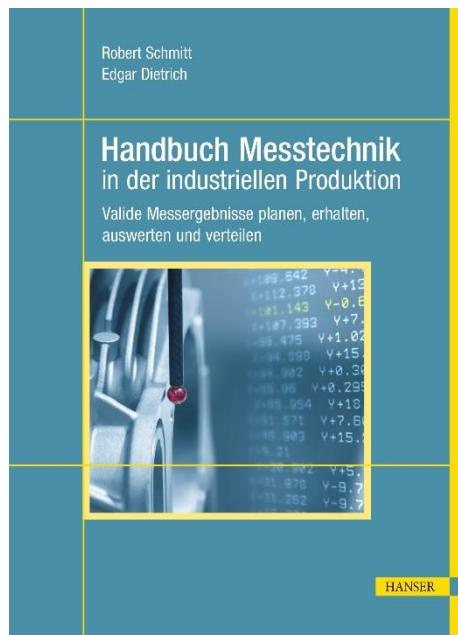


HANSER



Leseprobe

zu

Handbuch Messtechnik in der industriellen Produktion

von Robert Schmitt (Hrsg.) und Edgar Dietrich (Hrsg.)

Print-ISBN: 978-3-446-46559-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46626-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446465596>
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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
1.3 Nutzung von Messdaten in der Produktion	8	3.2.2.3	Adaption der Prüffrequenz	29
1.3 Nutzung von Messdaten in der Produktion	8	3.2.2.4	Festlegung der Prüfmittelüberwachung, Kalibrierung und Rückführung	31
1.3 Nutzung von Messdaten in der Produktion	8	3.2.2.5	Festlegung der Prüfdatenerfassung und -auswertung	31
2 Prüfplanung	11	3.2.2.6	Adaption weiterer in der Prüfplanung berücksichtigter Schritte	34
Robert Hofmann, Sophie Gröger, Anika Süß		3.3	Zusammenfassung und Ausblick	34
2.1 Definition und Ziele	13	3.4	Danksagung	35
2.2 Grundlegende Begriffe	13	4	Geometrische Produktspezifikation – vom Konstruktionsmerkmal zur Messgröße	37
2.3 Messen und Prüfen im Produktleben – Prüfzwecke	14	4.1	Gunter Effenberger	
2.4 Ablauf der Prüfplanung	15	4.1	Aufbau des Normensystems für die geometrische Produktspezifikation	40
2.4.1 Auftrag und Prüfobjekt	16	4.2	Grundregeln der geometrischen Produktspezifikation	42
2.4.2 Prüfmerkmalsdefinition	16	4.3	Größenmaße – Bemaßung und Tolerierung	47
2.4.3 Fertigungsintegration, Prüfumfang, Prüfort und -mittel	17			
2.4.4 Prüfmittelüberwachung, -kalibrierung und -rückführung, Eignungsnachweis	19			
2.4.5 Dokumentation und Weiterverarbeitung der Daten	20			
2.4.6 Reaktionspläne, Prüfplanüberwachung, Freigabe	20			

4.3.1	Größenmaßelemente und Größenmaße ...	47	TEIL II Geeignete Mess- und Prüfmittel einsetzen	101
4.3.2	Tolerierungskonzept Hüllbedingung	52		
4.3.3	Spezifizieren von Größenmaßelementen ...	54		
4.3.3.1	Auswahl von Größenmaßmerkmalen	54	1 Bedeutung von Mess- und Prüfmitteln	103
4.3.3.2	Festlegung von Grenzmaßen und Toleranzen für Größenmaße	54	Stephan Conrad	
4.4	Form, Richtung, Ort und Lauf geometrischer Elemente	56	1.1 Sinneswandel zur Relevanz von Mess- und Prüfprozessen	105
4.4.1	Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen – Angabe in Zeichnungen	58	1.2 Auswirkungen der Produkthaftung 105	
4.4.2	Formtoleranzen	60	1.3 Was sind Mess- und Prüfmittel? 106	
4.4.3	Bezug und Bezüge	61	1.4 Normative Anforderungen	107
4.4.4	Richtungstoleranzen	63		
4.4.5	Bezugssystem	66	1.5 Referenzhandbücher für die Beurteilung von Messsystemen	109
4.4.6	Ortstoleranzen	69	AIAG Core Tool Measurement System Analysis (MSA)	109
4.4.6.1	Position, Koaxialität, Symmetrie	69	VDA Band 5 „Mess- und Prüfprozesse – Eignung, Planung und Management“	109
4.4.6.2	Linien- und Flächenprofil	71		
4.4.7	Lauftoleranzen	73	1.6 Firmenrichtlinien	110
4.4.7.1	Rundlauf – radial	73		
4.4.7.2	Rundlauf – axial	74	1.7 Beschaffung von Mess- und Prüfmitteln 111	
4.4.7.3	Rundlauf in spezifizierter Richtung	75	Prüfmittelbeschaffung	112
4.4.7.4	Gesamtrundlauf – radial	75	Exemplarische Inhalte eines Lastenhefts ..	112
4.4.8	Allgemeintoleranzen für Form und Lage ..	76		
4.5	Weiterführende Aspekte der Geometrietolerierung	77		
5	Validierung von Analyse-Software ...	79	2 Eignungsnachweise für Messprozesse	115
	Markus Schmidt		Edgar Dietrich	
5.1	Testbeispiele	83	2.1 Einleitung	118
5.2	AIAG-Testbeispiel Ermittlung R&R (ANOVA)	83	2.2 Anforderungen	119
5.3	ISO/TR 11462-4	84	2.3 Übersicht der Verfahren	120
6	Vom EMPB zum exzellenten Produktentstehungsprozess	91	2.4 Fähigkeitsnachweise gemäß Firmenrichtlinie	120
	Stefan Weber		Untersuchung gemäß Verfahren 1	122
6.1	Einführung	93	Untersuchung gemäß Verfahren 2	125
6.1.1	Erstbemusterung im Automotive-Umfeld ..	93	2.5 Fähigkeitsuntersuchung gemäß MSA ..	128
6.1.2	Definition	93	Unterschiede zu Firmenrichtlinien	128
6.2	EMPB – der Garant für hohe Produktqualität	93	Systematische Messabweichungs-(Bias-) und Linearitätsstudie	128
6.2.1	Erstbemusterung in analogen Zeiten	94	Wiederhol- und Vergleichspräzision %GRR	129
6.2.2	Der digitale Erstmusterprüfbericht	94	Anzahl unterscheidbarer Kategorien	129
6.2.3	Fokussierte Kommunikation in der Lieferkette	94	2.6 Eignungsnachweis gemäß VDA 5 bzw. ISO 22514-7	129
6.3	EMPB im Kontext des Produktentstehungsprozesses	96	Definition von Messsystem und -prozess ..	129
6.4	Grenzen verschieben – ein Ausblick ...	98	Schematisierte Vorgehensweise	130
			Minimale Toleranz	132
			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		Beschreibung/Dokumentation des Prüfprozesses	168
	Autorenkollektiv			Identifikation der Einflussgrößen im Ishikawa-Diagramm	169
3.1	Beispieldaten	143		Ableiten des Parameterraums	169
3.2	Kappa-Koeffizient nach Jacob Cohen ..	144		Modellbildung und Unsicherheitsfortpflanzung	170
3.2.1	Rechenschema für den Kappa-Koeffizienten nach Cohen	144	4.4.1	Experimenteller Ansatz – GUM Typ A ..	172
3.2.2	Rechenschema für den Signifikanztest ..	146		Identifikation der Einflussgrößen	172
3.2.3	Annahmekriterien für Kappa nach Cohen ..	147		Ableiten des Parameterraums	173
3.2.4	Fallbeispiel: Vergleich Prüfer versus Prüfer	147		Modellbildung	173
3.2.4.1	Fallbeispiel: Bestimmen des Kappa-Koeffizienten nach Cohen	147		Unsicherheitsfortpflanzung	174
3.2.4.2	Fallbeispiel: Signifikanztest für den Kappa-Koeffizienten	149	4.5	Nicht experimenteller Ansatz – GUM Typ B ..	175
3.2.4.3	Bewertung des Prüfprozesses	150		Modellbildung	175
3.3	Kappa-Koeffizient nach Joseph L. Fleiss ..	150		Ermittlung der Eingangsgrößen	175
3.3.1	Rechenschema für den Kappa-Koeffizienten nach Fleiss	150		Unsicherheitsfortpflanzung mittels Varianzfortpflanzung	176
3.3.2	Rechenschema für den Signifikanztest ..	152		Unsicherheitsfortpflanzung mittels Monte-Carlo-Simulation	177
3.3.3	Annahmekriterien für Kappa nach Fleiss	153	4.6	Vor- und Nachteile von experimenteller und nicht experimenteller Ermittlung der Messunsicherheit	177
3.3.4	Fallbeispiel: Vergleichbarkeit der Prüferurteile	153	4.7	Eignungsnachweis bei attributivem Prüfergebnis	178
3.3.4.1	Bestimmen des Kappa-Koeffizienten nach Fleiss	153	4.8	Dokumentation des Eignungsnachweises	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 Koordinatenmesstechnik	184
3.4.1	Rechenschema zur Prüfsystem-Effektivität	155		Koordinatenmessgeräte und ihre Sensoren	185
3.4.2	Fallbeispiel zur Prüfsystem-Effektivität ..	155		Koordinatenmesssysteme	189
3.4.3	Annahmekriterien für die Prüfsystem-Effektivität	157		Kenngrößen für die Prüfung von Koordinatenmessgeräten und -systemen ..	192
3.4.4	Bewertung des Prüfprozesses	159		Software für Koordinatenmessgeräte und -systeme	194
3.5	Signalerkennung	159	5.1.4		
3.5.1	Fallbeispiel Signalerkennung	159	5.2	Koordinatenmesstechnik in der Produktion zur Qualitätsprüfung	196
3.5.2	Ermittlung der Kenngröße %GRR	160		Organisatorische Einordnung der Qualitätsprüfung	196
3.5.3	Bewertung des Prüfprozesses	161	5.2.1		
4	Eignungsnachweis von Prüfständen ..	163			
	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
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	Taktil-elektrische Sensoren	308
1.9.1.2	Profilprojektor	267	3.4.2	Taktil-optische Mikrotaster	308
1.9.2	3D-Koordinatenmessgerät (KMG)	268	3.4.3	Taktil-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				
2.1	Definition und Weitergabe der SI-Einheiten	275	4	Automatische Dichtheitsprüfung in der Serienfertigung	319
2.1.1	Einführung	275		Alexander Stratmann	
2.1.2	Die Längeneinheit Meter	276	4.1	Einleitung	322
2.1.3	Weitere SI-Einheiten	277	4.1.1	Grundbegriffe	322
2.2	Der Weg zum vergleichbaren Messen .. 278		4.1.2	Leckströmung	325
2.2.1	Prinzip der messtechnischen Rückführung	278	4.1.3	Anwendungen und Ergänzungen	326
2.2.2	Bedeutung der Messunsicherheit	280	4.1.3.1	Ableitung gasförmiger Leckagerate aus flüssigem Anwendungsfall	326
2.2.3	Ermittlung der Messunsicherheit	280	4.1.3.2	Ableitung gasförmige Leckagerate aus massebezogenem Grenzwert	328
2.2.4	Normale für die Industrie	283	4.1.3.3	Temperatur und Wärmeeinfluss	328
2.3	3D-Koordinatenmesssysteme	286	4.2	Qualitätsmethoden	329
2.3.1	Taktile Sensorik – seit Jahrzehnten bewährt	286	4.2.1	Messprozessfähigkeitsuntersuchung	329
2.3.2	CT, optische und Multi-Sensorik – auf dem Vormarsch	288	4.2.2	Referenztestleck/Normal	331
2.4	Alles eine Frage der Genauigkeit? .. 290		4.2.3	Prüfstandsregelbetrieb	332
2.4.1	Vergleich der Vorteile und Grenzen der Sensorarten	290	4.3	Leckprüfverfahren	333
2.4.2	Taktile Messtechnik als Referenz auf dem Prüfstand	291	4.3.1	Druckmessmethoden	334
2.5	Ein Beispiel: Verzahnungsmesstechnik 292		4.3.2	Durchflussmessmethoden	338
2.5.1	Normgerechte Zahnradmessungen	292	4.3.3	Spurengasleckprüfung	341
2.5.2	Messtechnische Herausforderungen: Mikro- und Großverzahnungen	292	4.3.3.1	Heliumleckprüfung	342
2.5.3	Neue Wege und deren Verifizierung	295	4.3.3.2	Wasserstoff- bzw. Formiergasleckprüfung	345
3	Multisensor-Koordinatenmesstechnik	299	4.4	Addendum	346
	Ralf Christoph, Schirin Heidari Bateni		5	Härteprüfung in der praktischen Anwendung	349
3.1	Sensorsystematik	301		Febo Menelao	
3.2	Optische Sensoren	303	5.1	Die Verfahren nach Rockwell, Brinell und Vickers kurz vorgestellt	351
			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
			7.1.4	Vor- und Nachteile der Automatisierung ..	387
			7.1.5	Sichtprüfung im Kontext von Industrie 4.0	388
5.4	Vor- und Nachteile unterschiedlicher Härtemessverfahren	354	7.2	Fallbeispiel – Automatisierte Farbeindringprüfung in der Gasturbinenindustrie ..	390
5.5	Umwertung von Härtewerten	355	7.2.1	Grundlagen der Farbeindringprüfung	391
5.6	Unsicherheit bei der Umwertung	355	7.2.2	Automatisierte Oberflächenrisserkennung bei der Farbeindringprüfung an Turbinenleitschaufeln	393
6	Messtechnik in der Schraubtechnik 357		7.2.3	Bestimmung der Messunsicherheiten nach VDA 5	400
	Niels Rabbe		7.2.4	Zusammenfassung und Ausblick	401
6.1	Einführung in die Schraubtechnik	359	7.3	Zusammenfassung	401
6.2	Schraubwerkzeuge	362	8	Weißlichtinterferometrie	405
6.2.1	Der Drehmomentschlüssel	362		Wilfried Bauer	
6.2.2	Motorisch betriebenes Schraubwerkzeug mit Abschaltkupplung	363	8.1	Einleitung	407
6.2.3	Impulsschrauber	363	8.2	Kohärenz, konstruktive und destruktive Interferenzen	408
6.2.4	Motorisch betriebenes Schraubwerkzeug mit Drehmoment oder mit Drehmoment plus Drehwinkelsteuerung	364	8.3	Grundlagen der Interferometrie	408
6.2.5	Beispiel Drehwinkelmessung	365	8.3.1	Interferometrie mit monochromatischem Licht	408
6.2.6	Streckgrenzsteuerung	365	8.3.2	Grundlagen des Weißlichtinterferometers	411
6.2.7	Vorspannen von Schrauben durch Zugkraft	366	8.4	Auswertung der Messsignale und Korrelogramme	414
6.2.8	Vorspannen von Schrauben durch thermische Dehnung	367	8.5	Mikroskopischer und telezentrischer Strahlengang bei scannenden Weißlichtinterferometern	416
6.3	Prüfen von bereits montierten Schraubverbindungen	367	8.6	„Phaseshift“-Methode als Alternative zur Weißlichtinterferometrie	417
6.3.1	Klemmkraftsensoren	367	8.7	Beugungsbegrenztes laterales optisches Auflösungsvermögen nach Rayleigh oder Sparrow	418
6.3.2	Messung mittels Ultraschall	368	8.8	Messzeiten	422
6.3.3	Messung des Weiterdrehmoments	369	8.9	Messung an geneigten oder schrägen Flächen	422
6.4	Statische Kalibrierung von Schraubwerkzeugen	371	8.10	Messungen von Oberflächen, die aus unterschiedlichen Materialien bestehen	425
6.5	Prüfung von Schraubwerkzeugen	372	8.11	Mess- und Instrumenten-Rauschen	426
6.6	Prozessfähigkeitsprüfung von Schraubverbindungen	373	8.12	Eindeutigkeit des Strahlengangs und deren Störungen durch die Oberflächenstruktur	427
6.7	Rückführung auf das dynamische Drehmoment bei kontinuierlich rotierenden Schraubwerkzeugen	374	8.13	Bestimmung von Texturparametern mit Weißlichtinterferometern	433
6.8	Kompetenz in der Schraubtechnik	374			
7	Sichtprüfung	375			
	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	Abbildungsgemetrie	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 Drehschrittanzahl	478	9.7.1.1	Antastabweichung	492
9.4	Gerätetechnik und Bauformen	478	9.7.1.2	Längenmessabweichung	492
	Ralf Christoph, Schirin Heidari Bateni		9.7.2	Messunsicherheitsbestimmung	493
10	Bildverarbeitung	499	9.8	Ausblick	494
	Ralf Christoph, Schirin Heidari Bateni		9.8.1	Photonenzählende Detektoren	494
			9.8.2	Artefaktkorrektur mittels künstlicher Intelligenz	495
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 Entwicklunggrundlage	519	12.4.2.1	Orientierungsverfahren	554
11.2	Funktionsprinzip des Lasertrackers	520	12.4.2.2	Epipolareometrie	555
11.3	Lasertracker mit Absolutdistanzmesser (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 Phasenvergleichsverfahren	524	12.4.2.5	Koordinatensysteme	556
11.4	Kalibrierung und Systemparameter	525	12.4.3	3D-Berechnung	557
11.5	Bestimmung des Referenzpunktes (Nullpunkttdistanz oder Additionskonstante)	527	12.5	Genauigkeit und Verifizierung	558
11.6	Einfluss der Atmosphäre	528	12.5.1	Kenngrößen	558
11.7	Lasertrackererweiterung zur 6D-Datenerfassung	529	12.5.2	Prüfkörper und Normale	559
11.7.1	Funktionsweise des 6D-Lasertrackersystems	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	Kamerasyteme	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
14	Laserradar	589	13.2	Optische Kohärenztomografie in der Fertigungsmesstechnik	582
	Alexander Schönberg		13.2.1	Laserprozesskontrolle	584
14.1	Einführung	591	13.2.2	OCT für die zerstörungsfreie Prüfung	586

