

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Prinzipien der Spanbildung und Zerspanbarkeit .....	3
2.1	Kinematik und Geometrie des Werkzeugsystems .....	3
2.1.1	Bewegungen .....	3
2.1.2	Geometrie des Schneidkeils .....	5
2.1.2.1	Negative Spanwinkel .....	8
2.1.3	Schnitt- und Spanungsgrößen .....	9
2.2	Spanbildung .....	10
2.3	Kräfte, Energie, Arbeit, Leistung .....	12
2.3.1	Zerspankraftzerlegung .....	12
2.3.2	Entstehung der Zerspankraft und Spangeometrie .....	15
2.3.3	Berechnung der Schnittkraft .....	19
2.3.3.1	Spanungsquerschnitt und spezifische Schnittkraft .....	19
2.3.3.2	Einfluss des Werkstoffs .....	21
2.3.3.3	Einfluss der Spanungsdicke .....	23
2.3.3.4	Einfluss der Schneidengeometrie .....	23
2.3.3.5	Einfluss des Schneidstoffs .....	24
2.3.3.6	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit .....	25
2.3.3.7	Einfluss der Werkstückform .....	26
2.3.3.8	Einfluss der Werkzeugstumpfung .....	27
2.3.3.9	Weitere Einflüsse .....	27
2.3.4	Schneidkantenbelastung .....	27
2.3.5	Berechnung der Vorschubkraft .....	28
2.3.5.1	Einfluss der Spanungsdicke .....	28
2.3.5.2	Einfluss der Schneidengeometrie .....	28
2.3.5.3	Einfluss des Schneidstoffs .....	29
2.3.5.4	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit .....	29
2.3.5.5	Stumpfung und weitere Einflüsse .....	29
2.3.6	Berechnung der Passivkraft .....	30
2.3.6.1	Einfluss der Schneidengeometrie .....	30
2.3.6.2	Stumpfung und weitere Einflüsse .....	31

---

2.4	Temperatur an der Schneide.....	31
2.4.1.1	Messen der Temperatur .....	31
2.4.2	Temperaturverlauf .....	34
2.4.3	Temperaturfeld und Wärmebilanz .....	35
2.5	Oberflächenintegrität.....	35
2.5.1	Oberflächentopografie .....	35
2.5.1.1	Grobgestalt.....	36
2.5.1.2	Feingestalt.....	36
2.5.2	Randzonenveränderung.....	37
2.6	Zerspangenauigkeit und Toleranzen .....	39
2.6.1.1	Zerspangenauigkeit.....	39
2.6.1.2	Form- und Lagetoleranzen.....	41
2.6.1.3	Gestaltabweichungen.....	43
2.6.1.4	Oberflächenkenngrößen.....	43
2.6.1.5	Internationale Oberflächennormung .....	45
2.7	Standbegriffe und Werkzeugverschleiß .....	45
2.7.1	Verschleißvorgänge .....	46
2.7.1.1	Reibungverschleiß.....	46
2.7.1.2	Aufbauschneidenbildung .....	46
2.7.1.3	Diffusionsverschleiß.....	47
2.7.1.4	Verformung der Schneidkante .....	47
2.7.2	Verschleißformen.....	48
2.7.2.1	Freiflächenverschleiß.....	48
2.7.2.2	Kolkverschleiß.....	48
2.7.2.3	Weitere Verschleißformen .....	49
2.7.3	Verschleißverlauf.....	50
2.7.3.1	Einfluss der Eingriffszeit .....	50
2.7.3.2	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit.....	50
2.7.4	Standzeit .....	50
2.7.4.1	Definitionen.....	50
2.7.4.2	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit.....	51
2.7.4.3	Weitere Einflüsse.....	53
2.8	Schneidstoffe.....	54
2.8.1	Unlegierter und niedriglegierter Werkzeugstahl.....	56
2.8.2	Schnellarbeitsstahl .....	56
2.8.3	Hartmetall .....	57

