

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	XVII	2.5	Wirtschaftliche Relevanz der Prüfplanung	21
Vorwort	XIX	2.6	Trends und Perspektiven der Prüfplanung	22
Über die Herausgeber	XXI	2.7	Danksagung	22
Autorenverzeichnis	XXIII	3	Adaptive Prüfplanung	23
			Meike Huber, Jonathan Greipel	
TEIL I Fähige Mess- und Prüfprozesse etablieren	1	3.1	Einführung in die adaptive Prüfplanung	25
1 Messen und Prüfen als Kernaufgabe der Qualitätssicherung	3	3.2	Aufgaben der adaptiven Prüfplanung ..	26
Robert H. Schmitt		3.2.1	Umsetzung der Adaptivität durch übergreifende Prozessströme	26
1.1 Bedeutung der Fertigungsmesstechnik in produzierenden Unternehmen	5	3.2.2	Umsetzung der Adaptivität innerhalb der Prozessschritte	27
1.2 Einordnung von Prüfprozessen in den betrieblichen Kontext	6	3.2.2.1	Adaption von Prüfmerkmalen	27
1.3 Nutzung von Messdaten in der Produktion	8	3.2.2.2	Adaption des Prüfumfangs	29
2 Prüfplanung	11	3.2.2.3	Adaption der Prüffrequenz	29
Robert Hofmann, Sophie Gröger, Anika Süß		3.2.2.4	Festlegung der Prüfmittelüberwachung, Kalibrierung und Rückführung	31
2.1 Definition und Ziele	13	3.2.2.5	Festlegung der Prüfdatenerfassung und -auswertung	31
2.2 Grundlegende Begriffe	13	3.2.2.6	Adaption weiterer in der Prüfplanung berücksichtigter Schritte	34
2.3 Messen und Prüfen im Produktleben – Prüfzwecke	14	3.3	Zusammenfassung und Ausblick	34
2.4 Ablauf der Prüfplanung	15	3.4	Danksagung	35
2.4.1 Auftrag und Prüfobjekt	16	4	Geometrische Produktspezifikation – vom Konstruktionsmerkmal zur Messgröße	37
2.4.2 Prüfmerkmalsdefinition	16		Gunter Effenberger	
2.4.3 Fertigungsintegration, Prüfumfang, Prüfort und -mittel	17	4.1	Aufbau des Normensystems für die geometrische Produktspezifikation	40
2.4.4 Prüfmittelüberwachung, -kalibrierung und -rückführung, Eignungsnachweis	19	4.2	Grundregeln der geometrischen Produktspezifikation	42
2.4.5 Dokumentation und Weiterverarbeitung der Daten	20	4.3	Größenmaße – Bemaßung und Tolerierung	47
2.4.6 Reaktionspläne, Prüfplanüberwachung, Freigabe	20			

v

4.3.1	Größenmaßelemente und Größenmaße ...	47
4.3.2	Tolerierungskonzept Hüllbedingung	52
4.3.3	Spezifizieren von Größenmaßelementen ..	54
4.3.3.1	Auswahl von Größenmaßmerkmalen	54
4.3.3.2	Festlegung von Grenzmaßen und Toleranzen für Größenmaße	54
4.4	Form, Richtung, Ort und Lauf geometrischer Elemente	56
4.4.1	Form-, Richtungs-, Orts- und Lauf- toleranzen – Angabe in Zeichnungen	58
4.4.2	Formtoleranzen	60
4.4.3	Bezug und Bezüge	61
4.4.4	Richtungstoleranzen	63
4.4.5	Bezugssystem	66
4.4.6	Orstoleranzen	69
4.4.6.1	Position, Koaxialität, Symmetrie	69
4.4.6.2	Linien- und Flächenprofil	71
4.4.7	Lauftoleranzen	73
4.4.7.1	Rundlauf – radial	73
4.4.7.2	Rundlauf – axial	74
4.4.7.3	Rundlauf in spezifizierter Richtung	75
4.4.7.4	Gesamtrundlauf – radial	75
4.4.8	Allgemeintoleranzen für Form und Lage ..	76
4.5	Weiterführende Aspekte der Geometrietolerierung	77
5	Validierung von Analyse-Software ...	79
	Markus Schmidt	
5.1	Testbeispiele	83
5.2	AIAG-Testbeispiel Ermittlung R&R (ANOVA)	83
5.3	ISO/TR 11462-4	84
6	Vom EMPB zum exzellenten Produktentstehungsprozess	91
	Stefan Weber	
6.1	Einführung	93
6.1.1	Erstbemusterung im Automotive-Umfeld ..	93
6.1.2	Definition	93
6.2	EMPB – der Garant für hohe Produktqualität	93
6.2.1	Erstbemusterung in analogen Zeiten	94
6.2.2	Der digitale Erstmusterprüfbericht	94
6.2.3	Fokussierte Kommunikation in der Lieferkette	94
6.3	EMPB im Kontext des Produkt- entstehungsprozesses	96
6.4	Grenzen verschieben – ein Ausblick ...	98

