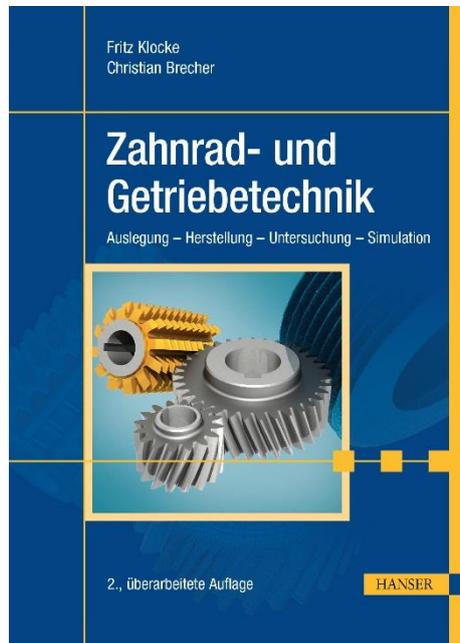


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Zahnrad- und Getriebetechnik

von Fritz Klocke und Christian Brecher

Print-ISBN: 978-3-446-46975-4  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46976-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446469754>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Geschichte des Zahnrads .....	2
1.2 Einteilung der Getriebetechnik .....	5
1.3 Gestufte Zahnradgetriebe .....	7
<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 .....	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
<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	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
<b>4</b>	<b>Herstellverfahren . . . . .</b>	<b>167</b>
4.1	Prozessketten und Wärmebehandlung . . . . .	170
4.1.1	Prozessketten der Zahnradfertigung . . . . .	170
4.1.2	Übliche Zahnradwerkstoffe . . . . .	172
4.1.3	Wärmebehandlung von Zahnradern . . . . .	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
<b>5</b>	<b>Untersuchung von Zahnradgetrieben .....</b>	<b>397</b>
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 Tragfähigkeitsuntersuchungen	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 Zahnradtragfähigkeitsauswertung	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
<b>6</b>	<b>Simulationstechnik . . . . .</b>	<b>597</b>
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	Spannungskenngrößen	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 Zahradfertigung	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 Zahradtragfähigkeit	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
<b>Index</b> .....		<b>723</b>



Der Verlag und die Autoren haben sich mit der Problematik einer gendergerechten Sprache intensiv beschäftigt. Um eine optimale Lesbarkeit und Verständlichkeit sicherzustellen, wird in diesem Werk auf Gendersternchen und sonstige Varianten verzichtet; diese Entscheidung basiert auf der Empfehlung des Rates für deutsche Rechtschreibung. Grundsätzlich respektieren der Verlag und die Autoren alle Menschen unabhängig von ihrem Geschlecht, ihrer Sexualität, ihrer Hautfarbe, ihrer Herkunft und ihrer nationalen Zugehörigkeit.

# Vorwort

*„Moderne Forschung verlangt die uneingeschränkte  
Bereitschaft zur Teamarbeit.“*

*(Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h. c. mult. Herwart Opitz)*

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

aufgrund der komplexen Bauteilgeometrie und der hohen Anforderungen an die Genauigkeit stellt das Zahnrad eine besondere Herausforderung im Bereich des Maschinenbaus dar. Darüber hinaus steht das Einsatzverhalten eines Zahnrads in unmittelbarer Abhängigkeit von den umgebenden Getriebekomponenten. Damit verbindet kaum ein Maschinenelement so viele technische Grundlagendisziplinen wie das Zahnrad. Exemplarisch genannt seien: Geometrie, Mechanik, Tribologie, Werkstoffe und deren Behandlung, Akustik, Maschinendynamik und Fertigungstechnik. Die notwendige Kopplung fertigungstechnischer und konstruktiver Fragestellungen verlangt daher eine „uneingeschränkte Bereitschaft zur Teamarbeit“, da die genannten Stellhebel sich einerseits gegenseitig beeinflussen und andererseits einen großen Lösungsraum zur Gestaltung anbieten. Die erforderliche Form der Teamarbeit wird am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen durch die Zusammenarbeit der Lehrstühle für Technologie der Fertigungsverfahren sowie Werkzeugmaschinen in der Abteilung Getriebetechnik realisiert.

Erste Forschungsarbeiten im Bereich der Getriebetechnik wurden am WZL bereits unter Leitung des Institutsgründers Prof. Dr.-Ing. E. h. Adolf Wallichs in den 1930er-Jahren durchgeführt. Das Forschungsgebiet „Zahnrad- und Getriebetechnik“ wurde durch Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h. c. mult. Herwart Opitz mit der Gründung des WZL-Getriebekreises institutionalisiert. Durch den Bedarf der Industrie an der Erforschung fertigungstechnischer Fragestellungen im Bereich der Getriebetechnik entstand 1956 die erste und eine der größten Industrievereinigungen in diesem Fachgebiet in Deutschland, welche bis heute Bestand hat. In der Nachfolge von Herwart Opitz wurden die Arbeiten zur Zahnrad- und Getriebetechnik über viele Jahrzehnte gemeinsam von Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Wilfried König (Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren) und Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. E. h. Manfred Weck (Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen) maßgeblich geprägt. In der Forschungsgruppe Getriebetechnik werden seitdem in engem Austausch die Themenfelder Getriebeberechnung und Fertigungssimulation, Technologie der Zahnradfertigung sowie Getriebeuntersuchung behandelt.

Noch immer sind Fragen der Zahnrad- und Getriebetechnik hochrelevant. Durch den ganzheitlichen Analyseansatz in der WZL-Getriebeabteilung wird es möglich, die Auslegung, Fertigung und das Funktionsverhalten von Zahnradgetrieben integrativ zu erklären, zu optimieren sowie unter Funktions- und Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten zu bewerten. Mehr als 170 Dissertationen und viele Fachpublikationen sind aus diesen Forschungsarbei-

ten hervorgegangen. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeiten sind wesentliche Teile dieses Fachbuches entstanden. Das vorliegende Fachbuch verfolgt die Zielsetzung, in die Grundlagen der einzelnen Themenfelder einzuleiten und darauf aufbauend aktuelle Entwicklungstrends und Forschungsergebnisse darzustellen. Damit richtet sich dieses Buch sowohl an Studierende zur vorlesungsbegleitenden Lektüre als auch an Techniker und Ingenieure in der Praxis als berufsbegleitendes Nachschlagewerk.

Wir möchten an dieser Stelle allen herzlich danken, die unsere Forschungen gefördert und unterstützt haben. Dazu zählen im Besonderen die Forschungsvereinigungen und Förderträger in Deutschland. Insbesondere genannt seien die AiF, die DFG, die Europäische Union, das BMWK und BMBF, die FVA, die FVV und der VDW, denen die kontinuierliche Erforschung von Fragestellungen im Bereich der Zahnrad- und Getriebetechnik am WZL zu verdanken ist. Ebenso gilt unser Dank den Mitgliedsfirmen des WZL-Getriebekreises. Deren jahrzehntelanges Vertrauen in die Arbeiten der Forschungsgruppe hat die Erforschung vieler praxisrelevanter Fragestellungen erlaubt und zu einem intensiven Erfahrungsaustausch mit der industriellen Praxis geführt. Aus diesem Kreis stammen auch viele der Abbildungen im Buch, wofür wir uns ebenfalls herzlich bedanken.

Das Buch steht in Ergänzung zu den am WZL erarbeiteten mehrbändigen Kompendien „Werkzeugmaschinen“ und „Fertigungsverfahren“, in denen die Themen der Zahnradfertigung, der Verzahnmaschinen und der Anwendung von Zahnradgetrieben in Werkzeugmaschinen in gekürzter Form enthalten sind. Mit dem vorliegenden Buch soll ergänzend zur bestehenden Fachliteratur ein Beitrag zur integrativen Analyse und Bewertung von Fertigungs- und Konstruktionsmethoden bezüglich der Zahnrad- und Getriebetechnik geleistet werden.

Die zweite Auflage umfasst aktualisierte Inhalte zu den Herausforderungen in der Auslegung für die Elektromobilität von Getrieben, zur Digitalisierung und dem digitalen Zwilling sowie zu den Forschungsergebnissen seit der ersten Auflage dieses Buches. Ebenso wurden Fehler behoben und Formulierungen verbessert.

Bei der Erstellung dieses Buches haben uns die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung Getriebetechnik unter Leitung unseres Oberingenieurs Herrn Dr.-Ing. Jens Brimmers maßgeblich unterstützt. Ohne den besonderen Einsatz unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wäre die Erstellung des Buches nicht möglich gewesen. Insbesondere danken wir Frau Melina Kamratowski M.Sc., Frau Patricia de Oliveira Löhner M.Sc., Frau Dr.-Ing. Mareike Solf sowie den Herren Charalampos Alexopoulos M.Sc., Christian Eggert M.Sc., Dr.-Ing. René Greschert, Gerrit Hellenbrand M.Sc., Steffen Hendricks M.Sc., Christopher Janßen M.Sc., Lukas Klee M.Eng., Johannes Lövenich M.Sc., Alexander Mann M.Sc., Dr.-Ing. Dieter Mevißen, Christian Namhoff M.Sc., Simon Nohl M.Sc., Johannes Rolzhäuser M.Sc., Laurenz Roth M.Sc., Maximilian Schrank M.Sc., Sebastian Sklenak M.Eng., Christian Westphal M.Sc., Marius Willecke M.Sc., Moritz Zalfen M.Sc. und Hanwen Zhang M.Sc. Unser Dank gilt aber auch den ehemaligen Mitarbeitern der Abteilung Getriebetechnik, die mit ihrer Forschungsarbeit wesentlich zu den Inhalten des Fachbuches beigetragen haben. Ebenso danken wir dem Carl Hanser Verlag für das Verlegen und den Druck dieses Fachbuches.

