

G. Niemann • H. Winter

# Maschinenelemente

**Band 2:**

**Getriebe allgemein,  
Zahnradgetriebe - Grundlagen,  
Stirnradgetriebe**

Zweite, völlig neubearbeitete Auflage

Zweiter berichtigter Nachdruck, korrigierter Nachdruck

Mit 288 Abbildungen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>20</b>	<b>Getriebe — allgemein</b>	
	<b>(Funktionen, Grundbeziehungen, Bauarten, Baugröße, Bewegungsgleichungen, Lagerkräfte)</b>	<b>1</b>
20.1	Grundbeziehungen für Getriebe und Kupplungen	2
20.2	Vorgehensweise beim Entwerfen — Pflichtenheft (Checkliste)	5
20.3	Getriebe für konstante Übersetzung	5
20.3.1	Zahnradgetriebe	5
20.3.2	Kettengetriebe	9
20.3.3	Riemengetriebe	9
20.3.4	Reibradgetriebe	10
20.3.5	Baugröße und Gewicht von Zahnradgetrieben	11
20.4	Verstellgetriebe	11
20.4.1	Bauarten	11
20.4.2	Pflichtenheft (Auswahlkriterien) für stufenlos verstellbare mechanische Getriebe	15
20.5	Bewegungsvorgänge, Massenkräfte, Lagerkräfte	19
20.5.1	Berechnung von Kräften, Momenten, Leistungen — Geschwindigkeiten, Beschleunigungen	19
20.5.2	Umrechnung für unterteilte Massen	22
20.5.3	Umrechnung von Maßeinheiten	22
20.5.4	Antriebsmotor und Massenwirkung	22
20.5.5	Beispiele für Beschleunigungsvorgänge	25
20.5.6	Berechnung der Lagerkräfte von Getrieben	26
20.6	Literatur zu 20	29
<b>21</b>	<b>Zahnradgetriebe — Grundlagen (Stirnräder)</b>	<b>31</b>
21.1	Verzahnungsgeometrie — allgemein	31
21.1.1	Zeichen und Einheiten für Verzahnungsgeometrie	31
21.1.2	Verzahnungsgesetz	32
21.1.3	Konstruktion von Eingriffslinie und Gegenflanke	35
21.1.4	Übersetzung, Radienverhältnis (Zähnezahlverhältnis), Momentenverhältnis	35
21.1.5	Weitere Verzahnungsgrößen	36
21.1.6	Profilüberdeckung $s_a$	38
21.1.7	Gleit- und Wälzbewegung der Zahnflanken	38
21.1.8	Überlegungen zur Wahl des Zahnprofils	40
21.1.9	Flankenlinien (Geradverzahnung, Schrägverzahnung); Innenverzahnung	41
21.1.10	Literatur zu 21.1 (s. Abschn. 21.3.9)	41
21.2	Nichtevolventische Verzahnungen	42
21.2.1	Zykloidenverzahnung	42
21.2.2	Kreisbogenverzahnung	43
21.2.3	Triebstockverzahnung	43
21.2.4	Wildhaber/Novikov-Verzahnung (W/N-Verzahnung)	46
21.2.5	Literatur zu 21.2	48
21.3	Evolventenverzahnung	49
21.3.1	Erzeugung der Evolvente, Eigenschaften	49
21.3.2	Bezugsprofile der Evolventenverzahnung, Werkzeug-Bezugsprofile	51
21.3.3	Evolventenfunktion und allgemeine Verzahnungsgrößen	51
21.3.4	Die einfachste Evolventenverzahnung: Null-Verzahnung	54
21.3.5	Profilverschobene Verzahnung	54
21.3.5.1	V-Null-Verzahnung	56
21.3.5.2	V-Verzahnung	56
21.3.5.3	Satzräder mit Evolventenverzahnung	58
21.3.5.4	Aufzeichnen der Zahnform	59