TEIL II Geeignete Mess- und Prüfmittel einsetzen	101	
1 Bedeutung von Mess- und Prüfmitteln	103	
	Stephan Conrad	
1.1	Sinneswandel zur Relevanz von Mess- und Prüfprozessen	105
1.2	Auswirkungen der Produkthaftung	105
1.3	Was sind Mess- und Prüfmittel?	106
1.4	Normative Anforderungen	107
1.5	Referenzhandbücher für die Beurteilung von Messsystemen	109
1.5.1	AIAG Core Tool Measurement System Analysis (MSA)	109
1.5.2	VDA Band 5 „Mess- und Prüfprozesse – Eignung, Planung und Management“	109
1.6	Firmenrichtlinien	110
1.7	Beschaffung von Mess- und Prüfmitteln	111
1.7.1	Prüfmittelbeschaffung	112
1.7.2	Exemplarische Inhalte eines Lastenhefts ..	112
2 Eignungsnachweise für Messprozesse	115	
	Edgar Dietrich	
2.1	Einleitung	118
2.2	Anforderungen	119
2.3	Übersicht der Verfahren	120
2.4	Fähigkeitsnachweise gemäß Firmenrichtlinie	120
2.4.1	Untersuchung gemäß Verfahren 1	122
2.4.2	Untersuchung gemäß Verfahren 2	125
2.5	Fähigkeitsuntersuchung gemäß MSA ..	128
2.5.1	Unterschiede zu Firmenrichtlinien	128
2.5.2	Systematische Messabweichungs-(Bias-) und Linearitätsstudie	128
2.5.3	Wiederhol- und Vergleichspräzision %GRR	129
2.5.4	Anzahl unterscheidbarer Kategorien	129
2.6	Eignungsnachweis gemäß VDA 5 bzw. ISO 22514-7	129
2.6.1	Definition von Messsystem und -prozess ..	129
2.6.2	Schematisierte Vorgehensweise	130
2.6.3	Minimale Toleranz	132
2.6.4	Formeln zu den Kennwerten	132
2.7	Vergleich von Firmenrichtlinien, MSA mit VDA 5 bzw. ISO 22514-7	135

2.8	Sonderfälle	139	4.3	Herausforderungen – Einzigartigkeit und Komplexität	167
2.9	Zusammenfassung	139	4.4	Generelles Vorgehen beim Eignungsnachweis	167
3	Eignung attributiver Prüfprozesse ..	141	4.4.1	Beschreibung/Dokumentation des Prüfprozesses	168
	Autorenkollektiv		4.4.2	Identifikation der Einflussgrößen im Ishikawa-Diagramm	169
3.1	Beispieldaten	143	4.4.3	Ableiten des Parameterraums	169
3.2	Kappa-Koeffizient nach Jacob Cohen ...	144	4.4.4	Modellbildung und Unsicherheits- fortpflanzung	170
3.2.1	Rechenschema für den Kappa- Koeffizienten nach Cohen	144	4.5	Experimenteller Ansatz – GUM Typ A ..	172
3.2.2	Rechenschema für den Signifikanztest ...	146	4.5.1	Identifikation der Einflussgrößen	172
3.2.3	Annahmekriterien für Kappa nach Cohen	147	4.5.2	Ableiten des Parameterraums	173
3.2.4	Fallbeispiel: Vergleich Prüfer versus Prüfer	147	4.5.3	Modellbildung	173
3.2.4.1	Fallbeispiel: Bestimmen des Kappa- Koeffizienten nach Cohen	147	4.5.4	Unsicherheitsfortpflanzung	174
3.2.4.2	Fallbeispiel: Signifikanztest für den Kappa-Koeffizienten	149	4.6	Nicht experimenteller Ansatz – GUM Typ B	175
3.2.4.3	Bewertung des Prüfprozesses	150	4.6.1	Modellbildung	175
3.3	Kappa-Koeffizient nach Joseph L. Fleiss	150	4.6.2	Ermittlung der Eingangsgrößen	175
3.3.1	Rechenschema für den Kappa- Koeffizienten nach Fleiss	150	4.6.3	Unsicherheitsfortpflanzung mittels Varianzfortpflanzung	176
3.3.2	Rechenschema für den Signifikanztest ...	152	4.6.4	Unsicherheitsfortpflanzung mittels Monte-Carlo-Simulation	177
3.3.3	Annahmekriterien für Kappa nach Fleiss	153	4.7	Vor- und Nachteile von experimenteller und nicht experimenteller Ermittlung der Messunsicherheit	177
3.3.4	Fallbeispiel: Vergleichbarkeit der Prüferurteile	153	4.8	Eignungsnachweis bei attributivem Prüfergebnis	178
3.3.4.1	Bestimmen des Kappa-Koeffizienten nach Fleiss	153	4.9	Dokumentation des Eignungs- nachweises	178
3.3.4.2	Fallbeispiel: Signifikanztest für Kappa-Koeffizienten	154	5	Koordinatenmesssysteme in der digitalen Produktion	181
3.3.4.3	Bewertung des Prüfprozesses	155		Dietrich Imkamp	
3.4	Prüfsystem-Effektivität	155	5.1	Grundlagen der Koordinaten- messtechnik	184
3.4.1	Rechenschema zur Prüfsystem- Effektivität	155	5.1.1	Koordinatenmessgeräte und ihre Sensoren	185
3.4.2	Fallbeispiel zur Prüfsystem-Effektivität ...	155	5.1.2	Koordinatenmesssysteme	189
3.4.3	Annahmekriterien für die Prüfsystem- Effektivität	157	5.1.3	Kenngrößen für die Prüfung von Koordinatenmessgeräten und -systemen ..	192
3.4.4	Bewertung des Prüfprozesses	159	5.1.4	Software für Koordinatenmessgeräte und -systeme	194
3.5	Signalerkennung	159	5.2	Koordinatenmesstechnik in der Produktion zur Qualitätsprüfung	196
3.5.1	Fallbeispiel Signalerkennung	159	5.2.1	Organisatorische Einordnung der Qualitätsprüfung	196
3.5.2	Ermittlung der Kenngröße %GRR	160			
3.5.3	Bewertung des Prüfprozesses	161			
4	Eignungsnachweis von Prüfständen	163			
	Philipp Jatzkowski				
4.1	Prüfstände – Rückgrat der industriellen Produktion	166			
4.2	Motivation für den Eignungsnachweis ..	166			

