



Leseprobe

Fritz Klocke, Christian Brecher

Zahnrad- und Getriebetechnik

Auslegung – Herstellung – Untersuchung – Simulation

ISBN (Buch): 978-3-446-43068-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-43140-9

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43068-6>

sowie im Buchhandel.

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. Aufgrund der Rohstoffknappheit zu jener Zeit lag der Schwerpunkt auf dem Verschleißverhalten nichtmetallischer Zahnräder. 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. In dem Arbeitskreis wurde zunächst das Ziel verfolgt, den Einfluss der Fertigungsgenauigkeit auf das Laufverhalten von Zahnradgetrieben zu ermitteln und durch Ursache-Wirkungs-Analysen die Bearbeitungsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen anhand der Optimierung des Antriebsstrangs der Maschinenachsen zu steigern. Das Laufverhalten wurde in Hinblick auf die Genauigkeit der Drehübertragung, das resultierende Laufgeräusch sowie die Lebensdauer beurteilt.

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 Techno-

logie 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. Unter Wilfried König und Manfred Weck konnten umfangreiche Weiterentwicklungen zum Einfluss fertigungsbedingter Produkteigenschaften des Zahnrads auf dessen Einsatzverhalten geleistet werden. Ebenso wurden umfassende Untersuchungen zur Steigerung der Prozessproduktivität sowie präzise Simulationsmethoden zur Abbildung des Zahneingriffs und der Fertigungsprozesse aufgebaut. Unseren Vorgängern gilt für ihr großartiges Wirken in der Entwicklung des Forschungsgebiets Getriebetechnik ein großer Dank. Unter Wilfried König und Manfred Weck wurden wegweisende Methoden für die Zahnradfertigung und Getriebekonstruktion entwickelt, die auch heute noch Anwendung finden und Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeiten sind.

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 150 Dissertationen und viele Fachpublikationen sind aus diesen Forschungsarbeiten 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 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. Es freut uns ganz besonders, dass wir im Jahr 2016 zum 60-jährigen Bestehen des WZL-Getriebekreises das vorliegende Buch den Interessenten der Zahnrad- und Getriebetechnik zugänglich machen können. 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.

Bei der Erstellung dieses Buches haben uns die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung Getriebetechnik unter Leitung unseres Oberingenieurs Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Christoph Löpenhaus maßgeblich unterstützt. Ohne den besonderen Einsatz unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wäre die Erstellung des Buches nicht möglich gewesen. Insbesondere danken wir Frau Julia Mazak M. Sc., sowie den Herren Mubarik Ahmad M. Sc., Jens

Brimmers M.Sc., Tim Frech M.Sc., René Greschert M.Sc., Dipl.-Ing. Florian Hübner, Dipl.-Ing. Marco Kampka, Dipl.-Ing. Peter Knecht, Philip Konowalczyk M.Sc., Dipl.-Ing. Markus Krömer, Dipl.-Ing. Matthias Ophey, Dipl.-Ing. Daniel Piel, Jonas Pollaschek M.Sc., Dieter Renkens M.Sc., Dipl.-Ing. Markus Rüngeler, Dipl.-Ing. Deniz Sari, Marius Schroers M.Sc., Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Julian Staudt und Dipl.-Ing. Stephan Wege. Herrn Dipl.-Ing. Florian Hübner danken wir weiterhin für die Kommunikation mit dem Verlag. Ebenfalls danken wir ganz herzlich unserem guten Freund, langjährigen Wegbegleiter und ehemaligen Oberingenieur der Getriebeabteilung, Prof. Dr.-Ing. Peter-Werner Gold, für die kritische Durchsicht des Buchmanuskripts und die vielen wertvollen Hinweise. 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 2016

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

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

Inhalt

Vorwort	V
1 Einführung	1
1.1 Geschichte des Zahnrades	2
1.2 Einteilung der Getriebetechnik	5
1.3 Gestufte Zahnradgetriebe	6
2 Grundlagen der Verzahnung	11
2.1 Das Verzahnungsgesetz	12
2.2 Stirnradverzahnungen	14
2.2.1 Arten der Stirnradverzahnungen	14
2.2.1.1 Zykloidenverzahnungen	15
2.2.1.2 Triebstockverzahnungen	16
2.2.1.3 Kreisbogenverzahnungen	17
2.2.1.4 Wildhaber-Novikov-Verzahnungen	17
2.2.1.5 Evolventenverzahnungen	18
2.2.2 Schrägverzahnungen	19
2.2.3 Erzeugungsprinzip von Evolventenverzahnungen	21
2.2.3.1 Die Evolventenfunktion	21
2.2.3.2 Das theoretische Herstellprinzip des Evolventenprofils	22
2.2.3.3 Das Bezugsprofil	23
2.2.3.4 Das praktische Herstellprinzip des Evolventenprofils	25
2.2.3.5 Räumliche Erzeugung des Flankenprofils	26
2.2.4 Geometrische Größen der Evolventenverzahnung	27
2.2.4.1 Modul und Teilung	27
2.2.4.2 Zähnezahzahl und Übersetzungsverhältnis	29
2.2.4.3 Eingriffswinkel und Überdeckungsgrad	29
2.2.4.4 Durchmesser	32
2.2.4.5 Profilverschiebung und Achsabstand	35
2.2.4.6 Lückenweiten, Zahndicken und Zahnweiten	40
2.2.5 Kontaktbedingungen zylindrischer Stirnräder	45

2.3	Kegelradgetriebe	46
2.3.1	Zahnprofile und Erzeugungsprinzip	47
2.3.2	Flankenlinie	51
2.3.3	Geometrische Größen	52
2.3.3.1	Mittlerer Modul und Spiralwinkel	54
2.3.3.2	Eingriffswinkel und Profilüberdeckung	55
2.3.3.3	Zahnhöhenverlauf, Zahndicke und Zahnweite	56
2.3.3.4	Profilverschiebung	58
2.3.3.5	Besonderheiten der Hypoidverzahnung	59
2.3.4	Kontaktbedingungen von Kegelradverzahnungen	61
2.4	Beveloidverzahnungen	61
2.4.1	Erzeugungsprinzip von Beveloidverzahnungen	63
2.4.2	Geometrische Größen von Beveloids	65
2.4.2.1	Konuswinkel	65
2.4.2.2	Eingriffs-, Schrägungswinkel und Überdeckungsgrad	66
2.4.3	Kontaktbedingungen von Beveloidverzahnungen	69
3	Getriebeentwicklung	79
3.1	Vorauslegung von Zahnradgetrieben	80
3.1.1	Konzeptionierung von Zahnradgetrieben	83
3.1.2	Vordimensionierung von Stirnradstufen	88
3.1.3	Vordimensionierung von Planetenstufen	98
3.2	Optimierung der Makrogeometrie	105
3.2.1	Akustische Optimierung durch Hochverzahnungen	106
3.2.2	Tragfähigkeitsorientierte Auslegung asymmetrischer Verzahnungen	112
3.2.3	Auslegung wirkungsgradoptimierter Low-Loss-Verzahnungen	116
3.2.4	Rechnergestützte Makrogeometrieoptimierung	118
3.3	Auslegung der Verzahnungsmikrogeometrie	120
3.3.1	Arten von Korrekturen	122
3.3.2	Topografieseparation durch Polynome	126
3.3.3	Auslegung funktionaler Modifikationen	127
3.3.3.1	Variantenrechnung	127
3.3.3.2	Berücksichtigung verfahrensbedingter Verschränkungen in der Mikrogeometrieauslegung	129
3.3.3.3	Toleranzfeldbasierte Mikrogeometrieoptimierung	130
3.3.3.4	Anwendungsbeispiel für toleranzfeldbasierte Mikrogeometrieauslegung	133
3.3.4	Inverse Ermittlung optimaler Sollkorrekturen	134
3.3.5	FE-basierte Auslegung von Kopfrücknahmen	136
3.4	Auslegung von Beveloids	139

3.5	Auslegung von Kegelradverzahnungen	145
3.5.1	Bestimmung der Tragfähigkeit	146
3.5.2	Auslegung der Mikrogeometrie	148
4	Herstellverfahren	159
4.1	Prozessketten und Wärmebehandlung	161
4.1.1	Prozessketten der Zahnradfertigung	161
4.1.2	Übliche Zahnradwerkstoffe	163
4.1.3	Wärmebehandlung von Zahnrädern	164
4.1.3.1	Glühverfahren	165
4.1.3.2	Härten und Vergüten	167
4.1.3.2.1	Thermische Verfahren	167
4.1.3.2.2	Thermochemische Verfahren	168
4.1.3.2.3	Härteverzug	173
4.2	Vorverzahnungen	176
4.2.1	Anforderungen an das Vorverzahnungen	176
4.2.2	Schneidstoff-Schicht-Systeme	179
4.2.3	Wälzverfahren	185
4.2.3.1	Wälzhobeln	185
4.2.3.2	Wälzfräsen	186
4.2.3.2.1	Prozesskinematik	186
4.2.3.2.2	Achsen und Aufbau einer Wälzfräsmaschine	189
4.2.3.2.3	Werkzeuggeometrie und -gestaltung	190
4.2.3.2.4	Spangeometrie und Bauteilabweichungen	192
4.2.3.2.5	Prozessanalyse im Modellversuch	196
4.2.3.3	Wälzstoßen	198
4.2.3.4	Wälzschälen	202
4.2.4	Formschneidverfahren	206
4.2.4.1	Formfräsen	206
4.2.4.2	Räumen	209
4.2.5	Verfahrensvergleich	212
4.2.6	Entgraten und Anfasen	213
4.3	Weichfeinbearbeitung mit definierter Schneide	216
4.3.1	Anforderungen an die Weichfeinbearbeitung	216
4.3.2	Zahnradschaben	218
4.3.3	Fertigwälzfräsen	222
4.4	Hartfeinbearbeitung	226
4.4.1	Hartfeinbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide	227
4.4.1.1	Schälwälzfräsen	227
4.4.1.2	Schälwälzstoßen	228
4.4.1.3	Hartwälzschälen	229