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. Kimmelmann, 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
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
TEIL IV	Messdaten verarbeiten, verteilen, nutzen	671	2.3.4	Quality Markup Language	702
1	Messdaten verarbeiten, verteilen, nutzen – aktuelle Entwicklungen	673	2.4	Ausblick	703
	Benjamin Montavon, Matthias Bodenbner		3	Von der Wareneingangsprüfung bis zur End-of-Line-Prüfung in der Montage	705
1.1	Messdaten und ihre Rolle in der Industrie 4.0	675		Horst Lang, Achim Huberty	
1.1.1	Der Lebenszyklus von Messdaten in der Industrie 4.0	676	3.1	Einleitung	707
1.1.2	Herausforderungen	677	3.2	Wareneingangsprüfung/ Prozessdokumentation bei Lieferanten	707
1.1.3	Anforderungen	678	3.2.1	Kurzzeitfähigkeitsuntersuchung	707
1.2	Dezentralisierung der Messdatenerzeugung,-verarbeitung und -nutzung	679	3.2.2	Vorabnahme beim Lieferanten	711
1.2.1	Nicht-monolithische Konzepte	679	3.3	Laufende Fertigungsüberwachung und deren Voraussetzungen	712
1.2.2	Separation of Concern	680	3.3.1	Beschaffung von Fertigungseinrichtungen für einen beschriebenen Herstellungsprozess	712
1.2.3	IoT-Infrastrukturen	681	3.3.2	Durchführung einer Vorabnahme beim Hersteller	712
1.3	Aktuelle Entwicklungen	683	3.3.3	Durchführung einer Abnahme beim Kunden	715
1.3.1	Modelle für Messdaten	683	3.3.4	Prüfprozesseignung der eingesetzten Messtechnik	715
1.3.1.1	SensOr Interfacing Language (SOIL)	683	3.3.5	Laufende Fertigungsüberwachung zur Dokumentation der Langzeitstabilität	716
1.3.1.2	Verwaltungsschale – Asset Administration Shell	683	3.4	Montageendprüfung/Funktionsprüfung	718
1.3.1.3	Das digitale Kalibrierzertifikat (DCC)	684	3.5	Auszug möglicher Standardgeräte für den Einsatz im Produktionsumfeld	719
1.3.2	Protokolle und Formate	684	4	SPC für kleine Losgrößen und Einzelfertigung	723
1.3.2.1	HTTP & REST-API	684		Wolfgang Schultz	
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			
	4.1	Die Bedeutung von SPC in der industriellen Produktion	725		

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 Produktionsystemen 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 Datenvielfältigung	747	7.2.3	Predictive-Quality-Ansatz zur Optimierung der Produktqualität am Beispiel eines Nutzfahrzeugherrschlers	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			

Danksagung

Dieses Handbuch konnte nur durch die fundierten Beiträge vieler Experten entstehen. Ihnen gebührt unser herzlicher Dank für die aufgebrachte Zeit und die Bereitschaft, ihren Erfahrungsschatz zu teilen. Ohne sie wäre es nicht möglich gewesen, ein Handbuch in dieser Form herauszubringen.

Weiterhin möchten wir uns recht herzlich bei Volker Herberg und Julia Stepp vom Carl Hanser Verlag bedanken, die sich um die durchgängige Betreuung von der Idee bis zur Veröffentlichung gekümmert haben.

Schlussendlich möchten wir noch Tobias Müller danken, der als Wissenschaftlicher Mitarbeiter die fachliche Koor-

dination der Autoren sowie die lehrstuhlseitige Betreuung des Handbuchs übernommen hat. Die Vorarbeiten von Christoph Voigtmann und Jonathan Greipel aufgreifend, hat Herr Müller mit großer Ausdauer und hohem Engagement die Inhalte vorangetrieben und das Handbuch zur Veröffentlichung gebracht.

Aachen/Birkenau, Mai 2023

*Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt
Dr. Ing. Edgar Dietrich*

Vorwort

Messtechnik ist die Quelle objektiv belastbarer Daten und der daraus gewonnenen Informationen. Das Vertrauen auf deren Aussagekraft hinsichtlich der Erfassung eines Sachverhalts ist die Währung, in der der Wert von Messergebnissen gehandelt wird. Vertrauen ist auch der Begriff, mit dem die Qualitätssicherung als elementarer Bestandteil des Qualitätsmanagements verbunden ist, nämlich in Bezug auf das Erzeugen von Vertrauen, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden.

Die Herausforderungen der stetigen oder gar ständigen Überprüfung aller Qualitätsanforderungen bei Prozessen und Produkten unter Fertigungsbedingungen sind zahlreich. Genau hier setzt dieses Handbuch an. Die industrielle Messtechnik wird als produktionsbegleitender, permanenter Prozess verstanden, bei dem unterschiedlichste Aufgaben erledigt werden müssen, um valide Messdaten zu erhalten, zu verwalten und zu analysieren. Mit diesem Buch möchten wir dazu beitragen, die erforderlichen technischen Grundlagen für eine effiziente, verlustarme, nachhaltige und perspektivisch zirkuläre Wertschöpfung zu vermitteln.

Das Handbuch ist in vier Teile gegliedert, die sich mit den folgenden Fragestellungen beschäftigen und entsprechende Lösungen aufzeigen:

- Wie müssen die Mess- und Prüfprozesse aussehen?
- Was ist zu tun, um stets geeignete Mess- und Prüfmittel verfügbar zu haben?
- Mit welchen Messverfahren lassen sich die erforderlichen Messdaten unter Produktionsbedingungen am besten gewinnen?
- Wie werden die Daten sinnvoll genutzt?

Jeder der vier Teile des Buches umfasst mehrere Kapitel, in denen jeweils einzelne Bestandteile der Fragestellungen aufgegriffen, analysiert und Lösungen in Form von Hinweisen für die Praxis geliefert werden. Durch die Beteiligung von über 60 Expertinnen und Experten aus diversen Unternehmen und Fachrichtungen können eine Vielzahl von Themen aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden und das faszinierende Spektrum der Messtechnik kann in voller Breite aufgespannt werden.

Ein besonderer Akzent des Buches liegt auf der Behandlung der Messtechnik als Datenquelle. Gerade im Rahmen von Industrie 4.0 gewinnt die massenweise, aber doch spezifische Generierung von Daten eine immer größere Bedeutung, die über die klassische, reaktive Qualitäts sicherung hinausgeht. Es wird dadurch effizienter möglich, die Daten zu verteilen und auszuwerten, wenn gleichzeitig die Datenqualität gewährleistet werden kann. Denn nur, wenn man weiß, welche Informationen dem System in welcher Qualität zur Verfügung stehen, kann man die daraus resultierenden Ergebnisse verwerten, z.B. um ein besseres Prozessverständnis zu bekommen, um Abläufe zu simulieren oder zu modellieren.

