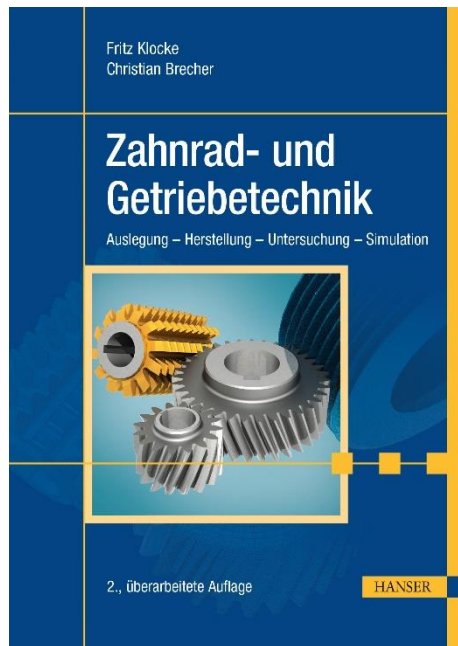


HANSER



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

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 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
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 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
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	Spannungskenngrößen	614
6.2.4.2	Modellierung der Zahnspannkraft	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
Index		723



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.

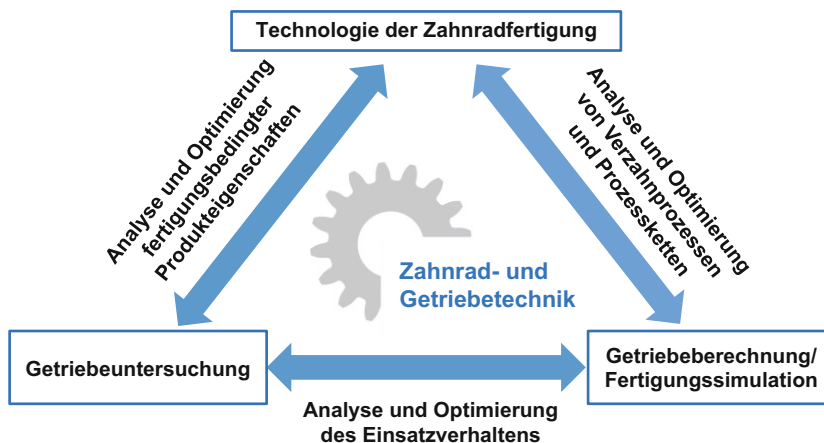


Bild 1.1 Gesamtheitlicher Analyseansatz in der Zahnrad- und Getriebetechnik

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.

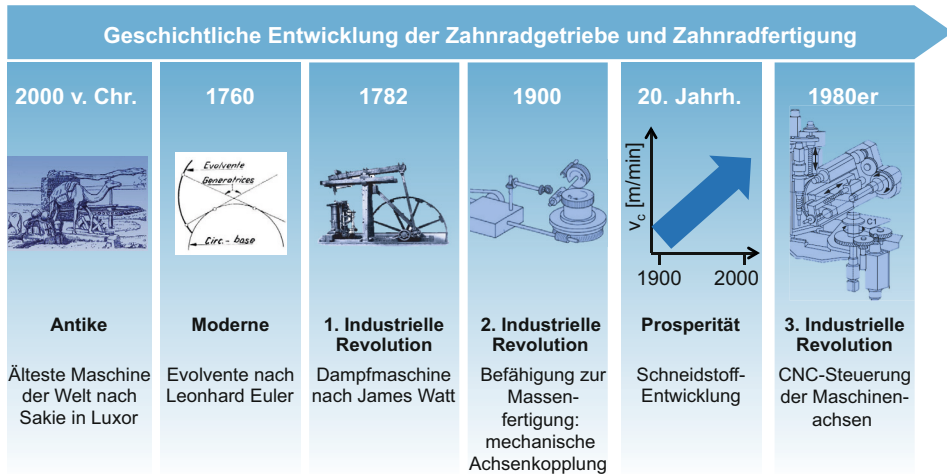


Bild 1.2 Übersicht über die Geschichte des Zahnradgetriebes [NAUN07, NN16a, NN16b, NN76, WECK05]

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]
 - ω Winkelgeschwindigkeit [s^{-1}]
 - n Drehzahl [min^{-1}]
 - i Übersetzung [-]
 - $i = T_{ab}/T_{an} = n_{an}/n_{ab}$

