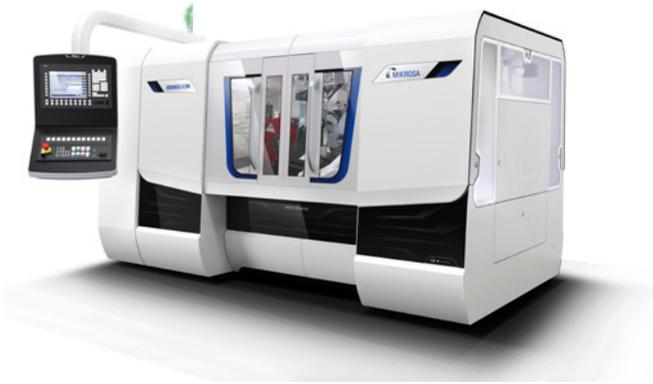
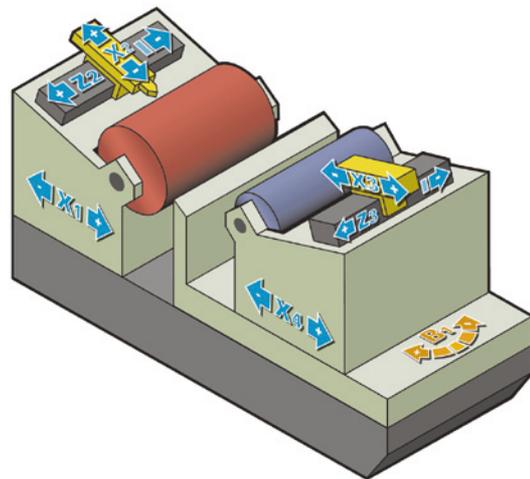


Abb. 13.198: Gesamtansicht einer spitzenlosen Außenrundschleifmaschine (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



13.7.2.5.5 Klassifikation spitzenloser Außenrundschleifmaschinen

Spitzenlose Außenrundschleifmaschinen lassen sich nach der Neigung des Maschinenbettes, dem Schleifspalt, der Baugröße und den Spindelkonzepten klassifizieren (Abb. 13.198).

Klassifikation nach der Neigung des Maschinenbettes

Werden Maschinen nach der Neigung des Maschinenbettes klassifiziert, unterscheidet man die horizontale, die schräge und die vertikale Bauweise (Tab. 13.10).

Klassifikation nach dem Schleifspalt

Man unterscheidet dabei Maschinen mit ortsfestem und beweglichem Schleifspalt (Abb. 13.199). Der bewegliche Schleifspalt ist dadurch gekennzeichnet, dass der Schleif-

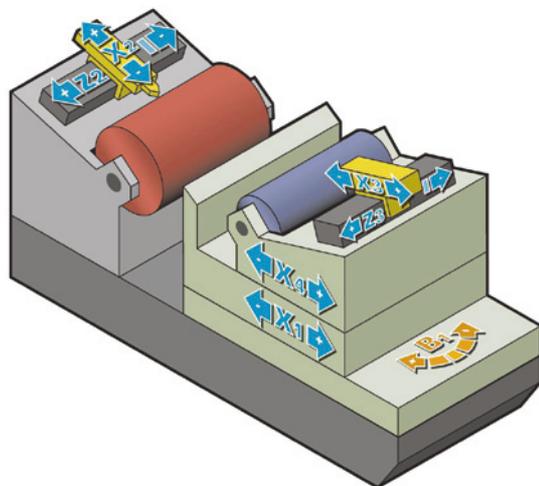


Abb. 13.199: Maschinen mit ortsfestem und beweglichem Schleifspalt (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Tab. 13.10: Klassifikation nach der Neigung des Maschinenbettes

horizontal	schräg	vertikal
<ul style="list-style-type: none"> • gebräuchlichste Bauform • gute Zugänglichkeit beim Einrichten 	<ul style="list-style-type: none"> • geeignet für schwere Werkstücke, da ein Teil der Gewichtskraft auf die Regelscheibe verlagert wird • Vermeidung von Anschliffen, da das Werkstück beim Andrehen unterstützt wird 	<ul style="list-style-type: none"> • Sonderbauform • Vorteile bei Be- und Entladung der Werkstücke • nur „Schleifen unter Mitte“ möglich

	groß	mittel	klein
Durchmesserbereich Werkstück			
minimaler Durchmesser [mm]	5	1,5	0,5 (0,1)
maximaler Durchmesser [mm]	> 150	< 150	< 50
Schleifscheibenantrieb			
Antriebsleistung [kW]	> 60	20 bis 60	< 20
Schleifscheibenabmessung			
Durchmesser [mm]	> 650	500 bis 650	< 500
Breite [mm]	> 600	200 bis 600	< 200

Tab. 13.11: Klassifikation nach Baugröße

spindelstock ortsfest mit dem Maschinebett verbunden ist. Die Schlitten für die Zustellbewegungen X1 und X4 befinden sich auf der Regelscheibenseite. Deshalb sind solche Maschinen kompakter als Maschinen mit ortsfestem Schleifspalt. Nachteilig ist allerdings die notwendige Nachführung von Automatisierungseinrichtungen, da sich die Werkstückauflage mit der X1-Achse bewegt. Bei Maschinen mit ortsfestem Schleifspalt befindet sich die Werkstückauflage ortsfest angebracht im Zentrum der Maschine. Schleif- und Regelscheibe verfügen jeweils über eigene Achsschlitten, mit denen sie zur Werkstückauflage bewegt werden können. Bei Maschinen mit ortsfestem Schleifspalt ist auf Grund der fixen Position der Werkstückauflage keine Handlingnachführung notwendig. Besonders bei der Verkettung von mehreren Maschinen ist dies ein Vorteil.

Klassifikation nach der Baugröße

Unterscheidet man spitzenlose Maschinen nach Ihrer Baugröße, so kann man diese anhand der Parameter Werkstückdurchmesserbereich, Antriebsleistung und Schleifscheibenabmessung in drei Baugrößen unterscheiden (Tab. 13.11).

Klassifikation nach dem Spindelkonzept

Die Schleif- und Regelspindeln können entweder einseitig (fliegende Lagerung) oder beidseitig (Portallagerung) gelagert sein. Bei den portalgelagerten Spindeln befindet sich die Scheibe (Schleifscheibe bzw. Regelscheibe) zwischen der vorderen und der hinteren Lagerstelle. Diese Spindeln haben eine hohe Steifigkeit und eignen sich besonders für die Aufnahme breiter Scheiben. Die Scheiben können direkt (Direktaufnahme) oder mittels einer Scheibenaufnahme auf die Spindeln montiert werden (Abb. 13.200). Auf Grund der großen Steifigkeit eignen sich portalgelagerte Spindeln besonders gut für Prozesse mit hohen Zeitspannvolumina oder auch hohen Genauigkeitsforderungen.

Der Scheibenwechsel lässt sich dagegen bei einer fliegend gelagerten Spindel (Abb. 13.200) schneller und einfacher durchführen. Diese Spindeln sind im Allgemeinen auch kostengünstiger als portalgelagerte Spindeln.

Bei beiden Spindelkonzepten können je nach Anforderung sowohl Wälzlager als auch Gleitlager in Form von hydrodynamischen als auch hydrostatischen Lagern zum Einsatz kommen.

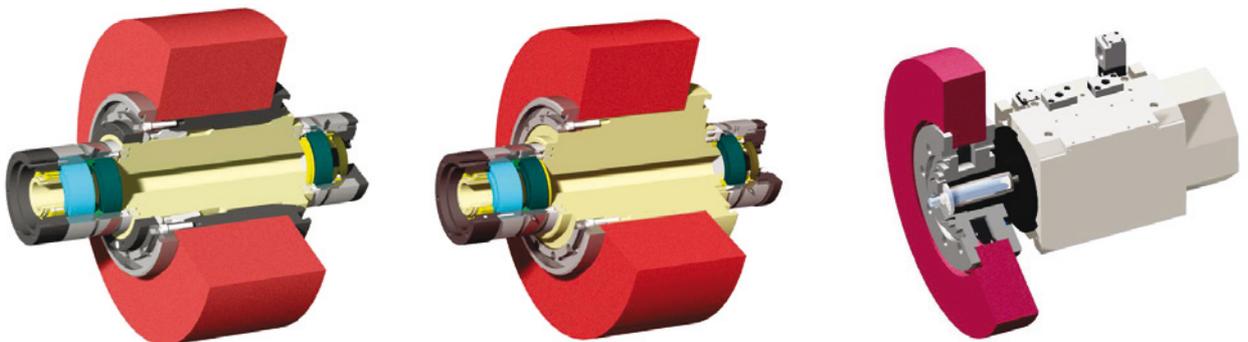


Abb. 13.200: Portallagerung mit Scheibenaufnahme, Portallagerung mit Direktaufnahme, fliegende Lagerung mit Scheibenaufnahme (Quellen: Schaudt Mikrosa GmbH; Studer AG)

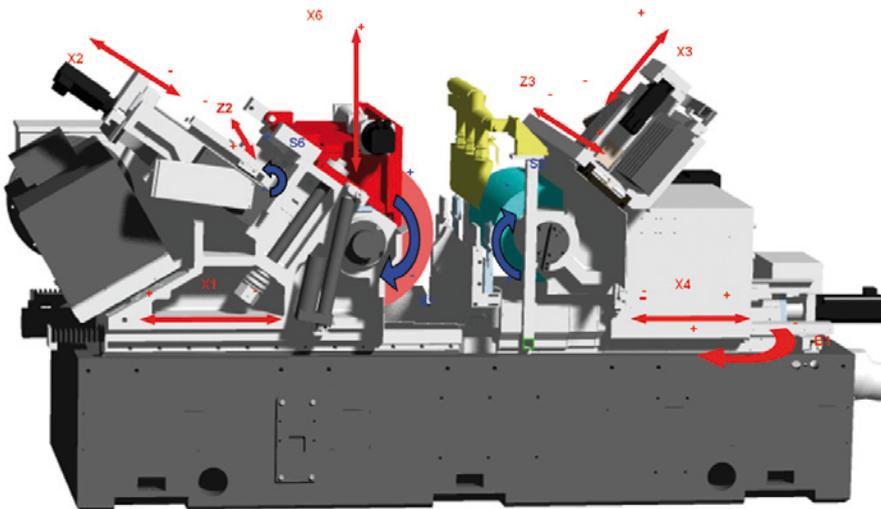


Abb. 13.201: Maschine mit ortsfestem Schleifspalt (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

13.7.2.5.6 Maschinenaufbau

Spitzenlose Schleifmaschinen sind auf Grund der großen Scheibeneingriffsbreiten hohen Belastungen ausgesetzt. Daher müssen sie eine hohe statische und dynamische Steifigkeit sowie eine gute thermische Konstanz aufweisen. Der prinzipielle Aufbau einer spitzenlosen Schleifmaschine ist in Abbildung 13.201 dargestellt.

Diese Maschine ist mit ortsfestem Schleifspalt und sieben Achsen ausgestattet. Die X1-Achse dient der radi-

alen Zustellung der Schleifscheibe zum Werkstück und die X4-Achse wird für die radiale Zustellung der Regelscheibe zum Werkstück genutzt. Die Abrichteinrichtungen für beide Scheiben befinden sich jeweils auf der dem Schleifspalt abgewandten Seite. Für das Abrichten der Schleifscheibe werden Bahnabrichter (Abb. 13.202), Einrolleinrichtungen oder Radienabrichter in unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt. Zum Abrichten kommen stehende (Ein- und Mehrkorndiamanten, Fliesen) oder rotierende Werkzeuge (Diamantformrollen, Diamant-

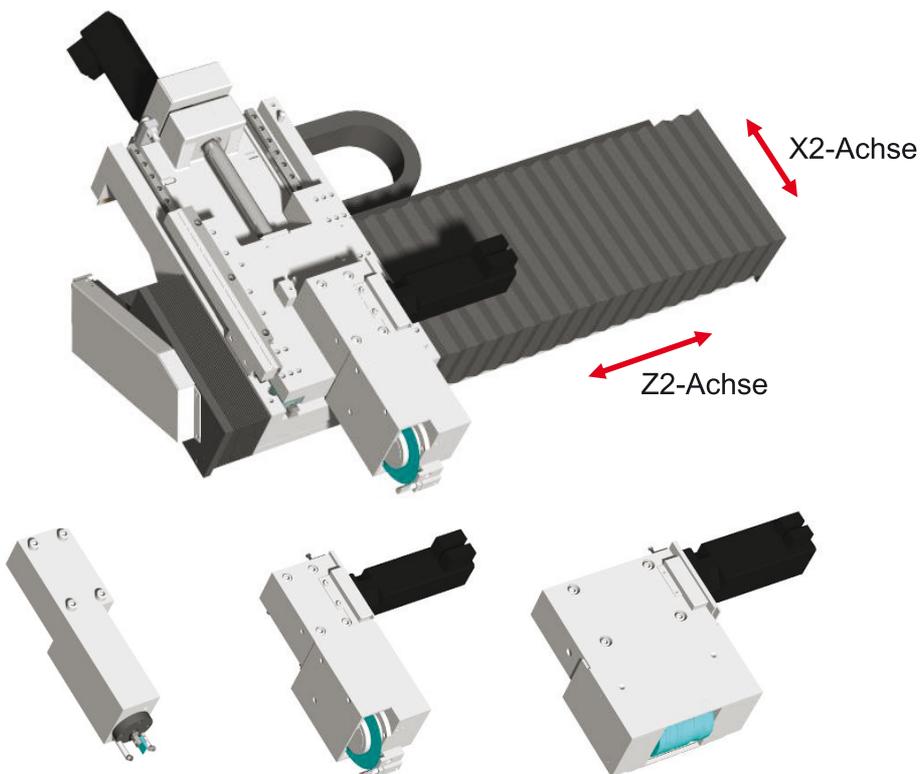


Abb. 13.202: CNC-Schleifscheibenabrichter mit wechselbaren Abrichtköpfen für stehende Werkzeuge, Diamantformrolle und Diamantprofilrolle (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

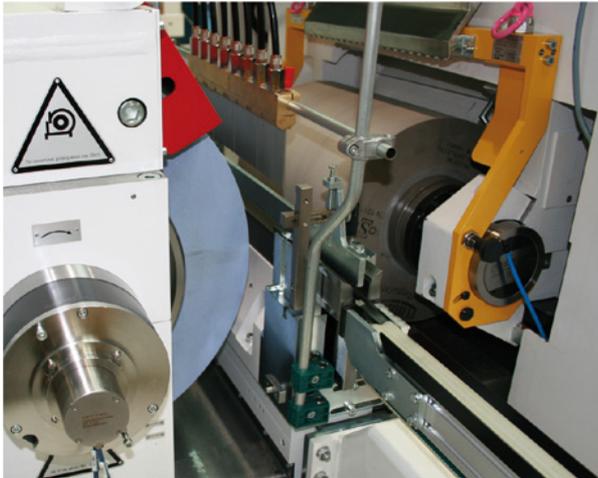


Abb. 13.203: Maschinenarbeitsraum für das Durchgangsschleifen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

profilrollen) zur Anwendung. Für das Abrichten der Regelscheibe werden Bahnabrichter genutzt. Als Abrichtwerkzeuge für die Regelscheibe haben sich Einkorndiamanten durchgesetzt.