Aachen, Oktober 2023

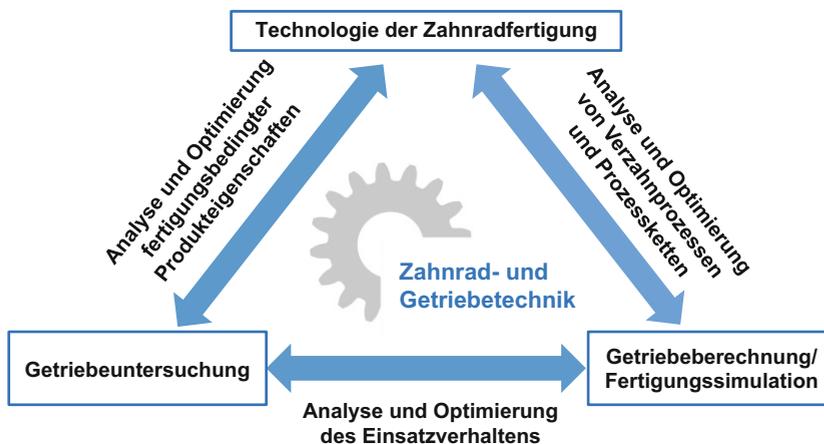
*Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher*

*Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke*

# 1

## Einführung

Dieses Buch gibt einen Überblick über das Verhalten von Zahnrädern in Getrieben. Zahnräder sind Maschinenelemente, deren Einsatzverhalten hinsichtlich Tragfähigkeit, Akustik und Wirkungsgrad unmittelbar mit den fertigungsseitig eingestellten Produkteigenschaften, wie Toleranzen, Oberflächen- und Randzonenintegrität, zusammenhängt. Daher stellt die integrative Betrachtung produktions- und konstruktionstechnischer Fragestellungen eine wichtige Grundlage für das Verständnis der Funktion des Zahnrads und seiner Eigenschaften in der gesamtheitlichen Analyse im Getriebeumfeld dar (Bild 1.1). Die zusammenführende simulative sowie experimentelle Untersuchung sowohl des Einsatzverhaltens als auch der Zahradfertigung erlaubt einen Analysegrad, der mit einer isolierten Betrachtung von Einzelaspekten nicht möglich ist. So bewirkt beispielsweise die Berücksichtigung fertigungsbedingter Aspekte, wie funktionaler Verzahnungstoleranzen, bereits in der Auslegungsphase eine Verkürzung von Entwicklungszeiten und Reduktion von Entwicklungskosten. Ein Schwerpunkt dieses Buches liegt daher auf einer Verbindung der Leistungsfähigkeit der Fertigungstechnik mit den Anforderungen der Konstruktionstechnik.



**Bild 1.1** Gesamtheitlicher Analyseansatz in der Zahnrad- und Getriebetechnik

Die Struktur und der Aufbau des vorliegenden Buchs orientieren sich an den Anforderungen der Praxis und berücksichtigen den Lebenszyklus eines Zahnradgetriebes. Zu Beginn werden die Zahnrad- und Getriebetechnik geschichtlich eingeordnet und der Betrachtungsrahmen des Buches abgegrenzt. Dann erfolgt im Anschluss an die Einführung in die Grundlagen von Zahnradgetrieben die sukzessive Vorstellung von Methoden zum Getriebedesign, zur Zahnradfertigung sowie zum Einsatzverhalten von Getrieben. Abschließend werden Simulationsmethoden zur Unterstützung in der Auslegung und Analyse von Zahnradgetrieben sowie Zahnradfertigungsprozessen vorgestellt. Ebenso werden Aspekte der Nachhaltigkeit im Lebenszyklus eines Zahnrads thematisiert. In allen Teilen werden sowohl fertigungstechnische als auch konstruktive Fragestellungen adressiert. In den einzelnen Kapiteln werden Grundlagen sowie aktuelle Forschungsergebnisse und Entwicklungstendenzen angesprochen. Damit soll das Buch sowohl den Konstrukteur bei der Auslegung von Verzahnungen als auch den Fertigungstechniker bei der Prozessauswahl und -auslegung unterstützen und Möglichkeiten zur Optimierung aufzeigen, die über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen.

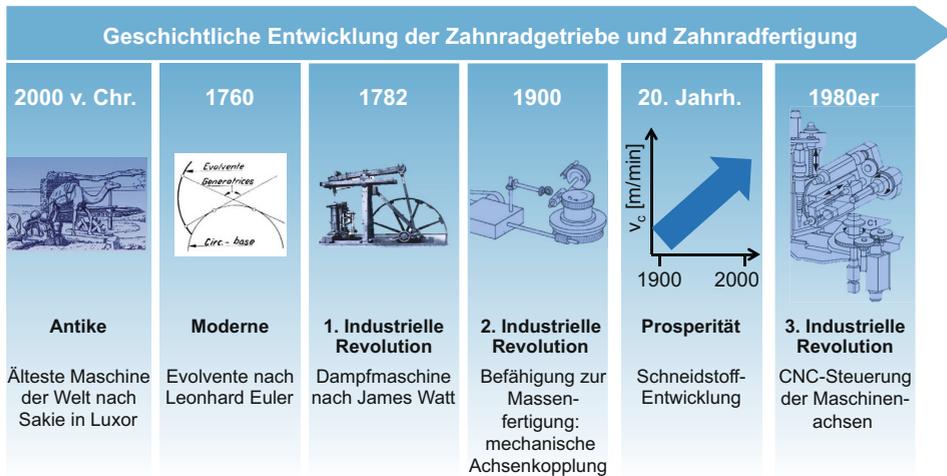
## ■ 1.1 Geschichte des Zahnrads

Das Zahnrad ist eines der ältesten Maschinenelemente der Welt und findet in heutigen Anwendungen noch immer eine dominante Verbreitung. Die nachfolgende Darstellung umfasst einen begrenzten Auszug. Umfangreichere Ausarbeitungen zur Geschichte des Zahnrads sind bei Kutzbach, Matschoss und Seherr-Thoss dokumentiert [KUTZ25, MATS40, SEHE65].

Die älteste Zahnradapparatur der Geschichte unter Nutzung mehrerer Zahnradstufen stammt aus der Antike und wird „Mechanismus von Antikythera“ genannt. Schätzungen zufolge stammt diese Apparatur aus der Zeit um 100 v. Chr. Dieser Mechanismus, der häufig auch als „Computer von Antikythera“ bezeichnet wird, ähnelt einem Uhrwerk. Er wurde aus Bronze hergestellt und war Wissenschaftlern zufolge vermutlich von einem Holzgehäuse umgeben. Die Übersetzung erfolgte über ein Differenzialgetriebe. Der Mechanismus wurde zur Berechnung der Bewegung von Himmelskörpern eingesetzt und stellt das erste dokumentierte Getriebe der Geschichte dar.

Die „Maschine nach Sakie“, die durch ein Kamel angetrieben und zur Bewässerung der Felder eingesetzt wurde, ist ebenfalls ein bedeutendes Beispiel in der Geschichte des Zahnradgetriebes (Bild 1.2). Der Hauptbestandteil des Antriebsstranges war ein einfaches Kronenradgetriebe mit Holzzahnrädern. Seit dem 9. Jahrhundert erfolgte in Europa vermehrt der Einsatz von Zahnrädern in Wassermühlen, ab dem 12. Jahrhundert auch in Windmühlen. Diese und ähnliche Konzepte wurden über die Jahrhunderte weiter genutzt, jedoch nie entscheidend weiterentwickelt. Erst durch Leonardo da Vinci und die für den technischen Fortschritt offene Epoche der Renaissance begann im Bereich der Antriebstechnik und der Getriebe eine Weiterentwicklung bereits bestehender technischer Errungenschaften. Der Ingenieur und Mechaniker da Vinci entwickelte mit der Zielsetzung, das Leben für die Menschen einfacher zu gestalten, die ersten Konzepte für angetriebene Fahrzeuge und Fluggeräte; hierzu nutzte er vermehrt die Dreh- und Leistungsübertragung durch erste einfache

Getriebe. In seinen Manuskripten finden sich um 1500 viele Zahnräder in verschiedenen Anwendungen.



**Bild 1.2** Übersicht über die Geschichte des Zahnradgetriebes [NAUN07, NN16a, NN16b, NN76, WECK05]

1556 gab Georgius Agricola in seiner Schrift „De re metallica libri XII“ erstmals den Einsatz von Zahnrädern aus Eisen an. Anfangs wurde bei der Verzahnungsherstellung wenig auf die geeignete Form der Zähne geachtet. Nach Angaben von Christiaan Huygens und Gottfried Wilhelm Leibniz empfahl der dänische Astronom Ole Rømer um 1674 die Epizykloide als Zahnform. Die Idee entstammt vermutlich seinen Erfahrungen beim Bau seiner Planetarien, z.B. des Jovilabiums, das an der Académie des sciences zu sehen ist. Schriftliche Belege gibt es für diese Erfindung nicht mehr.

Eine erste gründliche mathematische Untersuchung der Zahnräder beschrieb Philippe de La Hire um 1694 in seinem Werk „Traité des épicycloïdes“. Die darin beschriebene epizykloide Zahnform sicherte eine gleichförmige Bewegung der Zahnräder bei gleichmäßiger Gleitreibung. Diese Zahnräder wurden in Uhrwerke eingebaut. 1759 entwickelte John Smeaton eine eigene Zahnform, gefolgt von Leonhard Euler, der 1760 die Kreisevolvente als Profilform für Zahnflanken vorschlug. Es vergingen noch weitere 100 Jahre, bis diese Verzahnungsart fertigungstechnisch herstellbar und dann einsetzbar wurde. Heute gilt Leonhard Euler als „Vater“ der Evolvente und die Evolvente als maßgebliche Zahnprofilform [LINK10].

