

Studium und Praxis

# **WERKZEUGMASCHINEN — FERTIGUNGSSYSTEME BAND 2**

Konstruktion und Berechnung

Prof. Dr.-Ing. Manfred Weck

Vierte, neubearbeitete und erweiterte Auflage

**VDI** VERLAG

Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure · Düsseldorf



# Inhalt

Formelzeichen und Abkürzungen .....	XI
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Gestelle und Gestellbauteile .....</b>	<b>7</b>
2.1 Anforderungen und Bauformen .....	7
2.2 Werkstoffe für Gestellbauteile .....	13
2.3 Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei statischer Belastung ..	15
2.3.1 Statische Belastungen .....	15
2.3.2 Statische Kenngrößen .....	15
2.3.3 Kraftfluß und Verformungsanalyse .....	17
2.3.4 Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung .....	19
2.3.4.1 Steifigkeiten stabförmiger Bauteile .....	20
2.3.4.2 Verrippungen .....	29
2.3.4.3 Durchbrüche .....	35
2.3.4.4 Kraffteinleitung .....	38
2.3.4.5 Fügeverbindungen .....	39
2.3.5 Konstruktionsbeispiele .....	46
2.4 Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei dynamischer Belastung	49
2.4.1 Dymanische Belastungen .....	49
2.4.2 Dynamische Kenngrößen .....	51
2.4.3 Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung .....	53
2.4.3.1 Massen und Massenverteilung .....	55
2.4.3.2 Gezielte Schwächung .....	57
2.4.3.3 Dämpfung in Gestellen .....	58
2.4.3.4 Hilfsmassendämpfer, Reibungsdämpfer .....	62
2.5 Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei thermischer Belastung	65
2.5.1 Thermische Belastungen .....	65
2.5.2 Thermische Kenngrößen .....	66
2.5.3 Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung .....	69
2.6 Werkstoffgerechte Konstruktion .....	75
2.6.1 Reaktionsharzbeton .....	75
2.6.1.1 Der Werkstoff Reaktionsharzbeton .....	75
2.6.1.2 Verbindungstechniken Beton/Stahl .....	83

2.6.1.3	Formenbau .....	88
2.6.1.4	Werkzeugmaschinengestelle aus Reaktionsharz- beton .....	91
2.6.2	Faserverbundwerkstoffe .....	95
2.6.2.1	Werkstoffeigenschaften .....	96
2.6.2.2	Einsatzkriterien und -möglichkeiten für hochbelastete Maschinenelemente aus faser- verstärkten Kunststoffen .....	100
2.6.2.3	Konstruktion und Fertigung von FVK-Bauteilen, Anwendungsbeispiele .....	101
2.7	Berechnung und Optimierung von Gestellbauteilen .....	110
2.7.1	Berechnung von Gestellbauteilen .....	110
2.7.1.1	Einführung in die Finite-Elemente-Methode ....	112
2.7.1.2	Herleitung einer Elementsteifigkeitsmatrix .....	114
2.7.1.3	Überlagerung der Elementsteifigkeitsmatrizen zur Gesamtsteifigkeitsmatrix .....	117
2.7.1.4	Überblick über die Berechnungsmöglichkeiten nach der Finite-Elemente-Methode .....	119
2.7.1.5	Aufbereitung der Bauteilgeometrie für die Berechnung .....	119
2.7.1.5.1	Nutzung von CAD-Daten für die Berechnung .....	120
2.7.1.6	Berechnungsbeispiele .....	122
2.7.1.6.1	Berechnung des statischen Verhaltens von Gestellbauteilen .....	122
2.7.1.6.2	Berechnung des dynamischen Verhaltens von Gestellbauteilen .....	123
2.7.1.6.3	Berechnung des thermischen Verhaltens von Gestellbauteilen .....	127
2.7.2	Optimierung des mechanischen Bauteilverhaltens .....	133
2.7.2.1	Grundlagen der Optimierung .....	134
2.7.2.2	Einsatz der Finite-Elemente-Optimierung bei der Konstruktion von Werkzeugmaschinen ..	137
2.7.2.3	Minimierung von Bauteilverformungen bei gleichbleibendem Gewicht .....	139
2.7.2.3.1	Optimierung von Rippen und Wandstärken .....	139
2.7.2.3.2	Optimierung von Bauteilen aus Faser- verbundwerkstoffen .....	142
2.7.2.4	Optimierung der Bauteilform zur Reduzierung der Kerbspannungen oder des Gewichtes .....	147

