

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Geschichte des Zahnrades .....	2
1.2 Einteilung der Getriebetechnik .....	5
1.3 Gestufte Zahnradgetriebe .....	6
<b>2 Grundlagen der Verzahnung</b> .....	<b>11</b>
2.1 Das Verzahnungsgesetz .....	12
2.2 Stirnradverzahnungen .....	14
2.2.1 Arten der Stirnradverzahnungen .....	14
2.2.1.1 Zykloidenverzahnungen .....	15
2.2.1.2 Triebstockverzahnungen .....	16
2.2.1.3 Kreisbogenverzahnungen .....	17
2.2.1.4 Wildhaber-Novikov-Verzahnungen .....	17
2.2.1.5 Evolventenverzahnungen .....	18
2.2.2 Schrägverzahnungen .....	19
2.2.3 Erzeugungsprinzip von Evolventenverzahnungen .....	21
2.2.3.1 Die Evolventenfunktion .....	21
2.2.3.2 Das theoretische Herstellprinzip des Evolventenprofils .....	22
2.2.3.3 Das Bezugsprofil .....	23
2.2.3.4 Das praktische Herstellprinzip des Evolventenprofils .....	25
2.2.3.5 Räumliche Erzeugung des Flankenprofils .....	26
2.2.4 Geometrische Größen der Evolventenverzahnung .....	27
2.2.4.1 Modul und Teilung .....	27
2.2.4.2 Zähnezahzahl und Übersetzungsverhältnis .....	29
2.2.4.3 Eingriffswinkel und Überdeckungsgrad .....	29
2.2.4.4 Durchmesser .....	32
2.2.4.5 Profilverschiebung und Achsabstand .....	35
2.2.4.6 Lückenweiten, Zahndicken und Zahnweiten .....	40
2.2.5 Kontaktbedingungen zylindrischer Stirnräder .....	45

2.3	Kegelradgetriebe	46
2.3.1	Zahnprofile und Erzeugungsprinzip	47
2.3.2	Flankenlinie	51
2.3.3	Geometrische Größen	52
2.3.3.1	Mittlerer Modul und Spiralwinkel	54
2.3.3.2	Eingriffswinkel und Profilüberdeckung	55
2.3.3.3	Zahnhöhenverlauf, Zahndicke und Zahnweite	56
2.3.3.4	Profilverschiebung	58
2.3.3.5	Besonderheiten der Hypoidverzahnung	59
2.3.4	Kontaktbedingungen von Kegelradverzahnungen	61
2.4	Beveloidverzahnungen	61
2.4.1	Erzeugungsprinzip von Beveloidverzahnungen	63
2.4.2	Geometrische Größen von Beveloids	65
2.4.2.1	Konuswinkel	65
2.4.2.2	Eingriffs-, Schrägungswinkel und Überdeckungsgrad	66
2.4.3	Kontaktbedingungen von Beveloidverzahnungen	69
<b>3</b>	<b>Getriebeentwicklung</b>	<b>79</b>
3.1	Vorauslegung von Zahnradgetrieben	80
3.1.1	Konzeptionierung von Zahnradgetrieben	83
3.1.2	Vordimensionierung von Stirnradstufen	88
3.1.3	Vordimensionierung von Planetenstufen	98
3.2	Optimierung der Makrogeometrie	105
3.2.1	Akustische Optimierung durch Hochverzahnungen	106
3.2.2	Tragfähigkeitsorientierte Auslegung asymmetrischer Verzahnungen	112
3.2.3	Auslegung wirkungsgradoptimierter Low-Loss-Verzahnungen	116
3.2.4	Rechnergestützte Makrogeometrieoptimierung	118
3.3	Auslegung der Verzahnungsmikrogeometrie	120
3.3.1	Arten von Korrekturen	122
3.3.2	Topografie-separation durch Polynome	126
3.3.3	Auslegung funktionaler Modifikationen	127
3.3.3.1	Variantenrechnung	127
3.3.3.2	Berücksichtigung verfahrensbedingter Verschränkungen in der Mikrogeometrieauslegung	129
3.3.3.3	Toleranzfeldbasierte Mikrogeometrieoptimierung	130
3.3.3.4	Anwendungsbeispiel für toleranzfeldbasierte Mikrogeometrieauslegung	133
3.3.4	Inverse Ermittlung optimaler Sollkorrekturen	134
3.3.5	FE-basierte Auslegung von Kopfrücknahmen	136
3.4	Auslegung von Beveloids	139

