

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

4.3.1	Größenmaßelemente und Größenmaße . . .	47	<b>TEIL II Geeignete Mess- und Prüfmittel einsetzen . . . . .</b>	<b>101</b>
4.3.2	Tolerierungskonzept Hüllbedingung . . . . .	52		
4.3.3	Spezifizieren von Größenmaßelementen . .	54		
4.3.3.1	Auswahl von Größenmaßmerkmalen . . . . .	54	<b>1 Bedeutung von Mess- und Prüfmitteln . . . . .</b>	<b>103</b>
4.3.3.2	Festlegung von Grenzmaßen und Toleranzen für Größenmaße . . . . .	54	Stephan Conrad	
<b>4.4</b>	<b>Form, Richtung, Ort und Lauf geometrischer Elemente . . . . .</b>	<b>56</b>	<b>1.1 Sinneswandel zur Relevanz von Mess- und Prüfprozessen . . . . .</b>	<b>105</b>
4.4.1	Form-, Richtungs-, Orts- und Lauf-toleranzen – Angabe in Zeichnungen . . . . .	58	<b>1.2 Auswirkungen der Produkthaftung . . . . .</b>	<b>105</b>
4.4.2	Formtoleranzen . . . . .	60	<b>1.3 Was sind Mess- und Prüfmittel? . . . . .</b>	<b>106</b>
4.4.3	Bezug und Bezüge . . . . .	61	<b>1.4 Normative Anforderungen . . . . .</b>	<b>107</b>
4.4.4	Richtungstoleranzen . . . . .	63	<b>1.5 Referenzhandbücher für die Beurteilung von Messsystemen . . . . .</b>	<b>109</b>
4.4.5	Bezugssystem . . . . .	66	1.5.1 AIAG Core Tool Measurement System Analysis (MSA) . . . . .	109
4.4.6	Ortstoleranzen . . . . .	69	1.5.2 VDA Band 5 „Mess- und Prüfprozesse – Eignung, Planung und Management“ . . . . .	109
4.4.6.1	Position, Koaxialität, Symmetrie . . . . .	69	<b>1.6 Firmenrichtlinien . . . . .</b>	<b>110</b>
4.4.6.2	Linien- und Flächenprofil . . . . .	71	<b>1.7 Beschaffung von Mess- und Prüfmitteln</b>	<b>111</b>
4.4.7	Lauftoleranzen . . . . .	73	1.7.1 Prüfmittelbeschaffung . . . . .	112
4.4.7.1	Rundlauf – radial . . . . .	73	1.7.2 Exemplarische Inhalte eines Lastenhefts . .	112
4.4.7.2	Rundlauf – axial . . . . .	74	<b>2 Eignungsnachweise für Messprozesse . . . . .</b>	<b>115</b>
4.4.7.3	Rundlauf in spezifizierter Richtung . . . . .	75	Edgar Dietrich	
4.4.7.4	Gesamtrundlauf – radial . . . . .	75	<b>2.1 Einleitung . . . . .</b>	<b>118</b>
4.4.8	Allgemeintoleranzen für Form und Lage . .	76	<b>2.2 Anforderungen . . . . .</b>	<b>119</b>
<b>4.5</b>	<b>Weiterführende Aspekte der Geometrietolerierung . . . . .</b>	<b>77</b>	<b>2.3 Übersicht der Verfahren . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>5</b>	<b>Validierung von Analyse-Software . . . . .</b>	<b>79</b>	<b>2.4 Fähigkeitsnachweise gemäß Firmenrichtlinie . . . . .</b>	<b>120</b>
	Markus Schmidt		2.4.1 Untersuchung gemäß Verfahren 1 . . . . .	122
5.1	Testbeispiele . . . . .	83	2.4.2 Untersuchung gemäß Verfahren 2 . . . . .	125
5.2	AIAG-Testbeispiel Ermittlung R&R (ANOVA) . . . . .	83	<b>2.5 Fähigkeitsuntersuchung gemäß MSA . .</b>	<b>128</b>
5.3	ISO/TR 11462-4 . . . . .	84	2.5.1 Unterschiede zu Firmenrichtlinien . . . . .	128
<b>6</b>	<b>Vom EMPB zum exzellenten Produktentstehungsprozess . . . . .</b>	<b>91</b>	2.5.2 Systematische Messabweichungs-(Bias-) und Linearitätsstudie . . . . .	128
	Stefan Weber		2.5.3 Wiederhol- und Vergleichspräzision %GRR	129
6.1	Einführung . . . . .	93	2.5.4 Anzahl unterscheidbarer Kategorien . . . . .	129
6.1.1	Erstbemusterung im Automotive-Umfeld . .	93	<b>2.6 Eignungsnachweis gemäß VDA 5 bzw. ISO 22514-7 . . . . .</b>	<b>129</b>
6.1.2	Definition . . . . .	93	2.6.1 Definition von Messsystem und -prozess . .	129
6.2	EMPB – der Garant für hohe Produktqualität . . . . .	93	2.6.2 Schematisierte Vorgehensweise . . . . .	130
