

Moderne Zahnradfertigung

Verfahren und Maschinen zur kostengünstigsten Herstellung von
Stirn- und KegeLRädern mit hoher Qualität

Dr.-Ing. Thomas Bausch

Dr.-Ing. Ingo Faulstich
Dr.-Ing. Michael Gosdin
Prof. Dr.-Ing. W. Höfler
Dipl.-Ing. Manfred Jll
Helmut Krämer
H. Krapfenbauer
Ing. (grad.) B. Kreißig
Dr.-Ing. T. J. Krenzer
Dipl.-Ing. Helmut Mallener

Dipl.-Ing. (FH) Hans-G. Schmidt
Dr.-Ing. Herbert Schriefer
Dr.-Ing. Gert Sulzer
Dr.-Ing. Hans T. Wagner
Helmut Wiedemann
Dr.-Ing. Dieter Wiener
K. D. Yunker
Dipl.-Ing. Klaus Zachmann

Mit 437 Bildern und 82 Literaturstellen



Kontakt & Studium
Band 175

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Wilfried J. Bartz
Technische Akademie Esslingen
Weiterbildungszentrum
DI Elmar Wippler
expert verlag

expert  verlag

Inhaltsverzeichnis

Herausgeber-Vorwort
Autoren-Vorwort

1	Zur Entstehung von Verzahnungsabweichungen spanend bearbeiteter Zylinderräder	1
	1. Faulstich	
2	Aktueller Einsatz des HSS-Stollenwälzfräasers und HM-Schälwälzfräasers	19
	K. Zachmann	
2.1	HSS-Stollenwälzfräser	19
2.1.1	Entwicklung	19
2.1.2	Konstruktion	19
2.1.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	21
2.1.4	Bearbeitungszeit und Schnittdaten	22
2.1.4.1	Schnittgeschwindigkeit	23
2.1.4.2	Vorschub	25
2.1.4.3	Gangzahl	27
2.1.5	Verschleiß	28
2.1.6	Standweg	35
2.1.7	Genauigkeit	35
2.1.8	Scharfschleifen	40
2.1.9	Bezugsprofilformen für Wälzfräser	41
2.1.10	Bezugsprofilberechnungen	46
2.2	Titan-Nitrid-beschichtete HSS-Wälzfräser	47
2.2.1	Technologie	47
2.2.2	Verschleißverhalten	50
2.2.3	Schnittwerte	52
2.3	Hartmetallschälwälzfräser	54
2.3.1	Allgemeines	54
2.3.2	Schnittwerte	55
2.3.3	Verschleiß	55
2.3.4	Scharfschleifen	57

2.3.5	Profilbildung	57
2.3.6	Genauigkeit	59
2.3.7	Profilkorrekturen	60
2.3.8	Scharfschleifversatz	61
2.3.9	Standlänge	61
3	Numerisch gesteuerte Wälzfräsmaschinen zur Bearbeitung von Zylinderrädern	65
	I. Faulstich	
3.1	Konventionelle Wälzfräsmaschine – NC-Wälzfräsmaschine	65
3.2	Zeitliche Flexibilität	69
3.3	Technische Flexibilität	71
3.4	Programmierung	75
3.5	Wirtschaftlichkeit	81
3.6	Humanisierung der Arbeit	85
3.7	Zusammenfassung und Ausblick	86
	Anlage 1	88
	Anlage 2	89
4	CNC-Wälzfräsen – Wirtschaftliche Einsatz- möglichkeiten	90
	G. Sulzer	
4.1	Konventionelle Wälzfräsmaschine – NC-Wälzfräsmaschine	90
4.2	Stückzeiten	92
4.3	Rüstzeiten	97
4.4	Verfügbarkeit	100
4.5	Stückkosten	102
4.6	Das Verzahnungszentrum	103
5	Wälzstoßen – neue Möglichkeiten für Konstruktion und Produktion	106
5.1	Maschinen- und Automationstechnik im Wälzstoßverfahren	106
	Hans Dieter Wagner	
5.1.1	Anforderungen an Wälzstoßmaschinen	106
5.1.2	Maschinenaufbau	107
5.1.2.1	Hauptbaugruppen	107
5.1.2.2	Stoßkopfschlittenkonzept	110