5.2.2	Digitale Schnittstellen für die Kommunikation mit der Koordinatenmesstechnik	197
5.2.2.1	Eingangsinformationen: Geometrische Produktspezifikation und Messablauf	198
5.2.2.2	Ausgangsinformationen: Messergebnisse	199
5.2.2.3	Schnittstellen zur digitalen Übertragung von Kalibrierdaten	199
5.2.2.4	Schnittstellen zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	200
5.2.3	Automatisierung für den Materialfluss ...	200
6	Vorgehensweise für „nicht fähige Messsysteme/Messprozesse“	207
	Stephan Conrad	
6.1	Vorbemerkungen	209
6.2	Vorgehensweisen nach AIAG MSA	210
6.3	Vorgehensweise nach Bosch Heft 10 ...	211
6.4	Vorgehensweise nach VDA Band 5	212
6.5	Sonderregelungen nach VDA 5	214
6.5.1	Fine-Tolerances-(FT)-Regelung	214
6.5.2	Verringerung der Messunsicherheit durch Mehrfachmessung	217
7	Einseitig begrenzte Merkmale	219
	Stephan Conrad	
7.1	Vorbemerkungen	221
7.2	Kategorisierung einseitig begrenzter Merkmale	222
7.3	Einseitig begrenzte Merkmale mit natürlicher/physikalischer/technischer Grenze	222
7.4	Einseitig begrenzte Merkmale mit definiertem Arbeitspunkt	227
7.5	Einseitig begrenzte Merkmale (ohne natürliche Grenze oder definierten Arbeitspunkt)	229
7.5.1	Schätzung der Fertigungsprozessstreuung nach DIN ISO 22514-1 und DIN ISO 22514-2	230
7.5.2	Schätzung der Fertigungsprozessstreuung aus einer kleineren Zufallsstichprobe	231
7.5.3	Schätzung der Fertigungsprozessstreuung aus historischen Daten	231
7.5.4	Berechnung der Eignungsindizes bei einseitigen Toleranzen	231
7.6	Mögliche Verfahren der Messsystemanalyse	233

7.6.1	Verfahren 1 und Verfahren 2 bei einseitigen Grenzen und definiertem Arbeitspunkt	233
7.6.2	Verfahren 1 und Verfahren 2 bei einseitigen Grenzen ohne weitere Angaben	234

TEIL III Valide Messdaten unter Produktionsbedingungen gewinnen

1	Standardmessmittel	239
	Han Haitjema	
1.1	Einleitung	241
1.2	Einordnung der dimensional Messtechnik	241
1.3	Handmessgeräte für Längenmessungen	242
1.3.1	Messschieber	242
1.3.2	Messschraube/Mikrometer	243
1.3.3	Innenmessschrauben mit Zwei-Punkt- und Drei-Punkt-Berührung	244
1.4	Wegsensoren	245
1.4.1	Mechanische Wandler	245
1.4.2	Induktive Wandler	246
1.4.3	Kapazitive Sensoren	247
1.4.4	Optoelektronik: Linearencoder	248
1.5	Messgeräte zur Längen- und Wegmessung in einer Dimension	249
1.5.1	Laserinterferometer	249
1.5.2	Vertikale 1D-Messmaschine	250
1.5.3	Längenkomparator	250
1.5.4	Kleinlängenmesser	251
1.5.5	Höhenmessgeräte	251
1.6	Handmessgeräte für Winkelmessungen	253
1.6.1	Universal-Winkelmesser	253
1.6.2	Winkelmessgeräte für Neigungsmessungen	253
1.6.2.1	Wasserwaage	253
1.6.2.2	Klinometer bzw. Inklinometer	254
1.6.2.3	Elektronische Nivelliergeräte	254
1.6.2.4	Sinuslineal	255
1.7	Größere Instrumente für Winkelmessungen	255
1.7.1	Theodolit	255
1.7.2	Autokollimator	256
1.7.3	Rundschalttisch	257
1.8	Messen von Form und Rauheit	257
1.8.1	Geradheit	258
1.8.1.1	Elektronische Nivelliergeräte	258

