

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	VII
<b>Über die Herausgeber</b> .....	IX
<b>Autorenverzeichnis</b> .....	XI
<b>1 Überblick, allgemeine Grundlagen</b> .....	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
<b>2 Geometrie der Verzahnung</b> .....	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

<b>3 Eingriffsstörungen</b> .....	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
<b>4 Evolventische Sonderverzahnungen</b> .....	129
4.1 Arten und Möglichkeiten.....	129
4.2 Auslegung.....	133
4.3 Symbole und Symbolerklärungen.....	139
<b>5 Tragfähigkeit – Einführung, Ausgangswerte</b> .....	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
<b>6 Tragfähigkeit / Laufverhalten Außenverzahnung und Innenverzahnung</b> .	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 Sprödbruch 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 Sprödbruch.....	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 Schalleistungspegel 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 Schalleistungspegeln 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
<b>7</b>	<b>Auslegung von Verzahnungen und Getrieben .....</b>	<b>416</b>
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 Härbarkeit .....	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

<b>8</b>	<b>Sicherung der Qualität von Stirnradverzahnungen</b> .....	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 überschnittenen 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
<b>9</b>	<b>Zeichnungsangaben</b> .....	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 aufgebraachte Schichten.....	550
9.3.2.3	Chemisch aufgebraachte Schichten.....	550
9.4	Symbole und Symbolerklärungen .....	550
<b>10</b>	<b>Fertigung von Stirnradverzahnungen.....</b>	<b>551</b>
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

<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>646</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>710</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>742</b>