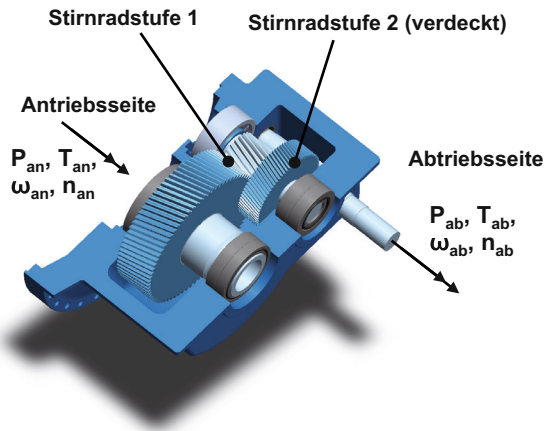


Bild 1.4 Aufbau eines gestuften Zahnradgetriebes

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 η 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	min^{-1}
n_{an}	Drehzahl Antrieb	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
η	Wirkungsgrad	
ω	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, 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_{wi} und entspricht bei Stirnrädern in der Regel dem Schnittpunkt der Verbindungslinie der Achsmittelpunkte der Zahnräder mit der Berühornormalen (siehe Bild 2.2).

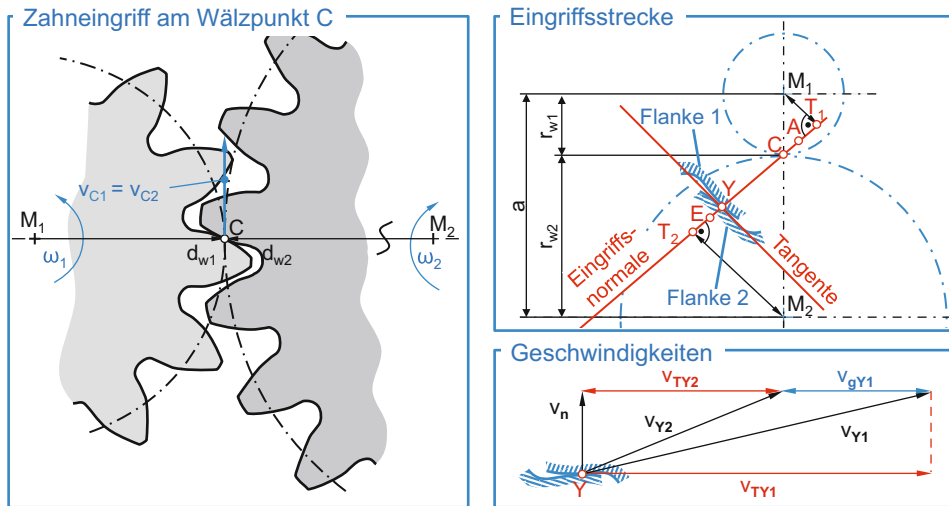


Bild 2.2 Zahneingriff und Geschwindigkeiten

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_{Ci} 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 ω_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
– Leistendrehtest 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
– Kunststoffmesstechnik 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
Grenzschicht 356
Grobkorn
– Glühen 175
Grübchenschaden 411, 488
Grübchentragfähigkeit 425, 478
Grundkreisdurchmesser 21
Grundkreisschrägungswinkel 27
Grünling 290

H

H1-Technik 549
Harmonische 493
Härtbarkeit 181
Härte
– Einsatzhärtetiefe 424
– Härteplateau 425
– Härtetiefenverlauf 425
– Randhärtigkeit 424
Härten 176
Härteprüfung 353
Härteverzug 183, 230
Hartfeinbearbeitung 240, 291, 434
Hartwälzschalen 242
Hertz'sche Pressung 402, 407
Hochdruckgasabschrecken 180
Hochverzahnung
– Optimierung 110
Hörfempfinden 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
 Kegelradläppen 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
 SPARTApro 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
- Wälzschalen 216
- Wälzstoßen 212

Wälzverfahren 169, 197
 Wärmebehandlung 173, 424
 Weganregung 512, 515, 687
 Weibull-Verteilung 463 f.
 Weichfeinbearbeitung 229
 Wendeschneidplattenfräser 221
 Werkstoffverbundzahnrad 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