4.4.2	Hartfeinbearbeitung mit geometrisch unbestimmten Schneiden	229
4.4.2.1	Der Abrichtprozess	230
4.4.2.2	Aufbau und Zusammensetzung von Werkzeugen mit nicht definierter Schneide	234
4.4.2.3	Verfahren zur Hartfeinbearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide	239
4.4.2.3.1	Diskontinuierliches Profilschleifen	239
4.4.2.3.2	Kontinuierliches Profilschleifen	245
4.4.2.3.3	Diskontinuierliches Wälzschleifen (Teilwälzschleifen) ...	246
4.4.2.3.4	Kontinuierliches Wälzschleifen	248
4.4.2.3.5	Verzahnungshonen	254
4.5	Erzeugung von Zahnflankenmodifikationen	257
4.5.1	Erzeugung von Profilmodifikationen	258
4.5.2	Erzeugung von Flankenmodifikationen	259
4.5.3	Entstehung von verfahrensbedingten Verschränkungen	260
4.5.3.1	Verfahrensbedingte Verschränkung beim Profilschleifen	261
4.5.3.2	Verfahrensbedingte Verschränkung beim kontinuierlichen Wälzschleifen	263
4.6	Alternative Fertigungsverfahren	264
4.6.1	Endkonturnahe Fertigungsverfahren	264
4.6.1.1	Querwalzen von Verzahnungen	265
4.6.1.2	Pulvermetallurgische Herstellung von Zahnrädern	267
4.6.1.3	Feinschneiden	271
4.6.1.4	Präzisionsschmieden	275
4.6.2	5-Achs-Fräsen von Verzahnungen	278
4.7	Qualitätsprüfung und Analyse fertigungsbedingter Produkteigenschaften	283
4.7.1	Motivation zur Bauteilprüfung	283
4.7.2	Geometrische Prüfung von Verzahnungen	283
4.7.2.1	Erfassung der makrogeometrischen Verzahnungsabweichungen ...	284
4.7.2.2	Erfassung der mikrogeometrischen Abweichung	300
4.7.3	Metallografische Analyse von Verzahnungen	307
4.7.3.1	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	307
4.7.3.2	Zerstörende Prüfverfahren	319
4.8	Kegelradherstellung	331
4.8.1	Diskontinuierliches Kegelradfräsen	332
4.8.2	Kegelradschleifen	333
4.8.3	Kontinuierliches Kegelradfräsen	334
4.8.4	Kegelradlappen	336
4.8.5	Kegelradverzahnmaschinen	337
4.8.5.1	Mechanische Kegelradfräsmaschinen	337
4.8.5.2	6-Achs-Universal-Fräsmaschinen	339

4.8.6	Der Closed Loop	341
4.8.7	Analogieversuche für das Kegelradfräsen	342
5	Untersuchung von Zahnradgetrieben	363
5.1	Beanspruchungs- und Schadensformen an Zahnrädern	364
5.1.1	Beanspruchung des Zahnfußes	365
5.1.2	Beanspruchung der Zahnflanke	367
5.1.2.1	Pressung im Zahnflankenkontakt	368
5.1.2.2	Beanspruchung in Folge der Kinematik	370
5.1.3	Zahnflankenschäden	374
5.1.3.1	Graufleckigkeit	375
5.1.3.2	Grübchenbildung	377
5.1.3.3	Fressen	380
5.1.3.4	Abrasivverschleiß	381
5.1.3.5	Zahnflankenbruch	383
5.1.4	Zahnfußschäden	384
5.1.4.1	Gewaltbruch	384
5.1.4.2	Dauerbruch	385
5.2	Einflussgrößen auf die Beanspruchbarkeit von Zahnrädern	387
5.2.1	Werkstoff	387
5.2.2	Schmierstoff	390
5.2.3	Oberflächengestalt	392
5.2.4	Randzoneneigenschaften	397
5.3	Untersuchung der Zahnradtragfähigkeit	399
5.3.1	Prüfstandkonzepte - Laufversuch	401
5.3.1.1	Zwei-Wellen-Verspannungsprüfstände	402
5.3.1.2	Drei-Wellen-Verspannungsprüfstände	404
5.3.1.3	Standardisierte Prüfverzahnungen für Tragfähigkeitsuntersuchungen	406
5.3.2	Prüfstandskonzepte - Analogieversuch	409
5.3.2.1	Zahnfußtragfähigkeit	410
5.3.2.2	Zahnflankentragfähigkeit	414
5.3.3	Schadenskriterien und Vorgehensweisen	418
5.3.4	Auswertemethoden für Zahnradtragfähigkeitsuntersuchungen	420
5.3.4.1	Statistische Grundlagen zur Zahnradtragfähigkeitsauswertung	422
5.3.4.2	Wöhlerdiagramm: Auswertung der Dauerfestigkeit	425
5.3.4.3	Wöhlerdiagramm: Auswertung der Zeitfestigkeit	430
5.3.4.4	Quantifizierung der Schmierstofftragfähigkeit	432
5.3.5	Übertragbarkeit zwischen Lauf- und Analogieversuch	440
5.3.5.1	Zahnfußtragfähigkeit	440
5.3.5.2	Zahnflankentragfähigkeit	444

5.4	Grundlagen der Getriebeakustik	448
5.4.1	Bewertungskenngrößen	449
5.4.1.1	Spektrale Zusammensetzung des Schalls	449
5.4.1.2	Kennwerte der Technischen Akustik	450
5.4.1.3	Zahneingriffsfrequenz und Ordnungsspektrum	453
5.4.1.4	Spektralanalyse von Getriebegeräuschen	454
5.4.2	Getriebegeräusche	456
5.4.2.1	Objektive Einteilung von Getriebegeräuschen	457
5.4.2.2	Subjektive Bewertung	459
5.4.3	Anregungsmechanismen im Zahneingriff	467
5.4.3.1	Parameteranregung	469
5.4.3.2	Stoßanregung	471
5.4.3.3	Weganregung	472
5.4.3.4	Einfluss von geometrischen Abweichungen	472
5.4.4	Maßnahmen zur Reduzierung der Geräuschabstrahlung	478
5.5	Untersuchung der Getriebeakustik	481
5.5.1	Untersuchungsmethoden	482
5.5.1.1	Einflankenwälzprüfung	482
5.5.1.2	Zweiflankenwälzprüfung	486
5.5.1.3	Drehbeschleunigungsmessung	487
5.5.1.4	Körperschallmessung	495
5.5.1.5	Luftschallmessung	499
5.5.1.6	Sondermessverfahren	507
5.5.1.7	Alternative Methoden zur Messung der Geräuschemission	515
5.5.2	Prüfstandskonzepte	519
5.5.2.1	Radsatzuntersuchung	520
5.5.2.2	Gesamtgetriebeuntersuchung	527
5.6	Wirkungsgradbestimmung von Getrieben	529
5.6.1	Verlustleistungsmessung	531
5.6.2	Leistungsdifferenzmessung	533
5.6.3	Reibkraftmessung im Analogieversuch	535
6	Simulationstechnik	555
6.1	Vorgehensweise zur Modellbildung	555
6.2	Fertigungssimulation	557
6.2.1	Grundlagen von Fertigungssimulationen	558
6.2.1.1	Werkzeug	559
6.2.1.2	Maschinenkinematik	560
6.2.2	Geometrieberechnung	563
6.2.3	Durchdringungsrechnung	566
6.2.3.1	Spanungskenngrößen	568

6.2.3.2	Spannungsdickenberechnung	569
6.2.3.3	Kraftberechnung	571
6.2.3.4	FE-Simulation der Spanbildung	573
6.2.4	Simulationsbasierte Fertigungs- und Prozessauslegung	575
6.2.4.1	Verschleißanalyse für die spanenden Fertigung	575
6.2.4.2	Bestimmung von charakteristischen Fertigungsabweichungen	578
6.2.4.3	Bezogenes Zeitspannungsvolumen und Kraftberechnung für das kontinuierliche Wälzschleifen	579
6.3	Zahnkontaktanalyse	582
6.3.1	FE-basierte Zahnkontaktanalyse	583
6.3.1.1	Geometrievorgabe	585
6.3.1.2	Kontaktfindung und lastfreie Verzahnungskennwerte	585
6.3.1.3	FE-Strukturgenerierung	587
6.3.1.4	Verschiebungseinflusszahlen	587
6.3.1.5	Mathematisches Federmodell	589
6.3.1.6	Lastverteilung und Kennwerte unter Last	592
6.3.2	Auslegung mit der Zahnkontaktanalyse am Beispiel der Zahnfußoptimierung	595
6.3.3	Mikrogeometrische Kontaktanalyse mit realen Oberflächenstrukturen	598
6.4	Höherwertige Berechnungsverfahren für die Zahnradtragfähigkeit	601
6.4.1	Methode zur lokalen Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit	604
6.4.1.1	Vergleichsspannung und Überlebenswahrscheinlichkeit für den Zahnfuß	605
6.4.1.2	Erweiterung der Methode um eine Fehlstellenanalyse	609
6.4.1.3	Validierung und Anwendung der Methode	611
6.4.2	Methode zur lokalen Wälzfestigkeitsberechnung	612
6.4.2.1	Volumen- und Oberflächenbeanspruchung im Wälzkontakt	614
6.4.2.2	Werkstofffestigkeit im Wälzkontakt	615
6.4.2.3	Vergleichsspannung und Überlebenswahrscheinlichkeit für den Wälzkontakt	617
6.4.2.4	Validierung der lokalen Wälzfestigkeitsberechnung	619
6.5	Dynamik des Zahneingriffs	622
6.5.1	Mathematische Beschreibung der Anregungsmechanismen im Zahneingriff	622
6.5.1.1	Der Einmassenschwinger als vereinfachtes Ersatzmodell von Verzahnung und Zahnradpaar	623
6.5.1.2	Parameterregung	624
6.5.1.3	Weganregung	627
6.5.1.4	Stoßanregung	629
6.5.1.5	Reibkraftanregung	631
6.5.1.6	Kippmomente	631
6.5.1.7	Rechnerische Abbildung des Dämpfungsverhaltens	632

