

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> . . . . .	<b>XXI</b>
<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 . . . . .	16
2.3.3 Kraftfluß- und Verformungsanalyse . . . . .	18
2.3.4 Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung . . . . .	20
2.3.4.1 Steifigkeiten stabförmiger Bauteile . . . . .	21
2.3.4.2 Verrippungen . . . . .	30
2.3.4.3 Krafteinleitung . . . . .	37
2.3.4.4 Fügeverbindungen . . . . .	47
2.3.5 Konstruktionsbeispiele . . . . .	55
2.4 Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei dynamischer Belastung . . . . .	58
2.4.1 Dynamische Belastungen . . . . .	58
2.4.2 Dynamische Kenngrößen . . . . .	60
2.4.3 Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung . . . . .	62
2.4.3.1 Massen und Massenverteilung . . . . .	65
2.4.3.2 Gezielte Schwächung . . . . .	65
2.4.3.3 Dämpfung in Gestellen . . . . .	68
2.4.3.4 Dynamische Zusatzsysteme . . . . .	72
2.4.3.5 Reibungsdämpfer . . . . .	76
2.4.3.6 Aktive Dämpfungssysteme . . . . .	77

---

2.4.3.7 Squeeze-Film-Dämpfer . . . . .	79
2.4.3.7.1 Squeeze-Film-Dämpfungsbuchse . . . . .	80
2.4.3.7.2 Squeeze-Film-Dämpfung an Werkzeugmaschinen-führungen . . . . .	82
2.5 Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei thermischer Belastung . . . . .	84
2.5.1 Thermische Belastungen . . . . .	84
2.5.2 Thermische Kenngrößen . . . . .	86
2.5.3 Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung . . . . .	88
2.6 Werkstoffgerechte Konstruktion . . . . .	96
2.6.1 Reaktionsharzbeton . . . . .	96
2.6.1.1 Der Werkstoff Reaktionsharzbeton . . . . .	96
2.6.1.2 Verbindungstechniken Beton/Stahl . . . . .	105
2.6.1.3 Formenbau . . . . .	110
2.6.1.4 Werkzeugmaschinengestelle aus Reaktionsharzbeton	114
2.6.2 Faserverbundwerkstoffe . . . . .	117
2.6.2.1 Werkstoffeigenschaften . . . . .	119
2.6.2.2 Einsatzkriterien und -möglichkeiten für hochbelastete Maschinenelemente aus faserverstärkten Kunststoffen	123
2.6.2.3 Konstruktion und Fertigung von FVK-Bauteilen, Anwendungsbeispiele . . . . .	124
2.7 Berechnung und Optimierung von Gestellbauteilen . . . . .	133
2.7.1 Berechnung von Gestellbauteilen . . . . .	133
2.7.1.1 Einführung in die Finite-Elemente-Methode . . . . .	135
2.7.1.2 Herleitung einer Elementsteifigkeitsmatrix . . . . .	137
2.7.1.3 Überlagerung der Elementsteifigkeitsmatrizen zur Gesamtsteifigkeitsmatrix . . . . .	140
2.7.1.4 Überblick über die Berechnungsmöglichkeiten nach der Finite-Elemente-Methode . . . . .	143
2.7.1.5 Aufbereitung der Bauteilgeometrie für die Berechnung	143
2.7.1.6 Berechnungsbeispiele . . . . .	146
2.7.1.6.1 Berechnung des statischen Verhaltens von Gestellbauteilen . . . . .	146
2.7.1.6.2 Berechnung des dynamischen Verhaltens von Gestellbauteilen . . . . .	147
2.7.1.6.3 Berechnung des thermischen Verhaltens von Gestellbauteilen . . . . .	154
2.7.1.7 Rechengenauigkeit und Fehlermöglichkeiten . . . . .	160