1.8.1.2	Fluchtfernrohr	259	3.2.1	Bildverarbeitungs- und Fokusvariationssensoren	303
1.8.2	Ebenheit	259	3.2.2	Laserabstandssensoren	304
1.8.3	Rechtwinkligkeit	260	3.2.3	Chromatische Fokussensoren	304
1.8.4	Rundheit	261	3.2.4	Konfokale Sensoren	305
1.8.5	Rauheit	263	3.2.5	Interferometrische Sensoren	306
1.9	Koordinatenmessungen	264	3.3	Röntgen-Computertomografie	306
1.9.1	2D-Messmaschinen	265	3.4	Taktile Sensoren	308
1.9.1.1	Messmikroskop	265	3.4.1	Taktilelektrische Sensoren	308
1.9.1.2	Profilprojektor	267	3.4.2	Taktile optische Mikrotaster	308
1.9.2	3D-Koordinatenmessgerät (KMG)	268	3.4.3	Taktile optische Kontursensoren	309
1.9.2.1	Prinzip des 3D-KMG	268	3.5	Gerätebauweisen	310
1.9.2.2	Konstruktion von 3D-KMGs	269	3.6	Multisensorintegration	312
1.9.2.3	Spezifikation und Leistungsüberprüfung von KMGs	271	3.7	Anwendung von Multisensorik	313
2	Taktile Messtechnik – die Referenz? 273		3.8	Messsoftware	315
	Harald Bosse, Karin Kniel		4	Automatische Dichtheitsprüfung in der Serienfertigung	319
2.1	Definition und Weitergabe der SI-Einheiten	275		Alexander Stratmann	
2.1.1	Einführung	275	4.1	Einleitung	322
2.1.2	Die Längeneinheit Meter	276	4.1.1	Grundbegriffe	322
2.1.3	Weitere SI-Einheiten	277	4.1.2	Leckströmung	325
2.2	Der Weg zum vergleichbaren Messen .. 278		4.1.3	Anwendungen und Ergänzungen	326
2.2.1	Prinzip der messtechnischen Rückführung	278	4.1.3.1	Ableitung gasförmiger Leckagerate aus flüssigem Anwendungsfall	326
2.2.2	Bedeutung der Messunsicherheit	280	4.1.3.2	Ableitung gasförmige Leckagerate aus massebezogenem Grenzwert	328
2.2.3	Ermittlung der Messunsicherheit	280	4.1.3.3	Temperatur und Wärmeeinfluss	328
2.2.4	Normale für die Industrie	283	4.2	Qualitätsmethoden	329
2.3	3D-Koordinatenmesssysteme	286	4.2.1	Messprozessfähigkeitsuntersuchung	329
2.3.1	Taktile Sensorik – seit Jahrzehnten bewährt	286	4.2.2	Referenztestleck/Normal	331
2.3.2	CT, optische und Multi-Sensorik – auf dem Vormarsch	288	4.2.3	Prüfstandsregelbetrieb	332
2.4	Alles eine Frage der Genauigkeit?	290	4.3	Leckprüfverfahren	333
2.4.1	Vergleich der Vorteile und Grenzen der Sensorarten	290	4.3.1	Druckmessmethoden	334
2.4.2	Taktile Messtechnik als Referenz auf dem Prüfstand	291	4.3.2	Durchflussmessmethoden	338
2.5	Ein Beispiel: Verzahnungsmesstechnik 292		4.3.3	Spurengasleckprüfung	341
2.5.1	Normgerechte Zahnradmessungen	292	4.3.3.1	Heliumleckprüfung	342
2.5.2	Messtechnische Herausforderungen: Mikro- und Großverzahnungen	292	4.3.3.2	Wasserstoff- bzw. Formiergasleckprüfung	345
2.5.3	Neue Wege und deren Verifizierung	295	4.4	Addendum	346
3	Multisensor-Koordinaten- messtechnik	299	5	Härteprüfung in der praktischen Anwendung	349
	Ralf Christoph, Schirin Heidari Bateni			Febo Menelao	
3.1	Sensorsystematik	301	5.1	Die Verfahren nach Rockwell, Brinell und Vickers kurz vorgestellt	351
3.2	Optische Sensoren	303	5.2	Zusammenhang zwischen Brinell- und Vickers-Härtetest	353

5.3	Anwendungsbereiche von Rockwell, Brinell und Vickers: Wann wird welches Verfahren eingesetzt?	354	7.1.3.2	Machine-Vision-Systeme	383
5.4	Vor- und Nachteile unterschiedlicher Härtemessverfahren	354	7.1.4	Vor- und Nachteile der Automatisierung ..	387
5.5	Umwertung von Härtewerten	355	7.1.5	Sichtprüfung im Kontext von Industrie 4.0	388
5.6	Unsicherheit bei der Umwertung	355	7.2	Fallbeispiel – Automatisierte Farbeindringprüfung in der Gasturbinenindustrie ..	390
6	Messtechnik in der Schraubtechnik	357	7.2.1	Grundlagen der Farbeindringprüfung	391
	Niels Rabbe		7.2.2	Automatisierte Oberflächenrisserkennung bei der Farbeindringprüfung an Turbinenleitschaufeln	393
6.1	Einführung in die Schraubtechnik	359	7.2.3	Bestimmung der Messunsicherheiten nach VDA 5	400
6.2	Schraubwerkzeuge	362	7.2.4	Zusammenfassung und Ausblick	401
6.2.1	Der Drehmomentschlüssel	362	7.3	Zusammenfassung	401
6.2.2	Motorisch betriebenes Schraubwerkzeug mit Abschaltkupplung	363	8	Weißlichtinterferometrie	405
6.2.3	Impulsschrauber	363		Wilfried Bauer	
6.2.4	Motorisch betriebenes Schraubwerkzeug mit Drehmoment oder mit Drehmoment plus Drehwinkelsteuerung	364	8.1	Einleitung	407
6.2.5	Beispiel Drehwinkelmessung	365	8.2	Kohärenz, konstruktive und destruktive Interferenzen	408
6.2.6	Streckgrenzsteuerung	365	8.3	Grundlagen der Interferometrie	408
6.2.7	Vorspannen von Schrauben durch Zugkraft	366	8.3.1	Interferometrie mit monochromatischem Licht	408
6.2.8	Vorspannen von Schrauben durch thermische Dehnung	367	8.3.2	Grundlagen des Weißlichtinterferometers	411
6.3	Prüfen von bereits montierten Schraubverbindungen	367	8.4	Auswertung der Messsignale und Korrelogramme	414
6.3.1	Klemmkraftsensoren	367	8.5	Mikroskopischer und telezentrischer Strahlengang bei scannenden Weißlichtinterferometern	416
6.3.2	Messung mittels Ultraschall	368	8.6	„Phaseshift“-Methode als Alternative zur Weißlichtinterferometrie	417
6.3.3	Messung des Weiterdrehmoments	369	8.7	Beugungsbegrenztes laterales optisches Auflösungsvermögen nach Rayleigh oder Sparrow	418
6.4	Statische Kalibrierung von Schraubwerkzeugen	371	8.8	Messzeiten	422
6.5	Prüfung von Schraubwerkzeugen	372	8.9	Messung an geneigten oder schrägen Flächen	422
6.6	Prozessfähigkeitsprüfung von Schraubverbindungen	373	8.10	Messungen von Oberflächen, die aus unterschiedlichen Materialien bestehen	425
6.7	Rückführung auf das dynamische Drehmoment bei kontinuierlich rotierenden Schraubwerkzeugen	374	8.11	Mess- und Instrumenten-Rauschen	426
6.8	Kompetenz in der Schraubtechnik	374	8.12	Eindeutigkeit des Strahlengangs und deren Störungen durch die Oberflächenstruktur	427
7	Sichtprüfung	375	8.13	Bestimmung von Texturparametern mit Weißlichtinterferometern	433
	Kilian Geiger, Hamid Jahangir, Oscar Malinowski				
7.1	Grundlagen	377			
7.1.1	Aufgaben der Sichtprüfung	377			
7.1.2	Mögliche Fehlereinflüsse	379			
7.1.3	Automatisierung der Sichtprüfung	381			
7.1.3.1	Prüfkörperzuführung und -handhabung ..	381			