---

2.8.4	Cermet .....	60
2.8.5	Keramik .....	62
2.8.6	Bornitrid.....	65
2.8.7	Diamant .....	66
2.8.8	Polykristalliner Diamant.....	67
2.9	Oberflächenbehandlung .....	68
2.9.1	Randzonenveränderung .....	70
2.9.2	Beschichtungen.....	71
2.9.2.1	Hartstoffschichten.....	71
2.9.2.2	Niedrigreibungsschichten .....	76
2.9.2.3	Entwicklungstrends .....	78
2.10	Kühlschmierung.....	79
2.10.1	Kühlschmierstoff .....	79
2.10.2	Überflutungskühlung.....	81
2.10.3	Minimalmengenschmierung .....	82
2.10.4	Trockenbearbeitung .....	83
2.11	Werkstoffe und Zerspanbarkeit.....	85
2.11.1	Werkstoff.....	85
2.11.2	Zerspanbarkeit .....	86
2.11.3	Standbegriffe .....	90
2.11.4	Zerspanungstests.....	92
2.12	Wirtschaftlichkeit.....	92
2.12.1	Einfluss der Schnittgrößen auf Kräfte, Verschleiß und Leistungsbedarf.....	92
2.12.2	Berechnung der Fertigungskosten.....	93
2.12.2.1	Maschinenkosten .....	93
2.12.2.2	Lohnkosten .....	95
2.12.2.3	Werkzeugkosten .....	96
2.12.2.4	Zusammenfassung der Fertigungskosten.....	96
2.12.3	Bearbeitungszeitverkürzung und Fertigungskosten .....	96
2.13	Qualitätsmanagement.....	100
2.13.1	Qualität und ihre Darstellung.....	100
2.13.2	Qualitätsmanagementsysteme.....	101
2.13.3	Produkterstellungsbereiche, -methoden und -werkzeuge .....	101
2.13.4	Total Quality Management (TQM).....	105

---

3	Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide.....	107
3.1	Drehen.....	107
3.1.1	Drehwerkzeuge.....	107
3.1.2	Werkzeugform.....	109
3.1.2.1	Drehmeißel aus Schnellarbeitsstahl.....	109
3.1.2.2	Drehmeißel mit Hartmetallschneiden.....	109
3.1.2.3	Wendeschneidplatten.....	109
3.1.2.4	Klemmhalter.....	113
3.1.2.5	Innendrehmeißel.....	118
3.1.2.6	Formdrehmeißel.....	119
3.1.3	Werkstückeinspannung.....	122
3.1.3.1	Radiale Lagebestimmung.....	122
3.1.3.2	Axiale Lagebestimmung.....	123
3.1.3.3	Übertragung der Drehmomente und Kräfte.....	123
3.1.4	Aus der Vorschubrichtung abgeleitete Drehverfahren.....	125
3.1.5	Schnitt- und Zerspanungsgrößen.....	125
3.1.6	Leistung und Spannungsvolumen.....	125
3.1.6.1	Leistungsberechnung.....	125
3.1.6.2	Spannungsvolumen.....	126
3.1.7	Berechnungsbeispiele.....	128
3.1.7.1	Scherwinkel.....	128
3.1.7.2	Längsrunddrehen.....	128
3.1.7.3	Standzeitberechnung.....	129
3.1.7.4	Fertigungskosten.....	130
3.1.7.5	Optimierung der Schnittgeschwindigkeit.....	132
3.2	Bohren, Senken, Reiben.....	134
3.2.1	Bohren ins Volle.....	135
3.2.1.1	Der Wendelbohrer.....	135
3.2.1.2	Schneidengeometrie am Wendelbohrer.....	137
3.2.1.3	Bohrer mit Wendeschneidplatten.....	142
3.2.1.4	Spanungsgrößen.....	143
3.2.1.5	Kräfte, Schnittmoment, Leistungsbedarf.....	145
3.2.1.6	Verschleiß und Standweg.....	148
3.2.1.7	Werkstückfehler, Bohrfehler.....	151
3.2.2	Aufbohren.....	153
3.2.2.1	Werkzeuge zum Aufbohren.....	153
3.2.2.2	Spanungsgrößen.....	154
3.2.2.3	Kräfte, Schnittmoment und Leistung.....	155

