

1	Einführung	1
1.1	Übersicht und Struktur des Buches	1
1.2	Entwicklung der Fertigungsmesstechnik	5
1.2.1	Basiseinheit „Meter“	5
1.2.2	Messgerätetechnik	5
1.3	Fertigungsmesstechnik innerhalb des Produktlebenszyklus	7
1.3.1	Austauschbau und Arbeitsteilung	7
1.3.2	Total Quality Management (TQM)	8
1.3.3	Beherrschte Fertigung	10
	Literatur	11
2	Grundlagen der Fertigungsmesstechnik	13
2.1	Grundbegriffe, Definitionen	13
2.1.1	Entstehung von Normen	14
2.1.2	Geometrische Produktspezifikation (GPS)	16
2.1.3	Maßtoleranzen, Spezifikationen	18
2.1.4	SI Einheitensystem	18
2.2	Messtechnische Rückführung	19
2.2.1	Normale und Kalibrierkette	19
2.2.2	Normale	21
2.3	Konstruktionsprinzipien	25
	Literatur	27
3	Messunsicherheit und deren Ursachen	29
3.1	Bedeutung der Messunsicherheit, Entscheidungsregeln	30
3.2	Ursachen für Messunsicherheit	33
3.2.1	Einflussgröße Milieu (Umgebung)	34
3.2.2	Einflussgröße Messgerät	36
3.2.3	Einflussgröße Material (Werkstück)	37
3.2.4	Einflussgröße Mensch (Anwender)	38
3.2.5	Einflussgröße Messstrategie	39

3.3	Methoden zur Abschätzung der Messunsicherheit.	40
3.3.1	Grundlagen	40
3.3.2	Ermittlung der Messunsicherheit	41
3.4	Korrekte Angabe von Messergebnissen	46
3.5	Maßnahmen zur Verringerung der Messunsicherheit.	46
3.6	Abschätzung der Messunsicherheit, Vorgehensweise	47
3.7	Abschätzung der Messunsicherheit, Beispiel.	47
3.7.1	Aufgabenstellung	47
3.7.2	Ermittlung und Kompensation systematischer Abweichungen	48
3.7.3	Einfluss der Wiederholpräzision.	48
3.7.4	Temperatureinfluss	49
3.7.5	Kombinierte Standardmessunsicherheit und erweiterte Messunsicherheit	49
3.8	Messunsicherheitsabschätzung durch Messunsicherheitsbilanzen	50
3.9	Messunsicherheitsabschätzung durch Simulation	52
	Literatur.	53
4	Koordinatenmesstechnik	55
4.1	Abbekomparator, 1-D-Koordinatenmessgerät	55
4.2	Grundprinzip der 3-D-Koordinatenmesstechnik	58
4.2.1	Messprinzip.	58
4.2.2	Vorgehen beim Messen.	59
4.2.3	Bildung von Koordinatensystemen.	60
4.2.4	Messdatenerfassung, -auswertung, Zuordnungsverfahren	60
4.3	Gerätetechnik	62
4.3.1	Gerätebasis	63
4.3.2	Antrieb und Führung.	64
4.3.3	Maßverkörperung	65
4.3.4	Messkopfsystem	66
4.3.5	Steuereinheit mit Bedienpult sowie Auswerterechner (PC)	66
4.3.6	Zusatzeinrichtungen	67
4.4	Bauarten	69
4.4.1	Hand- und CNC-geführte Koordinatenmessgeräte.	70
4.4.2	Auslegerbauweise.	70
4.4.3	Portalbauweise	72
4.4.4	Ständerbauweise	73
4.4.5	Brückenbauweise	73
4.4.6	Gegenüberstellung der Bauarten.	74
4.4.7	Alternative Bauformen	74
4.5	Taktile Koordinatenmesstechnik	75
4.5.1	Messkopfsysteme	75