2.7.2.4.1	Minimierung der Kerbspannungen an offenen Ausrundungen .....	147
2.7.2.4.2	Formoptimierung dickwandiger Bauteile .....	149
<b>3</b>	<b>Aufstellung und Fundamentierung von Werkzeugmaschinen .....</b>	<b>151</b>
3.1	Komponenten der Maschinenaufstellung .....	154
3.1.1	Aufstellelemente .....	154
3.1.2	Fundament .....	155
3.1.3	Baugrund .....	157
3.2	Fundamentauslegung unter statischen Gesichtspunkten .....	159
3.3	Fundamentauslegung unter dynamischen Gesichtspunkten .....	164
3.3.1	Beurteilungskriterien für Erschütterungen .....	167
3.3.2	Auslegung aktiver Schwingungsisolierungen .....	169
3.3.3	Auslegung passiver Schwingungsisolierungen .....	173
<b>4</b>	<b>Geräuscharme Maschinenkonstruktion .....</b>	<b>178</b>
4.1	Grundlagen .....	179
4.2	Beispiele für Geräuschminderung .....	185
4.2.1	Aktive, primäre Maßnahmen .....	186
4.2.2	Aktive, sekundäre Maßnahmen .....	194
4.2.3	Passive, primäre Maßnahmen .....	194
4.3	Bearbeitungsgeräusche .....	196
<b>5</b>	<b>Führungen und Lagerungen .....</b>	<b>200</b>
5.1	Hydrodynamische Gleitführungen und Gleitlager .....	205
5.1.1	Grundlagen der Reibung und Schmierung .....	206
5.1.1.1	Begriff der Viskosität .....	206
5.1.1.2	Hydrodynamische Druckbildung .....	209
5.1.1.3	Reibungsarten .....	217
5.1.1.4	Stribeck-Kurve .....	218
5.1.1.5	Stick-Slip-Effekt .....	220
5.1.2	Hydrodynamische Gleitführungen .....	222
5.1.2.1	Werkstoffe für Gleitführungen .....	223
5.1.2.2	Tribologische Eigenschaften .....	227
5.1.2.3	Führungselemente und Konstruktionsmerkmale .....	234
5.1.2.4	Klemmeinrichtungen .....	240
5.1.2.5	Kompensierung von Führungsfehlern .....	245
5.1.2.6	Statisches und dynamisches Verhalten .....	247
5.1.3	Hydrodynamische Gleitlager .....	248