8.14	„Batwings“	438	9.4.1	Röntgenröhre	478
8.15	Räumliche topografische Strukturauflösung	440	9.4.1.1	Reflexions- und Transmissionstargets	479
8.16	Schnelle und zuverlässige Qualitätskontrolle: Einsatz von Weißlichtinterferometern in der Produktionsüberwachung und Qualitätssicherung	446	9.4.1.2	Elektronenstrahlerzeugung und -fokussierung	480
8.17	Beispiele von Anwendungen für mikroskopische und telezentrisch aufgebaute Weißlichtinterferometer	450	9.4.1.3	Reduzierung von Betriebskosten	481
8.18	Ausgewählte Applikationen für den Einsatz von Weißlichtinterferometern ..	452	9.4.2	Drehachse	482
9	Computertomografie in der Koordinatenmesstechnik	459	9.4.3	Röntgendetektor	482
	Raoul Christoph, Marc Kachelrieß		9.4.3.1	Indirekte Detektion nach dem Szintillationsprinzip	482
9.1	Funktionsprinzip der Röntgen-Computertomografie	462	9.4.3.2	Zeilen- und Flächendetektoren	483
9.1.1	Röntgenröhre: Erzeugung der Röntgenstrahlung	462	9.4.4	Linearachsen	483
9.1.2	Vorfilter und Messobjekt: Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie	463	9.4.4.1	Einstellen von Vergrößerung und Kegelstrahlwinkel	484
9.1.3	Detektor: Erfassung der Röntgenstrahlung	465	9.4.4.2	Mehrere CT-Sensoren und Multisensorik ..	484
9.1.4	Vom Intensitätsbild zum Projektionsbild ..	465	9.4.5	Strahlenschutzmaßnahmen	485
9.1.5	Vom Bilderstapel zum Volumen	466	9.5	Messabweichungen: Verursachende Effekte und Korrektur	485
9.2	Auswertung für industrielle Anwendungen	466	9.5.1	Systematische Messabweichungen	485
9.2.1	Vom Intensitätsbild oder Volumen zur Messpunktewolke	467	9.5.1.1	Strahlaufhärtung	485
9.2.2	Inspektion des Werkstücks	469	9.5.1.2	Streustrahlung	486
9.2.2.1	Werkstückvisualisierung und Inspektion der Materialstruktur	470	9.5.1.3	Kegelstrahlartefakte	486
9.2.2.2	Automatische Analyse innen- und außenliegender Störungen	471	9.5.1.4	Empirische Artefaktkorrektur	486
9.2.3	Messen der Werkstückgeometrie	472	9.5.1.5	Virtuelle Autokorrektur	487
9.2.3.1	Maßliche Auswertung des Werkstücks ...	472	9.5.2	Zufällige Messabweichungen	487
9.2.3.2	3D-Soll-Ist-Vergleich	474	9.6	Spezielle Tomografieverfahren	488
9.2.4	Gemeinsame Lösung von Inspektions- und Messaufgaben	474	9.6.1	Messzeit oder Rauschen reduzieren mittels OnTheFly-Tomografie	488
9.3	Abbildungsgeometrie	474	9.6.2	Messbereich oder Strukturauflösung vergrößern	488
9.3.1	Vergrößerung	475	9.6.2.1	Abschnittstomografie, longitudinales Rastern und Helix-Tomografie	489
9.3.2	Messbereich	475	9.6.2.2	Halbseitentomografie und laterales Rastern	490
9.3.3	Orts- und Strukturauflösung	475	9.6.2.3	ROI- und exzentrische Multi-ROI-Tomografie	490
9.3.4	Optimierung der Abbildungsgeometrie ...	477	9.6.2.4	Swing- und Planar-Laminografie	490
9.3.4.1	Optimierung der Vergrößerung	477	9.7	Messgenauigkeit	492
9.3.4.2	Optimierung von Brennfleck- und Pixelgröße	477	9.7.1	Spezifikationsüberprüfung	492
9.3.4.3	Optimierung der Drehschrittzahl	478	9.7.1.1	Antastabweichung	492
9.4	Gerätetechnik und Bauformen	478	9.7.1.2	Längenmessabweichung	492
			9.7.2	Messunsicherheitsbestimmung	493
			9.8	Ausblick	494
			9.8.1	Photonenzählende Detektoren	494
			9.8.2	Artefaktkorrektur mittels künstlicher Intelligenz	495
			10	Bildverarbeitung	499
				Ralf Christoph, Schirin Heidari Bateni	
			10.1	Einführung	501
			10.2	Abbildung	501

