

A	Allgemeine Fertigungsgrundlagen	1
1	Entwicklung der Zahnradfertigung	1
2	Zahnform und Zahnformung	53
3	Evolventen-Sonderverzahnungen	72
4	Zahnradpaarungen	79
5	Allgemeine Verfahren der Zahnradfertigung	99
B	Zahnradfertigung – Hauptverfahren	168
6	Wälzfräsen	168
7	Wälzstoßen	282
C	Fertig- und Weichfein-Bearbeitung der Zahnflanken	305
8	Die ergänzende Zahnformung	305
9	Weichschaben	328
D	Wärmebehandlung (Härt(en))	366
10	Werkstoffe und Wärmebehandlung von Zahnrädern	366
E	Hart-Feinbearbeitung der Zahnflanken mit definierter Schneide	406
11	Schälwälzfräsen und Hartschälen	406
F	Hart-Feinbearbeitung der Zahnflanken mit nicht definierter Schneide	424
12	Zahnflankenschleifen	424
13	Wälzschrägen mit einer Doppelkegelscheibe	484
14	Wälzschrägen mit einer Schnecke	496
15	Zahnflankenschleifen mit einer Profilscheibe	533
16	Zahnflankenschleifen mit einer Globoidschnecke	584
17	Verzahnungshonen	590
G	Qualitätssicherung	638
18	Statistische Prozesskontrolle (SPC) beim Verzahnen von Stirnrädern	639
19	Verzahnungs-Messtechnik	656
20	Schleifbrand: Nachweis, Auswirkungen und Vermeidung	688
21	Ursachen, Bewertung und Minderung von Getriebegeräuschen	710
22	Anhang	731

Vorwort

1	Entwicklung der Zahnradfertigung	1
1.1	Das Zahnrad als Wirtschaftsfaktor.....	1
1.2	Maschinen für die Zahnradfertigung	3
1.3	100 Jahre Wälzfräsen.....	37
2	Zahnform und Zahnformung.....	53
2.1	Evolventische und nicht evolventische Zahnformen	53
2.2	Kreisbogenform	58
2.3	Zykloidenform	59
2.4	Evolventenform.....	61
2.4.1	Zahnformung mit einem Zahnstangen-Werkzeug	63
2.4.2	Einfluss der Profilverschiebung	68
3	Evolventen-Sonderverzahnungen.....	72
3.1	Einleitung.....	72
3.2	Evoloid-Verzahnung	72
3.3	Komplement-Verzahnung	74
3.4	Hybrid-Verzahnung	75
4	Zahnradpaarungen	79
4.1	Einleitende Übersicht.....	79
4.2	Zahnradpaarungen mit parallelen Achsen	82
4.2.1	Unrunde oder elliptische Räderpaarung	82
4.2.2	Keilschrägverzahnte Räderpaarung	84
4.3	Zahnradpaarungen mit sich schneidenden oder kreuzenden Achsen	86
4.3.1	Konische (Konus-)Zahnräderpaarung	86
4.3.2	Kronenzahnrad-(Planrad-)Paarung	90
5	Allgemeine Verfahren der Zahnradfertigung	99
5.1	Allgemeine Grundlagen	99
5.1.1	Gliederung der Verfahren	99
5.1.2	Fertigungskette.....	102
5.2	Urformende Verfahren (Gießen, Spritzgießen).....	105
5.3	Sintern	106
5.4	Umformende Verfahren	112
5.4.1	Merkmale gängiger Druckumform-Verfahren	112
5.4.2	Profilängswalzen mit Profilrollen	114
5.4.3	Profilquerwalzen mit Walzstangen.....	119
5.4.4	Querwalzen mit Walzrädern	124
5.4.5	Drückwalzen	127
5.4.6	Präzisionsschmieden.....	131
5.4.7	Fließpressen.....	136
5.5	Zerteilende Verfahren (Stanzen, Schneiden)	140
5.6	Spanende Verfahren	141
5.6.1	Verfahrensübersicht	141
5.6.2	Verzahnen mit einem Einzahnwerkzeug	143
