

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Über die Herausgeber	IX
Autorenverzeichnis	XI
1 Überblick, allgemeine Grundlagen	1
1.1 Entwicklung der Verzahnung.....	1
1.1.1 Entwicklung der Anwendung der Zahnräder/Zahnradgetriebe.....	1
1.1.2 Entwicklung der Verzahnungsgeometrie	7
1.1.3 Entwicklung der Tragfähigkeitsberechnung.....	12
1.1.3.1 Zahnfußbeanspruchung.....	12
1.1.3.2 Zahnflankenbeanspruchung – Grübchen.....	16
1.1.3.3 Fressbeanspruchung	18
1.2 Aufgaben und Einteilung der Getriebe und Verzahnungen.....	19
1.3 Verzahnungsgesetz für Stirnradverzahnungen	25
1.4 Grundbeziehungen.....	31
1.4.1 Übersetzung.....	31
1.4.2 Wirkungsgrad.....	34
1.4.3 Drehmomente.....	35
1.5 Symbole und Symbolerklärungen	36
2 Geometrie der Verzahnung	37
2.1 Geometrie der Geradverzahnung	37
2.1.1 Geometrie der Verzahnung eines Stirnrades	37
2.1.1.1 Evolvente.....	37
2.1.1.2 Bezugsprofil	47
2.1.1.3 Grundgrößen der Verzahnung eines Stirnrades	50
2.1.2 Geometrie der Verzahnungspaarung – Geradverzahnung.....	58
2.2 Geometrie der Schrägverzahnung.....	72
2.2.1 Erzeugung und grundlegende Eigenschaften.....	72
2.2.2 Grundgrößen der Verzahnung eines Stirnrades - Schrägverzahnung.....	81
2.2.3 Geometrie der Verzahnungspaarung – Schrägverzahnung	85
2.3 Ergänzungen zur Geometrie	89
2.3.1 Allgemeines zur Zahnfußgeometrie	89
2.3.2 Zahnfußgeometrie der Außenverzahnung bei Herstellung mit Wälzfräser oder Hobelkamm bei beliebigem Werkzeugprofilwinkel.....	89
2.3.2.1 Zahnfußdicke der Außenverzahnung.....	89
2.3.2.2 Krümmungsradien der Zahnfußübergangskurve der Außenverzahnung bei Herstellung mit Wälzfräser oder Hobelkamm.....	91
2.3.3 Zahnfußgeometrie bei Herstellung mit Schneidrad – Außen- und Innenverzahnung	95
2.3.3.1 Zahnfußdicke	95
2.3.3.2 Krümmungsradien der Zahnfußübergangskurve.....	97
2.3.4 Vergleichende Untersuchungen zur Zahnfußgeometrie.....	97
2.4 Symbole und Symbolerklärungen	99

3 Eingriffsstörungen	101
3.1 Überblick	101
3.2 Eingriffsstörungen bei Außenverzahnungen	101
3.2.1 Eingriffsstörung durch zu kleine Überdeckung	101
3.2.2 Eingriffsstörungen in nicht-evolventischen Bereichen	104
3.3 Eingriffsstörungen bei Innenverzahnungen	106
3.3.1 Vorbetrachtung	106
3.3.2 Eingriffsstörungen im theoretischen Eingriffsgebiet – Zahnfußeingriffsstörungen	108
3.3.2.1 Zahnfußeingriffsstörung am Ritzel	108
3.3.2.2 Zahnfußeingriffsstörung am Schneidrad des Erzeugungsgetriebes	111
3.3.2.3 Zahnfußeingriffsstörung am Hohlrad	111
3.3.3 Eingriffsstörungen außerhalb des regulären Zahneingriffsgebietes	114
3.3.3.1 Zahnkopfeingriffsstörung	114
3.3.3.2 Vorschubeingriffsstörung und radiale Einbaustörung	116
3.3.3.3 Passive Eingriffsstörung am Erzeugungsinnenradpaar	120
3.3.4 Hinweise zur Auslegung von Innenradpaaren und zur Werkzeugauswahl	121
3.3.4.1 Allgemeine Gesichtspunkte für den Entwurf von Innenradpaaren	121
3.3.4.2 Profilverschiebung zur Vermeidung von Eingriffsstörungen an Innenradpaaren	123
3.3.4.3 Wahl des Schneidrades zur Erzeugung der Innenverzahnung	125
3.4 Symbole und Symbolerklärungen	128
4 Evolventische Sonderverzahnungen	129
4.1 Arten und Möglichkeiten	129
4.2 Auslegung	133
4.3 Symbole und Symbolerklärungen	139