Von Vorteil sind Schleifspindelantriebe, die eine konstante Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe ermöglichen. Für konventionelle Schleifscheiben sollte ein Bereich bis 63m/s und für Schleifscheiben mit hochharten Schneidstoffen ein Bereich bis 120 m/s abgedeckt werden. Das Auswuchten der Schleifscheiben erfolgt meist mittels integrierter automatischer Auswuchteinrichtung. Manuelle Systeme findet man bei modernen Maschinen zunehmend selten. Die Primärschutzhaube der Schleifscheibe muss entsprechend den Forderungen der DIN EN 13218 ausgeführt sein.

Die Regelspindel befindet sich im Regelspindellagergehäuse. Dieses kann um den Winkel α_r in beide Richtungen geneigt werden. Für das Durchgangsschleifen haben sich Neigungswinkel von bis zu 6° bewährt. Die Rotationsbewegung der Regelspindel muss sehr konstant und gleichförmig sein. Deshalb werden vorzugsweise Servomotoren als Antriebe genutzt. Die Übertragung vom Motor zur Spindel erfolgt mittels Getriebe oder Riemen. Auch der Einsatz von Motorspindeln ist durchaus üblich. Je nach Baugröße sind Drehzahlen von bis zu 1.000 U/min möglich.

Für die Erzielung guter Schleifergebnisse ist eine stabile und präzise gefertigte Werkstückauflage notwendig. Diese ist mit der Werkstückauflagehalterung fest verschraubt oder mechanisch bzw. hydraulisch geklemmt. Die Werkstückauflage wird im Arbeitsbereich zur Minimierung des Verschleißes und zur Reduzierung der Reibung mit Hartmetall oder PKD belegt.

Unterhalb der X4-Achse befindet sich der Schwenkschlitten der B-Achse. Diese dient beim Einstechschleifen der Konuskorrektur am Werkstück sowie der Einstellung des „Schleifeffers“ beim Durchgangsschleifen.

Der Sekundärschutz deckt den Arbeitsraum der Maschine ab und schützt den Bediener und die Umwelt.

Neben den bisher aufgezeigten Maschinen mit sechs linearen Achsen haben sich auch andere kinematische Maschinenkonzepte erfolgreich im Markt etabliert. Diese erreichen mit einer geringeren Achsanzahl die gleiche Maschinengrundfunktionalität (Schleifen, Abrichten Schleifscheibe, Abrichten Regelscheibe). Gerade beim Einstechschleifen lassen sich bestimmte Schleifapplikationen effektiver realisieren.

In Abbildung 13.204 ist eine Maschine mit vier CNC-Achsen dargestellt. Die Schleif- und Regelscheibe sind über

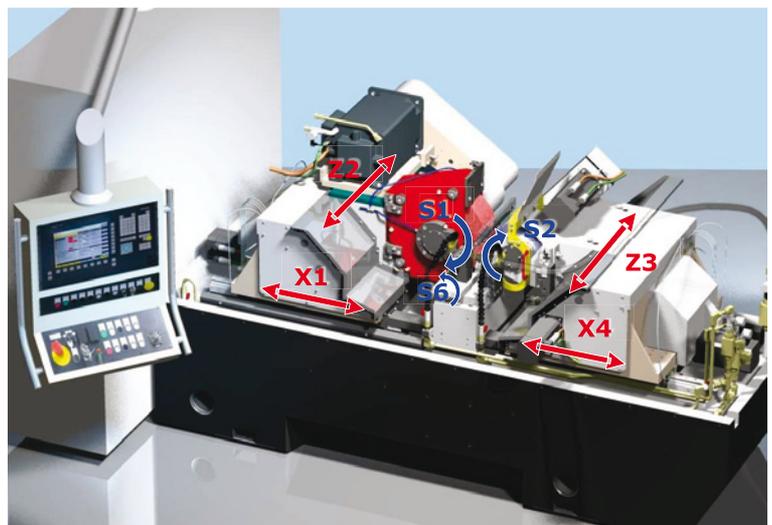


Abb. 13.204: Maschine mit Kreuzschlittensystem für Schleif- und Regelscheibe (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

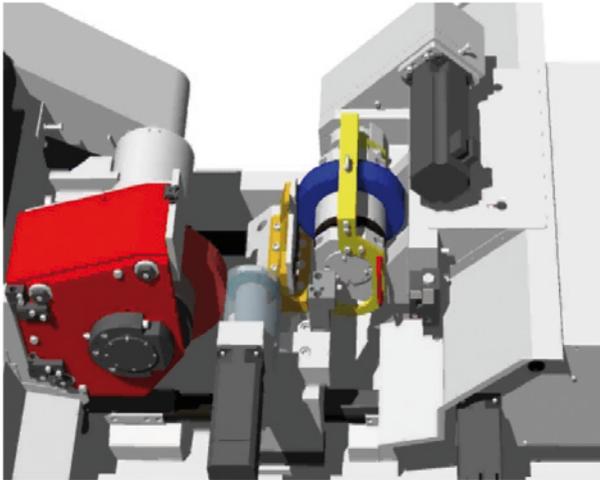


Abb. 13.205: Abrichten der Schleifscheibe (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

ein Kreuzschlittensystem in X- und Z-Richtung verfahrbar. Die vier Achsen werden sowohl zum Abrichten als auch zum Schleifen genutzt. Die stationären Abrichteinrichtungen für beide Scheiben befinden sich im Zentrum der Maschine (Abb. 13.205). Auf Grund der Bewegungsmöglichkeit in Z-Richtung eignet sich dieses Maschinenkonzept in Verbindung mit einem schräg gestellten

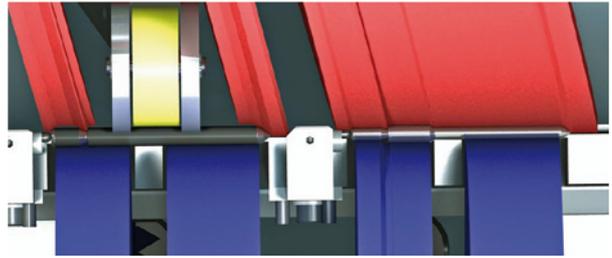


Abb. 13.206: Schrägeinstechschleifen einer Düsenadel in zwei Arbeitsoperationen (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Schleifspindelkopf auch hervorragend zum Schrägeinstechschleifen (Abb. 13.206).

Abbildung 13.207 zeigt eine Maschine mit vier linearen CNC-Achsen. Die Abrichteinrichtungen für beide Scheiben befinden sich auf der dem Schleifspalt abgewandten Seite. Der Schleifscheibenabrichter ist mit dem Maschinenbett verbunden und in Z-Richtung verfahrbar. Die X-Achse der Schleifscheibe wird sowohl zum Schleifen als auch in Verbindung mit der Z-Achse des Abrichters zum Abrichten genutzt. Der Aufbau der Regelscheibenseite ist äquivalent. Einziger Unterschied ist, dass sich alle Elemente dieser Seite auf einem Schwenkschlitten (hier als C2-Achse bezeichnet) befinden.

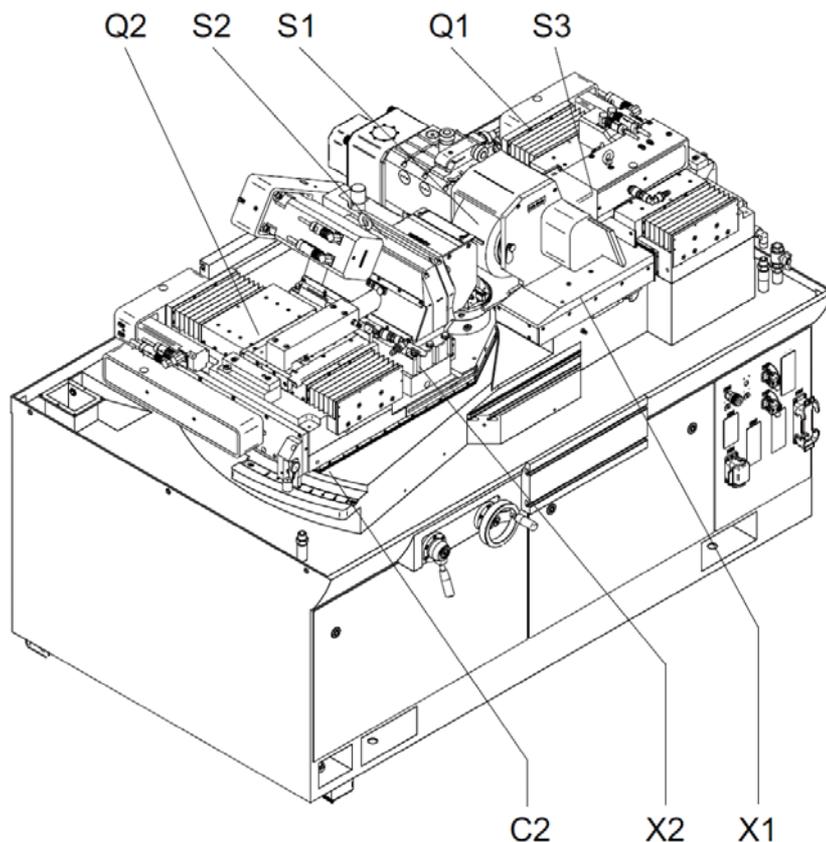


Abb. 13.207:
4-Achs-Maschine mit
entkoppelten Achsen
(Quelle: Agathon AG)

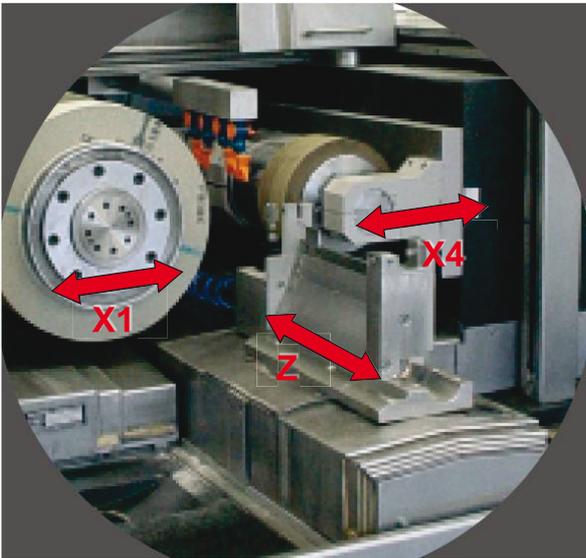


Abb. 13.208: 3-Achs-Maschine (Quelle: Tschudin AG)

Abbildung 13.208 zeigt, dass eine volle Funktionalität auch mit drei Achsen erreicht werden kann. Die Maschine ist mit je einer X-Achse für die Schleif- und die Regelscheibe ausgestattet. Die Werkstückauflagehalterung und die Abrichteinheiten werden über eine gemeinsame Z-Achse verfahren. Dadurch ergibt sich zusätzlich eine sehr einfache Be- und Entlademöglichkeit der Maschine.

13.7.2.5.7 Arbeitsbereich und Genauigkeit

Mit dem spitzenlosen Schleifverfahren können Werkstücke in einem Durchmesserbereich von 0,1 bis 400 mm bearbeitet werden, wobei der größte Teil der zu schleifenden Werkstücke in einem Bereich von 3 bis 35 mm liegt. Die schleifbare Werkstücklänge wird beim Einstechschleifen durch die maximale Schleifscheibenbreite begrenzt. Im Durchgangsschleifen können wesentlich längere Werkstücke bearbeitet werden. Beim Schleifen von Stangen sind Werkstücklängen von bis zu 5 m keine Seltenheit. Die beim Schleifen erreichbaren Maß-, Form- und Oberflächengenauigkeiten sind abhängig von den statischen, dynamischen und thermischen Eigenschaften der Schleifmaschine, von der Zustellgenauigkeit der Maschinenachsen, vom Werkstückwerkstoff und dessen Härte, von den

eingesetzten Schleif- und Regelscheibenspezifikationen, von den Abrichtwerkzeugen, von der Schleifspaltgeometrie (Höhenlage, Winkel und Material der Werkstückauflage), von den eingestellten Prozessparametern, von der Werkstückgeometrie und vom Aufmaß, von der Art des Kühlschmierstoffes und dessen Zuführung sowie in nicht unerheblichem Maß von den Fähigkeiten des Maschineneinrichters. Unter optimalen Bedingungen können Rundheitstoleranzen von $0,5 \mu\text{m}$, Durchmesserstoleranzen von $\pm 0,5 \mu\text{m}$ und Oberflächentoleranzen von $R_z = 0,8 \mu\text{m}$ prozesssicher eingehalten werden.