21.3.6	Schrägverzahnung	59
21.3.7	Innenverzahnung (Hohlräder)	65
21.3.8	Grenzen der Verzahnungsgeometrie	67
21.3.9	Literatur zu 21.1 und 21.3	71
21.4	Verzahnungsgenauigkeit und -messung, Elankenspiel	72
21.4.1	Zeichen und Einheiten für Verzahnungsgenauigkeit und Elankenspiel	73
21.4.2	Radkörpergenauigkeit und -toleranzen	74
21.4.3	Verzahnungs- und Gehäusegenauigkeit	74
21.4.4	Verzahnungstoleranzen, DIN-Verzahnungsqualitäten	78
21.4.5	Sondervorschriften für Zahnprofil und Plankenlinien	78
21.4.6	Flankenspiel, Getriebepassung	83
21.4.7	Ermittlung der Zahndicke	86
21.4.8	Literatur zu 21.4	88
21.5	Zahnkräfte, Verformungen, Korrekturen	89
21.5.1	Äußere Zahnkräfte, Drehmomente	89
21.5.2	Zahnverformung, Zahnfedersteifigkeit, Drehwegabweichungen (statisch belastete, fehlerfreie Verzahnung)	94
21.5.3	Verteilung der Zahnkraft längs der Berührlinie (statisch belastete, fehlerfreie Verzahnung)	99
21.5.4	Kraftaufteilung in Umfangsrichtung (fehlerbehaftete Verzahnung)	100
21.5.5	Kraftverteilung längs der Zahnbreite (fehlerbehaftete Verzahnung)	104
21.5.5.1	Wirksame Elankenlinienabweichung	104
21.5.5.2	Genauere Verfahren zur Bestimmung der wirksamen Flankenlinienabweichung	104
21.5.5.3	Näherungsverfahren zur Bestimmung der Flankenlinienabweichung durch Verformung	104
21.5.5.4	Näherungsansatz für die Flankenlinien-Herstellabweichung	106
21.5.5.5	Näherungsverfahren zur Bestimmung der Einflußfaktoren $K_n$ , $J_F3$	107
21.5.5.6	Genauere Berechnung von $K_{mp}$ für symmetrisch gelagerte Ritzel	109
21.5.5.7	Planetengeräte	109
21.5.6	Verzahnungskorrekturen	112
21.5.7	Innere dynamische Zahnkräfte — Dynamikfaktor $K_v$	115
21.5.7.1	Zahnkräfte in verschiedenen Betriebsbereichen	116
21.5.7.2	Resonanzgebiete, Bezugsdrehzahl $J_V$	117
21.5.7.3	Dynamikfaktor — Einflußgrößen, Grenzbedingungen	118
21.5.7.4	Vereinfachte Bestimmung des Dynamikfaktors	118
21.5.7.5	Berechnung des Dynamikfaktors bei besonderen Getriebebauarten	120
21.5.8	Literatur zu 21.5	121
21.6	Getriebeschäden und Abhilfe, Entwicklungstendenzen	123
21.6.1	Allgemeine Maßnahmen, Entwicklungstendenzen	124
21.6.2	Grübchenbildung (pitting)	126
21.6.3	Abplatzer (spalling)	128
21.6.4	Graufleckigkeit (frosted areas, micro-pitting)	130
21.6.5	Zahnbruch	130
21.6.6	Pressen	131
21.6.7	Verschleiß	136
21.6.8	Risse an Zähnen	138
21.6.9	Literatur zu 21.6 (s. Abschn. 21.8.5)	138
21.7	Tragfähigkeitsberechnung — Grundlagen	138
21.7.1	Elastohydrodynamik — Schmierfilm und Schmierdruck	138
21.7.2	Grübchenbildung (pitting)	140
21.7.2.1	An Zahnflanken auftretende Pressung	141
21.7.2.2	Zulässige Flankenpressung $CT_{HP}$	144
21.7.3	Zahnbruch	147
21.7.3.1	Am Zahnfuß auftretende örtliche Spannung	147
21.7.3.2	Zulässige Zahnfußspannung $\tau_{FP}$	153
21.7.4	Fressen (Warmfressen)	157
21.7.4.1	Berechnungsgrundlagen — auftretende Flankentemperatur	157
21.7.4.2	Zulässige Integraltemperatur $\#_{intP}$	160
21.7.5	Langsamlauf-Verschleiß	160
21.7.5.1	Berechnung des linearen Verschleißabtrages (Zahndickenminderung) und der Verschleißmasse	161
21.7.5.2	Zulässiger Verschleiß	162
21.7.6	Literatur zu 21.7 (s. Abschn. 21.8.5)	162

