



**ing**  
maschinenbau

Berthold Schlecht

# Maschinenelemente 2

Getriebe – Verzahnungen – Lagerungen

Zahnrad-Software

DriveConcepts  
und KISSsoft

Exclusive Versionen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	13
Handhabung des Buches .....	13
CWS .....	16
Danksagung .....	16
<b>Kapitel 14 Gleitlager und Gleitlagerungen</b>	19
14.1 Einleitung .....	21
14.2 Funktion und Wirkung von Gleitlagern .....	26
14.2.1 Reibungszustände, Stribeck-Kurve und mittlere Lagerbelastung .....	27
14.2.2 Grundlagen der hydrodynamischen Schmierung .....	31
14.2.3 Grundlagen der hydrostatischen Schmierung .....	34
14.2.4 Arten und Bauformen von Gleitlagern .....	36
14.2.5 Werkstoffe und Eigenschaften .....	51
14.2.6 Reibung, Temperatur und Schmierung .....	53
14.3 Gestaltung von Gleitlagerungen .....	56
14.3.1 Bauarten und Einbaubedingungen für Gleitlager .....	56
14.3.2 Steifigkeit und Dämpfung von Gleitlagerungen .....	67
14.4 Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Gleitlagern .....	70
14.4.1 Tragfähigkeit von Radial-Kreiszylinderlagern bei hydrodynamischer Schmierung .....	73
14.4.2 Tragfähigkeit von Axial-Kippsegmentlagern bei hydrodynamischer Schmierung .....	91
14.4.3 Tragfähigkeit von Radial-Gleitlagern bei hydrostatischer Schmierung .....	99
14.4.4 Tragfähigkeit bei Fettschmierung .....	109
14.5 Gleitlagerschäden und deren Diagnose .....	111
Literatur .....	114
<b>Kapitel 15 Wälzlager und Wälzlagerungen</b>	123
15.1 Einleitung .....	125
15.2 Funktion und Wirkung von Wälzlagern .....	126
15.2.1 Druckwinkel und Lastwinkel .....	128
15.2.2 Arten und Bauformen .....	130
15.2.3 Pressung, Schmiegung und Wälzkörperführung .....	138
15.2.4 Lagerluft, Spiel und Kippwinkel .....	140
15.2.5 Überrollen, Schwenkbewegungen und Abwälzen .....	143
15.2.6 Elastische Verformung und Federung .....	148
15.2.7 Werkstoffe und Eigenschaften .....	153
15.2.8 Reibung, Temperatur und Schmierung .....	155

15.3	Gestaltung von Wälzlagerungen. . . . .	165
15.3.1	Anordnung und Kombination von Lagern. . . . .	166
15.3.2	Bezeichnungen, Toleranzen und Passungswahl . . . . .	171
15.3.3	Lagerumbauteile und Gehäusekörper . . . . .	175
15.3.4	Ein- und Ausbau von Wälzlagern. . . . .	177
15.4	Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Wälzlagern. . . . .	181
15.4.1	Statische Tragfähigkeit und äquivalente statische Lagerbelastung . . . . .	185
15.4.2	Dynamische Tragfähigkeit und nominelle Lebensdauer nach DIN ISO 281 . . . . .	189
15.4.3	Äquivalente dynamische Lagerbelastung $P$ , maximale Axiallast $F_{a,max}$ und minimale Axiallast $F_{a,min}$ . . . . .	198
15.4.4	Angepasste nominelle Lebensdauer nach DIN ISO 281 . . . . .	210
15.4.5	Modifizierte Referenz-Lebensdauer nach DIN ISO 281 – Beiblatt 4 . . . . .	216
15.4.6	Zulässige Drehzahlen . . . . .	230
15.5	Wälzlagerschäden und deren Diagnose . . . . .	233
	Literatur. . . . .	245
 <b>Kapitel 16 Dichtungen und Dichtverbindungen</b>		251
16.1	Einleitung – Funktion und Wirkung . . . . .	253
16.1.1	Grundsätzliches Vorgehen bei der Dichtungsauswahl . . . . .	254
16.1.2	Anmerkungen zur Berechnung von Dichtverbindungen. . . . .	256
16.2	Statische Dichtverbindungen. . . . .	256
16.2.1	Stoffschlüssige Dichtverbindungen . . . . .	257
16.2.2	Kraftschlüssige Dichtverbindungen . . . . .	258
16.2.3	Membrandichtungen. . . . .	263
16.2.4	Balgdichtungen . . . . .	264
16.3	Dynamische Dichtverbindungen . . . . .	264
16.3.1	Berührende Dichtverbindungen . . . . .	265
16.3.2	Berührungsfreie Dichtverbindungen . . . . .	280
16.3.3	Gestaltung dynamischer Dichtverbindungen und Werkstoffe . . . . .	285
	Literatur. . . . .	292
 <b>Kapitel 17 Antriebssysteme und Getriebe</b>		295
17.1	Einleitung . . . . .	297
17.2	Funktion und Wirkung von Antrieben . . . . .	300
17.2.1	Antriebsmomente und Verlauf von Lastmomenten. . . . .	301
17.2.2	Stationäre Kennlinien von Antriebs- und Arbeitsmaschinen. . . . .	303
17.2.3	Stabilität von Antrieben und Änderungen des Arbeitspunktes . . . . .	308
17.2.4	Modellbildung von Antriebssystemen. . . . .	313
17.3	Funktion und Wirkung von Getrieben. . . . .	322
17.3.1	Einteilung und Anwendungsbereiche von Getrieben . . . . .	324
17.3.2	Übersetzung, Drehmomentverhältnis und Wirkungsgrad. . . . .	326
17.4	Mechanisch gleichförmig übersetzende Getriebe . . . . .	331

