

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers.....	V
Inhaltsverzeichnis .....	VII
Autorenverzeichnis .....	XV
<b>1 Einführung.....</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Messaufgaben.....</b>	<b>25</b>
2.1 Ziel der Messung.....	25
2.2 Spezifikation geometrischer Eigenschaften .....	25
2.2.1 Darstellung der Nenngeometrie.....	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	Orstoleranzen .....	38
2.2.7.3	Lauftoleranzen .....	39
2.2.7.4	Vollständige Produktspezifikation .....	39
<b>2.3</b>	<b>Konformitätsnachweis</b> .....	<b>40</b>
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
<b>2.4</b>	<b>Filterung</b> .....	<b>45</b>
<b>2.5</b>	<b>Assoziation</b> .....	<b>46</b>
<b>2.6</b>	<b>System der Geometrischen Produktspezifikation und -prüfung</b> .....	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>Grundprinzip und Gerätetechniken</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>Konventionelles Messen</b> .....	<b>53</b>
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
<b>3.2</b>	<b>Prinzip der Koordinatenmesstechnik</b> .....	<b>57</b>
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
<b>3.3</b>	<b>Gerätetechnik</b> .....	<b>70</b>
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
<b>3.4</b>	<b>Erweiterungen .....</b>	<b>81</b>
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
<b>3.5</b>	<b>Messung nach Substitutionsmethode.....</b>	<b>86</b>
<b>3.6</b>	<b>Messung von Formabweichungen .....</b>	<b>87</b>
<b>4</b>	<b>Sensoren für Koordinatenmesstechnik.....</b>	<b>93</b>
<b>4.1</b>	<b>Taktile Antastung .....</b>	<b>93</b>
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 Antastssysteme.....	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 Tastsysteme und Zusatzeinrichtungen .....	118
<b>4.2</b>	<b>Visuelle Sensoren .....</b>	<b>119</b>
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
<b>4.3</b>	<b>Berührungslose Abstandssensoren.....</b>	<b>133</b>
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
<b>4.4</b>	<b>Rastersondenverfahren .....</b>	<b>147</b>
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
<b>5</b>	<b>Grundlagen weiterentwickelter Gerätetechnik.....</b>	<b>155</b>
<b>5.1</b>	<b>Lasertracker .....</b>	<b>155</b>
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
<b>5.2</b>	<b>Koordinatenmessgeräte mit Gelenkarmen.....</b>	<b>167</b>
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
<b>5.3</b>	<b>3D Nanomess- und Nanopositioniergeräte .....</b>	<b>176</b>
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
<b>5.4</b>	<b>Röntgentomographie .....</b>	<b>200</b>
5.4.1	Röntgenstrahlerzeugung .....	202
5.4.2	Bildaufnahme .....	204
5.4.3	Mechanik und Strahlenschutz .....	205
5.4.4	Volumen- und Messpunktberechnung .....	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
<b>5.5</b>	<b>Optische Messsysteme .....</b>	<b>216</b>
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
<b>5.6</b>	<b>Messen mit mehreren Sensoren .....</b>	<b>228</b>
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	<b>Indoor-GPS (Global Positioning System)</b> .....	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	<b>Maschinenintegrierte Messtechnik</b> .....	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	<b>Von der technischen Zeichnung über den Prüfplan hin zum Messablaufplan</b> .....	253
6.1	<b>Einführung in die Prüfplanung</b> .....	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	<b>Abarbeiten der Prüfmerkmale in der Koordinatenmesstechnik</b> .....	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	<b>Softwareunterstützung bei der Prüfplanung für die Koordinatenmesstechnik</b> .....	285

<b>7</b>	<b>Vom Messablaufplan über die Programmierung, Durchführung und Auswertung bis zur Ergebnisdarstellung</b> .....	287
7.1	<b>Programmierung</b> .....	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	<b>Messung und Auswertung der Koordinaten (Punkte)</b> .....	303
7.2.1	Messung: Messprogrammausführung .....	303
7.2.2	Auswertung: Ableitung von Informationen aus den Messpunkten .....	304
7.3	<b>Ergebnisdarstellung und -übertragung</b> .....	314
7.3.1	Messprotokollgestaltung, Messprotokollarten .....	315
7.3.2	Rechnergestützte Übertragung von Messergebnissen .....	316
<b>8</b>	<b>Spezielle Messaufgaben</b> .....	323
8.1	<b>Spektrum der Messaufgaben mit komplexer Geometrie</b> .....	324
8.1.1	Messobjekte mit analytischer Geometriebeschreibung (funktionsbedingt gegeben) .....	324
8.1.2	Messobjekte mit numerisch-approximativer Geometriebeschreibung .....	327
8.2	<b>Definition der Messaufgabe</b> .....	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	<b>Definition der Messstrategie</b> .....	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	<b>Ausrichten</b> .....	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	<b>Messdatenauswertung</b> .....	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
<b>8.6</b>	<b>Funktionsorientierte Prüfungen.....</b>	<b>354</b>
8.6.1	Prinzip der numerischen Funktionsprüfung in der Koordinatenmesstechnik.....	354
8.6.2	Beispiel Tragbildprüfung bei Zylinderrädern .....	355
<b>9</b>	<b>Messunsicherheit und Rückverfolgbarkeit von Messwerten.....</b>	<b>359</b>
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
<b>10</b>	<b>Wirtschaftlichkeit .....</b>	<b>387</b>
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
<b>11</b>	<b>Schulungskonzepte.....</b>	<b>409</b>
11.1	Einführung .....	409
11.2	Formen der Ausbildung .....	410
11.3	Modernes Ausbildungskonzept CMTrain .....	412
11.4	Ausblick auf künftige Ausbildung.....	415
	<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>417</b>