21.8	Tragfähigkeitsgrenzwerte, ihre Ermittlung und Anwendung	.163
21.8.1	Verfahren (Tests) zur Ermittlung der Tragfähigkeitsgrenzwerte, Schadensdefinition	Ib3
21.8.2	Schadenswahrscheinlichkeit, Wöhler- und Schadens-Linien, Festigkeitswerte	.167
21.8.3	Anwendung der an Standard-Prüfrädern ermittelten Tragfähigkeitskennwerte	.170
21.8.4	Überlegungen zur Wahl des Sicherheitsfaktors	.171
21.8.5	Literatur zu 21.6,7,8 und 22.3	.174
21.9	Zahnradwerkstoffe, Wärmebehandlung, Vor- und Nachbehandlung	.178
21.9.1	Kosten für Zahnradwerkstoffe, Wärmebehandlung und zugehörige Bearbeitung	.180
21.9.2	Allgemeines zu Werkstoff wähl, Vor- und Nachbehandlung	.181
21.9.3	Zur Frage: Gehärtete oder ungehärtete Zahnräder?	.183
21.9.4	Gußeisen, Stahlguß	.183
21.9.5	Stähle ohne Oberflächenhärtung	.184
21.9.6	Einsatzstähle — Einsatzhärtung	.184
21.9.7	Vergütungsstähle — Induktions- und Flammhärtung	.190
21.9.8	Nitrier-, Vergütungs- und Einsatzstähle — Nitrierhärtung	.193
21.9.9	Vergütungsstahl → sonstige Oberflächenhärtung	.203
21.9.10	Sonstige Zahnradwerkstoffe	.203
21.9.11	Werkstoffqualität und Festigkeit	.204
21.9.12	Literatur zu 21.9	.204
21.10	Schmierung	.206
21.10.1	Wahl des Schmierstoffs	.206
21.10.2	Ölschmierung - Wahl der Ölart	.206
21.10.3	Wahl der öleigenschaften	.208
21.10.4	Ölzuführung (Tauch-, Einspritz-, Nebelschmierung)	.211
21.10.5	öltemperatur, -pflege, -Überwachung, -Wechsel	.215
21.10.6	Fettschmierung	.216
21.10.7	Sonstiges (Feststoff)Schmierung, Notlaufschmierung)	.217
21.10.8	Literatur zu 21.10	.217
21.11	Verlustleistung, Wirkungsgrad, Erwärmung	.218
21.11.1	Zeichen und Einheiten	.219
21.11.2	Verlustleistung	.219
21.11.3	Wirkungsgrad	.225
21.11.4	Wärmehaushalt (Kühlung, Heizung)	.225
21.11.5	Berechnungsbeispiel	.228
21.11.6	Literatur zu 21.11	.229
21.12	Zahnradherstellung	.230
21.12.1	Arbeitsprinzipien	.230
21.12.2	Anwendungsbereich und Besonderheiten der Herstellverfahren	.232
21.12.2.1	Wälzfräsen	.232
21.12.2.2	Wälzstoßen	.233
21.12.2.3	Wälzhobeln	.236
21.12.2.4	Formfräsen	.236
21.12.2.5	Formstoßen	.237
21.12.2.6	Verzahnungsräumen	.237
21.12.2.7	Wälzschälen	.237
21.12.2.8	Verzahnungsschleifen	.237
21.12.2.9	Verzahnungsschaben (Wälzschaben)	.239
21.12.2.10	Verzahnungsläppen	.241
21.12.2.11	Einlaufen mit Einlaufschmierstoff	.241
21.12.3	Reparatur bei beschädigten Zahnflanken	.241
21.12.4	Literatur zu 21.12	.242
21.13	Getriebe geräusch	.243
21.13.1	Meß- und Abnahmeregeln — erreichbare Geräuschqualität	.243
21.13.2	Zeichen und Einheiten	.244
21.13.3	Das Getriebe als Geräuscherzeuger und -abstrahler	.244
21.13.4	Das Getriebe als Schwingungssystem	.245
21.13.5	Einfluß der Getriebe- und Verzahnungsdaten	.248
21.13.6	Einfluß des Werkstoffs und der Herstellung der Zahnräder	.251
21.13.7	Einfluß der Verzahnungsqualität	.252
21.13.8	Sonstige Einflüsse auf das Zahnradgeräusch	.255
21.13.9	Einfluß der Lager	.255