Das bezogene Zeitspannungsvolumen Q'_w dient als Maß für die Leistungsfähigkeit des Verfahrens. Übliche verfahrensspezifische Richtwerte sind in Tabelle 13.12 aufgeführt.

Die Vermessung der Werkstücke erfolgt in den meisten Fällen nicht während sondern nach dem Schleifprozess. Es kommen vorzugsweise taktile (z.B. Messtaster) oder pneumatische Messverfahren (z.B. Ringmessdüsen) zum Einsatz.

13.7.2.5.8 Automatisierung

Hohe Produktivität wird nicht allein durch die Maschine erreicht. Einen wesentlichen Anteil hat die Be- und Entladezeit. Aus diesem Grund sind spitzenlose Außenrundschleifmaschinen in den meisten Fällen automatisiert.

Für das Durchgangsschleifen werden die Werkstücke im Strang axial der Maschine zugeführt. Kurze leichte Werkstücke mit einem \varnothing/L -Verhältnis < 1 werden meist über Flach- (Abb. 13.209) oder V-Bänder nicht rotierend zu- und abgeführt. Die Rotation startet erst beim Einlaufen der Werkstücke in den Schleifspalt. Längere Werkstücke, wie z.B. Stangen, werden rotierend über Rollengänge (Abb. 13.210) be- und entladen. Werkstücke, wie z.B. Ringe, mit einem \varnothing/L -Verhältnis > 1 werden dem Schleifspalt ebenfalls rotierend über Zweiwalzenzuführungen (Abb. 13.211) zugeführt. Die Zuführungsgeschwindigkeit sollte dabei minimal größer sein als die Durchgangsgeschwindigkeit beim Schleifen. Die Abführung erfolgt entweder über eine Einwalzenabführung (Abb. 13.212) oder im einfachsten Fall über eine Rutsche in eine Transportkiste.

Tab. 13.12: Richtwerte für bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w

	Einstechschleifen, gerechnet über die gesamte Schleifzeit	Durchgangsschleifen, gerechnet über die gesamte Schleifscheibenbreite
Konventionelle Schleifmittel	$Q'_w = 1 \text{ mm}^3/(\text{mm/s})$	$Q'_w = 0,5 \text{ mm}^3/(\text{mm/s})$
Hochharte Schleifmittel	$Q'_w = 5 \text{ mm}^3/(\text{mm/s})$	$Q'_w = 1 \text{ mm}^3/(\text{mm/s})$



Abb. 13.209: Flachbandzuführung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.210: Rollengang (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.211: Zweiwalzenzuführung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.212: Einwalzenabführung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

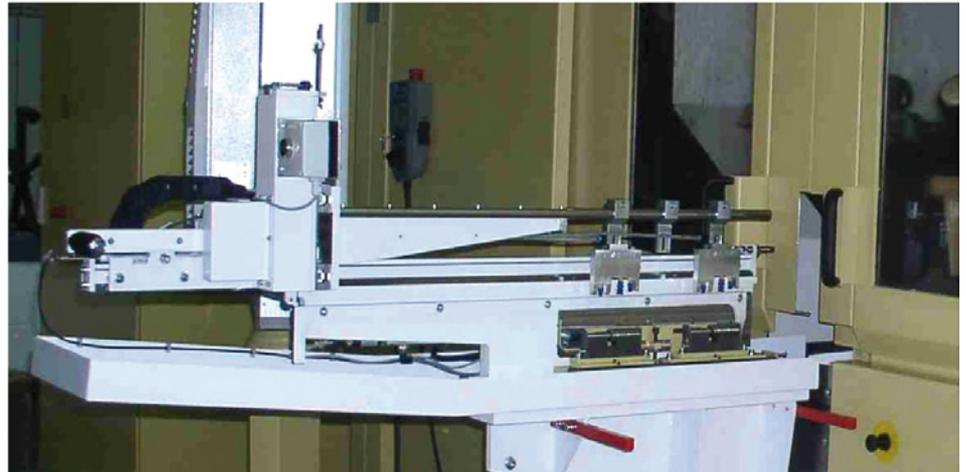


Abb. 13.213: Handeinlegevorrichtung (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Die einfachste Form der Automatisierung für das Einstechschleifen ist die Handeinlegevorrichtung (Abb. 13.213). Dabei werden die Werkstücke außerhalb der Maschine in Hakenreifern abgelegt, anschließend manuell in die Maschine eingeschoben und über dem Schleifspalt auf die Werkstückauflage abgesenkt. Die Handeinlegevorrichtung verbleibt während des Schleifprozesses im Arbeitsraum der Maschine. Danach werden die Werkstücke auf dem gleichen Weg heraustransportiert.

Eine weitere kostengünstige Form der Automatisierung sind die Einschieber. Die Rohteile werden über eine prismatische Schiene axial auf die Werkstückauflage bis zum Axialanschlag geschoben. Dies wird sowohl manuell als auch automatisch (z. B. pneumatisch) realisiert. Leichte Werkstücke können auch mittels Druckluft durch Schläuche in die Schleifposition gebracht werden. Beim Einsatz solcher Beladeeinrichtungen erfolgt das Entladen vorzugsweise über Weithub (Abb. 13.214). Zum Entladen wird mit Hilfe der X4-Achse die Regelscheibe von der Werkstückauflage weg bewegt. Die Fertigteile fallen auf ein Band, das sich unterhalb der Regelscheibe befindet und die Teile aus der Maschine transportiert.

Die Automatisierung mit Portalladern ist beim Einstechschleifen weit verbreitet. Das Greifen der Werkstücke erfolgt mechanisch oder mittels Vakuum. Die Rohteile werden von einem Speichersystem abgegriffen, zur Bearbeitung auf der Werkstückauflage abgelegt und anschließend aus dem Schleifspalt entnommen und auf einer definierten Position innerhalb oder außerhalb der Maschine abgelegt. Portallader sind mit einer Horizontalachse und einer oder zwei Vertikalachsen ausgerüstet.

Integrierte Portale (Abb. 13.215) befinden sich komplett innerhalb des Sekundärschutzes der Maschine und übernehmen den Be- und Entladeprozess. Die Werkstücke werden dazu durch eine externe Zuführeinrichtung

(z. B. Shuttle, Einschieber, Band) von außen in die Maschine transportiert bzw. wieder abgeführt. Solche Schlüssellochlösungen können einfach mit weiteren externen Automatisierungseinrichtungen (z. B. Ladezellen mit Teilespeichern und Pre- bzw. Postprozessmessenrichtungen) verbunden werden.

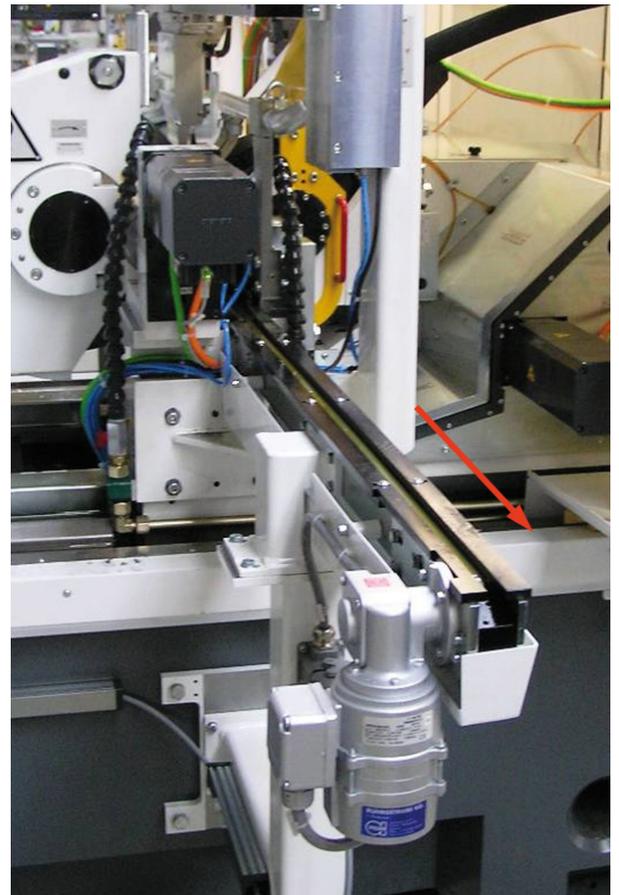


Abb. 13.214: Weithubband (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)



Abb. 13.215: Integriertes Portal (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

Externe Portallader sind direkt mit Werkstückspeichersystemen (z. B. Taktspeicherbändern) gekoppelt (Abb. 13.216). Das Be- und Entladen erfolgt entweder von oben durch eine Beladeklappe oder seitlich von der Maschinenrückseite. Bei dieser Variante können Roh- und Fertigteilgreifer gleichzeitig in die Maschine einfahren. Dadurch werden kürzere Werkstückwechselzeiten als bei der Beladung von oben erreicht.

Literatur zu Kapitel 13.7.2.5

Mais, F. U.: Geometrische und kinematische Grundlagen für das spitzenlose Durchlaufschleifen. Dissertation, Aachen, Techn. Hochschule, Fak. f. Maschinenwesen, 1980.

Reeka, D.: Über den Zusammenhang zwischen Schleifspalt-geometrie und Rundheitsfehler beim spitzenlosen Schleifen. Dissertation, Aachen, Techn. Hochschule, Fak. f. Maschinenwesen, 1967.

Conrad, K.; Stoll, S.; Otto, K.: Leitfaden spitzenloses Außenrundsleifen. Leipzig, Schleifring Service GmbH Team Mikrosa, 2008.



Abb. 13.216: Maschine mit seitlich einfahrendem Portal und Taktspeicherbändern (Quelle: Schaudt Mikrosa GmbH)

13.7.3 Schraubschleifen

Joachim Heim

Das Schraubschleifen ist eine Sonderform des Rundschleifens, dadurch gekennzeichnet, dass eine profilierte Schleifscheibe entsprechend dem Gewindeprofil verwendet wird (Abb. 13.217). Der Werkstückrotation ist in Achsrichtung eine Längsbewegung der Schleifscheibe zur Erzeugung der Schraubbewegung bzw. Steigung überlagert. Dieses Hauptmerkmal bestimmte in der Vergangenheit den besonderen Status der Schraubschleifmaschinen, da die Steigung über hochgenaue Trapezspindeln und Wechselräder einschließlich mechanischer Korrekturmöglichkeiten erzeugt werden musste.

Mit der Einführung voll NC-gesteuerter Schleifmaschinen erfolgt die Erzeugung der Steigung über zwei interpolierende NC-Achsen C und Z. Damit ist vom Prinzip her schon jede NC-gesteuerte Rundschleifmaschine für das Schraubschleifen geeignet. Um jedoch den Anforderungen an Genauigkeit und Produktivität gerecht zu werden, besitzen moderne Schraubschleifmaschinen eine Reihe weiterer Merkmale.

Durch die Entwicklung neuer Schneidstoffe haben früher nur in der Weichbearbeitung angewandte Verfahren das Schraubschleifen teilweise ersetzt. Trotzdem hat es auch heute noch Bedeutung bei der Fertigbearbeitung gehärteter Stähle und hochfester Materialien, die anders nicht oder nur schwer bearbeitbar sind, sowie für die Erzielung hoher Genauigkeiten und Oberflächenqualitäten. Praktische Anwendungen sind das Schleifen von Gewindelehren, Schnecken, Werkzeugen, Spindeln und Muttern für Antriebe sowie Lenkgetriebe.

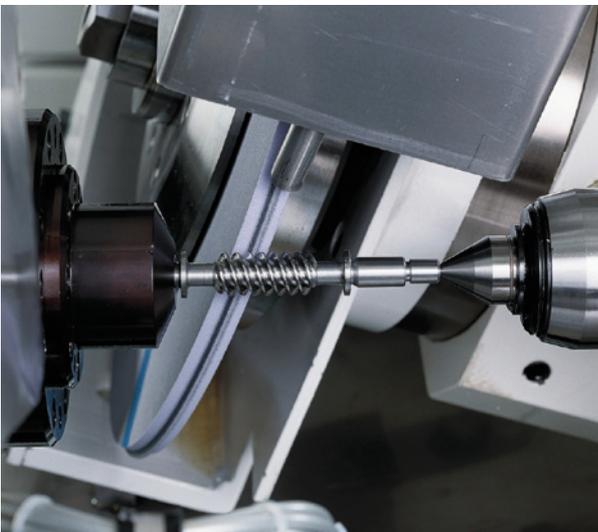


Abb. 13.217: Schraubschleifprozess (Quelle: Buderus)

13.7.3.1 Schleifprogramme

Der Ablauf des Schraubschleifprozesses kann entweder durch Längsschleifen oder durch Einstechschleifen erfolgen:

Längsschleifen mit einem oder meist mehreren Durchgängen

Das gesamte Aufmaß wird dabei auf einzelne Durchgänge wie Schruppen, Schlichten, Feinschlichten und Ausfeuern aufgeteilt mit jeweils angepassten Parametern für Schnittgeschwindigkeit und Längsvorschub. Das Verfahren kann als Pendelschleifen erfolgen mit Zustellung an den jeweiligen Enden des Gewindes oder für höhere Genauigkeiten als Einwegschleifen mit schnellem Rückhub im Eilgang. Durch das Schleifen nur in eine Richtung wird die Auswirkung eines möglichen Umkehrspiels vermieden, das zu ungleichmäßigem Abtrag an linker und rechter Gewindeflanke führen würde. Dieses Verfahren ist für das Präzisionsschleifen hochgenauer Spindeln, Schnecken und Lehren geeignet.

