

Heinz Linke

Stirnradverzahnung

Berechnung • Werkstoffe • Fertigung

Mit Beiträgen von

J. Börner, H. Linke, E. Röhle, I. Römhild, P. Schäcke, M. Senf, W. Sonntag,
A. Spengler, F. Spirling, W. Thyssen, H. Vogel



Carl Hanser Verlag München Wien

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick, allgemeine Grundlagen	15
1.1	Entwicklung der Verzahnung	15
1.1.1	Entwicklung der Anwendung der Zahnräder/Zahnradgetriebe	15
1.1.2	Entwicklung der Verzahnungsgeometrie	21
1.1.3	Entwicklung der Tragfähigkeitsberechnung	26
1.1.3.1	Zahnfußbeanspruchung	26
1.1.3.2	Zahnflankenbeanspruchung - Grübchen	30
1.1.3.3	Freßbeanspruchung	32
1.2	Aufgaben und Einteilung der Getriebe und Verzahnungen	33
1.3	Verzahnungsgesetz für Slimradverzahnungen	40
1.4	Grundbeziehungen	47
1.4.1	Übersetzung	47
1.4.2	Wirkungsgrad	50
1.4.3	Drehmomente	51
1.5	Symbole und Symbolerklärungen	53
2	Geometrie der Verzahnung	54
2.1	Geometrie der Gcradverzahnung	54
2.1.1	Geometrie der Verzahnung eines Stirnrades	54
2.1.1.1	Evolvente	54
2.1.1.2	Bezugsprofil	65
2.1.1.3	Grundgrößen der Verzahnung eines Stirnrades	69
2.1.2	Geometrie der Verzahnungspaarung - Gcradverzahnung	76
2.2	Geometrie der Schrägverzahnung	91
2.2.1	Erzeugung und grundlegende Eigenschaften	91
2.2.2	Grundgrößen der Verzahnung eines Stirnrades - Schrägverzahnung	100
2.2.3	Geometrie der Verzahnungspaarung - Schrägverzahnung	105
2.3	Ergänzungen zur Geometrie	110
2.3.1	Allgemeines zur Zahnfußgeometrie	110
2.3.2	Zahnfußgeometrie der Außenverzahnung bei Herstellung mit Wälzfräser oder Hobelkamm bei beliebigem Wälzwinkel	110
2.3.2.1	Zahnfußdicke der Außenverzahnung	110
2.3.2.2	Krümmungsradien der Zahnfußübergangskurve der Außenverzahnung bei Herstellung mit Wälzfräser oder Hobelkamm	113
2.3.3	Zahnfußgeometrie bei Herstellung mit Schneidrad - Außen- und Innenverzahnung	118
2.3.3.1	Zahnfußdicke	118
2.3.3.2	Krümmungsradien der Zahnfußübergangskurve	120
2.3.4	Vergleichende Untersuchungen zur Zahnfußgeometrie	121
2.4	Symbole und Symbolerklärungen	123
3	Eingriffsstörungen	125
3.1	Überblick	125
3.2	Eingriffsstörungen bei Außenverzahnung	125
3.2.1	Eingriffsstörung durch zu kleine Überdeckung	125
3.2.2	Eingriffsstörung durch nichtevolventische Bereiche	129
3.3	Eingriffsstörungen bei Innenverzahnungen	131
3.3.1	Vorbetrachtung	131
3.3.2	Eingriffsstörungen im theoretischen Eingriffsgebiet - Zahnfüßeingriffsstörungen	133
3.3.2.1	Zahnfüßeingriffsstörung am Ritzel	134
3.3.2.2	Zahnfüßeingriffsstörung am Schneidrad des Erzeugungsgliedes	136

