

Inhaltsverzeichnis

Autoren-Vorwort

Inhaltsverzeichnis

0. Nomenklatur und Zeichenerklärung	1
0.1 Nomenklatur	1
0.2 Erklärung der verwendeten Formelzeichen	5
1. Einführung in die Verzahnungstheorie	11
1.1 Einleitung	11
1.2 Die geeignete Flankenform	13
1.3 Evolventen und Achsabstände	16
1.4 Die Erzeugung der Evolvente	17
1.5 Der Schluss vom Zylinderrad aufs Kegelrad	20
1.6 Die Erzeugerräder bei Kegelradverzahnungen mit parallelem Zahnhöhenverlauf	24
1.7 Die Erzeugerräder bei Kegelradverzahnungen mit konischem Zahnhöhenverlauf	30
1.8 Zusammenfassung	37
1.9 Literatur	37
2. Verzahnungsmathematik für Kegelräder	39
2.1 Einleitung	39
2.2 Entwicklung eines einzelteilverzahnten Spiralkegelradsatzes	41
2.2.1 Berechnung der Drehteildaten	41
2.2.2 Berechnung der Messerkopf Geometrie	44
2.2.3 Berechnung der Basiseinstellungen der Verzahnmaschine	46
2.2.4 Simulation des Verzahnungsprozesses und rechnerische Zahnkontaktanalyse des einzelteilverzahnten Beispiels	51
2.3 Entwicklung eines kontinuierlich verzahnten Spiralkegelradsatzes	57
2.3.1 Berechnung der Drehteildaten	57
2.3.2 Berechnung der Messerkopf Geometrie	58
2.3.3 Berechnung der Basiseinstellungen der Verzahnmaschine	62
2.3.4 Simulation des Verzahnungsprozesses und rechnerische Zahnkontaktanalyse des kontinuierlich verzahnten Beispiels	67
2.4 Entwicklung eines kontinuierlich verzahnten, formgewälzten Spiralkegelradsatzes	69
2.4.1 Berechnung der Drehteildaten	69
2.4.2 Berechnung der Messerkopf Geometrie	70
2.4.3 Berechnung der Basiseinstellungen der Verzahnmaschine	71
2.4.4 Simulation des Verzahnungsprozesses und rechnerische Zahnkontaktanalyse des kontinuierlich verzahnten Beispiels	75
2.5 Entwicklung eines kontinuierlich verzahnten, formgewälzten Spiralkegelradsatzes mit Achsversatz	77
2.5.1 Berechnung der Drehteildaten	78
2.5.2 Berechnung der Messerkopf Geometrie	82
2.5.3 Berechnung der Basiseinstellungen der Verzahnmaschine	83
2.5.4 Simulation des Verzahnungsprozesses und rechnerische Zahnkontaktanalyse des achsversetzten Beispiels	85

2.6	Entwicklung einer gebrauchstüchtigen Kegelradverzahnung mit Längs- und Höhenballigkeit	87
2.6.1	Drehteildaten	89
2.6.2	Die Erzeugung von Längsballigkeit	89
2.6.2.1	Berechnung der Basiseinstellungen der Verzahnmaschine	91
2.6.2.2	Berechnung der Messerkopf Geometrie	95
2.6.2.3	Simulation des Verzahnungsprozesses und rechnerische Zahnkontakteanalyse des längsballigen Beispiels	97
2.6.3	Die Erzeugung von Höhenballigkeit	98
2.6.4	Simulation des Verzahnungsprozesses und rechnerische Zahnkontakteanalyse des längs- und höhenballigen Beispiels	101
2.7	Die Bedeutung von Profilverschiebung, Winkelkorrektur und Messerkopfneigung	103
2.7.1	Anwendungsprinzip der Profilverschiebung	103
2.7.2	Die Winkelkorrektur	106
2.7.3	Die Messerkopfneigung	108
2.8	Zusammenfassung	111
2.9	Literatur	111
3.	Die Anwendungsgebiete von Kegelrädern	113
3.1	Einleitung	113
3.2	Anwendungen im Automobilbau	113
3.3	Anwendungen im Nutzfahrzeugbau	115
3.4	Anwendungen in der Eisenbahntechnik	117
3.5	Anwendungen in Baumaschinen	118
3.6	Anwendungen in der Luftfahrt	119
3.7	Anwendungen in Industriegetrieben	121
3.8	Anwendungen in Marinegetrieben	121
3.9	Spezialanwendungen	123
3.10	Quellennachweis	124
4.	Die verschiedenen Arten von Kegelrädern und ihre tribologischen Aspekte	125
4.1	Grundlegende Erklärungen der theoretischen Analysen von Kegelrädern mit und ohne Achsversatz	125
4.2	Geradverzahnte Kegelräder	137
4.2.1	Auslegung	137
4.2.2	Analyse	138
4.2.3	Herstellung	142
4.2.4	Anwendung	143
4.3	Bogenverzahnte Kegelräder ohne Achsversatz – Spiralkegelräder	147
4.3.1	Auslegung	147
4.3.2	Analyse	148
4.3.3	Herstellung	152
4.3.4	Anwendung	154
4.4	Zerol® Kegelräder	157
4.4.1	Auslegung	157
4.4.2	Analyse	158
4.4.3	Herstellung	162
4.4.4	Anwendung	164