Einstechschleifen

Mindestens eine Werkstückumdrehung zuzüglich Ein- und Überlauf zur Fertigstellung der Schraube wird benötigt. Voraussetzung ist, dass die Schleifscheibenbreite mit dem Gewindeprofil um eine Steigung breiter ist, als die zu schleifende Schraube selbst, sowie genug Platz für den Ein- und Auslauf der Schleifscheibe vorhanden ist. Dieses Verfahren ermöglicht eine sehr kurze Bearbeitungszeit. Es wird jedoch oft nur für geringere Qualitätsansprüche und kleine Steigungen wie bei Befestigungsgewinden angewandt, wo ein Einschwenken der Schleifscheibe in den Steigungswinkel nicht erforderlich ist.

13.7.3.2 Schleifscheibenprofil

Der Ablauf des Schleifprozesses bestimmt die Form des Scheibenprofils. Grundsätzlich hat die Schleifscheibe das Negativprofil des Gewindes bzw. mindestens eines Zahnes. Die Einzahnscheibe als gebräuchlichste Scheibenform entspricht der Zahnücke im Normalschnitt. Zur Erzeugung des korrekten Gewindeprofils muss sie in den Steigungswinkel geschwenkt werden. Als Profilierwerkzeug reicht der Einkorndiamant aus, der auch die höchste Oberflächengüte des geschliffenen Gewindes ermöglicht, da die Diamantspitze immer im Kontakt mit der Schleifscheibe ist. Nachteil ist der schnelle Verschleiß, wodurch die Spitze unkontrolliert abstumpft und Form- und Maßfehler am Gewinde entstehen. Somit ist diese Methode für eine Serienproduktion schlecht geeignet.



Abb. 13.218: Profilierte Diamantscheibe (Quelle: Buderus)

Anwendung findet heute hauptsächlich die profilierte Diamantscheibe mit genau definiertem Radius (Abb. 13.218). Durch die Rotation sind ständig andere Diamantkörner im Kontakt mit der Scheibe, wodurch je nach Rundlauf und Spezifikation der Diamantscheibe nicht so geringe Rauigkeiten der Oberfläche erreicht werden, wie mit dem Einkorndiamant. Dafür sind Standzeit und Maßhaltigkeit um ein mehrfaches länger, wodurch dieses Abrichtverfahren für eine automatische Fertigung prädestiniert ist.

Korrigierte Profilformen sind erforderlich, wenn die Schleifscheibe nicht oder nicht voll in den Steigungswinkel geschwenkt wird. Die Verzerrung zwischen Axialschnitt und Normalschnitt durch den Schwenkwinkel lässt sich einfach berechnen. Dies gilt aber nur für ein Werkzeug, welches wie die Schneide eines Drehwerkzeuges in einer Ebene wirkt. Die Schleifscheibe kann auf Grund ihres Durchmessers auch über diese Ebene hinaus wirksam werden, was zu einem Vor- oder Nachschneiden und somit zu einem verfälschten Gewindeprofil führt. Durch Korrekturen des Scheibenprofils lassen sich diese Verfälschungen in bestimmten Grenzen kompensieren. Die Profilkorrekturen sind vom Scheibendurchmesser abhängig und generell umso kleiner, je kleiner die Schleifscheibe ist.

Die Mehrzahnscheibe für das Einstechschleifen mit nicht auf den Steigungswinkel eingeschwenkter Schleifscheibe weist mehrere gleiche Zähne mit der Profilkorrektur für den Axialschnitt auf. Für das Längsschleifen wird jedoch oft eine Schnittaufteilung vorgenommen, indem die Zähne schrittweise größer werden, bis der letzte Zahn oder Fertigschneider die endgültige Zahnhöhe aufweist. Der Fertigschneider muss beim Einschwenken in den Stei-

gungswinkel in der Ebene der Werkstückachse liegen damit keine Profilverzerrung entsteht. Die Vorschneider befinden sich entweder über oder unter dieser Ebene. Die dadurch entstehende Verzerrung des Profils ist bei der Profilierung der Vorschneider zu berücksichtigen.

Das Profilieren der Mehrzahnscheiben ist wesentlich aufwendiger als für eine Einzahnscheibe. Ein Einkorndiamant kann meist nicht benutzt werden, da er nicht die Lücke zwischen zwei nebeneinanderliegenden Zähnen mit den geforderten kleinen Radien ausformen kann. Profildiamanten mit definiertem Spitzenradius haben eine zu kurze Standzeit und sind höchstens für eine Einzelfertigung verwendbar. Praktische Lösungen bieten Diamantscheiben, die bahngesteuert das Scheibenprofil erzeugen. Profilkorrekturen können leicht über die Steuerung umgesetzt werden und andere Zahnformen ohne Wechsel der Diamantscheibe erzeugt werden. Ist das Scheibenprofil endgültig definiert, können für die Serienproduktion Diamant-Profilrollen eingesetzt werden, die das komplette Scheibenprofil über eine Einstichbewegung auf die Schleifscheibe kopieren. Ohne Diamantrolle arbeitet das Krushierverfahren. Hierbei wird eine Stahlrolle mit dem Scheibenprofil gegen die Schleifscheibe gedrückt und bei geringer Drehzahl ohne Relativbewegung zwischen Scheibe und Rolle die Scheibe profiliert. Dieser Prozess hängt stark vom Bediener ab. Die Standzeit der Stahlrollen ist begrenzt und macht dieses Verfahren nur für eine Einzelfertigung interessant.

13.7.3.3 Schleifscheibenspezifikation

Schleifscheiben für das Schraubschleifen sind in der Regel feinkörniger als übliche Schleifscheiben für das Rundschleifen, da sie profiliert sind und die Korngröße kleiner sein muss als die zu schleifenden Radien. Ansonsten sind alle bekannten Scheibenspezifikationen möglich:

- Keramisch gebundene Scheiben mit konventionellem Korn verschiedener Spezifikation je nach Anwendung. Diese lassen sich noch mit Einkorndiamanten abrichten.
- Keramisch gebundene CBN-Scheiben bieten hohe Standzeit und sind besonders für die Serienfertigung geeignet. Auf Grund der hohen Kosten muss aber der Standzeitvorteil nutzbar sein, um wirtschaftlich zu produzieren. Das Profilieren kann nur mit rotierenden Diamantabrichtern erfolgen. Zusätzlich sind Sensoren zur Abrichtüberwachung erforderlich, die sicherstellen, dass bei den geringen Abrichtzustellungen im μm -Bereich das gesamte Scheibenprofil profiliert wird.
- Galvanisch gebundene CBN-Scheiben erhalten ihre Form bereits mit dem Herstellungsprozess. Das erspart



das Abrichten auf der Maschine. Allerdings lassen sich einmal vorhandenen Profile nicht korrigieren. Die erreichten Oberflächenqualitäten sind geringer als die keramischer Scheiben. Da sich geringe Rauigkeit und hohe Abtragleistung widersprechen, werden auch unterschiedliche Schleifscheiben für Vor- und Fertigschleifen eingesetzt.

- Diamantscheiben nur für spezielle Anwendungen bei Nichteisenwerkstoffen. Deren Profilierung ist jedoch besonders schwierig, da Diamant schlecht mit Diamant abgerichtet werden kann.

13.7.3.4 Außenschraubschleifen

Die größte Herausforderung ist der Temperatureinfluss bei langen Werkstücken, da sich die Wärmedehnung direkt auf die Steigung auswirkt. Die Fertigung sollte in einer klimatisierten Umgebung stattfinden. Zur Prozesskühlung und Schmierung wird Schleiföl verwendet, dessen Temperatur konstant gehalten werden muss. Da trotzdem durch den Schleifprozess Wärme in das Werkstück eingebracht wird, ist das Längsschleifen von der Reitstockseite zur Werkstückspindel durchzuführen. Der Reitstock muss die Wärmedehnung ermöglichen, die durch den Schleifprozess in das Werkstück eingebracht wird. Durch die genannte Schleifrichtung hat diese Wärmedehnung aber keinen Einfluss auf die erzeugte Steigung, da sie nur in dem bereits geschliffenen Teil des Werkstückes entsteht. Schließt sich jedoch ein zweiter Durchgang an, muss die Wärmeausdehnung beachtet werden.

Neben der Steigungsgenauigkeit ist ein geringer Zylinderfehler ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Um dies zu erreichen, ist eine mechanische Feineinstellung des Reitstockes eine grundsätzliche Voraussetzung. Zusätzlich bieten moderne Maschinen eine NC-gesteuerte Zylinderkorrektur, die unterschiedliche Korrekturwerte über die Schleiflänge ermöglichen.

Beim Spannen der Werkstücke ist zu beachten, dass die Position der Windungen immer gleich zur C-Achse ist, damit nach einem erstmaligen manuellen Einfinden die Schleifscheibe danach immer in die vorgearbeitete Windung einfindet. Es gibt aber auch Lösungen, die ein automatisches Einfinden ermöglichen.

13.7.3.5 Innenschraubschleifen

Für das Innenschraubschleifen gelten die gleichen Grundsätze wie vorab beschrieben. Da die Schleifschei-

be jedoch kleiner ist als die Werkstückbohrung, muss sie eine im Verhältnis zum Scheibendurchmesser bedeutend größere Abtragleistung bringen, wodurch ein häufigeres Abrichten erforderlich ist und die Standzeit sinkt. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit ist meist nicht möglich, da der kleine Scheibendurchmesser sehr hohe Drehzahlen erfordert und die kritische Drehzahl schnell überschreitet. Die kritische Drehzahl ist von der Länge des Schleifdornes abhängig, die wiederum durch die Länge des zu schleifenden Werkstückes vorgegeben wird. Eine Erhöhung der Steife des Schleifdornes durch einen größeren Schaftdurchmesser ist begrenzt durch die Kollisionsgefahr mit der Bohrung, wenn die Schleifspindel in den Steigungswinkel geschwenkt wird. Kleine Steigungen lassen sich meist einfach realisieren, bei größeren Steigungen ist das Schleifen nur mit korrigiertem Profil möglich, da die Schleifspindel nicht oder nicht ganz in den Steigungswinkel geschwenkt werden kann.

Eine zielgenaue Prozesskühlung und Schmierung ist besonders zur Vermeidung von Brandschliff erforderlich. Dazu gehört neben der äußeren auch eine innere Kühlmitteldüse durch die Werkstückspindel, die mit der Schleifscheibe mitläuft und dadurch immer genau auf die Scheibenflanke gerichtet ist.

Obwohl meist Einzahnscheiben verwendet werden, sind auch Mehrzahnscheiben möglich, wenn die Profilverzerrung durch das Vor- und Nachschneiden beachtet wird. Das Abrichtverfahren sollte den geringen Kräften angepasst sein, die der Schleifdorn aufnehmen kann. Auch sollte die Axialposition der Schleifscheibe vor dem Abrichten kontrolliert werden, um keinen Profilversatz zuzulassen. Dazu bieten moderne Maschinen geeignete Messvorrichtungen an.

Das manuelle Einfinden in die vorgearbeitete Windung ist komplizierter als beim Außenschraubschleifen, da es nicht eingesehen werden kann. Daher besitzen die Werkstücke oft ein Merkmal an der Außenkontur, zu dem die Windung positioniert werden muss. Andernfalls ist ein automatisches Einfinden in die Windung möglich.

Da das Gewinde oft eine sehr hohe Laufgenauigkeit zu Außendurchmesser, Anlagefläche oder Bohrung haben muss, besitzen moderne Maschinen mehrere Bearbeitungseinheiten, die eine Bearbeitung aller relevanten Flächen in einer Aufspannung ermöglichen (Buderus Schleiftechnik 2010).

Literatur zu Kapitel 13.7.3

Buderus Schleiftechnik GmbH (Hrsg.): Katalog Buderus CNC Gewindeschleifmaschinen, Asslar 2010.

13.7.4 Zahnflankenschleifmaschinen

Frank Reichel

13.7.4.1 Einleitung

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Maschinen für das Zahnflankenschleifen von Zylinderrädern. Zum Schleifen von Kegelrädern werden Maschinen eingesetzt, die in ihrem Grundaufbau und ihrer Kinematik den Maschinen entsprechen, bei denen Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide eingesetzt werden. Deshalb wird an dieser Stelle nicht darauf eingegangen.

Durch Zahnflankenschleifmaschinen wird eine sehr komplexe Kontur geschliffen – die Evolvente entlang einer Schraubenlinie (Schrägverzahnung) überlagert zumeist mit Zahnflankenmodifikationen. Um diese Aufgabe im Mikrometerbereich bei höchstmöglicher Produktivität zu erfüllen wurden sehr anspruchsvolle Maschinen entwickelt. Zumeist sind die Konstruktionen zugeschnitten auf das verwendete Bearbeitungsverfahren. Abbildung 13.219 zeigt die prozentuale Verteilung der Zahnflankenschleifmaschinen bezogen auf die Verzahnungstechnologie und den Werkstückdurchmesser.