Die Idee, Handbücher als Leitfäden für die Praxis herauszugeben, hat sich bewährt. So wurde zum Beispiel in den 80er Jahren in vielen Firmen SPC (Statistical Process Control) eingeführt. Zur Beurteilung von Prüf- bzw. Messprozessen gab es jedoch so gut wie keine Vorgaben, keine Richtlinien oder Leitfäden von Verbänden wie dem Verband der Automobilindustrie (VDA) oder der Automotive Industry Action Group (AIAG). Auch Normen für diese Aufgabenstellung sind erst später entstanden. Viele Anwender von SPC mussten feststellen, dass bei der Beurteilung der Fertigungs- bzw. Produktionsprozesse ein Großteil der in den Messwerten beobachteten Streuung nicht dem Herstellungsprozess, sondern dem Messprozess anzulasten ist. Konsequenterweise hat man firmenintern Verfahrensanweisungen erstellt, anhand derer vor der Anwendung von SPC die Prüf- bzw. Messprozesse auf deren Eignung beurteilt wurden. Ohne konkrete Vorgaben seitens der Normung bzw. von Verbänden entstand jedoch ein gewisser, wenn auch in spezifischen Domänen nützlich erscheinender Wildwuchs von unterschiedlichen Vorgehensweisen. Diese nicht zufriedenstellende Inkompatibilität von unterschiedlichen Vorgehensweisen erschwerte die Anwendung in Unternehmen und auch die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette. Als Reaktion auf diese Situation entstand unter der Leitung der Firma Q-DAS ein Leitfaden zum Fähigkeitsnachweis von Messsystemen. Dieser Leitfaden führte die bestehenden Kenntnisse zusammen und bildete

als Handbuch eine Orientierungshilfe für praktische Anwendungen.

Ähnlich dem Leitfaden zum Fähigkeitsnachweis von Messsystemen orientiert sich auch dieses Handbuch schwerpunktmäßig an den in der Praxis auftretenden Problemen. Grundlagen werden dann einbezogen, wenn sie für fehlerfreies Arbeiten durch vertiefendes Verständnis unverzichtbar sind. Ziel dieses Handbuches ist es, relevante Messverfahren, wie sie in der industriellen Produktion verwendet werden, zu beschreiben, und unter gültigen Anforderungen Unterstützung für den realen Einsatz liefern.

Dementsprechend kann und will das Buch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sondern vielmehr Hilfestellungen für die Praxis anbieten, Neugier auf dieses faszinierende Gebiet wecken und nach Möglichkeit Impulse für weitere Entwicklungen geben. Den Herausgebern

sowie allen beteiligten Autorinnen und Autoren ist bewusst, dass nach Erscheinen dieses Buches kontinuierlich neue Messverfahren hinzukommen werden oder sich die Gewichtung ihrer Bedeutung im industriellen Umfeld ändern wird. Das gilt ebenso für das Normenumfeld, das sich mit der Zeit ändert. Daher sind wir für Anregungen und Ergänzungen jeder Art dankbar.

Wir hoffen, dass Ihnen dieses Buch ein hilfreiches Nachschlagewerk sein wird, in dem Sie Antworten auf Ihre Fragen, zahlreiche Inspirationen und viele gute Lösungsansätze finden werden, die dazu beitragen, die Messtechnik kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Aachen/Birkenau, Mai 2023

*Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt
Dr.-Ing. Edgar Dietrich*

Über die Herausgeber



Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt ist Inhaber des Lehrstuhls Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement. Er ist Direktor des WZL der RWTH Aachen und Direktor am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT. Er engagiert sich unter anderem in der Deutschen Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ),

deren Präsident er seit 2021 ist. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen die informationstechnische Verarbeitung sensorisch erhobener Daten und deren Einbindung in ein modernes Qualitätsmanagement.



Dr.-Ing. Edgar Dietrich war Mitbegründer und langjähriger Geschäftsführer der Q-DAS GmbH & Co. KG, die er 2015 an Hexagon MI verkaufte. Zuvor war er Professor für Technische Informatik der Dualen Hochschule in Mannheim und mehrere Jahre Vorsitzender des ISO TC 69 SC 4, das für alle ISO-Normen zur statistischen Analyse im Produkt- und Prozessmanagement verantwortlich ist. 2019 gründete er die IconPro GmbH und ist deren Mitgesellschafter.

Autorenverzeichnis

Wilfried Bauer

ehemals Polytec GmbH, Waldbronn

Sebastian Beckschulte

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Matthias Bodenbennner

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr. Harald Bosse

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig

Jimmy Chhor

Nexaro GmbH, Wuppertal

Dr.-Ing. habil. Ralf Christoph

Werth Messtechnik GmbH, Gießen

Dr.-Ing. Raoul Christoph

Werth Messtechnik GmbH, Gießen

Stephan Conrad

Q-DAS GmbH part of Hexagon, Weinheim

Simon Cramer

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr.-Ing. Philipp Dahlem

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Geert De Coppel

Audi Brussels S.A.

Dr.-Ing. Edgar Dietrich

IconPro GmbH, Aachen

Dr. Gunter Effenberger

ehemals Q-DAS GmbH part of Hexagon, Weinheim

Dr. Max Ellerich

NEUMAN & ESSER, Übach-Palenberg

Thomas Froese

VDI, Niederkrächten

Kilian Geiger

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Jonathan Greipel

Liebherr-Hausgeräte Ochsenhausen GmbH

Prof. Dr.-Ing. habil. Sophie Gröger

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschi-
nenbau, Institut für Werkzeugmaschinen und Produk-
tionsprozesse, Professur Fertigungsmesstechnik

Betül Güngör, M. Sc. RWTH Wirt.-Ing. Maschinenbau

EMEA Distribution Performance Analyst, Bayer AG

Prof. Han Haitjema

Manufacturing metrology section, Manufacturing
Processes and Systems, Mechanical Engineering
Department, KU Leuven, Leuven, Belgium

Dr.-Ing. Schirin Heidari Bateni

Werth Messtechnik GmbH, Gießen

Robert Hofmann

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschi-
nenbau, Institut für Werkzeugmaschinen und Produk-
tionsprozesse

Niels Holtmann

Spiegel-Institut Ingolstadt GmbH

Fabian Hüenthal (†)

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT,
Aachen

Meike Huber

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Achim Huberty

Festo SE & Co. KG, Esslingen

Dr. Dietrich Imkamp

Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

Hamid Jahangir

ehemals Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, Aachen

Dr.-Ing. Philipp Jatzkowski

Test Industrial Service GmbH, Kirchzarten

Prof. Dr. Marc Kachelrieß

X-Ray Imaging and Computed Tomography, Deutsches
Krebsforschungszentrum, Heidelberg

Dr.-Ing. Walter Kimmelmann

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr.-Ing. Karin Kniel

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig

Niels König

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT,
Aachen

Horst Lang

Festo SE & Co. KG, Esslingen

Dr. Raimund Loser

Confema GmbH, Sisseln

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Thomas Luhmann

Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geo-
informatik (IAPG), Jade Hochschule Wilhelmshaven/
Oldenburg/Elsfleth

Maximilian Macha

m&h Inprocess Messtechnik/Hexagon, Waldburg

Oscar Malinowski

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Febo Menelao

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig

Dr. Benjamin Montavon

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr.-Ing. Philipp Nienheysen

DB Netz AG, Frankfurt am Main

Antonio Niola

Europea Microfusioni Aerospaziali S. p. A. – Rolls-Royce
plc, Morra De Sanctis

Dr.-Ing. Markus Ohlenforst

IconPro GmbH, Aachen

Dr.-Ing. Martin Peterek

IconPro GmbH, Aachen

Niels Rabbe

Atlas Copco Tools Central Europe GmbH, Essen

Max Riediger

ehemals Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie
IPT, Aachen

Dr. Alexandr Sadovoy

Siemens Industry Software GmbH, Berlin

Markus Schmidt

Magna PT International GmbH, Untergruppenbach

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr.-Ing. Alexander Schönberg

FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG, Fulda

Dr. Wolfgang Schultz

Griesheim

Charlotte Stehmar

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT,
Aachen

Lennart Stohrer

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Dr.-Ing. Alexander Stratmann

Robert Bosch GmbH, Stuttgart

Anika Süß

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Wirt-
schaftswissenschaften, Professur Unternehmens-
rechnung und Controlling

Alfredo Velazquez

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT,
Aachen

Michael Wagner

O-DAS GmbH part of Hexagon, Weinheim

Stefan Weber

iqs Software GmbH, Bühl

Dominik Wolfschläger

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitäts-
management

Thomas Zweschper

edevis GmbH, Stuttgart

9 Computertomografie in der Koordinatenmesstechnik

Raoul Christoph, Marc Kachelrieß

9.1	Funktionsprinzip der Röntgen-Computertomografie	462
9.1.1	Röntgenröhre: Erzeugung der Röntgenstrahlung	462
9.1.2	Vorfilter und Messobjekt: Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie	463
9.1.3	Detektor: Erfassung der Röntgenstrahlung	465
9.1.4	Vom Intensitätsbild zum Projektionsbild	465
9.1.5	Vom Bilderstapel zum Volumen	466
9.2	Auswertung für industrielle Anwendungen	466
9.2.1	Vom Intensitätsbild oder Volumen zur Messpunktewolke	467
9.2.2	Inspektion des Werkstücks	469
9.2.2.1	Werkstückvisualisierung und Inspektion der Materialstruktur	470
9.2.2.2	Automatische Analyse innen- und außenliegender Störungen	471
9.2.3	Messen der Werkstückgeometrie	472
9.2.3.1	Maßliche Auswertung des Werkstücks	472
9.2.3.2	3D-Soll-Ist-Vergleich	474
9.2.4	Gemeinsame Lösung von Inspektions- und Messaufgaben	474
9.3	Abbildungsgeometrie	474
9.3.1	Vergrößerung	475
9.3.2	Messbereich	475
9.3.3	Orts- und Strukturauflösung	475
9.3.4	Optimierung der Abbildungsgeometrie	477
9.3.4.1	Optimierung der Vergrößerung	477
9.3.4.2	Optimierung von Brennfleck- und Pixelgröße	477
9.3.4.3	Optimierung der Drehschrittanzahl	478
9.4	Gerätetechnik und Bauformen	478
9.4.1	Röntgenröhre	478
9.4.1.1	Reflexions- und Transmissiontargets	479
9.4.1.2	Elektronenstrahlerzeugung und -fokussierung	480
9.4.1.3	Reduzierung von Betriebskosten	481
9.4.2	Drehachse	482
9.4.3	Röntgendetektor	482
9.4.3.1	Indirekte Detektion nach dem Szintillationsprinzip	482
9.4.3.2	Zeilen- und Flächendetektoren	483

9.4.4	Linearachsen	483
9.4.4.1	Einstellen von Vergrößerung und Kegelstrahlwinkel	484
9.4.4.2	Mehrere CT-Sensoren und Multisensorik	484
9.4.5	Strahlenschutzmaßnahmen	485
9.5	Messabweichungen: Verursachende Effekte und Korrektur	485
9.5.1	Systematische Messabweichungen	485
9.5.1.1	Strahlaufhärtung	485
9.5.1.2	Streustrahlung	486
9.5.1.3	Kegelstrahlartefakte	486
9.5.1.4	Empirische Artefaktkorrektur	486
9.5.1.5	Virtuelle Autokorrektur	487
9.5.2	Zufällige Messabweichungen	487
9.6	Spezielle Tomografieverfahren	488
9.6.1	Messzeit oder Rauschen reduzieren mittels OnTheFly-Tomografie	488
9.6.2	Messbereich oder Strukturauflösung vergrößern	488
9.6.2.1	Abschnittstomografie, longitudinales Rastern und Helix-Tomografie	489
9.6.2.2	Halbseitentomografie und laterales Rastern	490
9.6.2.3	ROI- und exzentrische Multi-ROI-Tomografie	490
9.6.2.4	Swing- und Planar-Laminografie	490
9.7	Messgenauigkeit	492
9.7.1	Spezifikationsüberprüfung	492
9.7.1.1	Antastabweichung	492
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

Die röntgenbasierte Computertomografie (CT) wurde in den Sechzigerjahren von Godfrey Hounsfield, Mitarbeiter der Firma Electric and Musical Industries (EMI), entwickelt, um das Körperinnere des Menschen nichtinvasiv darstellen zu können. Seine Entwicklung mündete 1972 in dem „EMI Mark 1“, dem ersten kommerziellen Computertomografen (Bild 9.1). Nur sieben Jahre später erhielt Herr Hounsfield gemeinsam mit Allan McLeod Cormack, der die theoretischen Grundlagen der CT entwickelt hatte, für diese Entwicklung den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin.