5 Tragfähigkeit – Einführung, Ausgangswerte	140
5.1 Schadensfälle	140
5.2 Möglichkeiten des Tragfähigkeitsnachweises	149
5.3 Belastungshäufigkeitsfunktion	151
5.3.1 Belastungsverlauf am Zahn	151
5.3.2 Erfassung des Belastungsverlaufes im Lastkollektiv	152
5.3.3 Experimentelle Ermittlung von Lastkollektiven	153
5.3.4 Erfassung von Lastkollektiven in der Tragfähigkeitsberechnung	155
5.3.5 Typische Lastkollektive, Besonderheiten	159
5.4 Symbole und Symbolerklärungen	161
6 Tragfähigkeit / Laufverhalten Außenverzahnung und Innenverzahnung	162
6.1 Geschwindigkeiten	162
6.1.1 Gleitgeschwindigkeit	162
6.1.2 Spezifisches Gleiten	165
6.1.3 Gleitfaktor	166
6.1.4 Summengeschwindigkeit	167
6.2 Zahnsteifigkeit	167
6.2.1 Grundlegendes	167
6.2.2 Zahnsteifigkeitsanteile	168
6.2.3 Zahnsteifigkeitsberechnung	169
6.2.4 Näherungsweise Zahnsteifigkeitsberechnung nach ISO 6336-1 (DIN 3990-1)	170
6.2.5 Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.2	171
6.3 Kräfte am Zahn	172
6.3.1 Grundsätzliches	172
6.3.2 Kräfte am Zahn aus Nutzleistung	172

6.3.2.1	Kraftzerlegung am Zahn	172
6.3.2.2	Definition der Nutzleistung für die Zahnbelastung	177
6.3.3	Äußere dynamische Zusatzkräfte	177
6.3.4	Innere dynamische Zusatzkräfte	181
6.3.4.1	Ursachen und Verlauf	181
6.3.4.2	Mechanisches Ersatzmodell	184
6.3.4.3	Mathematisches Berechnungsmodell	188
6.3.4.4	Parameter des Schwingungssystems	189
6.3.4.5	Schwingungsberechnung	193
6.3.4.6	Besonderheiten des Schwingungsverhaltens	195
6.3.4.7	Experimentelle Ermittlung	196
6.3.4.8	Ermittlung des Dynamikfaktors K_v entsprechend ISO 6336-1, DIN 3990-1	197
6.3.5	Resultierende Belastung - praktisches Vorgehen, Vernachlässigungen	201
6.3.6	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.3	202
6.4	Lastverteilung bei Verzahnungen	203
6.4.1	Grundproblem	203
6.4.2	Allgemeiner Berechnungsansatz	204
6.4.3	Verfahren der Einflusszahlen	205
6.4.3.1	Grundbeziehungen	205
6.4.3.2	Ermittlung der Verformungseinflusszahlen	206
6.4.3.3	Berechnung der Lastverteilung und Analyse von Besonderheiten	215
6.4.4	Erfassung der Lastverteilung für die Zahnflanken- und Zahnfußtragfähigkeits- berechnung durch Lastverteilungsfaktoren	219
6.4.4.1	Stirnfaktor $K_{H\alpha}$	220
6.4.4.2	Breitenfaktor $K_{H\beta}$	221
6.4.4.3	Vereinfachte Lastverteilungsfaktoren	222
6.4.4.4	Ermittlung der Kontaktlinienabweichung	226
6.4.4.5	Ermittlung der wirksamen Kontaktlinienabweichung für Berechnungen	229
6.4.5	Maßnahmen zur Verbesserung des Breitenlastverhaltens	230
6.4.6	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.4	236
6.5	Tragfähigkeitsnachweis	237
6.5.1	Zahnflankentragfähigkeit - Grübchen und Schäden bei Maximalbeanspruchung	237
6.5.1.1	Grundlagen	237
6.5.1.2	Zahnflankenpressung	241
6.5.1.3	Grübchenfestigkeit und Einflüsse	246
6.5.1.4	Sicherheit gegen Grübchenbildung; zulässige Beanspruchung	248
6.5.1.5	Sicherheit gegen bleibende Verformung, Anriss oder Sprödbbruch der Randschicht bei maximaler Belastung	249
6.5.2	Zahnfußtragfähigkeit	250
6.5.2.1	Grundlagen - Kerbwirkung	251
6.5.2.2	Zahnfußspannung bei Vollrädern	263
6.5.2.3	Zahnfußfestigkeit und Einflüsse	270
6.5.2.4	Sicherheit gegen Ermüdungsbruch	275
