

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Autorenverzeichnis	XV
1 Einführung	1
1.1 Ziele und Messobjekte der Fertigungsmesstechnik	2
1.2 Werkstückgestalt	6
1.3 Gliederung der gestaltbezogenen Mess- und Prüfaufgaben	8
1.4 Einheiten für Länge und Winkel und Rückführung	10
1.5 Fertigungsmessgeräte und Hilfsmittel	12
1.6 Koordinatenmesstechnik und Koordinatenmessgeräte	13
1.7 Multisensor Messgeräte	17
1.8 Geschichte	19
2 Messaufgaben	25
2.1 Ziel der Messung	25
2.2 Spezifikation geometrischer Eigenschaften	25
2.2.1 Darstellung der Nenneometrie	25
2.2.2 Grundsatz der Unabhängigkeit als internationaler Tolerierungsgrundsatz	27
2.2.3 Längenmaße	28
2.2.3.1 Zweipunktmaß	28
2.2.3.2 Größenmaße	29
2.2.3.3 Hüllbedingung	29
2.2.4 Toleranzzonen für Form- und Lagetoleranzen	32
2.2.5 Formtoleranzen	34
2.2.6 Bezüge, Bezugssysteme	35
2.2.7 Lagetoleranzen	38
2.2.7.1 Richtungstoleranzen	38

2.2.7.2	Ortstoleranzen	38
2.2.7.3	Lauftoleranzen	39
2.2.7.4	Vollständige Produktspezifikation	39
2.3	Konformitätsnachweis	40
2.3.1	Partition	41
2.3.2	Extraktion	42
2.3.2.1	Werkstückbezugssystem	42
2.3.2.2	Anzahl und Anordnung der Messpunkte	42
2.3.2.3	Sensor	44
2.4	Filterung	45
2.5	Assoziation	46
2.6	System der Geometrischen Produktspezifikation und -prüfung	48
3	Grundprinzip und Gerätetechniken	53
3.1	Konventionelles Messen	53
3.1.1	2-Punkt-Maß	53
3.1.2	3-Punkt-Maß	55
3.1.3	Sinustisch	55
3.1.4	2-Punkt-Abstand	56
3.1.5	Bohrungsabstand von einer Ebene	56
3.1.6	Zusammenfassung zur konventionellen Messtechnik	56
3.2	Prinzip der Koordinatenmesstechnik	57
3.2.1	Punktantastung und Ausgleichsrechnung	57
3.2.2	Ersatzflächen und Ersatzlinien	58
3.2.3	Minimale Anzahl Antastpunkte	59
3.2.4	Anzahl Antastpunkte	60
3.2.5	Beispiel Werkstückkoordinatensystem	61
3.2.6	Verschiedene Kriterien für Ausgleichsrechnungen	62
3.2.7	Definition von Lageabweichungen	63
3.2.8	Systematik der Koordinatenmesstechnik	64
3.2.9	Vergleich der Koordinatenmesstechnik mit konventioneller Messtechnik	68
3.3	Gerätetechnik	70
3.3.1	Geräteaufbau	70
3.3.1.1	Typischer Geräteaufbau am Beispiel eines Portalgerätes mit stehendem Portal	72
3.3.1.2	Mechanisches Justieren und Softwarekompensation	72
3.3.1.3	Innerer Aufbau eines Koordinatenmessgerätes	73
3.3.1.4	Handbediente Koordinatenmessgeräte	74
3.3.1.5	Einständer-Koordinatenmessgeräte	75
3.3.1.6	Koordinatenmessgeräte mit fahrendem Portal	76
3.3.1.7	Doppelständer-Koordinatenmessgeräte	77
3.3.1.8	Mehrstellenmessgeräte	78
3.3.2	Tastelemente, Einmessen, Mehrfachtaster und Tasterradiuskorrektur	78

3.3.2.1	Tastelemente	78
3.3.2.2	Einmessen	78
3.3.2.3	Mehrfachtaster.....	80
3.3.2.4	Tasterradiuskorrektur	80
3.4	Erweiterungen	81
3.4.1	Tasterwechseleinrichtung.....	81
3.4.2	Dreh-Schwenktaster.....	82
3.4.3	Drehtisch	83
3.4.4	Scannen	84
3.4.5	Automatischer Werkstückwechsel	85
