
Inhaltsverzeichnis

1	Arbeitsmethoden in der Konstruktion	1
1.1	Wirtschaftliche Bedeutung der Konstruktion und Folgerungen	2
1.2	Elemente der Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit . .	4
1.2.1	Planen	4
1.2.2	Wege zu neuen Lösungen	7
1.2.3	Auswahl der Lösung	8
1.2.4	Gestalten des gewählten Konzepts	10
1.2.5	Gestalten der Einzelteile	11
1.3	Konstruktionsarten	11
1.4	Versagensursachen – Berechnungen	12
1.4.1	Berechnungen in der Konstruktion	13
1.4.2	Entwurfsrechnung, Dimensionierung	13
1.4.3	Nachrechnung/Festigkeitsnachweis	13
1.4.4	Numerische Berechnungsverfahren	14
1.4.5	Belastungen, Beanspruchungen	14
1.4.5.1	Beanspruchungsarten	15
1.4.5.2	Ansatz der Belastung bei statisch beanspruchten Bauteilen	15
1.4.5.3	Ansatz der Belastung bei schwingend (dynamisch) beanspruchten Bauteilen	16
1.4.5.4	Pauschaler Ansatz der Beanspruchung dynamisch oder statisch belasteter Bauteile	18
1.4.5.5	Regelwerke	18
1.4.6	Definitionen	18
1.4.7	Bewertung der Rechenergebnisse	19
1.4.8	Bauteilsicherheit	19
1.5	Rechnergestütztes Konstruieren	23
1.6	Modelle	24
1.7	Versuche	25
1.8	Literatur	25
2	Gestaltung – Formgebung	27
2.1	Beanspruchungsgerechte Gestaltung	27
2.1.1	Beanspruchung, Festigkeit	27

2.1.2	Verformung	28
2.1.2.1	Lastabhängige Verformung	28
2.1.2.2	Temperaturabhängige Verformung	30
2.1.2.3	Stabilität	30
2.2	Schwingungen und Geräusche: Körperschall, Luftschall	30
2.2.1	Schwingungs- und geräuschanregende Betriebskräfte . .	32
2.2.2	Abhilfemaßnahmen – allgemein	33
2.2.3	Mindern der Körperschall-Entstehung	33
2.2.4	Mindern der Körperschall-Übertragung/Weiterleitung . .	33
2.2.5	Mindern der Schallabstrahlung	35
2.2.5.1	Abhilfe durch Mindern des Abstrahlgrads	36
2.2.5.2	Abhilfe durch Kapseln von Maschinen	36
2.3	Ergonomie	38
2.3.1	Arbeits- und Umweltsicherheit	38
2.3.2	Ergonomiegerechte Handhabung	39
2.4	Fertigung und Werkstoff	41
2.4.1	Guß-Formteile	42
2.4.1.1	Form- und Gießverfahren	42
2.4.1.2	Gießvorgang	43
2.4.2	Schmiedeformteile	48
2.4.2.1	Schmiedeverfahren	48
2.4.2.2	Gestaltungsregeln	49
2.4.3	Blechteile und Rohre	49
2.4.4	Preß- und Spritzgußteile aus Kunststoffen	51
2.4.5	Spanabhebend bearbeitete Teile	52
2.4.5.1	Arbeitsflächen	53
2.4.5.2	Bohrungen und Durchbrüche	53
2.4.5.3	Gewinde und Zentrierungen	55
2.4.5.4	Oberflächengüte und Toleranzen	55
2.5	Montagegerechte Gestaltung	56
2.6	Inspektion, Wartung, Instandhaltung (DIN 31051)	57
2.7	Recycling	58
2.7.1	Recycling-Verfahren	58
2.7.2	Gestaltung recyclinggerechter Produkte nach VDI 2243 . .	58
2.8	„Schöne“ Form, Design	61
2.9	Literatur	61
3	Praktische Festigkeitsrechnung	63
3.1	Zeichen und Einheiten	64
3.2	Belastung (Kräfte, Momente)	65
3.2.1	Krafteinleitung und Oberflächenbelastung	66
3.2.2	Prinzip von de Saint Venant	66
3.3	Beanspruchungen	67
3.3.1	Innere Kräfte und Momente	67

3.3.2	Spannungszustände im Inneren eines belasteten Bauteils (Mohrscher Spannungskreis)	68
3.3.3	Berechnung der Nennspannungen	70
3.3.3.1	Normalspannung aus Längskraft	70
3.3.3.2	Normalspannung aus Biegemoment	71
3.3.3.3	Normalspannung zwischen zwei Flächen (Flächenpressung)	74
3.3.3.4	Normalspannungen im Rohr unter Überdruck	74
3.3.3.5	Normalspannung aus schiefer Biegung (mehrachsigter Biegung)	75
3.3.3.6	Normalspannung aus Biegung in stark gekrümmten Trägern	76
3.3.3.7	Schubspannung aus Querkraft	77
3.3.3.8	Schubspannungen aus Torsion	78
3.3.3.9	Überlagerung von gleichgerichteten Spannungs- komponenten	82
3.3.3.10	Überlagerung von Normal- und Schubspannungs- komponenten	82
3.3.4	Beanspruchungsgefälle – Zeitlicher Verlauf	84
3.3.5	Örtliche Spannungen	85
3.3.5.1	Örtliche Spannungen – klassische Berechnung	85
3.3.5.2	Finite Elemente Methode (FEM) und Boundary Elemente Methode (BEM)	86
3.3.6	Eigenspannungen	89
3.3.7	Stabilität: Knick- und Beulspannungen	90
3.3.7.1	Knickspannung	90
3.3.7.2	Beulspannung	92
3.4	Festigkeitsnachweis – allgemein	92
3.4.1	Konzepte der Festigkeitsberechnung	92
3.4.2	Sicherheit und Bauteilfestigkeit	93
3.4.3	Festigkeitsgrenzen	94
3.4.4	Härtewerte	96
3.4.5	Kerbschlagzähigkeit	97
3.5	Festigkeit von Bauteilen aus metallischen Werkstoffen statischer Beanspruchung	98
3.5.1	Statische Werkstoff-Festigkeitswerte für Normabmessungen	100
3.5.2	Statische Festigkeitskennwerte für den Werkstoff im Bauteil	102
3.5.3	Statische Bauteilfestigkeit	106
3.5.3.1	Grundlagen, Einflußfaktoren	106
3.5.3.2	Berechnung von (statischer) Bauteilfestigkeit und Bauteilfließgrenze	114
3.5.4	Nachweis der statischen Festigkeit	114
3.5.4.1	Nachweis für die Einzelbeanspruchungen	115
3.5.4.2	Nachweis für die zusammengesetzte Beanspruchung	115
3.5.5	Mindestsicherheiten bei statischer Beanspruchung	117
3.6	Festigkeit von Bauteilen aus metallischen Werkstoffen bei dynamischer Beanspruchung	118
3.6.1	Dauerfestigkeit, Zeitfestigkeit – Grundlagen	119