Inhaltsverzeichnis

3.3.2.3	Zahnfußeingriffsstörung am Hohlrad . . . . .	.137
3.3.3	Eingriffsstörungen außerhalb des regulären Zahneingriffsgebietes. . . . .	.140
3.3.3.1	Zahnkopfeingriffsstörung. . . . .	.140
3.3.3.2	Vorschubeingriffsstörung und radiale Einbaustörung. . . . .	.143
3.3.3.3	Passive Eingriffsstörung am Erzeugungsinnegetriebe. . . . .	.147
3.3.4	Hinweise zur Auslegung von Innenradpaaren und zur Auswahl des Werkzeuges. . . . .	.148
3.3.4.1	Allgemeine Gesichtspunkte für den Entwurf von Innenradpaaren. . . . .	.148
3.3.4.2	Profilverschiebung zur Vermeidung von Eingriffsstörungen an Innenradpaaren. . . . .	.150
3.3.4.3	Wahl des Schneidrades zur Erzeugung der Innenverzahnung. . . . .	.152
3.4	Symbole und Symbolerklärungen. . . . .	.157
4	Evolventische Sonderverzahnungen. . . . .	.158
4.1	Arten und Möglichkeiten. . . . .	.158
4.2	Auslegung. . . . .	.162
4.3	Symbole und Symbolerklärungen. . . . .	.170
5	Tragfähigkeit - Einführung, Ausgangswerte. . . . .	.171
5.1	Schadensfälle. . . . .	.171
5.2	Möglichkeiten des Tragfähigkeitsnachweises. . . . .	.180
5.3	Belastungshäufigkeitsfunktion. . . . .	.182
5.3.1	Belastungsverlauf am Zahn. . . . .	.182
5.3.2	Erfassung des Belastungsverlaufes im Lastkollektiv. . . . .	.183
5.3.3	Experimentelle Ermittlung von Lastkollektiven. . . . .	.184
5.3.4	Erfassung von Lastkollektiven in der Tragfähigkeitsberechnung. . . . .	.186
5.3.5	Typische Lastkollektive, Besonderheiten. . . . .	.191
5.4	Symbole und Symbolerklärungen. . . . .	.194
6	Tragfähigkeit / Laufverhalten - Außenverzahnung und Innenverzahnung. . . . .	.195
6.1	Geschwindigkeiten. . . . .	.195
6.1.1	Gleitgeschwindigkeit. . . . .	.195
6.1.2	Spezifisches Gleiten. . . . .	.199
6.1.3	Gleitfaktor. . . . .	.200
6.1.4	Summengeschwindigkeit. . . . .	.200
6.2	Zahnsteifigkeit und Verformungseinflußzahlen. . . . .	.201
6.2.1	Grundlegendes. . . . .	.201
6.2.2	Zahnsteifigkeitsanteile. . . . .	.202
6.2.3	Zahnsteifigkeitsberechnung. . . . .	.203
6.2.4	Näherungsweise Zahnsteifigkeitsberechnung nach DIN 3990. . . . .	.204
6.2.5	Symbole und Symbolerklärungen. . . . .	.206
6.3	Kräfte am Zahn. . . . .	.206
6.3.1	Grundsätzliches. . . . .	.206
6.3.2	Kräfte am Zahn aus Nutzleistung. . . . .	.207
6.3.2.1	Kraftzerlegung am Zahn. . . . .	.207
6.3.2.2	Definition der Nutzleistung für die Zahnbelastung. . . . .	.212
6.3.3	Äußere dynamische Zusatzkräfte. . . . .	.212
6.3.4	Innere dynamische Zusatzkräfte. . . . .	.217
6.3.4.1	Ursachen und Verlauf. . . . .	.217
6.3.4.2	Mechanisches Ersatzmodell. . . . .	.219
6.3.4.3	Mathematisches Berechnungsmodell. . . . .	.225
6.3.4.4	Parameter des Schwingungssystems. . . . .	.226
6.3.4.5	Schwingungsberechnung. . . . .	.230
6.3.4.6	Besonderheiten des Schwingungsverhaltens. . . . .	.232
6.3.4.7	Experimentelle Ermittlung. . . . .	.234
6.3.4.8	Ermittlung des Dynamikfaktors K_v , entsprechend DIN 3990. . . . .	.235
6.3.5	Resultierende Belastung - praktisches Vorgehen, Vernachlässigungen. . . . .	.240