6.2.1	Erstbemusterung in analogen Zeiten . . . . .	94	2.6.3 Minimale Toleranz . . . . .	132
6.2.2	Der digitale Erstmusterprüfbericht . . . . .	94	2.6.4 Formeln zu den Kennwerten . . . . .	132
6.2.3	Fokussierte Kommunikation in der Lieferkette . . . . .	94	<b>2.7 Vergleich von Firmenrichtlinien, MSA mit VDA 5 bzw. ISO 22514-7 . . . . .</b>	<b>135</b>
6.3	EMPB im Kontext des Produktentstehungsprozesses . . . . .	96		
6.4	Grenzen verschieben – ein Ausblick . . . . .	98		

2.8	Sonderfälle .....	139	4.3	Herausforderungen – Einzigartigkeit und Komplexität .....	167
2.9	Zusammenfassung .....	139	4.4	Generelles Vorgehen beim Eignungsnachweis .....	167
<b>3</b>	<b>Eignung attributiver Prüfprozesse ..</b>	<b>141</b>	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 Unsicherheitsfortpflanzung .....	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 Eignungsnachweises .....	178
3.3.4.2	Fallbeispiel: Signifikanztest für Kappa-Koeffizienten .....	154	<b>5</b>	<b>Koordinatenmesssysteme in der digitalen Produktion .....</b>	<b>181</b>
3.3.4.3	Bewertung des Prüfprozesses .....	155		Dietrich Imkamp	
3.4	Prüfsystem-Effektivität .....	155	5.1	Grundlagen der Koordinatenmesstechnik .....	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	Kenngößen 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			
<b>4</b>	<b>Eignungsnachweis von Prüfständen</b>	<b>163</b>			
	Philipp Jatzkowski				
4.1	Prüfstände – Rückgrat der industriellen Produktion .....	166			
4.2	Motivation für den Eignungsnachweis ..	166			



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
<b>1.9</b>	<b>Koordinatenmessungen</b>	<b>264</b>	<b>3.3</b>	<b>Röntgen-Computertomografie</b>	<b>306</b>
1.9.1	2D-Messmaschinen	265	<b>3.4</b>	<b>Taktile Sensoren</b>	<b>308</b>
1.9.1.1	Messmikroskop	265	3.4.1	Taktilelektrische Sensoren	308
1.9.1.2	Profilprojektor	267	3.4.2	Taktiloptische Mikrotaster	308
1.9.2	3D-Koordinatenmessgerät (KMG)	268	3.4.3	Taktiloptische Kontursensoren	309
1.9.2.1	Prinzip des 3D-KMG	268	<b>3.5</b>	<b>Gerätebauweisen</b>	<b>310</b>
1.9.2.2	Konstruktion von 3D-KMGs	269	<b>3.6</b>	<b>Multisensorintegration</b>	<b>312</b>
1.9.2.3	Spezifikation und Leistungsüberprüfung von KMGs	271	<b>3.7</b>	<b>Anwendung von Multisensorik</b>	<b>313</b>
<b>2</b>	<b>Taktile Messtechnik – die Referenz?</b>	<b>273</b>	<b>3.8</b>	<b>Messsoftware</b>	<b>315</b>
	Harald Bosse, Karin Kniel		<b>4</b>	<b>Automatische Dichtheitsprüfung in der Serienfertigung</b>	<b>319</b>
<b>2.1</b>	<b>Definition und Weitergabe der SI-Einheiten</b>	<b>275</b>		Alexander Stratmann	
2.1.1	Einführung	275	<b>4.1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>322</b>
2.1.2	Die Längeneinheit Meter	276	4.1.1	Grundbegriffe	322
2.1.3	Weitere SI-Einheiten	277	4.1.2	Leckströmung	325
<b>2.2</b>	<b>Der Weg zum vergleichbaren Messen</b>	<b>278</b>	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	<b>4.2</b>	<b>Qualitätsmethoden</b>	<b>329</b>
<b>2.3</b>	<b>3D-Koordinatenmesssysteme</b>	<b>286</b>	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
<b>2.4</b>	<b>Alles eine Frage der Genauigkeit?</b>	<b>290</b>	<b>4.3</b>	<b>Leckprüfverfahren</b>	<b>333</b>
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
<b>2.5</b>	<b>Ein Beispiel: Verzahnungsmesstechnik</b>	<b>292</b>	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	<b>4.4</b>	<b>Addendum</b>	<b>346</b>