Bild 9.1 Erster kommerzieller Computertomograf „EMI Mark 1“ zur Untersuchung des Gehirns

Die CT wurde schnell zum wichtigsten bildgebenden Verfahren der Medizin und ist dies bis heute mit Abstand geblieben. Die technische Weiterentwicklung führte dazu, dass moderne diagnostische CT-Systeme mit dem „Mark 1“ bis auf die physikalischen Grundprinzipien so gut wie nichts mehr gemeinsam haben. Rotations- und Scanzeiten im Subsekundenbereich, räumliche Auflösungswerte unter 0,5 mm isotrop, zeitliche Auflösungswerte um die 60 ms, Scangeschwindigkeiten von über 70 cm/s sind heutzutage üblich, und das bei Dosiswerten teils deutlich unterhalb der natürlichen jährlichen Umgebungsstrahlung. Der Ende 2021 vollzogene nächste Schritt war die Einführung der photonenzähelnden Detektortechnologie, mit der Möglichkeit energieauflösend und somit spektral zu messen, die Hälfte an Dosis einzusparen und die räumliche Auflösung auf bis zu 150 µm zu verbessern.

Der Einsatz proprietärer hochspezialisierter Technologien machte diese rasanten Entwicklungen erst möglich. Röntgenröhren, Detektorsysteme und Bildrekonstruktionsrechner wurden dediziert für die medizinische CT entwickelt – von den Herstellern selbst. Die Technologien standen und stehen bis heute nur wenigen großen CT-Firmen zur Verfügung. Ungünstige Formfaktoren und

proprietäre Steuer- und Datenprotokolle verhindern die Nutzung der klinischen CT-Technologie in anderen Gebieten.

Eine alternative, nichtproprietäre Detektortechnologie bilden Röntgenbildverstärker, die gegen Ende der vierziger Jahre entwickelt wurden. Diese können mittlerweile auch digital ausgelesen werden und eignen sich somit prinzipiell für computertomografische Verfahren. Diese kostengünstigen und großflächigen Detektoren hatten jedoch zwei entscheidende Nachteile, die eine Verbreitung über medizinische Anwendungen hinaus erschwerten: die schiere Größe und Masse der Bildverstärker sowie die Anfälligkeit für Verzerrungen, die zudem vom Umgebungsmagnetfeld abhängen. Erst das Aufkommen von auch als Flachdetektoren bezeichneten Flächendetektoren, die die Röntgenstrahlung in einem Szintillator in sichtbares Licht wandeln, das von einem hinter der Szintillatorschicht liegenden Array von Photodioden erfasst wird, brachte um die Jahrtausendwende eine Technologie, die sich für die breite Anwendung über die Medizin hinaus leicht nutzen ließ. Der kleine Formfaktor, kombiniert mit der Robustheit der Detektoren und mit gängigen Softwareschnittstellen (auslesbar über Framegrabber oder über Ethernet), und die einfache Verfügbarkeit dieser leider relativ teuren Detektoren sorgte dafür, dass die CT-Technologie auch in zahlreichen industriellen Anwendungen Einzug fand.

Im Bereich der Koordinatenmesstechnik wurde diese Entwicklung zuallererst von der Firma Werth Messtechnik aufgegriffen und mündete gemeinsam mit herkömmlichen Sensoren in einem Multisensorkoordinatenmessgerät mit Computertomografie (Bild 9.2).



Bild 9.2 Werth TomoScope®: Das erste Koordinatenmessgerät mit Röntgen-Computertomografie und optionaler Multisensorik

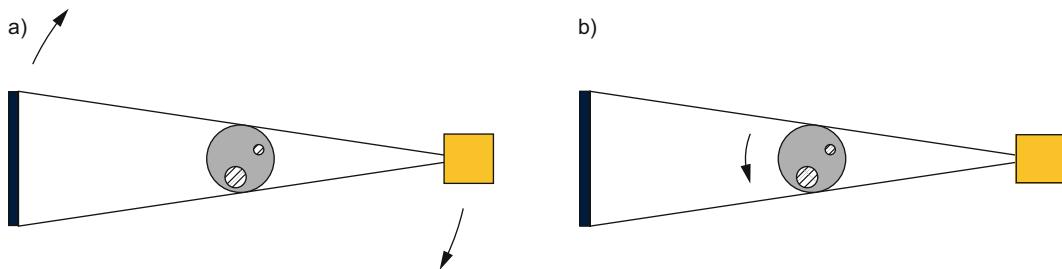


Bild 9.3 Grundprinzip der CT: Meist rotieren entweder a) Röhre und Detektor um das Objekt oder b) Röhre und Detektor sind stationär und das Objekt wird gedreht.

Die Vorteile liegen auf der Hand: Im Gegensatz zur Messung mit optischen und taktilen Sensoren lassen sich computertomografisch alle geometrischen Eigenschaften des Objekts in einem Scan schnell erfassen – auch die innenliegenden, die taktil oder optisch gar nicht erfassbar sind.

während der Aufnahme Röhre und Detektor um das Objekt rotieren oder dass sich das Objekt auf einer Drehseinheit befindet und Röhre und Detektor stationär angeordnet sind (Bild 9.3).

Im medizinischen Bereich ist die Rotation der CT-Komponenten um den Patienten die gängige Kinematik. Bei industrieller CT und in der Koordinatenmesstechnik können beide Versionen zur Anwendung kommen. In der Regel wird jedoch das Messobjekt mittels eines Drehtisches gedreht. Die Scantrajektorie, die durch eine einfache Rotationsbewegung erzeugt wird, nennt sich Kreisscan oder „Im Bild“-Tomografie. Um einen vollständigen Datensatz aufzunehmen, reicht ein Teilkreis, der einen Winkelbereich von 180° plus Fächerwinkel abdeckt. Aus Bildqualitätsgründen ist es oft jedoch besser, einen Vollkreis zu akquirieren.

III 9.1 Funktionsprinzip der Röntgen-Computer-tomografie

Die CT basiert darauf, dass von einem Objekt Röntgenbilder aus einer Vielzahl unterschiedlicher Blickrichtungen aufgenommen werden und diese aufgenommenen Bilder, auch Rohdaten genannt, mithilfe eines mathematischen Verfahrens, der so genannten Bildrekonstruktion, in Volumendaten, also in einen dreidimensionalen Bildstapel umgerechnet werden. Diese Umrechnung kann aufgrund der hohen Datenmenge und der komplexen durchzuführenden Rechnungen nur mithilfe von Computern realisiert werden, woher letztendlich der Name Computertomografie röhrt.

Die wesentlichen Komponenten eines CTs sind somit die Röntgenröhre zur Erzeugung der Röntgenstrahlung, ein gegenüberliegender Detektor zur Erfassung der durch das Objekt geschwächten Röntgenstrahlung sowie die Software, die die Rohdaten vorverarbeitet und die aus den vorverarbeiteten Daten das Volumen rekonstruiert. Außerdem benötigt das CT eine mechanische Vorrichtung mit Bewegungsfreiheitsgraden, um die Röntgenaufnahme aus unterschiedlichen Blickrichtungen automatisiert durchführen zu können. Diese Kinematik wird typischerweise mithilfe von Elektromotoren bewegt.

Die im CT-Bereich am häufigsten anzutreffende Kinematik ist die Rotation. Sie wird meist dadurch realisiert, dass

9.1.1 Röntgenröhre: Erzeugung der Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung wird mithilfe von Röntgenröhren erzeugt, deren Grundprinzip seit über 125 Jahren unverändert ist: In einem evakuierten Gefäß (Bild 9.4a) befinden sich Kathode b) und Anode c).

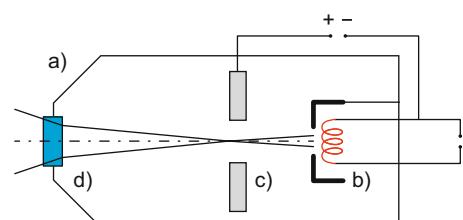


Bild 9.4 Vereinfachte Darstellung des Funktionsprinzips einer Röntgenröhre

Die Kathode b) emittiert, abhängig vom eingestellten Röhrenstrom, Elektronen, die durch das Anlegen einer positiven Spannung (Röhrenspannung) von bis zu mehreren hundert Kilovolt zur Anode c) hin beschleunigt werden.

Beim Auftreffen auf das Target d) werden die Elektronen durch Coulomb-Wechselwirkungen oder Stoßprozesse im Anodenmaterial abgebremst und geben dabei, wie jede beschleunigte Ladung, elektromagnetische Strahlung ab. Zusätzlich zu dieser Bremsstrahlung erzeugt das Elektronenbombardement in der Anode noch charakteristische Röntgenstrahlung. Sie entsteht, wenn gebundene Elektronen aus der Atomhülle der Atome der Anode gestoßen werden. In diesem Fall wird das freigewordene Energieniveau unmittelbar durch ein Atom aus einer höherenergetischen Schale aufgefüllt. Die Energiedifferenz beider Schalen wird in Form eines Röntgenphotons abgegeben. Da diese Energiedifferenz charakteristisch für das Atom ist und somit ein Linienspektrum besitzt, spricht man von charakteristischer Röntgenstrahlung. Am häufigsten tritt der Fall ein, dass ein Elektron aus der K-Schale gestoßen wird. Wird das so entstandene Loch durch ein Hüllen-Elektron aus der L-Schale aufgefüllt, spricht man bei der emittierten Strahlung von K_{α} -Strahlung. Wird es aus der M-Schale aufgefüllt, so entsteht ein K_{β} -Röntgenphoton. Analog dazu wird die Strahlung, die beim Füllen eines Loches in der L-Schale entsteht, mit L_{α} , L_{β} usw. bezeichnet. Bei dem häufig verwendeten Anodenmaterial Wolfram liegt die K_{α} -Linie ungefähr bei 58 keV und die Bindungsenergie der K-Schalen-Elektronen beträgt ungefähr 70 keV. Das aus dem kontinuierlichen Bremsstrahlungsspektrum und dem diskreten Spektrum der charakteristischen Strahlung zusammengesetzte Röntgenspektrum ist somit polychromatisch. Es treten alle Photonenergien von 0 bis $e \cdot U$ auf, wobei e die Elementarladung und U die Beschleunigungsspannung ist. Die Röhrenleistung, also das Produkt $U \cdot I$ aus Röhrenspannung und Röhrenstrom, ist durch den Schmelzpunkt des Targetmaterials limitiert, da ein Großteil der Energie

(etwa 99 %) der auf das Target treffenden Elektronen leider nicht in Röntgenstrahlung, sondern in Wärme gewandelt wird. Um ein Schmelzen des Targets zu vermeiden, wird ein Targetmaterial mit hohem Schmelzpunkt eingesetzt. Da die Ausbeute an Röntgenphotonen mit der Ordnungszahl Z des Targetmaterials steigt, muss ein Material sowohl mit hohem Z als auch mit hohem Schmelzpunkt und guter Wärmeleitfähigkeit gefunden werden. Es stellte sich somit früh heraus, dass Wolfram (Ordnungszahl 74, Schmelzpunkt 3695 K) ein gut geeignetes Targetmaterial ist.

9.1.2 Vorfilter und Messobjekt: Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie

Im für messtechnische (und medizinische) Zwecke interessierenden Energiebereich von mehreren keV bis hin zu einem MeV sind die wesentlichen Wechselwirkungen der Röntgenstrahlung mit Materie der Photoeffekt und der Comptoneffekt (Bild 9.5).

Beim Photoeffekt (Bild 9.6a) löst ein Röntgenphoton ein Elektron aus einer Atomhülle. Das Röntgenphoton wird dabei absorbiert und gibt seine Energie an das Elektron ab. Der Wirkungsquerschnitt und somit die Wahrscheinlichkeit, dass ein Röntgenphoton mittels des Photoeffekts wechselwirkt, ist proportional zur Dichte, steigt mit der dritten Potenz der Ordnungszahl der absorbierenden Materie und fällt mit der dritten Potenz der Energie des Röntgenphotons. Bei höher werdender Röhrenspannung und damit höher werdenden Energien der Röntgenphotonen wird der Photoeffekt folglich immer unwahrscheinlicher.

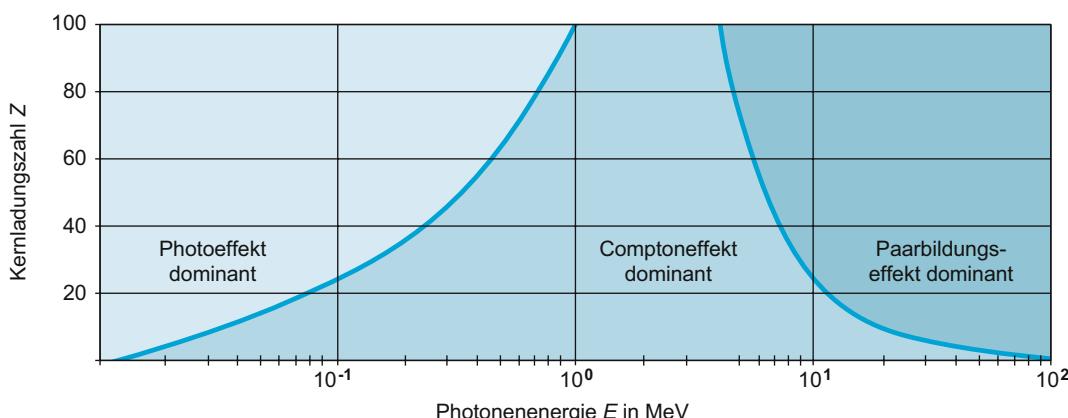


Bild 9.5 Abhängigkeit der dominierenden Wechselwirkungsprozesse von der Photonenergie: Während im messtechnischen Energiebereich die Rayleighstreuung kaum einen und die Paarbildung keinen Beitrag hat, sind der Photoeffekt und der Comptoneffekt die bestimmenden Größen für die Absorption (nach Krieger 2009).