---

3.2.3	Senken .....	156
3.2.3.1	Senkwerkzeuge .....	157
3.2.3.2	Spanungsgrößen und Schnittkraftberechnung .....	158
3.2.4	Stufenbohren .....	159
3.2.5	Reiben .....	160
3.2.5.1	Reibwerkzeuge .....	161
3.2.5.2	Spanungsgrößen .....	166
3.2.5.3	Arbeitsergebnisse .....	167
3.2.6	Tiefbohrverfahren .....	169
3.2.6.1	Tiefbohren mit Wendelbohrern .....	169
3.2.6.2	Tiefbohren mit Einlippen-Tiefbohrwerkzeugen .....	169
3.2.6.3	Tiefbohren mit BTA-Werkzeugen .....	173
3.2.6.4	Tiefbohren mit Ejektor-Werkzeugen .....	175
3.2.7	Berechnungsbeispiele .....	176
3.2.7.1	Bohren ins Volle .....	176
3.2.7.2	Aufbohren .....	177
3.2.7.3	Kegelsenken .....	178
3.3	Fräsen .....	180
3.3.1	Werkzeugformen .....	183
3.3.1.1	Walzen- und Walzenstirnfräser .....	183
3.3.1.2	Scheibenfräser .....	185
3.3.1.3	Profilfräser .....	187
3.3.1.4	Fräser mit Schaft .....	188
3.3.1.5	Fräsköpfe .....	192
3.3.2	Wendeschneidplatten für Fräswerkzeuge .....	198
3.3.3	Schneidstoffe .....	199
3.3.4	Umfangfräsen .....	200
3.3.4.1	Eingriffsverhältnisse beim Gegenlaufräsen .....	200
3.3.4.2	Zerspankraft .....	204
3.3.4.3	Schnittleistung .....	208
3.3.4.4	Zeitspannungsvolumen .....	209
3.3.5	Gleichlaufräsen .....	212
3.3.5.1	Eingriffskurve beim Gleichlaufräsen .....	212
3.3.5.2	Richtung der Zerspankraft beim Gleichlaufräsen .....	213
3.3.5.3	Weitere Besonderheiten beim Gleichlaufräsen .....	214
3.3.5.4	Veränderliche Größen beim Gleichlaufräsen .....	214
3.3.6	Stirnfräsen .....	215
3.3.6.1	Eingriffsverhältnisse .....	216
3.3.6.2	Kräfte .....	221

3.3.6.3	Schnittleistung und Zeitspannungsvolumen .....	223
3.3.7	Feinfräsen .....	223
3.3.7.1	Entstehung der Oberflächenform .....	224
3.3.7.2	Fräsen mit Sturz .....	226
3.3.7.3	Wirkung der Zerspankräfte beim Feinfräsen .....	229
3.3.7.4	Einzahnfräsen .....	231
3.3.8	Berechnungsbeispiele .....	232
3.3.8.1	Vergleich Umfangsfräsen - Stirnfräsen .....	232
3.3.8.2	Feinfräsen .....	235
3.4	Hobeln, Stoßen .....	237
3.4.1	Werkzeuge .....	237
3.4.2	Schneidstoffe .....	238
3.4.3	Schneidengeometrie .....	238
3.4.4	Werkstücke .....	238
3.4.4.1	Werkstückformen .....	238
3.4.4.2	Werkstoffe .....	239
3.4.5	Bewegungen .....	239
3.4.5.1	Bewegungen in Schnittrichtung .....	239
3.4.5.2	Bewegungen in Vorschubrichtung .....	240
3.4.6	Kräfte und Leistung .....	240
3.4.6.1	Berechnung der Schnittkraft .....	240
3.4.6.2	Berechnung der Schnittleistung .....	241
3.4.6.3	Zeitspannungsvolumen .....	241
3.4.7	Berechnungsbeispiel .....	242
3.5	Sägen .....	243
3.5.1	Werkzeuge .....	244
3.5.2	Schneidstoffe .....	245
3.5.3	Kräfte und Leistung .....	245
3.5.4	Zeitberechnung .....	247
3.6	Räumen .....	248
3.6.1	Werkzeuge .....	248
3.6.1.1	Schneidenzahl und Werkzeuglänge .....	249
3.6.1.2	Schnittaufteilung und Staffelung .....	249
3.6.1.3	Teilung .....	251
3.6.2	Spanungsgrößen .....	252
3.6.3	Kräfte und Leistung .....	253
3.6.4	Berechnungsbeispiel .....	253