6.5.2	Aufbau von Schwingungsmodellen	633
6.5.2.1	Ziele und Aufgaben der Modellbildung	633
6.5.2.2	Abbildung von Strukturkomponenten	635
6.5.2.3	Dynamikmodell eines einstufigen Getriebes	638
6.5.3	Entwicklung und Berechnung der mathematischen Ersatzmodelle	641
6.5.4	Methoden der Körperschall- und Luftschallberechnung	642
6.5.4.1	Zahnkraftpegel	643
6.5.4.2	Methoden der Körperschallberechnung	644
6.5.4.3	Methoden der Luftschallberechnung	645
Index	661

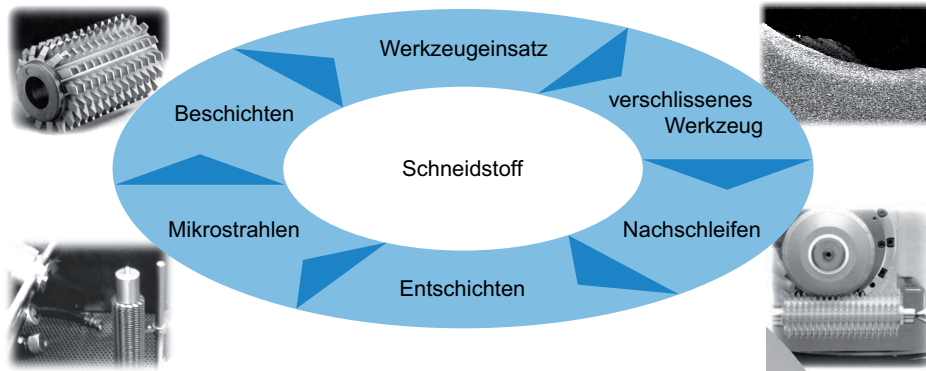
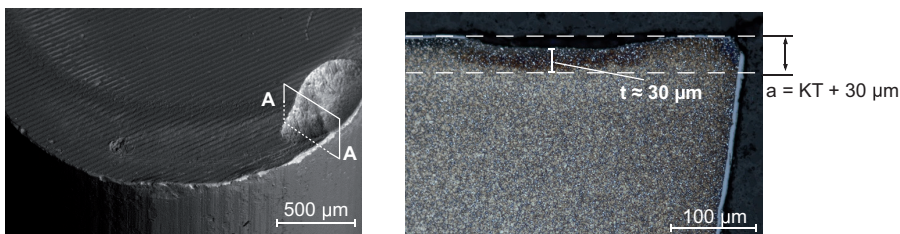


Bild 4.17 Aufbereitung von Verzahnwerkzeugen

Das nach dem Einsatz verschlissene Werkzeug wird in einem ersten Schritt spanflächenseitig nachgeschliffen. Der Prozess erfolgt häufig beim Anwender der Werkzeuge. Die Entschichtung, Strahlbehandlung und Neubeschichtung sowie die weiteren Aufbereitungsschritte werden in der Regel bei einem Beschichtungshersteller durchgeführt. Die Wiederaufbereitung kann zu einer beträchtlichen Verlängerung der Werkzeuglebensdauer führen. Während für Hartmetallwerkzeuge insbesondere die Strahlbehandlung maßgeblich ist [KLEI03], sind konstant gewählte und reproduzierbar durchgeführte Prozessschritte der gesamten Aufbereitungskette von PM-HSS-Werkzeugen für ein optimales Verschleißverhalten erforderlich.

Bei Vorliegen von Kolkverschleiß ist die Tiefenwirkung des Verschleißes bei der Wahl des zu zerspanenden Aufmaßes auf der Spanfläche beim Nachschleifen zu berücksichtigen (siehe Bild 4.18). An dem dargestellten Werkzeug wurde eine Gefügeuntersuchung im Bereich unmittelbar unterhalb des aufgetretenen Kolkverschleißes durchgeführt. Das Gefüge unterhalb der geschädigten Oberfläche ist dunkel verfärbt, da der Bereich bis zu einer Tiefe von $t \approx 30 \mu\text{m}$ eine thermische Schädigung erfahren hat. Mikrohärtemessungen in diesem geschädigten Bereich zeigen einen Härteabfall, wodurch ein möglicher Standzeiteinbruch resultieren kann, falls die geschädigte Zone in der Wiederaufbereitung nicht vollständig entfernt wird [KLOC14d].



- Thermische Schädigung des Gefüges unterhalb des Kolkverschleißes erkennbar
- Tiefe der thermischen Schädigung von ca. $30 \mu\text{m}$
- Härteabfall durch thermische Einwirkungen im Bearbeitungsprozess von 100 HV

Ausreichende Nachschliffiefe bei Kolkverschleiß vorsehen, um thermische Schädigungen zu beseitigen

Bild 4.18 Gefügeschädigung unterhalb des Kolkverschleißes [KLOC14d]

Die Analyse mehrerer Aufbereitungszyklen unter konstanten Bearbeitungsbedingungen zeigt, dass die Standzeit des Werkzeuges nach einer Vielzahl von Wiederaufbereitungszyklen nicht beeinträchtigt wird, sofern die Vorgehensweise der Wiederaufbereitung stets konstant gehalten wird (siehe Bild 4.19) [KLOC14d]. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der Zuwachs an abrasivem Freiflächenverschleiß VB sowie der Kolktiefe KT des Neuwerkzeugs sowie des elfmalig aufbereiteten Werkzeugs nahezu gleiches Verhalten aufweist. Einen negativen Einfluss auf die Neigung zu Kolkverschleiß konnte bei dem elfmalig aufbereiteten Werkzeug ebenfalls nicht festgestellt werden. So versagte das Neuwerkzeug nach einer Standlänge von $L = 11$ m und das aufbereitete nach $L = 16$ m an Kolkverschleiß.

Werkzeug:

HS 10-2-5-8; AlCrN-beschichtet;
 Durchmesser $d_{a0} = 80$ mm
 Auslegung $n_f/z_2 = 18/2$

Werkstück:

Modul $m_n = 2,83$ mm
 Zähnezahl $z_2 = 43$
 Eingriffswinkel $\alpha_{n2} = 20,0^\circ$
 Schräg.-winkel $\beta_2 = -22^\circ$
 Breite $b = 26,5$ mm

Bearbeitung:

Gleichlauf
 Schnittgeschw. $v_c = 310$ m/min
 Axialvorschub $f_a = 4,5$ mm
 Tauchtiefe $T = 6,6$ mm

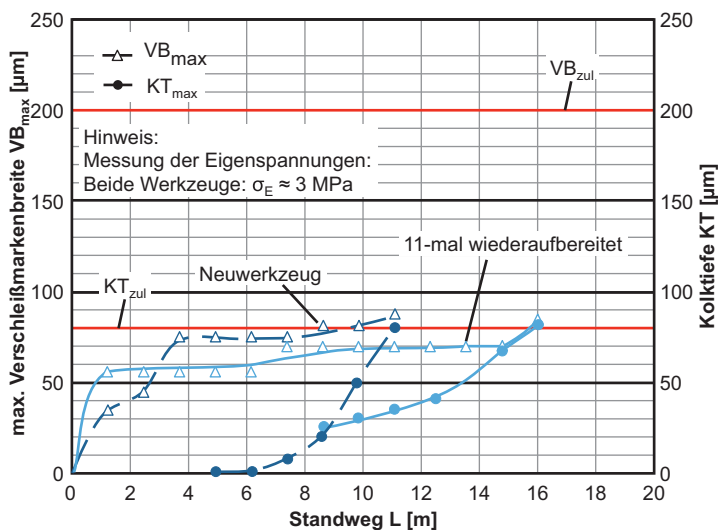


Bild 4.19 Werkzeugverschleißverlauf in Abhängigkeit von der Wiederaufbereitung [KLOC14d]

Zur Stabilisierung der Schneidkante kann eine gezielte Schneidkantenpräparation eingesetzt werden, um Schneidkantenausbrüche sowie plötzliche Verschleißanstiege zu vermeiden. Eine Schneidkantenpräparation beinhaltet eine definierte Verrundung der Schneidkante, wie es bei konventionellen Dreh- und Fräswerkzeugen häufig zum Einsatz kommt [DENK03a, DENK03b, SHAF00]. Die Werkzeugstandzeit beim Wälzfräsen kann ebenfalls durch gezielte Schneidkantenverrundungen erhöht werden. In [WINK05b] wird die erzielbare Werkzeugstandzeit für Hartmetallwälzfräser in Abhängigkeit von dem Schneidkantenradius untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein Schneidkantenradius von $\rho_s = 10 - 15$ µm zu einer Standzeiterhöhung von mehr als 120% führen kann. Zur Präparation der Schneidkante von Werkzeugen kommen heute standardmäßig das Strahlen oder das Bürsten zum Einsatz [DENK03a, DENK03b].

4.2.3 Wälzverfahren

In wälzenden Fertigungsverfahren wird das Zahnprofil durch ein Abwälzen des Werkzeugs am Werkstück erzeugt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Zur wälzenden Herstellung evolventischer Verzahnungen werden bevorzugt geradflankige Bezugsprofile eingesetzt, da sie effizient herstellbar und messbar sind. Das Abwälzen des Bezugsprofils am Werkstück führt zur Erzeugung der evolventischen Zahnflanke. Die Abwälzkinematik der relevantesten Verfahren zum Vorverzahnen ist in Bild 4.20 dargestellt und wird nachfolgend erläutert.

