

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XI
Einleitung	XVII
1 Erweiterte Zahnrad-Berechnungsverfahren auf der Grundlage numerischer Simulationen und der Methode finiter Elemente	1
1.1 Einsatzmöglichkeiten erweiterter Berechnungsverfahren	1
1.2 Berechnung der Zahnflankengeometrie und Ermittlung der Beanspruchungsgrößen	3
1.2.1 Berechnung der Zahnflanken- und Kontaktgeometrie	4
1.2.1.1 Numerische Zahnflankengenerierung	6
1.2.1.2 Lastfreie Zahnkontaktanalyse	7
1.2.2 Beanspruchungsermittlung mit der Methode finiter Elemente	9
1.2.2.1 Generierung der Finite-Element-Struktur	9
1.2.2.2 Lösung des Kontaktproblems im Zahneingriff	11
1.2.2.3 Berechnung der Beanspruchungsgrößen	14
1.3 Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf das Lauf- und Beanspruchungsverhalten von Zylinder- und Kegelrädern	17
1.3.1 Auswirkungen von Verzahnungsabweichungen auf die Beanspruchungen von Zylinderradgetrieben	17
1.3.2 Einfluß des Spiralwinkels auf das Lauf- und Beanspruchungsverhalten von Kegelradverzahnungen	19
1.3.2.1 Einflüsse auf das lastfreie Kontaktverhalten und die Verlagerungsempfindlichkeit	21
1.3.2.2 Einflüsse auf das Beanspruchungsverhalten	22
1.4 Methoden und Fallbeispiele zur Optimierung der Zahnflankengeometrie von Zylinder- und Kegelrädern	24
1.4.1 Zahnflankenkorrekturen zur Optimierung des Lauf- und Beanspruchungsverhaltens von Zylinderrädern	24
1.4.1.1 Korrekturgeometrien für Zylinderräder	25
1.4.1.2 Dreidimensionale Zahnflankenkorrekturen	30
1.4.1.3 Beispiele für zahnflankenkorrigierte Zylinderräder	34
1.4.2 Tragbildoptimierung an Kegelrädern durch gezielte Korrekturen der Verzahnmaschineneinstellung	39

2	Einfluß von Werkstoff, Wärmebehandlung und Fertigbearbeitung auf die Zahnflanken- und Zahnfußtragfähigkeit	47
2.1	Grundlegende Betrachtungen zur beanspruchungsgerechten Verzahnungsauslegung	49
2.2	Einfluß von Werkstoff und Wärmebehandlung auf das Beanspruchungsverhalten gehärteter Verzahnungen	57
2.2.1	Tragfähigkeitsverhalten einsatzgehärteter Verzahnungen	57
2.2.1.1	Werkstoffzustand der einsatzgehärteten Verzahnungen	59
2.2.1.2	Zahnfußtragfähigkeiten einsatzgehärteter Verzahnungen	61
2.2.1.3	Zahnflankentragfähigkeiten einsatzgehärteter Verzahnungen	65
2.2.1.4	Vergleich unterschiedlicher Werkstoffe und Gefügestrukturen einsatzgehärteter Verzahnungen bezüglich Zahnflanken- und Zahnfußdauerfestigkeit	71
2.2.2	Tragfähigkeitsverhalten nitrierter Verzahnungen	73
2.2.2.1	Werkstoffzustand der nitrierten Verzahnungen	73
2.2.2.2	Zahnflankentragfähigkeiten der nitrierten Verzahnungen	81
2.2.2.3	Zahnfußtragfähigkeiten der nitrierten Verzahnungen	85
2.2.2.4	Vergleich unterschiedlicher Werkstoffe und Gefügestrukturen gas- und plasmanitrierter Verzahnungen bezüglich Zahnflanken- und Zahnfußdauerfestigkeit	88
2.3	Tragfähigkeit von kaltgewalzten Zahnrädern	90
2.3.1	Kaltgewalzte Verzahnungen aus Vergütungsstahl	91
2.3.2	Einsatzgehärtete, kaltgewalzte Verzahnungen	95
2.3.3	Plasmanitrierte, kaltgewalzte Verzahnungen	101
2.3.4	Vergleich der Zahnflanken- und Zahnfußdauerfestigkeiten kaltgewalzter und geschliffener Verzahnungen	107
3	Schwingungs- und Geräuschverhalten von Getrieben	110
3.1	Geräuschmessung von Leistungsgetrieben	110
3.1.1	Kenngrößen	111
3.1.2	Schalldruckmeßtechnik	114
3.1.2.1	Fremdgeräusch	116
3.1.2.2	Raumeinfluß	117
3.1.2.3	Sondermeßverfahren	120
3.1.3	Schallintensitätsmeßtechnik	124
3.1.4	Vergleich und Bewertung von Sondermeßverfahren	127
3.1.5	Emissionskennfelder	130
3.1.5.1	Stirnradgetriebe	133
3.1.5.2	Kegel- und Kegelstirnradgetriebe	135
3.1.5.3	Planetengertriebe	137
3.1.5.4	Schneckengetriebe	138
3.1.5.5	Mechanisch regelbare Wandler	139
3.1.5.6	Anwendung von Emissionskennfeldern	142
3.2	Entstehung von Getriebegeräuschen, Einflußgrößen und Geräuschminderungsmaßnahmen	142

