

Inhalt

Vorwort	XI
1 Einführung	1
1.1 Geschichte des Zahnrads	2
1.2 Einteilung der Getriebetechnik	5
1.3 Gestufte Zahnradgetriebe	7
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	30
2.2.4.4	Durchmesser	33
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	Auslegungsziele von Zahnradgetrieben	90
3.1.3	Vordimensionierung von Stirnradstufen	92
3.1.4	Vordimensionierung von Planetenstufen	102
3.2	Optimierung der Makrogeometrie	108
3.2.1	Akustische Optimierung durch Hochverzahnungen	110
3.2.2	Tragfähigkeitsorientierte Auslegung asymmetrischer Verzahnungen	116
3.2.3	Auslegung wirkungsgradoptimierter Low-Loss-Verzahnungen ...	120
3.2.4	Rechnergestützte Makrogeometrieoptimierung	122

3.3	Auslegung der Verzahnungsmikrogeometrie	124
3.3.1	Arten von Korrekturen	126
3.3.2	Topografieseparation durch Polynome	130
3.3.3	Auslegung funktionaler Modifikationen	131
3.3.3.1	Variantenrechnung	131
3.3.3.2	Berücksichtigung verfahrensbedingter Verschränkungen in der Mikrogeometrieauslegung	133
3.3.3.3	Toleranzfeldbasierte Mikrogeometrieoptimierung	134
3.3.3.4	Anwendungsbeispiel für toleranzfeldbasierte Mikrogeometrieauslegung	137
3.3.4	Inverse Ermittlung optimaler Sollkorrekturen	138
3.3.5	FE-basierte Auslegung von Kopfrücknahmen	140
3.4	Auslegung von Beveloidverzahnungen	144
3.5	Auslegung von Kegelradverzahnungen	149
3.5.1	Bestimmung der Tragfähigkeit	151
3.5.2	Auslegung der Mikrogeometrie	153
4	Herstellverfahren	167
4.1	Prozessketten und Wärmebehandlung	170
4.1.1	Prozessketten der Zahnradfertigung	170
4.1.2	Übliche Zahnradwerkstoffe	172
4.1.3	Wärmebehandlung von Zahnrädern	173
4.1.3.1	Gefügebestandteile von Stahlwerkstoffen	173
4.1.3.2	Glühverfahren	175
4.1.3.3	Härten, Anlassen und Vergüten	176
4.2	Vorverzahnen	185
4.2.1	Anforderungen an das Vorverzahnen	185
4.2.2	Schneidstoffe und Beschichtungen	188
4.2.3	Wälzverfahren	197
4.2.3.1	Wälzhobeln	198
4.2.3.2	Wälzfräsen	199
4.2.3.3	Wälzstoßen	212
4.2.3.4	Wälzschälen	216

4.2.4	Formschneidverfahren	219
4.2.4.1	Formfräsen	219
4.2.4.2	Räumen	223
4.2.5	Verfahrensvergleich	226
4.2.6	Entgraten und Anfasen	227
4.3	Weichfeinbearbeitung mit definierter Schneide	229
4.3.1	Anforderungen an die Weichfeinbearbeitung	230
4.3.2	Zahnradschaben	231
4.3.3	Fertigwälzfräsen	236
4.4	Hartfeinbearbeitung	240
4.4.1	Hartfeinbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide	240
4.4.1.1	Schälwälzfräsen	240
4.4.1.2	Schälwälzstoßen	242
4.4.1.3	Hartwälzschälen	242
4.4.2	Hartfeinbearbeitung mit geometrisch unbestimmten Schneiden..	244
4.4.2.1	Der Abrichtprozess	244
4.4.2.2	Aufbau und Zusammensetzung von Werkzeugen mit geometrisch unbestimmten Schneiden	250
4.4.2.3	Verfahren zur Hartfeinbearbeitung mit geometrisch unbestimmten Schneiden	256
4.5	Erzeugung von Zahnflankenmodifikationen	277
4.5.1	Erzeugung von Profilmodifikationen	278
4.5.2	Erzeugung von Flankenmodifikationen	279
4.5.3	Entstehung von verfahrensbedingten Verschränkungen	280
4.5.3.1	Verfahrensbedingte Verschränkung beim Profilschleifen	283
4.5.3.2	Verfahrensbedingte Verschränkung beim kontinuierlichen Wälzschleifen	284
4.6	Alternative Fertigungsverfahren	285
4.6.1	Endkonturnahe Fertigungsverfahren	286
4.6.1.1	Querwalzen von Verzahnungen	286
4.6.1.2	Taumelpressen	289
4.6.1.3	Pulvermetallurgische Herstellung von Zahnrädern	290
4.6.1.4	Additive Herstellung von Zahnrädern	295
4.6.1.5	Feinschneiden	297