2.7.2 Optimierung des mechanischen Bauteilverhaltens . . . . .	161
2.7.2.1 Grundlagen der Optimierung . . . . .	161
2.7.2.2 Einsatz der Finite-Elemente-Optimierung bei der Konstruktion von Werkzeugmaschinen . . . . .	165
2.7.2.3 Optimierung von Wandstärken und Faserwinkeln . . . . .	167
2.7.2.3.1 Minimierung von Bauteilverformungen bei gleichbleibendem Gewicht . . . . .	167
2.7.2.3.2 Optimierung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen . . . . .	170
2.7.2.4 Optimierung der Topologie des Bauteils . . . . .	175
2.7.2.5 Optimierung der Bauteilform zur Reduzierung der Kerbspannungen oder des Gewichtes . . . . .	177
2.7.2.5.1 Minimierung der Kerbspannung an offenen Ausrundungen . . . . .	177
2.7.2.5.2 Allgemeiner Ansatz zur Formoptimierung mechanischer Bauteile . . . . .	179
<b>3 Aufstellung und Fundamentierung von Werkzeugmaschinen . . . . .</b>	<b>183</b>
3.1 Komponenten der Maschinenaufstellung . . . . .	187
3.1.1 Aufstellelemente . . . . .	187
3.1.2 Fundament . . . . .	187
3.1.3 Baugrund . . . . .	189
3.2 Fundamentauslegung unter statischen Gesichtspunkten . . . . .	192
3.3 Fundamentauslegung unter dynamischen Gesichtspunkten . . . . .	196
3.3.1 Beurteilungskriterien für Erschütterungen . . . . .	200
3.3.2 Auslegung aktiver Schwingungsisolierungen . . . . .	203
3.3.3 Auslegung passiver Schwingungsisolierungen . . . . .	208
<b>4 Geräuscharme Maschinenkonstruktion . . . . .</b>	<b>211</b>
4.1 Grundlagen . . . . .	212
4.2 Beispiele für Geräuschminderung . . . . .	218
4.2.1 Aktive, primäre Maßnahmen . . . . .	221
4.2.2 Aktive, sekundäre Maßnahmen . . . . .	228
4.2.3 Passive, primäre Maßnahmen . . . . .	228
4.3 Bearbeitungsgeräusche . . . . .	230

---

<b>5 Führungen und Lagerungen</b> . . . . .	234
5.1 Hydrodynamische Gleitführungen und Gleitlager . . . . .	239
5.1.1 Grundlagen der Reibung und Schmierung . . . . .	240
5.1.1.1 Begriff der Viskosität . . . . .	240
5.1.1.2 Hydrodynamische Druckbildung . . . . .	244
5.1.1.3 Reibungsarten . . . . .	252
5.1.1.4 Stribeck-Kurve . . . . .	253
5.1.1.5 Stick-Slip-Effekt . . . . .	255
5.1.2 Hydrodynamische Gleitführungen . . . . .	258
5.1.2.1 Werkstoffe für Gleitführungen . . . . .	258
5.1.2.2 Tribologische Eigenschaften . . . . .	263
5.1.2.3 Führungselemente und Konstruktionsmerkmale . .	270
5.1.2.4 Klemmeinrichtungen . . . . .	277
5.1.2.5 Kompensierung von Führungsfehlern . . . . .	283
5.1.2.6 Statisches und dynamisches Verhalten . . . . .	284
5.1.3 Hydrodynamische Gleitlager . . . . .	285
5.1.3.1 Druckaufbau und Anlaufvorgang . . . . .	286
5.1.3.2 Bauformen . . . . .	289
5.1.3.3 Hydrodynamische Spindel-Lager-Systeme in Werkzeugmaschinen . . . . .	292
5.1.3.4 Berechnung von Mehrflächenlagern . . . . .	294
5.2 Hydrostatische Gleitführungen und Gleitlager . . . . .	302
5.2.1 Grundlagen, Funktionsprinzip und Begriffe . . . . .	302
5.2.1.1 Ölversorgungssysteme . . . . .	306
5.2.1.2 Lagerberechnung . . . . .	316
5.2.1.3 Dämpfung an einer hydrostatischen Tasche . . .	331
5.2.1.4 Energiebedarf und hydraulischer Kreis . . . . .	333
5.2.2 Hydrostatische Gleitführungen . . . . .	336
5.2.2.1 Konstruktionsmerkmale und Ausführungsformen .	337
5.2.2.2 Anwendungsbeispiele . . . . .	341
5.2.2.3 Kompensierung von Führungsfehlern . . . . .	344
5.2.3 Hydrostatische Gleitlager . . . . .	345
5.2.3.1 Bauformen . . . . .	346
5.2.3.2 Druckaufbau . . . . .	348
5.2.3.3 Lagerauslegung . . . . .	349
5.2.3.4 Abdichtung . . . . .	354
5.2.4 Hydrostatische Spindel-Lager-Systeme in Werkzeug- maschinen . . . . .	354
5.2.5 Hydrostatische Spindel-Mutter-Systeme . . . . .	355

