

Joachim Milberg

# Werkzeugmaschinen - Grundlagen

Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen  
und Steuerungen

Zweite Auflage  
mit 360 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg NewYork  
London Paris Tokyo  
HongKong Barcelona Budapest

# Inhaltsverzeichnis

|   | Seite     |
|---|-----------|
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Begriffsdefinition.....   | 1         |
| 1.2 Industrielle Bedeutung des Werkzeugmaschinenbaus.....                         | 4         |
| <b>2 Entwicklung der Produktionstechnik und der Werkzeugmaschinen</b>             | <b>7</b>  |
| 2.1 Die handwerkliche Phase der Produktionstechnik.....                           | 7         |
| 2.2 Die Entstehung des Werkzeugmaschinenbaus zur Zeit der Industrialisierung..... | 8         |
| 2.3 Von der mechanischen zur rechnergestützten Automatisierung.....               | 12        |
| <b>3 Anforderungen an Werkzeugmaschinen</b>                                       | <b>19</b> |
| 3.1 Bewertungskriterien für Werkzeugmaschinen.....                                | 19        |
| 3.2 Verbesserung der Arbeitsgenauigkeit.....                                      | 20        |
| 3.2.1 Arbeitsgenauigkeit und Fertigungsgenauigkeit.....                           | 20        |
| 3.2.2 Verlagerung durch Kräfteeinfluß.....  | 21        |
| 3.2.3 Verlagerung durch Wärmeeinfluß.....   | 22        |
| 3.2.4 Verlagerung durch Verschleiß.....   | 23        |
| 3.3 Erhöhung der Mengenleistung.....  | 24        |
| 3.3.1 Definition der Mengenleistung.....  | 24        |
| 3.3.2 Mengenleistung und Fertigungskosten.....                                    | 25        |
| 3.3.3 Konstruktive Maßnahmen zur Verkürzung der Belegungszeit.....                | 26        |
| 3.3.4 Überlagerung von Teilzeiten der Belegungszeit.....                          | 27        |
| 3.4 Verbesserung der Flexibilität und der Integrationsfähigkeit.....              | 28        |
| 3.5 Senkung der Fertigungskosten.....   | 31        |
| 3.6 Weitere Anforderungen an Werkzeugmaschinen.....                               | 32        |
| <b>4 Grundlagen der Zerspanung</b>  | <b>33</b> |
| 4.1 Einleitung.....   | 33        |
| 4.2 Kinematik und Geometrie des Zerspanvorganges.....                             | 34        |
| 4.2.1 Bewegungen beim Spanen.....   | 34        |
| 4.2.2 Eingriffs- und Spanungsgrößen.....  | 35        |
| 4.3 Schneidteilgeometrie.....   | 37        |
| 4.3.1 Bezugssysteme.....  | 37        |
| 4.3.2 Flächenbezeichnungen.....   | 42        |
| 4.3.3 Schneidenbezeichnung.....   | 42        |
| 4.3.4 Winkel am Werkzeug.....   | 42        |
| 4.4 Spanbildung, Spanarten und Spanformen.....                                    | 46        |
| 4.4.1 Übersicht.....  | 46        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.4.2    | Spanbildung  | 46         |
| 4.4.3    | Spanarten  | 46         |
| 4.4.4    | Spanformen   | 48         |
| 4.5      | Mechanische Beanspruchung  | 51         |
| 4.6      | Thermische Beanspruchung   | 55         |
| 4.6.1    | Energieumwandelungsprozeß  | 55         |
| 4.6.2    | Temperaturverteilung und Temperaturabhängigkeit                          | 60         |
| 4.7      | Verschleiß und Standgrößen   | 61         |
| 4.7.1    | Verschleißmechanismen  | 61         |
| 4.7.2    | Verschleißformen und Verschleißmeßgrößen                                 | 64         |
| 4.7.3    | Standgrößen  | 66         |
| 4.8      | Schneidstoffe  | 69         |
| 4.8.1    | Übersicht  | 69         |
| 4.8.2    | Metallische Schneidstoffe  | 69         |
| 4.8.2.1  | Unlegierte und legierte Werkzeugstähle                                   | 69         |
| 4.8.2.2  | Schnellarbeitsstähle   | 70         |
| 4.8.2.3  | Hartmetalle  | 72         |
| 4.8.3    | Keramische Schneidstoffe   | 72         |
| 4.8.4    | Diamant und kubisches Bornitrid  | 73         |
| 4.9      | Kühlschmiermittel  | 74         |
| 4.9.1    | Aufgabe von Kühlschmierstoffen   | 74         |
| 4.9.2    | Kühlschmiermittelarten   | 74         |
| 4.10     | Wirtschaftliche Schnittbedingungen                                       | 76         |
| <b>5</b> | <b>Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen</b>                       | <b>79</b>  |
| 5.1      | Übersicht  | 79         |
| 5.2      | Beschreibung des dynamischen Verhaltens, Modalanalyse                    | 80         |
| 5.2.1    | Dynamische Steifigkeit   | 80         |
| 5.2.2    | Experimentelle Modalanalyse  | 83         |
| 5.2.3    | Rechnerische Modalanalyse  | 90         |
| 5.3      | Schwingungserscheinungen an Werkzeugmaschinen                            | 99         |
| 5.3.1    | Freie Schwingungen   | 99         |
| 5.3.2    | Fremderregte Schwingungen  | 100        |
| 5.3.3    | Selbsterregte Schwingungen   | 101        |
| 5.4      | Beeinflussung des dynamischen Verhaltens                                 | 108        |
| 5.4.1    | Allgemeines  | 108        |
| 5.4.2    | Beeinflussung des dynamischen Verhaltens über die Maschineneigenschaften | 109        |
| 5.4.3    | Beeinflussung des dynamischen Verhaltens über den Zerspanprozeß          | 112        |
| <b>6</b> | <b>Gestelle</b>  | <b>117</b> |
| 6.1      | Beanspruchungen von Gestellen  | 117        |
| 6.1.1    | Allgemeines  | 117        |
| 6.1.2    | Statische Beanspruchung des Gestells                                     | 117        |
| 6.1.3    | Steifigkeitsgerechte Konstruktion  | 121        |
| 6.1.4    | Dynamische Beanspruchung des Werkzeugmaschinengestells                   | 129        |
| 6.1.5    | Thermische Beanspruchung des Werkzeugmaschinengestells                   | 131        |