3.4.6	Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen.....	85
3.5	Messung nach Substitutionsmethode.....	86
3.6	Messung von Formabweichungen	87
4	Sensoren für Koordinatenmesstechnik.....	93
4.1	Taktile Antastung	93
4.1.1	Einführung und Grundlagen	93
4.1.1.1	Sinn und Zweck der Antastung	93
4.1.1.2	Anforderungen an taktile 3D Tastsysteme	94
4.1.1.3	Geschichtliche Entwicklung	94
4.1.1.4	Aufbau, Komponenten, Begriffsdefinitionen	96
4.1.2	Sensorik für taktile Antastsysteme.....	97
4.1.2.1	Schaltende und messende Sensorik	97
4.1.2.2	Serieller und paralleler Aufbau der Sensorik	98
4.1.2.3	Resistiv schaltende Sensorik.....	99
4.1.2.4	Schaltende Sensorik basierend auf Piezoelementen bzw. DMS.....	99
4.1.2.5	Induktiv und kapazitiv messende Sensorik	99
4.1.2.6	Skalenbasiert messende Sensorik.....	100
4.1.2.7	Optisch messende Sensorik.....	100
4.1.2.8	Pseudo-taktile Sensorik	101
4.1.3	Antastabweichung.....	103
4.1.3.1	Tastereinmessen und Bestimmung der Antastabweichung.....	103
4.1.3.2	Antastkraft, Deformation, Empfindlichkeit, Luftantastung.....	106
4.1.3.3	Filterwirkung und Einfluss der Formabweichung der Tastkugel	110
4.1.3.4	Einzelpunktmessung und Scanning	111
4.1.3.5	Tastelemente, Taststifte, Tasterbäume.....	112
4.1.4	Beispiele taktile 3D Tastsysteme für die Koordinatenmesstechnik	113
4.1.4.1	Taktile Tastsysteme für konventionelle KMG.....	113
4.1.4.2	Taktile Tastsysteme für Mikro-KMG	115
4.1.4.3	Tastsysteme für spezielle Anwendungsfälle.....	117
4.1.5	Anwendung taktile 3D Tastsysteme und Zusatzeinrichtungen.....	118
4.2	Visuelle Sensoren	119
4.2.1	Abbildungssysteme.....	120
4.2.2	Beleuchtungssysteme.....	123

4.2.3	Kameratechnik	126
4.2.4	Software zur Bildauswertung.....	127
4.2.5	Einbindung der Bildverarbeitungssensorik in Koordinatenmessgeräte.....	129
4.3	Berührungslose Abstandssensoren.....	133
4.3.1	Grundlegende Messprinzipien	134
4.3.2	Abstandssensor mit Foucault'scher Schneide.....	135
4.3.3	Triangulationssensoren	137
4.3.4	Photogrammetrie.....	138
4.3.5	Streifenprojektion	139
4.3.6	Fokusvariation	140
4.3.7	Konfokale Abstandssensoren.....	141
4.3.8	Weißlichtinterferometrie.....	143
4.3.9	Konoskopischer Abstandssensor.....	145
4.4	Rastersondenverfahren	147
4.4.1	Einführung und Grundlagen	147
4.4.1.1	Rastertunnelmikroskopie - Ursprung der Rastersondenverfahren	148
4.4.1.2	Rasterkraftmikroskopie.....	149
4.4.1.3	Rastersondenverfahren im Kontext der Koordinatenmesstechnik	150
4.4.2	Koordinatenmesstechnik mit Rastersondenverfahren.....	151
4.4.2.1	2,5D Koordinatenmesstechnik mit metrologischen Rastersondenmikroskopen.....	151
4.4.2.2	3D Koordinatenmesstechnik mit Rasterkraftmikroskopie.....	152
5	Grundlagen weiterentwickelter Gerätetechnik.....	155
5.1	Lasertracker	155
5.1.1	Einleitung	155