Die Entwicklung der Dampfmaschine im 18. Jahrhundert und der Beginn der Industriellen Revolution führten zu einem steigenden Bedarf an Zahnrädern, da die zu übertragende Leistung kontinuierlich stieg und Zahnräder aus Metall anstatt aus Holz gefertigt werden mussten. 1820 erfand Joseph Woollams die Schrägverzahnung und Pfeilverzahnung (Doppelschrägverzahnung). 1829 stellte Clavet eine Zahnholmaschine her, da der Werkzeugmaschinenbau ab dem 19. Jahrhundert eine steigende Genauigkeit der Verzahnungen erforderte. Die erste brauchbare Maschine zum Fräsen geradzahnter Stirnräder baute 1887

G. Grant. 1897 entwickelte H. Pfauter daraus eine universale Maschine, mit der sich auch Schnecken- und Schraubräder fertigen ließen. Die Spindel- und Werkstückachsen waren in dem Patent über ein Differenzial kinematisch gekoppelt. Von diesem Zeitpunkt an konnte die evolventische Verzahnung effizient hergestellt und damit für praktische Anwendungen nutzbar gemacht werden. Im Zuge der zweiten Industriellen Revolution wurden mit dieser Entwicklung in der Verzahnungstechnik die Möglichkeiten zur Massenproduktion von Zahnrädern eröffnet.

Die Produktivität in der Verzahnungsfertigung konnte durch Innovationen in der Werkzeugtechnik umfassend gesteigert werden. Durch die Entwicklung neuer Schneidstoffe waren sprunghafte Anstiege in den erreichbaren Zeitspannungsvolumen möglich, die in einer deutlichen Reduktion der Produktionskosten resultierten. Exemplarisch wird diese Entwicklung für die Bearbeitung mit definierter Schneide skizziert, ähnliche Entwicklungssprünge hat es ebenfalls in der Bearbeitung mit undefinierter Schneide gegeben. 1900 wurde von Taylor und White erstmals der Schnellarbeitsstahl (HSS) eingeführt, der gegenüber dem zuvor genutzten Kohlenstoffstahl eine Verdopplung der Schnittgeschwindigkeit erlaubte. Die Weiterentwicklung der HSS-Werkzeuge führte dazu, dass nun die Leistungsfähigkeit bestehender Werkzeugmaschinenkonzepte erreicht wurde und in der Folge auch die Werkzeugmaschinenkonzepte überarbeitet und dem neuen Leistungsvermögen der Werkzeuge angepasst wurden.

1923 wurde die von Schröter und Baumhauer durchgeführte Entwicklung, Wolframkarbid und Kobalt durch Sintern zu einem soliden Körper zusammenzufügen, patentiert. 1925 wurden die Patente von Krupp übernommen. Das Sinterhartmetall war entstanden und konnte aufgrund seiner hohen Härte bei gleichzeitig guter Zähigkeit hervorragend als Schneidstoff eingesetzt werden. Jetzt war eine nochmalige Vervielfachung der erzielbaren Schnittgeschwindigkeiten, bezogen auf die Verwendung von HSS-Werkzeugen, möglich. Weitere Leistungssteigerungen bei den Schneidstoffen sind durch die Einführung beschichteter Hartmetalle (1968) sowie die Einführung von Ultrafeinkorn- bzw. nanokristallinen Hartmetallen (1993) gekennzeichnet. Durch die Kombination von Feinkorn-, Ultrafeinkorn- und nanokristallinen Gefügen mit angepassten Beschichtungen finden seit den 90er-Jahren anwendungsbezogene Optimierungen in der spanenden Herstellung von Verzahnungen statt. Polykristallines Bornitrid und keramische Schneidstoffe runden das Schneidstoffportfolio ab. Grundsätzlich kann man aber sagen, dass Schnellarbeitsstahl und Hartmetall auch heute noch die am häufigsten eingesetzten Werkzeugbaustoffe in der Verzahnungsfertigung mit definierter Schneide sind.

Eine weitere wesentliche Weiterentwicklung für die Verzahnungstechnik stellte die Erfindung der integrierten Schaltkreise (Mikrochip) dar, deren Serienproduktion in den 1960er-Jahren insbesondere im US-amerikanischen Raum begann. Für die Verzahnmaschinen war es mit dem Aufkommen der Digitalisierung möglich, Achsen elektrisch und nicht mehr mechanisch zu koppeln. Seit den 1980er-Jahren wurden Verzahnmaschinen umfassend mit elektronisch gesteuerten Achsen ausgerüstet.

Die Digitalisierung der Werkzeugmaschine hat in nahezu allen Verzahnprozessen erhebliche Verbesserungen bewirkt. Da die Bauteilqualität zuvor insbesondere von der Übertragungsqualität des Getriebezugs abhängig war, konnte mit der elektronischen Wälzkopplung einerseits die Verzahnungsqualität angehoben werden. Andererseits konnten effizient neue Freiheitsgrade in der Achskinematik umgesetzt werden. Es wurde zum Beispiel möglich, topologische Modifikationen auf der Zahnflanke herzustellen.

Die Digitalisierung der Produktion ist noch nicht abgeschlossen. Im Rahmen der Arbeiten zu „Industrie 4.0“ steht die Vernetzung von Wertschöpfungsketten und ganzen Produktionseinheiten im Mittelpunkt. Der Aufbau digitaler Zwillinge und digitaler Schatten, das Maschinelle Lernen und die Kommunikation zwischen Maschinen, Produkten und dem Menschen stehen im Fokus der Entwicklungen. In der Zahnrad- und Getriebetechnik sind insbesondere virtuelle Produkt- und Prozessbeschreibungen, sensorgestützte Prozess- und Produktüberwachungsstrategien sowie selbstlernende Prozess- und Betriebsstrategien Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten. Eine Vielzahl der genannten Ansätze wurde im DFG-Exzellenzcluster „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ und wird im DFG-Exzellenzcluster „Internet of Production“ adressiert [BREC15; BREC23]. Weiterhin stellt die Nachhaltigkeit in der Getriebetechnik eine wichtige Herausforderung für die Zukunft dar. Grundsätzlich werden auch in der Getriebetechnik Nachhaltigkeitsfragen von der Ökonomie, der Ökologie und dem Einfluss auf soziale Strukturen bestimmt. Deshalb sind aktuelle Zielgrößen in der Getriebeauslegung und Fertigung aus diesem Umfeld zum Beispiel, Getriebe mit höherer Leistungsdichte und geringerem ökologischen Fußabdruck bei gleichbleibender Qualität und geringeren Kosten zu konzipieren und zu betreiben. Dies ist eine multikriterielle Optimierungsaufgabe, die mit Modellen unterstützt werden und im Einzelfall unterschiedliche Lösungen hervorbringen kann. Auf einige Ansätze wird beispielhaft im Rahmen der folgenden Kapitel auch eingegangen.

Die evolventische Verzahnung ist die heute am häufigsten genutzte Form einer Zahnradflanke. Durch ihre spezielle Eigenschaft macht sie das Zahnradgetriebe zu den bedeutendsten mechanischen Baugruppen für die Leistungs- und Bewegungsübertragung. Neue Entwicklungen und Verbesserungen der Getriebe erfordern aber auch ständige Optimierungen und Anpassungen der Fertigungsprozesse. Wesentliche Weiterentwicklungen in der Zahnradgestaltung wurden insbesondere durch die Optimierung der evolventischen Zahngeometrie sowie der Werkstoff- und Wärmebehandlungen erzielt. Durch diese Maßnahmen konnte die Festigkeit der Verzahnungen deutlich gesteigert werden. Dies hat auch Einfluss auf die Auslegung ganzer Wertschöpfungsketten und die Auswahl der Fertigungsverfahren.

## ■ 1.2 Einteilung der Getriebetechnik

Die grundsätzliche Aufgabe von Getrieben ist, die auf der Eingangsseite eingebrachte (aufgeprägte) Leistung in geeignete Abtriebsdrehzahlen und Drehmomente zu transformieren. Hierauf wird in Kapitel 3 im Detail eingegangen. Außerdem können Änderungen in der Bewegungsrichtung realisiert werden. Eine gängige Einteilung der Getriebearten kann anhand der Art der Bewegungsübertragung erfolgen. Grundsätzlich wird zwischen einer ungleichförmigen und einer gleichförmigen Übersetzung unterschieden (Bild 1.3).



**Bild 1.3** Einteilung der Getriebe nach Form der Bewegungsübertragung

Getriebe mit ungleichförmiger Übersetzung werden zur Übertragung un stetiger Bewegungen genutzt. Zwei häufig genutzte Getriebebauarten aus diesem Bereich sind die Schubkurbel und der Kniehebel. Das Schubkurbelgetriebe formt eine rotatorische Bewegung in eine translatorische Bewegung um und ist einer der wichtigsten Bestandteile des Kolbenmotors. Der Kniehebel wird zumeist in mechanischen Pressen eingesetzt und kommt bei verschiedenen Fertigungsverfahren wie dem Spritzguss oder dem Tiefziehen zum Einsatz.

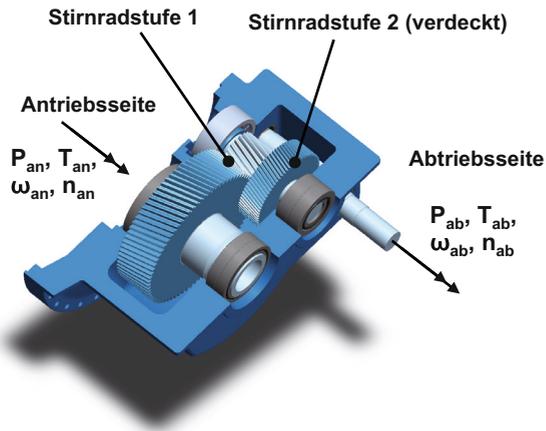
Getriebe mit gleichförmiger Übersetzung lassen sich weiter in gestufte und stufenlose Getriebe unterteilen. Das bedeutet, dass die Getriebe zwischen der höchsten und der niedrigsten Abtriebsdrehzahl entweder unendlich viele einstellbare Übersetzungen (stufenlos) aufweisen oder über eine endliche Anzahl an Schaltstufen (gestuft) verfügen. Hinsichtlich der stufenlosen Getriebe wird nach dem physikalischen Wirkprinzip zwischen mechanischer, elektrischer oder hydraulischer Bewegungsübertragung differenziert. Die bekannteste Getriebebauart aus diesem Bereich ist ein mechanisches Umschlingungsgetriebe mit Schubgliederband (Panzerkette). Das Kettengetriebe, auch Continuously Variable Transmission (CVT) genannt, wird in einigen Pkw als stufenloses Automatikgetriebe eingesetzt.