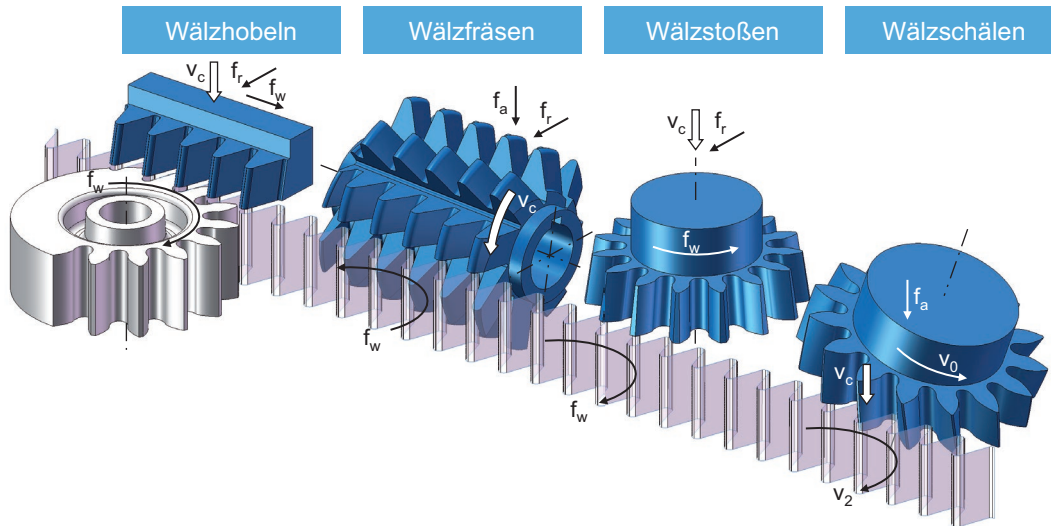


Bild 4.20 Wälzverfahren (das kinematisch erzeugte Bezugsprofil wälzt mit dem Werkstück ab)

4.2.3.1 Wälzhobeln

Das Wälzhobeln ist ein Verfahren zur Fertigung außenverzahnter Stirnräder. Entgegen der Benennung handelt es sich bei diesem Verfahren um einen Stoßprozess, bei dem die Schnittbewegung vom Werkzeug ausgeführt wird. Die Schneide des Hobelkammes hat die Form des Werkzeugbezugsprofils (vgl. Bild 4.14), sodass sich das Erzeugungsprinzip der Evolvente in diesem Prozess unmittelbar abbildet. Der Freiwinkel am Werkzeug wird so ausgeführt, dass verschlissene Werkzeuge durch ein Nachschleifen der Spanflächen aufbereitet werden können. Die resultierende Schneidkante ist im Anschluss an den Nachschliff gegenüber der ursprünglichen Schneide nach hinten versetzt. Dieser Versatz muss durch die Hobelmaschine nachgeführt werden.

Die Schnittgeschwindigkeit im Wälzhobelprozess wird durch eine geradlinige Bewegung parallel zur Zahnradmittelachse erzeugt (Bild 4.21), die als Arbeitshub bezeichnet wird. Nach dem Arbeitshub wird das Werkzeug radial vom Werkstück abgehoben und in seine Ausgangslage zurückgeführt. Zur Fertigung einer evolventischen Verzahnung wird neben der Hubbewegung eine Wälzbewegung durchgeführt (vgl. Abschnitt 2.2.1.5). Der Drehung des Werkstücks wird eine lineare Bewegung des Werkzeugs überlagert, indem abhängig vom eingesetzten Maschinenkonzept das Werkstück oder das Werkzeug verschoben wird [NN85]. Die sich aus Rotation und Translation ergebende Wälzbewegung wird durch eine Kopplung der Achsen synchronisiert. Da der Hobel-

kamm in der Regel über weniger Zähne als das Werkstück verfügt, muss dieser nach dem Durchwählen in seine Ausgangslage zurückgeführt werden. Die Bewegung wird als Teilen oder auch Reversieren bezeichnet.

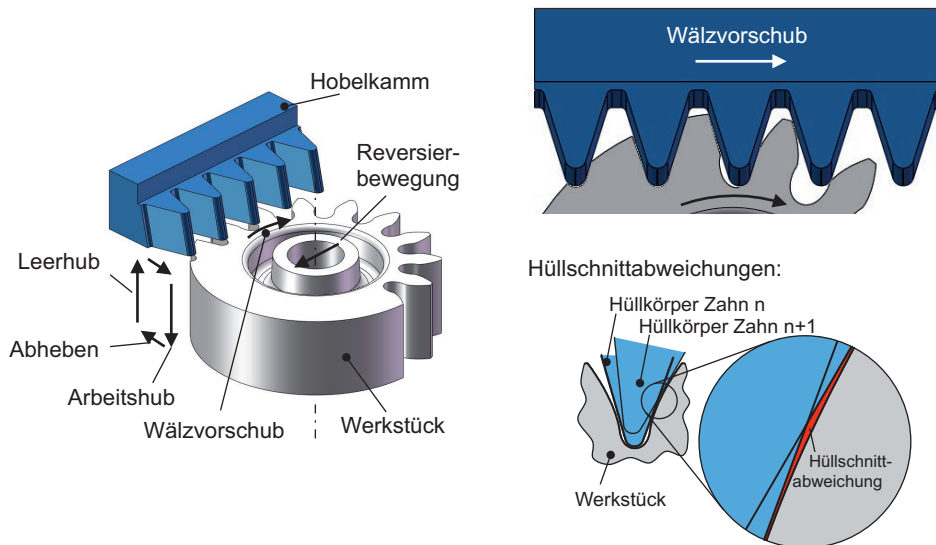


Bild 4.21 Herstellung evolvierender Verzahnungen durch Wälzhobeln

Im Wälzhobelprozess wird das evolvierende Zahnflankenprofil durch Hüllschnitte angenähert. Die hieraus entstehenden Abweichungen von der idealen Zahnflanke werden als Hüllschnittabweichungen bezeichnet. Die Größe dieser Abweichungen wird durch den Wälzvorschub im Prozess bestimmt. Während der Prozess durch einen steigenden Wälzvorschub an Produktivität gewinnt, steigt gleichzeitig der Betrag der Hüllschnittabweichungen.

Das Werkzeug für das Wälzhobeln ist im Vergleich zu den Werkzeugen anderer Verfahren einfacher herzustellen. Dennoch wird das Wälzhobeln heute aufgrund seiner geringen Produktivität im Vergleich zu den Verfahren Wälzfräsen und Wälzstoßen nur noch in Sonderfällen angewendet. Da mit dem Verfahren sehr zähe sowie harte Werkstoffe verzahnt werden können, zählen zu diesen Sonderfällen große, auf einen hohen Festigkeitswert behandelte Zahnräder in der Einzel- und Kleinserienfertigung.

4.2.3.2 Wälzfräsen

Das Wälzfräsen ist aufgrund seiner hohen Produktivität das dominierende Verfahren für die Vorverzahnung von Stirnrädern. Es bietet neben der Herstellung zylindrischer Stirnräder die Möglichkeit der Fertigung von Beveloidverzahnungen und Schneckenrädern.

4.2.3.2.1 Prozesskinematik

Die Kinematik des Verfahrens kann durch das Abwälzen einer Schnecke an einem Schneckenrad beschrieben werden (vgl. Bild 4.22). Die Schnecke entspricht dem Werkzeug und das Schneckenrad dem Werkstück. Die Rotation von Werkzeug und Werkstück wird entsprechend dem Verhält-

nis der Zähnezahl des Werkstücks und der Anzahl der Schneckengänge auf dem Werkzeug synchronisiert. Hieraus ergibt sich ein festes Verhältnis der Schnittgeschwindigkeit v_c zur Werkstückdrehzahl n_2 . Die abwälzende Bewegung wird im Prozess mit einer Vorschubbewegung überlagert.

$$v_c = n_0 \cdot \pi \cdot d_{a0} \quad (4.3)$$

und

$$n_0 = n_2 \cdot \frac{z_2}{z_0} \quad (4.4)$$

Bei der Betrachtung des Werkzeugeingriffs werden die Parallelen des Wälzfräsens zum Wälzhobeln sichtbar. Die Schneiden des Wälzfräsers sind vergleichbar zum Hobelkamm entsprechend dem Werkzeugbezugsprofil gestaltet (siehe Abschnitt 2.2.3.3). Die für die Erzeugung der Evolvente erforderliche Wälzbewegung wird beim Wälzfräsen aus der Kopplung der Werkzeuggeometrie und Rotation von Werkzeug und Werkstück realisiert.

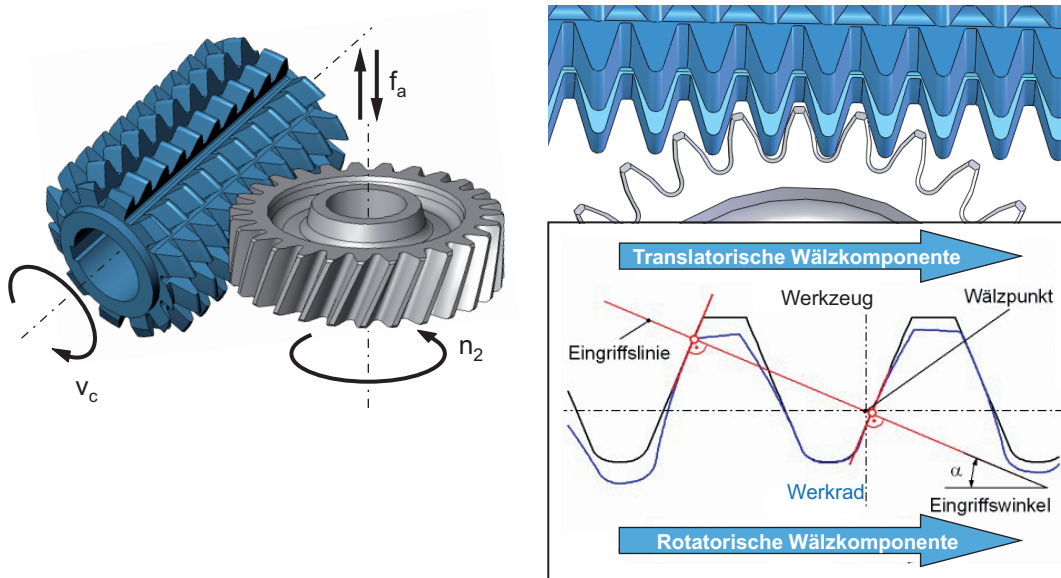


Bild 4.22 Herstellung evolventischer Zahnflanken durch Axialwälzfräsen

Im Prozess ist das Werkzeug um den Schwenkwinkel η gegen das Werkstück geneigt (Bild 4.23). Der Schwenkwinkel η entspricht bei einer gleichsinnigen Steigung von Schnecke und Verzahnung der Differenz aus dem Schrägungswinkel des Werkkrads β_2 und dem Steigungswinkel des Werkzeugs γ_0 . Bei einer gegensinnigen Ausrichtung entspricht der Schwenkwinkel der Summe der beiden Winkel (siehe Formel (4.5)).

