
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Gestelle und Gestellbauteile	7
2.1	Anforderungen und Bauformen	7
2.2	Werkstoffe für Gestellbauteile	12
2.3	Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei statischer Belastung	14
2.3.1	Statische Belastungen	14
2.3.2	Statische Kenngrößen	15
2.3.3	Kraftfluss- und Verformungsanalyse	17
2.3.4	Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung	18
2.3.4.1	Steifigkeiten stabförmiger Bauteile	19
2.3.4.2	Verrippungen	26
2.3.4.3	Krafteinleitung	31
2.3.4.4	Fügeverbindungen	39
2.3.5	Konstruktionsbeispiele	46
2.4	Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei dynamischer Belastung	49
2.4.1	Dynamische Belastungen	49
2.4.2	Dynamische Kenngrößen	50
2.4.3	Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung	52
2.4.3.1	Massen und Massenverteilung	54
2.4.3.2	Gezielte Schwächung	56
2.4.3.3	Dämpfung in Gestellen	58
2.4.3.4	Übersicht über dynamische Zusatzsysteme	61
2.4.3.5	Hilfsmassendämpfer	62
2.4.3.6	Reibungsdämpfer	64
2.4.3.7	Aktive Dämpfungssysteme	66
2.4.3.8	Squeeze-Film-Dämpfer	68
2.5	Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei thermischer Belastung	72
2.5.1	Thermische Belastungen	72
2.5.2	Thermische Kenngrößen	74

2.5.3	Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung	76
2.6	Werkstoffgerechte Konstruktion	83
2.6.1	Reaktionsharzbeton	83
2.6.1.1	Der Werkstoff Reaktionsharzbeton	83
2.6.1.2	Verbindungstechniken Beton/Stahl	90
2.6.1.3	Formenbau	95
2.6.1.4	Werkzeugmaschinengestelle aus Reaktionsharzbeton	98
2.6.2	Faserverbundwerkstoffe	101
2.6.2.1	Werkstoffeigenschaften	102
2.6.2.2	Einsatzkriterien und -möglichkeiten für hochbelastete Maschinenelemente aus faserverstärkten Kunststoffen	105
2.6.2.3	Konstruktion und Fertigung von FVK-Bauteilen, Anwendungsbeispiele	105
2.7	Berechnung und Optimierung von Gestellbauteilen	113
2.7.1	Berechnung von Gestellbauteilen	113
2.7.1.1	Einführung in die Finite-Elemente-Methode	115
2.7.1.2	Herleitung einer Elementsteifigkeitsmatrix	119
2.7.1.3	Überlagerung der Elementsteifigkeitsmatrizen zur Gesamtsteifigkeitsmatrix	122
2.7.1.4	Überblick über die Berechnungsmöglichkeiten nach der Finite-Elemente-Methode	123
2.7.1.5	Aufbereitung der Bauteilgeometrie für die Berechnung	124
2.7.1.6	Berechnungsbeispiele	126
2.7.1.6.1	Berechnung des statischen Verhaltens von Gestellbauteilen	126
2.7.1.6.2	Berechnung des dynamischen Verhaltens von Gestellbauteilen	128
2.7.1.6.3	Berechnung des thermischen Verhaltens von Gestellbauteilen	135
2.7.1.7	Rechengenauigkeit und Fehlermöglichkeiten	140
2.7.2	Gekoppelte Simulation von Strukturdynamik und Regelkreisen mit Hilfe der flexiblen Mehrkörpersimulation	142
2.7.3	Optimierung des mechanischen Bauteilverhaltens	148
2.7.3.1	Grundlagen der Optimierung	148
2.7.3.2	Parameteroptimierung bei der Konstruktion von Werkzeugmaschinen	151
2.7.3.3	Optimierung von Wandstärken und Faserwinkeln	153
2.7.3.3.1	Massen-Steifigkeitsoptimierung von Bauteilen	153
2.7.3.3.2	Optimierung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen	157