10.3	Beleuchtung	504	12.4	Messverfahren	551
10.4	Kamera	506	12.4.1	Bildmessung	551
10.5	Messsoftware	507	12.4.1.1	Messung von Zielmarken	551
10.6	Auflösung	510	12.4.1.2	Messung von natürlichen Merkmalen	552
10.7	Integration in Koordinatenmessgeräte ..	511	12.4.1.3	Präzise Messung von Oberflächenmustern	552
11	Lasertracker	517	12.4.1.4	Streifen- und Musterprojektionsverfahren	553
	Raimund Loser		12.4.2	Orientierung	554
11.1	Genauigkeitsanforderung als Entwicklungsgrundlage	519	12.4.2.1	Orientierungsverfahren	554
11.2	Funktionsprinzip des Lasertrackers ...	520	12.4.2.2	Epipolargeometrie	555
11.3	Lasertracker mit Absolutdistanz- messer (ADM)	522	12.4.2.3	Structure-from-Motion	555
11.3.1	ADM mit Polarisationsmodulation	522	12.4.2.4	Simultaneous Localization and Mapping ..	556
11.3.2	ADM nach dem Phasenvergleichs- verfahren	524	12.4.2.5	Koordinatensysteme	556
11.4	Kalibrierung und Systemparameter	525	12.4.3	3D-Berechnung	557
11.5	Bestimmung des Referenzpunktes (Nullpunktdistanz oder Additions- konstante)	527	12.5	Genauigkeit und Verifizierung	558
11.6	Einfluss der Atmosphäre	528	12.5.1	Kenngößen	558
11.7	Lasertrackererweiterung zur 6D-Datenerfassung	529	12.5.2	Prüfkörper und Normale	559
11.7.1	Funktionsweise des 6D-Lasertracker- systems	530	12.5.3	Normen und Richtlinien	560
11.7.2	Lasertracker Kamera (T-Cam)	533	12.6	Anwendungen und Messsysteme	561
11.7.3	Lasertracker Probe (T-Probe)	533	12.6.1	Offline-Photogrammetrie	561
11.7.4	Lasertracker Automatisierung Machine-Control (T-Mac-Varianten)	534	12.6.1.1	Kamerakalibrierung mit Testfeld	561
11.7.5	Lasertracker Scanner (T-Scan)	535	12.6.1.2	Deformationsmessungen	562
11.7.6	Realtime-Funktionalität	536	12.6.1.3	Messung großer Oberflächen durch Streifenprojektion	563
11.8	Neueste Generationen von Lasertrackern	537	12.6.1.4	Formerfassung durch Structure- from-Motion	563
12	Photogrammetrie	541	12.6.2	Online-Photogrammetrie	565
	Thomas Luhmann		12.6.2.1	Mobile Systeme zur Fertigungskontrolle ..	565
12.1	Einführung	543	12.6.2.2	System zur Vermessung von Rohrleitungen	566
12.1.1	Einordnung	543	12.6.2.3	System zur Positionierung von Stahlplatten	566
12.1.2	Messprinzip	544	12.6.2.4	Dynamische Messtechnik im Windkanal ..	568
12.2	Aufnahmetechnik	545	12.6.2.5	Integrierte Messzellen	568
12.2.1	Kamerasysteme	546	13	Optische Kohärenztomografie	571
12.2.2	Beleuchtung und Signalisierung	547		Niels König, Fabian Hübenthal (†), Max Riediger, Alfredo Velazquez, Charlotte Stehmar	
12.3	Kamerakalibrierung	549	13.1	OCT-Technologie	573
12.3.1	Zielsetzung	549	13.1.1	Grundlagen der kurzkohärenten Interferometrie	573
12.3.2	Geometrisches Kameramodell	549	13.1.2	Grundaufbau von OCT-Systemen	576
12.3.3	Strategien und Aufnahmeanordnungen ...	550	13.1.3	Signalverarbeitung	579
			13.1.4	OCT-Erweiterungen	580
			13.2	Optische Kohärenztomografie in der Fertigungsmesstechnik	582
			13.2.1	Laserprozesskontrolle	584
			13.2.2	OCT für die zerstörungsfreie Prüfung	586
			14	Laserradar	589
				Alexander Schönberg	
			14.1	Einführung	591