$$\eta = \beta_2 \pm \gamma_0 \quad (4.5)$$

Das dominierende Wälzfräsverfahren ist das Axialwälzfräsen. In diesem Verfahren wird die Vorschubbewegung parallel zur Werkzeugmittelachse ausgeführt. Die Strecke, die während einer Werkstückumdrehung zurückgelegt wird, wird als Axialvorschub f_a bezeichnet. Im Axialwälzfräsprozess werden drei Prozessphasen unterschieden (Bild 4.23 rechts). Zu Prozessbeginn wird der Eintritts- oder Einlaufbereich durchfahren. In diesem Bereich bildet das Werkzeug zunehmend große Späne, bis sich der Arbeitsbereich des Werkzeugs vollständig im Werkstück befindet. Ab diesem Zeitpunkt werden bei jeder Werkzeugumdrehung Späne mit identischen Spanungsgeometrien erzeugt. Folglich befindet sich der Wälzfräser im Bereich des sogenannten Vollschnitts. Sobald der Eingriffsbereich des Werkzeugs die Werkstückoberkante erreicht, nimmt die Größe der erzeugten Späne kontinuierlich ab. Für diese Prozessphase wird vom Austritts- oder Auslaufbereich des Fräasers gesprochen. Neben einer axialen Vorschubstrategie werden ebenfalls radiale oder radial-tangentiale Vorschubstrategien realisiert, um Störkonturen in der Werkzeugbahn auszuweichen. Wird im Falle von Störkonturen ein radialer Anschnitt gewählt, können die Prozessparameter wie Schnittgeschwindigkeit und Vorschub angepasst werden, sodass keine erhöhte Belastung am Werkzeug hervorgerufen wird. Um die maximalen Spanungsdicken beim radialen Anschnitt zum axialen Anschnitt gleich zu halten, können verringerte Vorschübe um bis zu 50% notwendig sein [NN76].

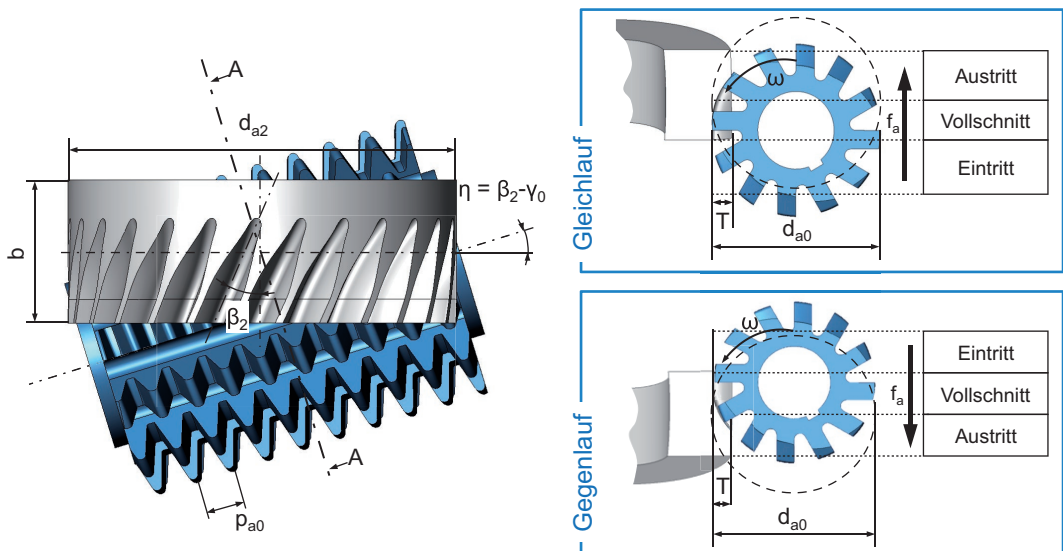


Bild 4.23 Bezeichnungen an der Paarung Wälzfräser - Werkrad

Liegt die Richtung des Axialvorschubs entgegen der Schnitttrichtung, so wird von Gleichlaufräsen gesprochen. Sind die Richtung des Axialvorschubs und die Schnitttrichtung gleich orientiert, so wird von Gegenlaufräsen gesprochen (siehe Bild 4.23 rechts). Die Bezeichnungen stammen vom Stirnumfangsfräsen auf Universalfräsmaschinen und werden auch für das Wälzfräsen genutzt. Während die Werkzeugschneide beim Gleichlauf den Schnitt am maximalen Spanquerschnitt initiiert, findet der Schnittbeginn beim Gegenlaufräsen am dünnen Spanende statt. Wird der Span am dicken Ende angeschnitten, so kann der Schnitt sofort initiiert werden. Der Span wird dann zum Schnittende hin dünner. Beim Gegenlaufräsen hingegen beginnt der Schnitt zunächst mit einem Gleiten, bis die geforderte Mindestspanungsdicke überschritten wird und die

Spanbildung einsetzt. Während des Schnittes nimmt die Spanungsdicke beim Gegenlaufräsen kontinuierlich zu. Das zu Schnittbeginn auftretende Reiben kann Schädigungen an der Werkzeugschneide und auf der Bauteiloberfläche hervorrufen. Durch den Anschnitt im Gegenlauf wird jedoch der Eingriffsstoß, wie er beim Gleichlaufräsen verstärkt auftreten kann, verringert [NN76].

Die resultierende Hauptzeit beim Wälzfräsen kann mithilfe der Prozess- und Geometriedaten nach Formel (4.6) berechnet werden [NN15a].

$$t_h = \frac{z_2 \cdot d_{a0} \cdot \pi \cdot (E + b + A)}{z_0 \cdot f_a \cdot v_c \cdot 100} \quad (4.6)$$

mit

$$E = \tan \eta \cdot \sqrt{T \cdot \left(\frac{d_{a0}}{\sin^2 \eta} + d_{a2} - T \right)} \quad (4.7)$$

und

$$A = l_{p0} \cdot \tan \beta_2 \quad (4.8)$$

4.2.3.2.2 Achsen und Aufbau einer Wälzfräsmaschine

Bild 4.24 zeigt die Gesamtansicht einer 6-Achsen-CNC-Wälzfräsmaschine mit von der Werkzeugachse entkoppeltem Direktantrieb des Werkstücktisches. Die Realisierung der Wälzkopplung mit einem mechanisch gekoppelten Differenzialgetriebe hat in aktuellen Bauformen keine Bedeutung mehr. Eingezeichnet sind alle zum Wälzfräsen erforderlichen Maschinenachsen. Die Tauchtiefe des Fräasers wird durch die Radialvorschubachse X_1 vorgegeben, die Schrägstellung des Werkzeuges erfolgt über die Fräaserschwenkachse A_1 . Die Tangentialvorschubachse V_1 ermöglicht die Shift-Bewegung, d.h. die Verschiebung der Frässpindel auf dem Frässchlitten. Die eigentliche Wälzbewegung erfolgt durch Kopplung der Achsen von Fräserdrehung B_1 , Tischdrehung C_1 und Axialvorschub Z_1 . Die rechts in Bild 4.24 dargestellte Wälzfräsmaschine ist für eine Nass- und Trockenbearbeitung geeignet. Die vertikale, ortsfeste Anordnung des Maschinentisches ist Voraussetzung für den geringen Platzbedarf der Maschinen. Der Antrieb der Tischdrehung C_1 kann über zwei verschiedene Bauformen realisiert werden. Zum einen kann ein geteiltes, zweistufiges Stirnradgetriebe mit einer spielfreien Vorspannung durch axiales Verschieben einer Zwischenwelle verwendet werden. Zum anderen werden Werkstücktische mit Direktantrieb eingesetzt. Für beide Bauformen kann zusätzlich ein Gegenhalter (Z_2 -Achse) zur Abstützung von Wellen vorgesehen werden, welcher gleichzeitig das automatisierte Werkstückhandling ermöglicht, indem um den Ständer des Gegenhalters ein Werkstückwechsler rotiert [WECK05, NN85, NN76, NN14].

In Bild 4.24 ist rechts eine Wälzfräsmaschine dargestellt, die die Fertigung von Verzahnungen sowohl mit Schnellarbeitsstahl unter Öl als auch mit hochharten Schneidstoffen im Trockenschnitt ermöglicht. Der Fräskopf (B-Achse) und die Werkstückspindel (C-Achse) sind mit direktgetriebenen Antrieben versehen. Durch die vertikale Werkstückspindelanzordnung fallen die Späne ungehindert auf den Späneförderer. Kurze Werkstücke können fliegend, das heißt ohne Gegenhalter aufgenommen werden. Lange Werkstücke werden zwischen Spitzen unter Zuhilfenahme der Z_2 -Achse fixiert [NN14].

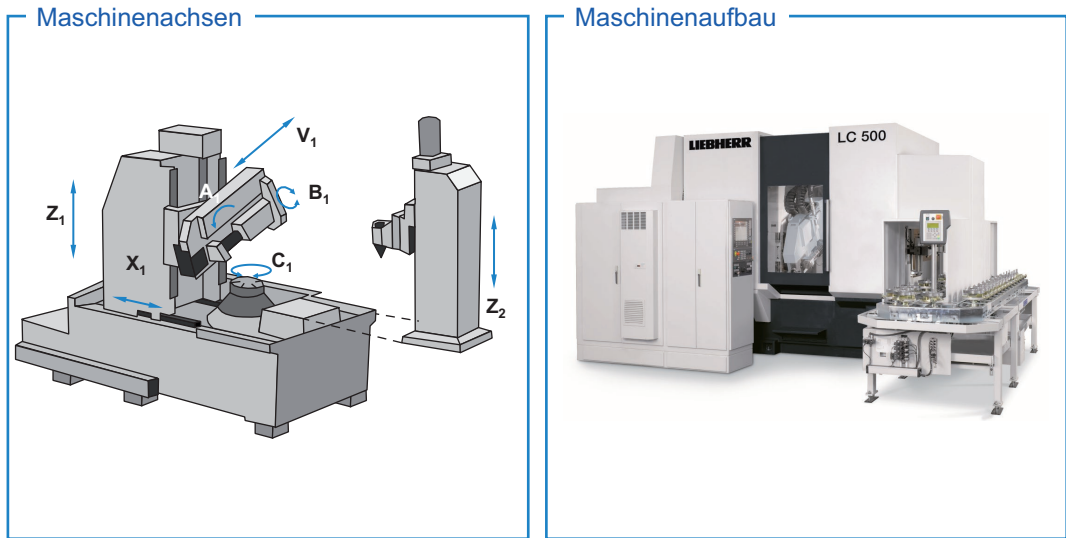


Bild 4.24 Aufbau einer Wälzfräsmaschine (exemplarisch nach Liebherr)