6.5.2.5	Sicherheit gegen bleibende Verformung Anriss oder Sprödbbruch	276
6.5.2.6	Zahnfußtragfähigkeit bei elastisch gestaltetem Zahnkranz	278
6.5.3	Praktisches Vorgehen beim Grundnachweis der Tragfähigkeit	294
6.5.3.1	Vorgehen beim Nachweis der Flankentragfähigkeit - Grübchen und Schäden bei Maximalbelastung (Methodischer Ablauf)	294
6.5.3.2	Zahnfußtragfähigkeit - Ermüdungsbruch und Schäden bei Maximalbelastung (Methodischer Ablauf)	297
6.5.4	Schmierfilmdicke	301
6.5.4.1	Berechnung der Schmierfilmdicke	301

6.5.4.2	Zahnflankenschäden und Schmierstoffeinfluss.....	304
6.5.5	Fresstragfähigkeit.....	305
6.5.5.1	Einführung	305
6.5.5.2	Schadensbeschreibung und Einflussgrößen zur Fresstragfähigkeit.....	305
6.5.5.3	Ansätze zur Berechnung der Fresstragfähigkeit.....	306
6.5.5.4	Fresstragfähigkeit nach der Blitztemperatur.....	307
6.5.5.5	Fresstragfähigkeit nach der Integraltemperatur.....	312
6.5.5.6	Praktische Berechnung der Fresstragfähigkeit nach dem Integraltemperaturverfahren.....	313
6.5.5.7	Testverfahren zur Fresstragfähigkeit.....	317
6.5.6	Graufleckentragfähigkeit	319
6.5.7	Verschleißtragfähigkeit	323
6.5.8	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.5.....	326
6.6	Leistungsverluste/Wirkungsgrad, Getriebeerwärmung, Schmierung	330
6.6.1	Leistungsverluste	330
6.6.1.1	Gesamtverluste - Übersicht.....	330
6.6.1.2	Verzahnungsverluste.....	330
6.6.1.3	Lagerverluste.....	336
6.6.2	Getriebewirkungsgrad	341
6.6.3	Wärmebilanz - Wärmetragfähigkeit.....	342
6.6.3.1	Vorbetrachtungen	342
6.6.3.2	Wärmeabgabe durch das Gehäuse	344
6.6.3.3	Wärmeabgabe durch den Kühlkreislauf.....	345
6.6.3.4	Ergänzungen zur Wärmebilanz	345
6.6.4	Schmierung und Kühlung	356
6.6.4.1	Schmierstoffauswahl.....	356
6.6.4.2	Schmier- und Kühlsysteme.....	360
6.6.5	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.6.....	365
6.7	Geräuschverhalten	367
6.7.1	Grundlagen.....	367
6.7.1.1	Einführung und wichtige akustische Begriffe	367
6.7.1.2	Rechenoperationen mit Pegelwerten.....	372
6.7.2	Mechanische Geräuschenstehung	373
6.7.2.1	Grundgleichung, Schallausbreitung.....	373
6.7.2.2	Körperschallanregung	375
6.7.2.3	Erregerfrequenzen.....	378
6.7.2.4	Übertragungs- und Abstrahlverhalten von Getriebegehäusen.....	379
6.7.2.5	Bestimmung der Gesamtschallleistung	384
6.7.3	Messtechnische Ermittlung der Schallleistung.....	384
6.7.3.1	Luftschall-Messverfahren.....	384
6.7.3.2	Körperschall-Messverfahren.....	386
6.7.3.3	Normen	386
6.7.4	Schallleistungspegel von Zahnradgetrieben.....	388
6.7.4.1	Erwartungswerte nach VDI 2159 [6.7/121].....	388
6.7.4.2	Vergleiche mit weiteren Literaturquellen.....	389
6.7.4.3	Einfluss geräuschrelevanter Parameter.....	390
6.7.4.4	Grenzwerte der Schallemission	391
6.7.5	Beispiele von Schallleistungspegeln diverser Maschinen	392
6.7.6	Konstruktive Maßnahmen zur Geräuschminderung	393
6.7.6.1	Vorschriften	393
6.7.6.2	Grundprinzipien zur Geräuschminderung	394
6.7.6.3	Beeinflussung der Anregung des Zahneingriffs bei Stirnradverzahnungen ..	395

6.7.6.4	Beeinflussung der Körperschallanregung an der Lagerstelle	401
6.7.6.5	Gestaltung des Getriebegehäuses	404
6.7.6.6	Schallschutzkapseln	410
