

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	1
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung und Zielsetzung der Arbeit	9
1.1 Thematische und historische Einordnung	9
1.2 Ziele und wissenschaftliche Arbeitsschwerpunkte	11
2 Stand der Technik	14
2.1 Historische Entwicklung der Verzahnungs-Messtechnik	15
2.1.1 Prüfung der Gesamtabweichungen an Kegelrädern	16
2.1.2 Klassische Prüfung von Einzelabweichungen an Kegelrädern	20
2.1.3 Prüfung von Einzelabweichungen mit CNC-gesteuerten Messgeräten	22
2.2 Aktueller Stand der Kegelradmessung bei der Prüfung von Einzelabweichungen	29
3 Allgemeines zur Kegelradmessung	34
3.1 Solldaten	39
3.2 Aufspannung und Ausrichtung	42
3.3 Messaufgaben und Messpunkterfassung	42
3.4 Auswertungen	45
3.5 Protokollierung	49
3.6 Ausgabe von ASCII-Dateien	50
4 Maß-, Form- und Lageabweichungen in der Geometrie-Messtechnik (GMT)	52
4.1 Maßabweichungen	54
4.2 Formabweichungen	57
4.3 Lageabweichungen	58
4.4 Maß-, Form- und Lageabweichungen in der Verzahnungs-Messtechnik (VMT)	60
5 Ausrichtung von Kegelrädern	64
5.1 Geräte-Koordinatensystem (GKS), Referenz-Koordinatensystem (RKS), Werkstück-Koordinatensystem (WKS) und Transformationsvorschriften	64
5.1.1 Allgemeine Betrachtung zur Ausrichtung	65
5.1.2 Lagerflächen-Koordinatensystem (LKS)	67
5.1.3 Verzahnungskoordinatensystem (VKS)	69
5.1.4 Kopfkegel-Koordinatensystem (KKKS)	70
5.1.5 Zusammenwirken der ermittelten Koordinatensysteme LKS, VKS und KKKS	72
5.2 Allgemeines zur Erfassung von Ausrichtungselementen	75
5.3 Bildung eines Werkstück-Koordinatensystems (WKS) an Referenzflächen	77
5.4 Ausrichtungselemente der Radführungsachse	79

5.4.1	Zylinder	79
5.4.2	Kreis und Ebene	80
5.4.3	Kalotte oder ebene Bezugs-Stirnfläche	81
5.4.4	Einbaumaß und Offset	82
5.5	Referenzflächen mit auszublenenden Bereichen	85
6	Rundlauf-, Teilungs- und Zahndickenprüfung am Kegelrad	87
6.1	Allgemeines zu Rundlauf-, Teilungs- und Zahndickenprüfung am Kegelrad	87
6.2	Teilungsprüfung	91
6.2.1	Drehend antastende Teilungsmessung	95
6.2.2	Vektoriell antastende Teilungsmessung	99
6.2.3	Teilungsauswertung	101
6.3	Zahndickenprüfung	106
6.3.1	Drehend antastende Zahndickenmessung	110
6.3.2	Vektoriell antastende Zahndickenmessung	113
6.3.3	Allgemeines zur Zahndicken-Auswertung	116
6.3.4	Zahndickenauswertung zur drehend antastenden Messung	118
6.3.5	Zahndickenauswertung zur vektoriell antastenden Messung	118
6.3.6	Schlussbetrachtung zur Zahndicken-Auswertung	120
6.4	Prüfung der Zahnlückenweite	123
6.5	Rundlaufprüfung	124
6.5.1	Direkte Rundlaufmessung	124
6.5.2	Rundlaufprüfung auf Basis der Teilungs- oder Zahndickenmessung	129
6.5.3	Rundlaufauswertung aus Flanken-Einzelmesspunkten	131
6.5.4	Rundlaufabweichung F_r als Kennwert zur Bestimmung der Genauigkeitsklasse eines Kegelrades	146
6.5.5	Linke und rechte Rundlaufabweichung	147
6.6	Berechnung von Exzentrizität und Taumel	148
6.6.1	Exzentrizität der Verzahnung	148
6.6.2	Taumel	153
6.6.3	Berechnung von Exzentrizität und Taumel am Kegelrad	157
6.7	Auswertung mit korrigierter Exzentrizität und Taumel	159
7	Simulationsergebnisse	161
7.1	Simulationsergebnisse zur Berechnung der Exzentrizität	161
7.2	Simulationsergebnisse zur Berechnung des Taumels	170
8	Topographie-Prüfung am Kegelrad	180
8.1	Allgemeines zur Topographie-Messung	180
8.2	Berührpfad-Messung	184
8.2.1	Lage des Berührpfades	184
8.2.2	Messung des Berührpfades	189
8.3	Systematik von Topographie-Diagrammen beim Kegelrad	190
8.4	Definition von punktweise erfassten Geometrie-Abweichungen	194

8.4.1	Euklidische Abweichung (vektorielle Abweichung)	196
8.4.2	Abweichung in Normalenrichtung (projizierter Abstand)	198
8.4.3	Abweichungen im Bogenmaß	200
8.5	Setzen eines Bezugspunktes	203
8.5.1	Drehen der Messpunkte	206
8.5.2	Verschieben der Messpunkte	207
8.5.3	Verschieben der Messpunkte in ihre jeweilige Normalenrichtung (schrumpfen)	209
8.5.4	Bezugspunkte an allen Flanken	210
8.5.5	Bezugspunkte nur am ersten Zahn	212
8.5.6	Bezugspunkte mit Zahndicke	214
8.6	Abschätzung von Spiral- und Eingriffswinkel-Abweichungen	215
8.7	Einrechnen von Taumel und Exzentrizität	219
9	Zusammenfassung und Ausblick	221
10	Mathematischer Anhang	224
10.1	Begriffe und Bezeichnungen einer ASCII-Solldatendatei im Gleason-Format	224
10.2	Abschätzung von Abweichungen durch die Positionsunsicherheit des Messgerätes an verschiedenen Standard-Geometrieelementen	226
10.3	Stirnschnitt und Normalschnitt einer Verzahnung	232
10.4	Gitter und Nachbarpunkte bei Kegelradflanken	233
10.5	Gegenüberstellung der Standard-Geometrieelemente	234
10.5.1	Ebenenapproximation	236
10.5.2	Zylinderapproximation	241
10.5.3	Kugelapproximation	245
10.5.4	Approximation eines Ellipsoiden	245
10.5.5	Approximation eines Torus	246
10.5.6	Zusammenfassung der verschiedenen Approximationen	247
10.6	Flächendarstellungen der Standard-Geometrieelemente Zylinder und Kegel	249
10.7	Schnittelelemente der Standard-Geometrieelemente Zylinder und Kegel für die Rundlaufauswertung	251
10.7.1	Schnittlinie zwischen zwei Zylindermänteln	251
10.7.2	Durchstoßpunkt Schnittlinie und Antastkegel	255
10.8	Sinusfunktion und Exzentrizität eines Kreises	257
10.9	Ermittlung der Exzentrizität auf Basis der Approximation von Sinusfunktion und Kreis	258
10.10	Euklidische Abweichung, Abweichung in Normalenrichtung und Abweichungen im Bogenmaß	261
11	Literaturliste und aktuelle Normen	263