<b>3</b>	<b>Multisensor-Koordinaten- messtechnik</b>	<b>299</b>	<b>5</b>	<b>Härteprüfung in der praktischen Anwendung</b>	<b>349</b>
	Ralf Christoph, Schirin Heidari Bateni			Febo Menelao	
<b>3.1</b>	<b>Sensorsystematik</b>	<b>301</b>	<b>5.1</b>	<b>Die Verfahren nach Rockwell, Brinell und Vickers kurz vorgestellt</b>	<b>351</b>
<b>3.2</b>	<b>Optische Sensoren</b>	<b>303</b>	<b>5.2</b>	<b>Zusammenhang zwischen Brinell- und Vickers-Härtetest</b>	<b>353</b>

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

<b>8.14</b>	<b>„Batwings“</b> .....	<b>438</b>	<b>9.4.1</b>	<b>Röntgenröhre</b> .....	<b>478</b>
<b>8.15</b>	<b>Räumliche topografische Strukturauflösung</b> .....	<b>440</b>	9.4.1.1	Reflexions- und Transmissionstargets ....	479
<b>8.16</b>	<b>Schnelle und zuverlässige Qualitätskontrolle: Einsatz von Weißlichtinterferometern in der Produktionsüberwachung und Qualitätssicherung</b> .....	<b>446</b>	9.4.1.2	Elektronenstrahlerzeugung und -fokussierung .....	480
<b>8.17</b>	<b>Beispiele von Anwendungen für mikroskopische und telezentrisch aufgebaute Weißlichtinterferometer</b> ....	<b>450</b>	9.4.1.3	Reduzierung von Betriebskosten .....	481
<b>8.18</b>	<b>Ausgewählte Applikationen für den Einsatz von Weißlichtinterferometern</b> ..	<b>452</b>	9.4.2	Drehachse .....	482
<b>9</b>	<b>Computertomografie in der Koordinatenmesstechnik</b> .....	<b>459</b>	9.4.3	Röntgendetektor .....	482
	Raoul Christoph, Marc Kachelrieß		9.4.3.1	Indirekte Detektion nach dem Szintillationsprinzip .....	482
<b>9.1</b>	<b>Funktionsprinzip der Röntgen-Computertomografie</b> .....	<b>462</b>	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	<b>9.5</b>	<b>Messabweichungen: Verursachende Effekte und Korrektur</b> .....	<b>485</b>
<b>9.2</b>	<b>Auswertung für industrielle Anwendungen</b> .....	<b>466</b>	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	<b>9.6</b>	<b>Spezielle Tomografieverfahren</b> .....	<b>488</b>
9.2.4	Gemeinsame Lösung von Inspektions- und Messaufgaben .....	474	9.6.1	Messzeit oder Rauschen reduzieren mittels OnTheFly-Tomografie .....	488
<b>9.3</b>	<b>Abbildungsgeometrie</b> .....	<b>474</b>	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	<b>9.7</b>	<b>Messgenauigkeit</b> .....	<b>492</b>
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
<b>9.4</b>	<b>Gerätetechnik und Bauformen</b> .....	<b>478</b>	9.7.1.2	Längenmessabweichung .....	492
			9.7.2	Messunsicherheitsbestimmung .....	493
			<b>9.8</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>494</b>
			9.8.1	Photonenzählende Detektoren .....	494
			9.8.2	Artefaktkorrektur mittels künstlicher Intelligenz .....	495
			<b>10</b>	<b>Bildverarbeitung</b> .....	<b>499</b>
				Ralf Christoph, Schirin Heidari Bateni	
			<b>10.1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>501</b>
			<b>10.2</b>	<b>Abbildung</b> .....	<b>501</b>

<b>10.3</b>	<b>Beleuchtung</b> .....	<b>504</b>	<b>12.4</b>	<b>Messverfahren</b> .....	<b>551</b>
<b>10.4</b>	<b>Kamera</b> .....	<b>506</b>	12.4.1	Bildmessung .....	551
<b>10.5</b>	<b>Messsoftware</b> .....	<b>507</b>	12.4.1.1	Messung von Zielmarken .....	551
<b>10.6</b>	<b>Auflösung</b> .....	<b>510</b>	12.4.1.2	Messung von natürlichen Merkmalen ....	552
<b>10.7</b>	<b>Integration in Koordinatenmessgeräte</b> ..	<b>511</b>	12.4.1.3	Präzise Messung von Oberflächenmustern	552