3.6.1.1	Ermittlung der dynamischen Festigkeit (Ermüdungsfestigkeit, Schwingfestigkeit)	119
3.6.1.2	Lebensdauer- und Schadenslinien	120
3.6.1.3	Dauerfestigkeitsschaubilder	121
3.6.1.4	Rechenschritte zur Ermittlung der dynamischen Bauteil-Sicherheit	122
3.6.2	Werkstoff-Wechselstabilitätswerte für Normabmessungen	
3.6.3	Wechselstabilität-Kennwerte für den Werkstoff im Bauteil	125
3.6.4	Bauteil-Wechselstabilität	125
3.6.4.1	Grundlagen, Einflußfaktoren	126
3.6.4.2	Berechnung der Bauteil-Wechselstabilität	136
3.6.5	Bauteil-Ausschlagfestigkeit (Amplitude der Bauteil- Dauerfestigkeit)	136
3.6.6	Nachweis der Bauteil-Dauerfestigkeit	140
3.6.6.1	Nachweis für die Einzelbeanspruchungen	140
3.6.6.2	Nachweis für die zusammengesetzte Beanspruchung . . .	141
3.6.7	Mindestsicherheiten bei Ermüdungsbeanspruchung . . .	142
3.6.8	Sicherheit gegen Gewaltbruch bei dynamischer Beanspruchung	142
3.7	Tragfähigkeit von Kunststoffbauteilen	142
3.7.1	Kurzzeitige Beanspruchung	143
3.7.2	Langzeitig ruhende Beanspruchung	144
3.7.3	Schwingbeanspruchung	146
3.7.4	Hinweise	146
3.7.5	Berechnungsbeispiel	148
3.8	Betriebsfestigkeit	148
3.8.1	Beanspruchungs-Zeit-Verlauf, Kollektivbildung	149
3.8.2	Berechnung der Lebensdauer	149
3.8.3	Experimentelle Betriebsfestigkeitsbestimmung	151
3.9	Bruchmechanik	151
3.9.1	Zeichen, Einheiten und Umrechnungsbeziehungen zu Abschn. 3.9 – Festigkeit allgemein s. Abschn. 3.1	152
3.9.2	Anwendung, Möglichkeiten der Bruchmechanik	153
3.9.3	Statische Festigkeit – das K_{Ic} -Konzept	154
3.9.3.1	Der Spannungsintensitätsfaktor K_I	154
3.9.3.2	Anwendungsbereich	156
3.9.3.3	Grenzwerte, Bruchzähigkeit	156
3.9.4	Statische Festigkeit – Fließbruchmechanik (FBM)	158
3.9.4.1	Anwendungsbereich	159
3.9.4.2	Grenzwerte	159
3.9.5	Dynamische Festigkeit – das ΔK -Konzept	159
3.9.5.1	Anwendungsbereich	160
3.9.5.2	Berechnung des Rißfortschritts bei schwingender Beanspruchung – Grenzwerte	160
3.9.6	Hinweise	162
3.10	Literatur	163

4	Leichtbau	166
4.1	Zeichen und Einheiten	167
4.2	Bedingungs-Leichtbau	168
4.3	Stoff-Leichtbau	168
4.3.1	Werkstoffkenngrößen	169
4.3.2	Leichtbau mit Leichtmetallen	170
4.3.2.1	Leichtmetall-Werkstoffe	171
4.3.2.2	Vergleich von Leichtmetallen mit Stahl, Stahlguß	173
4.3.2.3	Anwendung von Leichtmetallen	175
4.3.3	Leichtbau mit Kunststoffen und Verbundstoffen	175
4.3.3.1	Unverstärkte Kunststoffe	176
4.3.3.2	Faserverstärkte Kunststoffe	176
4.3.3.3	Verbundwerkstoffe (Sandwich-Platten)	177
4.4	Form-Leichtbau	177
4.4.1	Artnutzgrad η_A	177
4.4.2	Wahl der Querschnitte	178
4.4.3	Weitere Hinweise zur Querschnittswahl	180
4.5	Allgemeine Leichtbauregeln, Hinweise für die Konstruktion	184
4.6	Beispiele	186
4.7	Literatur	186
5	Werkstoffe, Wärmebehandlung, Oberflächenbehandlung	187
5.1	Zeichen und Einheiten	187
5.2	Werkstoffauswahl	188
5.2.1	Welche Eigenschaften sind wichtig?	188
5.2.2	Überlegungen zu den Kosten (Kostenfaktoren)	189
5.2.3	Sonderverfahren, analytische Methoden	190
5.3	Eisenwerkstoffe	190
5.3.1	Wärmebehandlung	191
5.3.1.1	Glühen	192
5.3.1.2	Abschreckhärten	193
5.3.1.3	Anlassen und Vergüten	194
5.3.1.4	Zwischenstufenvergüten	194
5.3.1.5	Randschichthärten	195
5.3.1.6	Einsatzhärten	195
5.3.1.7	Nitrieren	196
5.3.2	Stahl	197
5.3.2.1	Einflußgrößen für die Stahleigenschaften	197
5.3.2.2	Baustähle	202
5.3.2.3	Vergütungsstähle	202
5.3.2.4	Stähle für das Randschicht-(Flamm-, Induktions- und Laser)härten	204
5.3.2.5	Nitrierstähle	204
5.3.2.6	Einsatzstähle	204