Einen weiteren großen Einfluss auf die Maschinenkonstruktion hat die Lage der Werkstückachse – horizontal oder vertikal. Eine horizontale Werkstückachse hat Vorteile bei wellenförmigen Werkstücken (Ritzel) bis ca. 200 kg, die zwischen Spitzen bearbeitet werden sollen. Zum einen ist dann der Reitstock stabiler an die Maschinenstruktur angebunden, zu anderen ist eine bessere Automatisierbarkeit gegeben. Für scheibenförmige Werkstücke (Räder) und bei schweren Werkstücken hat die

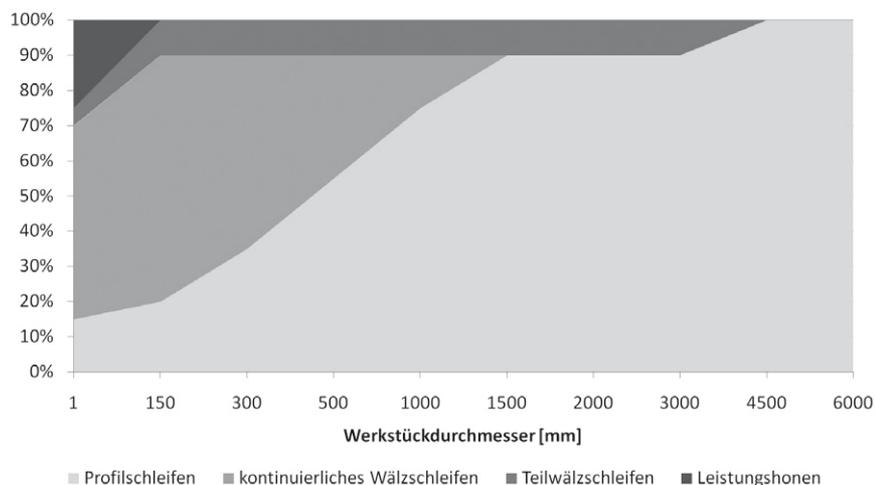


Abb. 13.219: Prozentuale Verteilung der vorhandenen Zahnflankenschleifmaschinen

vertikale Werkstückachse Vorteile – Automatisierung, Spannen, Ausrichtbarkeit schwerer Werkstücke und Minimierung der Verformungen durch das Eigengewicht.

13.7.4.2 Maschinen für das diskontinuierliche Wälzschleifen (Teilwälzschleifen)

Mit solchen Maschinen der Fa.Maag/Zürich und Fa.Niles/Berlin wurde um 1930 begonnen Zahnräder zu schleifen. Bis ungefähr zum Jahr 2000 wurden diese Maschinen geliefert. Ab den 1980er Jahren wurden sie mehr und mehr von hauptsächlich Profilschleifmaschinen verdrängt. Es sind aber immer noch tausende solcher Maschinen in der Verzahnungsfertigung weltweit anzutreffen.

In Abbildung 13.220 ist eine Maschine nach dem Niles-Verfahren zu sehen. Die Schleifscheibe wird mit einem

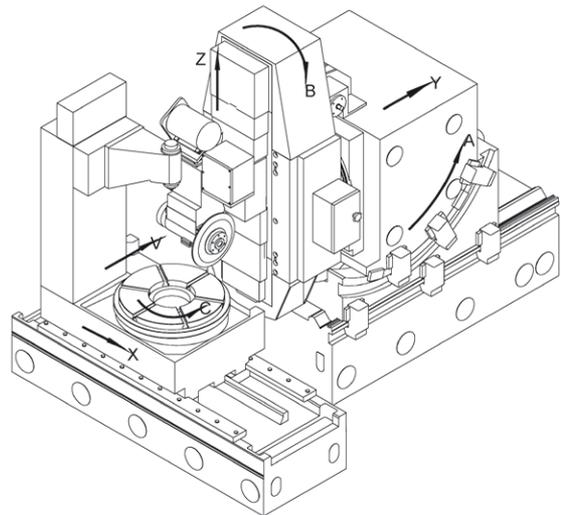


Abb. 13.220: Teilwälzschleifmaschine

Stichwortverzeichnis

Symbole

0-Punkt-Spannsysteme 1115
5-Achs Bearbeitung 1095

A

Abbildungsgenauigkeit 1192, 1194
ABCD-Matrix 1160
Abrasion 91
Abrasive-Wasserstrahl-Schneiden 1249
Abrichteinrichtung 1014
Abrichten 655, 656, 745, 964, 1012, 1288
Abrichtgeräte 617
Abrichtparameter 1014
Abrichtprozess 571, 900
Abrichtrolle 1012
Abrichtwerkzeug 573, 580, 630
Abschnittentsorgung 507
Abstützen 183
Abtrag 867, 1187, 1192 ff, 1208, 1209, 1212, 1218
Abtragen 1133
 chemisches 1137
 chemisch-thermisches 1139
 elektrochemisches 1187, 1193, 1216
 funktionserosives 1134, 1188
 thermisches 1133
 thermisches durch Laserstrahlen 1135
Abtragsrate 1192
Abtragstemperatur 887
Abwälzabtragen, elektrochemisches 1196 ff, 1208, 1218
Achsantriebe 623
Achsenwinkel 942
Achsenüberwachung 803
Adapterplatten 387
Additive 109
Adhäsion 90
Aluminiumoxid 1283
Amortisationsrechnung 58
Anbaugeräte 898
Andruckrolle 651
Annuitätenmethode 57
Anpressdruck 863, 887
Anpresskraft 889
Antrieb-Plandrehkopf-Kombinationen 332
Antriebsleistung 895
Antriebssystem 122
Anweisungsteil 141
Anwendungsbereich, sphärischer 892
Anwendungsprogramm 139
Arbeitsbereiche 821
Arbeitsgeschwindigkeit 734
Arbeitsmaske 1335
Arbeitsprinzip 819
Arbeitsraum 1112
Arbeitssicherheit 792
Arbeitsspalt 1188, 1193, 1196 ff, 1208, 1212
Architekturen
 antriebsbasierte 128
 controllerbasierte 128
Aspektverhältnis 1332
Ätzabtragen 1138
Aufbereitung von Honwerkzeugen 846
Aufbereitung von Kühlschmierstoffen 852
Aufbohren 328

Auflösung, anodische 1187
Aufnahmetechnik 832
Aufspannung, mehrfache 1095
Ausbrüche 88
Ausführungsformen 127
Ausgangsgrößen 115
Auskesseln 1193
Auslegungsmöglichkeiten 820
Außenhonen 816
Außenhön-Werkzeug 842
Außenräumen 468
Außenrundhonen 817
Außenrundschleifen 538
 von Behältern 722
 von Draht 723
 von Zylindern 720
Außenrundschleifmaschinen 627
Außenschraubschleifen 664
Außenwirbeln 1053
Auswuchteinrichtungen 584
Auswuchten 618
Auswuchtgeräte 617
Auszahlung 28
Automatisierung 16, 660
Automatisierungseinrichtungen beim Tiefbohren 372
Automatisierungsgrad von Sägemaschinen 503
Automatisierungskonzepte 280
Axialspannfutter 263

B

Bahnbewegung 123
Bahnplanung 123
Bahnvorbereitung 125
Bandfinish-Bearbeitung 896
Bandsägen 497
Bandschleifen 540, 670, 685
 Störungsursachen 694
Bandschleifmaschinen 695
Bandvorschub 897
Bauform 408
Baugrößenordnung 821
Bauteilschädigung 1241
Bauteilspektrum 869
Bearbeitungseinheiten 1092, 1106
Bearbeitungsgeometrien 888
Bearbeitungsmodellierung, objektorientierte 134
Bearbeitungsschritte 136
Bearbeitungsspannung 1221
Bearbeitungsspektrum 888
Bearbeitungszentrum 407, 1095, 1097, 1098, 1100
Bearbeitungszugaben 864
Beladestation 308, 1086
Beladungskonzepte 1111
Berechnungsgrundlagen 889
Berechnungsverfahren 860
Beschichtungen 93, 171
 im Gewindebohren 1041
Betriebsabrechnungsbogen 33
 Aufbau 33, 34
 Aufgaben 33
 Schlüsselgrößen 33
Betriebsart 139
Bettschlitten 206

Beugungsmaßzahl 1160
Bewegungsachsen 407
Bewegungssteuerung 123
Bezugsprofil 938, 939
Bezugssysteme 74
 Werkzeug-Bezugssystem 74
 Wirk-Bezugssystem 74
Bindemittelsysteme 681
Bindung 731
 keramische 565
 metallische 565
Bindungsmaterial 845
Bindungssysteme 564
Bindungswerkstoff 844
Bohren 313, 1196
Bohren von FVK 1244
Bohrerschleifen 746
Bohrfutter 334, 1064
Bohrgewindefräser 1049
Bohrmaschinen 344
Bohrprozess 299
Bohrung, profilierte 818
Bohrungsbearbeitung
 lageeregelte Werkzeuge 331
Bohrungsdrehen 267
Bohrungsschleifen 1295
Bohrverfahren 313
Bohrvorrichtungen 338
Bohrwerkzeuge, zweischneidige 326
Bohrzentren 384
Bornitrid, kubisches 103, 844, 845
Brandschutz 795
Brennschnittteile beim Bandschleifen 708
BTA-Bohren 365
Bügelsägen 496

C

CAD/NC-Kopplung 133
Carbide 1284
CBN-Schleifscheibe
 galvanisch gebunden 1016
 keramisch gebunden 1023
CD-Schleifen 578
Centerless-Schleifen 1294
Cermet 99
CFK-Werkstoffe 1243
CIS-Schleifen 577
CNC-Bohrzentren 384
CNC-Maschinen 383
CNC-Steuerungen 409
CNC-Universaldrehmaschine 209
CO₂-Emissionen 889
CO₂-Laser 1163
Coilstrukturschliff 712
Coronieren 899
Crushieren 579
CVD 105
CVD-Beschichtungsverfahren 172

D

Deckungsbeitrag 44
Decoder 125
Dehndorne 190
Dehnspannfutter 335
Deklarationsteil 141
Delamination von FVK 1244

Diamant 102, 500, 563, 844, 845
Diamantdrehmaschinen 280
Diamantformrollen 576
Diamantscheibe 663
Diamantschleifscheiben 1281
Diamantschneidstoff 1242
Diamantwerkzeuge 1286
Diffusion 92
DIN 8589-14 887, 898
DIN EN 61131 136
DIN S66025 128
Dioden-Laser 1164
Direkthonen 899
Direktmesssysteme
 mechanische 854
 pneumatische 856
Divisionskalkulation
 Äquivalenzziffernrechnung 35, 36
 Stufendivisionskalkulation 36
Doppelhonwerkzeug 836
Doppelkegelscheibe 1007
Dornhonen 873, 875
Dornhonwerkzeuge 840
Drahterodieren 1137
Drallräumen 468
Drehantrieb 820
Drehautomaten 228
Drehbearbeitung 199
Drehen 147
 Berechnungsverfahren 159
 Handspannfutter 185
 historische Entwicklung 147
 Kraftspannfutter 186
 Spanneinrichtungen 183
 Verfahren 150
 Werkstückaufnahmen 183
 von FVK 1247
 von Nickellegierungen 1263
 von Titanlegierungen 1276
Dreh-Fräs-Bearbeitungsmaschinen 298
Dreh-Fräszentrum 300
Drehmaschinen 147, 204
 für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung 158, 285
 Längsnutenbearbeitung 177
 Übersicht 154
 zweispindelige 258
Drehmaschinenrevolver 176
Drehmeißel 164
Drehmeißelklemmhalter 174
Drehmoment 863
Drehprozess 299
Drehräummaschine 297
Drehschalen 298
Dreh-Schleifzentrum 261
Drehschnitt 733
Drehspindereinheit 279
Drehteile 277
Drehverfahren nach DIN 8589-1 150
Drehwerkzeuge 164
Drehzellen 156, 218
Drehzentrum 156, 218, 254
Dreibacken-Bohrfutter 334
Druckeigenspannungen 822, 872, 873, 888
Durchgangsbohrung 817
Durchgangsschleifen 648
Durchlaufbearbeitung 892
Durchlaufschleifen 609

