

Präzisionsmesstechnik in der Fertigung mit Koordinatenmessgeräten

Entwicklung – Normung – Grundlagen – Messunsicherheit –
Anwendungserfahrungen – Auswahlkriterien – Ausbildung

Dipl.-Ing. (FH) Hans Joachim Neumann

Dipl.-Ing. (FH) Matthias Andräs
Dr.-Ing. habil. Ralf Christoph
Dipl.-Ing. Detlef Ferger
Dipl.-Ing. (FH) Theo Hageney
Dr.-Ing. Frank Härtig
Dr.-Ing. Michael Hernla
Dr.-Ing. Dietrich Imkamp
Dipl.-Ing. (FH) Georg König

Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Lotze
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Lunze
Dr.-Ing. Wolfgang Rauh
Dr.-Ing. Robert Roithmeier
Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Schwarz
Dr.-Ing. Heinrich Schwenke
Dr.-Ing. Franz Wäldele
Dr. Hartwig Weber

2., überarbeitete Auflage

Mit 321 Bildern und 45 Tabellen



Kontakt & Studium
Band 646

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Wilfried J. Bartz
Dipl.-Ing. Elmar Wippler

expert  verlag®

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | Die Koordinatenmesstechnik im Spannungsfeld der industriellen Messtechnik | |
| 1.1 | 3D-Koordinatenmesstechnik - ein Rückblick auf ihre Entwicklung..... | 13 |
| 1.1.1 | Einleitung | 13 |
| 1.1.2 | Entwicklungsstadien und Meilensteine | 14 |
| 1.1.2.1 | Koordinatenmessgeräte | 14 |
| 1.1.2.2 | Sensorik | 22 |
| 1.1.2.3 | Längenmesssysteme | 25 |
| 1.1.2.4 | Datenverarbeitung | 26 |
| 1.1.2.5 | Software | 28 |
| 1.1.2.6 | Meilensteine in der Gerätetechnik | 30 |
| 1.1.3 | Probleme bei der Einführung der Koordinatenmesstechnik | 31 |
| 1.1.4 | Schlussbemerkungen | 32 |
| 1.1.5 | Literatur | 32 |
| 1.2 | Die Koordinatenmesstechnik in Normen und Regelwerken..... | 35 |
| 1.2.1 | Einleitung | 35 |
| 1.2.2 | Normungsarbeit, national und international | 35 |
| 1.2.3 | Grundnormen | 36 |
| 1.2.4 | Grundsätzliches zu den Normen und Richtlinien | 37 |
| 1.2.4.1 | Normen und Richtlinien zur „Genauigkeit“ von KMG | 39 |
| 1.2.4.2 | Normen und Richtlinien zur Messunsicherheit | 39 |
| 1.2.4.3 | Prinzipien und Struktur der ISO 10360 und VDI/VDE 2617 | 40 |
| 1.2.5 | Die Normen und Richtlinien im Einzelnen..... | 41 |
| 1.2.5.1 | DIN EN ISO 10360-1: Begriffe, VDI/VDE 2617-1: Grundlagen | 42 |
| 1.2.5.2 | DIN EN ISO 10360-2: KMG eingesetzt zur Messung von Längenmaßen | 43 |
| 1.2.5.3 | VDI/VDE 2617-2.1: Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-2 | 46 |
| 1.2.5.4 | DIN EN ISO 10360-3: KMG mit der Achse eines Drehtisches als 4. Achse | 46 |
| 1.2.5.5 | VDI/VDE 2617-4: Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-3 | 48 |
| 1.2.5.6 | DIN EN ISO 10360-4: Im Scanningmodus angewendete KMG..... | 49 |
| 1.2.5.7 | DIN EN ISO 10360-5: Mit Mehrfachrastern angewendete KMG..... | 50 |
| 1.2.5.8 | DIN EN ISO 10360-6: Fehlerabschätzung beim Berechnen Gaußscher zugeordneter Geometrieelemente | 51 |
| 1.2.5.9 | VDI/VDE 2617-2.2: Formmessung | 53 |
| 1.2.5.10 | VDI/VDE 2617-2.3: Annahme- und Bestätigungsprüfung von Koordinatenmessgeräten großer Bauart..... | 54 |