---

3.7 Gewinden .....	256
3.7.1 Gewindearten .....	256
3.7.2 Gewindedrehen .....	257
3.7.2.1 Halter und Wendeschneidplatten .....	258
3.7.2.2 Schnittaufteilung .....	260
3.7.2.3 Kräfte und Leistung .....	262
3.7.3 Gewindebohren .....	263
3.7.3.1 Formen von Gewindebohrern .....	263
3.7.3.2 Schneidstoff .....	265
3.7.3.3 Verschleiß und Standweg .....	266
3.7.3.4 Berechnung von Kräften, Moment und Leistung .....	268
3.7.3.5 Schnittgeschwindigkeit .....	272
3.7.4 Gewindefräsen .....	273
3.7.4.1 Gewindefräser .....	273
3.7.4.2 Werkstücke .....	274
3.7.4.3 Kinematik des GewindefräSENS .....	275
3.7.5 GewindefräSbohren .....	276
4 Fertungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide .....	278
4.1 Schleifen .....	278
4.1.1 Schleifwerkzeuge .....	278
4.1.1.1 Formen der Schleifwerkzeuge .....	278
4.1.1.2 Bezeichnung nach DIN 69100 .....	281
4.1.1.3 Schleifmittel .....	282
4.1.1.4 Korngröße und Körnung .....	287
4.1.1.5 Bindung .....	289
4.1.1.6 Schleifscheibenaufspannung .....	290
4.1.1.7 Auswuchten von Schleifscheiben .....	292
4.1.2 Kinematik .....	293
4.1.2.1 Einteilung der Schleifverfahren in der Norm .....	293
4.1.2.2 Schnittgeschwindigkeit .....	294
4.1.2.3 Werkstückgeschwindigkeit beim Rundschleifen .....	296
4.1.2.4 Vorschub beim Querschleifen .....	297
4.1.2.5 Vorschub beim Schrägschleifen .....	300
4.1.2.6 Vorschub und Zustellung beim Längsschleifen .....	301
4.1.2.7 Bewegungen beim Spitzenlosschleifen .....	302
4.1.2.8 Bewegungen beim Umfangs-Planschleifen .....	303
4.1.2.9 Seitenschleifen .....	304
4.1.3 Tiefschleifen .....	311
4.1.3.1 Verfahrensbeschreibung .....	311

4.1.3.2	Besondere Schleifbedingungen.....	311
4.1.3.3	Wärmeentstehung und Kühlung .....	312
4.1.3.4	Schleifscheiben .....	313
4.1.4	Hochleistungsschleifen .....	314
4.1.5	Innenschleifen .....	316
4.1.6	Trennschleifen .....	318
4.1.6.1	Außentrennschleifen .....	318
4.1.6.2	Innenlochtrennen .....	319
4.1.7	Punktschleifen.....	320
4.1.8	Eingriffsverhältnisse .....	320
4.1.8.1	Vorgänge beim Eingriff des Schleifkorns.....	320
4.1.8.2	Eingriffswinkel .....	322
4.1.8.3	Kontaktlänge und Kontaktzone.....	325
4.1.8.4	Form des Eingriffsquerschnitts .....	327
4.1.8.5	Zahl der wirksamen Schleifkörner.....	328
4.1.9	Auswirkungen am Werkstück.....	332
4.1.9.1	Oberflächengüte.....	332
4.1.9.2	Verfestigung und Verformungseigenstressungen.....	336
4.1.9.3	Erhitzung, Zugeigenstressungen und Schleifrisse .....	337
4.1.9.4	Gefügeveränderungen durch Erwärmung .....	339
4.1.9.5	Beeinflussung der Eigenstressentstehung .....	339
4.1.10	Spannungsvolumen.....	341
4.1.10.1	Spannungsvolumen pro Werkstück .....	341
4.1.10.2	Zeitspannungsvolumen .....	342
4.1.10.3	Bezogenes Zeitspannungsvolumen.....	342
4.1.10.4	Standvolumen und andere Standgrößen.....	343
4.1.10.5	Optimierung .....	344
4.1.11	Verschleiß .....	346
4.1.11.1	Absplittern und Abnutzung der Schleifkornkanten.....	346
4.1.11.2	Ausbrechen von Schleifkorn.....	347
4.1.11.3	Auswaschen der Bindung .....	347
4.1.11.4	Zusetzen der Spanräume .....	348
4.1.11.5	Verschleißvolumen und Verschleißkenngrößen .....	348
4.1.11.6	Wirkhärte .....	350
4.1.12	Abrichten .....	351
4.1.12.1	Ziele .....	351
4.1.12.2	Abrichten mit Einkorndiamant .....	352
4.1.12.3	Abrichten mit Diamantvielkornabrichter .....	354
4.1.12.4	Abrichten mit Diamantfliese .....	354
4.1.12.5	Abrichten mit Diamantrolle .....	355