|   |     |
|---|-----|
| 6.2 Konzepte für Werkzeugmaschinenestelle.....  | 135 |
| 6.2.1 Einflußgrößen auf das Gestellkonzept und Vorgehensweise für die Konzeption .... | 135 |
| 6.2.2 Wahl einer geeigneten Kinematik.....  | 136 |
| 6.2.3 Übliche Gestellkonzepte.....  | 138 |
| 6.2.4 Fertigungstechnische Gesichtspunkte.....  | 139 |
| 6.2.5 Werkstoffe für Werkzeugmaschinenestelle.....                                    | 143 |
| 6.3 Berechnung von Gestellbauteilen - Finite-Elemente-Methode (FEM).....              | 145 |

## **7 Führungen**

**153**

|  |     |
|--|-----|
| 7.1 Anforderungen und Auslegung.....                     | 153 |
| 7.2 Klassifizierung von Werkzeugmaschinenführungen.....  | 156 |
| 7.2.1 Einleitung.....                                    | 156 |
| 7.2.2 Einteilung nach Funktionsweise.....                | 157 |
| 7.2.3 Einteilung nach Führungsbahngeometrie.....         | 158 |
| 7.2.3.1 Flachführungen.....                              | 158 |
| 7.2.3.2 V- und Dachprismenführungen.....                 | 158 |
| 7.2.3.3 Schwalbenschwanzführungen.....                   | 159 |
| 7.2.3.4 Rundführungen.....                               | 159 |
| 7.3 Hydrodynamische Gleitführungen.....                  | 159 |
| 7.3.1 Tribologie.....                                    | 159 |
| 7.3.2 Hydrodynamische Schmierdruckbildung.....           | 160 |
| 7.3.3 Stribeck-Kurve.....                                | 161 |
| 7.3.4 Ruckgleiten.....                                   | 162 |
| 7.3.5 Werkstoffe für hydrodynamische Gleitführungen..... | 164 |
| 7.3.6 Reibungsverhalten.....                             | 165 |
| 7.3.7 Verschleißverhalten.....                           | 167 |
| 7.3.8 Einfluß der Flächenpressung.....                   | 169 |
| 7.3.9 Schmierung.....                                    | 171 |
| 7.3.10 Paßleisten.....                                   | 171 |
| 7.4 Hydrostatische Gleitführungen.....                   | 173 |
| 7.4.1 Funktionsweise.....                                | 173 |
| 7.4.2 Berechnungsgrundlagen.....                         | 175 |
| 7.4.3 Konstruktive Ausführungsformen.....                | 178 |
| 7.5 Aerostatische Führungen.....                         | 181 |
| 7.5.1 Funktionsweise, Grundbegriffe, Merkmale.....       | 181 |
| 7.5.2 Konstruktive Ausführungsformen.....                | 182 |
| 7.6 Wälzführungen.....                                   | 183 |
| 7.6.1 Wälzkörper- und Wälzbahngeometrie.....             | 183 |
| 7.6.2 Fesselung der Wälzkörper.....                      | 184 |
| 7.6.3 Steifigkeit und Dämpfung.....                      | 185 |
| 7.6.4 Konstruktive Ausführung.....                       | 186 |
| 7.7 Fertigung, Montage und Umbauteile von Führungen..... | 186 |
| 7.7.1 Fertigung und Montage.....                         | 187 |
| 7.7.2 Umbauteile.....                                    | 188 |
| 7.8 Gegenüberstellung der Führungsprinzipien.....        | 189 |
| 7.8.1 Herstellkosten.....                                | 191 |
| 7.8.2 Auswahlkriterien.....                              | 192 |