5.1.1.1	Handtaster mit zusätzlicher Erfassung der Orientierung.....	158
5.1.2	Anwendungen	158
5.1.2.1	Flugzeugbau.....	158
5.1.2.2	Vorrichtungsbau.....	159
5.1.2.3	Qualitätssicherung von Großteilen und im Formenbau	160
5.1.2.4	Kalibrierung von Maschinen.....	160
5.1.3	Messunsicherheit und Normen	161
5.1.3.1	Messunsicherheit	161
5.1.3.2	Amerikanische Norm zur Prüfung von Lasertrackern: B89.4.19	162
5.1.3.3	Deutsche Richtlinie zur Prüfung von Lasertrackern: VDI 2617-10	163
5.1.3.4	Internationale Norm zur Prüfung von Lasertrackern in der Normungsreihe ISO 10360	164
5.1.4	Neue Technologien.....	165
5.1.4.1	Der „Virtuelle Lasertracker“	165
5.1.4.2	Multilaterationssystem.....	165
5.1.5	Zusammenfassung und Ausblick	166
5.2	Koordinatenmessgeräte mit Gelenkarmen.....	167
5.2.1	Funktionsweise der Gelenkarm-KMGs.....	167
5.2.2	Gelenkarm-KMG mit lineargeführter Z-Achse	168

5.2.3	Gelenkarm-KMG mit mehreren Gelenkarm-Segmenten	170
5.2.4	Prüfung von Gelenkarm-Koordinatenmessgeräten	174
5.3	3D Nanomess- und Nanopositioniergeräte	176
5.3.1	Einführung	176
5.3.2	Stand der Technik von Nanopositionier- und Nanomessgeräten	177
5.3.3	Laserinterferometrische Längenmesstechnik	179
5.3.3.1	Grundlagen der Interferometer.....	179
5.3.3.2	Metrologische Analyse	181
5.3.4	Laserinterferometer für Nanomessgeräte	186
5.3.5	Nanokoordinatenmessgeräte.....	188
5.3.5.1	Aufbauprinzipien von Koordinatenmessgeräten (CMM).....	188
5.3.5.2	Aufbau, Wirkungsweise und Eigenschaften der Nanomessmaschine NMM-1	190
5.3.5.3	Nanosensoren für Nanomessgeräte, Messergebnisse.....	194
5.3.5.4	Anwendungsgebiete der Nanomessmaschinen.....	199
5.4	Röntgentomographie	200
5.4.1	Röntgenstrahlerzeugung.....	202
5.4.2	Bildaufnahme.....	204
5.4.3	Mechanik und Strahlenschutz	205
5.4.4	Volumen- und Messpunkteberechnung.....	207
5.4.5	Messabweichungen durch das Röntgentomographieprinzip.....	209
5.4.6	Erweiterung des Einsatzbereichs von Koordinatenmessgeräten mit Röntgentomographie	211
5.4.7	Anwendung von Koordinatenmessgeräten mit Röntgentomographie.....	213
5.5	Optische Messsysteme	216
5.5.1	Prinzip der Triangulation	216
5.5.2	Berührungslose optische Erfassung von Werkstückoberflächen mit aktiver Triangulation.....	219
5.5.3	Berührungslose optische Erfassung von Werkstückoberflächen mit passiver Triangulation	221
5.5.3.1	Passive Triangulation mit zueinander kalibrierten Messkameras.....	222
5.5.3.2	Passive Triangulation mit einer bewegten Messkamera	222
5.5.3.3	Passive Triangulation mit Theodoliten	223
5.5.4	Geometrieerfassung mit photogrammetrischen Trackersystemen	224
5.5.5	Berührungslose optische Geometrieerfassung nach dem Licht-Laufzeitverfahren.....	226
5.5.6	Optische Geometrieerfassung spiegelnder Oberflächen	226
5.6	Messen mit mehreren Sensoren	228
5.6.1	Optische Messsysteme mit Antastung in mehreren Einzelansichten	229