5.3.2.7	Automatenstähle (DIN 1651)	204
5.3.2.8	Nichtrostende Stähle	206
5.3.2.9	Federstähle	206
5.3.2.10	Sonstige Stähle	206
5.3.3	Stahlguß (GS)	212
5.3.4	Sinter-Eisenwerkstoffe	214
5.3.5	Gußeisen	216
5.3.5.1	Gußeisen mit Lamellengraphit (GJL) = Grauguß	216
5.3.5.2	Gußeisen mit Kugelgraphit (GJS) = sphärolitisches Gußeisen	217
5.3.5.3	Temperguß (GJMW, GJMB)	218
5.3.5.4	Sondergußeisen	220
5.4	Nichteisenmetalle	220
5.4.1	Aluminium und Aluminium-Legierungen	222
5.4.2	Aluminium-Sinterwerkstoffe	224
5.4.3	Magnesium-Legierungen	224
5.4.4	Titan-Legierungen	226
5.4.5	Kupfer und Kupfer-Legierungen	228
5.4.6	Sonstige Nichteisenmetalle	230
5.5	Überzüge auf Metallen	230
5.5.1	Metallische Überzüge	232
5.5.2	Nichtmetallische Überzüge	233
5.6	Kunststoffe (Polymere)	233
5.6.1	Kunststoffarten – Übersicht	234
5.6.2	Eigenschaften der Kunststoffe	234
5.6.3	Faserverbundwerkstoffe	237
5.7	Verbundwerkstoffe mit Reißstop-Effekt	238
5.8	Elastomere (Gummi, Kautschuke)	239
5.9	Keramische Werkstoffe	239
5.10	Literatur	240
6	Allgemeines über Normen, Toleranzen, Passungen und Oberflächen	244
6.1	Normen	244
6.2	Normzahlen	244
6.3	Toleranzen, Abweichungen	245
6.3.1	Maßtoleranzen	245
6.3.2	Form- und Lagetoleranzen	248
6.3.3	Allgemeintoleranzen (Freimaßtoleranzen)	248
6.3.4	Tolerierungsgrundsätze	252
6.3.4.1	Unabhängigkeitsprinzip („neuer“ Tolerierungsgrundsatz)	252
6.3.4.2	Hüllprinzip („alter“ Tolerierungsgrundsatz)	254
6.3.4.3	Maximum-Material-Prinzip	255
6.4	Passungen	256

6.4.1	System Einheitsbohrung (EB)	257
6.4.2	System Einheitswelle (EW)	257
6.5	Einfluß der Toleranzen und Passungen auf die Fertigungskosten	260
6.6	Oberflächen technischer Körper, Grobgestalt und Feingestalt	260
6.6.1	Allgemeines, Grundbegriffe	260
6.6.2	Oberflächenmaße für die Feingestalt	262
6.6.2.1	Bezugslinie	262
6.6.2.2	Kennwerte zur Beschreibung der Rauheit	262
6.6.3	Oberflächenmessung	262
6.6.4	Beispiel für die Aussagefähigkeit der Kennwerte	266
6.6.5	Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in Zeichnungen nach DIN ISO 1302 Juni 1980	266
6.7	Literatur	270
7	Schweißverbindung	271
7.1	Zeichen und Einheiten	272
7.2	Schmelzschweißverbindung	273
7.2.1	Anwendung, Eigenschaften	273
7.2.2	Werkstoffe	274
7.2.2.1	Zum Schmelzschweißen geeignete Bauteilwerkstoffe	274
7.2.2.2	Zusatzwerkstoff	276
7.2.3	Herstellung, Schweißsicherheit	276
7.2.4	Stoß- und Nahtarten	289
7.2.5	Zeichnungsangaben	289
7.3	Tragfähigkeit und Betriebsverhalten von Schmelzschweißverbindungen	292
7.3.1	Dimensionierung, Schweißnahtabmessungen	292
7.3.2	Festigkeitsnachweis	293
7.3.2.1	Beanspruchungen	293
7.3.2.2	Festigkeitswerte für Bauteile aus Stahl	294
7.3.2.3	Festigkeitsnachweis bei Einzelbeanspruchung	297
7.3.2.4	Festigkeitsnachweis bei zusammengesetzter Beanspruchung	300
7.3.2.5	Festigkeitsnachweis für Schweißnaht-Sonderfälle	301
7.3.2.6	Festigkeitsnachweis für Bauteile aus Aluminium- legierungen	302
7.3.3	Sprödbruchgefahr	303
7.3.4	Steifigkeit und Schwingungen von Schweißkonstruktionen	304
7.3.5	Gestaltung	305
7.4	Punkt- und Nahtschweißverbindung	309
7.4.1	Dimensionierung	309
7.4.2	Festigkeitsnachweis für die Punktschweißverbindung	311
7.4.3	Festigkeitsnachweis für die Rollennaht-Schweißverbindung	315
7.4.4	Gestaltung	316