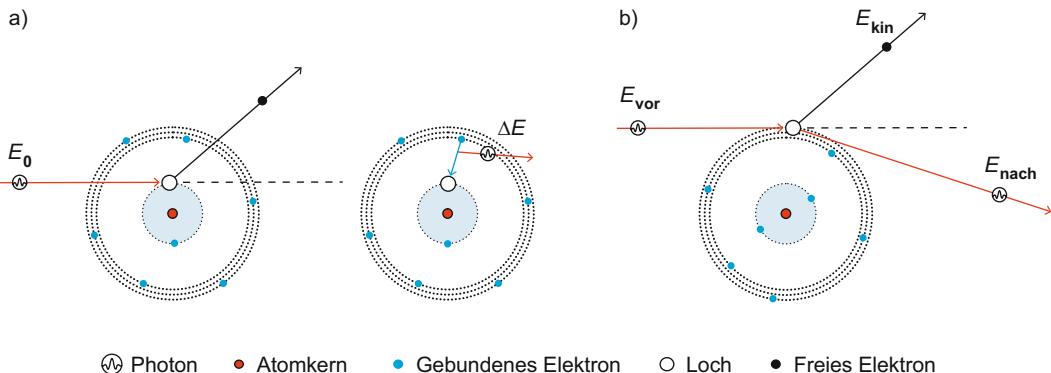


Bild 9.6 Für die Koordinatenmesstechnik mit Röntgen-Computertomografie wichtige Wechselwirkungsprozesse: a) Photoeffekt und b) Comptoneffekt (nach Krieger 2009)

Der Comptoneffekt hingegen ist ein Streueffekt (Bild 9.6b). Das mit einem Absorber wechselwirkende Röntgenphoton stößt mit einem Hüllenelektron derart, dass das Elektron nur einen Teil der Energie des Röntgenphotons übernimmt und ein neues, niederenergetisches Röntgenphoton den Wechselwirkungsort in einer zufälligen Richtung verlässt (die Winkelabhängigkeit dieser Richtungsverteilung ist durch die Klein-Nishina-Formel gegeben). Im Gegensatz zum Photoeffekt ist der Comptoneffekt kaum von der Ordnungszahl und schwächer von der Photonenergie abhängig (bei hohen Energien indirekt proportional zur Energie). Die Comptonstreuung dominiert folglich bei höheren Energien den Photoeffekt. Dies ist ein Nachteil für die Bildqualität, denn während das Röntgenphoton beim Photoeffekt einfach absorbiert wird, entsteht beim Comptoneffekt ein neues Röntgenphoton, das mit nicht zu vernachlässigender Wahrscheinlichkeit Richtung Detektor fliegt und dort registriert wird (Streustrahlung). Da der Detektor nicht zwischen einem Primärstrahlenphoton und einem Streustrahlenphoton unterscheiden kann, wird durch die Streustrahlung die

Messung verfälscht und führt im Volumen zu teils starken Artefakten (siehe Abschnitt 9.5.1.2).

Abgesehen von der Streustrahlung ist ein weiterer nachteiliger Effekt die sogenannte Strahlaufhärtung. Sie tritt auf, weil das Röntgenspektrum polychromatisch ist und weil die Schwächungskoeffizienten sowohl des Photo- als auch des Comptoneffekts mit höher werdender Photonenergie kleiner werden. Beim Durchlaufen von Materie passiert also Folgendes: Niederenergetische Photonen des Röntgenstrahls werden stärker absorbiert bzw. aus dem Primärstrahl entfernt als höherenergetische Photonen. Mit zunehmender Eindringtiefe in das Objekt wird der Anteil der niederenergetischen Photonen relativ zum Anteil der höherenergetischen Photonen immer kleiner, die Strahlung somit immer härter und immer durchdringungsfähiger. Der Schwerpunkt des Spektrums verschiebt sich hin zu höheren Energien. Man spricht von Strahlaufhärtung. Bild 9.7 zeigt dies anhand eines Röntgenspektrums.

Die aus der Strahlaufhärtung folgende nichtlineare Abhängigkeit von gemessenen Strahlungsintensitäten und

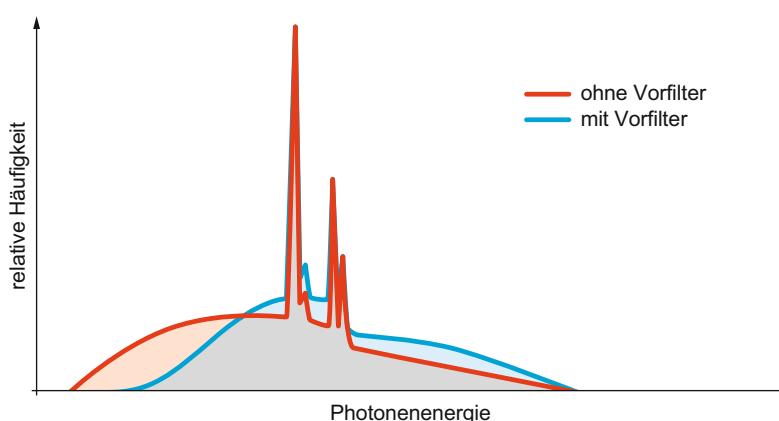


Bild 9.7

Aufhärtung des Spektrums mittels Vorfilter: 120-kV-Spektrum eines Röntgenstrahls direkt hinter der Röntgenröhre (rot) und nach Durchlaufen eines Vorfilters (blau). Beide Spektren sind auf die gleiche Fläche normiert. Im Vorfilter werden vorrangig niederenergetische Photonen absorbiert. Daher verschiebt sich das Spektrum hin zu höheren Energien und man spricht von einer Aufhärtung des Spektrums.

Durchstrahlungslängen wird in einer herkömmlichen Volumenrekonstruktion nicht berücksichtigt, was ähnlich wie Streustrahlung zu Artefakten im Volumen führt (siehe Abschnitt 9.5.1.1). Um der Strahlaufhärtung im Messobjekt vorzubeugen werden Vorfilter eingesetzt. Je nach Messaufgabe kommen hierfür 0,1 mm bis 3 mm dicke Metallplättchen beispielsweise aus Aluminium, Kupfer oder Zinn zum Einsatz, mit der die aus der Röntgenröhre austretende Röntgenstrahlung vor Durchstrahlung des Messobjekt aufgehärtet wird (Bild 9.7). Bei einer Messung resultieren aufgrund der dann geringeren Strahlaufhärtung im Messobjekt geringere Strahlaufhärtungsartefakte. Durch die Vorfilterung reduziert sich jedoch auch die Intensität der für die Messung nutzbaren Röntgenstrahlung. Dies führt – analog zu einer Reduzierung der Belichtung bei einer Fotografie – zu einem höheren Bildrauschen oder einer längeren Messzeit. CNC-Filterwechsler ermöglichen die automatische Anpassung des Vorfilters an die Messaufgabe.

Photo- und Comptoneffekt tragen zum linearen Schwächungskoeffizienten $\mu(E)$ bei. Dieser beschreibt den Anteil der aus dem Primärstrahl durch Absorption oder Streuung entnommenen Strahlung pro durchstrahlter Länge. Die Schwächung selbst ist aufgrund der Tatsache, dass ein Röntgenphoton kein Gedächtnis und somit keine Information über seine Vergangenheit hat, ein statistischer Prozess. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon einen Absorber der Dicke d ohne Wechselwirkung durchläuft, ist durch das Lambert-Beersche Gesetz gegeben und beträgt $\exp(-\mu(E) \cdot d)$. Wenn $N_0(E)$ Röntgenphotonen der Energie E auf den Absorber treffen, so ist zu erwarten, dass $N(E) = N_0(E) \cdot \exp(-\mu(E) \cdot d)$ Photonen ihn ungestört durchstrahlen. Bei Kenntnis der einfallenden Photonenzahl $N_0(E)$ und der aus dem Absorber austretenden Photonenzahl $N(E)$ lässt sich die Schwächung $\mu(E) \cdot d = -\ln(N(E)/N_0(E))$ berechnen. Dieses Prinzip wird bei der Röntgenbildgebung und somit auch bei der Computertomografie benutzt, um Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung $\mu(x, y, z)$ des Schwächungskoeffizienten zu ziehen.

9.1.3 Detektor: Erfassung der Röntgenstrahlung

Der Nachweis der Röntgenstrahlung, also die Messung der aus dem Objekt tretenden Verteilung von Röntgenphotonen, funktioniert mithilfe des Röntgendetektors. In der industriellen Praxis kommen primär aus vielen Bildelementen bestehende Flächendetektoren zum Einsatz (Bild 9.8).

Die von der Röntgenröhre a1) erzeugte Strahlung wird durch das Messobjekt a2) abgeschwächt und trifft auf den Szintillator a3), welcher einen Teil der Strahlungsenergie absorbiert und als sichtbares Licht emittiert. Das Licht wird auf einen Photodetektor a4) abgebildet, detektiert und per Analog-Digital-Wandler in ein digitales Intensitätsbild b) umgewandelt.

9.1.4 Vom Intensitätsbild zum Projektionsbild

Die bislang genutzten Detektoren sind nicht energielektiv, d.h. sie können nicht zwischen Röntgenphotonen unterschiedlicher Energie unterscheiden. Somit lässt sich in einem Detektorpixel nicht die Anzahl $N(E)$ der dort wechselwirkenden Photonen der Energie E nachweisen, sondern lediglich ein Intensitätswert I , der in nahezu linearem Zusammenhang mit der mittleren absorbierten Energie aller eintreffenden Röntgenphotonen steht. Zusammen mit dem Intensitätswert I_0 ohne Objekt lässt sich dann in guter Näherung die Schwächung, auch Projektionswert genannt, berechnen: $p = \mu \cdot d \approx -\ln(I/I_0)$. Das gesamte Detektorbild $I(u, v)$ setzt sich aus den Messwerten aller Detektorpixel zusammen. Hierbei sind u und v die Koordinatenachsen des Detektors. Analog dazu ist $p(u, v)$ die Projektion, also die logarithmierte, auf die nicht durch das Objekt abgeschwächte Intensität normierte Intensität (Bild 9.9).

Im Allgemeinen ist das abgebildete Objekt nicht homogen. In diesem Fall ist die gemessene Schwächung nicht einfach nur das Produkt $\mu \cdot d$ aus einem Schwächungskoeffizienten μ und der durchstrahlten Dicke d , sondern das

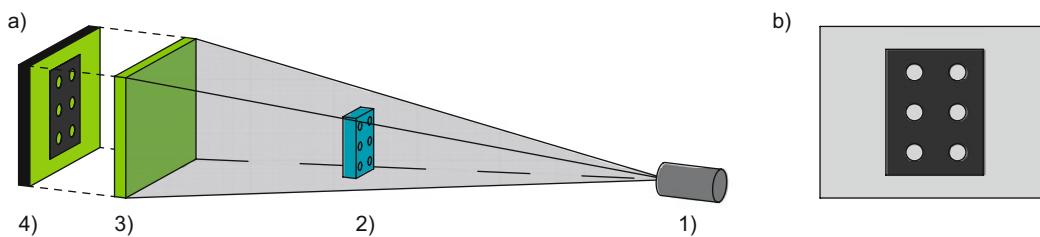


Bild 9.8 Erzeugung eines Intensitätsbilds

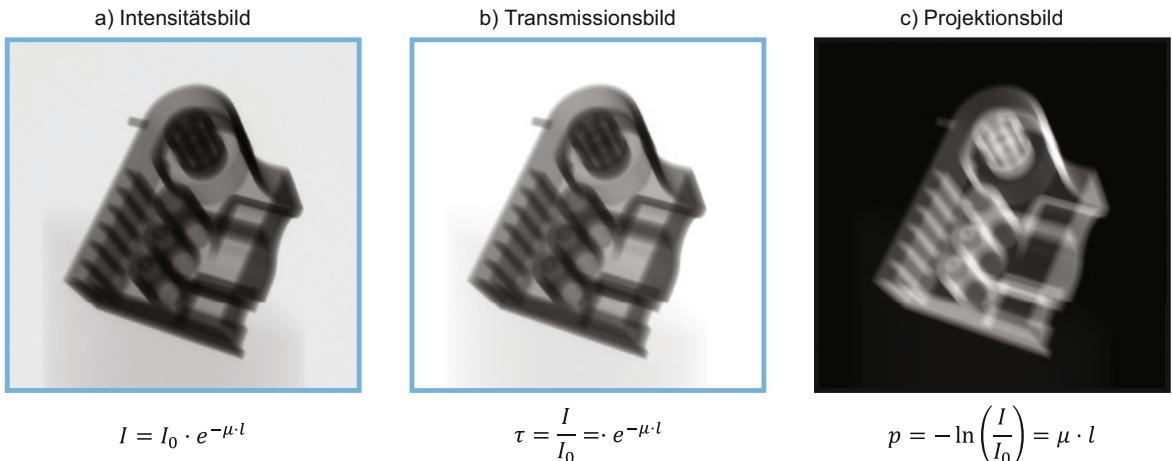


Bild 9.9 Das Transmissionsbild b) resultiert nach Normierung des gemessenen Intensitätsbilds a) auf den Intensitätswert I_0 ohne Objekt. Nach Logarithmieren und Negieren erhält man hieraus das Projektionsbild c).