6.7.6.7	Antischall	412
6.7.7	Körperschall und Diagnose	412
6.7.8	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.7	414
7	Auslegung von Verzahnungen und Getrieben	416
7.1	Stufenzahl und Aufteilung der Gesamtübersetzung	416
7.1.1	Vorbetrachtungen	416
7.1.2	Auslegung für minimale Masse	416
7.2	Überschlägige Bestimmung der Abmessungen	420
7.2.1	Überschlagskriterium Zahnflankentragfähigkeit (Grübchen)	420
7.2.2	Überschlagskriterium Zahnfußtragfähigkeit	422
7.3	Wahl und Aufteilung der Profilverschiebung	423
7.3.1	Kriterien und Tendenzen	423
7.3.2	Empfehlungen	431
7.4	Werkstoffauswahl - Festigkeitswerte	435
7.4.1	Grundlagen der Werkstoffwahl und Grundwerte der Werkstofffestigkeit	435
7.4.1.1	Allgemeine Grundlagen	437
7.4.1.2	Stahlauswahl nach der Härtebarkeit	440
7.4.2	Werkstoffe für Zahnräder ohne Randschichtverfestigung - Grundlagen	444
7.4.2.1	Zahnräder aus unlegierten Stählen sowie Stahlguss und unlegierten Gusseisensorten im Gusszustand	444
7.4.2.2	Zahnräder aus bainitischem Gusseisen	450
7.4.2.3	Zahnräder aus AFP-Stählen	451
7.4.2.4	Zahnräder aus vergüteten Stählen und aus vergüteten Eisengusswerkstoffen	452
7.4.3	Werkstoffe für Zahnräder mit Randschichtverfestigung - Grundlagen	454
7.4.3.1	Randschichtgehärtete Zahnräder	454
7.4.3.2	Einsatzgehärtete Zahnräder	456
7.4.3.3	Carbonitrierte Zahnräder	466
7.4.3.4	Aufgestickte Zahnräder	466
7.4.3.5	Nitrierte/Nitrocarburierte Zahnräder	467
7.4.3.6	Borierte Zahnräder	471
7.4.3.7	Beschichtete Zahnräder	472
7.4.3.8	Zahnräder aus speziellen Eisenwerkstoffen	472
7.4.4	Festigkeitswerte für Zahnräder	473
7.4.4.1	Zahnräder aus unlegierten Stählen sowie Stahlguss und unlegierten Gusseisensorten	473
7.4.4.2	Zahnräder aus bainitischem Gusseisen	473
7.4.4.3	Zahnräder aus AFP-Stählen	474
7.4.4.4	Zahnräder aus vergüteten Stählen und vergüteten Eisengusswerkstoffen	474
7.4.4.5	Randschichtgehärtete Zahnräder	477
7.4.4.6	Einsatzgehärtete Zahnräder	480
7.4.4.7	Carbonitrierte Zahnräder	487
7.4.4.8	Aufgestickte Zahnräder	487
7.4.4.9	Nitrierte/Nitrocarburierte Zahnräder	488
7.4.4.10	Gesinterte Zahnräder	495
7.4.4.11	Zahnräder aus thermoplastischen Werkstoffen	497
7.4.5	Vergleich der Dauerfestigkeitswerte	497
7.4.6	Wöhlerlinien	501
7.4.7	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 7.4	501

8	Sicherung der Qualität von Stirnradverzahnungen	503
8.1	Einführung	503
8.1.1	Normung	503
8.1.2	Toleranzsystem	503
8.1.3	Getriebe-Passsystem	506
8.2	Messtechnische Grundlagen	506
8.2.1	Grenzabweichungen, Grenzabmaße und Toleranzen	506
8.2.2	Istmaße und Istabweichungen	507
8.2.3	Bezogenheit von Messgrößen bzw. Messverfahren	507
8.2.4	Unsicherheit der Messergebnisse	508
8.3	Qualitätskenngrößen	509
8.3.1	Flankenabweichungen	509
8.3.1.1	Vorbemerkungen	509
8.3.1.2	Abweichungen des Stirnprofils	512
8.3.1.3	Abweichungen der Flankenlinie	514
8.3.1.4	Abweichungen der Erzeugenden	516
8.3.1.5	Fräseralmessung	516
8.3.1.6	Abweichungen der Flankenfläche	517
8.3.1.7	Messung modifizierter Flanken	518
8.3.1.8	Schränkung	520
8.3.1.9	Welligkeit	521
8.3.1.10	Toleranzfeld (K-Diagramm)	522
8.3.2	Teilungsabweichungen	522
8.3.2.1	Kreisteilungsabweichungen	522