| 1.2.5.11 | VDI/VDE 2617-3: Komponenten der Messabweichung des Geräts | 57 |
| 1.2.5.12 | VDI/VDE 2617-5: Überwachung durch Prüfkörper | 57 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1.2.5.13 | VDI/VDE 2617-5.1: Überwachung mit Kugelplatten | 58 |
| 1.2.5.14 | VDI/VDE 2617-6: KMG mit optischer Antastung, Grundlagen..... | 60 |
| 1.2.5.15 | VDI/VDE 2617-6.1: Sensoren zur 2D-Messung | 62 |
| 1.2.5.16 | VDI/VDE 2617-6.2: Optische 1D-Sensoren | 62 |
| 1.2.6 | Richtlinien zur Unsicherheit von Messungen auf KMG..... | 63 |
| 1.2.7 | Vorgesehene Änderungen in den Regelwerken | 64 |
| 1.2.8 | Ausblick..... | 65 |
| 1.2.9 | Literatur | 66 |
| 1.2.10 | Anhang: Normen und Richtlinien | 67 |
| 1.2.10.1 | DIN EN ISO-Normen..... | 67 |
| 1.2.10.2 | VDI/VDE 2617-Richtlinien..... | 67 |
| 2 | Grundlagen der Koordinatenmesstechnik | |
| 2.1 | Taktile Sensorik an Koordinatenmessgeräten | 69 |
| 2.1.1 | Einleitung | 69 |
| 2.1.2 | Aufbau und Prinzip taktiler Sensoren | 69 |
| 2.1.2.1 | Taktile Sensoren - schaltend | 70 |
| 2.1.2.2 | Taktile Sensoren - messend | 73 |
| 2.1.3 | Die Taster | 77 |
| 2.1.3.1 | Tasterformelemente..... | 78 |
| 2.1.3.2 | Einmessen der Taster | 78 |
| 2.1.3.3 | Tasterschäfte | 80 |
| 2.1.3.4 | Durchbiegung der Taster | 81 |
| 2.1.3.5 | Prüfung der Tastereinmessung | 82 |
| 2.1.3.6 | Einfluss des Einmessens bei Kugelstäben oder Kugelplatten..... | 83 |
| 2.1.3.7 | Vektorielle Messabweichungen | 84 |
| 2.1.4 | Tasterwechseinrichtungen | 86 |
| 2.1.5 | Dreh-Schwenk-Gelenke..... | 87 |
| 2.1.6 | Literatur | 89 |
| 2.2 | Optische Sensorik an Koordinatenmessgeräten..... | 91 |
| 2.2.1 | Einleitung | 91 |
| 2.2.2 | Visuelle Sensoren | 92 |
| 2.2.2.1 | Die Beleuchtung als Voraussetzung für sicheres Messen | 92 |
| 2.2.2.2 | Abbildungsoptik und flexible Wahl der Vergrößerung..... | 96 |
| 2.2.2.3 | Tastauge zur punktförmigen Informationsgewinnung | 98 |
| 2.2.2.4 | Flachbettscanner zur zeilenförmigen Informationsgewinnung | 98 |
| 2.2.2.5 | Bildverarbeitungssensor zur flächenförmigen Informationsgewinnung in der Ebene | 99 |
| 2.2.3 | Abstandssensoren | 102 |
| 2.2.3.1 | 1D-Autofokus | 102 |
| 2.2.3.2 | 1D-Laserabstandssensoren..... | 104 |
| 2.2.3.3 | 2D-Laserscanner | 105 |
| 2.2.3.4 | 3D-Streifenprojektion | 106 |
| 2.2.3.5 | 3D-Fotogrammetrie..... | 106 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 2.2.3.6 | Werth-3D-Patch | 107 |
| 2.2.3.7 | 3D-Interferometrie | 107 |
| 2.2.4 | Taktil optischer Sensor | 108 |
| 2.2.5 | Literatur | 110 |
| 2.3 | Vielpunktmessung oder Einzelpunktmessung? | 111 |
| 2.3.1 | Einleitung | 111 |
| 2.3.2 | Anzahl der Antastpunkte als Kriterium | 111 |
| 2.3.3 | Gerätetechnische Voraussetzungen | 112 |
| 2.3.4 | Erfassung der wahren Gestalt der Formelemente | 114 |
| 2.3.5 | Messung von Maß und Lage | 116 |
| 2.3.5.1 | Beispiel für den Einfluss der Messpunktanzahl auf die Art der Ausgleichsrechnung für das Ersatzelement | 119 |
| 2.3.5.2 | Beispiel für den Einfluss der Punktanzahl auf die Messzeit | 120 |