4.2.3.2.3 Werkzeuggeometrie und -gestaltung

Der Wälzfräser entspricht einer Schnecke, die durch Spannuten (Stollen) in einzelne Schneiden aufgeteilt ist (Bild 4.25). Die Anzahl der Schneckengänge wird als Gangzahl oder Werkzeugzähnezahl z_0 bezeichnet. Aus der Axialteilung des Werkzeugs p_{a0} , der Gangzahl und dem Fräser-Bezugsdiameter d_0 ergibt sich der Steigungswinkel des Werkzeugs γ_0 (siehe Formel (4.9)).

$$\tan \gamma_0 = \frac{p_{a0} \cdot z_0}{d_0 \cdot \pi} \quad (4.9)$$

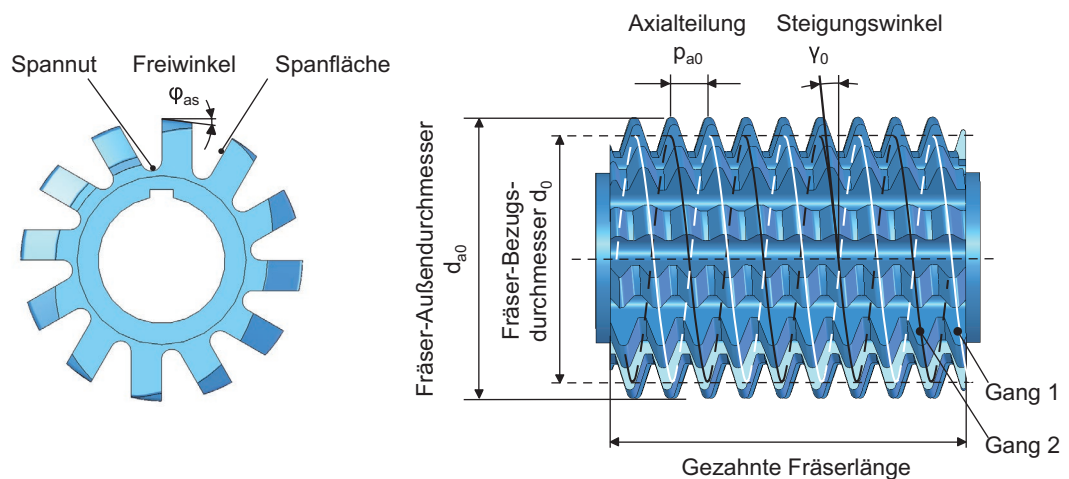


Bild 4.25 Geometrische Größen am Wälzfräser

Der Steigungswinkel ist zur Erzeugung der translatorischen Wälzkomponente erforderlich. Die Spannuten verlaufen entweder in Längsrichtung des Fräasers oder, bei Werkzeugen mit großen Steigungswinkeln, spiralförmig entlang des Fräasers. Die Anzahl der Spannuten wird als Stollenzahl oder Spannutenzahl n_i bezeichnet. Der Freiwinkel φ_{as} wird durch Hinterschleifen oder Hinterdrehen erzeugt. Es wird eine radiale Zustellung eines profilierten Werkzeugs einer Drehung des Wälzfräasers überlagert. Daraus resultiert eine Spiralform der Freiflächen. Dadurch bleibt das Bezugsprofil des Werkzeugs bei einem spanflächenseitigen Abschleiß konstant. Lediglich der Werkzeugaußendurchmesser erfährt eine Veränderung. Aus diesem Zusammenhang werden eine wirtschaftliche Aufbereitung und der erneute Einsatz bereits verschlissener Werkzeuge ermöglicht.

Wälzfräser werden in verschiedenen Bauformen hergestellt. Diese können als Block-, Räumzahn- und Wendeschneidplattenwälzfräser ausgeführt werden (Bild 4.26). Die Blockwälzfräser werden vollständig aus dem eingesetzten Schneidstoff hergestellt. Die häufig aus Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall gefertigten Blockzahnwälzfräser werden bevorzugt im kleinen und mittleren Modulbereich eingesetzt, da in dieser Baugröße diese Art der Fertigung am wirtschaftlichsten ist.



Bild 4.26 Bauarten von Wälzfräsern [NN15a]

Der Zahnkopfbereich des Werkzeugs wird im Wälzfräsprozess stärker belastet als der Flankenbereich, woraus ein lokaler Verschleiß in diesem Bereich resultiert. Um das Potenzial des Schneidstoffs über dem ganzen Werkzeugprofil gleichmäßiger ausnutzen zu können, wurden Räumzahnwälzfräser entwickelt. Räumzahnwälzfräser verfügen neben den Profilschneiden über zusätzliche Kopfschneiden. Da die Spannuten der Kopfschneiden flacher ausgeführt werden, sind in dieser Bauform größere Stollenzahlen möglich als bei einem konventionellen Blockwälzfräser. Dadurch kann bei einer vergleichbaren Werkzeugbelastung deutlich produktiver zerspannt werden. Räumzahnwälzfräser sind bei großen zerspannten Volumina wirtschaftlich und werden meist für Verzahnungen ab einem Modul von etwa $m_n = 6$ mm eingesetzt und aus Schnellarbeitsstahl hergestellt.

Eine neuere Entwicklung stellen Wendeschneidplattenwälzfräser dar. Sie bestehen aus einem Stahlgrundkörper und aufgeschraubten Hartmetall-Wendeschneidplatten. Diese Bauform ermöglicht den wirtschaftlichen Einsatz von Hartmetall bei großen Werkzeugdurchmessern, ohne den Schneidenträger aus Hartmetall ausführen zu müssen. Der Einsatz von Hartmetall erlaubt das Wälzfräsen bei hohen Schnittgeschwindigkeiten. Das Lückenprofil wird auf mehrere Schneidplatten aufgeteilt. Die Aufbereitung verschlissener Werkzeuge erfolgt bei diesen Werkzeugen über einen Wechsel der Schneidplatten, was in der Regel direkt beim Anwender der Werkzeuge erfolgen kann. Für die Erzielung einer guten Vorverzahnqualität ist eine auf den Anwendungsfall abgestimmte Montagestrategie der Schneidplatten von Bedeutung.

Insbesondere für das Vorverzahnen von Großverzahnungen ist das Wälzfräsen mit einem Wendeschneidplattenwälzfräser eine wirtschaftliche Alternative. Standzeitbegrenzend ist aufgrund der erhöhten Belastung in der Regel die Kopfplatte. Eine geeignete Schnittaufteilung sowie ein für den Spanfluss optimierter Spanraum sind entscheidend für den erfolgreichen Einsatz dieses Werkzeugkonzepts [KLOC15d].

Die Genauigkeit der Geometrie von Wälzfräsern wird nach DIN 3968 in verschiedene Güteklassen unterteilt. Diese Güteklassen lassen sich heute in AA, A, B, C und D unterteilen, wobei AA die geringsten und D die größten Toleranzen zulässt. Die Toleranzen beziehen sich auf nahezu alle messbaren geometrischen Größen an einem Wälzfräser. In Abhängigkeit von der gewählten Güteklasse und dem Modul sind vorgegebene Toleranzen einzuhalten [DIN60]. Verschiedene Werkzeughersteller bieten heute Wälzfräser an, die mit der Güteklasse AAA versehen sind [NN15a]. Die Klasse AAA weist einen nochmals verkleinerten Toleranzbereich auf. Die nochmals verringerten Toleranzbereiche sind heute in keiner Norm hinterlegt.

4.2.3.2.4 Spangeometrie und Bauteilabweichungen

Durch die abwälzende Kinematik entstehen im Wälzfräsprozess abhängig von der Axialposition der Schneide auf dem Fräser verschiedene Spanformen. Für einen Beispielprozess sind die charakteristischen Spanformen sowie die aktiven Schneidenbereiche in Bild 4.27 dargestellt. Der Bereich des Fräasers, in dem Späne gebildet werden, wird als Arbeitsbereich l_{A0} bezeichnet, der in einen Profilierungsbereich l_{p0} und einen Vorschneidbereich l_{AZ} unterteilt wird. Während im Profilierungsbereich die eigentliche Form der Zahnflanke im abschließenden Schnitt erzeugt wird, wird im Vorschneidbereich der Großteil des Lückenvolumens zerspant [WINK05b]. Die Späne werden häufig an mehreren Werkzeugflanken gleichzeitig gebildet. In diesem Fall sind große Verformungen der Späne festzustellen, die auf Spanablaufbehinderungen im Bereich der Schneidenecken zurückgeführt werden [BOUZ81].