2.7.3.4	Topologieoptimierung	160
2.7.3.5	Formoptimierung zur Reduzierung der Kerbspannungen oder des Gewichtes	165
2.7.3.5.1	Minimierung der Kerbspannung an offenen Ausrundungen	165
2.7.3.5.2	Allgemeiner Ansatz zur Formoptimierung mechanischer Bauteile	167
3	Aufstellung und Fundamentierung von Werkzeugmaschinen	171
3.1	Komponenten der Maschinenaufstellung	173
3.1.1	Aufstellelemente	173
3.1.2	Fundament	175
3.1.3	Baugrund	176
3.2	Fundamentauslegung unter statischen Gesichtspunkten	177
3.3	Fundamentauslegung unter dynamischen Gesichtspunkten	182
3.3.1	Beurteilungskriterien für Erschütterungen	186
3.3.1.1	Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Ganzkörperschwingungen	186
3.3.1.2	Erschütterung durch die Maschine (Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden)	187
3.3.2	Auslegung aktiver Schwingungsisolierungen	189
3.3.3	Auslegung passiver Schwingungsisolierungen	193
4	Geräuscharme Maschinenkonstruktion	197
4.1	Grundlagen	198
4.2	Beispiele für Geräuschkinderung	203
4.2.1	Aktive, primäre Maßnahmen	205
4.2.2	Aktive, sekundäre Maßnahmen	209
4.2.3	Passive, primäre Maßnahmen	211
4.2.4	Bearbeitungsgeräusche	212
5	Führungen und Lagerungen	217
5.1	Hydrodynamische Gleitführungen und Gleitlager	221
5.1.1	Grundlagen der Reibung und Schmierung	222
5.1.1.1	Begriff der Viskosität	222
5.1.1.2	Hydrodynamische Druckbildung	225
5.1.1.3	Reibungsarten	232
5.1.1.4	Stribeck-Kurve	234
5.1.1.5	Stick-Slip-Effekt	236
5.1.2	Hydrodynamische Gleitführungen	238
5.1.2.1	Werkstoffe für Gleitführungen	238
5.1.2.2	Tribologische Eigenschaften	243
5.1.2.3	Führungselemente und Konstruktionsmerkmale	249
5.1.2.4	Klemmeinrichtungen	256

5.1.2.5	Kompensierung von Führungsfehlern	260
5.1.2.6	Statisches und dynamisches Verhalten	261
5.1.3	Hydrodynamische Gleitlager	262
5.1.3.1	Druckaufbau und Anlaufvorgang	263
5.1.3.2	Bauformen	266
5.1.3.3	Hydrodynamische Spindel-Lager-Systeme in Werkzeugmaschinen	269
5.1.3.4	Berechnung von Mehrflächenlagern	271
5.2	Hydrostatische Gleitführungen und Gleitlager	277
5.2.1	Grundlagen, Funktionsprinzip und Begriffe	278
5.2.1.1	Ölversorgungssysteme	282
5.2.1.2	Lagerberechnung	290
5.2.1.2.1	Ölversorgungssystem „eine Pumpe pro Tasche ($Q = \text{konst.}$)“ ohne Umgriff	290
5.2.1.2.2	Ölversorgungssystem „Pumpe mit Vordrosseln (Kapillaren) ($p_P = \text{konst.}$)“	292
5.2.1.2.3	Ölversorgungssystem „eine Pumpe pro Tasche ($Q = \text{konst.}$)“ mit Umgriff	296
5.2.1.2.4	Ölversorgungssystem „Pumpe mit Vordrosseln (Kapillaren) ($p_P = \text{konst.}$)“ mit Umgriff	298
5.2.1.2.5	Berechnungsbeispiel	300
5.2.1.3	Dämpfung an einer hydrostatischen Tasche	304
5.2.1.4	Energiebedarf und hydraulischer Kreis	304
5.2.2	Hydrostatische Gleitführungen	309
5.2.2.1	Konstruktionsmerkmale und Ausführungsformen	309
5.2.2.2	Anwendungsbeispiele	312
5.2.2.3	Kompensation von Führungsfehlern	316
5.2.3	Hydrostatische Gleitlager	318
5.2.3.1	Bauformen	318
5.2.3.2	Druckaufbau	319
5.2.3.3	Lager mit strukturierten Oberflächen	321
5.2.3.4	Lagerauslegung	323
5.2.3.5	Abdichtung	329
5.2.4	Hydrostatische Spindel-Lager-Systeme	330
5.2.5	Hydrostatische Spindel-Mutter-Systeme	332
5.3	Aerostatische Gleitführungen und Gleitlager	335
5.3.1	Grundlagen und Führungsprinzip	336
5.3.2	Auslegung aerostatischer Lagerungen	338
5.3.3	Berechnung aerostatischer Lagerelemente	340
5.3.4	Dynamische Stabilität aerostatischer Gleitführungen und Gleitlager	344
5.3.5	Anwendungsbeispiele	346
5.3.5.1	Aerostatisch gelagertes Schlittensystem	347