Zu den gestuften Getrieben zählen die Zugmittelgetriebe und die Zahnradgetriebe. Zu den Zugmittelgetrieben gehören unter anderem die Riemen- und Kettentriebe. Ein bekanntes Beispiel für ein schaltbares Zugmittelgetriebe ist die Fahrradkettenschaltung. Das Zahnradgetriebe ist das bedeutendste gestufte Getriebe und ist im Maschinenbau von zentraler Bedeutung. Es kommt dort zum Einsatz, wo Drehzahlen und Drehmomente auf kleinem Raum gewandelt und übertragen werden müssen. Im vorliegenden Buch steht diese Getriebeart im Fokus.

## 1.3 Gestufte Zahnradgetriebe

Zahnradgetriebe erfüllen als Konstruktionselemente unterschiedliche Funktionen und existieren daher in vielen verschiedenen Bauformen. Eine einfache Bauform ist das in Bild 1.4 dargestellte zweistufige Stirnradgetriebe, wie es in vielen Getrieben von Windenergieanlagen hinter der Planetengetriebestufe eingesetzt wird. Eine Zahnradstufe entspricht einem zusammenwirkenden, im Eingriff befindlichen Zahnradpaar im Leistungsfluss des Getriebes.

- **Zahnradgetriebe** dienen zur formschlüssigen Leistungsübertragung.
- Zwei oder mehr miteinander im Eingriff befindliche **Zahnräder** sowie Wellen, Lager, Dichtungen, Gehäuse und der Schmierstoff bilden ein Getriebe.
- Hauptanforderung ist die **gleichmäßige Übersetzung** von Drehbewegungen.
- **Legende**
  - P Leistung [W]
  - T Drehmoment [Nm]
  - $\omega$  Winkelgeschwindigkeit [ $s^{-1}$ ]
  - n Drehzahl [ $min^{-1}$ ]
  - i Übersetzung [-]
  - $i = T_{ab}/T_{an} = n_{an}/n_{ab}$



**Bild 1.4** Aufbau eines gestuften Zahnradgetriebes

Die mechanische Leistung wird am Antrieb auf das Getriebe aufgeprägt. Auf der Abtriebsseite ist die Arbeitsmaschine angeordnet. Das Getriebe übersetzt anhand der Zähnezahlen der Zahnradstufen die Antriebsdrehzahl und das Antriebsdrehmoment. Die Übersetzung einer Getriebestufe  $i$  ergibt sich aus den Zähnezahlen des treibenden Zahnrads ( $z_1$ ) und denen des getriebenen Zahnrads ( $z_2$ ).

$$i = \frac{z_2}{z_1} \quad (1.1)$$

Die Gesamtübersetzung wird aus dem Produkt der Einzelübersetzungen gekoppelter Zahnradstufen berechnet.

Trotz veränderlicher Drehzahl- und Drehmomentgrößen bleibt für ein ideales Getriebe die Systemleistung konstant, d. h., Antriebs- und Abtriebsleistung sind identisch. Aufgrund von Reibungsvorgängen treten in einem realen Getriebe Verluste auf. Daher ist die Abtriebsleistung um die Verlustleistung gemindert, woraus sich aus dem Verhältnis zwischen der Abtriebs- und der Antriebsleistung ( $P_{ab}$  und  $P_{an}$ ) der mechanische Wirkungsgrad  $\eta$  des Getriebes ergibt:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{an}} \quad (1.2)$$

Die mechanischen Verluste werden in Wärmeenergie gewandelt, die vom Getriebe an die Umgebung abgeführt werden muss. Bei einigen Getriebeformen reicht die Konvektion über die Gehäuseoberfläche nicht aus, sodass eine zusätzliche Kühlung über einen Wärmetauscher erforderlich wird.

Bereits das einfache in Bild 1.4 dargestellte Beispiel zeigt, dass die Differenz der Drehmomente von An- und Abtrieb an der Getriebeaufhängung abgestützt werden muss, was in der Getriebeauslegung zu berücksichtigen ist. Bei räumlichen Getrieben wie Kegelrad- oder Schneckengetrieben ist nicht allein der Betrag, sondern auch die Orientierung der abzustützenden Kräfte verschieden. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Lagerung und Gehäusegestaltung.

Die Bauformen von Getrieben unterscheiden sich abhängig vom Bauraum und von der Funktion, die das Getriebe erfüllen muss. Einige Getriebe werden zur Synchronisation von Wellen verwendet. Beispiele hierfür sind Steuertriebe im Verbrennungsmotor oder die mechanische Synchronisation von Druckwalzen in Druckmaschinen. Weitere Getriebe werden zur Überbrückung von Achsabständen verwendet. In diesem Fall werden Verzahnungen als Alternative zu Riemen- oder Kettentrieben verwendet. Die Vorteile der Verzahnung sind die schlupffreie Drehübertragung, der höhere Wirkungsgrad und der geringe Wartungsaufwand im Betrieb.

Eine weitere Funktion, die Zahnradgetriebe erfüllen, ist die Wandlung der Drehbewegung. Bei räumlichen Getrieben wird die Drehrichtung um einen Winkel gewandelt, sodass der An- und der Abtrieb des Antriebsstrangs nicht parallel angeordnet werden müssen. Beispiele für die Verwendung sind Fahrzeuge mit längs eingebautem Verbrennungsmotor oder Schiffsantriebe mit Strahlruder. Planeten- und Differenzialgetriebe werden zur Leistungsverzweigung verwendet.

Zahnradgetriebe allgemein werden nach ihrer Bau- und Funktionsweise unterschieden in:

- Festgetriebe (unveränderliches Übersetzungsverhältnis)
- Schaltgetriebe (Übersetzungsverhältnis kann durch eine Veränderung des Zusammenwirkens der einzelnen Zahnräder verändert werden)
- Verteilergetriebe (gleichzeitiger Antrieb mehrerer Wellen)
- Summiergetriebe (Antrieb einer Welle mit mehreren Antriebswellen)
- Standgetriebe (alle Radachsen sind lagenunveränderlich drehbar gelagert)
- Umlauf- oder Planetengetriebe (Baugruppe aus Sonnenrad, Planetenrad, umlaufendem Steg, Hohlrad, Gehäuse)

## Verwendete Formelzeichen

### Kleinbuchstaben

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$i$	Übersetzung	
$n_{ab}$	Drehzahl Abtrieb	$\text{min}^{-1}$
$n_{an}$	Drehzahl Antrieb	$\text{min}^{-1}$

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$z_1$	Zähnezahl treibendes Rad	
$z_2$	Zähnezahl getriebenes Rad	

### Großbuchstaben

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$P_{ab}$	Abtriebsleistung	W
$P_{an}$	Antriebsleistung	W
$T_{ab}$	Drehmoment Abtrieb	Nm
$T_{an}$	Drehmoment Antrieb	Nm

### Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$\eta$	Wirkungsgrad	
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	$s^{-1}$

### Literatur

- [BREC15] *Brecher, C.*: Advanced Production Technology. Springer Verlag, Berlin 2015
- [BREC23] *Brecher, C.*: Internet of Production (IoP). <https://www.iop.rwth-aachen.de>. 2023
- [KUTZ25] *Kutzbach, K.*: Grundlagen und neuere Fortschritte der Zahnradherzeugung. VDI Verlag, Berlin 1925
- [LINK10] *Linke, H.*: Stirnradverzahnungen. 2. Auflage. Carl Hanser Verlag, München 2010
- [MATS40] *Matschoss, G.*: Geschichte des Zahnrades. VDI Verlag, Berlin 1940
- [NAUN07] *Naunheimer, H./Bertsche, B./Lechner, G.*: Fahrzeuggetriebe. 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin 2007
- [NN76] *Hermann Pfauter Werkzeugmaschinenfabrik*: Pfauter – Wälzfräsen. Teil 1. 2. Auflage. Springer, Augsburg 1976
- [NN16a] Mecánica. Engranajes (Quelle: [http://html.rincondelvago.com/mecanica\\_engranajes.html](http://html.rincondelvago.com/mecanica_engranajes.html), Stand 19.05.2016)
- [NN16b] Die Dampfmaschine von James Watt, 1788 (Quelle: <http://www.deutsches-museum.de/information/jugend-im-museum/erfinderpfad/antriebe/dampfmaschine>, Stand: 19.05.2016)
- [SEHE65] *Seherr-Thoss, H.-Chr.*: Die Entwicklung der Zahnrad-Technik, Zahnformen und Tragfähigkeitsberechnung. Springer Verlag, Berlin 1965
- [WECK05] *Weck, M./Brecher, C.*: Werkzeugmaschinen. Maschinenarten und Anwendungsbereiche. 6. Auflage. Springer Verlag, Berlin 2005



# 2

## Grundlagen der Verzahnung

Verzahnungen in Getrieben erfordern eine zielorientierte, d. h. wirtschaftlich und technisch aufeinander abgestimmte Wahl der Verzahnungsgeometrie. Dem Anspruch an ein optimales Einsatzverhalten der Verzahnungsgeometrie steht die Notwendigkeit einer kosteneffizienten Fertigung gegenüber. Hinsichtlich der Zahnprofilgeometrie und Achsanordnung sind Besonderheiten und Konventionen zu beachten, deren Kenntnis erforderlich ist, um Zahnradgetriebe erfolgreich konstruieren und fertigen zu können. Die nachfolgende Einführung in die Grundlagen der Verzahnungsgeometrie soll die Bewertung der Eignung unterschiedlicher Zahnradgeometrien zur Erfüllung der zum Teil konträren Anforderungen an das Maschinenelement Zahnrad erlauben.

