

Inhalt

Vorwort	V
1 Einführung	1
1.1 Geschichte des Zahnrades	2
1.2 Einteilung der Getriebetechnik	5
1.3 Gestufte Zahnradgetriebe	6
2 Grundlagen der Verzahnung	11
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 Zähnezahl 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
3	Getriebeentwicklung	79
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	Topografieseparation 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
4	Herstellverfahren	159
4.1	Prozessketten und Wärmebehandlung	161
4.1.1	Prozessketten der Zahnradfertigung	161
4.1.2	Übliche Zahnradwerkstoffe	163
4.1.3	Wärmebehandlung von Zahnrädern	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
5	Untersuchung von Zahnradgetrieben	363
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	Prüfstandskonzepte – 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
6	Simulationstechnik	555
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	Spanungskenngrößen	568

6.2.3.2	Spanungsdickenberechnung	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
- Index 661**