14.1.1	Einordnung	591	15.4.2	Robotergestützte Ultraschallmesszelle mit adaptiver Messkopfausrichtung	626
14.1.2	Messprinzip	591	15.4.3	Automatisierte Prüfung von Falzklebeverbindungen mit Ultraschall ...	627
14.2	Komponenten	593	16	Thermografie	629
14.2.1	Distanzmessung	593		Dominik Wolfschläger, Niels Holtmann, Thomas Zweschper	
14.2.2	Azimut und Elevation	594	16.1	Physikalische Grundlagen	631
14.2.3	Prozesskamera	595	16.2	Thermografiekameras	633
14.2.4	Referenzierung	595	16.3	Anregungssignale und Auswertemethoden	634
14.2.5	Sensorpositionierung	597	16.3.1	Lock-in-Thermografie	635
14.2.6	Bauteilpositionierung	598	16.3.2	Pulsthermografie	636
14.3	Kalibrierung	599	16.3.3	Bildverarbeitung	637
14.3.1	Zielsetzung	599	16.3.3.1	Rohdaten	638
14.3.2	Geometrisches Sensormodell	599	16.3.3.2	Bildvorverarbeitung	638
14.3.3	Bündelung von Standpunkten	600	16.3.3.3	Merkmalsextraktion	638
14.3.4	Bauteilausrichtung	601	16.3.3.4	Bildanalyse	639
14.4	Messverfahren	601	16.4	Anregungsquellen	640
14.4.1	Merkmale und Standpunkte	601	16.4.1	Halogenlampen-Anregung	641
14.4.2	Scan- und Antaststrategien	603	16.4.2	Blitzlampen-Anregung	641
14.4.3	Merkmalsauswertung	604	16.4.3	Ultraschall-Anregung	642
14.4.4	Messwerterstellung	606	16.4.4	Induktions-Anregung	642
14.5	Genauigkeit und Verifizierung	606	16.4.5	Laser-Anregung	643
14.5.1	Verfahren und Kenngrößen	606	16.4.6	Hinweise zur Auswahl des Thermografieverfahrens	644
14.5.2	Unsicherheitsbudgets	607	16.5	Thermografie-Systeme in der Produktion	644
14.5.3	Wiederholbarkeits-Tests	607	17	Messen auf Werkzeugmaschinen ...	647
14.5.4	Prüfprozesseignung	608		Maximilian Macha, Philipp Dahlem	
14.5.5	Korrelation und Vergleichbarkeit	608	17.1	Einleitung	649
14.6	Anwendungen und Integrationsgrade ..	609	17.2	Anwendungsfälle für On-Machine-Messungen	650
15	Industrielle Ultraschallmesstechnik	613	17.2.1	Prozesseinrichtung	650
	P. Nienheysen, L. Stohrer, W. Kimmelman, A. Sadovoy, A. Niola, G. De Coppel		17.2.2	Prozessüberwachung während der Fertigung	650
15.1	Physikalische Grundlagen	615	17.2.3	Endkontrolle des Werkstücks in der Aufspannung	651
15.1.1	Schallwellen	615	17.3	Messsystemtypen für Werkzeugmaschinen	653
15.1.2	Schallfeldgeometrie	616	17.3.1	Standardmesstaster	654
15.2	Ultraschallmessverfahren	617	17.3.2	Hochpräzisionsmesstaster	654
15.2.1	Konventionelle Ultraschallmessverfahren	617	17.3.3	Temperaturmesstaster	655
15.2.2	Ultraschallprüfköpfe	618	17.3.4	Ultraschallmesstaster	656
15.2.3	Phased-Array-Ultraschallmessung	619	17.3.5	Optische Messsysteme mittels Laser-Triangulation (Laserscanner)	657
15.3	Analyse der Ultraschallmessdaten	620	17.3.6	Steuerungstechnische Anbindung des Tastsystems	659
15.3.1	Darstellung der Schallintensität über der Laufzeit	620			
15.3.2	Visualisierungsverfahren für Ultraschallmessdaten	621			
15.3.3	Anwendungsbeispiel zur Dickenmessung	623			
15.3.4	Verfahren zur Fehlergrößenbestimmung ..	623			
15.4	Automatisierung der Ultraschallmesstechnik	624			
15.4.1	Robotergestützte Ultraschallmesszelle mit integrierter 3D-Geometriemessung	625			

17.3.7	Datenübertragung von Messtaster zu Empfängereinheit	659	2	Datenformate	691
				Michael Wagner	
17.4	Qualifizierung von Messungen auf Werkzeugmaschinen	660	2.1	Allgemeine Hinweise	693
17.4.1	Begrifflichkeiten der Wiederholgenauigkeit, Pre-Travel (Lobing) und 3D-Error	661	2.2	Die Bedeutung von Datenformaten in der Smart Factory	693
17.4.1.1	Wiederholpräzision/-genauigkeit	661	2.3	Datenformate im Überblick	693
17.4.1.2	Pre-Travel	662	2.3.1	Standards	693
17.4.1.3	3D-Formfehler	664	2.3.2	Q-DAS ASCII Transferformat	694
17.4.2	Eignungsnachweise für On-Machine Measurements - Normen- und Richtlinien	665	2.3.2.1	Struktur	694
17.4.3	OMM-Enablertechnologien und Forschungsperspektive	667	2.3.2.2	Datenmodell	695
17.5	Fazit und Ausblick	669	2.3.3	Advanced Quality Data Exchange Format (AQDEF)	697
			2.3.4	Quality Markup Language	702
			2.4	Ausblick	703
			3	Von der Wareneingangsprüfung bis zur End-of-Line-Prüfung in der Montage	705
TEIL IV	Messdaten verarbeiten, verteilen, nutzen	671		Horst Lang, Achim Huberty	
1	Messdaten verarbeiten, verteilen, nutzen – aktuelle Entwicklungen	673	3.1	Einleitung	707
	Benjamin Montavon, Matthias Bodenbenner		3.2	Wareneingangsprüfung/ Prozessdokumentation bei Lieferanten	707
1.1	Messdaten und ihre Rolle in der Industrie 4.0	675	3.2.1	Kurzzeitfähigkeitsuntersuchung	707
1.1.1	Der Lebenszyklus von Messdaten in der Industrie 4.0	676	3.2.2	Vorabnahme beim Lieferanten	711
1.1.2	Herausforderungen	677	3.3	Laufende Fertigungsüberwachung und deren Voraussetzungen	712
1.1.3	Anforderungen	678	3.3.1	Beschaffung von Fertigungseinrichtungen für einen beschriebenen Herstellungsprozess	712
1.2	Dezentralisierung der Messdatenerzeugung, -verarbeitung und -nutzung	679	3.3.2	Durchführung einer Vorabnahme beim Hersteller	712
1.2.1	Nicht-monolithische Konzepte	679	3.3.3	Durchführung einer Abnahme beim Kunden	715
1.2.2	Separation of Concern	680	3.3.4	Prüfprozesseignung der eingesetzten Messtechnik	715
1.2.3	IoT-Infrastrukturen	681	3.3.5	Laufende Fertigungsüberwachung zur Dokumentation der Langzeitstabilität	716
1.3	Aktuelle Entwicklungen	683	3.4	Montageendprüfung/Funktionsprüfung	718
1.3.1	Modelle für Messdaten	683	3.5	Auszug möglicher Standardgeräte für den Einsatz im Produktionsumfeld	719
1.3.1.1	SensOr Interfacing Language (SOIL)	683	4	SPC für kleine Losgrößen und Einzelfertigung	723
1.3.1.2	Verwaltungsschale – Asset Administration Shell	683		Wolfgang Schultz	
1.3.1.3	Das digitale Kalibrierzertifikat (DCC)	684	4.1	Die Bedeutung von SPC in der industriellen Produktion	725
1.3.2	Protokolle und Formate	684			
1.3.2.1	HTTP & REST-API	684			
1.3.2.2	Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	685			
1.3.2.3	OPC Unified Architecture (OPC UA)	685			
1.3.2.4	MTConnect	686			
1.3.2.5	SmartCom Digital System of Units (D-SI) ..	686			
1.3.3	Unternehmensübergreifender Datenaustausch	687			