Zahnradgetriebe erfüllen die Funktion der Drehzahl- und Drehmomentwandlung bzw. des Leistungstransfers. Die Grundlage einer gleichförmigen Drehübertragung stellt das allgemeine Verzahnungsgesetz dar, welches in Abschnitt 2.1 vorgestellt wird. Aus dem Verzahnungsgesetz ergeben sich distinkte Anforderungen an die Auslegung und Herstellung von Verzahnungen. Je nach Lage der beiden Radachsen zueinander ergeben sich verschiedene Zahnradgetriebegrundformen, die in Bild 2.1 exemplarisch anhand von ausgewählten und verbreitet eingesetzten Zahnradgeometrietypen dargestellt sind. Gemäß der Bau- und Funktionsweise ist eine Unterscheidung von Getrieben nach folgenden Grundformen möglich:

- Zahnradgetriebe mit parallelen Achsen
- Zahnradgetriebe mit sich schneidenden Achsen
- Zahnradgetriebe mit sich kreuzenden Achsen

Bei den Stirnradgetrieben ist die Geometrie des Grundkörpers der Verzahnungen zylindrisch oder konisch. Zylindrische Verzahnungen werden in achsparallelen Anwendungen eingesetzt. Zylinderräder weisen die größte Produktionsmenge in der Antriebstechnik auf [DSTAT14] und werden in verschiedensten Anwendungen und Baugrößen eingesetzt, wie z. B. in Miniaturstellgetrieben, Automobilschaltgetrieben, Industrie- und Windkraftgetrieben oder Schiffsgetriebenen.

Nachfolgend werden die Grundlagen der Zahnradgeometrie zunächst für zylindrische Stirnradverzahnungen beschrieben. Dazu wird in Abschnitt 2.2 auf grundlegende Zahnprofilformen und geometrische Definitionen und Konventionen eingegangen.



**Bild 2.1** Grundformen von Zahnradgetrieben

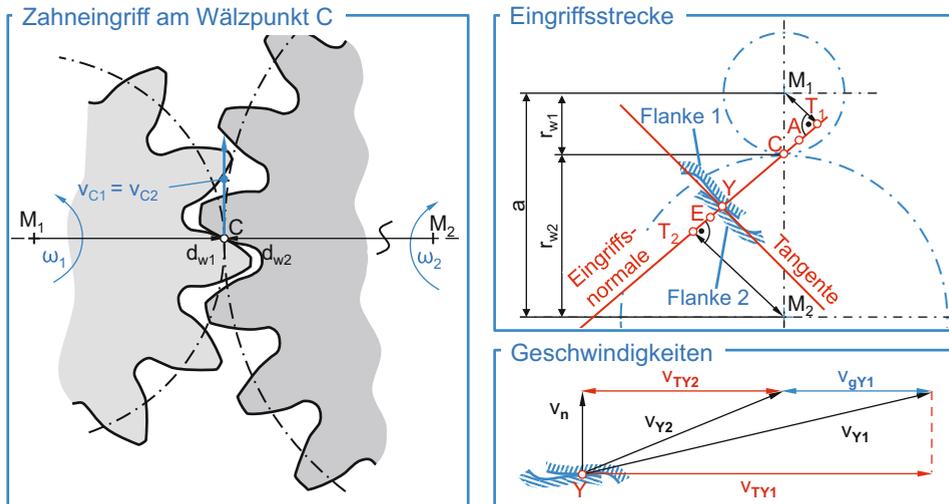
Für Getriebebauformen mit sich schneidenden und kreuzenden Achsen werden insbesondere bei großen Achskreuzwinkeln Kegelradgetriebe eingesetzt. Kegelradgetriebe, deren Achsen sich aufgrund eines Achsversatzes nicht schneiden bzw. kreuzen, werden als Hypoidgetriebe bezeichnet. Die Kegelradverzahnung weist Besonderheiten gegenüber einer Stirnradgeometrie auf, die in Auslegung und Fertigung zu berücksichtigen sind und in Abschnitt 2.3 erläutert werden. Weitere Beispiele für Getriebebauformen bei sich schneidenden oder kreuzenden Achsen, die allerdings nachfolgend nicht näher betrachtet werden, sind z. B. Schraubradgetriebe, Schneckengetriebe oder Kronenradgetriebe.

Konische Stirnradverzahnungen, auch als Beveloidverzahnungen bezeichnet, werden in Getrieben mit unterschiedlichen Achskonfigurationen eingesetzt und finden zunehmend Beachtung. Bei Getrieben mit parallelen Achsen zeichnen sie sich durch ein einstellbares Verdrehflankenspiel aus, sodass Beveloidverzahnungen in Präzisionsgetrieben wie beispielsweise bei Robotern Anwendungen finden. Weiterhin werden Beveloidverzahnungen in Anwendungen mit kleinen Achskreuzwinkeln, z. B. im Automobil- und Schiffsgtriebebau, eingesetzt. In Abschnitt 2.4 wird auf die geometrischen Besonderheiten von Beveloidverzahnungen eingegangen.

## ■ 2.1 Das Verzahnungsgesetz

Das Verzahnungsgesetz definiert die Anforderungen an die Zahngeometrie für ein konstantes Übersetzungsverhältnis der Antriebsleistung. Zur Erfüllung des Verzahnungsgesetzes müssen zwei Bedingungen vorliegen. Zum einen müssen die Zahnflanken stets einen Kontakt in nur einem gemeinsamen Berührungspunkt entlang einer Berührlinie, der sogenannten Eingriffslinie, aufweisen. Zum anderen dürfen sich die Zahnflanken zu keinem Zeitpunkt

durchdringen oder voneinander abheben. Die Bedingungen werden dann erfüllt, wenn die Eingriffsnormale der Zahnflanken in jedem Berührungspunkt einen ortsfesten Wälzpunkt C schneidet. Der Wälzpunkt C definiert die idealen Wälzkreise mit den Wälzkreisdurchmessern  $d_{w1}$  und entspricht bei Stirnrädern in der Regel dem Schnittpunkt der Verbindungslinie der Achsmittelpunkte der Zahnräder mit der Berührrnormalen (siehe Bild 2.2).



**Bild 2.2** Zahneingriff und Geschwindigkeiten

Der aktive, sich im Kontakt befindliche Abschnitt der Eingriffslinie  $\overline{AE}$ , im vorliegenden Fall als Eingriffsnormale eingezeichnet, wird als Eingriffsstrecke bezeichnet. Der initiale Kontakt erfolgt zwischen dem größten aktiven Durchmesser des getriebenen Rads und dem kleinsten aktiven Durchmesser des treibenden Rads am Beginn des Eingriffs (Punkt A). Im weiteren Verlauf des Eingriffs verschiebt sich der Berührungspunkt Y in Zahnhöhenrichtung des treibenden Rads in Richtung der gemeinsamen Normalen auf der Eingriffsstrecke bis zum Wälzpunkt C und anschließend bis zum Ende des Eingriffs (Punkt E). Wird das Verzahnungsgesetz von einer Zahnradgeometrie erfüllt, liegt eine kontinuierliche, hinsichtlich Drehmoment- und Drehzahlverhältnis gleichförmige, stoßfreie Drehübertragung von einer Antriebswelle ( $M_1$ ) auf die Abtriebswelle ( $M_2$ ) vor.

Da im Stirnschnitt, also einem Schnitt senkrecht zur Achse der Verzahnung, der Kontakt zwischen beiden Flanken stets in einem Punkt stattfindet, kann bei Vorgabe einer Flanke aus dem Verzahnungsgesetz die entsprechende konjugierte Gegenflanke bestimmt werden. Weiterhin lassen sich die Geschwindigkeitsverhältnisse an den Zahnflanken im Eingriff ableiten. Bild 2.2 zeigt die Geschwindigkeitsverhältnisse im Eingriff. Die Normalgeschwindigkeit  $v_{ni}$  ist für jede Eingriffssituation in Betrag und Orientierung für Rad und Ritzel identisch, sodass keine Abhebung oder Durchdringung der Zahnflanken vorliegt. Am Wälzpunkt C tritt der Sonderfall auf, dass die Normalgeschwindigkeit  $v_n$  identisch mit der Umfangsgeschwindigkeit  $v_{C1}$  ist. Damit verbunden ist die Tatsache, dass am Wälzpunkt C keine Gleitgeschwindigkeit der Zahnflanken vorliegt, sodass in diesem Punkt die Zahnflanken theoretisch aufeinander abrollen. Die Gleitgeschwindigkeit  $v_{g,C}$  ist null. Die für jeden Be-

rührpunkt Y während des Eingriffs auftretende Umfangsgeschwindigkeit  $v_{Y1}$  ist vom Durchmesser  $d_{Y1}$  an den Berührungspunkten sowie der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_1$  des betrachteten Rads abhängig. Damit ändern sich die Umfangsgeschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  der Zahnflanken im Eingriffspunkt in ihrer Richtung und in ihrem Betrag. Es gilt:

$$v_{Y1} = \frac{d_{Y1}}{2} \cdot \omega_1 \quad (2.1)$$

Bild 2.2 zeigt im rechten Bildbereich die kinematischen Verhältnisse während des Zahneingriffes. Mit zunehmendem Abstand vom Wälzpunkt C erhöht sich die Gleitgeschwindigkeit. Aufgrund der Orientierung und des Betrags der Tangentialgeschwindigkeitsvektoren ist die Gleitgeschwindigkeit  $v_{gY1}$  am treibenden Rad zwischen Punkt A und C negativ und zwischen Punkt C und E positiv. Beim getriebenen Rad sind die Verhältnisse genau umgekehrt. Auf die Bestimmung der kinematischen Kontaktgrößen wird in Kapitel 5 detailliert eingegangen.