5.1.3.1	Druckaufbau und Anlaufvorgang .....	249
5.1.3.2	Bauformen .....	252
5.1.3.3	Hydrodynamische Spindel-Lager-Systeme in Werkzeugmaschinen .....	254
5.1.3.4	Berechnung von Mehrgleitflächenlagern .....	256
5.2	Hydrostatische Gleitführungen und Gleitlager .....	263
5.2.1	Grundlagen, Funktionsprinzip und Begriffe .....	264
5.2.1.1	Ölversorgungssysteme .....	268
5.2.1.2	Lagerberechnung .....	276
5.2.1.3	Energiebedarf und hydraulischer Kreis .....	289
5.2.2	Hydrostatische Gleitführungen .....	293
5.2.2.1	Konstruktionsmerkmale und Ausführungsformen ..	294
5.2.2.2	Anwendungsbeispiele .....	297
5.2.2.3	Kompensierung von Führungsfehlern .....	300
5.2.3	Hydrostatische Gleitlager .....	301
5.2.3.1	Bauformen .....	302
5.2.3.2	Druckaufbau .....	304
5.2.3.3	Lagerauslegung .....	305
5.2.3.4	Abdichtung .....	308
5.2.4	Hydrostatische Spindel-Lager-Systeme in Werkzeugmaschinen .....	310
5.2.5	Hydrostatische Spindel-Mutter-Systeme .....	311
5.3	Aerostatische Gleitführungen und Gleitlager .....	313
5.3.1	Grundlagen und Funktionsprinzip .....	316
5.3.2	Auslegung aerostatischer Lagerungen .....	318
5.3.3	Berechnung aerostatischer Lagerelemente .....	321
5.3.4	Dynamische Stabilität von Luftlagern .....	323
5.3.5	Anwendungsbeispiele .....	326
5.3.5.1	Aerostatisch gelagerte Rundtische und Spindel- Lager-Systeme .....	327
5.3.5.2	Aerostatisch gelagerte Schlitzenysteme .....	331
5.4	Elektromagnetisches Lager .....	332
5.4.1	Konstruktionsprinzip .....	332
5.4.2	Ausführungsform .....	334
5.5	Wälzführungen und Wälzlager .....	335
5.5.1	Wälzführungen .....	335
5.5.1.1	Konstruktionsprinzipien .....	335
5.5.1.2	Ausführungsformen .....	337
5.5.1.3	Einsatz in Werkzeugmaschinen .....	340
5.5.2	Wälzlager .....	340
5.5.2.1	Übersicht der Lagerbauarten .....	342

5.5.2.2	Lager für Spindellagerungen und Toleranzen für ihre Umbauteile .....	343
5.5.2.3	Lagerspiel .....	344
5.5.2.4	Federung und Vorspannung bei Radlagern .....	344
5.5.2.5	Federung und Vorspannung bei Axiallagern und Axial-Radiallagern .....	350
5.5.2.6	Gegenüberstellung von radialen bzw. axialen Federkennlinien verschiedener Lagerarten .....	354
5.5.2.7	Käfigschlupf bei Radiallagern .....	355
5.5.2.8	Wälzlager als Schwingungserreger .....	355
5.5.2.9	Schmierung und Temperaturverhalten .....	356
5.5.2.10	Berechnung der Wälzlagerlebensdauer .....	362
5.5.2.11	Eigenschaften von Wälzlagern im Vergleich zu denen anderer Lager .....	367
5.5.3	Wälzgelagerte Spindel-Lager-Systeme im Werkzeugmaschinenbau .....	369
5.5.3.1	Anforderungsprofil, Konstruktionsprinzipien und Auslegungskriterien .....	369
5.5.3.1.1	Lageranordnung .....	369
5.5.3.1.2	Vorspannung des Lagersystems .....	374
5.5.3.1.3	Statisches und dynamisches Systemverhalten .....	376
5.5.3.2	Berechnung von Spindel-Lager-Systemen .....	386
5.5.3.3	Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens .....	392
5.5.3.4	Abdichtung der Lagersysteme .....	398
5.5.3.5	Schmierversorgungsanlagen .....	408
5.5.4	Kugelrollspindelsysteme .....	416
5.6	Abdeckung von Führungselementen .....	420
<b>6</b>	<b>Hauptantriebe .....</b>	<b>428</b>
6.1	Motoren .....	428
6.1.1	Elektromotoren .....	429
6.1.1.1	Gleichstrommotoren .....	429
6.1.1.1.1	Aufbau und Wirkungsweise .....	430
6.1.1.1.2	Grund- und Betriebsgleichungen .....	431
6.1.1.1.3	Drehzahlverstellung und Belastungsgrenzen .....	433
6.1.1.1.4	Stromrichter zur Gleichstromgewinnung .....	437