5.6.3	Profilfräsen	145
5.6.4	Profilräumen	146
5.6.5	Räumhonen – Harträumen von Innenprofilen mit Diamantwerkzeugen	153

5.6.6	Hobeln, Stoßen – ohne und mit Wälzen	155
5.6.7	Wälzstoßhönen (Harteinwälzstoßen).....	156
5.6.8	Wälzschälen	157
5.7	Abtragende Verfahren	160
5.8	Verfahrensauswahl.....	162
6	Wälzfräsen	168
	Verfahren, Werkzeug, Maschine	
6.1	Einleitung	168
6.2	Grundlagen des Verfahrens	169
6.2.1	Werkzeug-Bezugsprofil	170
6.2.2	Arbeitsbereich und Durchdringung des Wälzfräzers	175
6.2.3	Spanungsgeometrie, Kopfspanungsdicke, Spannungsvolumen.....	179
6.2.4	Hüllschnitt- und Vorschubabweichungen.....	185
6.2.5	Kennwerte mit Berechnungsformeln.....	187
6.3	Wälzfräswerkzeuge	189
6.3.1	Wirtschaftliche Aspekte zur Konstruktion (Auslegung)	189
6.3.2	Bauarten und allgemeine Auslegung	191
6.3.3	Flankenfreiwinkel und Spanwinkel.....	195
6.3.4	Wälzfräser-Werkstoff.....	197
6.3.5	Herstellung und Qualitätsmerkmale des Wälzfräzers	203
6.3.6	Optimierungsprogramme zur Wälzfräser-Auslegung	204
6.4	Das Beschichten der Wälzfräswerkzeuge	212
6.5	Verschleiß und Wiederaufbereitung des Wälzfräzers	228
6.5.1	Verschleißformen, -ursachen und -reduzierung	228
6.5.2	Verschleiß- und Prozessüberwachung	239
6.5.3	Nachschärfen und Schneidkantenverrundung	242
6.5.4	Qualitätssicherung nachgeschliffener Wälzfräser	245
6.6	Hochleistungswälzfräsen	247
6.6.1	Nass-, Trocken- oder Minimalöl-Bearbeitung	247
6.6.2	Hochleistungssubstrate und -beschichtungen	251
6.6.3	Hochleistungs-Wälzfräsprozess	255
6.7	Wälzfräsmaschinen	257
6.7.1	Grundkonzeption	257
6.7.2	Wälzfräsmaschinen bekannter Hersteller	260
6.8	Wälzfräsen von Mikroverzahnungen	271
7	Wälzstoßen	282
	Technologie, Maschinen, Werkzeuge	
7.1	Verfahren	282
7.1.1	Verfahrensprinzip	282
7.1.2	Verfahrensvarianten auf der Wälzstoßmaschine	285
7.2	Maschinenaufbau	289
7.3	Werkzeugtechnik für den Wälzstoßprozess	293
7.4	Innovative Anwendungstechnik und Kombination mit anderen Verfahren	296
7.5	Technologieoptimierung und Zusammenfassung	301
8	Die ergänzende Zahnformung	305
	Entgraten, Fasen, Abkanten, Anspitzen, Abrunden, Hinterlegen	
8.1	Benennungen und Übersicht	305
8.2	Zahnstirnkanten fassen (abkanten).....	307
8.2.1	Wälzentgraten	308
8.2.2	Maschinen zum Wälzentgraten	313
8.2.3	Zahnstirnkanten fassen mit Schneidwerkzeugen	316
8.2.4	Zahnstirnkanten entgraten mit Bürsten und anfassen mit Fräswerkzeugen oder Schleifscheiben	318

8.3	Schaltzahnformung	321
8.3.1	Schaltzahnformen.....	321
8.3.2	Verfahren und Maschinen zum Anspitzen (Abdachen).....	322
8.4	Hinterlegen der Schaltverzahnungen	326
9	Weichschaben.....	328
9.1	Einleitung.....	328
9.2	Technologie des Weichschabens	329
9.2.1	Verfahrensmerkmale und Kinematik.....	329
9.2.2	Angewendete Schabverfahren	331
9.3	Maschinenkonzeption.....	337
9.3.1	Maschinenaufbau	337