Das Übersetzungsverhältnis  $i$  beschreibt das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten zwischen dem treibenden und dem getriebenen Rad. Unter Berücksichtigung von Formel 2.1 ergibt sich ein Zusammenhang in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit und dem Berührungspunktdurchmesser:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{v_{Y1}}{d_{Y1}} \cdot \frac{d_{Y2}}{v_{Y2}} \quad (2.2)$$

Aus der Anwendung von Formel 2.2 folgt Formel 2.3, da die Umfangsgeschwindigkeiten  $v_{C1}$  und  $v_{C2}$  identisch sind.

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_{Y2}}{d_{Y1}} = \frac{d_{w2}}{d_{w1}} \quad (2.3)$$

Der Zusammenhang in Formel 2.3 ist für alle Berührungspunkte Y entlang der Eingriffslinie gültig. Die allgemeine Anwendung geht aus den Dreiecken der Geschwindigkeitsvektoren hervor. Somit kann das Übersetzungsverhältnis einer Zahnradgetriebestufe bei Erfüllung des Verzahnungsgesetzes aus den Durchmesserhältnissen bestimmt werden. Die charakteristischen Durchmesser für die hier beispielhaft vorgestellte evolventische Verzahnung werden in Abschnitt 2.2.4.4 vorgestellt.

## ■ 2.2 Stirnradverzahnungen

### 2.2.1 Arten der Stirnradverzahnungen

Aus dem Verzahnungsgesetz lassen sich verschiedene Zahnflankengeometrien ableiten, die sich auf bekannte geometrische Funktionen zurückführen lassen. In der Praxis werden aus fertigungs- und messtechnischen Gründen nur solche Flankenprofile eingesetzt, die mathematisch einfach zu beschreibende Eingriffslinien (Gerade, Kreis) besitzen. Zu diesen Profilen zählen z. B. Zykloiden-, Triebstock-, Kreisbogen-, Wildhaber-Novikov- und insbesondere Evolventenverzahnungen, deren geometrische Eigenschaften und Einsatzfelder nachfolgend beschrieben werden.

# Index

## A

- Abkühlgeschwindigkeit
  - kritische 177
- Abrasiveverschleiß 416
- Abrichtprozess 244
- Abschrecken 179
- Abstrahlmaß 507
- Achsabstand berechnen 94
  - Null-Achsabstand 38
- Achskreuzwinkel 53, 57
- Achsversatz 47, 59 f., 149, 364
- Achswinkel 149
- Additive Fertigung 286, 295
- Adhäsion 290
- Akustische Kamera 557
- Akustische Pegel 492
- Alternative Fertigungsverfahren 285
- Amplitudenfrequenzgang 688
- Analogieversuch 371, 437, 447 f., 452
  - Leistendrehstest 372
  - Messergruppen-Versuch 372
  - Pulsator 448
  - Übertragbarkeit 480, 484
  - Zwei-Scheiben-Versuch 452
- Anfangswertproblem 702
- Anlassen 177, 179
- Anregung
  - äußere 508
  - fertigungsbedingte 514
  - infolge Teilungsabweichung 516
  - innere 508
  - lastbedingte 515
- Anregungsmechanismen 507
  - Parameteranregung 509
  - Stoßanregung 511
  - Weganregung 512
- Äquivalente Absorptionsfläche 545
- Arraymesstechnik 557
- Aufkohlen 179
- Ausfallwahrscheinlichkeit 462, 471
  - Umrechnung 465
  - Wahrscheinlichkeitsnetz 462
  - Zuordnung 466
- Auslegung
  - beanspruchungsgerechte 92
  - toleranzfeldbasierte 154
  - Verzahnungsmikrogeometrie 124
- Außenräumen 223
- Austenitisieren 179
- Axialmodul 28
- Axialschnitt 20
- Axialwälzfräsen 200
  - Gegenlauf 200
  - Gleichlauf 200

## B

- Barkhausen-Rauschen 341 f.
- Basquin'sche Gleichung 462
- Bauteilrandzone 434
- Beschichtung 193
- Beschleunigungsaufnehmer 537
  - Applikation 538
- Beschleunigungspegel 493
- Betriebswälzprüfung 524, 561, 565
- BevelCut 626

- Beveloid 603
  - Auslegung 144
  - Auslegungsbeispiel 148
  - Eingriffslinie 69
  - Eingriffswinkel 66
  - Einpassprozess 147
  - Generierung 63
  - Geometrie 62
  - Konuswinkel 65
  - Radanordnung 145
  - Schrägungswinkel 66
  - Vorauslegung 146
- Bewertungskurven 501
- Bezugsfrequenz 494
- Bezugsprofil 23, 602
- Bezugswert 492
- Bindungssysteme 253
- Boundary Element Method (BEM) 706
- Breite 96
- Breitenballigkeit 127, 279
- Briefmarkendiagramm 132
  
- C**
- Campbell-Diagramm 495
- Carbonitrieren 182
- Chemisches Gleitschleifen 433
- Closed Loop 370
  
- D**
- Dämpfung 691
- Dauerbruch 420
- Dauerfestigkeit 461, 464
  - Abgrenzungsverfahren 467
  - Auswertung 465
  - Horizontenverfahren 465
  - PROBIT-Verfahren 465
  - Treppenstufenverfahren 467
- Dezibel 491
- Diagonalschaben 234
- Dichtwalzen 291
- Differenz
  - -drehbeschleunigung 534
  - -drehgeschwindigkeit 535
  - -schnelle 535
  - -schnelleuntersuchung 549
- Differenzialgleichungssysteme 701
- Diffusion 175
- Diffusionsfluss 177
- Diffusionsglühen 175
- Digitaler Zwilling 638
- Diskontinuierliches Profilschleifen 257, 283
- Diskontinuierliches Wälzschleifen 264
- Doppelhärtung 180
- Drehbeschleunigungs
  - -messsystem 530 f.
  - -messung 528 f.
  - -untersuchung 514, 533, 535 f.
- Drehfehler 151, 507, 523
  - dynamischer 569
  - -untersuchung 514, 517, 533, 562, 564, 566, 569
  - -verlauf 524
- Drehmomentgrundgleichung 104
- Drehübertragungsverhalten 528
- Drehungleichförmigkeit 497, 507
- Drehwinkelmessung 524, 528
  - inkrementelle 528
- Drehzahlgrundgleichung 103
- Duplex-Kegel 57, 360
- Durchdringungsrechnung 601, 609
- Durchhärbarkeit 181
- Durchmesser
  - Fußkreis 34
  - Kopfkreis 34
- Durchvergütbarkeit 177
- Dynamik 681
- Dynamikfaktor 508
  
- E**
- Ease-Off 150
- Eckrücknahme 128
- Effektivwert 491
- Eigenspannungen 176
- Eigenspannungsanalyse 347
- Eigenspannungsverlauf 348
- Einbaumaß 52 f.

- Einflanken
  - -Wälzabweichung 523, 525, 579
  - -Wälzfehler 525
  - -Wälzprüfung 324, 523, 561
  - -Wälzsprung 525
- Eingriffs
  - -stoß 511, 689
  - -teilung 510
  - -teilungsfehler 517
- Eingriffslinie 18
- Eingriffsstrecke 13, 30
- Eingriffswinkel 30
  - Normal- 98
- Einmassenschwinger 683
- Einsatzhärten 179
- Einsatzhärte tiefe 424
- Einzelfedersteifigkeit 510
- Einzelteilverfahren 47, 49
- Elastohydrodynamik 403
- Elektromobilität 88
- Emission 489
- Emissionskennfeld 555
- Endkonturnahe Fertigungsverfahren 286
- End-of-Line-Test 567
- Endrücknahme 128
- Entgraten 227
- Epizykloide 47, 50, 52, 362
- Ersatzstirnradverzahnung 151
- Erzeugungsplanrad 53
- Evolvente 23, 606
  - Fertigung 26
  - Herstellprinzip 22
- Evolventenfläche 26
- Evolventenfunktion 22
- Evolventenverzahnung 18
- Exzentrizität 527
  
- F**
- Face Hobbing 47, 49
- Face Milling 47, 49
- FE-basierte Auslegung von Kopfrücknahmen 140
- FE-basierte Zahnkontaktanalyse 641
  - Kontaktfindung 643
  - Lastkennwerte 649
  - Mathematisches Federmodell 646
  - Verschiebungseinflusszahlen 644
  - Vorgehensweise 642
  - Zahnfußoptimierung 652
- Federmodell 139
- Feinschneiden 286
- Fernfeld 491
- Ferrit 173
- Ferse 53
- Fertigungsabweichungen 627
- Fertigungsbedingte Produkteigenschaften 309
- Fertigungssimulation 600
- Fertigwälzfräsen 236
- Fingerfräser 219
- Finite-Elemente-Methode 601, 641
- Flammhärten 178
- Flankenlinienabweichung 312
- Flankenlinien-Formabweichung 315
- Flankenlinien-Gesamtabweichung 316
- Flankenlinien-Winkelabweichung 315
- Flüssigkeitsreibung 403
- Formfräsen 219
- Formfunktion 645
- Fourier-Transformation 490
- Freiflächenverschleiß 188
- Freiheitsgradreduktion 695
  - Craig/Bampton 696
- Fremdgeräusch 493, 544
  - -korrektur 544
  - -reduzierung 544
- Frequenz
  - -bereich 490, 493, 499
  - Bezugs- 494
  - -spektrum 494
  - Zahneingriffs- 493
- Frequenzbereich 490
  - hörbarer 499
  - sensitiver 493
- Frequenzspektrum 493
- Fressschaden 415, 473
  - Kaltfressen 415
  - Warmfressen 415
- Fresstragfähigkeit 60, 473