5.1.3	Bearbeitungszentrum mit neun CNC-Achsen	110
5.1.3.1	Maschinenachsen und Funktionen	110
5.1.3.2	Konstruktive Gestaltung	111
5.1.4	Steuerungstechnik	115
5.1.4.1	Aufbau und Programmierung	115
5.1.4.2	Datenverkehr	118
5.1.4.3	Werkstückvermessung und Programmkorrektur	118
5.1.5	Automationslösungen beim Wälzstoßen	119
5.1.5.1	Werkstückwechsel bei konventionellen Maschinen	121
5.1.5.1.1	Ringmagazin	121
5.1.5.1.2	Schwenklader	121
5.1.5.1.3	Portallader	122
5.1.5.2	Werkstückwechsel bei Stoßkopfschlittenmaschinen	124
5.1.5.2.1	Schwenklader	124
5.1.5.2.2	Palettenwechsler mit Speicher- und Rüstplatz	124
5.1.5.2.3	Palettenwechsler mit Anbindung an Flurförderfahrzeuge	126
5.1.5.3	Werkzeugwechsel bei Stoßkopfschlittenmaschinen	127
5.1.5.3.1	Halbautomatischer Werkzeugwechsler	127
5.1.5.3.2	Vollautomatischer Werkzeugwechsler	129
5.1.5.3.3	Vollautomatischer Werkzeugwechsler mit Magazin	129
5.2	Verfahrens- und Anwendungstechnik	129
	Helmut Krämer	
5.2.1	Konstruktive Gestaltung zu stoßender Verzahnungen	129
5.2.1.1	Paarungsbedingungen für Werkstück und Werkzeug	129
5.2.1.2	Werkzeugauslauf und Einstichbreite	130
5.2.1.3	Tiefliegende Verzahnungen	131
5.2.1.4	Standardisierung von Verzahnungen	133
5.2.1.5	Schrägungswinkelnorm	133
5.2.1.6	Lageorientierte Verzahnungen	135
5.2.1.7	Konische Verzahnungen mit freiem Werkzeugauslauf	135
5.2.1.8	Hinterlegte Verzahnungen	137
5.2.1.9	Verzahnungskorrekturen	138
5.2.2	Verfahrenstechnologie beim Wälz- und Profilverfahren	139
5.2.2.1	Bearbeitungsverfahren	139
5.2.2.2	LORENZ-SSM-Verfahren	141
5.2.2.3	Wälzverfahren	143
5.2.2.4	Profilverfahren	144
5.2.2.5	Teilwälzverfahren	145
5.2.2.6	Verfahren ohne Schnittbewegung der Werkzeug-Stoßspindel	146
5.2.2.7	Verzahnungen mit Achsenwinkeln	147
5.2.3	Anwendungstechnik	147

5.2.3.1	Wälzstoßen lageorientierter Schrägverzahnungen	147
5.2.3.2	Überbreite Verzahnung mit begrenztem Werkzeugauslauf	150
5.2.3.3	Unrund-Stirnräder eines Hydraulikmotors	150
5.2.3.4	Entgraten und Drehen	151
	Herstellung genauer Verzahnungen im Wälzstoß-Verfahren	153
5.2.4	Werkzeuge für Wälzstoßmaschinen	153
5.2.4.1	Nachschärfbare Schneidräder	156
5.2.4.2	Wafer Schneidräder	159
6	GROB-Verfahren zum Kaltwalzen von Außen- und Innenverzahnungen	164
	H. Krapfenbauer	
6.1	Grundsätzliches	164
6.2	Walzen von Außenverzahnungen	167
6.2.1	GROB-Kaltwalzmaschinen zum Walzen von Verzahnungen aus dem vollen Material	167
6.2.2	Fertigwalzen vorgefräster Zahnräder	172
6.3	Walzen von Hohlteilen mit Innen- und Außenverzahnungen	175
6.3.1	GROB-Kaltwalzmaschinen zum Walzen von Hohlteilen mit Innen- und Außenverzahnung	176
6.4	Kaltreduzieren von Hohlteilen mit Innenverzahnung	177
6.5	Zusammenfassung	180
7	Kaltwalzen von Evolventenprofilen mit Flachbackenwerkzeugen	181
	B. Kreißig	
7.1	Allgemeines Maschine und Automation mit Beispielen – Wirtschaftlichkeit	181
7.1.1	Einleitung	181
7.1.2	Profilwalzen	181
7.1.3	Verfahrensbeschreibung	182
7.1.3.1	Maschine	184
7.1.3.2	Belastungen	186
7.1.3.3	Maschinenzyklus, dargestellt am Beispiel „halbautomatisch mit Handbeladen“	187
7.1.4	Werkstoffe	188
7.1.5	Bearbeitungsmöglichkeiten	188
7.1.5.1	Walzen mehrerer Profile an einem Werkstück	189