17.5	Mechanisch ungleichförmig übersetzende Getriebe . . . . .	332
17.6	Hydrostatische und hydrodynamische Getriebe. . . . .	334
17.7	Rad-Schiene-System als spezielles reibschlüssiges Getriebe. . . . .	339
	Literatur . . . . .	349
<b>Kapitel 18 Stirnradverzahnung und Stirnradgetriebe</b>		<b>353</b>
18.1	Einleitung . . . . .	355
18.2	Funktion und Wirkung . . . . .	358
18.2.1	Allgemeines Verzahnungsgesetz für Stirnradverzahnungen . . . . .	363
18.2.2	Geometrie der Stirnradverzahnung . . . . .	369
18.2.3	Evolventenverzahnung – Geradverzahnung . . . . .	380
18.2.4	Evolventenverzahnung – Schrägverzahnung . . . . .	402
18.2.5	Gleitgeschwindigkeit und spezifisches Gleiten . . . . .	410
18.2.6	Evolventenverzahnung – Sonderverzahnungen . . . . .	415
18.2.7	Eingriffstörungen bei Außenverzahnungen . . . . .	418
18.2.8	Zusammenstellung geometrischer Grundgrößen der Gerad- und Schrägverzahnung . . . . .	425
18.2.9	Fertigung – Zahnradformgebung, Werkstoffe und Wärmebehandlung . . . . .	428
18.2.10	Verlustleistung, Wirkungsgrad, Erwärmung und Schmierung von Stirnradgetrieben . . . . .	469
18.3	Gestaltung von Stirnrädern und Stirnradgetrieben . . . . .	495
18.3.1	Verzahnungsqualität, Verzahnungsabweichungen und Toleranzen. . . . .	496
18.3.2	Zeichnungsangaben . . . . .	520
18.3.3	Dimensionierung von Stirnradgetrieben . . . . .	526
18.3.4	Gestaltungsgrundlagen Getriebebauformen, Räder, Wellen und Lagerungen . . . . .	552
18.3.5	Gestaltungsgrundlagen Getriebegehäuse und Deckel . . . . .	574
18.4	Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Stirnrädern . . . . .	579
18.4.1	Schadensbilder . . . . .	583
18.4.2	Kräfte, Momente und Lastkollektive . . . . .	593
18.4.3	Lastverteilung . . . . .	626
18.4.4	Nachweis der Grübchentragfähigkeit. . . . .	662
18.4.5	Nachweis der Zahnfußtragfähigkeit. . . . .	674
18.4.6	Nachweis der Fresstragfähigkeit . . . . .	693
18.4.7	Nachweis der Graufleckentragfähigkeit. . . . .	705
18.4.8	Nachweis der Verschleißtragfähigkeit. . . . .	707
18.4.9	Nachweis der Sicherheit gegen Maximalbelastung. . . . .	711
18.4.10	Festigkeitskennwerte . . . . .	714
18.5	Schwingungen und Geräusche von Zahnradgetrieben. . . . .	724
18.5.1	Geräusche . . . . .	730
18.5.2	Resonanzschwingungen im Betrieb. . . . .	737
	Literatur . . . . .	746