4.5 Kronenräder	167
4.5.1 Auslegung	167
4.5.2 Analyse	168
4.5.3 Herstellung	173
4.5.4 Anwendung	174
4.6 Achsversetzte Kegelräder – Hypoidgetriebe	177
4.6.1 Auslegung	177
4.6.2 Analyse	179
4.6.3 Herstellung	182
4.6.4 Anwendung	185
4.7 Kegelschneckengetriebe	189
4.7.1 Auslegung	189
4.7.2 Analyse	191
4.7.3 Herstellung	195
4.7.4 Anwendung	197
4.8 Bevelold und Hypolold Verzahnungen	203
4.8.1 Auslegung	203
4.8.2 Analyse	205
4.8.3 Herstellung	208
4.8.4 Anwendung	209
4.9 Zusammenfassung	213
4.10 Literatur	215
5. Praktische Verfahrensmerkmale	217
5.1 Einleitung	217
5.2 Einstechen und Wälzen	217
5.3 Merkmale der Fräsprozesse häufig verwendeter Verzahnverfahren	218
5.3.1 Fünfschnitt-Verfahren	218
5.3.2 Einzelteilendes Zweiflankenschnitt-Verfahren - Completing	220
5.3.3 Kontinuierliches Verfahren - Face Hobbing	221
5.3.4 Das CYCLOCUT™ Verfahren	222
5.3.5 Das SPIROFORM™ Verfahren	224
5.3.6 Das Super Reduction Hypoid - SRH™ Verfahren	226
5.3.7 Das HYPOLOID™ Verfahren	227
5.3.8 Das CONIFLEX Verfahren	228
5.3.9 Das CONIFACE™ Verfahren	229
5.3.10 Das Semi-Completing Verfahren	230
5.4 Geometrische und kinematische Einordnung der Verfahren	231
5.5 Literatur	233
6. Die Regeln zur optimalen Grundauslegung von Kegelräädern	235
6.1 Einleitung	235
6.2 Der Einfluss der wichtigsten Parameter	236
6.2.1 Der Modul	237
6.2.2 Die Zahnbreite	238
6.2.3 Der Spitzenumfang des Fräsermessers	238
6.2.4 Der Achsversatz	240
6.2.5 Der Eingriffswinkel	241
6.2.6 Die Profilverschiebung	242
6.2.7 Die Zahnhöhe	243
6.2.8 Der Fräserradius	244

6.2.9	Das Verhältnis des Evolventenpunktes zur mittleren Kegeldistanz	245
6.2.10	Der Spiralwinkel	246
6.2.11	Das Verzahnverfahren	247
6.3	Restriktionen bei der Veränderung der Verzahnungsgrunddaten	248
6.4	Optimierung mittels Flankenform-Modifikationen	249
6.5	Festigkeitssteigerung und Geräuschreduzierung mittels Ease-Off	250
6.6	Zusammenfassung	251
6.7	Literatur	252
7.	Verzahnwerkzeuge	253
7.1	Einleitung	253
7.2	Das HARDAC®-Messerkopfsystem	254
7.3	RSR®-Stabmesserköpfe	255
7.4	TRI-AC®-Messerköpfe für kontinuierliche Verzahnverfahren	256
7.5	PENTAC®FH-Messerkopf zum kontinuierlichen Verzahnen	257
7.6	PENTAC®FM-Messerkopf zum Einzelteilverzahnen	261
7.7	Theoretische und praktische Untersuchungen des PENTAC®-Messerkopfsystems	262
7.8	Eignung zum Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsverzahnen und der Schritt zu PENTAC®Plus	264
7.9	Werkzeuge zur Herstellung von Geradzahnkegelräder	267
7.10	Einrichten von Messerköpfen mit Stabmessern	268
7.11	Zusammenfassung	270
7.12	Literatur	271
8.	Verzahnmaschinen	273
8.1	Einleitung	273
8.2	Die ersten Freiform Kegelrad-Verzahnmaschinen	274
8.3	Neues Konzept für Freiform Kegelrad-Verzahnmaschinen	276
8.3.1	Ziele für eine neue Generation Kegelrad-Verzahnmaschinen	277
8.3.2	Suche nach einer geeigneten Maschinenstruktur	278
8.3.3	Diskussion der Schwenkwinkelproblematik	280
8.3.4	Analytische Untersuchungen für optimale Schwenkpunktlage	283
8.4	Die ultimative Kegelradverzahnmaschine - Neue Standards in der Kegelradverzahntechnik	285
8.4.1	Formgestaltung der Maschinenverkleidung und Ergonomie	288
8.5	Weiterentwicklungen und zukünftige Trends	289
8.6	Zusammenfassung	289
8.7	Literatur	290
9.	Die Kegelradfräswerfahren	291
9.1	Einleitung	291
9.2	Der Trend in Europa und den Vereinigten Staaten von Amerika	292
9.3	Kontinuierliches Verzahnen mit Läppen oder einzelteilendes Verzahnen mit Schleifen	293
9.4	Die Betrachtung der Unterschiede in der Makrogeometrie	294
9.4.1	Makrogeometrie einzelteilerverzahnter Kegelräder	294
9.4.2	Makrogeometrie kontinuierlich verzahnter Kegelräder	296
9.5	Flanken Topologie	299
9.5.1	Flanken Topologie einzelteilerverzahnter Kegelräder	299
9.5.2	Flanken Topologie kontinuierlich verzahnter Kegelräder	300