9.3.2	Beladung, Automation und Werkstückspannung	339
9.3.3	Rüsten und Maschinenbedienung	341
9.4	Einflussgrößen auf das Bearbeitungsergebnis und die Verzahnungsqualität	342
9.4.1	Erreichbare Qualität.....	342
9.4.2	Werkstoff und Aufmaß.....	343
9.4.3	Auslegung des Schabprozesses	345
9.5	Einsatzfelder und Wirtschaftlichkeit.....	349
9.6	Schabwerkzeuge und ihre Wiederaufbereitung	351
9.6.1	Schabradstandzeit und Werkzeugkosten	351
9.6.2	Schabrad schleifen	352
9.6.3	Schabrad aufbereitung	353
9.7	Neuentwicklungen Power Shaving™	355
9.7.1	Power Shaving™ – Idee und Prozessablauf	355
9.7.2	Konzeption einer hochproduktiven Schabmaschine	359
9.7.3	Arbeitsbeispiele	361
9.7.4	Maschinenvarianten	362
9.8	Zusammenfassung und Ausblick.....	365
10	Werkstoffe und Wärmebehandlung von Zahnrädern	366
10.1	Einführung	366
10.2	Werkstoffe für Zahnräder.....	368
10.3	Wärmebehandlung von Zahnrädern	369
10.3.1	Glühen.....	369
10.3.2	Vergüten	370
10.3.3	Randschichthärtungen.....	370
10.3.4	Nitrieren und Nitrocarburieren	372
10.3.5	Einsatzhären und Carbonitrieren	375
10.4	Optimierung der Maß- und Formänderung	380
10.5	Niederdruck-Aufkohlung und Hochdruck-Gasabschreckung	389
10.5.1	Prozessablauf.....	389
10.5.2	Niederdruck-Aufkohlung	392
10.5.3	Hochdruck-Gasabschreckung	394
10.5.4	Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit	397
10.5.5	Beispiele für das Härteverzugsverhalten	399
11	Schälwälzfräsen und Hartschälen.....	406
11.1	Einführung	406
11.2	Definierte beziehungsweise nicht definierte Schneide	406
11.3	Anordnung von Werkzeug und Werkstück; Schnittgeschwindigkeit	407
11.4	Einsatzfelder.....	408
11.5	Merkmale beider Verfahren	408
11.6	Maschinen	410
11.7	Werkzeuge	411

11.8	Vorbearbeitung der Werkstücke	414
11.9	Einflanken-Hartschälen	415
11.10	Geräuschverhalten	418
11.11	Bearbeitungsbeispiele und Ausblick	418
12	Zahnflankenschleifen	424
	Grundlagen und Vergleich der Verfahren	
12.1	Übersicht und Begriffsbestimmungen	424
12.2	Kontaktzonen und Flankenformabweichungen	428
12.2.1	Teilschleifverfahren	428
12.2.2	Modellierung und Analogieschleifprozesse	438
12.2.3	Kontinuierliche Schleifverfahren	440
12.3	Zahnflankenmodifikationen	445
12.4	Abrichten der Schleifwerkzeuge	450
12.4.1	Grundlagen zum Abrichtprozess	450
12.4.2	Abrichtwerkzeuge	453
12.5	Schleifprozess und seine Kenngrößen	457
12.5.1	Grundlagen zum Schleifprozess	457
12.5.2	Definitionen zum Zeitspannungsvolumen	460
12.5.3	Kühlschmiersystem	463
12.6	Schleifaufmaß	465
12.7	Schleifergebnis und Verzahnungsqualität	469
12.7.1	Oberflächenstruktur und Rauheit	469
12.7.2	Eigenspannungen in der Zahnflanken-Randschicht	471
12.7.3	Verschränkte Flankenform und Geräuschverhalten	474
12.8	Anwendungsbereich Verfahrensauswahl	477
12.8.1	Überlegungen zur Auswahl	477