| 2.3.6 | Messaufgabenvielfalt erfordert einfache Bedienung | 121 |
| 2.3.7 | Ausblick | 123 |
| 2.3.8 | Literatur | 124 |
| 2.4 | Koordinatenmesstechnik und CAx-Anwendungen zur Qualitätsprüfung | 125 |
| 2.4.1 | Einleitung | 125 |
| 2.4.2 | Die Qualitätsprüfung im industriellen Produktionsprozess | 126 |
| 2.4.3 | Koordinatenmesstechnik zur Qualitätsprüfung im industriellen Produktionsprozess | 130 |
| 2.4.4 | Rechnergestützte Eingangsinformationen und Messabläuferzeugung | 132 |
| 2.4.4.1 | CAD-Modelle für die Koordinatenmesstechnik | 134 |
| 2.4.4.2 | Messablaufübertragung | 145 |
| 2.4.5 | Messung | 148 |
| 2.4.5.1 | Simulation und Kollisionskontrolle | 149 |
| 2.4.5.2 | Kommunikation mit der Gerätesteuerung | 151 |
| 2.4.6 | Auswertung und rechnergestützte Ausgangsinformationen | 152 |
| 2.4.6.1 | Schnittstellen zur Übertragung von Messergebnissen | 153 |
| 2.4.6.2 | Strukturen für die rechnergestützte Auswertung der Messergebnisse | 157 |
| 2.4.7 | Literatur | 159 |
| 2.5 | Formmessung - ein wichtiges Einsatzgebiet der Koordinatenmesstechnik | 163 |
| 2.5.1 | Einleitung | 163 |
| 2.5.2 | Stand der internationalen Normung | 164 |
| 2.5.3 | Prinzipielle Unterschiede zwischen klassischen Formprüfgeräten und Koordinatenmessgeräten | 164 |
| 2.5.3.1 | Vorteile der Formmessung mit Koordinatenmessgeräten | 165 |
| 2.5.4 | VDI/VDE Richtlinie 2617 Blatt 2.2 | 167 |
| 2.5.4.1 | Wahl und Bedeutung der Größe des Tastkugeldurchmessers bei Koordinatenmessgeräten | 167 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 2.5.4.3 | Anzahl der Antastpunkte und Filterung | 171 |
| 2.5.4.4 | Beispiel für den Einfluss der Anzahl der Messpunkte | 172 |
| 2.5.5 | Erreichbare Messunsicherheit | 173 |
| 2.5.6 | Einsatzbeispiel von Koordinatenmessgeräten zur Formmessung | 174 |
| 2.5.7 | Annahmeprüfung und Überwachung | 176 |
| 2.5.7.1 | Verwendung kalibrierter Formnormale | 176 |
| 2.5.7.2 | Mehrwellennormale | 178 |
| 2.5.8 | Ausblick | 181 |
| 2.5.9 | Literatur | 181 |
| 2.6 | Besonderheiten bei optischen und Multisensor-Koordinatenmessgeräten | 183 |
| 2.6.1 | Einleitung | 183 |
| 2.6.2 | Anforderungen an Multisensor-Koordinatenmessgeräte | 185 |
| 2.6.3 | Aufbau von Multisensor-Koordinatenmessgeräten | 186 |
| 2.6.3.1 | Messprojektoren und Messmikroskope | 187 |
| 2.6.3.2 | Multisensor-Koordinatenmessgeräte mit Kreuztisch | 189 |
| 2.6.3.3 | Multisensor-Koordinatenmessgeräte mit Portal | 190 |
| 2.6.3.4 | 2D-Geräte | 195 |
| 2.6.3.5 | Sonderbauformen | 196 |
| 2.6.4 | Software für Multisensor-Koordinatenmessgeräte | 197 |
| 2.6.4.1 | Software für das fertigungsnahe Messen | 198 |
| 2.6.4.2 | Software für Messen mit CAD-Daten | 201 |
| 2.6.5 | Anwendungsschwerpunkte für Multisensor-Koordinatenmessgeräte | 203 |
| 2.6.5.1 | Kunststoffformteile | 203 |
| 2.6.5.2 | Kunststoffspritzwerkzeuge | 205 |
| 2.6.5.3 | Blechteile | 206 |
| 2.6.5.4 | Stanzwerkzeuge | 207 |
| 2.6.5.5 | Aluminium- und Kunststoffprofile | 208 |
| 2.6.5.6 | Spanabhebende Werkzeuge | 209 |