Integral über die Schwächungskoeffizientenverteilung entlang der Strahlrichtung. Vereinfacht kann man sich dieses Linienintegral vorstellen als Summe über alle Voxelwerte entlang des Strahls multipliziert mit der Schnittlänge des Strahls mit dem jeweiligen Voxel. Das beschriebene Vorgehen entspricht der Umkehrung des Lambert-Beerschen Schwächungsgesetzes.

9.1.5 Vom Bilderstapel zum Volumen

Die Projektionsbilder können nun in das Volumen rückgerechnet werden. Dazu ist es zunächst mathematisch nötig, dass jedes Detektorbild zeilenweise mit einem so genannten Faltungs- oder Rekonstruktionskern gefiltert wird. Nach der Faltung werden die gefalteten Projektionsbilder in das Volumen zurückprojiziert.

Zu Beginn sind die Voxel (Volumetric Pixel; Volumenbildpunkt) des Volumens (im Computer) mit Nullen gefüllt. Ausgehend vom ersten Detektorpixel des ersten gefalteten Detektorbilds wird nun ein Strahl in das Volumen zurückgerechnet und der Wert des Detektorpixels wird auf jedes Voxel addiert, den der Strahl trifft (Bild 9.10). Dies wird für jeden Detektorpixel eines jeden Projektionsbilds getan. Der Prozess nennt sich Rückprojektion, denn die gemessenen gefalteten Projektionsdaten werden entlang ihrer ursprünglichen Messrichtung in das Volumen addiert, also zurückprojiziert. Die hier beschriebene Rekonstruktion besteht also aus einer Faltung gefolgt von einer Rückprojektion. Sie nennt sich daher gefilterte Rückprojektion bzw. filtered Backprojection (FBP). Im Bereich der Kegelstrahl-CT, wie sie auch in der Messtechnik angewendet wird, spricht man auch vom Feldkampalgorithmus, bzw. Feldkamp-Davis-Kress-Verfahren (FDK-Verfahren),

zur Würdigung der drei Autoren, die die FBP erstmals auf Kegelstrahldaten angewendet haben (Feldkamp et al. 1984).

Die Bildrekonstruktion ist extrem rechenaufwendig (ein 2000^3 Volumen aus 2000 Projektionen benötigt $2000^4 = 16$ Billionen Rechenoperationen und noch mehr Speicherzugriffe) und wird heutzutage daher meist auf Graphikkarten (GPUs) implementiert. Ziel ist es oft, die Rekonstruktionszeit kleiner oder gleich der Bildaufnahmzeit zu halten. FBP-basierte Rekonstruktionsverfahren können schon während der Bildaufnahme starten und die bereits gemessenen Projektionen falten und zurückprojizieren. Somit steht das fertige Volumen bei modernen Geräten in der Regel unmittelbar nach der Aufnahme des letzten Intensitätsbildes zur Verfügung.

9.2 Auswertung für industrielle Anwendungen

Mit Röntgen-Computertomografie kann ein vielseitiges Aufgabenspektrum gelöst werden. Dieses reicht von der Visualisierung von Werkstückmaterialien über die automatische Erkennung von Störungen bis hin zum vollautomatischen Messen sämtlicher geometrischer Eigenschaften mehrerer Werkstücke – das Aufgabenspektrum umfasst Prüfaufgaben, die mit CT-Inspektionsgeräten gelöst werden können, sowie die dimensionelle Messung von Werkstückgeometrien mit Methoden der Koordinatenmesstechnik. Die Basis für die Lösung komplexerer

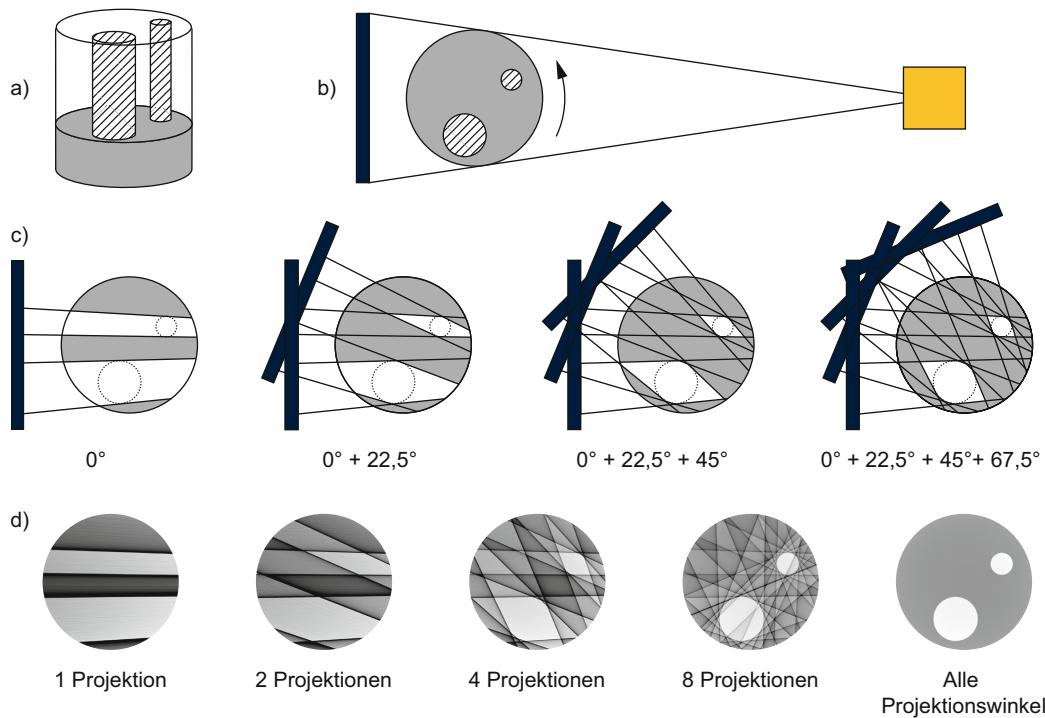


Bild 9.10 Vereinfachte Darstellung des Funktionsprinzips der gefilterten Rückprojektion: Durch Drehen des Messobjekts a) im Strahlengang b) werden Intensitätsbilder aus verschiedenen Blickwinkel aufgenommen. Die aus den Intensitätsbildern berechneten Projektionsbilder werden anschließend mittels gefilterter Rückprojektion in das Volumen projiziert c). Unter d) ist die Rekonstruktion des Volumens mittels gefilterter Rückprojektion dargestellt.

Inspektionsaufgaben, beispielsweise die automatische Prüfung auf Lunker oder Grate, und die Bestimmung geometrischer Eigenschaften sind an den Grenzflächen zwischen zwei Materialien, in der Regel zwischen dem Material des Werkstücks und der umgebenden Luft, berechnete Grenzflächenpunkte.

9.2.1 Vom Intensitätsbild oder Volumen zur Messpunktewolke

Die Bestimmung von Grenzflächenpunkten erfolgt entweder anhand von Intensitätsbildern oder Volumen. Für die Berechnung der Grenzflächenpunkte aus Intensitätsbildern werden aus der digitalen Bildverarbeitung bekannte Methoden der Konturbildverarbeitung verwendet (Bild 9.11).

Hierzu muss im Vorfeld der im Röntgenstrahlengang lokal unterschiedliche Abbildungsmaßstab ermittelt und bei der Berechnung berücksichtigt werden. Die Bestimmung von Regelgeometrieelementen und geometrischen Eigenschaften erfolgt anschließend wie bei bildverarbeitenden optischen Sensoren, welche in Teil III, Kapitel 10, „Bildverarbeitung“, detaillierter beschrieben werden.

In der Regel werden die Grenzflächenpunkte jedoch auf Basis des rekonstruierten Volumens bestimmt, das sich aus den Schwächungskoeffizienten der einzelnen Voxel zusammensetzt. In einem ersten Schritt werden hierzu die Grenzflächenorte, beispielsweise mithilfe eines globalen Schwellwerts, grob bestimmt. Diese grobe Bestimmung der Grenzflächenpunkte ist für Inspektionsaufgaben meistens ausreichend. Als Grundlage für die Bestimmung geometrischer Eigenschaften erfolgt anschließend die genaue Bestimmung der Grenzflächenpunkte aus den in der Umgebung um den jeweils grob bestimmten Grenzflächenpunkt befindlichen Schwächungswerten. Durch Einbeziehung der Beträge der Schwächungskoeffizienten wird die erreichbare Auflösung der Positionsbestimmung deutlich erhöht. Dieses Vorgehen wird in Anlehnung an das aus der klassischen Bildverarbeitung bekannte Subpixeling auch als Subvoxeling bezeichnet. Hierfür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, z.B. die Bestimmung des lokalen Maximums des differenzierten Kantenübergangs oder integrale Verfahren wie das Verfahren der photometrischen Mitte. Das Grundprinzip wird nachfolgend am Beispiel der linearen Interpolation zwischen Schwächungskoeffizienten unter Verwendung eines lokal bestimmten Schwellwerts erläutert (Bild 9.12).

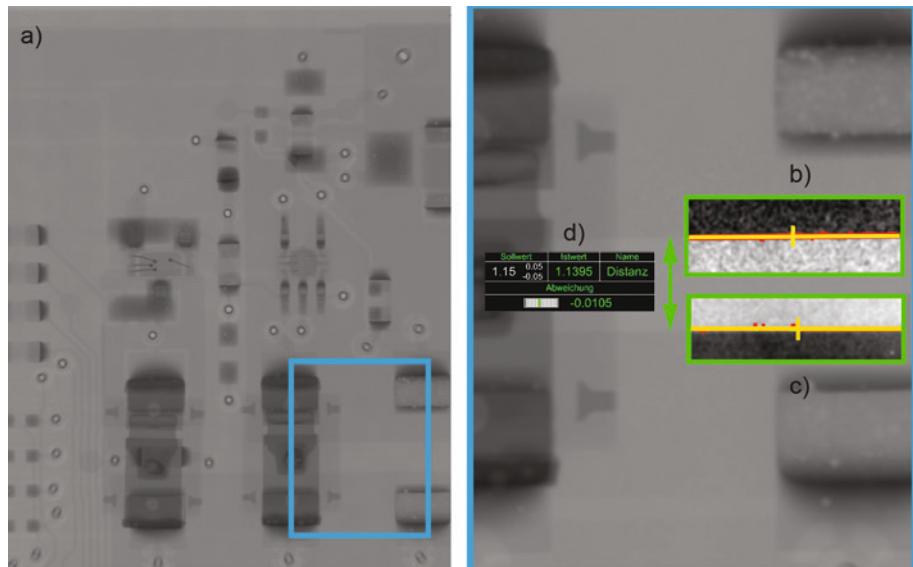


Bild 9.11 Messen im Intensitätsbild: Im Ausgangsbild a) wird mithilfe der Selektionsfenster b) und c) (grün) interessante Bildbereiche ausgewählt und gefiltert. Aus den mittels Konturbildverarbeitung bestimmten Grenzflächenpunkten wird je Fenster eine Ausgleichsgerade (gelb) berechnet. Schließlich wird die Distanz d) zwischen den beiden Geraden ausgewertet und angezeigt.

In einem ersten Schritt wird hierzu ein Linienprofil durch das Volumen senkrecht zur Grenzfläche (nachfolgend Kantenübergang) bestimmt. Hieraus wird ein lokaler Schwellwert μ_{sw} beispielsweise durch Berechnung des Mittelwerts aus minimalem Schwächungskoeffizienten μ_u und maximalem Schwächungskoeffizienten μ_o berechnet. Der Kantenort P wird anschließend zwischen den beiden Voxeln mit dem zum Schwellwert nächst kleineren und nächst größeren Schwächungskoeffizienten linear interpoliert. Die ohne Subvoxeling durch den Mittenabstand der Voxel vorgegebene Auflösung, wird durch die Einbeziehung der Voxelwerte deutlich erhöht.