9.6 Ease-Off Topographie einzelteil- und kontinuierlich verzahnter Kegelräder	301
9.7 Fußausrundungsgeometrie einzelteil- und kontinuierlich verzahnter Kegelräder	303
9.8 Flankenrauigkeit, Welligkeit und Textur	304
9.9 Globale Festigkeitsbetrachtungen	306
9.10 Nachoptimierungen im Zuge von Produktpflege	306
9.11 Vergleich der Fertigungskosten	307
9.11.1 Fertigungskosten Läppen	309
9.11.2 Fertigungskosten Schleifen	309
9.11.3 Schlussfolgerung des Kostenvergleiches	309
9.12 Anwendungsgebiete geschliffener und geläppter Kegelräder	310
9.13 Zusammenfassung	311
9.14 Literatur	312
10. Hochgeschwindigkeits-Trockenverzahnen von Kegelräder	313
10.1 Einleitung	313
10.2 Werkzeugmaterial	314
10.3 Werkzeugbeschichtung und Schneidkantenverrundung	315
10.4 Werkstückmaterial und Gefügebehandlung	319
10.5 Vorschübe und Schnittgeschwindigkeiten	320
10.6 Optimale Werkzeuggeometrie	324
10.6.1 Vergrößerung der Messerspitzenbreite	328
10.7 Standzeiten und Werkzeugkosten	331
10.8 Studie verschiedener Messerverschleißerscheinungen	333
10.9 Regeln zur Aufbereitung von Hartmetallmessern	335
10.10 Spanformen und optimale Winkel am Hartmetallmesser	337
10.11 Zusammenfassung	340
10.12 Literatur	341
11. Hartfeinbearbeitungsverfahren für Kegelräder	343
11.1 Das Läppen von Kegelräder	343
11.1.1 Die Gesetzmäßigkeiten beim Läppen von Kegelräder	345
11.1.2 Neue Generation Kegelradläppmaschinen	348
11.1.3 Kompaktes und ergonomisches Läppmaschinenkonzept	350
11.1.4 Das Turbo-Läppverfahren	351
11.1.5 Zyklusmerkmale	353
11.1.6 Ausblick	353
11.1.7 Anhang – Die Läppregeln für bogenverzahnte Kegelräder	355
11.2 Das Schleifen von Kegelräder	357
11.2.1 Die Strategie des optimalen Vorverzahnens	357
11.2.2 Interferenz und kreisförmige Protuberanz	361
11.2.3 Oberflächengüte und Oberflächenbehandlung	362
11.2.4 Schleifscheibenspezifikation und Eigenschaften	363
11.2.5 Kühlung und Schleifscheibenreinigung	365
11.2.6 Schleifzyklen	366
11.2.7 Das Abrichten der Schleifscheiben	368
11.2.8 Die Kompensation des Schleifscheibenverschleißes	373
11.2.9 Laufprüfung geschliffener Kegelradsätze	374
11.2.10 Festigkeit von geschliffenen Kegeiradsätzen	376
11.2.11 Die wirtschaftlichen Aspekte des Schleifens	380
11.2.12 Zusammenfassung	381