7.1.5.2	Walzen im Vor- und Rücklauf	189
7.1.5.3	Orientiertes Walzen	191
7.1.6	Automation, Verkettung	191
7.1.7	Wirtschaftlichkeit	195
7.2	Walzbare Profile – Werkzeuge und ausgeführte Beispiele Toleranzen und Meßmethoden Neuentwicklungen	195
7.2.1	Walzbare Verzahnungsprofile	195
7.2.2	Werkzeuge zur Herstellung von Verzahnungen	198
7.2.2.1	Gestaltung der Werkzeuge zum Walzen von Verzahnungen	198
7.2.2.2	Auswahl der Werkzeu glängen	198
7.2.3	Toleranzen, Definition und Meßmethoden zum Prüfen von Steckverzahnungen (nach ANSI B 92.1)	199
7.2.3.1	Maschinentoleranz	200
7.2.3.2	Summenteilungsfehler	200
7.2.3.3	Profilfehler	201
7.2.3.4	Flankenrichtungsfehler	201
7.2.3.5	Definition des wirksamen Fehlers	201
7.2.3.6	Einfluß der Verzahnungsfehler Effektive und actuale Zahndicken	201
7.2.4	Weitere walzbare Sonderprofile	202
7.2.4.1	Gewinde	202
7.2.4.2	Ölnuten	204
7.2.4.3	Rändel	206
7.2.4.4	Ringnuten	206
7.2.4.5	Kerbverzahnung mit Knickprofil	207
8	Zahnrad-Stirnkantenbearbeitung Das Entgraten – Anfasen und das Schaltformfräsen H. Wiedemann	210
9	Weichschaben H. Schriefer	226
9.1	Schabverfahren	226
9.1.1	Einfluß der Vorverzahnungsqualität auf das Schabergebnis	231
9.2	Schabradgeometrie	234
9.3	Vorschubstrategien	238
9.4	Automatisierung der Schabmaschine	242
9.5	Schabradschleifen	247
9.6	Anwendung des Schabens	251
9.7	Zusammenfassung	255

10	Wärmebehandlung von Zahnrädern	256
	H.-G. Schmidt	
10.1	Einführung	256
10.2	Wärmebehandlungsverfahren	259
10.3	Maß- und Formänderungen bei den zuvor genannten Wärmebehandlungsarten	267
10.4	Zeichnungseintragungen und Wärmebehandlungsangaben	270
10.5	Fehler bei der Wärmebehandlung	272
	Anhang	274
11	Maß- und Formänderung beim Einsatzhärten	
	Systematik und Maßnahmen zur Minderung/ Vergleichmäßigung	283
	H. Mallener	
11.1	Einleitung	283
11.2	Vorgehensweise bei der Optimierung der Formänderung	285
11.2.1	Konstruktion	285
11.2.2	Werkstoff	287
11.2.3	Erschmelzung	289
11.2.4	Schmieden	290
11.2.5	Bearbeitungsglühen	291
11.2.6	Zerspannung	292
11.2.7	Einsatzhärten	295
11.3	Zusammenfassung	297
12	Schälwälzfräsen gehärteter Zylinderräder	298
	I. Faulstich	
12.1	Verfahrensbeschreibung	298
12.2	Werkzeuge	299
12.2.1	Auslegungsmerkmale	299
12.2.2	Schärfen	301
12.3	Maschinen zum Schälwälzfräsen und ihre Handhabung	303
12.3.1	Steife	303
12.3.2	Einmitten	304
12.3.3	Shiften	308
12.4	Einsatzbereich des Verfahrens	308
12.5	Technologische Daten	309
12.6	Genauigkeit schälwälzgefräster Zylinderräder	311