|  |     |
|--|-----|
| 8 Hauptspindeln  | 195 |
| 8.1 Anforderungen                                      | 195 |
| 8.2 Steifigkeit von Hauptspindeln                      | 198 |
| 8.2.1 Kräfte an einer Spindel                          | 198 |
| 8.2.2 Statische Steifigkeit                            | 198 |
| 8.2.3 Dynamische Steifigkeit                           | 203 |
| 8.2.4 Thermische Steifigkeit                           | 206 |
| 8.3 Lagerung von Hauptspindeln                         | 210 |
| 8.3.1 Allgemeines                                      | 210 |
| 8.3.2 Hauptspindeln mit Wälzlagern                     | 212 |
| 8.3.2.1 Allgemeines                                    | 212 |
| 8.3.2.2 Laufgenauigkeit                                | 213 |
| 8.3.2.3 Lagerungsarten                                 | 215 |
| 8.3.2.4 Schmierung                                     | 219 |
| 8.3.2.5 Motorspindeln                                  | 221 |
| 8.3.3 Hauptspindeln mit Gleitlagern                    | 222 |
| 8.3.3.1 Allgemeines                                    | 222 |
| 8.3.3.2 Hydrodynamische Gleitlager                     | 222 |
| 8.3.3.3 Hydrostatische Gleitlager                      | 223 |
| 8.3.3.4 Weitere Lagerbauarten                          | 224 |
| 9 Hauptantriebe  | 227 |
| 9.1 Einleitung   | 227 |
| 9.2 Anforderungen und Auslegung                        | 228 |
| 9.2.1 Bearbeitungsgerechte Bemessung                   | 228 |
| 9.2.1.1 Drehzahlbereich und Drehzahlverstellung        | 228 |
| 9.2.1.2 Leistung und Drehmoment                        | 230 |
| 9.3 Wirkungsgrad                                       | 232 |
| 9.4 Schwingungsverhalten                               | 233 |
| 9.5 Anlauf- und Bremsverhalten                         | 234 |
| 9.6 Antriebsmotoren                                    | 236 |
| 9.6.1 Übersicht  | 236 |
| 9.6.2 Gleichstrommotor                                 | 237 |
| 9.6.2.1 Aufbau und Wirkungsweise                       | 238 |
| 9.6.2.2 Betriebseigenschaften                          | 239 |
| 9.6.2.3 Drehzahlverstellung                            | 242 |
| 9.6.3 Asynchronmotor                                   | 244 |
| 9.6.3.1 Aufbau und Wirkungsweise                       | 244 |
| 9.6.3.2 Betriebseigenschaften                          | 245 |
| 9.6.3.3 Drehzahlverstellung                            | 246 |
| 9.6.4 Auslegung und Auswahl eines Hauptantriebmotors   | 247 |
| 9.6.4.1 Drehmoment- und Drehzahlverhalten              | 248 |
| 9.6.4.2 Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit         | 250 |
| 9.6.4.3 Thermisches Verhalten                          | 252 |
| 9.6.4.4 Bauformen und Anordnung des Hauptantriebmotors | 252 |
| 9.6.4.5 Geräusch- und Schwingungsverhalten             | 254 |
| 9.7 Drehzahleinstellung                                | 254 |
| 9.7.1 Stufenlose Drehzahleinstellung                   | 254 |