4.5.2	Arten der Messpunkterfassung	77
4.5.3	Messpunktaufbereitung.	78
4.6	Mikro-Koordinatenmesstechnik.	79
4.6.1	Messkopfsysteme	79
4.6.2	Besonderheiten im Aufbau	82
4.6.3	Eigenschaften und Anwendungen.	83
4.7	Optische Koordinatenmesstechnik	83
4.7.1	Messkopfsysteme	83
4.7.2	Messpunktaufbereitung.	84
4.7.3	Eigenschaften und Anwendungen.	85
4.8	Multisensor-Koordinatenmesstechnik	89
4.8.1	Messkopfsysteme	89
4.8.2	Besonderheiten im Aufbau	90
4.8.3	Eigenschaften und Anwendungen.	90
4.9	Computertomographie	91
4.9.1	Messprinzip.	91
4.9.2	Besonderheiten im Aufbau	92
4.9.3	Eigenschaften und Anwendungen.	94
4.10	Programmierung eines Koordinatenmessgeräts	96
4.10.1	Online-Programmierung	97
4.10.2	Offline-Programmierung.	97
4.11	Leistungsfähigkeit und Überwachung	100
4.11.1	Längenmessabweichung	100
4.11.2	Antastabweichung.	101
4.11.3	Normen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit	102
4.11.4	Normale zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit.	102
4.12	Schnittstellen/CAx	102
	Literatur.	105
5	Messtechnik für Form, Richtung, Ort und Lauf	107
5.1	Grundlagen	108
5.2	Spezifikation von Geometrischen Toleranzen, Form und Lage	111
5.2.1	Toleranzarten	111
5.2.2	Funktionsorientierte Zuordnungsverfahren	112
5.2.3	Defaultvorgaben	113
5.2.4	Bezüge und Bezugssysteme	114
5.2.5	Bestimmung von Merkmalen an den Geometrieelementen „Kreis/Zylinder“	115
5.2.6	Angaben zu Auswerteprozessen.	116
5.3	Gerätetechnik	117
5.3.1	Spezialisierte Messverfahren	117
5.3.2	Rundheitsmessungen mit Koordinatenmessgeräten	121

5.3.3	Rundheitsmessungen mit Formmessgeräten	121
5.3.4	Filterung der Messdaten bei Formmessungen	123
5.4	Rückführung, Überwachung, Normale, Messunsicherheit	124
	Literatur.	126
6	Oberflächen- und Konturmesstechnik	129
6.1	Grundlagen	130
6.1.1	Entstehung von Rauheit	130
6.1.2	Bezeichnung und Anteile von Oberflächenprofilen	130
6.2	Spezifikation von Rauheit	131
6.3	2-D-Rauheitsparameter	133
6.3.1	Senkrechtkenngößen, Extrema (Spitzenhöhen und Taltiefen).	133
6.3.2	Senkrechtkenngößen, Mittelwerte	134
6.3.3	Waagrechtkenngößen (Abstandskenngrößen)	135
6.3.4	Wahl der Rauheitskenngrößen	136
6.4	3-D-Rauheitsparameter	136
6.5	Gerätetechnik	138
6.5.1	Berührende Oberflächenmessgeräte: Bezugsflächentastsysteme.	138
6.5.2	Berührende Oberflächenmessgeräte: Kufentastsysteme.	139
6.5.3	Berührunglose Oberflächenmessgeräte.	139
6.5.4	Konturmessgeräte	140
6.6	Filterung	141
6.7	Messbedingungen, Messstrategie	142
6.8	Rückführung, Überwachung, Normale, Messunsicherheit	144
6.8.1	Normale	145
6.8.2	Generelle Hinweise zur Kalibrierung von Rauheitsmessgeräten.	146
6.8.3	Messunsicherheit	146
	Literatur.	147
7	Messräume.	149
7.1	Grundlagen	150
7.2	Kenngrößen und Klassifikation	150
7.2.1	Temperatur	150
7.2.2	Luftfeuchte	152
7.2.3	Luftgeschwindigkeit	152
7.2.4	Schwingungen.	153
7.2.5	Reinheit der Luft.	154
7.3	Architektur und Ausrüstung	154
7.3.1	Standort.	154
7.3.2	Grundriss.	154

