

Fritz Klocke  
Christian Brecher

# Zahnrad- und Getriebetechnik

Auslegung – Herstellung – Untersuchung – Simulation



## **Blieben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[WWW.HANSER-FACHBUCH.DE/NEWSLETTER](http://WWW.HANSER-FACHBUCH.DE/NEWSLETTER)**



# 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	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
<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 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	Kegelrad schleifen .....	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 Zahnradern .....	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 Zahnradern .....	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</b>	<b>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>