---

5.3 Aerostatische Gleitführungen und Gleitlager . . . . .	359
5.3.1 Grundlagen und Funktionsprinzip . . . . .	361
5.3.2 Auslegung aerostatischer Lagerungen . . . . .	363
5.3.3 Berechnung aerostatischer Lagerelemente . . . . .	365
5.3.4 Dynamische Stabilität von Luftlagern . . . . .	369
5.3.5 Anwendungsbeispiele . . . . .	372
5.3.5.1 Aerostatisch gelagerte Rundtische und Spindel-Lager-Systeme . . . . .	372
5.3.5.2 Aerostatisch gelagerte Schlittensysteme . . . . .	379
5.4 Rundlaufverhalten unterschiedlicher Spindelsysteme . . . . .	379
5.5 Elektromagnetisches Lager . . . . .	381
5.5.1 Konstruktionsprinzip . . . . .	381
5.5.2 Ausführungsform . . . . .	383
5.5.3 Eigenschaften elektromagnetischer Lagerungen . . . . .	383
5.6 Wälzführungen und Wälzlager . . . . .	385
5.6.1 Wälzführungen . . . . .	385
5.6.1.1 Bauarten und Eigenschaften . . . . .	385
5.6.1.2 Einsatz in Werkzeugmaschinen . . . . .	395
5.6.2 Wälzlager . . . . .	397
5.6.2.1 Übersicht der Lagerbauarten . . . . .	398
5.6.2.2 Lager für Spindellagerungen und Toleranzen für ihre Umbauteile . . . . .	398
5.6.2.3 Lagerspiel . . . . .	399
5.6.2.4 Federung und Vorspannung bei Radiallagern . . . . .	400
5.6.2.5 Federung und Vorspannung bei Axiallagern und Axial-Radiallagern . . . . .	405
5.6.2.6 Gegenüberstellung von radialen bzw. axialen Federkennlinien verschiedener Lagerarten . . . . .	410
5.6.2.7 Käfigschlupf bei Radiallagern . . . . .	411
5.6.2.8 Wälzlager als Schwingungserreger . . . . .	411
5.6.2.9 Schmierung und Temperaturverhalten . . . . .	413
5.6.2.10 Berechnung der Wälzlagerebensdauer . . . . .	419
5.6.2.11 Eigenschaften von Wälzlagern im Vergleich zu denen anderer Lager . . . . .	425
5.6.3 Wälzgelagerte Spindel-Lager-Systeme im Werkzeugmaschinenbau . . . . .	427
5.6.3.1 Anforderungsprofil, Konstruktionsprinzipien und Auslegungskriterien . . . . .	427