6.3.6	Symbole und Symbolerklärungen	241
6.4	Lastverteilung bei Verzahnungen	242
6.4.1	Grundproblem	242
6.4.2	Allgemeiner Berechnungsansatz	243
6.4.3	Verfahren der Einflußzahlen	244
6.4.3.1	Grundbeziehungen	244
6.4.3.2	Ermittlung der Verformungseinflußzahlen	246
6.4.4	Erfassung der Lastverteilung für die Zahnflanken- und Zahnfuß-Tragfähigkeitsberechnung durch Lastverteilungsfaktoren	256
6.4.4.1	Stimfaktor $K_{U,\sigma}$	257
6.4.4.2	Breitenfaktor $K_{H\sigma}$	259
6.4.4.3	Vereinfachte Lastverteilungsfaktoren	260
6.4.4.4	Ermittlung der Kontaktlinienabweichung	265
6.4.4.5	Ermittlung der wirksamen Kontaktlinienabweichung für praktische Berechnungen	267
6.4.5	Maßnahmen zur Verbesserung des Breitenlastverhaltens	273
6.4.6	Symbole und Symbolerklärungen	279
6.5	Tragfähigkeitsnachweis	280
6.5.1	Zahnflankenragfähigkeit - Grübchen und Schäden bei Maximalbeanspruchung	280
6.5.1.1	Grundlagen	280
6.5.1.2	Zahnflankenpressung	285
6.5.1.3	Grübchenfestigkeit und Einflüsse	292
6.5.1.4	Sicherheit gegen Grübchenbildung; zulässige Beanspruchung	295
6.5.1.5	Sicherheit gegen bleibende Verformung, Anriß oder Sprödbruch der Randschicht bei maximaler Belastung	296
6.5.2	Zahnfußtragfähigkeit	297
6.5.2.1	Grundlagen - Kerbwirkung	298
6.5.2.2	Zahnfußspannung bei Vollrädern	311
6.5.2.3	Zahnfußfestigkeit und Einflüsse	320
6.5.2.4	Sicherheit gegen Ermüdungsbruch	325
6.5.2.5	Sicherheit gegen bleibende Verformung, Anriß oder Sprödbruch	326
6.5.2.6	Zahnfußtragfähigkeit bei elastisch gestaltetem Zahnkranz	327
6.5.3	Praktisches Vorgehen beim Grundnachweis der Tragfähigkeit	345
6.5.3.1	Vorgehen beim Nachweis der Flankeniragfähigkeit - Grübchen und Schäden bei Maximalbelastung (Methodischer Ablauf)	345
6.5.3.2	Zahnfußtragfähigkeit - Ermüdungsbruch und Schäden bei Maximalbelastung (Methodischer Ablauf)	350
6.5.4	Schmierfilmdicke	355
6.5.4.1	Berechnung der Schmierfilmdicke	355
6.5.4.2	Zahnflankenschäden und Schmierstoffeinfluß	359
6.5.5	Freßtragfähigkeit	359
6.5.5.1	Einführung	359
6.5.5.2	Schadensbeschreibung und Einflußgrößen zur Freßtragfähigkeit	360
6.5.5.3	Ansätze zur Berechnung der Freßtragfähigkeit	361
6.5.5.4	Freßtragfähigkeit nach der Blitztemperatur (Blök)	362
6.5.5.5	Freßtragfähigkeit nach der Integraltemperatur (Winter/Michaelis)	368
6.5.5.6	Praktische Berechnung der Freßtragfähigkeit nach dem Integraltemperaturverfahren nach DIN 3990 T4	369
6.5.5.7	Testverfahren zur Freßtragfähigkeit	374
6.5.6	Graufleckentragfähigkeit	376
6.5.7	Verschleißtragfähigkeit	380
6.5.8	Symbole und Symbolerklärungen	384
6.6	Leistungsverluste/Wirkungsgrad, Getriebeerwärmung, Schmierung	387
6.6.1	Leistungsverluste	387
6.6.1.1	Gesamtverluste - Übersicht	387
6.6.1.2	Verzahnungsverluste	388
6.6.1.3	Lagerverluste	395
6.6.1.4	Dichtungsverluste	398
6.6.2	Getriebewirkungsgrad	400