- E**
- Ease-Off 990
 - Eckenradius 74, 77
 - Eckenwinkel 76
 - Eckfräser 422
 - ECM-Entgratvorrichtung 1223
 - ECM-Jet-Verfahren 1196
 - ECR-Typ 1171
 - Edelstahlcoils, Bandschleifen von 710
 - EDM, Electro Discharge Machining 1143
 - EDM von FVK 1250
 - Effektivverzinsung 57
 - Eigenspannung 901
 - Einbaukartusche 305
 - Eingangsgrößen 115, 860
 - Eingriffsbogen 734
 - Einheit, modulare 896
 - Einleisten-Honwerkzeug 837
 - Einlippenbohren 362
 - Einlippenbohrverfahren 325
 - Einnahme 28
 - Einspannen von FVK 1248
 - Einspindeldrehautomaten 228
 - Einspindelmaschine 257
 - Einspindler 257
 - Einstechschleifen 609, 627, 650, 662, 763
 - Einstechverfahren 890, 892
 - Einstellwinkel 76
 - Einzahlungen 28
 - Einzelkosten 29
 - Einzelteilverfahren 987, 990
 - Ejektorbohren 366
 - Electro Discharge Machining, EDM 1134
 - Elektroden 1188, 1189, 1193 ff
 - Elektrodenisolation 1194, 1200
 - Elektrodenwerkstoffe 1149
 - Elektrolyte 1187 ff, 1193, 1196, 1200 f, 1207 ff, 1216, 1222
 - Elektrolytverarmung 1192
 - Elektrolytversorgung 1195, 1196, 1206 f
 - Elektrolytzuführung 1200
 - Elektronenstrahlolithografie 1335
 - Elektro-Spanner 201
 - Elektrostate 799
 - Emission, induzierte 1156
 - Endqualität 866
 - Endwert 56
 - Energiedichte 1340
 - Energieeffizienz 200, 1097
 - Entgraten
 - elektrochemisches 1218
 - thermisch-chemisches 1138
 - Entladestation 308, 1086
 - Entsorgungskosten 736
 - Epizykloide 990
 - Ereignis 139
 - Ermüdungsfestigkeit von FVK 1242
 - Ertrag 28
 - Evolvente 937, 938
 - Ex-Cell-O-Verfahren 898
 - Excimer-Laser 1165
- F**
- Face-Hobbing 990, 992
 - Face-Milling 990, 991
 - Fahrschnitt 733
 - Fahrständermaschine 611
 - Faradaysches Gesetz 1187
 - Faser-Laser 1164
 - Faserorientierung 1243
 - Fässler 899
 - Feature 136
 - Feilen 515
 - Feilwerkzeuge 515
 - Feinbearbeitungszentren 756
 - Feinbohrmaschinen 350
 - Feinbohrspindel 354
 - Feinbohrstangen 358
 - Feinbohrwerkzeuge 355
 - Feindrehmaschinen 157
 - Feinstbearbeitungszentrum 896
 - Feldbus 121
 - FEPA-Standard 679
 - Fernfelddivergenz 1159
 - Fertigschleifen 763
 - Fertigungseinzelkosten 39
 - Fertigungsgemeinkosten 39
 - Fertigungssysteme 386
 - Fertigungssystem zur Fertigbearbeitung 1088
 - Fertigungsverfahren
 - mit geometrisch bestimmter Scheide 22
 - mit geometrisch unbestimmter Scheide 23
 - nach DIN 8580 21
 - Fertigungsverfahren, trennende 73
 - Fertigungszelle 386
 - Fertigwälzfräsen 986
 - Festigkeit, dynamische 1153
 - FG-Verfahren (VW) 880
 - Finanzplan 59
 - Fingerfutter 188
 - Finishbandtechnik 893
 - Finishen 816
 - Finishsteinvarianten 893, 894
 - Fixe Kosten 29
 - Flächen, sphärische 892
 - Flachschleifen 600
 - Flachschleifmaschinen 597
 - Flachschliff von Massivholz 714
 - Flammenmelder 795
 - Flankenlinienmodifikationen 939
 - Fließspannbildung 79
 - Fluidstrahlen 816, 880, 882
 - FMEA 164, 1167
 - FMF-Hybridhonverfahren 880
 - Form-Bandschleifen 690
 - Formbohren 377
 - Formdrehen 153
 - Formfeilen 515
 - Formfräser 428
 - Formgebung 1285
 - Formhonen 886
 - Formhonwerkzeug 839
 - Formmesser 994
 - Formregelungseinrichtungen 859
 - Formschleifen 540, 715
 - Formverfahren 935
 - Fräsbearbeitung faserverstärkter Kunststoffe 1242
 - Fräsen, trochoides 445, 1278
 - Fräsen von Nickellegierungen 1267
 - Fräsen von Titanlegierungen 1277
 - Fräser für die Aluminiumbearbeitung 429
 - Fräsergangzahl 979
 - Fräuserschleifen 747
 - Fräsköpfe 306

Fräsmaschinen 442, 404
Fräsprozess 299, 441, 450
Fräsverfahren 401
Fräswerkzeuge 416
Freifläche 73
Freiflächenverschleiß 87
Freiformdrehen 153
Freihandtrennen 729, 732
Freistich 817
Freiwinkel 76
Freiwinkelschleifen 748
Fremdleistungskosten 32
Fresnelbeugung 1333
Fügetechniken 1344
Führungen 410
Führungsbahnenschleifen 542
Führungsgrößen 115
Führungssysteme 275
Fundamentierung 776
Funkenerosion 1143
Funktion 140
Funktionsbaustein 140
Funktionssteuerungen 116
Fußfreischnitt 981

G

Gabelfräskopf 307
GA-Faktor 734
Gauß'scher Strahl 1159
G-Code 128
Gebühren 32
Gefrierspannen 185
Gegenlaufräsen von FVK 1243
Gegenlaufschleifen 703
Gegenspindelmaschine 259
Gemeinkosten 29
Generatoren 1204ff
Geradheitsmessung 874
Gesamtzerspanarbeit 85
Geschwindigkeitsprofile 126
Gewebe 680
Gewichtsausgleich 1095
Gewichtsreduzierung 200
Gewinde 1027
Gewindeausführungen 1028
Gewindebearbeitung 1067
Gewindebohren 1034
Gewindebohren, Werkzeuge 1038
Gewindedrehen 161, 1057
Gewindedrehen, Zustellungsarten 1059
Gewindefertigung 1034
Gewindefertigung, Maschinen zur 1061
Gewindefräsen 1047
Gewindefräser 431
Gewindefräsfurchen 1052
Gewindefurchen 1042
Gewindefurcher, Werkzeuge 1044
Gewindeherstellung 1028
Gewindeschleifen 641
Gewindeschneidapparate 1067
Gewindeschneidfutter 1064
Gewindesenkräfer 1049
Gewindestrehlen 1060
Gewindewirbeln 1053
Gewinnvergleichsrechnung 52
Gewirke 680

GFK-Werkstoffe 1243
Glasfasergewebe 731
Gleichlaufräsen von FVK 1243
Gleichlaufschleifen 703
Gleithonen 878
Gleitschleifen 542
Goldabsorber 1335
Gouy-Phase 1160
Gratbildung 736
Großbandsäge 505
Großflächenwerkzeuge 839
Großhohmaschinen 821, 826
Großkurbelwellen 790
Grünbearbeitung 1286
Grundhalter 436
Grundkörper 566
Grünräumen 478
G-Wert 868

H

Handeinlegevorrichtung 660
Handfeilen 516
Handhabung von Werkstücken 1116
Handling 820, 851
Hartbearbeitungsverfahren 1289
Hartdrehen 264
Härte 97
Härtegrad 731
Hartfeinbearbeitung 762, 1019
Hartmetall 169, 99
Hartmetall-Sägewerkzeuge 501
Harträumen 478
Hartschalen 1022
Hartwirbeln 1056
Hauptbewegungen 889
Hauptkomponenten 820
Hauptschneide 74
Hauptspindelantrieb 820
Hauptzeit 161, 1095, 1100
Hauptzeit, Gewindeherstellung 1030
Hebelausgleichfutter 193
Heißprägen 1333
Heißtrennen 734
Herstellverfahren, wälzende 935
Hiebarten 517
High Speed Cutting 158
Hilfsfunktionen 131
Hobelkämme 1001
Hobelmaschine 458, 461
Hobeln 462
Hobel- und Stoßmaschinen 1001
Hochdruckspannzylinder 200
Hochgeschwindigkeitsbearbeitung 285
Hochgeschwindigkeitsgewindebohren 1038
Hochgeschwindigkeitszerspanung 285
Hochleistungsdrehmaschine 296
Hochleistungsfräsen 444, 1279
Hochleistungskeramik 1284
Hochpräzisionsdrehen 275
Hochtemperaturwerkstoffe 1261
Hochvorschubfräser 426
Hohlschaftkegel 333, 437
Honband-Technologie 896
Honbeläge 846
Honen 1296
Honleistenlänge 862

- Honleisten-Zustellsystem 820, 852
 Honmaschine für Verzahnungen 901
 Honmaschinenarten 819
 Honmesssystem 820
 Honmodul 824
 Honprozess 860, 867, 1020
 Honrad 968
 Honring 1019
 Honsystem 827
 Honverfahren 814, 816
 Honzeiten 864
 Honzentrum 821, 825
 Honzugabe 867
 Horizontales Bearbeitungszentren 406
 Horizontal-Langhubhohmaschinen 827
 HSC-Bearbeitung 158
 HSC-Bohrmaschine 382
 HSC-Maschinen 382
 Hubbewegung 820
 Hublagerschleifen 789
 Hublänge 862
 Hubschleifen 541
 Hüllschnittabweichung 958
 Hybridansatz 1342
 Hybridverfahren 816, 818
 Hydraulikventile 875
 Hydro-Dehnspannfutter 335
 Hydrostatische Gleitführung 410
 Hypoid 970
 Hypoidgetriebe 943
 Hypoidräder 990
- I**
- ICP-Typ 1171
 Implantate, Schleifen von 767
 Inconel 1262
 Indexschnitt 733
 Indirektmesssysteme 858
 Innen-/Außenschneider 972, 992, 993
 Innengewindeerzeugung 1050
 Innengewindeschleifen 642
 Innenhonen 816
 Innenprofilhonen 817
 Innenräumen 467
 Innenräummaschinen 483
 Innenrundhonen 817
 Innenrundscheifen 538
 Innenrundscheifen von Behältern 722
 Innenrundscheifmaschinen 634
 Innenschleifen 635
 Innenschraubschleifen 664
 Innenwirbeln 1054
 In-Prozess-Messung 777
 Interpolation 1095
 Investitionsprogramm 50
 Investitionsrechnung 51, 54
 Ionenstrahlverfahren 1166
 Istkostenrechnung 43
- J**
- Joule'sche Wärme 1188
- K**
- Kalkulation, retrograde 46
 Kalttrennen 734
 Kammrisse 89
 Kapitalkosten 31
 Kapitalwert 56
 Kappschnitt 733
 Karbidbildner 98
 Karusselldrehmaschinen 157, 268
 Kaufman-Typ 1170
 Kegelrad
 Bogenverzahnung 941
 Evolventenverzahnung 941
 Geradverzahnung 941, 991
 Läppmaschine 975
 Schrägverzahnung 941
 spiralverzahnt 994
 Stoßmaschine 1001
 Zykloidenverzahnung 941
 Keilhakenfutter, kraftbetätigtes 186
 Keilstangenfutter 185
 Keilwinkel 76
 Keramik 170
 technische 1283
 Kernlochformen 1038
 Kinematik 819
 Kleinsignalverstärkung 1158
 Kleinstbohrungen 841, 873
 Koaxialhonen 879
 Kolbenlaufbahn 816
 Kolkverschleiß 87
 Kollisionsüberwachung 803
 Kollisionsvermeidung 807
 Kombiniertes Verfahren 818
 Kompaktabscheider 798
 Kompakt-SPS 137
 Komplettbearbeitung 240
 Komplettbearbeitungsmaschine 1098
 Konditionieren 569, 630, 1288
 Konischhohwerkzeug 839
 Konsolspannfutter 264
 Kontursägen 504
 Kontursenken 1193, 1196 ff
 Konturüberwachung 803
 Konzentration 847
 Koordinatenbohrmaschinen 360
 Koordinatensystem 129
 Korkschleifbänder 713
 Korngößenangaben 564
 Korngröße 844
 Kornmaterial 845
 Kornwerkstoffe 561
 Korrosionsschutzwirkung 851
 Korund 561
 Kostenartenrechnung 30
 Kostenrechnungssysteme 42
 Kostenstellenrechnung 32
 Kostenträgerzeitrechnung 35
 Kostenvergleichsrechnung 51
 Kraftspannanlage 195
 Kraftspanneinrichtungen 199
 Kreissägen 496
 Kreuzschliff-Superfinishen 892
 Kreuzschlitten 1095
 Kubisches Bornitrid 170
 Kubisch kristallines Bornitrid (cBN) 563
 Kugelgewindespindel 1056
 Kugelkopffräser 426
 Kugelrollspindel 1095
 Kühlaggregate 894

Kühlschmiermittelmanagement 1108
Kühlschmierstoff 554, 848, 894
 Aufbereitung 894
 Zuführtechniken 852
Kühlschmierstoffe 108, 704
Kühlschmierstoffversorgung 432
Kühlschmiersystem 555
Kühlwirkung 851
Kunstharzbindung 564
Kuppelkalkulation 42
Kurbelwelle 896
Kurbelwellenfräser 430
Kurbelwellenschleifmaschinen 785
Kurzhubhonen 815, 816, 887
Kurzhubhонvarianten 888
Kurzschlussüberwachung 1212

L

Ladungsträgerverarmung 1212
Lagekorrekturen 816
Lagergassenbearbeitung 874
Lagerintegration 509
Lagerstelle, hydrostatische 1095
Lagerungen 410
Lamellenspannbildung 79
Langdrehautomaten 156, 243
Längenausgleich 1065
Langgutlager 510
Langhubhonen 816
Langhubhонvarianten 816
Längsbearbeitung 892
Längsdrehen 161
Längsformschleifen 763
Längsschleifen 662
Längs-Seiten-Planschleifen 608
Längs-Umfangs-Planschleifen 602
Langzeitschleifband 713
Langzeitschleifmittel 677
Läppen 907 ff, 1023
Lärmmissionen 737
Laser 1151
Laserbedingung 1158
Laserhonen 816, 883
Laserstrahlschneiden 1137
Laserstrahlung 1155
Laufbahnbearbeitung 892
Leerhub 1001
Leichtbauspannmittel 200
Leistenhонwerkzeug 842
Leistung 28
Leistungsfaktor 734
Leistungshonen 899
Leistungshонmaschine 901
Leitsteuerung 118
Leitungsführungen 1070
Lenkzahnstange 613
Lift-&Carry-Transfer 824
LIGA-Technik 1332
Linearachse 306
Lineardirektantrieb 256
Linearfinishen 889
Lithografie, optische 1338
Look-ahead 123
Lorentzkraft 1343
Löscheinrichtung 797
Luft- und Raumfahrtanwendungen 428
Lünetten 208, 596