7.5	Buckelschweißverbindung	316
7.6	Preß- und Abbrenn-Stumpfschweißverbindungen	317
7.7	Reibschweißverbindungen	318
7.8	Schweißverbindung für Anwendungen außerhalb des Maschinenbaus	318
7.8.1	Schweißverbindungen im Stahl- und Kranbau	318
7.8.2	Schweißverbindung im Behälter- und Kesselbau	319
7.8.3	Schweißverbindung im Flugzeugbau	319
7.9	Beispiele	319
7.10	Literatur	322
8	Löt-, Kleb- und kombinierte Verbindungen	325
8.1	Lötverbindungen	325
8.1.1	Zeichen und Einheiten	325
8.1.2	Anwendung, Eigenschaften, Funktionen	326
8.1.3	Herstellung, Lötverfahren	326
8.1.3.1	Gestalt der Lötstelle	327
8.1.3.2	Temperatur	327
8.1.3.3	Vorüberlegungen, Fertigungsablauf	328
8.1.4	Werkstoffe	328
8.1.4.1	Bauteilwerkstoffe	328
8.1.4.2	Zusatzwerkstoffe: Lote	331
8.1.4.3	Flußmittel	331
8.1.5	Ausführung und Tragfähigkeit	333
8.1.5.1	Dimensionierung	333
8.1.5.2	Festigkeitsnachweis	335
8.1.6	Gestaltung	339
8.1.7	Beispiel	340
8.2	Klebverbindung	343
8.2.1	Zeichen und Einheiten	343
8.2.2	Anwendung, Eigenschaften, Funktionen	344
8.2.3	Herstellung	345
8.2.4	Werkstoffe	346
8.2.4.1	Bauteilwerkstoff (Eigenschaften, Anforderungen)	346
8.2.4.2	Klebstoffe	347
8.2.5	Tragfähigkeit von Flächen-Klebverbindungen	348
8.2.5.1	Dimensionierung	351
8.2.5.2	Festigkeitsnachweis	352
8.2.6	Gestaltung	355
8.3	Kombinierte Fügeverfahren (Punktschweiß-, Niet-, Schraub-Klebverbindungen)	358
8.4	Literatur	358

9	Nietverbindungen sowie Durchsetzfuge- und Blechform-Verbindungen	360
9.1	Zeichen und Einheiten	360
9.2	Nietverfahren und Eigenschaften der Nietverbindung	361
9.2.1	Herstellung	361
9.2.2	Funktionen, Anwendungen und Eigenschaften	362
9.3	Elemente der Nietverbindung	363
9.3.1	Nietformen und Spezialelemente	363
9.3.2	Werkstoffe für Nietverbindungen	363
9.4	Dimensionierung	363
9.5	Besonderheiten im Flugzeugbau	368
9.6	Beanspruchungen und Festigkeitsnachweis	369
9.6.1	Belastungsannahmen und wirkliche Beanspruchungen	369
9.6.2	Festigkeitsnachweis für die vernieteten Bauteile	371
9.6.3	Festigkeitsnachweis für die Niete	373
9.6.4	Tragfähigkeitsnachweis für Blindniete	376
9.7	Spezial-Verbindungstechniken	376
9.7.1	Durchsetzfugeverbindungen	376
9.7.2	Schnappverbindungen	379
9.7.3	Blechformverbindungen	379
9.8	Beispiele	380
9.9	Literatur	384
10	Schraubenverbindungen, Gewinde	386
10.1	Zeichen und Einheiten	386
10.2	Übersicht	388
10.2.1	Funktionen und Eigenschaften von Befestigungsschrauben	388
10.2.2	Anwendungen und Bauarten von Befestigungsschrauben	388
10.2.2.1	Heftverbindungen	388
10.2.2.2	Längsbeanspruchte, nicht vorgespannte Befestigungsschrauben	389
10.2.2.3	Unter Längskraft angezogene Befestigungsschrauben	389
10.2.2.4	Längsbeanspruchte, vorgespannte Befestigungsschrauben	389
10.2.2.5	Querbeanspruchte Befestigungsschrauben	390
10.2.3	Bewegungsschrauben (Schraubgetriebe)	391
10.2.4	Gewinde	391
10.3	Befestigungsschrauben, Muttern, Zubehör (Bauarten, Auswahlkriterien, Bestelldaten)	392
10.3.1	Schrauben	392
10.3.2	Muttern	395
10.3.3	Unterlegscheiben	396
10.3.4	Schraubensicherungen	397