12.8.2	Besonderheiten und Einsatzmöglichkeiten	480
13	Wälzschleifen mit einer Doppelkegelschelbe	484
	Das diskontinuierliche Wälzschleifen (Teilwälzschleifen) der Zahnflanken	
13.1	Verfahren und Schleifprozess	484
13.1.1	Verfahrensvarianten	485
13.1.2	Reduzierung der Schleifezeit	486
13.2	Doppelkegelschleifscheibe	489
13.3	Teilwälzschleifmaschinen	490
13.4	Wälzschleifen oder Profilschleifen im Teilverfahren – Auswahlkriterien	494
14	Wälzschleifen mit einer Schnecke	496
	Das kontinuierliche Wälzschleifen der Zahnflanken	
14.1	Hauptmerkmale	496
14.2	Verfahren und Schleifprozess	496
14.2.1	Kenngrößen und Prozessvarianten	496
14.2.2	Schleifkontakteksymmetrie und Profil-Formabweichung	499
14.2.3	Mikrogeometrische Zahnflankenstrukturen	502
14.3	Abricht- und Schleifwerkzeuge	504
14.3.1	Abrichtbare Schleifschnecken	504
14.3.2	Abrichtfreie CBN-Schleifschnecken	507
14.4	Wälzschleifmaschinen mit Arbeitsbeispielen	508
14.5	Verfahrensvergleich	530
15	Zahnflankenschleifen mit einer Profilschelbe	533
	Das diskontinuierliche Profilschleifen (Teilprofilschleifen) der Zahnflanken	
15.1	Verfahrensbewertung	533
15.2	Besonderheiten des Verfahrens	534
15.2.1	Profil und Position der Schleifscheibe	534

15.2.2	Aufmaßverteilung und Zustellstrategie	535
15.2.3	Einsatz verschiedenartiger Profilschleifscheiben.....	538
15.3	Korund- und abrichtbare CBN-Profienschleifscheiben im Abricht- und Schleifprozess	539
15.3.1	Korund-Schleifscheiben	539
15.3.2	Abrichtbare CBN-Profienschleifscheiben	545
15.4	Galvanisch gebundene CBN-Profienschleifscheiben	548
15.4.1	Herstellung	548
15.4.2	Schleifverhalten	552
15.4.3	Leistungssteigerung mit optimierten Schleifparametern	556
15.5	Maschinen zum Zahnflankenschleifen mit Profilscheiben	562
15.6	Ausblick und mögliche Produktivitätssteigerung	579
16	Zahnflankenschleifen mit einer Globoidschnecke	584
	Das kontinuierliche Profilschleifen der Zahntassen	
16.1	Verfahren und Anwendungsbereich	584
16.2	Globoidschnecke, Abrichtrad und Honrad – die Werkzeuge des Verfahrens	584
16.3	Reishauer-Profienschleifmaschine RZF	586
17	Verzahnungshonen.....	590
17.1	Einleitung	590
17.2	Verfahrensentwicklung und Anwendung	590
17.2.1	Historie	590
17.2.2	Verfahrensvarianten	591
17.3	Verfahrensmerkmale	592
17.3.1	Technologische Merkmale.....	592
17.3.2	Kontaktverhältnisse und Prozesskinematik	594
17.3.3	Geschwindigkeitsverhältnisse	597
17.4	Werkzeuge	599
17.4.1	Bearbeitungswerkzeuge (Honringe)	599
17.4.2	Abrichtwerkzeuge	600
17.5	Werkzeugauslegung und Prozessstrategien	601
17.5.1	Auslegen der Werkzeuggeometrie	602
17.5.2	Theoretischer Abrichtbereich	602
17.5.3	Haupteinflussgrößen auf Materialabtrag und Oberflächengüte	605
17.5.4	Erzeugen von Flankenkorrekturen.....	607
17.6	Herstellung von Verzahnungshonwerkzeugen (Honringen)	608