Fußkegelwinkel 53, 57  
 Fußkreis 34  
 Fußwinkel 57

## G

Gangabstufung 84  
 Gasaufkohlen 180  
 GearGenerator 607  
 GearGRIND3D 629 f.  
 Gefügeschliff 355  
 Geisterfrequenzen 515  
 Geometrische Bauteilprüfung 310  
 Geräusch 489 f.  
 – -emission 541  
 – -entstehungskette 498  
 – -kennwerte 489  
 – -minderungsmaßnahmen 518  
 – -pegel 489  
 – -prüfung 560  
 – -stärke 489  
 Geräuschmessmethoden 556  
 – Arraymesstechnik 557  
 – Kunstkopfmessstechnik 556  
 – Laser-Vibrometrie 558  
 Gesamtgetriebeuntersuchung 567  
 Gesamtlautheit 503  
 Gesamtprofilseitenverschiebung 59  
 Gesamtüberdeckung 32, 56, 510  
 Gesamtzahnfedersteifigkeit 510  
 Getriebe  
 – ungleichförmig 6  
 – ungleichförmig, gestuft 6  
 – ungleichförmig, stufenlos 6  
 Getriebeakustik  
 – Anregungsmechanismen 507  
 – Bewertungskenngrößen 489  
 – Geräuschreduzierung 518  
 – Getriebegeräusche 496  
 – Prüfstandskonzepte 560  
 – Untersuchungsmethoden 523  
 Getriebeauslegung 79  
 Getriebegeräusch 489, 496  
 – Heulen, Pfeifen 497  
 – Klappern, Rasseln 497

– Lagergeräusch, Kreischen 498  
 – Schaltgeräusch 498  
 Getriebekonzept 83  
 Getriebetyp 83  
 Gewaltbruch 419  
 Gleitgeschwindigkeit 59 f., 405  
 Glühen 175  
 Graufleckentragfähigkeit 475  
 Graufleckigkeit 409, 488  
 Grenzflächenreibung 403  
 Grenzlastspielzahl 458, 469  
 Grenzschiicht 356  
 Grobkorn  
 – Glühen 175  
 Grübchenschaden 411, 488  
 Grübchentragfähigkeit 425, 478  
 Grundkreisdurchmesser 21  
 Grundkreisschrägungswinkel 27  
 Grünling 290

## H

H1-Technik 549  
 Harmonische 493  
 Härbarkeit 181  
 Härte  
 – Einsatzhärte tiefe 424  
 – Härteplateau 425  
 – Härtetiefenverlauf 425  
 – Randhärte 424  
 Härten 176  
 Härteprüfung 353  
 Härteverzug 183, 230  
 Hartfeinbearbeitung 240, 291, 434  
 Hartwälzschalen 242  
 Hertz'sche Pressung 402, 407  
 Hochdruckgasabschrecken 180  
 Hochverzahnung  
 – Optimierung 110  
 Hörempfinden 491  
 Horizontenverfahren 460, 465  
 Hörschwelle 499  
 Hüll  
 – -fläche 492, 543 f.  
 – -flächenverfahren 542

Hüllschnittabweichung 360, 363  
 Hyperboloid 59  
 Hypoidgetriebe 46  
 Hypoidverzahnung 59, 149, 152, 364

## I

IABG-Auswertemethode 468  
 Immission 489  
 Induktionshärten 178  
 Innenräumen 223  
 Intensitätspegel 493  
 Isophonen 500

## K

Kegelrad 149  
 – Achsversatz 364  
 – Erzeugungsplanrad 47  
 – Erzeugungsprinzip 50  
 – Flankenlinie 47, 51  
 – geometrische Größen 53  
 – Klassifizierung 46  
 – Kopfspiel 53  
 – Mikrogeometrie 150  
 – mittlere Zahnfußhöhe 53  
 – mittlere Zahnkopfhöhe 53  
 – Tauchen 50  
 – Tragbild 364  
 – Tragfähigkeit 151  
 – Wälzen 50, 360  
 – Zahnbreite 53  
 – Zahnhöhe 360, 363  
 – Zahnhöhenverlauf 47  
 Kegelradauslegung 154  
 Kegelradfertigung  
 – Finnen 363  
 – Flankenmaß 362  
 – Gleitgeschwindigkeit 364  
 – Läppdauer 364  
 – Läppen 363  
 – Läppmoment 364  
 – Läppposition 364  
 – Prozesskette 358  
 – Qualitätsregelkreis 370

– Schleifen 361  
 – Schnittgeschwindigkeit 360, 362 f.  
 – Spanbildung 372  
 – Unterschnitt 363  
 – Vorschub 360, 363  
 – Wälzgeschwindigkeit 362  
 Kegelradgetriebe 46  
 Kegelradlappen 363  
 Kegelradmesszelle 151, 565  
 Kegelradschleifen 361  
 Kippmoment 691  
 Klang 490  
 Knicklastspielzahl 462  
 Kohärenzfunktion 548 f.  
 Kolkverschleiß 188  
 Kombinationswälzfräser 238  
 Konjugierte Verzahnung 13  
 Kontinuierliches Profilschleifen 263  
 Kontinuierliches Wälzschleifen 266  
 Kopfrücknahme 127, 140  
 Kopfspiel 25, 53  
 – Mindest- 99  
 Korngröße 175  
 Körperschall 489, 498  
 – Berechnung 705  
 – -maß 507  
 – -messung 536  
 – -untersuchung 540  
 Korrekturfaktoren  
 – Vordimensionierung 94  
 Kraftkoppellement 698  
 Kreisbogenverzahnung 17  
 Kreuzleistungsspektrum 549  
 Kugelevolventen 48  
 Kunstkopfmessstechnik 556

## L

Lärm 489  
 Lärminderungsmaßnahmen 541  
 Laser-Vibrometrie 558  
 Lastkollektiv 440  
 Lastniveau 460, 466, 470  
 Laststeigerungsverfahren 460, 474  
 Laufversuch 437 f., 447

Lautheit 502, 506  
 Lautstärke 501f.  
 Lautstärkeempfinden 499  
 Lehr'sches Dämpfungsmaß 687  
 Leistendrehtest 372  
 Leistungsdifferenzmessung 573f.  
 Leistungskreislauf 439  
 Lokale Berechnungsmodelle 658  
 – Fehlstellenmodell 659  
 – Fehlstellenverteilung 666  
 – Gesamtanstrengung im Wälzkontakt 679  
 – Überlebenswahrscheinlichkeit 661  
 – Wälzfestigkeit 672  
 – Werkstofffestigkeit im Wälzkontakt 675  
 – Zahnfußtragfähigkeit 662  
 Lückenweite 40f.  
 Luftschall 489, 498  
 – Berechnung 706  
 – direkter 498  
 – -entstehungskette 507  
 – indirekter 498  
 – -messung 541  
 – Signalsynthese 708  
 – -untersuchung 547, 549, 551

## M

Magnetische Drehgeber 563  
 Makrogeometrieoptimierung  
 – rechnergestützte 122  
 Maschinenakustische Grundgleichung 507, 703  
 Maschinenkinematik  
 – Beveloid 603  
 – Kegelrad 604  
 – Stirnrad 603  
 Maskierung 503  
 Massenträgheitsmoment 695  
 Mehrschnittstrategie 237  
 Mess  
 – -bedingungen 542  
 – -flächenmaß 493, 544  
 – -gegenstand 542

– -punktanordnung 543  
 – -sonde 555  
 – -stelle 548  
 – -technik 528, 537, 542, 556 ff.  
 Metallografische Analyse 334  
 Mikrogeometrie 124  
 Mikrogeometrische Kontaktanalyse 655  
 – Methode kombinierter Lösungen 656  
 Mindestprofilverschiebung 37  
 Mischreibung 403  
 Mischtopografie 154  
 Mithörschwelle 503  
 Mittlerer Schallabsorptionsgrad 545  
 Modellbildung 598, 693  
 Modellversuch 437  
 Modifikationen 277, 608  
 Modul 23, 27, 54  
 – mittlerer Normalmodul 54  
 – Normal- 96  
 – Stirnmodul 28  
 Modulation 504

## N

Nachhaltigkeit 639  
 Nahfeld 543  
 Neuhärtung 348  
 Niederdruckaufkohlen 180  
 Nitalätzung 337  
 Nitrieren 181f.  
 Nitrocarburieren 182  
 Normaleingriffswinkel 30  
 Normalglühen 175  
 Normalisieren 175  
 Normalmodul 28  
 Normalschnitt 20  
 Normalverteilung 463  
 – Gauß'sche 464  
 – logarithmische 464

## O

Oberflächen  
 – -gestalt 428  
 – -integrität 430

- -rauheit 428
  - -struktur 410, 428, 513
  - -topografie 334, 429, 627
  - Oberflächendefekte 208
  - Oberflächengüte 294
  - Oktoide 48
  - Ölabschrecken 180
  - Ordnungsspektrum 494
- P**
- Parallelschaben 234
  - Parameteranregung 509
  - Parametererregung 684
  - Pegel 492
  - Pendelnde Getriebeaufstellung 573
  - Pendelnde Lagerung von An- und Abtriebsmaschine 574
  - Perlenschnurverfahren 470
  - Perlit 174
  - Piezoelektrischer Effekt 529, 537
  - Pittingtest
    - praxisnaher 479
    - Standard 479
  - Pkw-Getriebegeräusche 497
  - Planetengeräte
    - Anregungsbedingung 107
    - Kräfte 107
    - Montagebedingungen 107
    - Vordimensionierung 102
  - Planetengeriebemesszelle 563
  - Präzisionsschmieden 286
  - PROBIT-Verfahren 465
  - Produktlebenszyklus 80
  - Profilballigkeit 127
  - Profil-Formabweichung 314
  - Profil-Gesamtabweichung 315
  - Profillinienabweichung 312
  - Profilseitenverschiebung 59
  - Profilüberdeckung 31f., 39, 55
  - Profilverschiebung 36, 58, 100
    - Beveloid 62
    - Null-Verzahnung 37
    - Profilverschiebungssumme 36
    - V-Null-Verzahnung 37
    - V-Verzahnung 37
  - Profil-Winkelabweichung 314
  - Profilwinkelkorrektur 126
  - Protuberanz 187
  - Prozessketten der Zahnradsfertigung 170
  - Prüfverzahnungen 444
  - Psychoakustik 501
  - Psychoakustische Kennwerte 502
    - Lautheit 502
    - Maskierung, Verdeckung 503
    - Rauigkeit 504
    - Schärfe 505
    - Tonalität 505
    - Zusammenführung der Kenngrößen 505
  - Pulsatorprüfstand 446
    - hydraulischer 450
    - Magnetresonanz- 450
    - unwuchterregter Resonanz- 449
  - Pulsatorversuch 438, 447f., 480
    - Schrägverzahnung 451
  - Pulvermetallurgische Fertigung 286, 290
  - PVD-Beschichtung 431
- Q**
- Qualitätsprüfung 309
- R**
- Radsatzuntersuchung 560
    - Kegelradmesszelle 565
    - Planetengeriebemesszelle 563
    - Stirnradmesszelle 560
  - Randschichthärten 177
  - Rauheitsmessung 328
  - Raumeinfluss 545
  - Räumen 223
  - Reibkraftanregung 690
  - Reibkraft-Tribometer 576
  - Reibung 406
  - Reibwert 407, 412, 428
  - Rekristallisationsglühen 176
  - Restaustenit 425
  - Restprotuberanz 186
  - Reversieren 293