<b>Kapitel 19</b>	<b>Umlaufrädergetriebe</b>	765
19.1	Einleitung . . . . .	767
19.2	Funktion und Wirkung . . . . .	773
19.2.1	Standübersetzung und Standwirkungsgrad . . . . .	780
19.2.2	Symbolische Darstellung der Umlaufgetriebe nach Wolf . . . . .	784
19.2.3	Drehzahlen und Umlaufübersetzungen . . . . .	787
19.2.4	Drehmomente – Summenwelle und Differenzwellen . . . . .	797
19.2.5	Leistungen und Leistungsflüsse . . . . .	801
19.2.6	Wirkungsgrade und Selbsthemmung . . . . .	815
19.2.7	Gekoppelte Umlaufrädergetriebe . . . . .	824
19.3	Gestaltung von Umlaufrädergetrieben . . . . .	829
19.3.1	Beispiele ausgeführter Umlaufrädergetriebe . . . . .	829
19.3.2	Dimensionierung von Umlaufrädergetrieben . . . . .	837
19.3.3	Eingriffsstörungen bei Innenverzahnungen (Innengetrieben) . . . . .	849
19.3.4	Gestaltungsgrundlagen und Lastausgleich . . . . .	867
19.3.5	Getriebeschmierung und Wärmeabfuhr . . . . .	883
19.4	Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Umlaufrädergetrieben . . . . .	884
19.4.1	Kräfte, Momente und Lastverteilung . . . . .	886
19.4.2	Sicherheit gegen Dauerbruch . . . . .	893
19.4.3	Sicherheit gegen Schäden infolge Anriss, bleibender Verformung und Gewaltbruch . . . . .	895
19.4.4	Spannungskonzentrationsfaktoren . . . . .	896
19.4.5	Spannungsanteile und ihre Überlagerung . . . . .	902
19.4.6	Beanspruchbarkeit – Zahnfußfestigkeit abhängig von der Mittelspannung . . . . .	905
19.4.7	Rechnergestützte Bestimmung der Lastverteilung in Umlaufrädergetrieben . . . . .	907
19.4.8	Weitere Gesichtspunkte zu Auslegung, Berechnung und Betrieb von Umlaufrädergetrieben . . . . .	912
	Literatur . . . . .	914
<b>Kapitel 20</b>	<b>Kegelradverzahnung und Kegelradgetriebe</b>	929
20.1	Einleitung . . . . .	931
20.2	Funktion und Wirkung . . . . .	933
20.2.1	Bauarten von Kegelrädern . . . . .	935
20.2.2	Geometrie der Kegelradverzahnung . . . . .	939
20.2.3	Virtuelle Ersatz-Stirnräder (Näherung nach Tredgold) . . . . .	948
20.2.4	Bezugsprofil, Planrad und Profilverchiebung . . . . .	951
20.2.5	Geometrie der Hypoidverzahnung und zugehöriger Ersatz-Verzahnungen . . . . .	954
20.2.6	Geschwindigkeiten und spezifisches Gleiten . . . . .	959
20.2.7	Fertigung – Zahnradformgebung, Werkstoffe und Wärmebehandlung . . . . .	962
20.2.8	Verlustleistung, Wirkungsgrad, Erwärmung und Schmierung . . . . .	965