Verfahren zur Bestimmung von Grenzflächenpunkten können danach unterschieden werden, ob Vorabinformationen über das Werkstück in die Berechnung der Grenzflächenpunkte einfließen. Liegen keine Vorabinformationen beispielsweise in Form von CAD-Modellen vor, muss auf Verfahren zurückgegriffen werden, welche die automatische Berechnung einer Gesamtpunktwolke direkt aus dem Volumen ermöglichen. Die Berechnung wird an jedem Voxel an einer Materialgrenze automatisch durchgeführt. Alle innen- und außenliegenden Grenzflächen werden durch die resultierende Punktwolke beschrieben. Um die weitere Verarbeitung einer Punktwolke zu er-

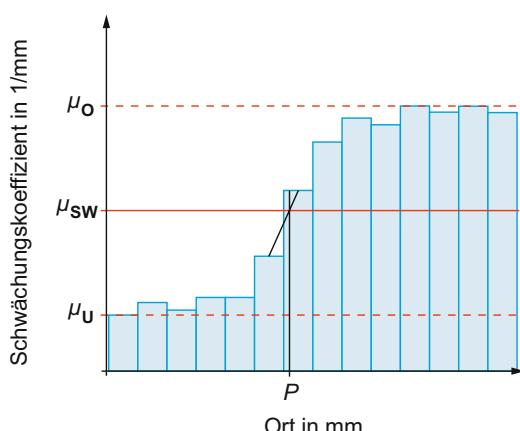


Bild 9.12 Vereinfachte Darstellung der Bestimmung eines Grenzflächenpunkts P an einem Kantenübergang mittels linearer Interpolation

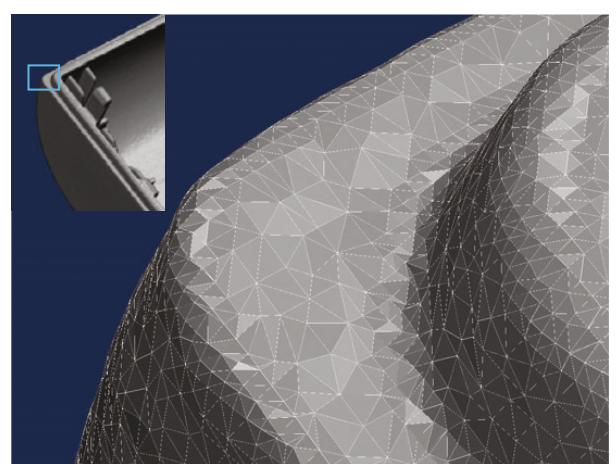


Bild 9.13 Triangulierte Punktwolke im STL-Format (Christoph 2017)

leichtern, wird diese in der Regel als triangulierte Punktwolke im STL-Format gespeichert (Bild 9.13). Je drei benachbarte Punkte werden hierbei zu einer Dreiecksfläche, einem sogenannten Vertex, verbunden.

Die Information über die Nachbarschaftsbeziehung zwischen den Grenzflächenpunkten bleibt erhalten und kann für spätere Auswertungen verwendet werden. Die für eine erneute Berechnung der Nachbarschaftsbeziehung notwendige Rechenzeit entfällt. Wird nur ein Teil der Punkte für die Auswertung benötigt, können auch nur interessierende Teilbereiche gespeichert werden. Hierbei gehen viele Informationen über die Werkstückoberfläche verloren, welche gegebenenfalls für eine genaue Bestimmung der Werkstückgeometrie benötigt werden. Verfahren, welche keine Vorabinformation über das Werkstück benötigen, eignen sich für die meisten Werkstücke aus einem Material.

Besteht das Messobjekt jedoch aus mehreren Materialien oder weisen die rekonstruierten Volumendaten starke Artefakte auf, dann können Verfahren eingesetzt werden, welche Vorabinformationen über die Werkstückoberfläche nutzen. Hierbei kann es sich beispielsweise um Nominaldaten des Werkstücks wie ein CAD-Modell oder eine zuvor berechnete ungenauere Punktwolke handeln. Falls notwendig, wird in einem ersten Schritt die Werkstücklage mit der vorhandenen groben Oberflächenbeschreibung abgeglichen. Eine Methode hierfür ist das in Bild 9.14 dargestellte automatische Einpassen einer Messpunktwolke in ein CAD-Modell.

Zunächst wird aus dem Volumen (Bild 9.14a) eine triangulierte Punktwolke (Bild 9.14b) berechnet. Mithilfe von Einpassalgorithmen, wie der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate, wird die Punktwolke in das CAD-

Modell eingepasst. Das Volumen wird automatisch mittransformiert. Alternativ werden durch Anwählen bzw. durch Messen von Regelgeometrieelementen zwei lokale Koordinatensysteme aufgebaut und aufeinander abgeglichen. Anschließend erfolgt die Auswahl der interessierenden Grenzflächen durch Selektion der zugehörigen CAD-Patches. Im nächsten Schritt werden Linienprofile senkrecht zu den durch die CAD-Patches beschriebenen Grenzflächen berechnet und z.B. mittels linearer Interpolation jeweils ein Grenzflächenpunkt bestimmt.

Aufgrund der notwendigen Vorabinformation über die Werkstückgrenzflächen erfolgt die Bestimmung der Punktwolke lediglich in Teilbereichen des Volumens. Neue Algorithmen, wie beispielsweise in (Stopp et al. 2022) beschrieben, ermöglichen die vollautomatische Bestimmung aller Grenzflächen von Werkstücken aus mehreren Materialien oder Baugruppen. Diese haben sich jedoch in der industriellen Praxis aufgrund zu hoher Berechnungszeiten noch nicht durchgesetzt.

9.2.2 Inspektion des Werkstücks

Koordinatenmessgeräte mit Röntgen-Computertomografie werden zwar primär für die Bestimmung geometrischer Eigenschaften eingesetzt, ermöglichen jedoch zusätzlich die Lösung konventioneller Inspektionsaufgaben wie der Werkstückvisualisierung, der Inspektion der Materialstruktur oder der Prüfung auf innen- und außenliegende Störungen wie Grate und Lunker. Die Inspektion eines Werkstücks erfolgt hierbei entweder anhand von 2D-Durchstrahlungsbildern, rekonstruierten Volumendaten oder Grenzflächenpunkten.

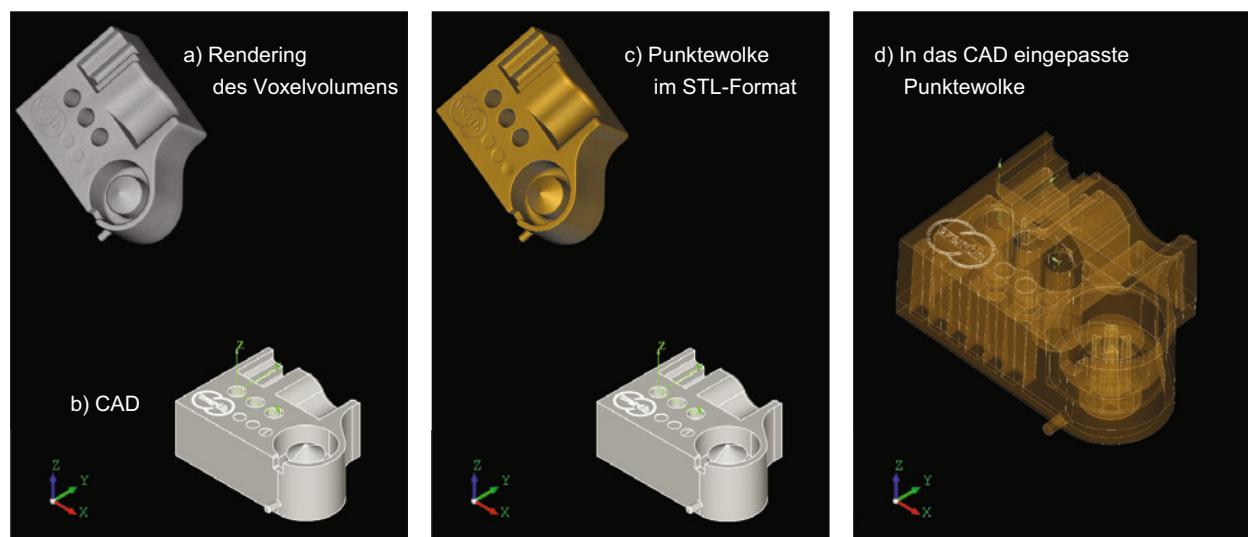


Bild 9.14 Automatisches Einpassen der Messdaten in das CAD-Modell

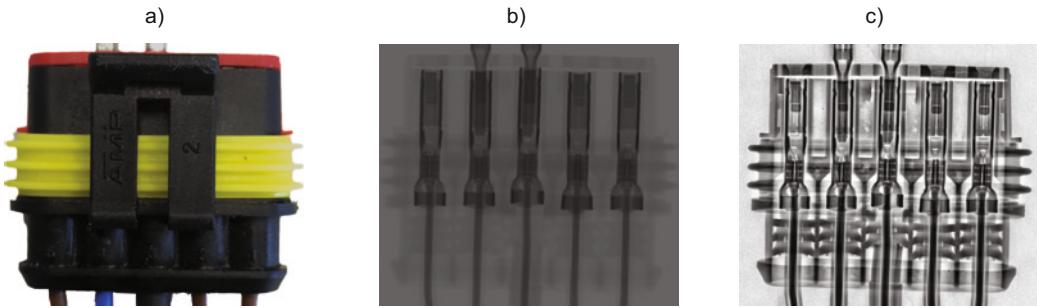


Bild 9.15 Inspektion eines Kfz-Steckers a): Details im Intensitätsbild b) sind nach Anwendung der 2D-Kontrasterhöhung c) deutlich besser zu erkennen. Dies ermöglicht beispielsweise die Überprüfung der Steckverbindungen.

9.2.2.1 Werkstückvisualisierung und Inspektion der Materialstruktur

Bei Werkstücken mit hohen Dichteunterschieden (Bild 9.15a) ist das Erkennen von Details in Intensitätsbildern ohne Vorverarbeitung (Bild 9.15b) nur schwierig möglich. Funktionen zur lokalen Kontrasterhöhung erhöhen die Erkennbarkeit von Details deutlich (Bild 9.15c).

Die klassische Inspektion mittels Röntgen-Computertomografie basiert auf der Auswertung von Volumendaten. Die Berechnung von Grenzflächenpunkten ist für diese Form der Materialanalyse zwar nicht zwingend notwendig, ermöglicht jedoch den Abgleich mit Nominaldaten und damit die automatische Erzeugung von 3D-Ansichten gerenderter Volumen (Bild 9.16a) sowie 2D-Volumenschnitten (Bild 9.16b bis Bild 9.16d).

Auch das Speichern von Videos zu Dokumentationszwecken ist möglich (Beispiel unter www.werth.de/CT-Film). Die Brüche der Voxel sind proportional zur lokalen Abschwächungsfähigkeit des Materials und werden als Grauwerte dargestellt. Je stärker das Material die Röntgenstrahlung abschwächt, desto höher ist der gemessene Wert und desto heller die Darstellung des Voxels. Unterschiedlich stark absorbierende Materialien oder Dichteunterschiede innerhalb eines Materials lassen sich hiermit darstellen und zerstörungsfrei inspizieren.

Verschiedene Funktionszustände einer Baugruppe können mit derselben Software visualisiert werden. Das virtuelle Demontieren (Bild 9.17) von Baugruppen ermöglicht die Überprüfung der Einzelkomponenten zum Beispiel auf Verschleiß. Das zeit- und kostenintensive reale Demontieren von Baugruppen kann entfallen (Christoph 2017).