3.5	Auslegung von Kegelradverzahnungen .....	145
3.5.1	Bestimmung der Tragfähigkeit .....	146
3.5.2	Auslegung der Mikrogeometrie .....	148
<b>4</b>	<b>Herstellverfahren .....</b>	<b>159</b>
4.1	Prozessketten und Wärmebehandlung .....	161
4.1.1	Prozessketten der Zahnradfertigung .....	161
4.1.2	Übliche Zahnradwerkstoffe .....	163
4.1.3	Wärmebehandlung von Zahnradern .....	164
4.1.3.1	Glühverfahren .....	165
4.1.3.2	Härten und Vergüten .....	167
4.1.3.2.1	Thermische Verfahren .....	167
4.1.3.2.2	Thermochemische Verfahren .....	168
4.1.3.2.3	Härteverzug .....	173
4.2	Vorverzahnen .....	176
4.2.1	Anforderungen an das Vorverzahnen .....	176
4.2.2	Schneidstoff-Schicht-Systeme .....	179
4.2.3	Wälzverfahren .....	185
4.2.3.1	Wälzhobeln .....	185
4.2.3.2	Wälzfräsen .....	186
4.2.3.2.1	Prozesskinematik .....	186
4.2.3.2.2	Achsen und Aufbau einer Wälzfräsmaschine .....	189
4.2.3.2.3	Werkzeuggeometrie und -gestaltung .....	190
4.2.3.2.4	Spangeometrie und Bauteilabweichungen .....	192
4.2.3.2.5	Prozessanalyse im Modellversuch .....	196
4.2.3.3	Wälzstoßen .....	198
4.2.3.4	Wälzschälen .....	202
4.2.4	Formschneidverfahren .....	206
4.2.4.1	Formfräsen .....	206
4.2.4.2	Räumen .....	209
4.2.5	Verfahrensvergleich .....	212
4.2.6	Entgraten und Anfasen .....	213
4.3	Weichfeinbearbeitung mit definierter Schneide .....	216
4.3.1	Anforderungen an die Weichfeinbearbeitung .....	216
4.3.2	Zahnradschaben .....	218
4.3.3	Fertigwälzfräsen .....	222
4.4	Hartfeinbearbeitung .....	226
4.4.1	Hartfeinbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide .....	227
4.4.1.1	Schälwälzfräsen .....	227
4.4.1.2	Schälwälzstoßen .....	228
4.4.1.3	Hartwälzschälen .....	229

4.4.2	Hartfeinbearbeitung mit geometrisch unbestimmten Schneiden .....	229
4.4.2.1	Der Abrichtprozess .....	230
4.4.2.2	Aufbau und Zusammensetzung von Werkzeugen mit nicht definierter Schneide .....	234
4.4.2.3	Verfahren zur Hartfeinbearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide .....	239
4.4.2.3.1	Diskontinuierliches Profilschleifen .....	239
4.4.2.3.2	Kontinuierliches Profilschleifen .....	245
4.4.2.3.3	Diskontinuierliches Wälzschleifen (Teilwälzschleifen) ...	246
4.4.2.3.4	Kontinuierliches Wälzschleifen .....	248
4.4.2.3.5	Verzahnungshonen .....	254
4.5	Erzeugung von Zahnflankenmodifikationen .....	257
4.5.1	Erzeugung von Profilmodifikationen .....	258
4.5.2	Erzeugung von Flankenmodifikationen .....	259
4.5.3	Entstehung von verfahrensbedingten Verschränkungen .....	260
4.5.3.1	Verfahrensbedingte Verschränkung beim Profilschleifen .....	261
4.5.3.2	Verfahrensbedingte Verschränkung beim kontinuierlichen Wälzschleifen .....	263
4.6	Alternative Fertigungsverfahren .....	264
4.6.1	Endkonturnahe Fertigungsverfahren .....	264
4.6.1.1	Querwalzen von Verzahnungen .....	265
4.6.1.2	Pulvermetallurgische Herstellung von Zahnrädern .....	267
4.6.1.3	Feinschneiden .....	271
4.6.1.4	Präzisionsschmieden .....	275
4.6.2	5-Achs-Fräsen von Verzahnungen .....	278
4.7	Qualitätsprüfung und Analyse fertigungsbedingter Produkteigenschaften .....	283
4.7.1	Motivation zur Bauteilprüfung .....	283
4.7.2	Geometrische Prüfung von Verzahnungen .....	283
4.7.2.1	Erfassung der makrogeometrischen Verzahnungsabweichungen ...	284
4.7.2.2	Erfassung der mikrogeometrischen Abweichung .....	300
4.7.3	Metallografische Analyse von Verzahnungen .....	307
4.7.3.1	Zerstörungsfreie Prüfverfahren .....	307
4.7.3.2	Zerstörende Prüfverfahren .....	319
4.8	Kegelradherstellung .....	331
4.8.1	Diskontinuierliches Kegelradfräsen .....	332
4.8.2	Kegelradschleifen .....	333
4.8.3	Kontinuierliches Kegelradfräsen .....	334
4.8.4	Kegelradlappen .....	336
4.8.5	Kegelradverzahnmaschinen .....	337
4.8.5.1	Mechanische Kegelradfräsmaschinen .....	337
4.8.5.2	6-Achs-Universal-Fräsmaschinen .....	339