M

Magnetspanntechnik 597
Maschinen 893
Maschinenarten 819
Maschinenbett 286
Maschinenkonzepte, modulare 820
Maschinenrichtlinie 792
Maschinenschaber 523
Maschinensteuerung 118
Maschinenstundensatz 34, 40
Maschinenwerkzeuge 522
Mask Aligner 1338
Maske 1332
Materialabtrag 867, 1187, 1195, 1210
Materialeinzelkosten 39
Materialgemeinkosten 39
Materialkosten
 Betriebsstoffkosten 31
 Fertigungsmaterialkosten 31
 Hilfsstoffkosten 31
Mechanische Schrittzustellung (formschlüssig) 853
Medizintechnik 1055
Mehrfachaufspannung 1094
Mehrfachbearbeitung 834, 1096
Mehrleisten-Hонwerkzeug 836
Mehrmaschinensysteme, verkettete 1101
Mehrspindelbohrkopf 1100
Mehrspindeldrehautomaten 230
Mehrspindeleinheit 1096
Mehrspindelkopf 1096, 1097, 1098
 Lochbild 1094, 1096
Membranfutter 188
Mengensäge 506
Messbüchse 854
Messdorn 854
Messerkopf 972, 991, 994
Messsteuerungen 627
Messsystem 820, 854
Messtaster 1108
Microfinishen 816
Microfinishing 721
Mikrofertigung 1196
Mikromontage 1344
Mikrostrukturierung 1175
Miniaturfräser 427
Minimallängenausgleich 1067
Minimalmengenschmierung 432, 801, 1069, 1096, 1100
Minisynchronmotor 1340
Mitnehmer 192
Mittellagerbearbeitung 788
Mittelantriebsdrehmaschinen 283
Modularbaukasten 261
Modulare-SPS 138
Modulschnecke 1056
Molybdän und seine Legierungen 1257
Monokristalliner Diamant 171
Morsekegel 435
Motorblock 816, 818
Motorspindel 252
Multifunktionsmaschinen 259

N

Nachformdrehen 162
Nachschliff 980
Nassbearbeitung 1070
Nasstrennen 732

- NC-Programmierung 128, 131
NC-Simulation 1122
NC-Steuerung 119
Nd:YAG-Laser 1164
Nebenschneide 74
Nebenzeit 1094, 1100
Negativresist 1332
Neigungswinkel 76
Neutralisatoren 1172
Nichtoxidkeramik 1284
Nickel 1339
Nickelbasislegierungen 1260
Niederhalter 652
NiFe-Legierung 1342
Nimonic 1263
Nitride 1284
Nockenwellenschleifmaschinen 778
Normalkostenrechnung 43
Normung 815
Nullpunkterkennung 1212
Nutenfräsen 445
Nutzstoßen 179
Nutzwertanalyse 62
- O**
Oberflächen 455, 462
Oberflächen-Flachschleifen 711
Oberflächengüte 849
Oberflächenrauheit 864
Oberflächenrauheit beim Schleifen 556
Oberflächenstruktur 1020
Objektlöschanlage 795
Ohm'sches Gesetz 1191
Ölfilmstärke 885
Ölhalte und Transportmechanismen 881
Ölnebelabscheidung 798
Oszillationsfinishen 887, 889, 890
Oszillationsschnitt 733
Oxidationsvorgang 94
- P**
Paletten-Transportsysteme 1119
Palettenwechsler 274, 1111
Palettieren 508
Parallelbearbeitung 1094
Passivkraft 82
Peak-Honen 875
PEM-Verfahren 1194
Pendelschleifen 577, 978
Pendelschleifverfahren 602
Periode 139
Personalkosten 30
Pick-up-Drehmaschine 256
Pick-up-Schnittstelle 305
Pick-up-Station 262
Pick-up-Werkstückwechsel 1098
PIG-Typ 1171
Pinole, hydrostatische 1095
PKW-Getrieberad 902
Plan-Bandschleifen 689, 708
Plandrehen 267
Plandrehmaschinen 156, 248
Planetengetriebe 1345
Planetenräder 832
Planflächen 892
Planfräser 421
Plankostenrechnung 43
Plankurvenfutter 186
Planlappen 910
Planrad 941, 942, 990
Planräumen 468
Planschlagkorrekturen 816
Planschleifen 536
Planschleifmaschine 600, 610
Planschleifverfahren 600, 1289
Plasmapolieren 1230, 1231
Plateau-Honen 876
PMMA (Plexiglas) 1335
Polieren 921 ff
Polieren, elektrochemisches 1228
Polygonspanntechnik 336
Polykristalliner Diamant 171
Polymerbeton 895
Portallader 274, 275
Portal-Radsatzdrehmaschine 294
Portfoliodarstellung 63
Positionierüberwachung 804
Positionshonen 816, 828, 885
Positivresist 1332
Postprocessor 128
Powerhonen 899
Präzisionsbearbeitung 632, 756
Präzisionsdrehmaschinen 157, 275
Präzisionsfeilen 516
Präzisionsspannfutter 336
Processor 128
Produktionsdrehmaschinen 155, 210
Produktionsfaktoren nach Gutenberg 27
Profil-Bandschleifen 690
Profilbearbeitung 506
Profildrehen 152
Profilfeilen 515
Profilfräsen 987
Profilfräser 988
Profilfräsmaschinen 951
Profillappen 912
Profilmodifikationen 939
Profilräumen 468
Profilschleifen 540, 611, 666, 1013
Profilschleifmaschine 965
Profilschleifverfahren 600
Profilverfahren 940
Programm 141
Programmiersprache 128, 133, 142
Programmiersysteme 624
Programmorganisationseinheiten 141
Programmsteuerung 116
Protuberanz 981, 1010
Prozess-Bearbeitungsmodule 1110
Prozessgestaltung auf Fräsmaschinen 440
Prozesskinematik 900
Prozesskostenrechnung 46
Prozesskostenrechnung, ressourcenorientierte 48
Prozessmodellierung 450
Prozessregelung 451, 895
Prozesssteuerung 120
Prozessüberwachung 451
Pulversynthese 1284
Pumpenrotor 612
PVD 105

Q

Qualitätsmanagement 1120
Qualitätsmerkmale 816, 832, 901
Qualitätsstand 822
Querdrehen 162
Querrisse 89

R

Radialbohrmaschinen 346
Radialfinishen 889
Radialoszillation 888, 891
Radialspanntechnik 831
Radialspannungen 736
Radienabrichten 638
Radsatzdrehmaschine, mobile 291
Radsatzwellen-Drehmaschine 296
Randschichten 1152
Randzone 872, 887
Raspeln 515
Rauheit 847, 864
Räumen 467
 Maschinen und Systeme 481
 Schneidstoffe 478
 von Nickellegierungen 1269
 von Titanlegierungen 1279
 Werkstückstoffe 468
 Werkzeuge 469
Räummaschinen
 Steuerungstechnik 490
Räumnadel 467
Räumprozess
 Berechnungsgrundlagen 479
 Zerspankräfte 479
Räumverfahren 467
Räumwerkzeuge 612, 955
 Ausführungsformen 473
 Befestigung 474
 Instandhaltung 476
 Verschleiß 475
Räumwerkzeugschleifen 751
Rayleigh-Länge 1159
Reaktion, tribochemische 92
Regeln 115
Regelscheibenform 648
Regelsystem 820
Reiben 330
Reibungsreduzierung 889
Reibwert 863
Reinigungsanlage 894
Reinigungssystem 852
Reitstock 206
Reluktanzantrieb 1341
REM-Aufnahme 1337
Rendite 57
Rentabilitätsrechnung 52
Rentabilitätsvergleichsrechnung 53
Resist 1332
Resonator 1156
Richtwerte 315
Ringformen, sphärische 892
Roboter 1118
Rohrbearbeitungsmaschinen 302
Rohrschleifmaschine 720
Röntgenscanner 1333
Röntgentiefenlithografie 1332
Rotationsdrehen 264

Rotationsfinishen 887, 889, 892
Rotationsfinish-Maschine 894
ROX-Kennzahl 27
 Return on Equity (ROE) 27
 Return on Investment (ROI) 28
 Return on Sales (ROS) 27
Rückhub 1001
Rückkopplung 1158
Rückverfolgung von Werkstücken 1121
Rund-Bandschleifen 689
Rundheitsfehler 643
Rundheitsmessung 874
Rundkolbenfutter 188
Rundlappen 911
Rundräumen 468
Rundschalttisch 1084
Rundschleifen 538, 717
Rundschleifmaschinen 620
Rundschleifverfahren 1294
Rundtaktmaschine 1100
Rundtaktmaschinen 1077
Rundtisch 304
Rundtischmaschine 606
Rüstplätze 308
Rüstzeitoptimierung 193

S

Sacklochbohrung 817
Sacklochräumen 468
Sackloch-Werkzeuge 838
Sägeband 495
Sägeblattschleifmaschine 749
Sägen 495
Sägeverfahren 495
Sägewerkzeuge 499
Sägezentrum 510
Sättigungsintensität 1158
Satzräder 938
Säulenkonzept 896
Schaben 521
Schabmaschinen 1002
Schabrad 958, 1002
Schabschleifen 670
Schabverfahren 521, 1004
Schabwerkzeuge 522
Schafftfräsen 403, 427
Schafthaltersysteme 175
Schaffwerkzeuge 418, 422, 841
Schälrad 977
Schälwälzfräsen 986
Scheibenfräser 423
Scheiben-Laser 1164
Scherbänder 79
Schieber-Werkzeuge 357
Schleifbänder 671, 681, 683
Schleifbrand 1015, 1020
Schleifen 299, 1286
 von FVK 1248
 spitzenloses 643
 über Mitte 647
 unter Mitte 647
 von Nickellegierungen 1269
 von Nocken- und Kurbelwellen 542
 von Titanlegierungen 1280
Schleiffeinstbearbeitung 721
Schleifkenngrößen 546

- Schleifkorn 672, 674
Schleifkörperschutzhauben 793
Schleiflünetten 596
Schleifmaschinen 543, 1006
Schleifmittel 731
 auf Unterlage 670
 -körnungen 678
Schleifprozess
 Kenngrößen 535
Schleifscheiben 554, 753, 1016, 1287
Schleifscheibenbindungseigenschaften 754
Schleifscheibenprofil 662
Schleifscheibenverschleiß 570
Schleifscheibenverwaltung 616
Schleifscheibenwechsler 743
Schleifschnecke 1009
Schleifspalt 645, 655
Schleifverfahren 534, 536, 600
Schleifvorgang 549
Schleifwerkzeuge 561
Schleifzahnrad 898
Schleifzentrum 756, 613
Schlichten 455
Schlichtfräsen 419, 425
Schmelzkorunde 676
Schmierwirkung 851
Schnecken 944
 Duplexschnecken 946
 Globoidschnecke 944
 Zylinderschnecke 944
Schneckenräder 946, 998
Schneckenradwälzfräser 999
SchneckenSchalen 997
Schneidbeläge 843
Schneiden, funkenerosives 1144
Schneiden für Drehwerkzeuge 165
Schneidengeometrie 165, 448
Schneidenträger 174
Schneiderodieren 1135
Schneiderosionsanlage 1150
Schneidkantenpräparation 449
Schneidkeil 73
Schneidkeramiken 1264, 1267
Schneidkopfsystem 175
Schneidkornart 848
Schneidmittel 893
Schneidöle 109
Schneidplatten 170
Schneidräder 1001
Schneidstoffe 168, 843
 für FVK 1242
 konventionelle 844, 847
 zum Fräsen 416
 nach ISO 513 169
Schnellarbeitsstahl 169, 418, 98
Schnellhubschleifen 615
Schnellradialbohrmaschine 348
Schnellwechseleinsätze 1068
Schnitтарbeit 85
Schnittenergie 85
Schnittgeschwindigkeit 816, 860
 beim Bandschleifen 702
Schnittkosten 735
Schnittkräfte 81, 862
Schnittleistung 85
Schnittstelle 333
Schnittstellensystem 435
Schnittstrategien 441, 447
Schnittwerte für Schwermetalllegierungen 1254
Schrägeinsteichschleifen 630
Schraubdrehen 152, 1060
Schraubbläppen 912
Schraubräumen 468
Schraubschleifen 539, 662
Schraubwälzschleifen 962
Schrittzähler 858
Schruppen 455
Schruppfräsen 425
Schruppfräser 419
Schuhschleifverfahren 637
Schwalbenschwanzführung 272
Schwermetalle 1253
Schwimmende Spannung 343
Schwingschleifen 816
Segmentspanndorn 599
Selbstschärfeffekt 893
Senken 1144, 1187 ff, 1201, 1208, 1218
Senkerodieren 1135
Senkerosionsanlage 1145
Senkrechtdrehmaschinen 157, 251
Sensitivitätsanalyse 60
Setzmarkierungen 815
Shiften 1011
Shiftstrategie 986, 1011
Sicherheitsanforderungen 736
Sicherheitseinrichtungen 792
Sicherheitstechnik, NC-integrierte 809
Siliciumcarbid 562, 677
Siliziumcarbidkeramik 1284
Simulation von Fertigungssystemen 1121
Simulation von Zerspanprozessen 16
Sinterkorunde 676
Sintern 1286
Slope 127
Sonderbearbeitungsstationen 1110
Sonderdrehmaschinen 158, 289
Sondereinzelkosten
 der Fertigung 39
 des Vertriebs 39
Sonderlappverfahren 913
Sonderschleifmaschinen 772
Sonderschleifverfahren 542
Sondertiefbohrmaschinen 373
Spanarten 79
Spanbildung 77
Spänefall 1097
Spänemanagement 1108
Spanen von FVK 1242, 1248
Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide 536
Spanfläche 73
Spanformen 80
Spanndorne 190
Spanneinrichtungen für Drehmaschinen 207
Spannen von Werkstücken 1113
Spannest 1097
Spannfutter 333
Spannlage 1095
Spannmittel 287
 auf Verzahnungsschleifmaschinen 598
 für die Drehbearbeitung 263
Spannplatz 1095
Spannrundlaufgenauigkeit 333
Spannstock 341
Spannsysteme 435, 439, 744