10.4	Gewinde	397
10.4.1	Kenngrößen von Gewinden	398
10.4.2	Gebräuchliche Gewinde	398
10.4.2.1	Befestigungsgewinde im Maschinenbau	398
10.4.2.2	Gewinde für Rohre und Armaturen	398
10.4.2.3	Bewegungsgewinde	401
10.4.3	Sondergewinde	401
10.4.4	Weg- und Kraft-Übersetzung im Gewinde, Wirkungsgrad	402
10.4.4.1	Wegübersetzung	402
10.4.4.2	Kraftübersetzung bei Flachgewinde	402
10.4.4.3	Kraftübersetzung bei Spitzgewinde	403
10.4.4.4	Selbsthemmung	404
10.4.4.5	Hemmfaktor	404
10.4.4.6	Wirkungsgrad η	405
10.5	Werkstoffe, Herstellung, Oberflächenbehandlung, Schmierung für Befestigungsschrauben	407
10.5.1	Werkstoffe	407
10.5.2	Herstellung, Genauigkeit	409
10.5.3	Oberflächenbehandlung	409
10.5.4	Schmierung, Schmierstoffe	410
10.6	Schraubenverbindungen für Befestigungsschrauben . . .	410
10.6.1	Montage der Schraubenverbindungen	410
10.6.1.1	Montage durch Anziehen	412
10.6.1.2	Montage durch Anspannen	413
10.6.2	Kräfte und Verformungen – Verspannungsschaubild . . .	414
10.6.2.1	Vorspannungszustand nach dem Montieren	414
10.6.2.2	Elastische Nachgiebigkeiten	415
10.6.2.3	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand	418
10.6.2.4	Nachgiebigkeit bei exzentrischer Verspannung und exzentrischer Krafteinleitung	425
10.7	Tragfähigkeit von Befestigungsschrauben	425
10.7.1	Gefahrenquellen – Abhilfemaßnahmen	425
10.7.2	Tragfähigkeitsberechnung – Vorgehensweise	427
10.7.3	Beanspruchung und Festigkeit der Schraube	427
10.7.4	Sicherheiten gegen Festigkeit der Schraube	430
10.7.5	Dimensionierung und Festigkeitsnachweis	431
10.7.5.1	Durch Anziehen vorgespannte, statisch oder dynamisch belastete Schraubenverbindung	431
10.7.5.2	Durch Anspannen vorgespannte, statisch oder dynamisch belastete Schraube	436
10.7.5.3	Längsbelastete Schraubenverbindung ohne Vorspannung	437
10.7.5.4	Schrauben die unter Längskraft angezogen werden	438
10.8	Querbelastete Schraubenverbindungen	438
10.8.1	Kraftübertragung durch Reibschluß, Durchsteckschrauben	439
10.8.1.1	Durch Anziehen vorgespannte, querbelastete Schrauben	440
10.8.1.2	Durch Anspannen vorgespannte, querbelastete Schrauben	440
10.8.1.3	Gestaltung und Herstellung der Reibschlußverbindung . .	441
10.8.2	Kraftübertragung durch Formschluß: Paßschrauben, Scherbüchsen	442

10.8.2.1	Berechnung	442
10.8.2.2	Gestaltung und Herstellung der Paßschraubenverbindung	443
10.8.3	Kraftübertragung durch Kraft- und Reibschluß	444
10.9	Gestaltung von Befestigungs-Schraubenverbindungen	444
10.10	Sichern von Befestigungs-Schraubenverbindungen	448
10.10.1	Lockern	449
10.10.2	Losdrehen	449
10.10.3	Verliersicherungen	451
10.11	Bewegungsschrauben	451
10.11.1	Bauformen, Gewinde	452
10.11.2	Kraft- und Wegübersetzung, Wirkungsgrad, Selbsthemmung – Hemmfaktor, Bremsfaktor	453
10.11.3	Werkstoffe, Herstellung	454
10.11.4	Schmierung, Schmierstoffe	455
10.11.5	Dimensionierung und Festigkeitsnachweis	455
10.12	Beispiele	456
10.13	Literatur	459
11	Stift- und Bolzenverbindungen	464
11.1	Zeichen und Einheiten	464
11.2	Stiftverbindungen	464
11.2.1	Ausführung, Anwendung	466
11.3	Bolzenverbindungen	469
11.4	Dimensionierung und Festigkeitsnachweis für Stift- und Bolzenverbindungen	471
11.4.1	Dimensionierung	471
11.4.2	Festigkeitsnachweis	471
11.5	Berechnungsbeispiele	475
11.6	Literatur	476
12	Elastische Federn	478
12.1	Zeichen und Einheiten	481
12.2	Kennwerte	483
12.2.1	Federkennlinien	483
12.2.2	Federrate	484
12.2.3	Dämpfung	484
12.2.4	Federungsarbeit	485
12.2.5	Parallel- und Reihenschaltung	485
12.2.6	Nutzgrade	486
12.3	Allgemeines (Normen, Werkstoff, Sicherheit/zulässige Beanspruchung)	488

12.3.1	DIN-Normen	488
12.3.2	Werkstoffe	488
12.3.3	Tragfähigkeit, zulässige Beanspruchung bzw. Sicherheit – allgemein	491
12.3.3.1	Berechnung bei statischer und quasistatischer Belastung	492
12.3.3.2	Berechnung bei dynamischer Beanspruchung	492
12.4	Auswahl, Dimensionierung, Gestaltung und Tragfähigkeit von Metallfedern	492
12.4.1	Zug- und druckbeanspruchte Federn	492
12.4.1.1	Zugstäbe, Druckstäbe, Drahtzugfeder	492
12.4.1.2	Ringfeder	493
12.4.2	Biegebeanspruchte Federn	495
12.4.2.1	Gerade Biegefedern	495
12.4.2.2	Gekrümmte Biegefedern	499
12.4.2.3	Gewundene Biegefedern	500
12.4.2.4	Tellerfedern	503
12.4.2.5	Sonstige biegebeanspruchte Federn	509
12.4.3	Torsionsbeanspruchte Federn	510
12.4.3.1	Drehstabfedern	510
12.4.3.2	Zylindrische Schraubenfedern	511
12.4.3.3	Sonstige Schraubenfedern	523
12.5	Gummifedern	524
12.5.1	Gummi als Federwerkstoff	524
12.5.2	Berechnung und Gestaltung	525
12.5.3	Besonderheiten von schubbeanspruchten Gummifedern	531
12.6	Gasfedern	531
12.7	Flüssigkeitsfedern	532
12.8	Berechnungsbeispiele	533
12.9	Literatur	535
13	Wälzpaarungen	538
13.1	Zeichen und Einheiten	538
13.2	Anwendung, Funktionen, Wirkprinzipien	539
13.3	Beanspruchung nach Hertz	541
13.3.1	Oberflächenbeanspruchung nach Hertz	543
13.3.2	Spannungen unter der Oberfläche nach Hertz	543
13.3.3	Beanspruchung des technischen Wälzkontakts	547
13.3.4	Der geschmierte Wälzkontakt nach der Theorie der Elastohydrodynamik (EHD)	550
13.4	Praktische Berechnung der Tragfähigkeit	554
13.4.1	Zulässige statische Belastung	554
13.4.2	Zulässige dynamische Belastung	554
13.4.2.1	Grübchentragfähigkeit	556
13.4.2.2	Graufleckentragfähigkeit	562