4.8.6	Der Closed Loop .....	341
4.8.7	Analogieversuche für das Kegelradfräsen .....	342
<b>5</b>	<b>Untersuchung von Zahnradgetrieben .....</b>	<b>363</b>
5.1	Beanspruchungs- und Schadensformen an Zahnrädern .....	364
5.1.1	Beanspruchung des Zahnfußes .....	365
5.1.2	Beanspruchung der Zahnflanke .....	367
5.1.2.1	Pressung im Zahnflankenkontakt .....	368
5.1.2.2	Beanspruchung in Folge der Kinematik .....	370
5.1.3	Zahnflankenschäden .....	374
5.1.3.1	Graufleckigkeit .....	375
5.1.3.2	Grübchenbildung .....	377
5.1.3.3	Fressen .....	380
5.1.3.4	Abrasivverschleiß .....	381
5.1.3.5	Zahnflankenbruch .....	383
5.1.4	Zahnfußschäden .....	384
5.1.4.1	Gewaltbruch .....	384
5.1.4.2	Dauerbruch .....	385
5.2	Einflussgrößen auf die Beanspruchbarkeit von Zahnrädern .....	387
5.2.1	Werkstoff .....	387
5.2.2	Schmierstoff .....	390
5.2.3	Oberflächengestalt .....	392
5.2.4	Randzoneneigenschaften .....	397
5.3	Untersuchung der Zahnradtragfähigkeit .....	399
5.3.1	Prüfstandkonzepte - Laufversuch .....	401
5.3.1.1	Zwei-Wellen-Verspannungsprüfstände .....	402
5.3.1.2	Drei-Wellen-Verspannungsprüfstände .....	404
5.3.1.3	Standardisierte Prüfverzahnungen für Tragfähigkeitsuntersuchungen .....	406
5.3.2	Prüfstandskonzepte - Analogieversuch .....	409
5.3.2.1	Zahnfußtragfähigkeit .....	410
5.3.2.2	Zahnflankentragfähigkeit .....	414
5.3.3	Schadenskriterien und Vorgehensweisen .....	418
5.3.4	Auswertemethoden für Zahnradtragfähigkeitsuntersuchungen .....	420
5.3.4.1	Statistische Grundlagen zur Zahnradtragfähigkeitsauswertung ....	422
5.3.4.2	Wöhlerdiagramm: Auswertung der Dauerfestigkeit .....	425
5.3.4.3	Wöhlerdiagramm: Auswertung der Zeitfestigkeit .....	430
5.3.4.4	Quantifizierung der Schmierstofftragfähigkeit .....	432
5.3.5	Übertragbarkeit zwischen Lauf- und Analogieversuch .....	440
5.3.5.1	Zahnfußtragfähigkeit .....	440
5.3.5.2	Zahnflankentragfähigkeit .....	444

5.4 Grundlagen der Getriebeakustik .....	448
5.4.1 Bewertungskenngrößen .....	449
5.4.1.1 Spektrale Zusammensetzung des Schalls .....	449
5.4.1.2 Kennwerte der Technischen Akustik .....	450
5.4.1.3 Zahneingriffsfrequenz und Ordnungsspektrum .....	453
5.4.1.4 Spektralanalyse von Getriebegeräuschen .....	454
5.4.2 Getriebegeräusche .....	456
5.4.2.1 Objektive Einteilung von Getriebegeräuschen .....	457
5.4.2.2 Subjektive Bewertung .....	459
5.4.3 Anregungsmechanismen im Zahneingriff .....	467
5.4.3.1 Parameteranregung .....	469
5.4.3.2 Stoßanregung .....	471
5.4.3.3 Weganregung .....	472
5.4.3.4 Einfluss von geometrischen Abweichungen .....	472
5.4.4 Maßnahmen zur Reduzierung der Geräuschabstrahlung .....	478
5.5 Untersuchung der Getriebeakustik .....	481
5.5.1 Untersuchungsmethoden .....	482
5.5.1.1 Einflankenwälzprüfung .....	482
5.5.1.2 Zweiflankenwälzprüfung .....	486
5.5.1.3 Drehbeschleunigungsmessung .....	487
5.5.1.4 Körperschallmessung .....	495
5.5.1.5 Luftschallmessung .....	499
5.5.1.6 Sondermessverfahren .....	507
5.5.1.7 Alternative Methoden zur Messung der Geräuschemission .....	515
5.5.2 Prüfstandskonzepte .....	519
5.5.2.1 Radsatzuntersuchung .....	520
5.5.2.2 Gesamtgetriebeuntersuchung .....	527
5.6 Wirkungsgradbestimmung von Getrieben .....	529
5.6.1 Verlustleistungsmessung .....	531
5.6.2 Leistungsdifferenzmessung .....	533
5.6.3 Reibkraftmessung im Analogieversuch .....	535
<b>6 Simulationstechnik .....</b>	<b>555</b>
6.1 Vorgehensweise zur Modellbildung .....	555
6.2 Fertigungssimulation .....	557
6.2.1 Grundlagen von Fertigungssimulationen .....	558
6.2.1.1 Werkzeug .....	559
6.2.1.2 Maschinenkinematik .....	560
6.2.2 Geometrieberechnung .....	563
6.2.3 Durchdringungsrechnung .....	566
6.2.3.1 Spannungskenngrößen .....	568