6.6.3	Wärmebilanz - Wärmelagfähigkeit	401
6.6.3.1	Vorbetrachtungen	401
6.6.3.2	Wärmeabgabe durch das Gehäuse	402
6.6.3.3	Wärmeabgabe durch Kühlkreislauf	404
6.6.3.4	Ergänzungen zur Wärmebilanz	405
6.6.4	Schmierung und Kühlung	419
6.6.4.1	Schmierstoffauswahl	419
6.6.4.2	Schmier- und Kühlsysteme	423
6.6.5	Symbole und Symbolerklärungen	429
6.7	Geräuschverhalten	431
6.7.1	Grundlagen	431
6.7.1.1	Einführung und wichtige akustische Begriffe	431
6.7.1.2	Rechenoperationen mit Pegelwerten	437
6.7.2	Mechanische Geräuschentstehung	438
6.7.2.1	Grundgleichung, Schallausbreitung	438
6.7.2.2	Körperschallanregung	440
6.7.2.3	Erregerfrequenzen	442
6.7.2.4	Übertragungs- und Abstrahlverhalten von Getriebegehäusen	444
6.7.2.5	Bestimmung der Gesamtschalleistung	449
6.7.3	Meßtechnische Ermittlung der Schalleistung	450
6.7.3.1	Luftschall-Meßverfahren	450
6.7.3.2	Körperschall-Meßverfahren	451
6.7.3.3	Normen	452
6.7.4	Schalleistungspegel von Zahnradgetrieben	453
6.7.4.1	Erwartungswerte nach VDI 2159	453
6.7.4.2	Vergleiche mit weiteren Literaturquellen	455
6.7.4.3	Einfluß geräuschrelevanter Parameter	456
6.7.4.4	Grenzwerte der Schallemission	457
6.7.5	Beispiele von Schalleistungspegeln diverser Maschinen	458
6.7.6	Konstruktive Maßnahmen zur Geräuschminderung	459
6.7.6.1	Vorschriften	459
6.7.6.2	Grundprinzipien zur Geräuschminderung	460
6.7.6.3	Beeinflussung der Anregung des Zahneingriffs bei Stirnradverzahnungen	461
6.7.6.4	Beeinflussung der Körperschallanregung an der Lagerstelle	468
6.7.6.5	Gestaltung des Getriebegehäuses	470
6.7.6.6	Schallschutzkapseln	476
6.7.7	Körperschall und Diagnose	479
6.7.8	Symbole und Symbolerklärungen	480
7	Auslegung von Verzahnungen und Getrieben	483
7.1	Stufenzahl und Aufteilung der Gesamtübersetzung	483
7.1.1	Vorbetrachtungen	483
7.1.2	Auslegung für minimale Masse	483
7.2	Überschlägige Bestimmung der Abmessungen	488
7.2.1	Überschlagskriterium Zahnflankentragfähigkeit (Grübben)	488
7.2.2	Überschlagskriterium Zahnfußtragfähigkeit	490
7.3	Wahl und Aufteilung der Profilverschiebung	491
7.3.1	Kriterien und Tendenzen	491
7.3.2	Empfehlungen	500
7.4	Werkstoffauswahl - Festigkeitswerte	504
7.4.1	Zusammenhang Werkstoffauswahl und Wärmebehandlung	504
7.4.2	Grundlagen der Werkstoffauswahl	507
7.4.2.1	Allgemeine Grundlagen	507
7.4.2.2	Werkstoffauswahl nach der Härbarkeit	510
7.4.3	Werkstoffe mit beanspruchungsgerechter Wärmebehandlung	513
7.4.3.1	Werkstoffe für vergütete Zahnräder	514
7.4.3.2	Werkstoffe für randschichtgehärtete Zahnräder	517

7.4.3.3	Werkstoffe für einatzgehärtete Zahnräder.	521
7.4.3.4	Werkstoffe für carbonitrierte Zahnräder.	529
7.4.3.5	Werkstoffe für nitrierte Zahnräder.	530
7.4.3.6	Werkstoffe für boridierte Zahnräder.	539
7.4.3.7	Bainitisch-austenitisches Gußeisen mit Kugelgraphit.	539
7.4.4	Vergleich der Dauerfestigkeitswerte.	541
7.4.5	Wöhlerlinien.	542
7.4.6	Symbole und Symbolerklärungen Abschnitt 7.4.	546
8	Qualitätssicherung von Stirnradverzahnungen	547
8.1	Toleranzsystem und Getriebe-Paßsystem.	547
8.2	Verzahnungstoleranzsystem - Verzahnungsabweichungen und Verzahnungsmeßtechnik.	548
8.2.1	Einleitung.	548
8.2.2	Toleranzsystem Verzahnungsabweichungen.	555
8.2.2.1	Flankenabweichungen.	555
8.2.2.2	Teilungsabweichungen.	560
8.2.2.3	Rundlaufabweichungen.	562
8.2.2.4	Wälzabweichungen.	563
8.2.3	Verzahnungsmeßtechnik (Toleranzsystem).	565
8.2.3.1	Meßgeräte für Flankenabweichungen.	565
8.2.3.2	Meßgeräte für Teilungsabweichungen.	568
8.2.3.3	Meßgeräte für Rundlaufabweichungen.	570
8.2.3.4	Meßgeräte für Wälzabweichungen.	570
8.2.3.5	Verzahnungsmessung auf Mehrkoordinatenmeßgeräten.	571
8.3	Getriebe-Paßsystem - Flankenspiel, Paßgrößen und Prüftechnik.	571
8.3.1	Getriebe-Paßsystem und Flankenspiel.	571
8.3.2	Achsen-/stützflächenbezogene und flankenbezogene Prüfmaße.	572
8.3.2.1	Zahndicke und Prüfmaße für die Zahndicke.	572
8.3.2.2	Zahndickensehnen und Zahnkopfhöhen über der Sehne.	573
8.3.2.3	Konstante Sehne.	574
8.3.2.4	Zweiflanken-Wälzabstand mit Lehrzahnrad.	574
8.3.2.5	Radiales Prüfmaß für die Zahndicke.	575
8.3.2.6	Zahnweite.	575
8.3.2.7	Diametrales Prüfmaß für die Zahndicke.	577
8.3.3	Verzahnungsmeßtechnik (Getriebe-Paßsystem).	578
8.4	Symbole und Symbolerklärungen.	581
9	Zeichnungsangaben	583
9.1	Überblick, geometrische Angaben.	583
9.2	Angaben zur Wärmebehandlung.	587
9.3	Angaben zum Oberflächenschutz.	590
10	Fertigung von Stirnradverzahnungen.	593
10.1	Allgemeiner Fertigungsprozeß für Stirnräder.	593
10.2	Verfahren der Zahnformgebung.	595
10.2.1	Allgemeine Gliederung der Verfahren der Zahnformgebung.	595
10.2.2	Umförmende Herstellung von Stirnrädern.	596
10.2.3	Umförmende und zerteilende Zahnformgebung.	597
10.2.4	Spanende Zahnformgebung durch Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide	603
10.2.4.1	Technologische Grundlagen.	603
10.2.4.2	Wälzhobeln.	608
10.2.4.3	Wälzstoßen.	609
10.2.4.4	Wälzschälen.	612
10.2.4.5	Wälzfräsen.	613
10.2.4.6	Wälzschaben.	617