<b>11</b>	<b>Lasertracker</b> .....	<b>517</b>	12.4.1.4	Streifen- und Musterprojektionsverfahren	553
	Raimund Loser		12.4.2	Orientierung .....	554
<b>11.1</b>	<b>Genauigkeitsanforderung als Entwicklungsgrundlage</b> .....	<b>519</b>	12.4.2.1	Orientierungsverfahren .....	554
<b>11.2</b>	<b>Funktionsprinzip des Lasertrackers</b> ...	<b>520</b>	12.4.2.2	Epipolargeometrie .....	555
<b>11.3</b>	<b>Lasertracker mit Absolutdistanz- messer (ADM)</b> .....	<b>522</b>	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
<b>11.4</b>	<b>Kalibrierung und Systemparameter</b> ....	<b>525</b>	12.4.3	3D-Berechnung .....	557
<b>11.5</b>	<b>Bestimmung des Referenzpunktes (Nullpunktdistanz oder Additions- konstante)</b> .....	<b>527</b>	<b>12.5</b>	<b>Genauigkeit und Verifizierung</b> .....	<b>558</b>
<b>11.6</b>	<b>Einfluss der Atmosphäre</b> .....	<b>528</b>	12.5.1	Kenngößen .....	558
<b>11.7</b>	<b>Lasertrackererweiterung zur 6D-Datenerfassung</b> .....	<b>529</b>	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	<b>12.6</b>	<b>Anwendungen und Messsysteme</b> .....	<b>561</b>
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
<b>11.8</b>	<b>Neueste Generationen von Lasertrackern</b> .....	<b>537</b>	12.6.1.4	Formerfassung durch Structure- from-Motion .....	563
<b>12</b>	<b>Photogrammetrie</b> .....	<b>541</b>	12.6.2	Online-Photogrammetrie .....	565
	Thomas Luhmann		12.6.2.1	Mobile Systeme zur Fertigungskontrolle ..	565
<b>12.1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>543</b>	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
<b>12.2</b>	<b>Aufnahmetechnik</b> .....	<b>545</b>	12.6.2.5	Integrierte Messzellen .....	568
12.2.1	Kamerasysteme .....	546	<b>13</b>	<b>Optische Kohärenztomografie</b> .....	<b>571</b>
12.2.2	Beleuchtung und Signalisierung .....	547		Niels König, Fabian Hübenthal (†), Max Riediger, Alfredo Velazquez, Charlotte Stehmar	
<b>12.3</b>	<b>Kamerakalibrierung</b> .....	<b>549</b>	<b>13.1</b>	<b>OCT-Technologie</b> .....	<b>573</b>
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
			<b>13.2</b>	<b>Optische Kohärenztomografie in der Fertigungsmesstechnik</b> .....	<b>582</b>
			13.2.1	Laserprozesskontrolle .....	584
			13.2.2	OCT für die zerstörungsfreie Prüfung ....	586
			<b>14</b>	<b>Laserradar</b> .....	<b>589</b>
				Alexander Schönberg	
			<b>14.1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>591</b>

14.1.1	Einordnung	591	15.4.2	Roboterassistierte Ultraschallmesszelle mit adaptiver Messkopfausrichtung	626
14.1.2	Messprinzip	591	15.4.3	Automatisierte Prüfung von Falzklebeverbindungen mit Ultraschall	627
<b>14.2</b>	<b>Komponenten</b>	<b>593</b>	<b>16</b>	<b>Thermografie</b>	<b>629</b>
14.2.1	Distanzmessung	593		Dominik Wolfschläger, Niels Holtmann, Thomas Zweschper	
14.2.2	Azimet und Elevation	594	<b>16.1</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>631</b>
14.2.3	Prozesskamera	595	<b>16.2</b>	<b>Thermografiekameras</b>	<b>633</b>
14.2.4	Referenzierung	595	<b>16.3</b>	<b>Anregungssignale und Auswertemethoden</b>	<b>634</b>
14.2.5	Sensorpositionierung	597	16.3.1	Lock-in-Thermografie	635
14.2.6	Bauteilpositionierung	598	16.3.2	Pulsthermografie	636
<b>14.3</b>	<b>Kalibrierung</b>	<b>599</b>	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
<b>14.4</b>	<b>Messverfahren</b>	<b>601</b>	<b>16.4</b>	<b>Anregungsquellen</b>	<b>640</b>