4.2	Ansätze für SPC bei kleinen Stückzahlen	728	5.5	Der Wert von Messdaten	760
4.3	Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Prozessen	735	6	Predictive Maintenance – wie KI den Betrieb von Produktionssystemen revolutionieren kann	763
4.4	Fazit	739		Martin Peterek	
5	Erfassung von Messdaten	741	6.1	Einleitung	765
	Thomas Froese		6.2	Advanced Analytics in produzierenden Unternehmen	765
5.1	Einführung	743	6.3	Anwendungsbeispiel Messsysteme	766
5.2	Speicherung von Messdaten	743	6.4	Anwendungsbeispiel Werkzeugmaschinen und Roboterkinematiken ...	768
5.2.1	Kurzzeitige Speicherung im PLS oder im Labor	743	6.5	Handlungsempfehlungen für die Praxis	769
5.2.2	Schnittstellen	744	7	Einführung in Predictive Quality	771
5.2.3	Langfristige Speicherung in PI(M)S	744		Sebastian Beckschulte, Betül Güngör	
5.2.4	Strukturierte Ablage in Datenbanken/ „Single Source of Truth“	745	7.1	Digitale Transformation zur Befähigung zukunftsfähiger Produktionssysteme ..	774
5.2.5	Bereitstellung und Verteilung von Messdaten	745	7.1.1	Der digitale Wandel	774
5.3	Bereinigung und Bewertung von Messdaten	746	7.1.2	Erfolgsfaktoren für zukunftsfähige Produktionssysteme	775
5.3.1	Messdatenvalidierung	746	7.2	Zukunftsfähige Produktionssysteme durch Predictive Quality	776
5.3.1.1	Massebilanzen und Stoffbilanzen	746	7.2.1	Big Data als technologische Grundlage ...	776
5.3.1.2	Enthalpie-/Energiebilanzen	746	7.2.2	Data Analytics als methodischer Befähiger	779
5.3.1.3	Statistische Datenvalidierung	747	7.2.3	Predictive-Quality-Ansatz zur Optimierung der Produktqualität am Beispiel eines Nutzfahrzeugherstellers	780
5.3.1.4	SOM-Filterung	747	7.3	Potenziale und Ausblick	783
5.3.2	Vollständigkeit und Nutzbarkeit von Daten/SIPOC	748	8	Process Mining	785
5.3.3	Datenbereinigung	749		Jimmy Chhor, Simon Cramer, Max Ellerich, Markus Ohlenforst	
5.3.4	Umgang mit stochastischem Rauschen ...	750	8.1	Einordnung von Analysetechniken	787
5.3.5	Produktverfolgung und Fingerprinting in Datensätzen	750	8.2	Data Mining und Process Mining	788
5.3.5.1	Produktverfolgung in Fertigungsverfahren	750	8.3	Grundlagen zu Process Mining	789
5.3.5.2	Produktverfolgung in kontinuierlichen Prozessen	750	8.4	Datenquellen für Process Mining in Unternehmen	791
5.3.5.3	Batchfingerprinting	751	8.5	Fallstudie in der Produktion	792
5.3.6	Von Big Data zu Smart Data	752	8.6	Herausforderungen für den Einsatz in der Produktion	794
5.4	Nutzung von Messdaten	753	8.7	Ausblick	795
5.4.1	Analyse einzelner Zeitreihen	753	Stichwortverzeichnis	797	
5.4.2	Komplexe Datenanalyse	754			
5.4.2.1	Korrelationsanalysen	754			
5.4.2.2	Parallelkoordinaten	754			
5.4.2.3	Entscheidungsbäume	755			
5.4.3	Modellierung	756			
5.4.3.1	Whitebox-Modelle	756			
5.4.3.2	Blackbox-Modelle	756			
5.4.3.3	Hybride Modelle	757			
5.4.3.4	Nutzung von Modellen	757			
5.4.4	Softsensorik	757			
5.4.5	Prädiktive Regelung mit Softsensoren ...	759			
5.4.6	RTO, Echtzeitoptimierung mit Messdaten	759			