Rissprüfung 345  
 Rundlaufabweichung 317

## S

Schadensformen 407, 419, 458  
 Schadensfortschritt 458, 488  
 Schadenskriterium 458, 470, 478  
 Schall 489  
 – -druck 489, 491  
 – -druckmesstechnik 542  
 – -druckpegel 492  
 – -emissionsmessung 489  
 – -energie 491  
 – -geschwindigkeit 491  
 – -intensität 491  
 – -intensitätsmesstechnik 551  
 – -kennimpedanz 492, 553  
 – -kennwerte 491f.  
 – -leistung 492  
 – -leistungsermittlung 546  
 – -schnelle 491  
 – -wellenwiderstand 492  
 Schallemission 493  
 Schallereignisse 490  
 Schallübertragung 498  
 Schaltgetriebe 84  
 Schälwälzfräsen 240  
 Schälwälzstoßen 242  
 Schärfe 505, 507  
 Scheibenfräser 219  
 Schleifbrand 338  
 Schleifwerkzeug 250  
 Schlupf 405, 453  
 Schmierfilmhöhe 403  
 Schmierpalt 403  
 Schmierstoff 426  
 – -additivierung 426  
 – -tragfähigkeit 473  
 Schmierzustand 403  
 Schneidkornmaterialien 252  
 Schneidräder 215  
 Schneidstoff 190  
 Schrägungswinkel 99  
 Schrägverzahnung 27

Selektivanalyse 548  
 Sensorischer Wohlklang 506  
 Shiftstrategien 209  
 Spannungsarmglühen 176  
 Spannungsdicke 616  
 Spannungskenngrößen 614  
 SPARTAprö 609, 622  
 Spezifische Lautheit 503  
 Spiralrichtung 55, 59  
 Spiralwinkel 54  
 – Ferse 55  
 – mittlerer 55, 59  
 – Zehe 55  
 Spreizung 86  
 Sprungüberdeckung 32  
 Standübersetzung 103  
 Statistische Energieanalyse (SEA) 707  
 Stirnradmesszelle 560  
 Stirnschnitt 20  
 Stoßanregung 511, 689  
 Strukturdynamik 703  
 Stufensprung 85, 460, 467f.  
 Subjektive Geräuschbewertung 499  
 Summenprüfverfahren 523

## T

Tangentialgeschwindigkeiten 405  
 Tauchschaben 234  
 Taumelpressen 289  
 Teilbewegung 169  
 Teilkegel 53  
 Teilkreisdurchmesser 27, 33  
 Teilung 28  
 – Grundkreisteilung 29  
 Teilungsabweichung 316  
 Teilwälzschleifen 264  
 Ton 489f.  
 Tonalität 505, 507  
 Tongemisch 490  
 Topografische Zahnflankenmessung 323  
 Topologische Flankenkorrektur 129  
 Tragbild 327  
 Tragfähigkeitsuntersuchung 436  
 – Auswertemethoden 465, 470

- Fressen 473
- Grauflecken 475
- Grübchen 478
- Prüfstandkonzepte 437
- Schmierstoff 445, 473
- Vorgehensweise 460
- Zahnfuß 446
- Treppenstufenverfahren 460, 467
- Tribometer 576
- Tribomutation 435
- Triebstockverzahnung 16

## U

- Überdeckung
  - Gesamtüberdeckung 32
  - Profilüberdeckung 32
  - Sprungüberdeckung 32
- Überrollung 524
- Übersetzung 7, 29
- Übersetzungsschwankung 523
- Übertragungsfunktion 549
- Ultraschallprüfung 337
- Umformgrad 176
- Umwandlungstemperaturen 174
- Underpass-Schaben 234
- Universalgetriebeprüfstand 567
- Unrundverzahnung 455

## V

- Verlagerung 154
- Verlustleistung 570
- Verschleißmechanismus 407
  - Abrasion 409
  - Adhäsion 409
  - chemische Reaktion 409
  - Oberflächenzerrüttung 408
- Verschleißmodell
  - Wälzfräsen 624
- Veschränkung 129, 133, 259, 269, 278
- Verspanneinheit
  - hydraulische 440
  - mechanische 440

- Verspannkreislauf 439, 441
- Verspannungsprüfstand 438
  - DIN ISO 14635 439
  - Drei-Wellen- 441
  - Drei-Wellen-Biegewechselast 442
  - Hochdrehzahl 444
  - Kegelrad- 438
  - Zwei-Wellen- 439
- Verteilungsdichtefunktion 463
- Verzahnungen
  - asymmetrische 116
  - wirkungsgradoptimierte 120
- Verzahnungsabweichung 513
- Verzahnungsarten
  - Kreisbogen 17
  - Triebstock 16
  - Zykloiden 15
- Verzahnungsgesetz 15
- Verzahnungshonen 272, 291
- Verzahnungsmessschrieb 319
- Verzahnungsmesszentrum 311
- Verzahnungsmodifikationen 608
- Verzahnungsqualität 310
- Verzahnungswerkstoffe 423
- Verzug 229
- Verzugsmechanismen 183
- Visuelle Prüfung 336
- V-Kreisdurchmesser 34
- Vordimensionierung 92
- Vorverzahnen 185
- Vorzugslastdrehrichtung 116

## W

- Wafer-Werkzeuge 215
- Waguri-Bewegung 361
- Wälzfestigkeit-Tribometer 453
- Wälzfräsen 199
- Wälzfräser 203
- Wälzhobeln 198
- Wälzkreisverlegung 30
- Wälzpunkt 13
- Wälz-Rundlaufabweichung 527
- Wälzschälen 216
- Wälzstoßen 212

- Wälzverfahren 169, 197
  - Wärmebehandlung 173, 424
  - Weganregung 512, 515, 687
  - Weibull-Verteilung 463 f.
  - Weichfeinbearbeitung 229
  - Wendeschneidplattenfräser 221
  - Werkstoffverbundzahnräder 521
  - Werkzeugprofil 602
  - Werkzeugverschleiß 188, 622
  - Winkel
    - -beschleunigung 528
    - -geschwindigkeit 528
    - -schrittgeber 561
  - Wirkungsgrad 7, 59, 120, 570
    - Oberflächenstruktur 577
    - PVD-Beschichtung 575, 577
  - Wöhlerlinie 461
- Z**
- Zahnbreite 53
  - Zahndicke 41, 59, 311
  - Zahneingriff
    - -sfrequenz 493
    - vorzeitiger 445
  - Zähnezahl 27, 29, 52, 99
    - Ersatz- 100
    - Grenz- 37, 99
  - Zähnezahlverhältnis 29, 52
  - Zahnflankenbuch
    - Analogieversuch 457
  - Zahnflankenmodifikation 312, 513
  - Zahnflankenschaden 407
    - Abrasivverschleiß 416
    - Fressen 415
    - Graufleckigkeit 409
    - Grübchenbildung 410 f.
    - Zahnflankenbruch 417
  - Zahnflankentopografie 130
  - Zahnfußbeanspruchung
    - bidirektionale 443
    - unidirektionale 443
  - Zahnfußhöhe 53
  - Zahnfußschaden 419
    - Dauerbruch 420
    - Gewaltbruch 419
    - Oberflächeninduziert 421
    - Suboberflächeninduziert 421
  - Zahnhöhenverlauf 56
  - Zahnkontaktanalyse 153, 482
  - Zahnkopfdicke
    - Mindest- 99
  - Zahnkopfhöhe 53
  - Zahnkraftpegel 704
  - Zahnlückenweite 59
  - Zahnprofilgeometrie 96
  - Zahnrad
    - Geschichte 2
  - Zahnradbeanspruchbarkeit 398, 422
  - Zahnradbeanspruchung 398
  - Zahnradschaben 231
  - Zahnradschäden 399
  - Zahnradtragfähigkeit 398
    - Berechnung 402
    - Einflussgrößen 402, 406, 422, 424, 427 f., 431, 435
    - Zahnflanke 401, 428, 431, 435
    - Zahnfuß 399
  - Zahnradwerkstoffe 172
  - Zahnstange 23
  - Zahnweite 42
  - Zehe 53
  - Zeitfestigkeit 461, 464
    - Auswertung 470
    - Horizontenverfahren 471
    - Perlenschnurverfahren 470
  - Zementit 173
  - Zerspankraft 617
  - Zerstörende Prüfverfahren 346
  - Zerstörungsfreie Prüfverfahren 335
  - Zweiflanken-Wälzabweichung 527, 581
  - Zweiflanken-Wälzprüfung 326, 527
  - Zweiflanken-Wälzprung 527, 579
  - Zweikugelmaß 311
  - Zwei-Scheiben-Prüfstand 438, 453
    - konstanter Schlupf 453
    - Reibkraftmessung 576
    - variabler Schlupf 454
  - Zwei-Scheiben-Versuch 448, 452, 484
  - Zykloidenverzahnung 15