6.2.3.2	Spannungsdickenberechnung .....	569
6.2.3.3	Kraftberechnung .....	571
6.2.3.4	FE-Simulation der Spanbildung .....	573
6.2.4	Simulationsbasierte Fertigungs- und Prozessauslegung .....	575
6.2.4.1	Verschleißanalyse für die spanenden Fertigung .....	575
6.2.4.2	Bestimmung von charakteristischen Fertigungsabweichungen ....	578
6.2.4.3	Bezogenes Zeitspannungsvolumen und Kraftberechnung für das kontinuierliche Wälzschleifen .....	579
6.3	Zahnkontaktanalyse .....	582
6.3.1	FE-basierte Zahnkontaktanalyse .....	583
6.3.1.1	Geometrievorgabe .....	585
6.3.1.2	Kontaktfindung und lastfreie Verzahnungskennwerte .....	585
6.3.1.3	FE-Strukturgenerierung .....	587
6.3.1.4	Verschiebungseinflusszahlen .....	587
6.3.1.5	Mathematisches Federmodell .....	589
6.3.1.6	Lastverteilung und Kennwerte unter Last .....	592
6.3.2	Auslegung mit der Zahnkontaktanalyse am Beispiel der Zahnfußoptimierung .....	595
6.3.3	Mikrogeometrische Kontaktanalyse mit realen Oberflächenstrukturen ....	598
6.4	Höherwertige Berechnungsverfahren für die Zahnradtragfähigkeit .....	601
6.4.1	Methode zur lokalen Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit .....	604
6.4.1.1	Vergleichsspannung und Überlebenswahrscheinlichkeit für den Zahnfuß .....	605
6.4.1.2	Erweiterung der Methode um eine Fehlstellenanalyse .....	609
6.4.1.3	Validierung und Anwendung der Methode .....	611
6.4.2	Methode zur lokalen Wälzfestigkeitsberechnung .....	612
6.4.2.1	Volumen- und Oberflächenbeanspruchung im Wälzkontakt .....	614
6.4.2.2	Werkstofffestigkeit im Wälzkontakt .....	615
6.4.2.3	Vergleichsspannung und Überlebenswahrscheinlichkeit für den Wälzkontakt .....	617
6.4.2.4	Validierung der lokalen Wälzfestigkeitsberechnung .....	619
6.5	Dynamik des Zahneingriffs .....	622
6.5.1	Mathematische Beschreibung der Anregungsmechanismen im Zahneingriff .....	622
6.5.1.1	Der Einmassenschwinger als vereinfachtes Ersatzmodell von Verzahnung und Zahnradpaar .....	623
6.5.1.2	Parameterregung .....	624
6.5.1.3	Weganregung .....	627
6.5.1.4	Stoßanregung .....	629
6.5.1.5	Reibkraftanregung .....	631
6.5.1.6	Kippmomente .....	631
6.5.1.7	Rechnerische Abbildung des Dämpfungsverhaltens .....	632

6.5.2	Aufbau von Schwingungsmodellen .....	633
6.5.2.1	Ziele und Aufgaben der Modellbildung .....	633
6.5.2.2	Abbildung von Strukturkomponenten .....	635
6.5.2.3	Dynamikmodell eines einstufigen Getriebes .....	638
6.5.3	Entwicklung und Berechnung der mathematischen Ersatzmodelle .....	641
6.5.4	Methoden der Körperschall- und Luftschallberechnung .....	642
6.5.4.1	Zahnkraftpegel .....	643
6.5.4.2	Methoden der Körperschallberechnung .....	644
6.5.4.3	Methoden der Luftschallberechnung .....	645
<b>Index</b>	.....	<b>661</b>