| 2.6.5.7 | Wellen | 212 |
| 2.6.6 | Literatur | 214 |
| 3 | Aspekte der Messunsicherheit | |
| 3.1 | Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessungen | 215 |
| 3.1.1 | Einführung | 215 |
| 3.1.2 | Bedeutung der Messunsicherheit | 215 |
| 3.1.3 | Aufgabenspezifische Messunsicherheit | 216 |
| 3.1.4 | Grundlagen der Messunsicherheit | 217 |
| 3.1.5 | Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit | 217 |
| 3.1.5.1 | Unsicherheitsbudget | 218 |
| 3.1.5.2 | Experimentelle Methode mit kalibrierten Werkstücken | 218 |
| 3.1.5.3 | Simulationsmethode | 220 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.1.5.4 | Hybridmethoden..... | 223 |
| 3.1.6 | Anwendung der Methoden auf Koordinatenmessgeräte | 223 |
| 3.1.6.1 | Schwierigkeiten aus der Sicht der Koordinatenmesstechnik | 223 |
| 3.1.6.2 | Unsicherheitsbudget für Koordinatenmessungen | 224 |
| 3.1.6.3 | Experimentelle Methode für Koordinatenmessungen | 227 |
| 3.1.6.3.1 | Die ISO/TS 15530-3 (DIN 32881-3)..... | 231 |
| 3.1.6.4 | Simulationsmethode für Koordinatenmessungen | 232 |
| 3.1.6.4.1 | Modell des Messprozesses..... | 233 |
| 3.1.6.4.2 | Simulation des Messprozesses | 234 |
| 3.1.6.4.3 | Die Richtlinie VDI/VDE 2617-7 | 236 |
| 3.1.5 | Rückführung von Koordinatenmessungen in die Produktion..... | 237 |
| 3.1.6 | Ausblick..... | 238 |
| 3.1.7 | Literatur | 239 |
| 3.2 | Beispiele zur Abschätzung der Messunsicherheit anhand der spezifizierten Längenmessabweichung | 241 |
| 3.2.1 | Einführung..... | 241 |
| 3.2.2 | Geometrieabweichungen von Koordinatenmessgeräten | 242 |
| 3.2.2.1 | Überblick | 242 |
| 3.2.2.2 | Längenmessabweichung | 242 |
| 3.2.2.3 | Rechtwinkligkeit | 244 |
| 3.2.2.4 | Geradheit | 245 |
| 3.2.2.5 | Weitere Prüfmerkmale | 246 |
| 3.2.2.6 | Beispiel..... | 248 |
| 3.2.3 | Andere Einflussgrößen | 249 |
| 3.2.3.1 | Werkstück | 249 |
| 3.2.3.1.1 | Ausgleichsrechnung..... | 249 |
| 3.2.3.1.2 | Ausgleichskreis | 250 |
| 3.2.3.1.3 | Ausgleichszylinder | 251 |
| 3.2.3.1.4 | Ausgleichsebene..... | 252 |
| 3.2.3.2 | Taster | 253 |
| 3.2.3.3 | Temperatur | 254 |
| 3.2.4 | Beispiele | 255 |
| 3.2.4.1 | Überblick | 255 |
| 3.2.4.2 | Bohrungsdurchmesser | 256 |
| 3.2.4.2.1 | Mathematisches Modell | 256 |
| 3.2.4.2.2 | Messunsicherheitsbudget..... | 257 |
| 3.2.4.2.3 | Diskussion..... | 258 |
| 3.2.4.3 | Abstand der Bohrungsachsen..... | 258 |
| 3.2.4.3.1 | Mathematisches Modell | 258 |
| 3.2.4.3.2 | Messunsicherheitsbudget | 259 |
| 3.2.4.3.3 | Diskussion..... | 260 |
| 3.2.4.4 | Rechtwinkligkeit der Bohrungsachse zur Auflagefläche | 261 |
| 3.2.4.4.1 | Mathematisches Modell | 261 |
| 3.2.4.4.2 | Messunsicherheitsbudget | 262 |
| 3.2.4.4.3 | Diskussion..... | 262 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.2.5 | Zusammenfassung | 263 |
| 3.2.6 | Literatur | 264 |
| 3.3 | Prüfprozesseignung - Welche Methode ist die richtige? | 267 |
| 3.3.1 | Einleitung | 267 |
| 3.3.2 | Die Bedeutung der Messunsicherheit für Prüfentscheidungen | 268 |