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
<b>14.5</b>	<b>Genauigkeit und Verifizierung</b>	<b>606</b>	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	<b>16.5</b>	<b>Thermografie-Systeme in der Produktion</b>	<b>644</b>
14.5.3	Wiederholbarkeits-Tests	607	<b>17</b>	<b>Messen auf Werkzeugmaschinen</b>	<b>647</b>
14.5.4	Prüfprozesseignung	608		Maximilian Macha, Philipp Dahlem	
14.5.5	Korrelation und Vergleichbarkeit	608	<b>17.1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>649</b>
<b>14.6</b>	<b>Anwendungen und Integrationsgrade</b>	<b>609</b>	<b>17.2</b>	<b>Anwendungsfälle für On-Machine-Messungen</b>	<b>650</b>
<b>15</b>	<b>Industrielle Ultraschallmesstechnik</b>	<b>613</b>	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
<b>15.1</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>615</b>	17.2.3	Endkontrolle des Werkstücks in der Aufspannung	651
15.1.1	Schallwellen	615	<b>17.3</b>	<b>Messsystemtypen für Werkzeugmaschinen</b>	<b>653</b>
15.1.2	Schallfeldgeometrie	616	17.3.1	Standardmesstaster	654
<b>15.2</b>	<b>Ultraschallmessverfahren</b>	<b>617</b>	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
<b>15.3</b>	<b>Analyse der Ultraschallmessdaten</b>	<b>620</b>	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			
<b>15.4</b>	<b>Automatisierung der Ultraschallmesstechnik</b>	<b>624</b>			
15.4.1	Roboterassistierte Ultraschallmesszelle mit integrierter 3D-Geometriemessung	625			

17.3.7	Datenübertragung von Messtaster zu Empfängereinheit .....	659	<b>2</b>	<b>Datenformate .....</b>	<b>691</b>
				Michael Wagner	
<b>17.4</b>	<b>Qualifizierung von Messungen auf Werkzeugmaschinen .....</b>	<b>660</b>	<b>2.1</b>	<b>Allgemeine Hinweise .....</b>	<b>693</b>
17.4.1	Begrifflichkeiten der Wiederholgenauigkeit, Pre-Travel (Lobing) und 3D-Error .....	661	<b>2.2</b>	<b>Die Bedeutung von Datenformaten in der Smart Factory .....</b>	<b>693</b>
17.4.1.1	Wiederholpräzision/-genauigkeit .....	661	<b>2.3</b>	<b>Datenformate im Überblick .....</b>	<b>693</b>
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
<b>17.5</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>669</b>	2.3.3	Advanced Quality Data Exchange Format (AQDEF) .....	697
			2.3.4	Quality Markup Language .....	702
			<b>2.4</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>703</b>
<b>TEIL IV</b>	<b>Messdaten verarbeiten, verteilen, nutzen .....</b>	<b>671</b>	<b>3</b>	<b>Von der Wareneingangsprüfung bis zur End-of-Line-Prüfung in der Montage .....</b>	<b>705</b>
				Horst Lang, Achim Huberty	
<b>1</b>	<b>Messdaten verarbeiten, verteilen, nutzen – aktuelle Entwicklungen ....</b>	<b>673</b>	<b>3.1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>707</b>
	Benjamin Montavon, Matthias Bodenbenner		<b>3.2</b>	<b>Wareneingangsprüfung/ Prozessdokumentation bei Lieferanten .....</b>	<b>707</b>
<b>1.1</b>	<b>Messdaten und ihre Rolle in der Industrie 4.0 .....</b>	<b>675</b>	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	<b>3.3</b>	<b>Laufende Fertigungsüberwachung und deren Voraussetzungen .....</b>	<b>712</b>
1.1.3	Anforderungen .....	678	3.3.1	Beschaffung von Fertigungseinrichtungen für einen beschriebenen Herstellungsprozess .....	712
<b>1.2</b>	<b>Dezentralisierung der Messdatenerzeugung, -verarbeitung und -nutzung .....</b>	<b>679</b>	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
