

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	XXI
1 Einführung	1
2 Gestelle und Gestellbauteile	7
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 Gestell- bauteilen	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 Faserverbund- werkstoffen	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
3 Aufstellung und Fundamentierung von Werkzeugmaschinen . . .	183
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
4 Geräuscharme Maschinenkonstruktion	211
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

5	Führungen und Lagerungen	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 Feder- kennlinien 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 Wälzlagerlebensdauer	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
6 Hauptantriebe	496
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 Gesichts- punkten	531

6.1.2.3	Auswahl nach dynamischen Gesichtspunkten	534
6.1.2.4	Besondere Anforderungen beim C-Achs- Betrieb	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 Abtriebs- drehzahlen	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

8	Zusatzeinrichtungen	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	Progressivanlagen	624
8.5.3	Zweileitungsanlagen	625
8.5.4	Mehrleitungsanlagen	626
8.5.5	Drosselanlagen	626
8.5.6	Druckluftbeölungsanlagen	628
9	Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen	631
9.1	Einführung	631
9.1.1	Übersicht	631
9.1.2	Aufgaben der Elektrokonstruktion an Werkzeug- maschinen	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
9.4 Funktionsgerechte Integration von elektrischen Komponenten	
in Werkzeugmaschinen	660
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 Platzierung	679
9.4.5.3 Schaltschrankklimatisierung	684
Anhang	686
Literaturverzeichnis	697
Sachverzeichnis	707