| 3.2.2.1 | Beispiele aus der Rechtsprechung | 268 |
| 3.3.3 | Einfluss der Messunsicherheit auf Prüfentscheidungen | 269 |
| 3.3.4 | Die Entscheidungsregeln | 272 |
| 3.3.5 | Die Kenngröße für die Prüfprozesseignung..... | 273 |
| 3.3.6 | Die Richtlinie VDA 5..... | 273 |
| 3.4 | Die Messunsicherheit im Fertigungsprozess | 275 |
| 3.4.1 | Einleitung | 275 |
| 3.4.2 | Messunsicherheit berücksichtigen | 275 |
| 3.4.3 | Toleranzdefinition im Verhältnis Abnehmer - Zulieferer..... | 278 |
| 3.4.4 | Der tatsächlich nutzbare Toleranzbereich in der Fertigung | 280 |
| 3.4.5 | Ausblick..... | 282 |
| 3.4.6 | Literatur | 282 |
| 3.5 | Lineare thermische Einflüsse - Ein Leitfaden für den praktischen Einsatz | 283 |
| 3.5.1 | Einleitung | 283 |
| 3.5.2 | Statische und dynamische Temperatureinflüsse können minimiert werden..... | 283 |
| 3.5.2.1 | Umgebungstemperatur | 284 |
| 3.5.2.2 | Generelle Regeln für das Messen | 284 |
| 3.5.3 | Systematische, thermisch bedingte Längenabweichung..... | 285 |
| 3.5.3.1 | Wann muss der Temperatureinfluss korrigiert werden? | 286 |
| 3.5.4 | Stand der internationalen Normung | 286 |
| 3.5.5 | Unsicherheit der thermischen Längenkorrektur | 288 |
| 3.5.5.1 | Die Grenzabweichungen der Ausdehnungskoeffizienten | 289 |
| 3.5.5.2 | Die Grenzabweichungen der Temperatur..... | 291 |
| 3.5.5.3 | Einteilung der Messbedingungen in Klassen..... | 292 |
| 3.5.5.4 | Berechnung der Unsicherheit der thermischen Längenkorrektur .. | 293 |
| 3.5.5.5 | Beispiele für die Unsicherheit mit korrigierter Längenabweichung..... | 294 |
| 3.5.6 | Thermische Längenkorrektur bei temperaturstabilen KMG | 296 |
| 3.5.7 | Grenzen der linearen thermischen Längenkorrektur | 297 |
| 3.5.8 | Unsicherheit ohne thermische Längenkorrektur | 298 |
| 3.5.8.1 | Beispiele für die Unsicherheit ohne Längenkorrektur | 299 |
| 3.5.9 | Genauere Messergebnisse..... | 301 |
| 3.5.10 | Einbeziehung der thermisch verursachten Unsicherheit in die Gesamtunsicherheit einer Längenmessung..... | 302 |
| 3.5.11 | Schlussfolgerungen | 304 |
| 3.5.12 | Literatur | 304 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.6 | Prüfung und Kalibrierung von großen Koordinatenmessgeräten | 305 |
| 3.6.1 | Einleitung | 305 |
| 3.6.2 | Anwendungsbeispiele großer KMG | 306 |
| 3.6.2.1 | Automobilbau | 306 |
| 3.6.2.2 | Luft und Raumfahrttechnik | 307 |
| 3.6.3 | Technische Besonderheiten großer KMG | 308 |
| 3.6.4 | Annahme- und Bestätigungsprüfungen | 309 |
| 3.6.4.1 | Grundkonzept | 309 |
| 3.6.4.2 | Zulässige Prüfkörper | 309 |
| 3.6.4.3 | Prüfung von Mehrarm-Messgeräten | 311 |
| 3.6.4.4 | Prüfung der Antastabweichungen | 311 |
| 3.6.4.5 | Prüfung von Dreh-Schwenksystemen | 312 |
| 3.6.4.6 | Prüfung optischer Sensoren | 312 |
| 3.6.5 | Bestimmung von Geometrieabweichungen | 312 |
| 3.6.5.1 | Konventionelle Verfahren | 312 |
| 3.6.5.2 | Verwendung von Kugel- oder Lochplatten | 313 |
| 3.6.6 | Einsatz von Lasertrackern | 313 |
| 3.6.7 | Zusammenfassung und Ausblick | 317 |
| 3.6.8 | Literatur | 317 |

