

HANSER

Inhaltsverzeichnis

Stirnradverzahnung

Berechnung - Werkstoffe - Fertigung

Herausgegeben von Heinz Linke

ISBN: 978-3-446-41464-8

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41464-8>

sowie im Buchhandel.

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 Stirnradverzahnungen	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 Geradverzahnung	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 – Geradverzahnung	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 Werkzeugprofilwinkel	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 in nichtevolventischen Bereichen	129
3.3	Eingriffsstörungen bei Innenverzahnungen	131
3.3.1	Vorbetrachtung	131
3.3.2	Eingriffsstörungen im theoretischen Eingriffsgebiet – Zahnfußeingriffsstörungen	133
3.3.2.1	Zahnfußeingriffsstörung am Ritzel	134
3.3.2.2	Zahnfußeingriffsstörung am Schneidrad des Erzeugungsetriebes	136
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 Erzeugungsinnengetriebe	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 Innenradpaare	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 bei 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	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
6.4.3.3	Berechnung der Lastverteilung und Analyse von Besonderheiten	255
6.4.4	Erfassung der Lastverteilung für die Zahnflanken- und Zahnfuß- Tragfähigkeitsberechnung durch Lastverteilungsfaktoren	260
6.4.4.1	Stirnfaktor $K_{H\alpha}$	261
6.4.4.2	Breitenfaktor $K_{H\beta}$	263
6.4.4.3	Vereinfachte Lastverteilungsfaktoren	264
6.4.4.4	Ermittlung der Kontaktlinienabweichung	269
6.4.4.5	Ermittlung der wirksamen Kontaktlinienabweichung für praktische Berechnungen	271
6.4.5	Maßnahmen zur Verbesserung des Breitenlastverhaltens	273
6.4.6	Symbole und Symbolerklärungen	279
6.5	Tragfähigkeitsnachweis	280
6.5.1	Zahnflankentragfähigkeit – 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 Anriss, bleibende Verformung oder Sprödbruch	326
6.5.2.6	Zahnfußtragfähigkeit bei elastisch gestaltetem Zahnkranz	328
6.5.3	Praktisches Vorgehen beim Grundnachweis der Tragfähigkeit	345
6.5.3.1	Vorgehen beim Nachweis der Flankentragfähigkeit – 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 (Blok)	362
6.5.5.5	Fresstragfähigkeit nach der Integraltemperatur (Winter/Michaelis)	368

6.5.5.6	Praktische Berechnung der Fresstragfähigkeit nach dem Integraltemperaturverfahren	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	394
6.6.1.4	Dichtungsverluste	399
6.6.2	Getriebewirkungsgrad	400
6.6.3	Wärmebilanz – Wärmetragfähigkeit	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	437
6.7.2.1	Grundgleichung, Schallausbreitung	437
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	448
6.7.3	Messtechnische Ermittlung der Schalleistung	449
6.7.3.1	Luftschall-Messverfahren	449
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	454
6.7.4.3	Einfluss geräuschrelevanter Parameter	455
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	477
6.7.6.7	Antischall	479
6.7.7	Körperschall und Diagnose	480
6.7.8	Symbole und Symbolerklärungen	481

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 (Grübchen)	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	Grundlagen der Werkstoffauswahl und Grundwerte der Werkstofffestigkeit	504
7.4.1.1	Allgemeine Grundlagen	506
7.4.1.2	Stahlauswahl nach der Härbarkeit	509
7.4.2	Werkstoffe für Zahnräder ohne Randschichtverfestigung – Grundlagen	513
7.4.2.1	Zahnräder aus unlegierten Stählen sowie Stahlguss und unlegierten Gusseisensorten	513
7.4.2.2	Zahnräder aus bainitischem Gusseisen	519
7.4.2.3	Zahnräder aus AFP-Stählen	521
7.4.2.4	Zahnräder aus vergüteten Stählen und vergüteten Eisengusswerkstoffen	521
7.4.3	Werkstoffe für Zahnräder mit Randschichtverfestigung – Grundlagen	524
7.4.3.1	Randschichtgehärtete Zahnräder	524
7.4.3.2	Einsatzgehärtete Zahnräder	526
7.4.3.3	Carbonitrierte Zahnräder	537
7.4.3.4	Aufgestickte Zahnräder	537
7.4.3.5	Nitrierte/Nitrocarburierte Zahnräder	538
7.4.3.6	Borierte Zahnräder	543
7.4.3.7	Beschichtete Zahnräder	543
7.4.3.8	Zahnräder aus speziellen Eisenwerkstoffen	544
7.4.4	Festigkeitswerte für Zahnräder	544
7.4.4.1	Zahnräder aus unlegierten Stählen sowie Stahlguss und unlegierten Gusseisensorten	545
7.4.4.2	Zahnräder aus bainitischem Gusseisen	545
7.4.4.3	Zahnräder aus AFP-Stählen	546
7.4.4.4	Zahnräder aus vergüteten Stählen und vergüteten Eisengusswerkstoffen	546
7.4.4.5	Randschichtgehärtete Zahnräder	550
7.4.4.6	Einsatzgehärtete Zahnräder	555
7.4.4.7	Carbonitrierte Zahnräder	563
7.4.4.8	Aufgestickte Zahnräder	564
7.4.4.9	Nitrierte/ Nitrocarburierte Zahnräder	565
7.4.4.10	Gesinterte Zahnräder	572
7.4.4.11	Zahnräder aus thermoplastischen Werkstoffen	574
7.4.5	Vergleich der Dauerfestigkeitswerte	574
7.4.6	Wöhlerlinien	576
7.4.7	Symbole und Symbolerklärungen	579
8	Sicherung der Qualität von Stirnradverzahnungen	581
8.1	Einführung	581
8.1.1	Normung	581
8.1.2	Toleranzsystem	581
8.1.3	Getriebe-Passsystem	582
8.2	Messtechnische Grundlagen	584
8.2.1	Grenزابweichungen, Grenزابmaße und Toleranzen	584