	5.3.5.2	Aerostatisch gelagerte Rundtische	348
	5.3.5.3	Aerostatisch gelagerte Spindel-Lager-Systeme	350
5.4		Rundlaufverhalten unterschiedlicher Spindelsysteme	352
5.5		Elektromagnetische Lager	355
	5.5.1	Konstruktionsprinzip	355
	5.5.2	Ausführungsformen elektromagnetischer Lagerungen	356
	5.5.3	Eigenschaften elektromagnetischer Lagerungen	357
5.6		Wälzfürungen und Wälzlager	358
	5.6.1	Wälzfürungen	358
	5.6.1.1	Bauarten und Eigenschaften	358
	5.6.1.2	Einsatz in Werkzeugmaschinen	368
	5.6.2	Wälzlager	368
	5.6.2.1	Übersicht der Lagerbauarten	369
	5.6.2.2	Lager für Spindellagerungen und Toleranzen für ihre Umbauteile	369
	5.6.2.3	Lagerspiel	373
	5.6.2.4	Federung und Vorspannung bei Radiallagern	374
	5.6.2.5	Federung und Vorspannung bei Axiallagern und Axial-Radiallagern	379
	5.6.2.6	Gegenüberstellung von radialen bzw. axialen Federkennlinien verschiedener Lagerarten	383
	5.6.2.7	Käfigschlupf bei Radiallagern	384
	5.6.2.8	Wälzlager unter dem Einfluss hoher Winkelbeschleunigungen	384
	5.6.2.9	Wälzlager als Schwingungserreger	386
	5.6.2.10	Schmierung und Temperaturverhalten	387
	5.6.2.11	Veränderung der Kinematik eines Spindellagers in Abhängigkeit von Belastung und Drehzahl	393
	5.6.2.12	Berechnung der Wälzlagerlebensdauer	401
	5.6.2.13	Eigenschaften von Wälzlagern im Vergleich zu denen anderer Lager	406
5.6.3		Wälzgelagerte Spindel-Lager-Systeme im Werkzeugmaschinenbau	408
	5.6.3.1	Anforderungsprofil, Konstruktionsprinzipien und Auslegungskriterien	408
	5.6.3.1.1	Lageranordnung	408
	5.6.3.1.2	Vorspannung des Lagersystems	414
	5.6.3.1.3	Spindellager für hohe Drehzahlen	416
	5.6.3.1.4	Modifizierte Zylinderrollenlager für hohe Drehzahlen	422
	5.6.3.1.5	Gestaltung der Loslagerung	426
	5.6.3.1.6	Statisches Systemverhalten	428
	5.6.3.1.7	Dynamisches Systemverhalten	432
	5.6.3.2	Berechnung von Spindel-Lager-Systemen	439

5.6.3.3	Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens	447
5.6.3.4	Abdichtung der Lagersysteme	452
5.6.3.4.1	Berührende Dichtsysteme	454
5.6.3.4.2	Berührungsfreie Dichtsysteme	455
5.6.3.5	Schmierversorgungsanlagen	465
5.6.3.6	Drehdurchführungen	472
5.6.4	Kugelrollspindelsysteme	476
5.7	Abdichtung, Schmierung und Abdeckung von Führungselementen	480
5.7.1	Dichtungstechnik und Schmierung von Profilschienenführungen	480
5.7.2	Verschleiß von Profilschienenwälzführungen beim Einsatz in Werkzeugmaschinen	485
5.7.3	Abdeckung von Führungsbahnen	487
6	Hauptantriebe	493
6.1	Motoren	493
6.1.1	Elektromotoren	494
6.1.1.1	Gleichstrommotoren	494
6.1.1.1.1	Aufbau und Wirkungsweise	495
6.1.1.1.2	Grund- und Betriebsgleichungen	496
6.1.1.1.3	Drehzahlverstellung und Belastungsgrenzen	497
6.1.1.1.4	Stromrichter zur Gleichstromgewinnung und Drehzahlregelung	502
6.1.1.2	Synchronmotoren	503
6.1.1.3	Asynchronmotoren	506
6.1.1.3.1	Aufbau und Wirkungsweise	506
6.1.1.3.2	Kurzschlussläufermotor	510
6.1.1.3.3	Drehzahlverstellung des Asynchronmotors	511
6.1.1.3.4	Feldorientierte Regelung	512
6.1.1.4	Direktantriebe	514
6.1.1.4.1	Motorspindeln	514
6.1.1.4.2	Linearmotoren	515
6.1.2	Auslegung und Berechnung elektrischer Antriebe	518
6.1.2.1	Hochlaufverhalten	518
6.1.2.1.1	Hochlauf ohne Strombegrenzung	518
6.1.2.1.2	Hochlauf mit Strombegrenzung	520
6.1.2.1.3	Numerische Ermittlung des Hochlaufs bei nichtlinearen und unstetigen Kennlinien	523