4 Anwendungen und Erfahrungen

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.1 | Erfahrungswerte beim Einsatz von Koordinatenmessmaschinen in der Fertigung | 319 |
| 4.1.1 | Einleitung | 319 |
| 4.1.2 | Haupteinflüsse auf Messergebnisse im Fertigungsbereich | 320 |
| 4.1.3 | Technologien und Mechanikkonzepte für Produktionsmesszentren | 322 |
| 4.1.4 | Temperaturbezogene Genauigkeitsspezifikation | 328 |
| 4.1.5 | Messverfahren und Auswertemethoden | 329 |
| 4.1.6 | Taster- und Taststiftkombinationen | 330 |
| 4.1.6.1 | Temperaturstabile Tasterelemente | 331 |
| 4.1.6.2 | Tasterkonfigurationen | 333 |
| 4.1.6.3 | Tasterabnutzung und Tastkugelauftrag | 334 |
| 4.1.7 | Werkstückaufspannung und Beschickungssysteme | 337 |
| 4.1.7.1 | Werkstückaufspannung | 337 |
| 4.1.7.2 | Beschickungssysteme | 338 |
| 4.1.8 | Sicherheitskonzepte | 340 |
| 4.1.9 | Werkstückverhalten bei Temperaturschwankungen | 342 |
| 4.1.10 | Bedienkonzepte | 345 |
| 4.1.10.1 | Eingabe- und Integrationskonzepte | 346 |
| 4.1.10.2 | Programmstart | 347 |
| 4.1.10.3 | Ausgabe | 348 |
| 4.1.11 | Servicekonzepte | 350 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.1.11.1 | Teleservice | 351 |
| 4.1.11.2 | Onboard Diagnose | 352 |
| 4.1.12 | Wirtschaftlichkeit durch Fertigungsmesstechnik | 353 |
| 4.1.13 | Literatur | 355 |

4.2 Erfahrungen bei der Überwachung von Koordinatenmessgeräten

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.2.1 | Einleitung | 357 |
| 4.2.2 | Der Begriff "Überwachung" | 357 |
| 4.2.2.1 | Annahme-, Bestätigungsprüfung, Kalibrierung, Überwachung | 357 |
| 4.2.2.2 | Umfang der Überwachung | 358 |
| 4.2.2.3 | Zeitintervalle der Überwachung | 359 |
| 4.2.2.4 | Verantwortung für die Überwachung | 360 |
| 4.2.2.5 | Messgrößen und Grenzwerte nach DIN EN ISO 10360 | 361 |
| 4.2.2.6 | Messgrößen und Grenzwerte nach VDI/VDE 2617 | 361 |
| 4.2.3 | KMG-Überwachung mit einem universellen Prüfkörper | 362 |
| 4.2.3.1 | Normale des Prüfkörpers | 362 |
| 4.2.3.2 | Antastabweichung an der Kugel | 363 |
| 4.2.3.3 | Antastabweichung am Ring und Verstärkungsnormal | 364 |
| 4.2.3.4 | Mehrfachtasterabweichungen an der Kugel | 366 |
| 4.2.3.5 | Längenmessabweichung an zwei Endmaßen | 366 |
| 4.2.3.6 | Vierachsenabweichungen mit zwei umlaufenden Kugeln | 367 |
| 4.2.3.7 | Einmessen der Drehtischachse | 368 |
| 4.2.3.8 | Messprotokoll | 372 |
| 4.2.4 | Überwachung der KMG Geometrie mit einer Kugelplatte | 372 |
| 4.2.4.1 | Der Überwachungsfaktor \bar{u} | 373 |
| 4.2.5 | Grenzen der Genauigkeit bei der Überwachung | 373 |
| 4.2.5.1 | Grenzen durch Temperatureinflüsse | 373 |
| 4.2.5.2 | Nachweis einer Rechtwinkligkeitsabweichung | 376 |
| 4.2.5.3 | Nachweis einer rotatorischen Führungsabweichung | 376 |
| 4.2.6 | Überwachung von großen KMG | 377 |
| 4.2.7 | Ursachen und Auswirkungen von Messabweichungen | 377 |
| 4.2.8 | Literatur | 379 |