7.3.3	Ergonomische und wirtschaftliche Aspekte	155
	Literatur	156
8	Messmittel und Lehren für Werkstatt und Produktion	157
8.1	Maßverkörperungen für Länge und Winkel	158
8.2	Längenaufnehmer, Messsignal, Skalen- und Ziffernanzeige	160
8.3	Lehren, Taylorscher Grundsatz	162
8.3.1	Grenzlehren	162
8.3.2	Taylorscher Grundsatz	163
8.3.3	Prüfunsicherheit	164
8.4	Messuhr und Feinzeiger	165
8.4.1	Messuhr	165
8.4.2	Feinzeiger	166
8.5	Längenmessgeräte, induktiv, kapazitiv, magnetisch, optisch	167
8.5.1	Induktive Längenmessgeräte	168
8.5.2	Kapazitiv arbeitende Feinzeiger	170
8.5.3	Digitale Messtaster	170
8.6	Längenmessgeräte, pneumatisch	172
	Literatur	175
9	Messtechnik im Produktionsprozess	177
9.1	Einführung	177
9.2	Beherrschte Fertigung	177
9.3	Messvorrichtungen	178
9.3.1	Rechner, Schnittstellen und Messwertaufnehmer	180
9.3.2	Konstruktionselemente für Messvorrichtungen	181
9.4	Messautomaten, Messzellen und Automatisierungstechnik	181
9.5	Flexibel umrüstbare Messvorrichtungen	182
9.6	Messen im oder nahe am Produktionsprozess	184
9.6.1	Begriffe	184
9.6.2	Beispiel einer In-Prozess Messung	184
9.7	Überwachung von Werkzeugmaschinen	186
	Literatur	188
10	Sichtprüfung und deren Automatisierung	189
10.1	Arten visueller Prüfungen	189
10.1.1	Objekterkennung	189
10.1.2	Lageerkennung	190
10.1.3	Vollständigkeitsprüfung	190
10.1.4	Form- und Maßprüfung, Geometrieprüfung	190
10.1.5	Oberflächenprüfung	190
10.2	Sichtprüfung durch den Menschen	191
10.2.1	Gestaltung von Sichtprüfearbeitsplätzen	192

10.2.2	Beleuchtung	192
10.2.3	Arbeitsplatz des Menschen	192
10.2.4	Monotonie	193
10.3	Automatisierte Sichtprüfung mit Bildverarbeitung	194
10.3.1	Vorgehensmodell der automatisierten Sichtprüfung	195
10.3.2	Anwendungsgebiete und Methoden der Bildverarbeitung ...	198
10.4	Maschinelles Lernen in der Bildverarbeitung	200
10.4.1	Einführung	200
10.4.2	Lernvarianten	201
10.4.3	Arten von Algorithmen	202
10.5	Komponenten und Geräte bei der automatisierten Sichtprüfung	208
10.6	Beleuchtung bei der automatisierten Sichtprüfung	210
10.7	Komponenten bei der automatisierten Sichtprüfung	212
10.7.1	Beleuchtung	212
10.7.2	Kamera und Objektiv	212
10.7.3	Rechner und Schnittstellen	214
10.7.4	Handhabung	215
10.7.5	Software	216
10.7.6	SPS, Intranet und Leitsysteme	217
10.7.7	Intelligente Kameras	217
10.8	Anwendungen und Systemintegration in der Produktion	218
	Literatur	219
11	Statistische Prozessregelung (SPC)	221
11.1	Grundlagen, Qualitätsmanagement-Verfahren	221
11.1.1	Auf dem Weg zum wohldefinierten Prozess	221
11.1.2	Der Begriff SPC	222
11.1.3	Einflussgrößen auf den Prozess	222
11.1.4	Prozessmodelle und Phasen der Prozessqualifikation	224
11.1.5	Grundsätzliches Vorgehen während jeder Phase der Qualifikation	226
11.2	Qualitätsfähigkeitskennzahlen	228
11.2.1	Prozesspotenzial	228
11.2.2	Prozessstreuung	228
11.2.3	Prozessfähigkeit	229
11.3	Kurzzeitfähigkeit	230
11.4	Vorläufige und Langzeit-Prozessfähigkeit	231
11.5	Qualitätsregelkarten	232
11.5.1	Arten von Qualitätsregelkarten	233
11.5.2	Grenzwerte für Qualitätsregelkarten	233
	Literatur	234
12	Optische Sensoren	235