12.7	Betriebsverhalten schälwälzgefräster Zylinderräder	312
12.8	Bearbeitungsbeispiele	313
12.9	Schlußfolgerungen	315
13	Hartschälen – das neue Verfahren	316
	Fa. Pfauter	
13.1	Die Kinematik	316
13.2	Die Merkmale des Verfahrens	319
13.2.1	Kurze Bearbeitungszeit	319
13.2.2	Hohe Genauigkeit und Laufruhe	320
13.2.3	Vollautomatischer Arbeitskreislauf	322
13.2.4	Vielseitige Einsatzmöglichkeit	322
14	Hartfeinbearbeitungsverfahren mit zahnradförmigen Werkzeugen	323
	H. Schriefer	
14.1	Zielsetzungen der Hartfeinbearbeitung	323
14.2	Grundprinzipien der Verfahren mit zahnradförmigen Werkzeugen	327
14.2.1	Technologie und Verfahren	327
14.2.2	Werkzeuge	331
14.2.3	Maschine und Automatisierung	334
14.3	Geräuschreduzierung durch Hartschaben	336
14.4	Arbeitsbeispiele und Kosten-/Nutzenbetrachtungen	342
14.5	Zusammenfassung	350
15	Zahnflankenschleifen	
	Vergleich bekannter Verfahren und Maschinen	351
	Th. Bausch	
15.1	Einteilung und Begriffsbestimmung	351
15.2	Kontakt- und Eingriffsgrößen, Oberflächenstruktur	356
15.2.1	Teilwälzschleifen mit Tellerscheiben (MAAG-Schleifen)	357
15.2.2	Teilwälzschleifen mit einer Doppelkegelscheibe (HÖFLER-, NEILES-Schleifen)	362
15.2.3	Teilprofilschleifen	366
15.2.4	Vergleichende Betrachtung und Schleifmodell	372
15.3	Schleifprozeß, Schleifstrategie, Schleifzeitberechnung	379
15.3.1	Teilwälzschleifen mit Tellerscheiben	381
15.3.2	Teilwälzschleifen mit Doppelkegelscheibe	386
15.3.3	Teilprofilschleifen	395

15.3.4	Kontinuierliches Wälzschleifen	401
15.3.5	Kontinuierliches Profilschleifen	409
15.4	Vergleich hinsichtlich Arbeitsbereich und Qualitätsanforderungen	417
15.5	Zusammenfassung	419
16	Hartbearbeitung von Verzahnungen und Profilen mit dem KAPP-Vollform-Schleifverfahren	422
	Michael Gosdin	
16.1	Einleitung	422
16.2	KAPP-Schleiftechnologie	422
16.3	Spektrum der Schleifmaschinen	424
16.4	Produktionssysteme	432
16.5	Zahnradbearbeitung	433
17	Gehärtete Zahnflanken mit CBN wälzschleifen	437
	Gerd Sulzer	
17.1	Anforderungen an das Verfahren	437
17.2	CBN-Wälzschleifen – das Verfahren	437
17.3	Die Werkzeuge	441
17.4	Realisierbare Korrekturen der Zahngeometrie	447
17.4.1	Erreichbare Genauigkeiten	454
17.5	Leistung	457
17.6	Die Schleifmaschine	457
18	Neue Maschinen zum Profilschleifen von Zahnflanken	466
	Th. Bausch	
18.1	Besonderheiten beim Profilschleifen von Zahnflanken	466
18.1.1	Vorteile des Profil-Schleifverfahrens	466
18.1.2	Nachteile des Profil-Schleifverfahrens	467
18.1.3	Einflußfaktoren auf die Standmenge galvanisch gebundener Schleifscheiben	468
18.1.4	Zustellung und Positionierung der Schleifscheibe	471
18.1.5	Auswirkungen des CBN-Schliffs	476
18.2	Schleifmaschinen mit teilendem (diskontinuierlichem) Verfahren	479
18.2.1	Maschinen der Firma KAPP	479

18.2.2	Maschinen der Firma PFAUTER-KAPP	484
18.2.3	Maschinen der Firma OERLIKON-GEARTEC	485
18.2.4	Maschinen der Firma SAMPUTENSILI	490
18.2.5	Maschinen der Firma REFORM	494
18.2.6	Maschinen der Firma GUEHRING	497
18.2.7	Maschinen der Firma NILES	501
18.3	Maschinen mit kontinuierlichem Verfahren	511

19 Verfahren und Maschinen zum Wälzhonen (Schabschleifen) 514

Th. Bausch

19.1	Einleitung	514
19.2	Vergleich der Verfahren Schaben und Schabschleifen (Wälzhonen)	515
19.3	Maschinen zum Schabschleifen (Wälzhonen)	521
19.3.1	Maschinen mit außenverzahntem Honwerkzeug	521
19.3.2	Maschinen mit innenverzahntem Honwerkzeug	532
19.4	Daten und Merkmale verschiedener Maschinen zum Schabschleifen (Wälzhonen)	540