<b>1.3</b>	<b>Aktuelle Entwicklungen .....</b>	<b>683</b>	<b>3.4</b>	<b>Montageendprüfung/Funktionsprüfung .....</b>	<b>718</b>
1.3.1	Modelle für Messdaten .....	683	<b>3.5</b>	<b>Auszug möglicher Standardgeräte für den Einsatz im Produktionsumfeld ....</b>	<b>719</b>
1.3.1.1	SensOr Interfacing Language (SOIL) ....	683	<b>4</b>	<b>SPC für kleine Losgrößen und Einzelfertigung .....</b>	<b>723</b>
1.3.1.2	Verwaltungsschale – Asset Administration Shell .....	683		Wolfgang Schultz	
1.3.1.3	Das digitale Kalibrierzertifikat (DCC) ....	684	<b>4.1</b>	<b>Die Bedeutung von SPC in der industriellen Produktion .....</b>	<b>725</b>
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	<b>Ansätze für SPC bei kleinen Stückzahlen</b> .....	728	5.5	<b>Der Wert von Messdaten</b> .....	760
4.3	<b>Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Prozessen</b> .....	735	<b>6</b>	<b>Predictive Maintenance – wie KI den Betrieb von Produktionssystemen revolutionieren kann</b> .....	<b>763</b>
4.4	<b>Fazit</b> .....	739		Martin Peterek	
<b>5</b>	<b>Erfassung von Messdaten</b> .....	<b>741</b>	6.1	<b>Einleitung</b> .....	765
	Thomas Froese		6.2	<b>Advanced Analytics in produzierenden Unternehmen</b> .....	765
5.1	<b>Einführung</b> .....	743	6.3	<b>Anwendungsbeispiel Messsysteme</b> .....	766
5.2	<b>Speicherung von Messdaten</b> .....	743	6.4	<b>Anwendungsbeispiel Werkzeugmaschinen und Roboterkinematiken</b> ...	768
5.2.1	Kurzzeitige Speicherung im PLS oder im Labor .....	743	6.5	<b>Handlungsempfehlungen für die Praxis</b>	769
5.2.2	Schnittstellen .....	744	<b>7</b>	<b>Einführung in Predictive Quality</b> .....	<b>771</b>
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	<b>Digitale Transformation zur Befähigung zukunftsfähiger Produktionssysteme</b> ..	774
5.2.5	Bereitstellung und Verteilung von Messdaten .....	745	7.1.1	Der digitale Wandel .....	774
<b>5.3</b>	<b>Bereinigung und Bewertung von Messdaten</b> .....	<b>746</b>	7.1.2	Erfolgsfaktoren für zukunftsfähige Produktionssysteme .....	775
5.3.1	Messdatenvalidierung .....	746	<b>7.2</b>	<b>Zukunftsfähige Produktionssysteme durch Predictive Quality</b> .....	<b>776</b>
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	<b>7.3</b>	<b>Potenziale und Ausblick</b> .....	<b>783</b>
5.3.2	Vollständigkeit und Nutzbarkeit von Daten/SIPOC .....	748	<b>8</b>	<b>Process Mining</b> .....	<b>785</b>
5.3.3	Datenbereinigung .....	749		Jimmy Chhor, Simon Cramer, Max Ellerich, Markus Ohlenforst	
5.3.4	Umgang mit stochastischem Rauschen ...	750	8.1	<b>Einordnung von Analysetechniken</b> .....	787
5.3.5	Produktverfolgung und Fingerprinting in Datensätzen .....	750	8.2	<b>Data Mining und Process Mining</b> .....	788
5.3.5.1	Produktverfolgung in Fertigungsverfahren	750	8.3	<b>Grundlagen zu Process Mining</b> .....	789
5.3.5.2	Produktverfolgung in kontinuierlichen Prozessen .....	750	8.4	<b>Datenquellen für Process Mining in Unternehmen</b> .....	791
5.3.5.3	Batchfingerprinting .....	751	8.5	<b>Fallstudie in der Produktion</b> .....	792
5.3.6	Von Big Data zu Smart Data .....	752	8.6	<b>Herausforderungen für den Einsatz in der Produktion</b> .....	794
<b>5.4</b>	<b>Nutzung von Messdaten</b> .....	<b>753</b>	8.7	<b>Ausblick</b> .....	<b>795</b>
5.4.1	Analyse einzelner Zeitreihen .....	753	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>797</b>	
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			