20.3	Gestaltung von Kegelrädern und Kegelradgetrieben . . . . .	968
20.3.1	Verzahnungsabweichungen, Toleranzen, Einstellbarkeit und Zeichnungsangaben . . . . .	968
20.3.2	Zahndicke und Flankenspiel . . . . .	976
20.3.3	Gestaltungsgrundlagen – Gehäuse und Räder. . . . .	977
20.3.4	Entwurf und Vorabauslegung von Kegelrad- und Hypoidtriebbestufen . . . . .	980
20.4	Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Kegelrädern. . . . .	983
20.4.1	Schadensbilder . . . . .	983
20.4.2	Kräfte, Momente, Lastkollektive und Lastverteilungsfaktoren . . . . .	984
20.4.3	Genauere Beanspruchungsanalyse und Lastverteilung . . . . .	989
20.4.4	Nachweis der Grübchentragfähigkeit. . . . .	995
20.4.5	Nachweis der Zahnfußtragfähigkeit. . . . .	999
20.4.6	Nachweis der Fresstragfähigkeit . . . . .	1005
20.4.7	Nachweis der Sicherheit gegen Maximalbelastung. . . . .	1014
20.4.8	Weitere Gesichtspunkte zu Auslegung, Berechnung und Betrieb von Kegelrädern . . . . .	1014
	Literatur . . . . .	1017
<b>Kapitel 21 Schneckenverzahnung und Schneckengetriebe</b>		<b>1023</b>
21.1	Einleitung . . . . .	1025
21.2	Funktion und Wirkung . . . . .	1026
21.2.1	Bauarten von Schnecken und Schneckenrädern. . . . .	1027
21.2.2	Geometrie der Schnecken und Schneckenräder . . . . .	1029
21.2.3	Werkstoffe und Fertigung . . . . .	1035
21.2.4	Geschwindigkeiten und spezifisches Gleiten . . . . .	1037
21.2.5	Verlustleistung, Wirkungsgrad, Erwärmung und Schmierung . . . . .	1037
21.3	Gestaltung von Schnecken und Schneckengetrieben. . . . .	1040
21.3.1	Verzahnungsabweichungen, Toleranzen und Zeichnungsangaben . . . . .	1041
21.3.2	Tragbildprüfung, Flankenspiel . . . . .	1042
21.3.3	Gestaltungsgrundlagen – Schnecken, Räder und Gehäuse. . . . .	1044
21.3.4	Entwurf und Vorauslegung von Schneckengetrieben. . . . .	1046
21.4	Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Schnecken und Schneckenrädern . . . . .	1049
21.4.1	Kräfte und Momente. . . . .	1049
21.4.2	Nachweis der Grübchentragfähigkeit. . . . .	1052
21.4.3	Nachweis der Verschleißtragfähigkeit. . . . .	1054
21.4.4	Nachweis der Einhaltung der zulässigen Durchbiegung . . . . .	1059
21.4.5	Nachweis der Zahnfußtragfähigkeit . . . . .	1060
21.4.6	Nachweis der Temperatursicherheit . . . . .	1063
21.4.7	Weitere Gesichtspunkte zu Auslegung, Berechnung und Betrieb von Schneckenverzahnungen . . . . .	1066
	Literatur . . . . .	1068

<b>Kapitel 22</b>	<b>Hüllgetriebe – Riemen- und Kettengetriebe</b>	1073
22.1	Einleitung – Funktion und Wirkung . . . . .	1075
22.2	Riemengetriebe . . . . .	1080
22.2.1	Riemenbauarten und ihre Werkstoffe . . . . .	1083
22.2.2	Riemenscheibenbauarten und ihre Werkstoffe . . . . .	1090
22.2.3	Allgemeine Gestaltungs- und Betriebshinweise . . . . .	1095
22.2.4	Allgemeine Berechnungsgrundlagen für Riemengetriebe . . . . .	1098
22.2.5	Auslegung von Flachriemengetrieben . . . . .	1111
22.2.6	Auslegung von Keilriemen- und Keilrippenriemengetrieben . . . . .	1114
22.2.7	Auslegung von Zahnriemengetrieben . . . . .	1119
22.2.8	Dynamisches Verhalten von Riemengetrieben . . . . .	1123
22.2.9	Betriebsverhalten und Einsatzgrenzen von Riemengetrieben . . . . .	1126
22.3	Kettengetriebe . . . . .	1130
22.3.1	Kettenbauarten und ihre Werkstoffe . . . . .	1131
22.3.2	Räderbauarten und ihre Werkstoffe . . . . .	1140
22.3.3	Allgemeine Gestaltungs- und Betriebshinweise . . . . .	1145
22.3.4	Berechnungsgrundlagen – Polygoneffekt und Kräfte am Kettengetriebe . . . . .	1153
22.3.5	Auslegung von Rollen- und Buchsenkettengetrieben . . . . .	1161
22.3.6	Auslegung von Zahnkettengetrieben . . . . .	1171
22.3.7	Dynamisches Verhalten von Kettengetrieben . . . . .	1172
22.3.8	Betriebsverhalten und Einsatzgrenzen von Kettengetrieben . . . . .	1176
22.4	Stufenlos einstellbare Riemen- und Kettengetriebe . . . . .	1178
	Literatur . . . . .	1184
	<b>Hinweise zur CD-ROM</b>	1189
	<b>Register</b>	1191