8.3.2.2	Eingriffsteilungsabweichung	524
8.3.3	Rundlaufabweichung	525
8.4	Passkenngrößen	525
8.4.1	Flankenspiel	525
8.4.2	Zahndicke	526
8.4.3	Zahndickenprüfmaße	527
8.4.3.1	Vorbemerkungen	527
8.4.3.2	Zahnweite	528
8.4.3.3	Radiale Prüfmaße für die Zahndicke	529
8.4.3.4	Sehnen	531
8.4.3.5	Zweiflankenwälz-Achsabstand	531
8.4.3.6	Kopfkreisdurchmesser bei überschrittenen Zylinderrädern	532
8.5	Wälzabweichungen	532
8.5.1	Vorbemerkungen	532
8.5.2	Einflanken-Wälzprüfung	532
8.5.3	Zweiflankenwälzprüfung	534
8.5.4	Abweichungen an Radpaaren im Getriebe	534
8.5.4.1	Achslageabweichungen des Radpaares	534
8.5.4.2	Wälzabweichung von Werkradpaaren	535
8.6	Tragbild	535
8.7	Rauheitsmessung	536
8.8	Geräusch	537
8.9	Einsatz von Verzahnungslehren	537
8.10	Symbole und Symbolerklärungen	537
9	Zeichnungsangaben	539
9.1	Überblick	539
9.2	Geometrische Angaben	539

9.3	Angaben zur Wärmebehandlung und zum Beschichten	543
9.3.1	Angaben zur Wärmebehandlung.....	543
9.3.2	Angaben zum Beschichten	547
9.3.2.1	Hartstoffbeschichten.....	550
9.3.2.2	Galvanisch aufgebrachte Schichten.....	550
9.3.2.3	Chemisch aufgebrachte Schichten.....	550
9.4	Symbole und Symbolerklärungen	550
10	Fertigung von Stirnradverzahnungen.....	551
10.1	Allgemeiner Fertigungsprozess für Stirnräder.....	551
10.2	Allgemeine Gliederung der Verfahren der Zahnformgebung.....	553
10.2.1	Verfahren der Zahnformgebung.....	553
10.2.2	Urformende Herstellung von Stirnrädern.....	554
10.2.3	Umformende und zerteilende Zahnformgebung	555
10.2.4	Spanende Zahnformgebung durch Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide	560
10.2.4.1	Technologische Grundlagen.....	560
10.2.4.2	Wälzhobeln.....	565
10.2.4.3	Wälzstoßen.....	566
10.2.4.4	Wälzschälen.....	569
10.2.4.5	Wälzfräsen.....	570
10.2.4.6	Profilfräsen	574
10.2.4.7	Wälzschaben.....	575
10.2.4.8	Profilräumen	577
10.2.5	Spanende Zahnformgebung durch Werkzeuge mit geometrisch unbestimmter Schneide	578
10.2.5.1	Technologische Grundlagen.....	578
10.2.5.2	Diskontinuierliches Wälzschleifen mit tellerförmigen Schleifkörpern	582
10.2.5.3	Diskontinuierliches Wälzschleifen mit Doppelkegel-Schleifkörper	583
10.2.5.4	Kontinuierliches Wälzschleifen	585
10.2.5.5	Diskontinuierliches Profilschleifen	587
10.2.5.6	Kontinuierliches Profilschleifen	589
10.2.5.7	Wälzhonen.....	590
10.2.5.8	Wälzlappen.....	592
10.2.5.9	Gleitschleifen.....	593
10.2.6	Prüfen geschliffener Stirnräder auf Schädigung der Randzone	594
10.2.7	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 10.1 und 10.2.....	605
10.3	Wärmebehandlung.....	605
10.3.1	Fertigungsgerechte Wärmebehandlung.....	606
10.3.1.1	Normalglühen	607
10.3.1.2	Perlitisieren.....	608
10.3.1.3	Weichglühen.....	608
10.3.1.4	Spannungsarmglühen.....	609
10.3.2	Beanspruchungsgerechte Wärmebehandlung.....	609
10.3.2.1	Vergüten.....	610
10.3.2.2	Bainitisieren.....	613
10.3.2.3	Randschichthärten	614
10.3.2.4	Einsatzhärten	620
10.3.2.5	Carbonitrieren	631
10.3.2.6	Nitrieren/Nitrocarburieren	633
10.3.2.7	Borieren.....	639
10.3.2.8	Beschichten	639
10.3.3	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 10.3	645

Anlagenverzeichnis	646
Literaturverzeichnis	710
Sachwortverzeichnis	742