5.6.1.1	Registrierung	230
5.6.1.2	Datenfusion	233
5.6.2	Multisensor-Koordinatenmessgeräte	234
5.6.2.1	3D Multisensor-Koordinatenmessgeräte	234
5.6.2.2	Multisensor-Oberflächenmessgeräte	237

5.7	Indoor-GPS (Global Positioning System)	239
5.7.1	Funktionsweise und Komponenten des iGPS.....	239
5.7.2	Skalierung des Messsystems	241
5.7.3	Inhomogene Fehlerverteilung im Messsystem	242
5.7.4	Anwendungsbeispiel: Regelung von Robotern	243
5.8	Maschinenintegrierte Messtechnik	244
5.8.1	Definition und Einordnung innerhalb der Fertigungsmesstechnik	244
5.8.2	Pre- und Post-Prozess-Messtechnik.....	244
5.8.3	Potenzial der dreidimensionalen Korrektur	246
5.8.4	Sensoren zur Integration auf der Werkzeugmaschine	247
5.8.5	In-Prozess-Messtechnik.....	248
5.8.6	Pneumatische In-Prozess-Messtechnik	250
5.8.7	Zukünftige Entwicklungen	252
6	Von der technischen Zeichnung über den Prüfplan hin zum Messablaufplan	253
6.1	Einführung in die Prüfplanung	253
6.1.1	Prüfen der Unterlagen	254
6.1.2	Erkennen der Merkmale	254
6.1.3	Auswahl der Prüfmerkmale.....	254
6.1.4	Abarbeiten der Prüfmerkmale (allgemein).....	256
6.1.5	Abstimmen mit Fachbereichen	256
6.1.6	Dokumentation - Eintragungen in den Prüfplan	257
6.1.7	Inhalte eines Prüfplans	257
6.2	Abarbeiten der Prüfmerkmale in der Koordinatenmesstechnik	257
6.2.1	Einführung	257
6.2.2	Prüfaufgabe analysieren	258
6.2.2.1	Auswahl des Koordinatenmessgeräts und dessen Zusatzeinrichtungen	258
6.2.2.2	Prüfplan für die Koordinatenmesstechnik	259
6.2.3	Messstrategie definieren.....	260
6.2.3.1	Orientierung des Werkstücks im Koordinatenmessgerät	260
6.2.3.2	Koordinatensysteme	260
6.2.3.3	Antaststrategie.....	264
6.2.3.4	Auswertestrategie	272
6.2.4	Messablauf festlegen	279
6.2.4.1	Grundsätze	280
6.2.4.2	Optimierungskriterien	280
6.2.5	Messung vorbereiten	282
6.2.5.1	Erforderliche Unterlagen.....	282
6.2.5.2	Werkstück.....	283
6.2.5.3	Koordinatenmessgerät.....	284
6.2.5.4	Hilfsmittel.....	284
6.3	Softwareunterstützung bei der Prüfplanung für die Koordinatenmesstechnik	285

7	Vom Messablaufplan über die Programmierung, Durchführung und Auswertung bis zur Ergebnisdarstellung	287
7.1	Programmierung	287
7.1.1	Software zur Programmierung für Koordinatenmessgeräte.....	289
7.1.2	Rechnergestützte Schnittstellen für Eingangsinformationen: CAD und Planungssoftware.....	291
7.1.3	Simulation und Kollisionskontrolle.....	296
7.1.4	Rechnergestützte Übertragung von Messprogrammen.....	298
7.1.5	Programmierung von automatisierten Systemen in der Produktion	300
7.1.6	Programmierung bei speziellen Messaufgaben.....	301
7.2	Messung und Auswertung der Koordinaten (Punkte)	303
7.2.1	Messung: Messprogrammausführung.....	303
7.2.2	Auswertung: Ableitung von Informationen aus den Messpunkten.....	304
7.3	Ergebnisdarstellung und -übertragung	314