17.7	Spheric Honen™ mit Maschinen der Firma Gleason-HURTH	611
17.7.1	Kinematik des Spheric Honens™	611
17.7.2	Maschinenaufbau	617
17.7.3	Praxis der Prozessführung	621
17.8	Coronieren mit Maschinen der Firma Kapp	626
17.9	Hochleistungshonen mit Maschinen der Firma Präwema.....	628
17.10	Direkt-Honen mit Maschinen der Firma Fässler	631
18	Statistische Prozesskontrolle (SPC) beim Verzahnen von Stirnrädern .	638
18.1	Einleitung.....	638
18.2	Gauß'sche Normalverteilung	638
18.3	Grundformeln der SPC	639
18.4	Maschinen- und Prozessfähigkeit.....	642
18.5	Entwicklung der Toleranzen zur Maschinenleistung.....	643
18.6	Fehlerquellen bei der praktischen Umsetzung der SPC	644
18.7	Beispiele aus der Verzahnungspraxis	650

19	Verzahnungs-Messtechnik.....	655
19.1	Einleitung.....	655
19.2	Theoretische Grundlagen	655
19.3	Prüfparameter an Stirnverzahnungen	656
19.4	Aufbau und Funktion von Verzahnungsprüfgeräten	659
19.4.1	Mechanisch gesteuerte Prüfgeräte	660
19.4.2	CNC-gesteuerte Prüfgeräte	661
19.5	Sammelfehlerprüfverfahren	672
19.5.1	Einflanken-Wälzprüfung	672
19.5.2	Zweiflanken-Wälzprüfung	675
19.6	Qualitätssicherung von Passungsverzahnungen.....	677
19.6.1	Übersicht	677
19.6.2	Maßprüfung und Passungsspiel	677
19.6.3	Formprüfung	683
19.6.4	Lageprüfung	684
19.6.5	Spezielle Kombinations-Messgeräte	685
20	Schleifbrand: Nachweis, Auswirkungen und Vermeidung.....	686
20.1	Entstehung des Schleifbrands	686
20.2	Nachweis von Schleifbrand	691
20.2.1	Nitalätzung	691
20.2.2	Kleinlastprüfung und metallographisches Schliffbild.....	696
20.2.3	Sensorische Schleifbrand-Erkennung	697
20.3	Beurteilung des Schleifbrands anhand der Nitalätzung	701
20.4	Auswirkungen des Schleifbrands.....	702
20.5	Maßnahmen zur Schleifbrandvermeidung	705
21	Ursachen, Bewertung und Minderung von Getriebegeräuschen.....	708
21.1	Einführung	708
21.2	Geräuschproblematik bei Kfz-Getrieben.....	708
21.3	Verzahnungsgeräusche.....	709
21.3.1	Leerlaufklappern und Beschleunigungsrasseeln	710
21.3.2	Geräuschanregung im Zahneingriff	713
21.3.3	Verzahnungskorrekturen (Mikrogeometrie)	717
21.3.4	Fertigungseinflüsse	718
21.3.5	Auslegungsstrategie	720
21.3.6	Radsatzprüfung	721
21.4	Gehäuseoptimierung	722
21.5	Grundlagen zur Akustik und Messtechnik	723
21.5.1	Schallleitung, Maschinenakustik	723
21.5.2	Akustische Messtechnik	726
21.5.3	Geräuschprüfung	728
21.5.4	Subjektive Geräuschbewertung	729
22	Anhang.....	731
22.1	Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	731
22.2	Schleifscheiben – Einsatz, Spezifikation, Herstellung	728
22.3	DIN-Normen	752
22.4	Zahnradforschung – Veröffentlichungen zur Zahnrad- und Getriebetechnik	755
22.5	Weitere Quellen und Kontaktadressen für Fachinformationen	763
Die Autoren	770	
Sachregister	771	
Zahnradgedanken	778	