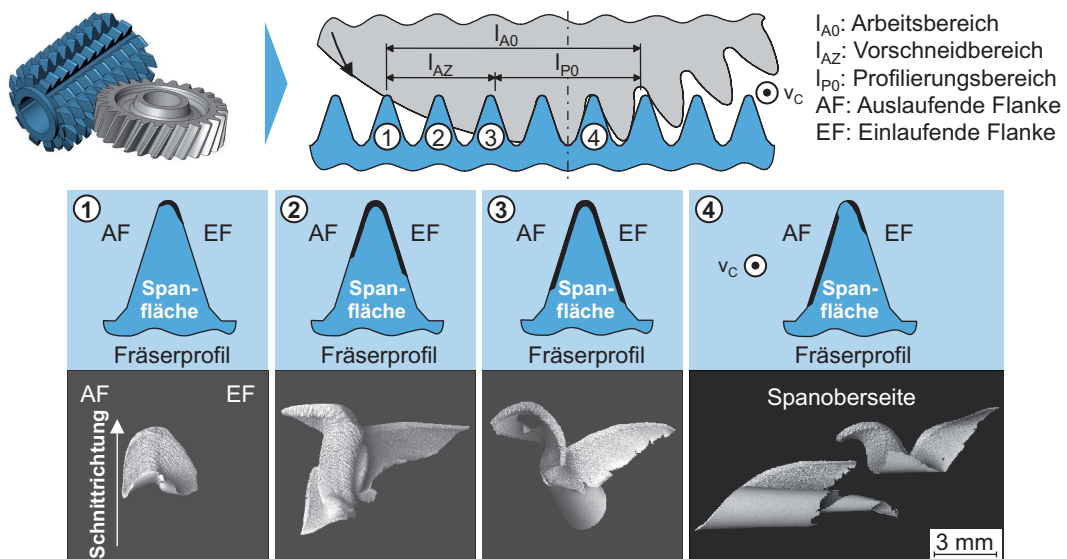


Bild 4.27 Charakteristische Spanformen beim Wälzfräsen [WINK05b]

Die Auslegung des Wälzfräsprozesses unterliegt verschiedenen Restriktionen. Beispielsweise muss gewährleistet sein, dass das eingesetzte Werkzeug die notwendige Standzeit erzielt. Die Standzeit hängt von den auf den Wälzfräser wirkenden Belastungen ab. Um eine Abschätzung der in dem Prozess auftretenden Belastungen geben zu können, wurden von [HOFF70] Näherungsformeln für die Berechnung der maximalen Spannungsdicke (Formel (4.10)) sowie der Schnittbogenlänge (Formel (4.11)) entwickelt. Auf Grundlage der Kenntnis der auf die Fräterschneide erwarteten Belastung aus Spannungsdicke und -länge muss ein geeignetes Schneidstoff-Schicht-System gewählt werden, wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert wird.

Maximale Spannungsdicke:

$$h_{\text{cu,max}} = 4,9 \cdot m_n \cdot z_2^{(9,25 \cdot 10^{-3} \cdot \beta_0 - 0,542)} \cdot e^{(-0,015 \cdot \beta_0)} \cdot e^{(-0,015 \cdot x_p)} \cdot \left(\frac{d_{a0}}{2 \cdot m_n} \right)^{(-8,25 \cdot 10^{-3} \cdot \beta_0 - 0,225)} \cdot \left(\frac{n_{i0}}{z_0} \right)^{-0,877} \cdot \left(\frac{f_a}{m_n} \right)^{0,511} \cdot \left(\frac{T}{m_n} \right)^{0,319} \quad (4.10)$$

Maximale Schnittbogenlänge:

$$l_{\text{cu,max}} = 3,081 \cdot m_n \cdot e^{(-0,032 \cdot \beta_0)} \cdot \left(\frac{d_{a0}}{2 \cdot m_n} \right)^{0,336} \cdot n_{i0}^{-0,036} \cdot \left(\frac{f_a}{m_n} \right)^{(-4,25 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_2^2 + 0,026 \cdot \beta_0 + 0,04)} \cdot \left(\frac{T}{m_n} \right)^{0,262} \quad (4.11)$$

Neben den geometrischen Größen lassen sich die Spanbildung und -geometrie durch die Prozessparameter beeinflussen. Die Haupteinstellgrößen sind die Schnittgeschwindigkeit und der Axialvorschub. Zur Festlegung der beiden Größen muss das eingesetzte Schneidstoff-Werkstoff-System bekannt sein. Zur Bearbeitung üblicher Einsatzstähle kommen PM-HSS sowie Hartmetall-Werkzeuge zum Einsatz, bei denen die Wahl der Prozessparameter unterschiedlich erfolgt. Der Schnittgeschwindigkeitsbereich, bei dem im industriellen Umfeld Werkzeuge aus PM-HSS eingesetzt werden, liegt bei $v_c = 120 - 300$ m/min [HIPK12]. Die maximalen Spannungsdicken bei diesem Schneidstoff-Werkstoff-System können bis zu $h_{\text{cu,max}} = 250$ μm betragen, was über den Axialvorschub eingestellt werden kann [HOFF70]. Bei dem Einsatz von Hartmetallwerkzeugen zum Wälzfräsen von Verzahnungen aus Einsatzstählen liegt mit $v_c = 250 - 400$ m/min der übliche Schnittgeschwindigkeitsbereich höher. Aufgrund der höheren Sprödigkeit des Schneidstoffes sollten dabei maximale Spannungsdicken um $h_{\text{cu,max}} = 150$ μm nicht überstiegen werden. Bei der Zerspanung von höherfesten Stählen müssen die Prozessparameter entsprechend der zu erwartenden Belastung verringert werden, um einen frühzeitigen Werkzeugausfall zu vermeiden.

Zudem ist eine definierte Bauteilqualität sicherzustellen. Zum einen kann in die zulässige Geometrieabweichung und zum anderen die Oberflächenbeschaffenheit unterteilt werden. Bedingt durch das Werkzeug und die Kinematik weichen die im Wälzfräs- sowie im Fertigwälzfräsprozess erzeugten Oberflächen von der idealen Form ab (vgl. Abschnitt 2.1.3). Eine Unterteilung wird nach Vorschubmarkierungstiefe δ_x und Hüllschnittabweichungstiefe δ_y vorgenommen (siehe Bild 4.28). Vorschubmarkierungen entstehen aufgrund der Vorschubbewegung des Werkzeuges in Axialrichtung des Werkstücks. Der Axialvorschub f_a entspricht dem Weg, den der Wälzfräser während einer Umdrehung des Werkstücks in axialer Richtung des Bauteils zurücklegt. Diese Vorschubmarkierungstiefe δ_x tritt in Zahnflankenrichtung auf und kann nach Formel (4.12) berechnet werden.

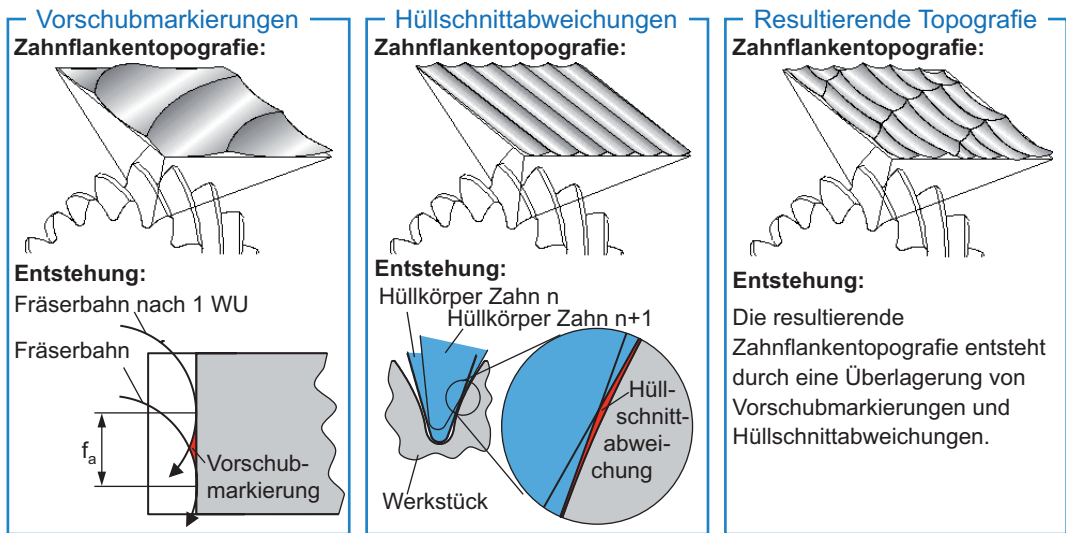


Bild 4.28 Hüllschnittabweichungen und Vorschubmarkierungen beim Wälzfräsen

$$\delta_x = \left(\frac{f_a}{\cos \beta} \right)^2 \cdot \frac{\sin \alpha_n}{4 \cdot d_{a0}} \quad (4.12)$$

Hüllschnittabweichungen resultieren aus der charakteristischen Prozessführung, dem Abwälzen der Zahnflanke mit einem durch Spannuten unterbrochenen Werkzeug. Die Evolvente wird somit durch einzelne Abschnitte angenähert. Die Tiefe der Hüllschnittabweichungen δ_y kann nach Formel (4.13) näherungsweise ermittelt werden

$$\delta_y = \frac{\pi^2 \cdot m_n \cdot z_0^2 \cdot \sin \alpha_n}{4 \cdot n_1^2 \cdot z_2} \quad (4.13)$$

Neben den prozessbedingten geometrischen Abweichungen treten beim Wälzfräsen Oberflächendefekte auf, die wie in Bild 4.29 dargestellt erscheinen können. Umfangreiche Untersuchungen zum Auftreten der Oberflächendefekte beim Wälzfräsen wurden in [STUC14] durchgeführt.



Bild 4.29 Oberflächendefekte auf Zahnflanken [STUC14]

Die Defektarten werden in Primär-, Sekundär- und Tertiärdefekte unterteilt. Dabei beschreibt das Auftreten von Primärdefekten die Schädigung der Zahnflanke, welche unmittelbar aus der Zerspanung resultiert. Zur Verringerung dieser Defektart sind nach [STUC14] die Verringerung des Spanvolumens sowie der Einsatz von Kühlschmierstoffen mögliche Maßnahmen. Der Begriff Sekundärdefekte umfasst Bereiche auf der schon fertig bearbeiteten Flanke, die durch das Auftreffen des in der Bildung befindlichen Spans geschädigt werden. Ein möglicher Ansatz zur Verringerung von Sekundärdefekten ist die Anpassung der Prozessauslegung hinsichtlich der Bildung möglichst symmetrischer Spanungsgeometrien, um das Spanablaufverhalten positiv beeinflussen zu können. Als dritte Defektart, die Tertiärdefekte, werden Späne bezeichnet, welche schon vollständig abgetrennt wurden, wieder in den Eingriff gelangen und auf einem Bereich der Bauteilflanke aufgeschweißt werden. Die letztgenannte Defektart führt infolge der größten geometrischen Abweichungen zur Zielgeometrie zu der deutlichsten Beeinflussung der Prozessstabilität nachfolgender Fertigungsschritte [STUC14].