8.2.2	Istmaße und Istabweichungen	584
8.2.3	Bezogenheit von Messgrößen bzw. Messverfahren	585
8.2.4	Unsicherheit der Messergebnisse	586
8.3	Qualitätskenngrößen	587
8.3.1	Flankenabweichungen	587
8.3.1.1	Vorbemerkungen	587
8.3.1.2	Abweichungen des Stirnprofils	590
8.3.1.3	Abweichungen der Flankenlinie	592
8.3.1.4	Abweichungen der Erzeugenden	593
8.3.1.5	Fräseralmessung	594
8.3.1.6	Abweichungen der Flankenfläche	595
8.3.1.7	Messung modifizierter Flanken	596
8.3.1.8	Schränkung	598
8.3.1.9	Welligkeit	598
8.3.1.10	Toleranzfeld (K-Diagramm)	599
8.3.2	Teilungsabweichungen	599
8.3.2.1	Kreisteilungsabweichungen	599
8.3.2.2	Eingriffsteilungsabweichung	601
8.3.3	Rundlaufabweichung	602
8.4	Passkenngrößen	603
8.4.1	Flankenspiel	603
8.4.2	Zahndicke	604
8.4.3	Zahndickenprüfmaße	604
8.4.3.1	Vorbemerkungen	604
8.4.3.2	Zahnweite	605
8.4.3.3	Radiale Prüfmaße für die Zahndicke	607
8.4.3.4	Sehnen	608
8.4.3.5	Zweiflankenwälz-Achsabstand	609
8.4.3.6	Kopfkreisdurchmesser bei überschnittenen Zylinderrädern	609
8.5	Wälzabweichungen	610
8.5.1	Vorbemerkungen	610
8.5.2	Einflankenwälzprüfung	610
8.5.3	Zweiflankenwälzprüfung	611
8.5.4	Abweichungen an Radpaaren im Getriebe	612
8.5.4.1	Achslageabweichungen des Radpaares	612
8.5.4.2	Wälzabweichung von Werkradpaaren	612
8.6	Tragbild	613
8.7	Rauheitsmessung	613
8.8	Geräusch	614
8.9	Einsatz von Verzahnungslehren	615
8.10	Symbole und Symbolerklärungen	615
9	Zeichnungsangaben	617
9.1	Überblick, geometrische Angaben	617
9.2	Geometrische Angaben	617
9.3	Angaben zur Wärmebehandlung und zum Beschichten	621
9.3.1	Angaben zur Wärmebehandlung	621
9.3.2	Angaben zum Beschichten	628
9.3.2.1	Hartstoffschichten	628
9.3.2.2	Galvanisch aufgebraute Schichten	628
9.3.2.3	Chemisch aufgebraute Schichten	629
9.4	Symbole und Symbolerklärungen	629

10 Fertigung von Stirnradverzahnungen	630
10.1 Allgemeiner Fertigungsprozess für Stirnräder	630
10.2 Verfahren der Zahnformgebung	632
10.2.1 Allgemeine Gliederung der Verfahren der Zahnformgebung	632
10.2.2 Urformende Herstellung von Stirnrädern	633
10.2.3 Umformende und zerteilende Zahnformgebung	634
10.2.4 Spanende Zahnformgebung durch Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide	640
10.2.4.1 Technologische Grundlagen	640
10.2.4.2 Wälzhobeln	645
10.2.4.3 Wälzstoßen	646
10.2.4.4 Wälzschälen	649
10.2.4.5 Wälzfräsen	650
10.2.4.6 Profilfräsen	654
10.2.4.7 Wälzschaben	655
10.2.4.8 Profilräumen	657
10.2.5 Spanende Zahnformgebung durch Werkzeuge mit geometrisch unbestimmter Schneide	658
10.2.5.1 Technologische Grundlagen	658
10.2.5.2 Diskontinuierliches Wälzschleifen mit tellerförmigen Schleifkörpern	663
10.2.5.3 Diskontinuierliches Wälzschleifen mit Doppelkegel-Schleifkörper	664
10.2.5.4 Kontinuierliches Wälzschleifen	666
10.2.5.5 Diskontinuierliches Profilschleifen	668
10.2.5.6 Kontinuierliches Profilschleifen	669
10.2.5.7 Wälzhonen	671
10.2.5.8 Wälzlappen	673
10.2.5.9 Gleitschleifen	674
10.2.6 Prüfen geschliffener Stirnräder auf Schädigung der Randzone	675
10.2.7 Symbole und Symbolerklärungen Abschnitt 10.1 und 10.2	687
10.3 Wärmebehandlung	688
10.3.1 Fertigungsgerechte Wärmebehandlung	689
10.3.1.1 Normalglühen	689
10.3.1.2 Perlitisieren	690
10.3.1.3 Weichglühen	691
10.3.1.4 Spannungsarmglühen	691
10.3.2 Beanspruchungsgerechte Wärmebehandlung	692
10.3.2.1 Vergüten	692
10.3.2.2 Bainitisieren	695
10.3.2.3 Randschichthärten	697
10.3.2.4 Einsatzhärten	703
10.3.2.5 Carbonitrieren	715
10.3.2.6 Nitrieren / Nitrocarburieren	717
10.3.2.7 Borieren	723
10.3.2.8 Beschichten	724
10.4 Symbole und Symbolerklärungen Abschnitt 10.3	730
 Anlagen 1 bis 17	 731
 Literaturverzeichnis	 792
 Sachwortverzeichnis	 821
 Autoren	 837