21.13.10	Abstrahleigenschaften des Gehäuses.	255
21.13.11	Sekundäre Schallschutzmaßnahmen.	257
21.13.12	Literatur zu 21.13.	257
<b>22</b>	<b>Stirnradgetriebe — Entwurf, Berechnung, Gestaltung</b>	<b>259</b>
22.1	Entwerfen eines Getriebes.	259
22.1.1	Vorgehen bei Entwurf und Konstruktion.	259
22.1.2	Getriebebauform, Anschluß an Motor und Arbeitsmaschine.	259
22.1.3	Aufteilung der Gesamtübersetzung in Getriebestufen.	261
22.1.4	Überschlägige Bestimmung der Hauptabmessungen: Durchmesser, Achsabstand.	262
22.1.5	Wahl der Zahnbreite $b$ oder der Verhältniswerte $b/d^{\wedge} b/a$ .	266
22.1.6	Wahl von Zähnezah $z_1$ und Modul $m$ .	266
22.1.7	Geradzahnung — Schrägverzahnung/Schrägungswinkel.	271
22.1.8	Wahl des Bezugsprofils und der Profilverschiebung.	273
22.1.9	Berechnung der Verzahnungsdaten.	275
22.1.10	Lagerkräfte: Rechenschema s. Abschn. 20.5.0.	275
22.1.11	Entwurfsschema und Beispiel.	275
22.1.12	Literaturhinweis.	275
22.2	Gestaltung von Stirnradgetrieben.	280
22.2.1	Getriebebauform und Anordnung der Zahnräder.	280
22.2.2 <sup>c</sup>	Anschluß an Antriebs- und Arbeitsmaschine.	280
22.2.3	Gestaltung der Zahnräder.	286
22.2.4	Gestaltung der Ritzelwellen.	293
22.2.5	Gestaltung der Gehäuse.	294
22.2.6	Lagergestaltung und Lagerwahl.	299
22.2.7	Gestaltung der Wellen, Dichtungen, Gehäusedeckel.	300
22.2.8	Auswuchten.	301
22.2.9	Literatur zu 22.2.	301
22.3	Nachweis der Tragfähigkeit, Rechenschema, Beispiele.	302
22.3.1	Zeichen und Einheiten.	307
22.3.2	Allgemeine Einflußgrößen.	310
22.3.3	Grübchentragfähigkeit.	326
22.3.4	Zahnfußtragfähigkeit.	333
22.3.5	Freßtragfähigkeit (Warmfressen).	341
22.3.6	Beurteilung der Kaltfreßgefahr (s. Abschn. 21.6.6 und 21.7.1).	345
22.3.7	Verschleißtragfähigkeit.	345
22.4	Kunststoffzahnrad.	347
22.4.1	Eigenschaften gegenüber Stahlzahnradern, Anwendung.	347
22.4.2	Werkstoffe, Erzeugen der Verzahnung.	349
22.4.3	Besonderheiten der Herstellung von Zahnradern aus thermoplastischen Werkstoffen.	350
22.4.4	Zeichen und Einheiten.	350
22.4.5	Tragfähigkeit von Kunststoff Zahnradern.	350
22.4.6	Hinweise zur Konstruktion.	357
22.4.7	Rechenschema und Beispiele.	358
22.4.8	Literatur zu 22.4.	359
22.5	Besondere Zahnradgetriebe und Anwendungen.	359
22.5.1	Einfache Planetengetriebe mit Einfachplaneten.	359
22.5.1.1	Literatur zu 22.5.1.	365
22.5.2	Spielarme Zahnradgetriebe.	365
22.5.2.1	Literatur zu 22.5.2.	368
22.5.3	Hinweise zur Feinwerktechnik, extrem kleine Zähnezahlen.	368
22.5.3.1	Literatur zu 22.5.3.	370
22.5.4	Elliptische und exzentrische Zahnrad.	370
22.5.4.1	Literatur zu 22.5.4.	371
	Sachverzeichnis.	373