|   |            |
|---|------------|
| 9.7.1.1 Elektrische Getriebe.....   | 255        |
| 9.7.1.2 Hydraulische Getriebe.....  | 255        |
| 9.7.1.3 Mechanische Getriebe.....   | 259        |
| 9.7.2 Gestufte mechanische Drehzahleinstellung.....                                       | 263        |
| 9.7.2.1 Auslegung.....  | 263        |
| 9.7.2.2 Bauformen mechanischer Getriebe.....  | 267        |
| <b>10 Vorschubantriebe</b> .....  | <b>271</b> |
| 10.1 Einleitung.....  | 271        |
| 10.1.1 Forderungen an Vorschubantriebe.....   | 273        |
| 10.1.2 Prinzipielle Möglichkeiten für den Aufbau von Vorschubantrieben.....               | 274        |
| 10.2 Mechanische Vorschubantriebe.....  | 276        |
| 10.3 Hydraulische Vorschubantriebe.....   | 278        |
| 10.4 Elektrische Vorschubantriebe.....  | 282        |
| 10.4.1 Einleitung.....  | 282        |
| 10.4.2 Antriebsmotoren.....   | 283        |
| 10.4.2.1 Gleichstrommotoren (konventionell mit Bürsten und Kommutator).....               | 284        |
| 10.4.2.2 Bürstenloser Gleichstrommotor.....   | 288        |
| 10.4.2.3 Synchronmotor.....   | 291        |
| 10.4.2.4 Asynchronmotor.....  | 291        |
| 10.4.2.5 Betriebsverhalten der einzelnen Antriebe im Vergleich.....                       | 292        |
| 10.4.2.6 Linearantriebe.....  | 293        |
| 10.4.2.7 Die Drehzahlmessung.....   | 294        |
| 10.4.3 Mechanische Baugruppen.....  | 295        |
| 10.4.3.1 Allgemeines.....   | 295        |
| 10.4.3.2 Zahnriemen.....  | 297        |
| 10.4.3.3 Möglichkeiten zum Wandeln der Rotationsbewegung in die Translationsbewegung..... | 298        |
| 10.4.3.4 Führungen.....   | 301        |
| 10.5 Der Lageregelkreis.....  | 301        |
| 10.6 Auslegung von Vorschubantrieben.....   | 306        |
| <b>11 Weg- und Winkelmeßsysteme</b> .....   | <b>315</b> |
| 11.1 Anforderungen.....   | 315        |
| 11.2 Begriffe.....  | 316        |
| 11.3 Funktionsstruktur.....   | 317        |
| 11.4 Meßverfahren.....  | 318        |
| 11.4.1 Direktes und indirektes Meßverfahren.....  | 318        |
| 11.4.2 Analoges und digitales Meßverfahren.....   | 319        |
| 11.4.3 Absolutes und relatives Meßverfahren.....  | 320        |
| 11.5 Meßprinzipien.....   | 322        |
| 11.5.1 Photoelektrisches Meßprinzip.....  | 322        |
| 11.5.2 Induktives Meßprinzip.....   | 324        |
| 11.5.3 Laserinterferometer.....   | 327        |
| <b>12. Steuerungstechnik und Informationsverarbeitung</b> .....                           | <b>329</b> |
| 12.1 Übersicht.....   | 329        |
| 12.1.1 Forderungen an Werkzeugmaschinensteuerungen.....                                   | 330        |

|   |     |
|---|-----|
| 12.1.2 Grundbegriffe des Steuerns und Regeins.....                  | 330 |
| 12.1.3 Einteilung von Steuerungen.....                              | 332 |
| 12.2 Realisierungsformen verbindungsprogrammierter Steuerungen..... | 336 |
| 12.2.1 Mechanische Steuerungen.....                                 | 336 |
| 12.2.2 Pneumatische und hydraulische Steuerungen.....               | 339 |
| 12.2.3 Elektrische Steuerungen.....                                 | 343 |
| 12.2.4 Nachformsteuerungen.....                                     | 345 |
| 12.3 Speicherprogrammierbare Steuerungen.....                       | 347 |
| 12.3.1 Aufbau und Funktionsweise.....                               | 348 |
| 12.3.2 Integration in Werkzeugmaschinen.....                        | 351 |
| 12.3.3 Programmierung.....  | 351 |
| 12.4 Numerische Steuerungen.....                                    | 353 |
| 12.4.1 Aufbau und Funktionsweise.....                               | 353 |
| 12.4.2 Integration in Werkzeugmaschinen.....                        | 359 |
| 12.4.3 Programmierung.....  | 361 |
| 12.4.4Trends.....   | 365 |
| 12.5 Rechnergestützte Steuerdatenverteilung.....                    | 367 |
| 12.5.1 DNC-Systeme.....   | 368 |
| 12.5.2 CAM-Systeme.....   | 370 |
| Literaturverzeichnis.....   | 375 |
| Sachwortverzeichnis.....  | 389 |