4.6.1.6	Verfahren des Massivumformens zur Herstellung von Verzahnungen	301
4.6.2	5-Achs-Fräsen von Verzahnungen	304
4.7	Qualitätsprüfung und Analyse fertigungsbedingter Produkteigenschaften	309
4.7.1	Bauteilprüfung	309
4.7.2	Geometrische Prüfung von Verzahnungen	310
4.7.2.1	Erfassung der makrogeometrischen Verzahnungs- abweichungen	310
4.7.2.2	Erfassung der mikrogeometrischen Abweichung	328
4.7.3	Metallografische Analyse von Verzahnungen	334
4.7.3.1	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	335
4.7.3.2	Zerstörende Prüfverfahren	346
4.8	Kegelradherstellung	358
4.8.1	Diskontinuierlich teilendes Kegelradfräsen	359
4.8.2	Kegelradschleifen	361
4.8.3	Kontinuierlich teilendes Kegelradfräsen	362
4.8.4	Kegelradlappen	363
4.8.5	Optimierungsansätze für die Werkzeug- und Prozessauslegung ..	365
4.8.6	Kegelradverzahnmaschinen	366
4.8.6.1	Mechanische Kegelradfräsmaschinen	366
4.8.6.2	6-Achs-Universal-Fräsmaschinen	368
4.8.7	Der Closed Loop	370
4.8.8	Analogieversuche für die Kegelradfertigung	371
5	Untersuchung von Zahnradgetrieben	397
5.1	Beanspruchungs- und Schadensformen an Zahnrädern	398
5.1.1	Beanspruchung des Zahnfußes	399
5.1.2	Beanspruchung der Zahnflanke	401
5.1.2.1	Pressung im Zahnflankenkontakt	402
5.1.2.2	Beanspruchung in Folge der Kinematik	404
5.1.3	Zahnflankenschäden	407
5.1.3.1	Graufleckigkeit	409
5.1.3.2	Grübchenbildung	411

5.1.3.3	Fressen	415
5.1.3.4	Abrasivverschleiß	416
5.1.3.5	Zahnflankenbruch	417
5.1.4	Zahnfußschäden	419
5.1.4.1	Gewaltbruch	419
5.1.4.2	Dauerbruch	420
5.2	Einflussgrößen auf die Beanspruchbarkeit von Zahnrädern	422
5.2.1	Werkstoff	423
5.2.2	Schmierstoff	426
5.2.3	Oberflächengestalt	428
5.2.4	Randzoneneigenschaften	434
5.3	Untersuchung der Zahnradtragfähigkeit	436
5.3.1	Prüfstandkonzepte – Laufversuch	438
5.3.1.1	Zwei-Wellen-Verspannungsprüfstände	439
5.3.1.2	Drei-Wellen-Verspannungsprüfstände	441
5.3.1.3	Hochdrehzahl-Verspannungsprüfstände	443
5.3.1.4	Standardisierte Prüfverzahnungen für Tragfähigkeits- untersuchungen	444
5.3.2	Prüfstandkonzepte – Analogieversuch	447
5.3.2.1	Zahnfußtragfähigkeit	448
5.3.2.2	Zahnflankentragfähigkeit	452
5.3.3	Schadenskriterien und Vorgehensweisen	458
5.3.4	Auswertemethoden für Zahnradtragfähigkeitsuntersuchungen ..	461
5.3.4.1	Statistische Grundlagen zur Zahnradtragfähigkeits- auswertung	463
5.3.4.2	Wöhlerdiagramm: Auswertung der Dauerfestigkeit	465
5.3.4.3	Wöhlerdiagramm: Auswertung der Zeitfestigkeit	470
5.3.4.4	Quantifizierung der Schmierstofftragfähigkeit	473
5.3.5	Übertragbarkeit zwischen Lauf- und Analogieversuch	480
5.3.5.1	Zahnfußtragfähigkeit	480
5.3.5.2	Zahnflankentragfähigkeit	484
5.4	Grundlagen der Getriebeakustik	488
5.4.1	Bewertungskenngrößen	489
5.4.1.1	Spektrale Zusammensetzung des Schalls	489