12.1	Einführung und Abgrenzung	235
12.2	Lasertriangulation.	236
12.2.1	Messprinzip und Eigenschaften	237
12.2.2	Anwendung.	238
12.3	Foucault-Sensor	240
12.3.1	Messprinzip.	240
12.3.2	Eigenschaften und Anwendungen.	241
12.4	Chromatische Weisslichtsensoren	242
12.4.1	Messprinzip.	242
12.4.2	Eigenschaften und Anwendungen.	243
12.5	Laser-Autofokussensor.	243
12.5.1	Messprinzip.	244
12.5.2	Eigenschaften und Anwendungen.	245
12.6	Weißlichtinterferometrie	245
12.6.1	Messprinzip.	245
12.6.2	Eigenschaften und Anwendungen.	252
12.7	Streulicht-Sensoren	252
12.7.1	Messprinzip.	252
12.7.2	Eigenschaften und Anwendung	253
12.8	Konoskopische Holografie	254
12.8.1	Messprinzip.	254
12.8.2	Eigenschaften und Anwendung	254
12.9	Lichtfeldkamera	255
12.9.1	Messprinzip.	255
12.9.2	Eigenschaften und Anwendung	256
	Literatur.	256
13	Optische Messsysteme	259
13.1	Einführung	259
13.2	Laserinterferometer	260
13.2.1	Messprinzip und Aufbau.	260
13.2.2	Messunsicherheit	262
13.2.3	Kalibrierung und Rückführung.	264
13.2.4	Absolut messende Interferometrie	265
13.3	Lasersabschattungsmessgerät.	266
13.3.1	Messprinzip.	266
13.3.2	Eigenschaften und Anwendung	268
13.4	Messmikroskop	268
13.4.1	Messprinzip.	268
13.4.2	Eigenschaften und Anwendung	268
13.5	Profilprojektor	269

13.5.1	Messprinzip	269
13.5.2	Eigenschaften und Anwendung	270
13.6	Fokusvariation	270
13.6.1	Messprinzip	271
13.6.2	Eigenschaften und Anwendung	272
13.7	Streifenprojektion	273
13.7.1	Messprinzip	273
13.7.2	Eigenschaften und Anwendung	275
13.8	Fotogrammetrie	277
13.8.1	Messprinzip	277
13.8.2	Eigenschaften und Anwendung	278
13.9	Lasertracker	279
13.9.1	Messprinzip	280
13.9.2	Erweiterungen-berührungsloses Messkopfsystem	280
13.9.3	Eigenschaften und Anwendung	281
13.10	Lasertracer	282
13.10.1	Messprinzip	282
13.10.2	Eigenschaften und Anwendung	282
	Literatur	284
14	Prüfplanung, beherrschte Prüfprozesse	285
14.1	Übersicht, Bedeutung und Zusammenhänge	285
14.2	Beherrschte Prüfprozesse	287
14.2.1	Fähigkeit des Messmittels, Verfahren 1	288
14.2.2	Fähigkeit eines Messprozesses mit Bediener Einfluss, Verfahren 2	290
14.2.3	Fähigkeit eines Messprozesses ohne Bediener Einfluss, Verfahren 3	293
14.2.4	Messbeständigkeit eines Messprozesses, Verfahren 4	294
14.2.5	Fähigkeit für Prüfprozesse bei attributiven Merkmalen, Verfahren 5	294
14.3	Prüfplanung	296
14.3.1	Prüfplanerstellung	296
14.3.2	Funktions- und prozessorientierte Prüfplanung	300
14.3.3	Prüfplanung und beherrschte Fertigung	301
	Literatur	303
15	Digitale Prozessketten	305
15.1	Einführung	305
15.2	Datenerhebung und Informationsflüsse	306
15.3	Digitalisierung vom Design- zum Fertigungsprozess	308
15.3.1	Design	309
15.3.2	Produktion	309

15.3.3	Lieferkette	309
15.3.4	Qualitätssicherung	310
15.4	Vorhersagende Instandhaltung	310
15.4.1	Sensorik und Datenfluss	311
15.4.2	Prädiktive Analyse	311
15.5	Ausblick	312
	Literatur.	313
16	Glossar, Begriffe, Definitionen	315
	Literatur.	326
	Links zu wichtigen Metrologischen Institutionen	329
	Literatur.	333
	Dictionary English–German	335
	Stichwortverzeichnis.	353