Spannvorrichtung 336, 1095 ff
 für Feinbearbeitungen 359
Spannzangen 189, 335
Spannzangenfutter 335
Spanwinkel 76
Spheric-Honen 899
Spindelheiten 1093
Spindelkonfiguration 1096, 1097, 1098, 1100
Spindelkopf 1097
Spindeln 328
Spindelrevolver 1096
Spindelstock 205
Spindelüberwachung 803
Spindelwerkzeug 329
Spiralbohrer 326
Spiralfutter 185
Spiral-Gleithonen 878
Spritzgießen 1333
SPS 136
SPS-Programmierung 140, 141
Spulen 1339
Spülwirkung 850
Stabilitätsindex 646
Stabilitätskarte 451
Standzeit 444
Staubemissionen 737
Steifigkeit 97, 1095
Steilkegel 333, 436
Steinanpresskraft 889
Steinbreite 890
Steinlänge 889
STEP-NC 135
Step-Technologie 323
Steuerbohrung 875
Steuerkette 115
Steuerung 115, 117, 123 ff, 820
Steuerungsablauf 116
Steuerungsebenen 117
Steuerungseinrichtung 115
Steuerungsmittel 115
Steuerungssystem 118
Steuerungstechnik 115
Stillstandsüberwachung 805
Stirnflächenbearbeitung 652
Stirnmesserkopf 991
Stirnmitnehmer 184
Stirnräder 938
Stirnschleifen 600
Stirn-Umfangsplanfräsen 402
Störgrößen im Fräsprozess 447
Stößel 1001, 1095, 1096, 1098
Stoßen 299
Stoßmaschine 455, 456, 461
Stoßschaber 522
Strahlparameter, komplexe 1160
Strahlparameterprodukt 1159
Strahlqualitätskennzahl 1160
Strahlungstransportgleichung 1158
Streuabtrag 1194, 1197, 1198
Streubild 673
Stromdichte 1192, 1209
Struktur 731
Stückzeitberechnung 1098
Stützelement 700
Stützscheibe 699
Substrat 1334
Superfinish-Verfahren 721, 815, 816

Supportmaschine 604
Synchronreitstöcke 632
Synchrotronstrahlung 1332, 1333
System
 tribologisches 818
 verkettetes modulares 825
Szenariotechnik 61

T

Tangentialdrehen 265
Tangentialspannungen 736
Tantallegierungen 1259
Target Costing 46
Tauchfräser 425
Taumelfräsen von FVK 1247
Teamzusammensetzung 1170
Technische Investitionsplanung 49
Technische Investitionsrechnung 49
Technologieträgersystem 1095
Teilespektrum beim Verzahnungshonen 903
Teilkostenrechnung 44
Teilwälzschleifen 665, 959, 1006
Teleservice 820
Tellerscheiben 1006
Temperaturfelder 85
Temperaturmessung 86
Temperaturverteilung 86
Thermoplaste 1343
Tiefbohren 362
Tiefbohrmaschinen 362
Tiefbohrwerkzeug 383
Tieflochbohrwerkzeuge 325
Titanaluminide 1273
Titanbleche, Plan-Bandschleifen von 708
Titandrehen 1276
Titanlegierungen 1272
Toleranzen 13
Topfräumen 468
Topfschleifscheibe 991, 1023
Topografiemessung 266
Torusfräser 427
Trägerwerkstoffe für Schleifmittel auf Unterlage 680
Transfer-Honanlage 822
Transfermaschinen 1089, 1100
Transferzentrum 1094 ff
Transformation 1095
Trennen
 Bearbeitungsfehler 1241
 von FVK 1241
 handgeführtes 729, 732
 von Hartmetall 1242
 maschinengeführtes 729
Trennfräser 424
Trennschleifen 732
Trennschleifmaschinen 729
Tribos-Spannfutter 336
Trockenbearbeitung 1100
Trockenräumen 478
Trockentrennen 732
Tubusräumen 468
Turbinenschaufeln, Schleifen von 716, 760
Tuschierplatte 523

U

Udimet 1263
Ultrapräzisionsdrehen 275

Ultrapräzisionsdrehmaschinen 280
 Umfangsgeschwindigkeit des Werkstücks 889
 Umfangsplanfräsen 402
 Umfangsprofilfräsen 402
 Umschlingungswinkel 446
 Umspannen 1095, 1098
 Umspannvorgang 1100
 Universaldrehmaschinen 155, 204
 Universalsägen 505
 Universalschleifmaschine 742
 Unrundhonwerkzeug 839
 Unrundschleifmaschinen 639
 Unterflur-Radsatzdrehmaschine 290
 Unternehmerlohn, kalkulatorischer 32
 Unwuchtausgleich 587
 Unwuchten 584

V

Ventile 875
 Verbreiterung
 homogene 1158
 inhomogene 1158
 Vereinzelung 510
 Verfahrenskinetik 889
 Verfahrensmerkmale 818, 889
 Verfahrensstruktur 891
 Verfahrensvarianten 870, 890, 899
 Verformung, plastische 90
 Vergleich, paarweiser 63
 Verkettungen 16, 508
 Verkettungsarchitekturen 1101
 Verkettungseinrichtungen 304
 Verknüpfungssteuerungen 116
 Verschleiß 554, 87
 an der Schneidkante 173
 bei FVK 1242
 -formen 1267
 -keramiken 1283
 -mechanismen 90
 -schutzschicht 103
 -ursachen 90
 -widerstand 97
 Vertikalbandsägemaschine 504
 Vertikaldrehmaschinen 251, 253, 294
 Vertikal-Finishmaschine 895
 Vertikal-Innenrundhonmaschinen 852
 Vertikal-Langhubhonmaschinen 820
 Vertriebsgemeinkosten 39
 Verwaltungsgemeinkosten 39
 Verzahnen 299
 Verzahnmaschinen, spanende 947
 Verzahnungsfräser 427
 Verzahnungshonen 670, 816, 898, 1019
 Verzahnungsschleifmaschinen 598
 Verzahnungswerkzeuge 428
 Verzunderung 94
 Vollbohren 322
 Vollkostenrechnung 43
 Vollmantelwerkzeuge 840
 Vollnutenfräsen 1277
 Vorbearbeitung 865, 866
 Vorrichtung 829
 Vorschubachsen 409
 Vorschubarbeit 85
 Vorschubenergie 85
 Vorschubkraft 81
 Vorschubleistung 85

Vorschubmarkierung 958, 983
 Vorschubrichtung
 Gegenlauf 981
 Gleichlauf 981
 Vorschubrichtungswinkel 73
 Vorschubstrategie 983
 Vw-Wert 868

W

Wagnis, kalkulatorisches 32
 Wälzdrehen 152
 Walzendrehmaschinen 302
 Walzenschleifmaschinen 772
 Walzenwerkstatt 778
 Wälzfräsen 979
 Wälzfräser 427, 947, 979
 Wälzfräser, Schleifen von 750
 Wälzfräsmaschinen 947
 Wälzhobel- und Wälzstoßmaschinen 951
 Wälzhonen 898
 Wälzlappen 912
 Wälzschälmaschine 956
 Wälzschleifen 539, 665, 1009
 Wälzschleifen, kontinuierliches 667
 Wälzschleifmaschine 668, 959
 Wälzstoßen 299, 952
 Wälzverfahren 940
 Warmdrehen 154
 Wärmebilanz 85
 Wärmeenergie 85
 Warmschrumpffutter 337
 Warmtrennen 734
 Waspaloy 1263
 Wasserarmaturen, Formschleifen von 716
 Wasserstrahlschneiden von FVK 1248
 Wechselgenauigkeit 183
 Wechselkopfböhrer 328
 Wechselkopfvollbohrer 325
 Wegmesssysteme 411
 Weichhaut 815
 Weichräumen 478
 Weißbearbeitung 1286
 Welle, elektromagnetische 1155
 Wellengleichung, paraxiale 1159
 Wellenmaschine 258
 Wellenspannfutter 189
 Wendeschneidplatten 168, 323, 428, 431
 Schleifen von 752
 -Vollbohrer 322
 -werkzeuge 420, 426
 Werkstattfeilen 516
 Werkstoffabtrag 867
 Werkstoffe 14
 Werkstoffrandzone 893
 Werkstoffspektrum 869
 Werkstück 183
 Werkstückaufnahme 744, 829, 891, 892
 beim Bohren 338
 beim Schleifen 590
 schwimmende 832
 starre 830
 Werkstück beim Bandschleifen 686
 Werkstücke beim Schleifen 590
 Werkstückhandhabung 1116
 Werkstückhandling 273
 Werkstückmanagement 1107
 Werkstückspannung 274

- Werkstückspindel 286, 766
- Werkstücktransport in Transfermaschinen 1090
- Werkstückwechselsystem 407
- Werkstückwechsler 1112
- Werkzeugarten 835
- Werkzeugaufnahme 561, 333
 - doppelgelenkige 829
 - doppelkardanische 829, 833
 - von Schleifscheiben 567
- Werkzeugbahngenerierung 446
- Werkzeugbeschichtung 449
- Werkzeugbezugssystem 74
- Werkzeugcodierung 1108
- Werkzeuge 14, 893, 900
 - für die Bohrungsbearbeitung 322
- Werkzeugegeometriekorrektur 125
- Werkzeughalter 273
- Werkzeugkegelreinigung 1108
- Werkzeugmagazine 385
- Werkzeugmanagement 1108
- Werkzeugmaschine 122
 - für Keramikbearbeitung 1286
- Werkzeugmaschinenindustrie 10
- Werkzeugrevolver 1100
- Werkzeugschleifmaschinen 741
- Werkzeugschnittstellensysteme 435
- Werkzeugspannfutter 333
- Werkzeugspannsysteme 1064
- Werkzeugstahl 98
- Werkzeugsysteme von Drehmaschinen 207
- Werkzeugträger 286
- Werkzeugüberwachung 1108
- Werkzeug- und Formenbau 425
- Werkzeugwechsel 272, 385, 1094
- Werkzeugwechseleinrichtungen 1097
- Werkzeugwechselhilfe bei Transferzentren 1100
- Werkzeugwechselsysteme 407, 273
- Werkzeugwechsler 824
- Winkelfräskopf 307
- Winkelhebelfutter 187
- Wirbeln 997, 1053
- Wirbelring 997
- Wirbelwerkzeug 1055
- Wirkarbeit 84, 85
- Wirk-Bezugssystem 74
- Wirkenergie 84
- Wirkleistung 85
- Wirkrichtungswinkel 73
- Wirtschaftlichkeit 845, 901
- Wolframlegierungen 1255
- Wolfram, Zerspanung 1253
- Wolframgetriebe 1344
- Zahnradbohrung 832
- Zahnräder 832
- Zahnradgetriebe 935
- Zahnradherstellung 936
- Zahnradhonen 899
- Zahnradhonmaschine 899, 968
- Zahnradlappen 899
- Zahnradräummaschinen 954
- Zahnradschabmaschine 957
- Zeitspanfläche 735
- Zeitspannungsvolumen 1015
- Zeitsteuerung 859
- Zellensteuerung 118
- Zentrieren 183
- Zerspanbarkeit 1239
 - von Nickellegierungen 1263
 - von Titanlegierungen 1274
- Zerspankraft 81
- Zerspankraftkomponenten 159
- Zerspanleistung 160
- Zerspanprozess beim Bandschleifen 701
- Zerspantechnik 10
- Zerspantemperaturen 86
- Zerspannungskenngrößen 448
- Zerspannungskennwerte 868
- Zerspanungsprozess 682
- Ziehaußbohrwerkzeug 377
- Ziehschaben 521
- Ziehschleifen 816
- Zielkostenrechnung 46
- Zinsen 32
- Zinsfuß 57
- Zirkonkorund 677
- Zirkonoxid 1284
- Zirkular-Bohrgewindefräser 1050
- Zirkular-Gewindefräser 1051
- Zugfestigkeit von FVK 1242
- Zusatzeinrichtungen 304
- Zuschlagskalkulation 45
 - differenzierende 38, 40
 - einfache 38
- Zuschlagssätze
 - Fertigungsgemeinkostenzuschlagssatz 40
 - Materialgemeinkostenzuschlagssatz 40
 - Vertriebsgemeinkostenzuschlagssatz 40
- Zustellkraft 864
- Zustelloptimierung 895
- Zustellsysteme 820, 893
- Zustellung 820, 853
- Zweisäulen-Schnellspanner 341
- Zweispindler 258
- Zyklonabscheider 799
- Zyκλο-Palloid-Verfahren 971
- Zyklus 139
- Zylinderbüchse 831
- Zylinder-/Globoidschnecke 995
- Zylinderlaufbahn 881, 886
- Zylinderräder 938

Z

- Zähigkeit 97
- Zahnflankenschleifen 665
- Zahnradaußenbearbeitung 900