13.5	Sonstige Oberflächenschäden	562
13.5.1	Freßtragfähigkeit	562
13.5.2	Verschleißtragfähigkeit	562
13.6	Rollreibung	563
13.7	Berechnungsbeispiele	564
13.8	Literatur	565
14	Wälzlager	569
14.0	Führungen – Lager	569
14.0.1	Lager	569
14.0.1.1	Bauarten	569
14.0.1.2	Anforderungen	569
14.0.1.3	Auswahl der Lagerbauart: Wälzlager oder Gleitlager . . .	570
14.0.1.4	Lageranordnung	570
14.0.2	Geradfürungen	572
14.0.2.1	Anforderungsliste – Auswahl der Bauart	573
14.0.2.2	Anwendungen	575
14.1	Zeichen und Einheiten	575
14.2	Aufbau der Wälzlager, Wirkprinzip	576
14.2.1	Wälzkörper und Wälzbahnen	578
14.2.2	Käfige	578
14.2.3	Führung der Wälzkörper und Käfige	580
14.2.4	Grundbegriffe (Schmiegung, Druckwinkel, Lagerluft, Betriebsspiel, Steifigkeit)	580
14.3	Herstellung, Schmierung, Abdichtung	584
14.3.1	Werkstoffe, Wärmebehandlung	584
14.3.2	Genuigkeit, Toleranzen	586
14.3.3	Schmierung	586
14.4	Bauarten	590
14.4.1	Eigenschaften und Auswahl der Normal-Bauformen . . .	590
14.4.2	Sonderbauarten	594
14.4.3	Maße und Bezeichnungen	596
14.5	Tragfähigkeit, Dimensionierung	596
14.5.1	Übersicht: Tragfähigkeitsgrenzen, Berechnungsmethoden	596
14.5.2	Statische Tragfähigkeit	598
14.5.3	Einflußgrößen für die dynamische Tragfähigkeit	601
14.5.3.1	Grundlagen	601
14.5.3.2	Konstante Lagerbelastung und -drehzahl	602
14.5.3.3	Veränderliche Lagerbelastung und -drehzahl	606
14.5.3.4	Tragfähigkeit bei besonderen Betriebszuständen	609
14.5.4	Berechnung der dynamischen Tragfähigkeit	609
14.5.4.1	Nominelle Lebensdauer (nominal rating life) nach DIN ISO 281	610
14.5.4.2	Angepaßte nominelle Lebensdauer (adjusted rating life) nach DIN ISO 281	611

14.5.4.3	Modifizierte Lebensdauer (modified rating life) nach dem Prinzip DIN ISO 281	613
14.5.5	Grenzdrehzahlen	616
14.6	Einbau, Gestaltung	617
14.6.1	Wahl der Passung	617
14.6.2	Lageranordnung	620
14.7	Reibung, Temperatur	623
14.7.1	Reibungsverluste	623
14.7.2	Lagertemperatur	625
14.8	Kosten, Liefermöglichkeit	625
14.9	Beispiele	627
14.10	Literatur	630
 15	 Gleitlager	 631
15.1	Zeichen und Einheiten	632
15.2	Grundlagen hydrodynamischer und hydrostatischer Schmierung	635
15.2.1	Druckströmung (Hagen-Poiseuille-Strömung)	635
15.2.2	Schleppströmung (Couette-Strömung)	637
15.2.3	Überlagerung aus Druck- und Schleppströmung	638
15.3	Hydrodynamische Radiallager (stationär belastete, kreiszyindrische Radiallager)	638
15.3.1	Tragfähigkeit und Reibungszahl: Sommerfeldzahl	639
15.3.2	Einflußgrößen für Sommerfeldzahl und Reibungskennzahl	641
15.3.3	Kennwerte für den Betriebszustand	646
15.3.4	Erwärmung und Schmierstoffbedarf	647
15.3.5	Schwingungen, Stabilität	650
15.3.6	Gestaltung der hydrodynamischen Radialgleitlager	652
15.4	Sonstige hydrodynamische Radiallager	653
15.4.1	Gleitlager bei instationärem Betrieb	653
15.4.2	Gleitlager mit nichtzyindrischem Schmierpalt	655
15.4.3	Fettgeschmierte Gleitlager	656
15.4.4	Schwimmbuchsenlager	657
15.4.5	Folienlager	657
15.5	Hydrodynamische Axiallager	658
15.5.1	Tragfähigkeit und Reibungszahl: Sommerfeldzahl bei kippbeweglichen Gleitschuhen	658
15.5.2	Übergangsdrehzahl	660
15.5.3	Reibungskennzahl	660
15.5.4	Reibleistung	660
15.5.5	Abmessungen und Anzahl der Segmente	660
15.5.6	Wärmebilanz	661
15.5.7	Schmierstoffdurchsatz	661
15.5.8	Bauarten und Gestaltung der hydrodynamischen Axiallager	662