10.2.4.7	Profilfräsen	619
10.2.4.8	Profilräumen	620
10.2.5	Spanende Zahnformgebung durch Werkzeuge mit geometrisch unbestimmter Schneide	621
10.2.5.1	Technologische Grundlagen	621
10.2.5.2	Diskontinuierliches Wälzschleifen mit tellerförmigen Schleifkörpern	626
10.2.5.3	Diskontinuierliches Wälzschleifen mit Doppelkegel-Schleifkörper	627
10.2.5.4	Kontinuierliches Wälzschleifen	630
10.2.5.5	Diskontinuierliches Profilschleifen	632
10.2.5.6	Kontinuierliches Profilschleifen	633
10.2.5.7	Wälzhonen	635
10.2.5.8	Wälzläppen	637
10.2.6	Gestaltung optimaler Fertigungsprozesse für Stirnräder - Auswahl optimaler Verfahren und Verfahrenskombinationen	638
10.2.7	Symbole und Symbolerklärungen Abschnitt 10.1 und 10.2	650
10.3	Wärmebehandlung	651
10.3.1	Fertigungsgerechte Wärmebehandlung	660
10.3.1.1	Normalglühen	660
10.3.1.2	Perlitisieren	661
10.3.1.3	Weichglühen	661
10.3.1.4	Spannungsarmglühen	662
10.3.2	Beanspruchungsgerechte Wärmebehandlung	662
10.3.2.1	Vergüten	662
10.3.2.2	Bainitisieren	666
10.3.2.3	Randschichthärten	669
10.3.2.4	Einsatzhärten	676
10.3.2.5	Carbonitrieren	690
10.3.2.6	Nitrieren	691
10.3.2.7	Borieren	698
10.3.3	Anwendungsbereiche und Vergleich der Verfahren	699
10.3.4	Anlagentechnik	702
10.3.5	Prüftechnik	709
10.4	Oberflächenbehandlung	712
10.5	Symbole und Symbolerklärungen Abschnitt 10.3	712

Anlagen

Anlage 1	Zahnfußgeometrie	714
Anlage 1.1	Gleichungen	714
Anlage 1.2	Bezogener Zahnfußkrümmungsradius Q_{pn}/r^{\wedge}	716
Anlage 1.3	Bezogene Zahnfußdicke S_{fjrr}^{\wedge}	717
Anlage 1.4	Kerbparameter $2B_{p_n}/i_{p_n}$	718
Anlage 2	Angaben von DIN 3990 zu Y_s und y_{8relT}	719
Anlage 3	Flankenspiel	720
Anlage 4	Ausgewählte Beispiele für Zahnradgetriebe	721
Anlage 5	Verzahnungsnormen	729

Literaturverzeichnis	731
-----------------------------	-----

Sachwortverzeichnis	756
----------------------------	-----