5.6.3.1.1 Lageranordnung . . . . .	427
5.6.3.1.2 Vorspannung des Lagersystems . . . . .	432
5.6.3.1.3 Statisches und dynamisches Systemverhalten . . . . .	436
5.6.3.2 Berechnung von Spindel-Lager-Systemen . . . . .	446
5.6.3.3 Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens . . . . .	453
5.6.3.4 Abdichtung der Lagersysteme . . . . .	458
5.6.3.4.1 Berührende Dichtelemente . . . . .	461
5.6.3.4.2 Berührungslose Dichtelemente . . . . .	465
5.6.3.4.3 Sperrluftdichtungen . . . . .	469
5.6.3.5 Schmierversorgungsanlagen . . . . .	472
5.6.3.6 Drehdurchführungen . . . . .	480
5.6.4 Kugelrollspindelsysteme . . . . .	483
5.7 Abdeckung von Führungselementen . . . . .	487
<b>6 Hauptantriebe . . . . .</b>	<b>496</b>
6.1 Motoren . . . . .	496
6.1.1 Elektromotoren . . . . .	498
6.1.1.1 Gleichstrommotoren . . . . .	498
6.1.1.1.1 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	498
6.1.1.1.2 Grund- und Betriebsgleichungen . . . . .	499
6.1.1.1.3 Drehzahlverstellung und Belastungsgrenzen . . . . .	501
6.1.1.1.4 Stromrichter zur Gleichstromgewinnung . . . . .	506
6.1.1.2 Synchronmotoren . . . . .	507
6.1.1.3 Asynchronmotoren . . . . .	511
6.1.1.3.1 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	511
6.1.1.3.2 Kurzschlußläufermotor . . . . .	514
6.1.1.3.3 Drehzahlverstellung des Asynchronmotors . . . . .	515
6.1.1.4 Direktantriebe . . . . .	518
6.1.1.4.1 Motorspindeln . . . . .	518
6.1.1.4.2 Linearmotoren . . . . .	520
6.1.2 Auslegung und Berechnung elektrischer Antriebe . . . . .	523
6.1.2.1 Hochlaufverhalten . . . . .	523
6.1.2.1.1 Hochlauf ohne Strombegrenzung . . . . .	524
6.1.2.1.2 Hochlauf mit Strombegrenzung . . . . .	526
6.1.2.1.3 Numerische Ermittlung des Hochlaufs bei nichtlinearen und unstetigen Kennlinien . . . . .	530
6.1.2.2 Auswahl der Motoren nach statischen Gesichtspunkten . . . . .	531

6.1.2.3 Auswahl nach dynamischen Gesichtspunkten . . . . .	534
6.1.2.4 Besondere Anforderungen beim C-Achsbetrieb . . . . .	534
6.1.3 Hydraulikmotoren . . . . .	535
6.1.3.1 Rotatorische Motoren . . . . .	539
6.1.3.1.1 Zahnradmotor . . . . .	539
6.1.3.1.2 Flügelzellenmotor . . . . .	541
6.1.3.1.3 Kolbenverdrängereinheiten . . . . .	544
6.1.3.1.4 Lineare Hydraulische Antriebe . . . . .	548
6.1.3.2 Drehzahlverstellung von Hydraulikmotoren . . . . .	552
6.1.3.3 Erzeugung der hydraulischen Energie . . . . .	559
6.2 Getriebe . . . . .	561
6.2.1 Allgemeine Anforderungen . . . . .	561
6.2.2 Gleichförmig übersetzende Getriebe . . . . .	562
6.2.2.1 Getriebe mit stufenweise verstellbaren Abtriebsdrehzahlen . . . . .	562
6.2.2.1.1 Prinzipielle Bauformen von Schaltgetrieben . . . . .	564
6.2.2.1.2 Grundlagen zur Berechnung von Stufengetrieben . . . . .	568
6.2.2.2 Getriebe mit stufenlos verstellbaren Abtriebsdrehzahlen . . . . .	574
6.2.2.2.1 Elektrische Getriebe . . . . .	574
6.2.2.2.2 Hydraulische Getriebe . . . . .	574
6.2.2.2.3 Mechanische Getriebe . . . . .	576
6.2.2.3 Kombination von gestuften Getrieben mit stufenlosen Antriebsmotoren . . . . .	581
6.2.2.4 Anwendungsbeispiele für gleichförmig übersetzende Getriebe . . . . .	582
6.2.3 Ungleichförmig übersetzende Getriebe . . . . .	583
6.2.3.1 Schwingende Kurbelschleife . . . . .	585
6.2.3.2 Schubkurbel . . . . .	586
6.2.3.3 Kniehebel . . . . .	589
6.2.3.4 Kurvenscheiben . . . . .	591
7 Industriedesign als Aufgabe im Entwicklungsprozeß . . . . .	592
7.1 Maschinenverkleidung . . . . .	593
7.2 Ergonomie . . . . .	601
7.3 Entwicklungsabfolge des Designprozesses . . . . .	605