7.3.1	Messprotokollgestaltung, Messprotokollarten	315
7.3.2	Rechnergestützte Übertragung von Messergebnissen	316
8	Spezielle Messaufgaben	323
8.1	Spektrum der Messaufgaben mit komplexer Geometrie	324
8.1.1	Messobjekte mit analytischer Geometriebeschreibung (funktionsbedingt gegeben).....	324
8.1.2	Messobjekte mit numerisch-approximativer Geometriebeschreibung	327
8.2	Definition der Messaufgabe	328
8.2.1	Messaufgaben-Definition an ausgezeichneten Punkten.....	328
8.2.2	Messaufgaben-Definition entlang ausgezeichneter Linien	329
8.2.3	Messaufgaben-Definition durch 3D Topografien	330
8.3	Definition der Messstrategie	331
8.3.1	Auswahlkriterien und Beurteilungskriterien	331
8.3.2	Gerätebezogene Aspekte der Messstrategie	331
8.3.3	Phasen der Messprogrammerstellung und der Programmierung des Prüfprozesses.....	332
8.4	Ausrichten	337
8.4.1	Methodik der Ausrichtung komplexer Messobjekte	337
8.4.2	Ausrichtung nach dem Werkstück-Grundkörper oder nach funktionsbestimmenden Bezugsflächen.....	338
8.4.3	Ausrichtung nach den Freiformflächen.....	339
8.4.4	Ausrichtung mit Ähnlichkeitstransformationen.....	342
8.4.5	Ausrichtung nach Teilflächen	343
8.5	Messdatenauswertung	344
8.5.1	Messdatenauswertung für Freiformflächen	345
8.5.1.1	Zuordnung von Soll- und Ist-Punkten.....	345
8.5.1.2	Tastkugelkorrektur	346
8.5.1.3	Soll-Ist-Vergleich.....	348

8.5.1.4	Berechnung von Abweichungs-Kenngrößen.....	349
8.5.2	Sonderfall Verzahnungsmessungen	351
8.5.3	Besondere Auswertemethoden	353
8.6	Funktionsorientierte Prüfungen.....	354
8.6.1	Prinzip der numerischen Funktionsprüfung in der Koordinatenmesstechnik.....	354
8.6.2	Beispiel Tragbildprüfung bei Zylinderrädern	355
9	Messunsicherheit und Rückverfolgbarkeit von Messwerten.....	359
9.1	Metrologische Rückverfolgbarkeit.....	359
9.2	Ermittlung der Messunsicherheit.....	361
9.2.1	Messunsicherheitsbilanz	362
9.2.2	Ermittlung der Messunsicherheit am kalibrierten Werkstück	372
9.2.3	Ermittlung der Messunsicherheit durch Simulation	373
9.2.4	Korrektur systematischer Abweichungen.....	374
9.3	Annahme und Überwachung von Koordinatenmessgeräten.....	375
9.3.1	Antastabweichung.....	379
9.3.2	Längenmessabweichung	380
9.4	Eignungsnachweis für Prüfprozesse und Messsysteme.....	382
10	Wirtschaftlichkeit	387
10.1	Kosten	388
10.2	Nutzen und Zweckerfolg einer Messung.....	389
10.2.1	Referenzmodell zur Bewertung des Zweckerfolgs einer Messung	389
10.2.2	Methodisches Vorgehen	393
10.3	Bewertungsansätze.....	396
10.3.1	Konformitätsprüfung (Gestaltprüfung)	396
10.3.2	Prozessfähigkeitsuntersuchung	398
10.3.3	Statistische Prozesslenkung.....	403
11	Schulungskonzepte.....	409
11.1	Einführung	409
11.2	Formen der Ausbildung	410
11.3	Modernes Ausbildungskonzept CMTrain	412
11.4	Ausblick auf künftige Ausbildung.....	415
	Stichwortverzeichnis.....	417