15.6	Hydrostatische Lager	664
15.6.1	Hydrostatische Radiallager	665
15.6.1.1	Funktion, Gestaltung	665
15.6.1.2	Dimensionierung, Tragfähigkeit	666
15.6.2	Hydrostatische Axiallager (Spurlager)	671
15.6.2.1	Bauarten und Gestaltung der hydrostatischen Axiallager	671
15.6.2.2	Tragfähigkeit des Einflächenlagers (Tellerlager)	623
15.6.2.3	Tragfähigkeit anderer Axiallager-Bauarten	675
15.7	Werkstoffe und Herstellung der Gleitlager	675
15.7.1	Wellenwerkstoff	676
15.7.2	Lagerwerkstoff	677
15.8	Schmierstoff und Schmierstoffversorgung	680
15.8.1	Schmierölarnten	681
15.8.2	Schmieröl-Kenngrößen	681
15.8.3	Schmierfett	682
15.8.4	Schmierstoffversorgung	682
15.9	Sonstige Gleitlager	685
15.9.1	Poröse Sintermetall-Lager	685
15.9.2	Kunststofflager und Verbundlager mit Kunststoff- Laufschicht	686
15.9.2.1	Kunststoffe für kompakte Lager	687
15.9.2.2	Kunststoffe mit Zusatzstoffen	688
15.9.2.3	Tragfähigkeit von Kunststofflagern	688
15.9.2.4	Gleitpaarung Welle-Lager	690
15.9.2.5	Schmierung	691
15.9.2.6	Verbundlager mit Kunststoff-Laufschicht	691
15.9.2.7	Duroplastische Kunststoffe	693
15.9.2.8	Weichgummi	694
15.9.3	Luftlager – aerostatische Lager	694
15.9.4	Magnetlager	695
15.9.4.1	Magnet-Luftspaltlager	695
15.9.4.2	Magnet-Flüssigkeitslager	696
15.9.5	Kunstkohle-Lager	696
15.9.6	Wartungsfreie Lager mit Festschmierstoffen	696
15.10	Beispiele	697
15.11	Literatur	700
16	Schmierung, Schmierstoffe, Reibung, Verschleiß, Korrosion	703
16.1	Zeichen und Einheiten	705
16.2	Reibung, Reibungszahl	706
16.3	Wirkmechanismus der Schmierung	707
16.3.1	Hydrodynamische und elastohydrodynamische (EHD) Schmierung	707
16.3.2	Mischschmierung	708
16.3.3	Festkörperschmierung	709

16.3.4	Grenzschmierung	709
16.3.5	Hydrostatische Schmierung	710
16.4	Schmierstoffarten	710
16.5	Schmieröle	710
16.5.1	Klassifikation der Schmieröle	710
16.5.2	Eigenschaften der Schmieröle	712
16.5.2.1	Viskosität	712
16.5.2.2	Sonstige Stoffeigenschaften der Schmierstoffe	716
16.5.3	Mineralöle	718
16.5.4	Synthetische Öle	718
16.5.5	Biologisch leicht abbaubare Schmieröle	720
16.5.6	Additive	721
16.6	Schmierfette	723
16.7	Festschmierstoffe	726
16.8	Haftschmierstoffe	727
16.9	Metallische und nichtmetallische Überzüge	727
16.10	Gasschmierung	727
16.11	Schmierstoffwahl	727
16.11.1	Schmierstoffe für Maschinenelemente	728
16.11.2	Schmierstoffwahl – allgemeine Grundsätze	728
16.12	Sonstiges	729
16.12.1	Schmierungsarten	729
16.12.2	Einlaufverfahren	730
16.12.3	Entsorgung	730
16.13	Verschleiß	730
16.14	Korrosion	732
16.14.1	Gleichwertig abtragende – chemische – Korrosion	732
16.14.2	Örtlich angreifende Korrosion	733
16.14.3	Allgemeine Abhilfemaßnahmen	734
16.15	Literatur	735
17	Achsen und Wellen	738
17.1	Zeichen und Einheiten	739
17.2	Vorgehensweise bei Entwurf und Konstruktion	739
17.3	Belastung (Kräfte, Momente)	740
17.4	Werkstoffe	740
17.5	Herstellung	741
17.6	Entwurfsrechnung, Dimensionierung	741
17.7	Gestaltung	744
17.7.1	Gestaltung von Achsen und Wellen allgemein	744