6.1.1.2	Synchronmotoren .....	438
6.1.1.3	Asynchronmotoren .....	441
6.1.1.3.1	Aufbau und Wirkungsweise .....	441
6.1.1.3.2	Läuferarten .....	443
6.1.1.3.3	Drehzahlverstellung des Asynchron- motors .....	445
6.1.2	Auslegung und Berechnung elektrischer Antriebe .....	447
6.1.2.1	Hochlaufverhalten .....	447
6.1.2.1.1	Hochlauf ohne Strombegrenzung .....	448
6.1.2.1.2	Hochlauf mit Strombegrenzung .....	450
6.1.2.1.3	Numerische Ermittlung des Hochlaufs bei nichtlinearen und unstetigen Kennlinien .....	453
6.1.2.2	Auswahl der Motoren nach statischen Gesichtspunkten .....	455
6.1.2.3	Auswahl nach dynamischen Gesichtspunkten ...	458
6.1.2.4	Besondere Anforderungen beim C-Achs-Betrieb .	458
6.1.3	Hydraulikmotoren .....	458
6.1.3.1	Rotatorische Motoren .....	462
6.1.3.1.1	Zahnradmotor .....	462
6.1.3.1.2	Flügelzellenmotor .....	464
6.1.3.1.3	Kolbenverdrängereinheiten .....	465
6.1.3.1.4	Lineare hydraulische Antriebe .....	471
6.1.3.2	Drehzahlverstellung von Hydraulikmotoren .....	475
6.1.3.3	Erzeugung der hydraulischen Energie .....	481
6.2	Getriebe .....	482
6.2.1	Allgemeine Anforderungen .....	482
6.2.2	Gleichförmig übersetzende Getriebe .....	484
6.2.2.1	Getriebe mit stufenweise verstellbaren Abtriebsdrehzahlen .....	484
6.2.2.1.1	Prinzipielle Bauformen von Schaltgetrieben .....	486
6.2.2.1.2	Grundlagen zur Berechnung von Stufengetrieben .....	489
6.2.2.2	Getriebe mit stufenlos verstellbaren Abtriebs- drehzahlen .....	494
6.2.2.2.1	Elektrische Getriebe .....	495
6.2.2.2.2	Hydraulische Getriebe .....	495
6.2.2.2.3	Mechanische Getriebe .....	496
6.2.2.3	Kombination von gestuften Getrieben mit stufenlosen Antriebsmotoren .....	501

6.2.2.4	Anwendungsbeispiele für gleichförmig übersetzende Getriebe .....	503
6.2.3	Ungleichförmig übersetzende Getriebe .....	504
6.2.3.1	Schwingende Kurbelschleife .....	506
6.2.3.2	Schubkurbel .....	507
6.2.3.3	Kniehebel .....	508
6.2.3.4	Kurvenscheiben .....	511
6.3	Wellenkupplungen .....	511
6.3.1	Nichtschalbare Kupplungen .....	512
6.3.1.1	Starre Kupplungen .....	512
6.3.1.2	Bewegliche, nachgiebige Kupplungen .....	516
6.3.1.2.1	Drehstarre Kupplungen .....	517
6.3.1.2.2	(Dreh-) elastische Kupplungen .....	520
6.3.2	Schalbare Kupplungen .....	526
6.3.2.1	Fremdgeschaltete Kupplungen .....	527
6.3.2.1.1	Mechanisch betätigte Kupplungen .....	528
6.3.2.1.2	Hydraulisch betätigte Kupplungen .....	529
6.3.2.1.3	Elektrisch betätigte Kupplungen .....	530
6.3.2.2	Selbstgeschaltete Kupplungen .....	542
6.3.2.2.1	Drehzahlgeschaltete Kupplungen .....	544
6.3.2.2.2	Richtungsgeschaltete Kupplungen .....	547
6.3.2.2.3	Momentgeschaltete Kupplungen .....	548
6.4	Welle-Nabe Verbindungen .....	552
6.4.1	Einteilung und Einsatzbereiche von Welle-Nabe Verbindungen .....	552
6.4.2	Kraftschlüssige Welle-Nabe Verbindungen .....	554
6.4.2.1	Preß-Verbindungen .....	554
6.4.2.2	Klemm-Verbindungen .....	569
6.4.2.3	Spannsystem-Verbindungen .....	571
6.4.3	Stoffschlüssige Welle-Nabe Verbindungen .....	578
6.4.3.1	Kleb-Verbindungen .....	578
6.4.4	Formschlüssige Welle-Nabe Verbindungen .....	583
6.4.4.1	Mitnehmer-Verbindungen .....	583
6.4.4.2	Vorgespannte Formschluß-Verbindungen .....	588
<b>7</b>	<b>Industriedesign als Aufgabe im Entwicklungsprozeß .....</b>	<b>590</b>
7.1	Die Maschinenverkleidung .....	591
7.2	Ergonomie .....	599
7.3	Entwicklungsabfolge des Designprozesses .....	603