4.3 Qualitätssicherung im Motorenbau mit Koordinatenmessgeräten

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.3.1 | Einleitung | 381 |
| 4.3.2 | Aufgaben und Ziele der QMP/M-Messtechnik | 381 |
| 4.3.3 | Anforderung aus der Produktion für den kleinen Regelkreis | 382 |
| 4.3.4 | Bedienerführung | 383 |
| 4.3.5 | Prozesslenkung mit Koordinatenmessgeräten | 384 |
| 4.3.5.1 | Kleiner Regelkreis | 384 |
| 4.3.5.2 | Großer Regelkreis | 385 |
| 4.3.5.3 | Übersicht über die Regelkreise und Messdatenablage | 385 |
| 4.3.6 | Ausgabe der Messwerte am Koordinatenmessgerät | 387 |
| 4.3.6.1 | Balkendiagramm | 387 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 4.3.6.2 | Werteverlauf..... | 387 |
| 4.3.7 | Messprotokollbeispiele..... | 388 |
| 4.3.7.1 | Standardmessprotokoll..... | 388 |
| 4.3.7.2 | Formmessprotokoll..... | 390 |
| 4.3.7.3 | Grafisches Messprotokoll..... | 393 |
| 4.3.7.4 | Schussbild..... | 393 |
| 4.3.7.5 | Statistische Auswertung..... | 394 |
| 4.3.8 | Messgeräteabnahme..... | 395 |
| 4.3.8.1 | Geometrische Abnahme..... | 395 |
| 4.3.8.2 | Bauteilabnahme..... | 396 |
| 4.3.9 | Prüfmittelüberwachung..... | 397 |
| 4.3.10 | Stabilitätsüberwachung..... | 398 |
| 4.3.10.1 | Kalibrierung der Meisterteile..... | 398 |
| 4.3.10.2 | Überwachung mit Meisterteilen..... | 399 |
| 4.3.10.3 | Überwachung der Tastereinmessung..... | 401 |
| 4.3.11 | Ausblick..... | 403 |
| 4.4. | Koordinatenmessgeräte für das Messen von Mikroteilen..... | 405 |
| 4.4.1 | Einleitung..... | 405 |
| 4.4.2 | Koordinatenmessgerät für Mikroteile..... | 406 |
| 4.4.3 | Sensorik für Mikrogeometrien..... | 407 |
| 4.4.3.1 | Bildverarbeitung..... | 408 |
| 4.4.3.2 | Lasersensor..... | 409 |
| 4.4.3.3 | Fasertaster..... | 410 |
| 4.4.4 | Messunsicherheit..... | 412 |
| 4.4.5 | Einsatzbeispiele..... | 415 |
| 4.4.5.1 | Diesel-Einspritzdüsen..... | 415 |
| 4.4.5.2 | Uhrenplatinen..... | 416 |
| 4.4.5.3 | Mikrozahnräder..... | 417 |
| 4.4.5.4 | Mikro-Kunststoffteile..... | 418 |
| 4.4.6 | Ausblick..... | 418 |
| 4.4.7 | Literatur..... | 419 |
| 4.5 | Zahnradmessungen mit Koordinatenmessgeräten..... | 421 |
| 4.5.1 | Einleitung..... | 421 |
| 4.5.2 | Grundlagen..... | 422 |
| 4.5.2.1 | Zahnradtypen, Geometrie, Bezugsflächen..... | 422 |
| 4.5.2.2 | Bestimmungsgrößen..... | 424 |
| 4.5.2.3 | Bezugsprofil und Wälzweg..... | 425 |
| 4.5.3 | Aufbau eines KMG für Zahnradmessungen..... | 426 |
| 4.5.4 | Auswertungen..... | 426 |
| 4.5.4.1 | Zahnflankenabweichungen für Profil und Flankenlinie..... | 427 |
| 4.5.4.2 | Teilungsabweichungen..... | 430 |
| 4.5.4.3 | Flächenhafte Auswertung von Zahnflanken..... | 431 |
| 4.5.5 | Qualitätssicherung und Rückführung von Messergebnissen..... | 433 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.5.5.1 | Ermittlung der Messunsicherheit..... | 435 |
| 4.4.5.2 | Zertifizierung der Verzahnungssoftware..... | 437 |
| 4.5.5.3 | Datenaustausch durch eine einheitliche Datenschnittstelle..... | 438 |
| 4.5.6 | Zusammenfassung..... | 440 |
| 4.5.7 | Literatur..... | 441 |
| 4.6 | Ersatz von Mehrstellenmeseinrichtungen und Lehren durch Multisensor-Koordinatenmesstechnik..... | 443 |
| 4.6.1 | Einleitung..... | 443 |
| 4.6.2 | Körperliche Lehren..... | 443 |
| 4.6.3 | Mehrstellenmeseinrichtungen..... | 446 |
| 4.6.4 | Gerätetechnik..... | 448 |