---

4.1.12.6	Pressrollabrichten .....	356
4.1.12.7	Abrichten von BN-Schleifscheiben .....	356
4.1.13	Kräfte und Leistung .....	357
4.1.13.1	Richtung und Größe der Kräfte .....	357
4.1.13.2	Leistungsberechnung .....	361
4.1.14	Schwingungen .....	362
4.1.15	Berechnungsbeispiele .....	362
4.1.15.1	Querschleifen .....	362
4.1.15.2	Außen-Längsrundschleifen .....	364
4.1.15.3	Innen-Längsrundschleifen .....	366
4.2	Honen .....	368
4.2.1	Langhubhonen .....	368
4.2.1.1	Werkzeuge .....	368
4.2.1.2	Bewegungsablauf .....	371
4.2.1.3	Abspannvorgang .....	376
4.2.1.4	Zerspankraft .....	377
4.2.1.5	Auswirkungen am Werkstück .....	379
4.2.1.6	Abspannungsgrößen .....	382
4.2.2	Kurzhubhonen .....	385
4.2.2.1	Werkzeuge .....	385
4.2.2.2	Bewegungsablauf .....	387
4.2.2.3	Kräfte .....	391
4.2.2.4	Abspannungsvorgang .....	393
4.2.2.5	Auswirkungen am Werkstück .....	394
4.2.2.6	Abspannungsgrößen .....	396
4.2.3	Bandhonen .....	397
4.2.3.1	Verfahrensbeschreibung .....	397
4.2.3.2	Bewegungsablauf .....	397
4.2.3.3	Werkzeuge .....	397
4.2.3.4	Werkstücke .....	399
4.2.4	Arbeitsergebnisse .....	399
4.2.5	Berechnungsbeispiele .....	399
4.2.5.1	Langhubhonen .....	399
4.2.5.2	Kräfte beim Honen .....	400
4.2.5.3	Kurzhubhonen .....	401
4.2.5.4	Abspannung und Verschleiß beim Kurzhubhonen .....	401
4.3	Läppen .....	403
4.3.1	Läppwerkzeuge .....	404
4.3.1.1	Läppkorn .....	404

4.3.1.2	Läppflüssigkeit .....	405
4.3.1.3	Läppscheiben .....	405
4.3.1.4	Andere Läppwerkzeuge .....	406
4.3.2	Bewegungsablauf bei den Läppverfahren .....	408
4.3.2.1	Planläppen .....	408
4.3.2.2	Planparallel-Läppen .....	409
4.3.2.3	Außenrundläppen .....	409
4.3.2.4	Innenrundläppen .....	410
4.3.2.5	Schraubläppen .....	410
4.3.2.6	Wälzläppen .....	411
4.3.2.7	Profilläppen .....	411
4.3.3	Werkstücke .....	411
4.3.4	Abspannungsvorgang .....	413
4.3.5	Arbeitsergebnisse .....	416
4.3.5.1	Oberflächengüte .....	416
4.3.5.2	Genauigkeit .....	416
4.3.5.3	Randschicht .....	417
4.3.6	Weitere Läppverfahren .....	417
4.3.6.1	Druckfließläppen .....	417
4.3.6.2	Ultraschall-Schwingläppen .....	420
4.3.6.3	Polierläppen .....	422
5	Weiterführende Aspekte .....	424
5.1	Hochgeschwindigkeitszerspanung .....	424
5.1.1	Allgemeine Abgrenzung .....	424
5.1.2	Hochgeschwindigkeitsfräsen .....	427
5.2	Hartbearbeitung .....	429
5.3	Numerische Zerspanungsanalyse .....	431
5.4	Schneidkantenpräparation .....	435
5.4.1	Präparationsverfahren .....	436
5.4.2	Präparationswirkung .....	438
5.4.3	Messtechnik .....	439
	Literatur .....	440
	Technische Regeln .....	447
	Sachwortverzeichnis .....	454