17.7.2	Gestaltung von Wellen und umlaufenden Achsen	745
17.7.3	Gestaltung von stillstehenden Achsen	746
17.8	Festigkeitsnachweis	747
17.8.1	Vorbemerkungen	747
17.8.2	Nachweis der statischen und dynamischen Festigkeit (hier Dauerfestigkeit) für Wellen	748
17.9	Nachweis der elastischen Verformung	768
17.9.1	Durchbiegung und Neigung	769
17.9.2	Torsion	773
17.10	Schwingungsverhalten	773
17.10.1	Biegeschwingungen	774
17.10.2	Drehschwingungen	775
17.10.3	Auswuchten	776
17.11	Sonderbauarten	776
17.12	Literatur	777
18	Welle-Nabe-Verbindungen	778
18.1	Zeichen und Einheiten	780
18.2	Reibschluß-Verbindungen	782
18.2.1	Übertragbare Kräfte und Drehmomente	782
18.2.2	Haftbeiwerte, Rutschsicherheit	784
18.2.3	Zylindrischer Preßverband – allgemeines	786
18.2.3.1	Erzeugung des Preßverbands – Definitionen	786
18.2.3.2	Anforderungen an den Preßverband	787
18.2.3.3	Elastischer und elastisch-plastischer Preßverband	787
18.2.3.4	Übermaß des elastischen Preßverbands	788
18.2.3.5	Berechnung des elastischen Preßverbands – allgemeine Beziehungen, Nachweis	796
18.2.3.6	Berechnung des elastischen Preßverbands – Zustand nach dem Fügen, in Ruhe, bei Raumtemperatur	798
18.2.3.7	Berechnung des elastischen Preßverbands – Zustand bei kleiner Umfangsgeschwindigkeit sowie unterschiedlicher Wärmedehnung von Welle und Nabe	798
18.2.3.8	Berechnung des elastischen Preßverbands – Zustand bei Temperatur- und Fliehkrafteinfluß	799
18.2.3.9	Auswirkungen von Gestalt und Betriebsweise auf die Beanspruchung	799
18.2.3.10	Abhilfemaßnahmen bei nicht ausreichender Festigkeit	801
18.2.3.11	Gestaltung	801
18.2.3.12	Fügen und Lösen von zylindrischen Preßverbänden	802
18.2.4	Kegeliger Preßverband	806
18.2.4.1	Mechanisch verspannter kegeliger Preßverband	806
18.2.4.2	Hydraulisch verspannter kegeliger Preßverband	809
18.2.4.3	Kegeliger Preßverband mit Lagesicherung	809
18.2.5	Spannelement-Verbindungen	810
18.2.5.1	Kegelspannring-Verbindung (Ringspann)	810

18.2.5.2	Kegel-Spannsatz-Verbindung	813
18.2.5.3	Ringspann-Sternscheiben-Verbindung	813
18.2.5.4	Druckhülsen-Verbindung	813
18.2.5.5	Toleranzring-Verbindung	814
18.2.5.6	Hydraulische Hohlmantel-Spannbuchse	814
18.2.5.7	Spannscheiben-Verbindung	814
18.3	Formschlußverbindungen – allgemein	814
18.3.1	Zentrierung – allgemein	815
18.3.2	Betriebszustände (Beanspruchung durch Drehmoment und Querkraft) – allgemein	818
18.3.3	Tragfähigkeitsberechnung – allgemein	820
18.3.4	Unmittelbare Formschlußverbindungen	823
18.3.4.1	Zahnwellen-Verbindungen	823
18.3.4.2	Keilwellen-Verbindungen	826
18.3.4.3	Kerbzahn – Verbindungen	829
18.3.4.4	Polygon-Verbindung	830
18.3.5	Mittelbare Formschluß-Verbindungen	834
18.3.5.1	Paßfeder-Verbindung	834
18.3.5.2	Scheibenfederverbindung	837
18.4	Vorgespannte Formschluß-Verbindungen	838
18.4.1	Längskeil-Verbindung	838
18.4.2	Sonstige Keilverbindungen	840
18.5	Geklebte Welle-Nabe-Verbindung	841
18.5.1	Geklebte Schiebesitz-Verbindung	841
18.5.1.1	Klebstoffe	842
18.5.1.2	Herstellung	842
18.5.1.3	Tragfähigkeit, Dimensionierung, Festigkeitsnachweis	843
18.5.1.4	Gestaltung	847
18.5.2	Schrumpfkleb-Welle-Nabe-Verbindung	848
18.5.2.1	Klebstoffe	848
18.5.2.2	Herstellung	848
18.5.2.3	Tragfähigkeit, Dimensionierung, Festigkeitsnachweis der Schrumpfklebverbindung	849
18.5.2.4	Gestaltung	851
18.6	Kostenvergleich	852
18.7	Beispiele	852
18.8	Literatur	861
19	Dichtverbindungen	865
19.1	Zeichen und Einheiten	865
19.2	Anforderungen/Funktionen	866
19.3	Lösungsmöglichkeiten von Dichtungsproblemen unterschiedlicher Schwierigkeit	868
19.4	Statische Dichtverbindungen	869
19.4.1	Stoffschlüssige statische Dichtungen	869
19.4.2	Kraftschlüssige statische Dichtungen	871

19.4.2.1	Flachdichtungen	872
19.4.2.2	Profildichtungen	873
19.4.3	Membranen	875
19.4.4	Faltenbälge	875
19.4.5	Berechnung der Anpreßkraft von Flanschdichtungen nach DIN 2505	876
19.5	Dynamische Dichtverbindungen	878
19.5.1	Dynamische Berührungsdichtungen für Längsbewegungen	878
19.5.1.1	Elastomerdichtungen	878
19.5.1.2	Stopfbuchsen für Längs- und Drehbewegungen	880
19.5.1.3	Manschettendichtungen und Lippenringe	881
19.5.2	Dynamische Berührungsdichtungen für Drehbewegungen – Wellendichtungen	882
19.5.2.1	Radial-Wellendichtringe – drucklos	882
19.5.2.2	Radial-Wellendichtringe für Abdichtung gegen Druck . .	885
19.5.2.3	Filzringdichtung	886
19.5.2.4	Axial-Gleitringdichtung	887
19.5.2.5	V-Ring (Wellendichtung ohne Druck)	889
19.5.2.6	Elastomer-Profildichtungen: O-Ringe	889
19.5.3	Berührungsfreie dynamische Dichtungen	890
19.5.3.1	Spaltdichtungen	890
19.5.3.2	Labyrinthdichtungen	892
19.5.3.3	Gewinde-Wellendichtungen	893
19.5.4	Magnetflüssigkeits-Dichtungen	894
19.5.5	Hermetische Dichtungen	894
19.6	Literatur	895
 Sachverzeichnis		 897