| 4.6.5 | Messen mit Multisensor-Koordinatenmessgeräten..... | 450 |
| 4.6.6 | Lehren mit einem Multisensor-Koordinatenmessgerät..... | 452 |
| 4.6.7 | Fertigungsintegriertes Messen von Möbelbeschlägen..... | 454 |
| 4.6.8 | Lehren von Kupplungsteilen..... | 456 |
| 4.6.9 | Gegenüberstellung der Systeme..... | 457 |
| 5 | Allgemeine Aspekte der Koordinatenmesstechnik | |
| 5.1 | Auswahlkriterien für Koordinatenmessgeräte..... | 459 |
| 5.1.1 | Einleitung..... | 459 |
| 5.1.2 | Anforderungen aus dem geplanten Einsatz..... | 459 |
| 5.1.2.1 | Messobjekte..... | 459 |
| 5.1.2.2 | Toleranzen und Messunsicherheit..... | 461 |
| 5.1.2.3 | Aufstellort..... | 462 |
| 5.1.2.4 | Umgebungsbedingungen..... | 462 |
| 5.1.3 | Gerätetechnik..... | 463 |
| 5.1.3.1 | Bauart und Messbereich..... | 463 |
| 5.1.3.2 | Sensorik und Steuerung..... | 464 |
| 5.1.3.2.1 | Taktile Sensoren, schaltend..... | 465 |
| 5.1.3.2.2 | Taktile Sensoren, messend..... | 465 |
| 5.1.3.2.3 | Tasterwechsel- und Dreh-Schwenk-Einrichtungen..... | 466 |
| 5.1.3.2.4 | Berührungslose Sensoren..... | 467 |
| 5.1.3.2.5 | Multisensorik..... | 468 |
| 5.1.3.3 | Ausrüstung und Zubehör..... | 469 |
| 5.1.3.3.1 | Drehachsen..... | 469 |
| 5.1.3.3.2 | Zuführeinrichtungen..... | 469 |
| 5.1.4 | Software..... | 469 |
| 5.1.5 | Schulung und Service..... | 470 |
| 5.1.5.1 | Handbücher..... | 470 |
| 5.1.5.2 | Schulung..... | 470 |
| 5.1.5.3 | Service..... | 471 |
| 5.1.6 | Literatur..... | 471 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.2 | Herstellerneutrale Ausbildung in der Koordinatenmesstechnik | 473 |
| 5.2.1 | Einleitung | 473 |
| 5.2.2 | Momentane Aus-, Weiter- und Fortbildung in der Koordinatenmesstechnik..... | 476 |
| 5.2.2.1 | Duale Ausbildung in den industriellen Metallberufen | 476 |
| 5.2.2.2 | Techniker Maschinentechnik und Industriemeister Metall | 476 |
| 5.2.2.3 | DDR-Facharbeiter für Qualitätskontrolle | 476 |
| 5.2.2.4 | Hochschulstudium..... | 477 |
| 5.2.2.5 | Weiterbildung Qualitätsfachmann Längenprüftechnik bei den Berufsförderungswerken..... | 477 |
| 5.2.2.6 | Fortbildungen der Herstellerfirmen | 478 |
| 5.2.2.7 | Weitere Bildungsangebote in der KMT (Beispiele) | 479 |
| 5.2.2.8 | Multimediale Lernsoftware für Koordinatenmesstechniker | 481 |
| 5.2.2.9 | Ausbildungskonzepte KMT im Ausland | 484 |
| 5.2.2.10 | Defizite in der Koordinatenmesstechnik-Ausbildung | 486 |
| 5.2.3 | Struktur und Inhalte des AUKOM-Konzepts | 488 |
| 5.2.3.1 | Entwicklung der AUKOM-Struktur..... | 489 |
| 5.2.3.2 | AUKOM Inhalte | 491 |
| 5.2.3.3 | AUKOM eLearning-System..... | 498 |
| 5.2.4 | Dachverband AUKOM e. V. | 499 |
| 5.2.5 | Ausblick..... | 501 |
| 5.2.6 | Literatur..... | 502 |
| 5.3 | Spaß an der Messtechnik..... | 503 |
| 5.3.1 | Einleitung | 503 |
| 5.3.2 | Cartoons nach Themen gegliedert..... | 503 |
| 5.3.2.1 | Stabilität von Prüfkörpern..... | 503 |
| 5.3.2.2 | Vierte Achse..... | 504 |
| 5.3.2.3 | Prozessmesstechnik | 505 |
| 5.3.2.4 | Temperatureinfluss | 506 |
| 5.3.2.5 | Scanningabtastung | 507 |
| 5.3.2.6 | Visuelle optische Messung | 508 |
| 5.3.2.7 | Sensorik an Koordinatenmessgeräten..... | 508 |
| 5.3.2.8 | Rückführbarkeit | 509 |
| 5.3.3 | Schlaue Sprüche zum Thema Messen | 509 |
| 5.3.4 | Glossen zur Koordinatenmesstechnik | 509 |
| 5.3.5 | Literatur..... | 515 |