

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Überblick, allgemeine Grundlagen .....</b>	<b>15</b>
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
<b>2</b>	<b>Geometrie der Verzahnung .....</b>	<b>54</b>
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
<b>3</b>	<b>Eingriffsstörungen .....</b>	<b>125</b>
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 Erzeugungsgetriebes .....	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	<b>Evolventische Sonderverzahnungen .....</b>	<b>158</b>
4.1	Arten und Möglichkeiten .....	158
4.2	Auslegung .....	162
4.3	Symbole und Symbolerklärungen .....	170
5	<b>Tragfähigkeit – Einführung, Ausgangswerte .....</b>	<b>171</b>
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	<b>Tragfähigkeit / Laufverhalten – Außenverzahnung und Innenverzahnung .....</b>	<b>195</b>
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 Geräuscentstehung .....	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 Gesamtschallleistung .....	448
6.7.3	Messtechnische Ermittlung der Schallleistung .....	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

<b>7</b>	<b>Auslegung von Verzahnungen und Getrieben .....</b>	<b>483</b>
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 Härtebarkeit .....	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
<b>8</b>	<b>Sicherung der Qualität von Stirnradverzahnungen .....</b>	<b>581</b>
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	Grenzabweichungen, Grenzabmaße 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 überschrittenen 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	<b>Zeichnungsangaben</b> .....	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 aufgetragene Schichten .....	628
9.3.2.3	Chemisch aufgetragene Schichten .....	629
9.4	Symbole und Symbolerklärungen .....	629

<b>10 Fertigung von Stirnradverzahnungen</b>	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
<b>Anlagen 1 bis 17</b>	731
<b>Literaturverzeichnis</b>	792
<b>Sachwortverzeichnis</b>	821
<b>Autoren</b>	837