20 Konventionelle und CNC-Verzahnungs-Prüfgeräte 564

W. Höfler

20.1	Einführung	564
20.1.1	Profilprüfung	564
20.1.2	Flankenlinienprüfung	566
20.2	Verfahren und Geräte für Profil- und Flankenlinienprüfungen	566
20.2.1	Mechanische Verfahren und Geräte	567
20.2.1.1	Profil- und Flankenlinienprüfgeräte mit festen Grundkreisscheiben	568
20.2.1.2	Profil- und Flankenlinienprüfgeräte mit bereichsweiser stufenloser Grundkreisdurchmesser-Einstellung	569
20.2.1.3	Profil- und Flankenlinienprüfgeräte mit stufenloser Grundkreisdurchmesser-Einstellung mittels Hebelübersetzung	570
20.2.1.4	Profil- und Flankenlinienprüfmaschinen mit stufenloser Grundkreisdurchmesser-Einstellung mittels Kulisse	572
20.2.2	Elektronische Verfahren und Geräte zur Profil- und Flankenlinienprüfung	573
20.2.2.1	Prüfung des Profils	573
20.2.2.2	Prüfung der Flankenlinien	574

20.3	Neues elektronisches Mehrkoordinaten-Meßzentrum	575
20.3.1	Profilprüfung	577
20.3.2	Flankenlinienprüfung	577
20.3.3	Automatische Teilungsprüfung	578
20.3.4	Rechnerunterstützte Ermittlung der Rundlaufabweichung F_r	580
20.4	Zusammenfassung	581
21	Nachweis, Auswirkungen und Vermeidung von Schleifbrand	584
	Th. Bausch	
21.1	Entstehung des Schleifbrands	584
21.1.1	Erklärung in metallographischer Hinsicht	584
21.1.2	Erklärung in schleiftechnischer Hinsicht	586
21.2	Nachweis von Schleifbrand	590
21.2.1	Nitalätzung	590
21.2.2	Kleinlastprüfung und metallographisches Schliffbild	594
21.2.3	Sensoren	596
21.3	Beurteilung des Schleifbrands nach der Nitalätzung	599
21.4	Auswirkungen von Schleifbrand	601
21.5	Maßnahmen, um Schleifbrand zu vermeiden	604
22	Universelle, numerisch gesteuerte Wälzfräsmaschine für Kegelrad- und Hypoidgetriebe	609
	T. J. Krenzer; K. D. Yunker	
22.1	Einleitung	609
22.2	Konventionelle Kegelradverzahnmaschine	609
22.3	Der Weg zur numerisch gesteuerten Kegelradverzahnmaschine 591	
22.4	Neuartige Konzeption einer Wälzfräsmaschine	617
22.5	Mechanischer Aufbau einer numerisch gesteuerten Verzahnmaschine	618
22.6	Merkmale der numerischen Maschinensteuerung	618
22.7	Schlußbetrachtung	622
23	Schleifen bogenverzahnter Kegelräder in der Kleinserienfertigung	623
	D. Wiener	
23.1	Schleifverfahren	623
23.2	Maschinenkonzeption	625

23.3	Abrichten der Schleifscheibe	626
23.4	Schleifen unterschiedlicher Verzahnungen	628
23.5	Programmieren der Maschine	629
24	Neue Verzahnungsgeometrie für Kegelräder durch Schleifen mit kegeligen Topfscheiben („Flare Cup“-Verfahren)	631
	T. J. Krenzer	
24.0	Zusammenfassung	631
24.1	Geometrie von Kegelradzähnen beeinflussen durch Schleifen mit kegeligen Topfscheiben („Flare Cup“-Verfahren)	631
24.2	Schleifen mit kegeliger Topfscheibe	632
24.3	Berührung beim Schleifen	635
24.4	Neue Freiheitsgrade	636
24.4.1	Radialneigung	637
24.4.2	Tangentialneigung	638
24.4.3	Axiale Bewegung	638
24.4.4	Radiale Bewegung	641
24.4.5	Tangentiale Bewegung	645
24.5	Tragbildanalyse (TCA)	645
24.6	Duplex-Verbesserung	645
24.7	Zusammenfassung	656
25	Geräuschprüfung von Getrieben und Zahnrädern	658
	M. Ill	
25.0	Kurzfassung	658
25.1	Erregung und Geräuschfortleitung in Zahnradgetrieben	658
25.2	Möglichkeiten der akustischen Meßtechnik	660
25.3	Durchführung der Geräuschprüfung	668
25.4	Einflußgrößen zur Lärminderung	670
25.5	Tragbild und Verzahnungskorrektur	671
	Literaturverzeichnis	676
	Sachregister	681
	Autorenverzeichnis	