Durch die verschiedenen Spanformen werden die Schneiden des Werkzeugs jeweils unterschiedlich belastet. Damit verbunden ist ein bevorzugter Verschleiß einzelner Schneidenbereiche gemäß der lokalen Schneidkantenbelastung. Um die Belastung der Schneiden gleichmäßiger auf das Werkzeug zu verteilen, wird der Fräser nach jedem gefertigten Bauteil entlang seiner Mittelachse verschoben. Das Verfahren wird als Shiften bezeichnet. Zur Gewährleistung möglichst hoher Standlängen der Werkzeuge sollte der Shiftbereich möglichst groß gewählt werden. Der mögliche Shiftbereich ergibt sich aus der gezahnten Fräserlänge und den Arbeitsbereichen des Fräsers (Bild 4.30).

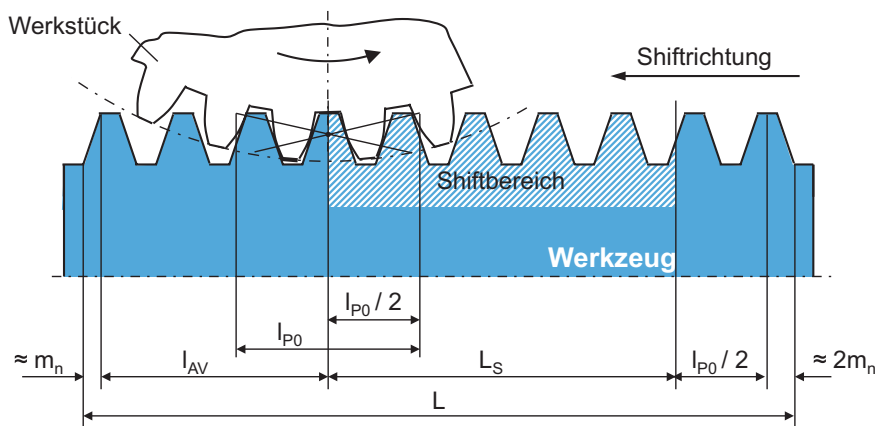


Bild 4.30 Shiftbereich am Wälzfräser [ABLE03, NN15a, NN76]

Für den Shiftvorgang werden verschiedene Strategien eingesetzt (Bild 4.31). Beim konventionellen Shiften wird das Werkzeug nach jedem gefertigten Werkstück um einen definierten Betrag versetzt. Der Versatz wird so gewählt, dass das Werkzeug nach einem Durchgang das Standzeitende erreicht und entsprechend Bild 4.31 n Werkstücke bearbeitet hat. Eine weitere Möglichkeit ist das Multizyklus-Shiften, wonach die Shiftsprünge größer gewählt werden. Hat das Werkzeug das Ende des Shiftbereichs nach n Bauteilen erreicht, erfolgt ein weiterer Shiftdurchgang, beginnend mit dem Bauteil $n + 1$, mit einem versetzten Ausgangspunkt. Die erzeugte Werkstückanzahl bis zum Standzeitende des Werkzeugs gibt die Auslegung der Shiftstrategie vor. Ein Vorteil dieser

Shiftvariante ist eine gleichmäßigere Erwärmung des Werkzeugs, wodurch das Risiko einer thermischen Überlastung reduziert wird.

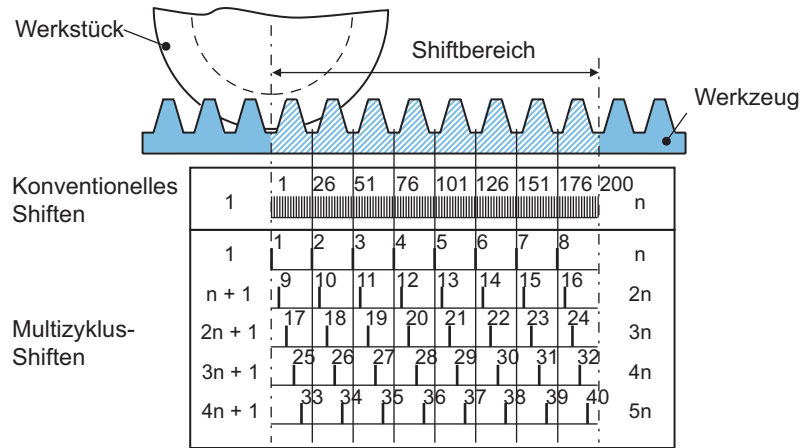


Bild 4.31 Shiftstrategien beim Wälzfräsen

4.2.3.2.5 Prozessanalyse im Modellversuch

Ein maßgebliches Kriterium für die Prozessproduktivität ist die Standzeit eines Werkzeugs. Für die Untersuchung des Standzeitverhaltens im Wälzfräsprozess wird aufgrund der hohen Schneidanzahl und der resultierenden hohen Standzeiten der Werkzeuge eine hohe Anzahl von Werkstücken und Werkzeugen benötigt. Aus diesem Grund wurden Modellprozesse entwickelt, die eine Abbildung der Spanungsgeometrien aus dem Wälzfräsprozess an einem einzelnen Fräserzahn ermöglichen [HOFF70]. Das Analogieverfahren zum Wälzfräsprozess wird als Schlagzahnversuch bezeichnet. Durch die Reduktion des Werkzeugs auf einen Zahn reduzieren sich im Gegensatz zum Prozess mit einem vollen Wälzfräser die Untersuchungskosten deutlich.

Im Schlagzahnversuch werden alle im Wälzfräsprozess gebildeten Späne an einem einzelnen Fräserzahn erzeugt (Bild 4.32). Die Wälzkopplung zwischen Werkzeug und Werkstück wird entsprechend dem abzubildenden Wälzfräsprozess eingestellt. Der Fräser wird in eine Ausgangsposition gebracht, die entsprechend dem Anfang des Arbeitsbereichs des Wälzfräses an seiner einlaufenden Seite festgelegt wird. Nach der Zustellung auf die Tauchtiefe im Wälzfräsprozess (1) wird der Schlagzahn tangential über den Arbeitsbereich des Wälzfräses geschiftet (2). In jeder Lücke bildet der Schlagzahn jeweils alle Wälzstellungen des Werkzeugs ab. Nach dem Durchlaufen des Arbeitsbereichs wird das Werkzeug wieder in seine Ausgangslage gebracht (3). Im Folgenden wird das Werkzeug um den Axialvorschub entlang der Werkstückmittelachse versetzt (4) und der beschriebene Prozess wiederholt.

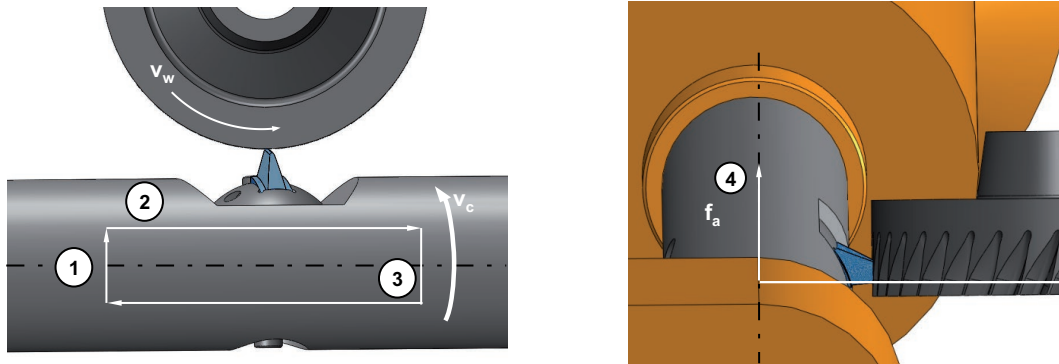


Bild 4.32 Der Schlagzahnversuch

Um eine möglichst einheitliche Grundlage der Versuchsergebnisse beim Wälzfräsen zu gewährleisten, wurde der Standard-Schlagzahnversuch definiert. Bei diesem Prozess wird der Schlagzahnversuch bei einer festgelegten Geometrie von Werkstück und Werkzeug durchgeführt. Bild 4.33 zeigt die Daten der vorgesehenen Paarung aus Werkstück und Werkzeug. Standardmäßig wird ein schräg verzahntes Stirnrad mit einem Normalmodul von $m_n = 2,557$ mm, abgeleitet aus dem Nutfahrzeugbereich, verwendet. Die Zähnezahl liegt bei $z_2 = 39$ Zähnen. Weiterhin sieht die Auslegung vor, dass das Schlagzahnwerkzeug einen Wälzfräser mit einem Außendurchmesser von $d_{a0} = 80$ mm abbildet. Das zweigängige Werkzeug weist dabei eine Spannutenzahl von $n_1 = 16$ auf. Mithilfe dieses Versuches können unterschiedliche Prozessauslegungen sowie Werkstoff-Schneidstoff-Kombinationen untersucht und mit umfangreichen vorhandenen Ergebnissen verglichen werden. Sofern spezielle Auslegungen eine Abwandlung der Geometrie von Werkzeug oder Werkstück verlangen, kann dies unter genauer Angabe erfolgen.

Werkstück:

Modul $m_n = 2,557$ mm
 Zähnezahl $z_2 = 39$
 Eingriffswinkel $\alpha_{n2} = 17,5^\circ$
 Schräg.-winkel $\beta_2 = 23^\circ$
 Breite $b = 30$ mm
 Durchmesser $d_{a2} = 116,2$ mm

Werkzeug:

Schlagzahnwerkzeug
 Durchmesser $d_{a0} = 80$ mm
 Auslegung $n_1/z_0 = 16/2$



Bild 4.33 Werkstück-Werkzeug-Kombination des Standard-Schlagzahnversuchs

Eine Reihe von Untersuchungen belegt die Überführbarkeit der im Schlagzahnprozess ermittelten Effekte auf den Wälzfräsprozess, sodass diese Form des Analogieprozesses in der Forschung zum Wälzfräsen etabliert ist [STUC14, WINK05b]. Bild 4.34 zeigt den Vergleich erzielter Standlängen des Schlagzahnversuchs und des realen Wälzfräsversuchs bei Einsatz eines vollständigen Werkzeuges. Während der Untersuchungen wurden das Hartmetallsubstrat sowie die maximale Spannungsdicke variiert, um eine breite Vergleichsbasis zur Verifizierung des Schlagzahnversuchs zum Wälzfräsen zu erhalten. Die Ergebnisse zeigen stets eine erhöhte Standlänge bei den Versuchen, welche im Schlagzahnprozess durchgeführt wurden. Jedoch lassen sich gleiche Trends