

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 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Begriffsdefinition..... | 1 |
| 1.2 Industrielle Bedeutung des Werkzeugmaschinenbaus..... | 4 |
| 2 Entwicklung der Produktionstechnik und der Werkzeugmaschinen | 7 |
| 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 |
| 3 Anforderungen an Werkzeugmaschinen | 19 |
| 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 |
| 4 Grundlagen der Zerspanung | 33 |
| 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 |
| 5 | Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen | 79 |
| 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 |
| 6 | Gestelle | 117 |
| 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 Werkzeugmaschinengestelle..... | 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 Werkzeugmaschinengestelle..... | 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 |
| 10 Vorschubantriebe | 271 |
| 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 |
| 11 Weg- und Winkelmeßsysteme | 315 |
| 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 |
| 12. Steuerungstechnik und Informationsverarbeitung | 329 |
| 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 |