5.4.1.2	Kennwerte der Technischen Akustik	491
5.4.1.3	Zahneingriffsfrequenz und Ordnungsspektrum	493
5.4.1.4	Spektralanalyse von Getriebegeräuschen	494
5.4.2	Getriebegeräusche	496
5.4.2.1	Objektive Einteilung von Getriebegeräuschen	497
5.4.2.2	Subjektive Bewertung	499
5.4.3	Anregungsmechanismen im Zahneingriff	507
5.4.3.1	Parameteranregung	509
5.4.3.2	Stoßanregung	511
5.4.3.3	Weganregung	512
5.4.3.4	Einfluss von geometrischen Abweichungen	513
5.4.4	Maßnahmen zur Reduzierung der Geräuschabstrahlung	518
5.5	Untersuchung der Getriebeakustik	523
5.5.1	Untersuchungsmethoden	523
5.5.1.1	Einflankenwälzprüfung	523
5.5.1.2	Zweiflankenwälzprüfung	527
5.5.1.3	Drehbeschleunigungsmessung	528
5.5.1.4	Körperschallmessung	536
5.5.1.5	Luftschallmessung	541
5.5.1.6	Sondermessverfahren	547
5.5.1.7	Alternative Methoden zur Messung der Geräuschemission	556
5.5.2	Prüfstandkonzepte	560
5.5.2.1	Radsatzuntersuchung	560
5.5.2.2	Gesamtgetriebeuntersuchung	567
5.6	Wirkungsgradbestimmung von Getrieben	570
5.6.1	Verlustleistungsmessung	572
5.6.2	Leistungsdifferenzmessung	573
5.6.3	Reibkraftmessung im Analogieversuch	576
6	Simulationstechnik	597
6.1	Vorgehensweise zur Modellbildung	597
6.2	Fertigungssimulation	600
6.2.1	Grundlagen von Fertigungssimulationen	600

6.2.1.1	Werkzeug	602
6.2.1.2	Maschinenkinematik	603
6.2.2	Geometrieberechnung	606
6.2.3	Simulationsmethoden	608
6.2.3.1	Durchdringungsrechnung	609
6.2.3.2	FE-Simulation	611
6.2.4	Simulationsgestützte Modellierung	614
6.2.4.1	Spanungskenngrößen	614
6.2.4.2	Modellierung der Zahnspankraft	617
6.2.4.3	Modellierung der Spanverformung	621
6.2.4.4	Verschleißanalyse für die spanende Fertigung	622
6.2.4.5	Bestimmung von charakteristischen Fertigungs- abweichungen	627
6.2.4.6	Bezogenes Zeitspannungsvolumen, Kraftberechnung und Energieeinbringung beim kontinuierlichen Wälzschleifen	628
6.2.4.7	Digitaler Zwilling in der Zahnradfertigung	637
6.3	Zahnkontaktanalyse	639
6.3.1	FE-basierte Zahnkontaktanalyse	641
6.3.1.1	Geometrievorgabe	642
6.3.1.2	Kontaktfindung und lastfreie Verzahnungskennwerte ...	643
6.3.1.3	FE-Strukturgenerierung	644
6.3.1.4	Verschiebungseinflusszahlen	644
6.3.1.5	Mathematisches Federmodell	646
6.3.1.6	Lastverteilung und Kennwerte unter Last	649
6.3.2	Auslegung mit der Zahnkontaktanalyse am Beispiel der Zahnfußoptimierung	652
6.3.3	Mikrogeometrische Kontaktanalyse mit realen Oberflächenstrukturen	655
6.4	Höherwertige Berechnungsverfahren für die Zahnradtragfähigkeit ...	658
6.4.1	Methode zur Berechnung der lokalen Zahnfußtragfähigkeit	661
6.4.1.1	Vergleichsspannung und Überlebens- wahrscheinlichkeit für den Zahnfuß	662
6.4.1.2	Erweiterung der Methode um eine Fehlstellenanalyse ...	666

6.4.1.3	Validierung und Anwendung der Methode	668
6.4.1.4	Übertragung der Methode auf die Berechnung der Zahnflankenbruchtragfähigkeit	670
6.4.2	Methode zur lokalen Wälzfestigkeitsberechnung	672
6.4.2.1	Volumen- und Oberflächenbeanspruchung im Wälzkontakt	674
6.4.2.2	Werkstofffestigkeit im Wälzkontakt	675
6.4.2.3	Vergleichsspannung und Überlebenswahrscheinlichkeit für den Wälzkontakt	677
6.4.2.4	Validierung der lokalen Wälzfestigkeitsberechnung	679
6.5	Dynamik des Zahneingriffs	681
6.5.1	Mathematische Beschreibung der Anregungsmechanismen im Zahneingriff	682
6.5.1.1	Der Einmassenschwinger als vereinfachtes Ersatzmodell von Verzahnung und Zahnradpaar	683
6.5.1.2	Parametererregung	684
6.5.1.3	Weganregung	687
6.5.1.4	Stoßanregung	689
6.5.1.5	Reibkraftanregung	690
6.5.1.6	Kippmomente	691
6.5.1.7	Rechnerische Abbildung des Dämpfungsverhaltens	691
6.5.2	Aufbau von Schwingungsmodellen	692
6.5.2.1	Ziele und Aufgaben der Modellbildung	693
6.5.2.2	Abbildung von Strukturkomponenten	694
6.5.2.3	Dynamikmodell eines einstufigen Getriebes	697
6.5.3	Entwicklung und Berechnung der mathematischen Ersatzmodelle	701
6.5.4	Methoden der Körperschall- und Luftschallberechnung	703
6.5.4.1	Zahnkraftpegel	704
6.5.4.2	Methoden der Körperschallberechnung	705
6.5.4.3	Methoden der Luftschallberechnung	706