11.3 Hartschälen von gewälzten Kegelrädern	383
11.3.1 Die Strategie des optimalen Vorverzahnens	383
11.3.2 Werkzeuge zum Hartschälen	384
11.3.3 Der Zerspanungsprozess	385
11.3.4 Beispielhafte Bearbeitungsergebnisse	387
11.3.5 Zusammenfassung	388
11.4 Literatur	389
12. Laufprüfung von Kegelrädern	391
12.1 Heute eingesetzte Zahnradprüfverfahren	391
12.2 Prüfkonzept für Zahnräder	392
12.3 Kegelradlaufprüfung in Entwicklung und Fertigung	394
12.4 Die Einfankenwälzprüfung	395
12.5 3-D-Körperschallanalyse	399
12.6 Regelkreis zwischen Fahrzeug und Prüfmaschine	401
12.7 Regeln für die Erarbeitung von Auswertekriterien	403
12.8 Auswertestrategie bei Anwendung mehrerer Analysemethoden	405
12.9 Zusammenfassung und Ausblick	406
12.10 Literatur	408
13. Geräuschtstestfahrten und Auswertung	409
13.1 Instrumentierte Testfahrten	409
13.2 Das Akustische Gesamtsystem Fahrzeug	410
13.3 Die Testfahrt	411
13.4 Das Phänomen des „Abschirmpegels“	413
13.5 Schema zur akustischen Bewertung eines Achsgetriebes	415
13.6 Zusammenfassung	416
13.7 Literatur	417
14. Koordinatenmessung von Kegelrädern	419
14.1 Gleason Koordinatenmessgeräte	419
14.2 Die Aufbereitung der theoretischen Flankenkoordinaten	420
14.3 Die Technik der Flankengittermessung	421
14.4 Axiale Besteinpassung „Best Fit“	423
14.5 Berechnung von korrigierten Maschineneinstellungen	424
14.6 Zusammenfassung und Ausblick	426
14.7 Literatur	428
15. Strategie zur Fehlerkorrektur	429
15.1 Allgemeine Bemerkungen	429
15.2 Korrekturstrategie	429
15.3 Korrekturen erster Ordnung	430
15.4 Korrekturen von Flankenverwindungen	431
15.5 Korrekturen von Langs- und Höhenballigkeitsfehlern	432
15.6 Beurteilung der Restabweichungen	434
15.7 Literatur	435
16. Flankenmodifikationen mittels Universellen Bewegungen	437
16.1 Einleitung	437
16.2 Suche nach einem geeigneten Korrekturmodell	439
16.3 Kinematische Korrekturmechanismen	440
16.4 Theorie der universellen Freiformkorrekturen	443

16.5 Unabhängige Optimierung verschiedener Flankenbereiche	448
16.6 Zusammenfassung	450
16.7 Literatur	452
17. Wärmebehandlung von Kegelrädern	453
17.1 Allgemeine Bemerkungen	453
17.2 Härtbarkeit der Stähle	453
17.3 Verwendete Stähle	455
17.4 Die gebräuchlichsten Wärmebehandlungsverfahren	456
17.4.1 Einsatzhärten	456
17.4.2 Anlassen	457
17.4.3 Vergüten	458
17.4.4 Nitrieren	458
17.4.5 Induktionshärten	459
17.4.6 Flammhärten	460
17.4.7 Vakuumhärten	462
17.5 Härteverzüge	463
17.6 Härteanlagen	465
17.6.1 Schachtöfen	465
17.6.2 Kammeröfen	466
17.6.3 Drehherdöfen	467
17.6.4 Förderbandhärteanlagen	468
17.6.5 Vakuumhärteanlagen	468
17.7 Erzielbare Härten	468
17.8 Zusammenfassung	469
17.9 Literatur	470
18. Spezielle Arten von Winkelgetrieben	471
18.1 Allgemeine Bemerkungen	471
18.2 Schraubradgetriebe	471
18.3 Schneckengetriebe	473
18.4 Kronenradgetriebe	474
18.4.1 Grundlegende Bemerkungen	474
18.4.2 Bekannte Fertigungsverfahren	475
18.4.3 Das neue CONIFACE Verfahren	477
18.4.4 Geometrische und kinematische Basisdaten	479
18.4.5 Flankengenerierung und Zahnkontaktanalyse	481
18.4.6 Verfahrensspezifische Besonderheiten	481
18.4.7 Fräsen und Schleifen von Kronenrädern	483
18.4.8 Zusammenfassung	485
18.4.9 Literatur	486
Sachwortregister	487
Warenzeichen und Verkaufsnamen	490
Der Autor	491