---

<b>8 Zusatzeinrichtungen</b> . . . . .	607
8.1 Späneförderer . . . . .	607
8.2 Spänezentrifugen . . . . .	610
8.3 Kühlschmierstoff-Reinigungsanlagen . . . . .	613
8.3.1 Sedimentieren . . . . .	613
8.3.2 Filtrieren . . . . .	616
8.3.3 Magnetabscheiden . . . . .	619
8.4 Temperiergeräte . . . . .	619
8.5 Zentralschmieranlagen . . . . .	621
8.5.1 Einleitungsanlagen . . . . .	621
8.5.2 Progressivianlagen . . . . .	624
8.5.3 Zweileitungsanlagen . . . . .	625
8.5.4 Mehrleitungsanlagen . . . . .	626
8.5.5 Drosselanlagen . . . . .	626
8.5.6 Druckluftbeölungsanlagen . . . . .	628
<b>9 Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen</b> . . . . .	631
9.1 Einführung . . . . .	631
9.1.1 Übersicht . . . . .	631
9.1.2 Aufgaben der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen . . . . .	633
9.1.2.1 Energiebereitstellung . . . . .	633
9.1.2.2 Realisierung von Steuerungsfunktionen . . . . .	634
9.1.2.3 Schutzfunktionen für Personal und Anlage . . . . .	635
9.2 Zusammenwirken zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion . . . . .	640
9.2.1 Schnittstelle zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion . . . . .	640
9.2.2 Verständigungshilfsmittel zur Funktionsfestlegung in einer Werkzeugmaschine . . . . .	641
9.3 Komponenten und Verfahren der Elektrokonstruktion . . . . .	643
9.3.1 Normen und Vorschriften zur Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen . . . . .	643
9.3.2 Kriterien zur Auswahl von Komponenten . . . . .	645
9.3.3 Schaltungsunterlagen . . . . .	647
9.3.4 Verfahren der Elektrokonstruktion . . . . .	656

9.3.4.1 Projektierung, Erstellung von Schaltungsunterlagen . . . . .	656
9.3.4.2 CAD-Systeme für die Elektrokonstruktion . . . . .	657
<b>9.4 Funktionsgerechte Integration von elektrischen Komponenten in Werkzeugmaschinen . . . . .</b>	<b>660</b>
9.4.1 Energieversorgung . . . . .	660
9.4.2 Elektrische Komponenten in Werkzeugmaschinen . . . . .	662
9.4.3 Benutzungsschnittstelle . . . . .	669
9.4.4 Sicherheitseinrichtungen . . . . .	674
9.4.5 Schaltschrankbau . . . . .	677
9.4.5.1 Konstruktion und Aufbau . . . . .	678
9.4.5.2 Komponenten und deren Plazierung . . . . .	679
9.4.5.3 Schaltschrankklimatisierung . . . . .	684
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>686</b>
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>697</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>707</b>