3.2.1	Entstehung von Getriebegeräuschen	142
3.2.2	Äußere Anregung des Getriebes durch Fremdeinwirkung	144
3.2.3	Innere Anregung des Getriebes durch den Zahneingriff	145
3.2.3.1	Eintrittsstoß	146
3.2.3.2	Parameteranregung	152
3.2.3.3	Verzahnungsabweichungen	155
3.2.3.4	Lastbedingte Verformung der Wellen- und Lagersysteme	157
3.2.4	Maßnahmen zur Geräuschkürzung	159
3.2.4.1	Auslegung geräuscharmer Zylinderradverzahnungen	160
3.2.4.2	Zahnflankenkorrekturen	167
3.2.4.3	Auslegung geräuscharmer Kegelradverzahnungen	174
3.2.4.4	Beeinflussung des Übertragungs- und Abstrahlverhaltens von Getrieben	175
3.3	Schwingungssimulation von Getrieben	177
4	Erfassung und Verarbeitung geometrischer Abweichungen	184
4.1	Kenngrößen zur Bestimmung von Verzahnungsqualitäten	184
4.1.1	Ermittlung geometrischer Einzelabweichungen	185
4.1.2	Ermittlung von Wälzabweichungen	186
4.2	Tragbildprüfung	187
4.3	Verzahnungsmessung auf Mehrkoordinaten-Meßgeräten	190
4.3.1	Werkstückausrichtung auf Koordinaten-Meßgeräten	193
4.3.2	Berücksichtigung des Meßtasterradius	194
4.4	Rückführung der Meßdaten in den Herstellprozeß durch Analyse der geometrischen Abweichungen von Verzahnungen	195
4.4.1	Verfahren zur Bestimmung von Verzahnungsabweichungen und deren Korrektur an bogenverzahnten Kegelrädern	196
4.4.1.1	Fertigung und Wärmebehandlung	197
4.4.1.2	Flankenmessung nach Sollkoordinaten	199
4.4.1.3	Einpassung und Analyse gemessener Flanken	201
4.4.1.4	Berechnung geeigneter Korrekturen für die Verzahnungsmaschinen- einstellung zur Kompensation der signifikanten Abweichungen	204
4.4.2	Meßdatenverarbeitung bei der Optimierung von Zylinderradverzahnungen	205
4.4.3	Meßdatenverarbeitung bei der Feinbearbeitung von Sonderverzahnungen	206
4.4.3.1	Verfahren zur Prüfung von Zylinderschnecken und Rotoren	206
4.4.3.2	Profilkorrektur durch Meßdatenrückführung	209
4.5	Ausblick	212
5	Zusammenfassung	214
6	Literatur	215
Anhang	221
Sachverzeichnis	223