

**Hermann J. Stadtfeld**

# **Gleason Kegelradtechnologie**

**Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen  
und modernste Herstellungsverfahren  
für Winkelgetriebe**

**2., neu bearbeitete Auflage**

**Mit 379 Bildern  
und 33 Tabellen**

**expert  verlag®**

# Inhaltsverzeichnis

---

## Vorwort

## Inhaltsverzeichnis

<b>0. Nomenklatur und Zeichenerklärung</b> .....	<b>1</b>
0.1 Nomenklatur.....	1
0.2 Erklärung der verwendeten Formelzeichen.....	5
<b>1. Einführung in die Verzahnungstheorie</b> .....	<b>11</b>
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
<b>2. Verzahnungsmathematik für Kegelräder</b> .....	<b>39</b>
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 Zahnkontaktanalyse des längsballigen Beispiels.....	97
2.6.3	Die Erzeugung von Höhenballigkeit.....	98
2.6.4	Simulation des Verzahnungsprozesses und rechnerische Zahnkontaktanalyse des längs- und höhenballigen Beispiels.....	101
2.7	Die Bedeutung von Profilverziehung, Winkelkorrektur und Messerkopfneigung.....	103
2.7.1	Anwendungsprinzip der Profilverziehung.....	103
2.7.2	Die Winkelkorrektur.....	106
2.7.3	Die Messerkopfneigung.....	108
2.8	Zusammenfassung.....	111
2.9	Literatur.....	111
<b>3.</b>	<b>Die Anwendungsgebiete von Kegelrädern.....</b>	<b>113</b>
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 im Boots- und Schiffsbau.....	121
3.9	Spezialanwendungen.....	123
3.10	Quellennachweis.....	124
<b>4.</b>	<b>Die verschiedenen Arten von Kegelrädern und ihre tribologischen Aspekte.....</b>	<b>125</b>
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	Beveloid und Hypoloid Verzahnungen.....	203
4.8.1	Auslegung.....	203
4.8.2	Analyse.....	205
4.8.3	Herstellung.....	208
4.8.4	Anwendung.....	210
4.9	Zusammenfassung.....	213
4.10	Literatur.....	215
<b>5.</b>	<b>Praktische Verfahrensmerkmale.....</b>	<b>217</b>
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
<b>6.</b>	<b>Die Regeln zur optimalen Grundauslegung von Kegelrädern.....</b>	<b>235</b>
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 Spitzenradius des Fräsmessers.....	238
6.2.4	Der Achsversatz.....	240
6.2.5	Der Eingriffswinkel.....	241
6.2.6	Die Profilverziehung.....	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
<b>7.</b>	<b>Verzahnwerkzeuge</b>	<b>253</b>
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 Verzahn	257
7.6	PENTAC®FM-Messerkopf zum Einzelteilverzahn	261
7.7	Theoretische und praktische Untersuchungen des PENTAC®-Messerkopfsystems	262
7.8	Eignung zum Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsverzahn und der Schritt zu PENTAC®Plus	264
7.9	Werkzeuge zur Herstellung von Geradzahnkegelrädern	267
7.10	Einrichten von Messerköpfen mit Stabmessern	268
7.11	Zusammenfassung	270
7.12	Literatur	272
<b>8.</b>	<b>Verzahnmaschinen</b>	<b>273</b>
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
<b>9.</b>	<b>Die Kegelradfräsverfahren</b>	<b>291</b>
9.1	Einleitung	291
9.2	Der Trend in Europa und den Vereinigten Staaten von Amerika	292
9.3	Kontinuierliches Verzahn mit Läppen oder einzelteilendes Verzahn mit Schleifen	293
9.4	Die Betrachtung der Unterschiede in der Makrogeometrie	294
9.4.1	Makrogeometrie einzelteilverzahnter Kegelräder	294
9.4.2	Makrogeometrie kontinuierlich verzahnter Kegelräder	296
9.5	Flanken Topologie	299
9.5.1	Flanken Topologie einzelteilverzahnter 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
<b>10.</b>	<b>Hochgeschwindigkeits-Trockenverzahnen von Kegelrädern.....</b>	<b>313</b>
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
<b>11.</b>	<b>Hartfeinbearbeitungsverfahren für Kegelräder.....</b>	<b>343</b>
11.1	Das Läppen von Kegelrädern.....	343
	11.1.1 Die Gesetzmäßigkeiten beim Läppen von Kegelrädern.....	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 Kegelrädern.....	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 Kegelradsätzen.....	376
	11.2.11 Die wirtschaftlichen Aspekte des Schleifens.....	380
	11.2.12 Zusammenfassung.....	381
11.3	Hartschalen 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
<b>12.</b>	<b>Laufprüfung von Kegelrädern.....</b>	<b>391</b>
12.1	Heute eingesetzte Zahnradprüfverfahren.....	391
12.2	Prüfkonzept für Zahnräder.....	392
12.3	Kegelradlaufprüfung in Entwicklung und Fertigung.....	394
12.4	Die Einflankenwälzprüfung.....	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
<b>13.</b>	<b>Geräuschtstfahrten und Auswertung.....</b>	<b>409</b>
13.1	Instrumentierte Testfahrten.....	409
13.2	Das Akustische Gesamtsystem Fahrzeug.....	410
13.3	Die Testfahrt.....	411
13.4	Das Phänomen des Maskenpegels.....	413
13.5	Schema zur akustischen Bewertung eines Achsgetriebes.....	415
13.6	Zusammenfassung.....	416
13.7	Literatur.....	417
<b>14.</b>	<b>Koordinatenmessung von Kegelrädern.....</b>	<b>419</b>
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
<b>15.</b>	<b>Strategie zur Fehlerkorrektur.....</b>	<b>429</b>
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 Längs- und Höhenballigkeitsfehlern.....	432
15.6	Beurteilung der Restabweichungen.....	434
15.7	Literatur.....	435
<b>16.</b>	<b>Flankenmodifikationen mittels Universellen Bewegungen.....</b>	<b>437</b>
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
<b>17. Wärmebehandlung von Kegelrädern.....</b>	<b>453</b>
17.1 Allgemeine Bemerkungen.....	453
17.2 Härbarkeit 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.....	466
17.6.1 Schachtöfen.....	466
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
<b>18. Spezielle Arten von Winkelgetrieben.....</b>	<b>471</b>
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
<b>Sachwortregister.....</b>	<b>487</b>
<b>Warenzeichen und Verkaufsnamen.....</b>	<b>490</b>
<b>Der Autor.....</b>	<b>491</b>