6.1.2.2	Auswahl der Motoren nach statischen Gesichtspunkten	523
6.1.2.3	Auswahl nach dynamischen Gesichtspunkten	527
6.1.2.4	Besondere Anforderungen beim C-Achs-Betrieb	527
6.1.3	Hydraulikmotoren	527
6.1.3.1	Rotatorische Motoren	531
6.1.3.1.1	Zahnradmotor	531
6.1.3.1.2	Flügelzellenmotor	533
6.1.3.1.3	Kolbenverdrängereinheiten	535
6.1.3.1.4	Lineare Hydraulische Antriebe	538
6.1.3.2	Drehzahlverstellung von Hydraulikmotoren	542
6.1.3.3	Erzeugung der hydraulischen Energie	548
6.2	Getriebe	549
6.2.1	Allgemeine Anforderungen	549
6.2.2	Gleichförmig übersetzende Getriebe	551
6.2.2.1	Getriebe mit stufenweise verstellbaren Abtriebsdrehzahlen	551
6.2.2.1.1	Prinzipielle Bauformen von Schaltgetrieben	552
6.2.2.1.2	Grundlagen zur Berechnung von Stufengetrieben	555
6.2.2.2	Getriebe mit stufenlos verstellbaren Abtriebsdrehzahlen	560
6.2.2.2.1	Elektrische Getriebe	560
6.2.2.2.2	Hydraulische Getriebe	561
6.2.2.2.3	Mechanische Getriebe	562
6.2.2.3	Kombination von gestuften Getrieben mit stufenlosen Antriebsmotoren	565
6.2.2.4	Anwendungsbeispiele für gleichförmig übersetzende Getriebe	566
6.2.3	Ungleichförmig übersetzende Getriebe	569
6.2.3.1	Schwingende Kurbelschleife	569
6.2.3.2	Schubkurbel	570
6.2.3.3	Kniehebel	571
6.2.3.4	Kurvenscheiben	573
6.2.3.5	Unrunde Zahnräder	574
7	Industriedesign als Aufgabe im Entwicklungsprozess	577
7.1	Maschinenverkleidung	578
7.1.1	Corporate Design	579
7.1.2	Gestaltungsrichtlinien	580
7.1.3	Farbgebung	582
7.2	Ergonomie	582
7.3	Entwicklungsabfolge des Designprozesses	586

8	Zusatzeinrichtungen	589
8.1	Zentralschmieranlagen	589
8.1.1	Einleitungsanlagen	590
8.1.2	Progressivanlagen	591
8.1.3	Zweileitungsanlagen	592
8.1.4	Mehrleitungsanlagen	593
8.1.5	Drosselanlagen	593
8.1.6	Druckluftbeölungsanlagen	594
8.2	Temperiergeräte	597
8.3	Systeme zur Minimalmengenkühlschmierung	597
8.3.1	Äußere Zufuhr	599
8.3.2	Innere Zufuhr	601
8.4	Handhabung von Spänen	602
8.4.1	Fördern	602
8.4.2	Zentrifugieren	605
8.4.3	Brikettieren	608
8.5	Kühlschmierstoff-Reinigungsanlagen	610
8.5.1	Sedimentieren	610
8.5.2	Filtrieren	611
8.5.3	Magnetabscheiden	615
8.6	Brandschutz beim Einsatz nicht wassermischbarer Kühlschmierstoffe	615
9	Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen	621
9.1	Einführung	621
9.1.1	Übersicht	621
9.1.2	Aufgaben der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen	622
9.1.2.1	Energiebereitstellung	623
9.1.2.2	Realisierung von Steuerungsfunktionen	624
9.1.2.3	Schutzfunktionen für Personal und Anlage	624
9.2	Zusammenwirken zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion	629
9.2.1	Schnittstelle zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion	629
9.2.2	Verständigungshilfsmittel zur Funktionsfestlegung in einer Werkzeugmaschine	630
9.3	Komponenten und Verfahren der Elektrokonstruktion	632
9.3.1	Normen und Vorschriften zur Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen	632
9.3.2	Kriterien zur Auswahl von Komponenten	634
9.3.3	Schaltungsunterlagen	635
9.3.4	Verfahren der Elektrokonstruktion	643
9.3.4.1	Projektierung, Erstellung von Schaltungsunterlagen	643
9.3.4.2	CAD-Systeme für die Elektrokonstruktion	645

9.4 Funktionsgerechte Integration von elektrischen Komponenten in Werkzeugmaschinen	647
9.4.1 Energieversorgung	647
9.4.2 Elektrische Komponenten in Werkzeugmaschinen	648
9.4.3 Bedienerschnittstelle	654
9.4.4 Sicherheitseinrichtungen	658
9.4.5 Schaltschrankbau	662
9.4.5.1 Konstruktion und Aufbau	662
9.4.5.2 Komponenten und ihre Platzierung	663
9.4.5.3 Schaltschrankklimatisierung	668
Anhang	671
Literatur	681
Index	693