<b>8 Zusatzeinrichtungen</b> .....	604
8.1 Späneförderer .....	604
8.2 Kühlschmierstoff-Reinigungsanlagen .....	606
8.2.1 Sedimentieren .....	608
8.2.2 Filtrieren .....	609
8.2.3 Magnetabscheiden .....	612
8.3 Temperiergeräte .....	612
8.4 Zentralschmieranlagen .....	614
8.4.1 Einleitungsanlagen .....	616
8.4.2 Progressivanlagen .....	617
8.4.3 Zweileitungsanlagen .....	618
8.4.4 Mehrleitungsanlagen .....	619
8.4.5 Drosselanlagen .....	620
8.4.6 Druckluftbeöhlungsanlagen .....	621
<b>9 Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen</b> .....	624
9.1 Einführung .....	624
9.1.1 Übersicht .....	624
9.1.2 Aufgaben der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen	626
9.1.2.1 Energiebereitstellung .....	626
9.1.2.2 Realisierung von Steuerungsfunktionen .....	627
9.1.2.3 Schutzfunktionen für Personal und Anlage .....	628
9.2 Zusammenwirken zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion .....	632
9.2.1 Schnittstelle zwischen mechanischer und elektrischer Konstruktion .....	632
9.2.2 Verständigungshilfsmittel zur Funktionsfestlegung in einer Werkzeugmaschine .....	634
9.3 Komponenten und Verfahren der Elektrokonstruktion .....	635
9.3.1 Normen und Vorschriften zur Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen .....	635
9.3.2 Kriterien zur Auswahl von Komponenten .....	638
9.3.3 Schaltungsunterlagen .....	639
9.3.4 Verfahren der Elektrokonstruktion .....	648
9.3.4.1 Projektierung, Erstellung von Schaltungsunterlagen	648
9.3.4.2 CAD-Systeme für die Elektrokonstruktion .....	650
9.4 Funktionsgerechte Integration von elektrischen Komponenten in Werkzeugmaschinen .....	652
9.4.1 Energieversorgung .....	652

9.4.2 Elektrische Komponenten in Werkzeugmaschinen .....	653
9.4.3 Bedienerchnittstelle .....	659
9.4.4 Sicherheitseinrichtungen .....	665
9.4.5 Schaltschrankbau .....	668
9.4.5.1 Konstruktion und Aufbau .....	668
9.4.5.2 Komponenten und deren Platzierung .....	669
9.4.5.3 Schaltschrankklimatisierung .....	674
<b>10 Zusammenfassung .....</b>	<b>676</b>
<b>11 Anhang .....</b>	<b>677</b>
<b>12 Normen und Richtlinien .....</b>	<b>690</b>
<b>13 Literatur .....</b>	<b>695</b>
<b>14 Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>712</b>