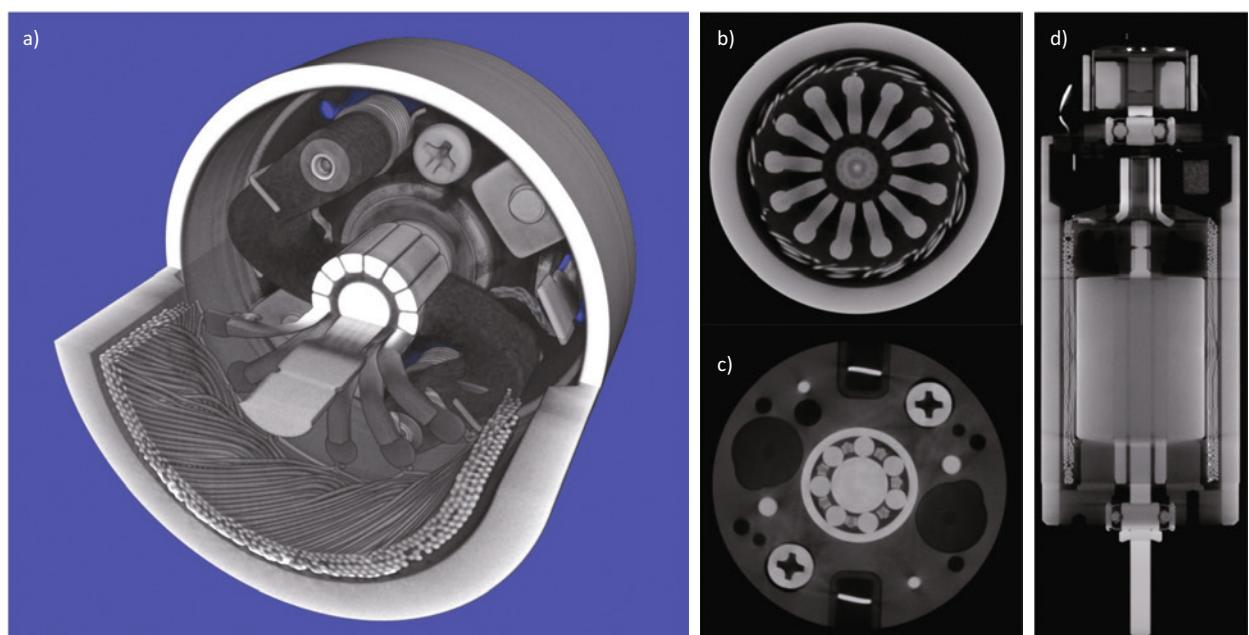


Bild 9.16 Visualisierung der Volumendaten mittels a) 3D-Rendering und b) bis d) verschiedene Schnittansichten (Christoph 2017)

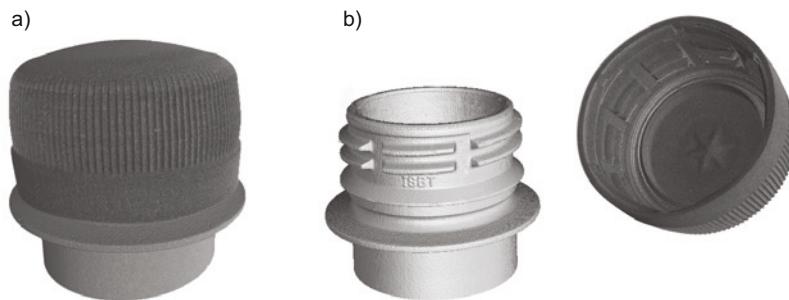


Bild 9.17

a) montierte Baugruppe und b) virtuell demontierte Komponenten (Christoph 2017)

Auch die Überprüfung von Leiterplatten und Halbleiterbaugruppen beispielsweise zur Prüfung der Durchkontaktierung ist prinzipiell möglich. Häufig können diese nicht vollständig im Messbereich gedreht werden, da diese hierbei aufgrund des großen Aspektverhältnisses entweder mit der Röntgenröhre oder mit dem Röntgendetektor kollidieren würden. Aus diesem Grund werden hierfür in der Regel Laminografie-Trajektorien eingesetzt (siehe Abschnitt 9.6.2.4).

9.2.2.2 Automatische Analyse innen- und außenliegender Störungen

Spezielle Softwarewerkzeuge dienen zur automatischen Identifikation und Klassifizierung innen- und außenliegender Störungen. Ein Beispiel hierfür sind Software-

module zur Analyse von Lunkern und Einschlüssen. Die Störungen werden basierend auf einer das Werkstück und die Störungen umfassenden triangulierten Gesamtpunktewolke erkannt und nach ihrer Größe klassifiziert. Als Ergebnis wird die Anzahl der Lunker je Klasse ausgegeben. Optional können die identifizierten Störungen entsprechend Ihrer Größe unter Berücksichtigung einer benutzerdefinierbaren Toleranz farbcodiert dargestellt werden (Bild 9.18).

Auch die Überprüfung des Werkstücks auf Risse und Grate kann auf Basis einer zuvor bestimmten Messpunktwolke (Bild 9.19a) erfolgen. Hierzu wird in einem ersten Schritt eine gratafreie Punktewolke (Bild 9.19b) berechnet. Aus ursprünglicher und gratafreier Punktewolke werden die störenden Grate anschließend unter Berücksichtigung der zulässigen Gratlänge ermittelt. Analog zur

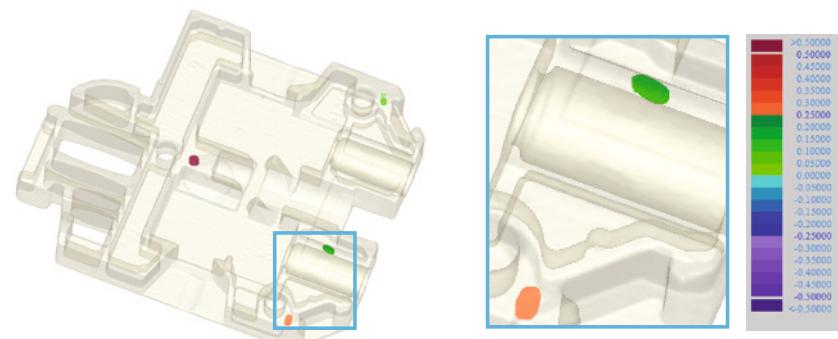


Bild 9.18

Lunkerdarstellung: Lufteinschlüsse werden automatisch gefunden und nach Größe farbcodiert dargestellt.

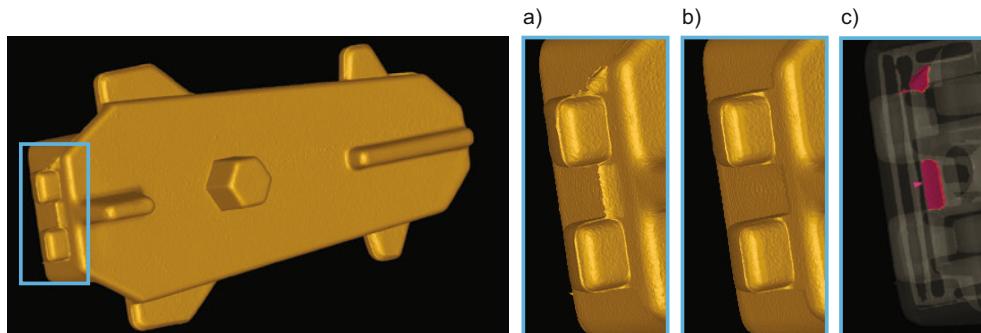


Bild 9.19 Berechnung der farbcodierten Gratdarstellung: Aus dem gratbehafteten Werkstück a) wird mittels Filterung ein gratafreies Werkstück b) berechnet. Grate außerhalb Toleranz werden anschließend farbcodiert c) dargestellt.

Lunkererkennung ist auch hier eine farbcodierte Darstellung der außer Toleranz liegenden Grate möglich (Bild 9.19c).

9.2.3 Messen der Werkstückgeometrie

Die Röntgen-Computertomografie ermöglicht die vollständige, zerstörungsfreie Messung aller innen- und außenliegenden geometrischen Eigenschaften. Die Bedeutung kurzer Messzeiten bei gleichzeitig ausreichend geringer Messunsicherheit nimmt hierbei immer mehr an Bedeutung zu. Beispielsweise erfordert die 100-Prozent-Überwachung eines Fertigungsprozesses im Mehrschichtbetrieb Messzeiten von wenigen Sekunden pro Werkstück. Die Forderung nach Rückführbarkeit der hierbei ermittelten Messergebnisse ist hierbei von zentraler Bedeutung und wird in Abschnitt 9.7 näher behandelt. In Bild 9.20 ist die Messzeit als Funktion der Anzahl zu messender geometrischer Eigenschaften für verschiedene Messprinzipien schematisch dargestellt.

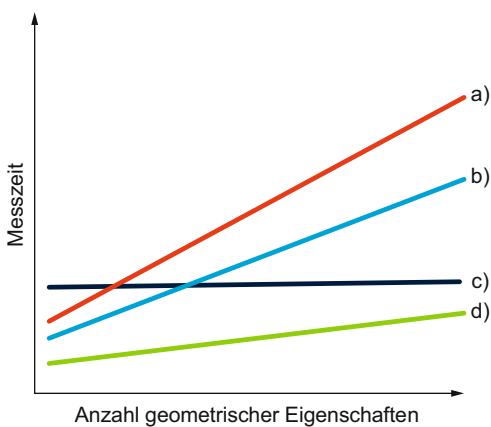


Bild 9.20 Messzeit in Abhängigkeit von der Anzahl zu messender geometrischer Eigenschaften mit a) Taster, b) Multisensorik, c) Röntgentomografie und d) Bildverarbeitung

Sowohl bei konventionellen taktilen als auch bei Multisensorkoordinatengeräten hängt die Messzeit maßgeblich von der Anzahl zu messender geometrischer Eigenschaften ab. Auch bei schnellen Koordinatenmessgeräten mit Bildverarbeitungssensorik nimmt die Messzeit in erster Näherung linear mit der Anzahl zu messender geometrischer Eigenschaften zu. Im Gegensatz hierzu ist die Messzeit beim Messen mittels Röntgen-Computertomografie hiervon im Wesentlichen unabhängig. In den letzten Jahren konnten die Messzeiten nochmals deutlich reduziert werden. Die Zeit für eine „Im Bild“-Tomografie beträgt bei den meisten Anwendungen nun typischerweise zwischen einigen 10 Sekunden und 10 Minuten pro

Werkstück. Lediglich Messaufgaben mit sehr hohen Anforderungen an Strukturauflösung oder schwer zu durchstrahlenden Materialien erfordern deutlich längere Messzeiten von bis zu 2 Stunden.

Im Vergleich zu mit klassischen Sensoren aufgenommenen Punktwolken ist die Punktanzahl bei Messungen mittels Röntgen-Computertomografie sehr groß. Die Form der gemessenen Geometrien wird durch eine CT-Punktwolke aufgrund der hohen Punktanzahl deutlich besser beschrieben. Große Formabweichungen wirken sich geringer auf die Messergebnisse aus, da viele Punkte in die Berechnung der Ausgleichselemente einfließen. Die hohe Punktanzahl wirkt sich zusätzlich positiv auf die Reproduzierbarkeit der hieraus ermittelten geometrischen Eigenschaften aus.

9.2.3.1 Maßliche Auswertung des Werkstücks

Die Bestimmung geometrischer Eigenschaften erfolgt auf Basis zuvor berechneter Grenzflächenpunkte. In einem ersten Schritt werden hierzu aus den Messpunkten Regelgeometrieelemente wie Geraden, Ebenen oder Zylinder mittels Methoden der Ausgleichsrechnung bestimmt. Störende Objektbereiche wie Anspritzpunkte lassen sich z.B. mittels 3D-Selektionsfenstern aus einer Messpunktwolke herausschneiden (Bild 9.21a).

Für die anschließende Selektion der für die Berechnung der Regelgeometrieelemente relevanten Grenzflächenpunkte kommen, abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationen über das Werkstück, verschiedene Verfahren zum Einsatz.

Liegt ein 3D-CAD-Modell des Werkstücks vor, kann die Auswahl der Grenzflächenpunkte besonders einfach durch Anwählen des zugehörigen CAD-Elements erfolgen (Patchselektion, Bild 9.21b). Unter Berücksichtigung von vorgegebenen Randabständen werden alle Messpunkte selektiert, die dem angewählten CAD-Patch geometrisch zugeordnet sind. In Anlehnung an die Vorgehensweise beim taktilen Messen kann die Punktauswahl mithilfe einer vorgegebenen Punkteverteilung auf dem CAD-Patch erfolgen. Da hierbei jedoch die meisten Informationen über die Werkstückoberfläche verworfen werden, sollte diese Methode nur in Ausnahmefällen, beispielsweise zum Vergleich einer CT-Punktwolke mit einer taktilen Referenzmessung, eingesetzt werden.

Liegt kein CAD-Modell vor, erfolgt die Selektion der Punkte alternativ anhand einer triangulierten Punktwolke, z.B. mithilfe einer automatischen Zerlegung in Regelgeometrieelemente (Segmentierung, Bild 9.21c): Unter Vorgabe eines zu messenden Regelgeometrieelements, beispielsweise eines Zylinders, werden ausgehend von einem Startpunkt solange Grenzflächenpunkte in dessen Umgebung hinzugenommen, bis sich die Formabweichung

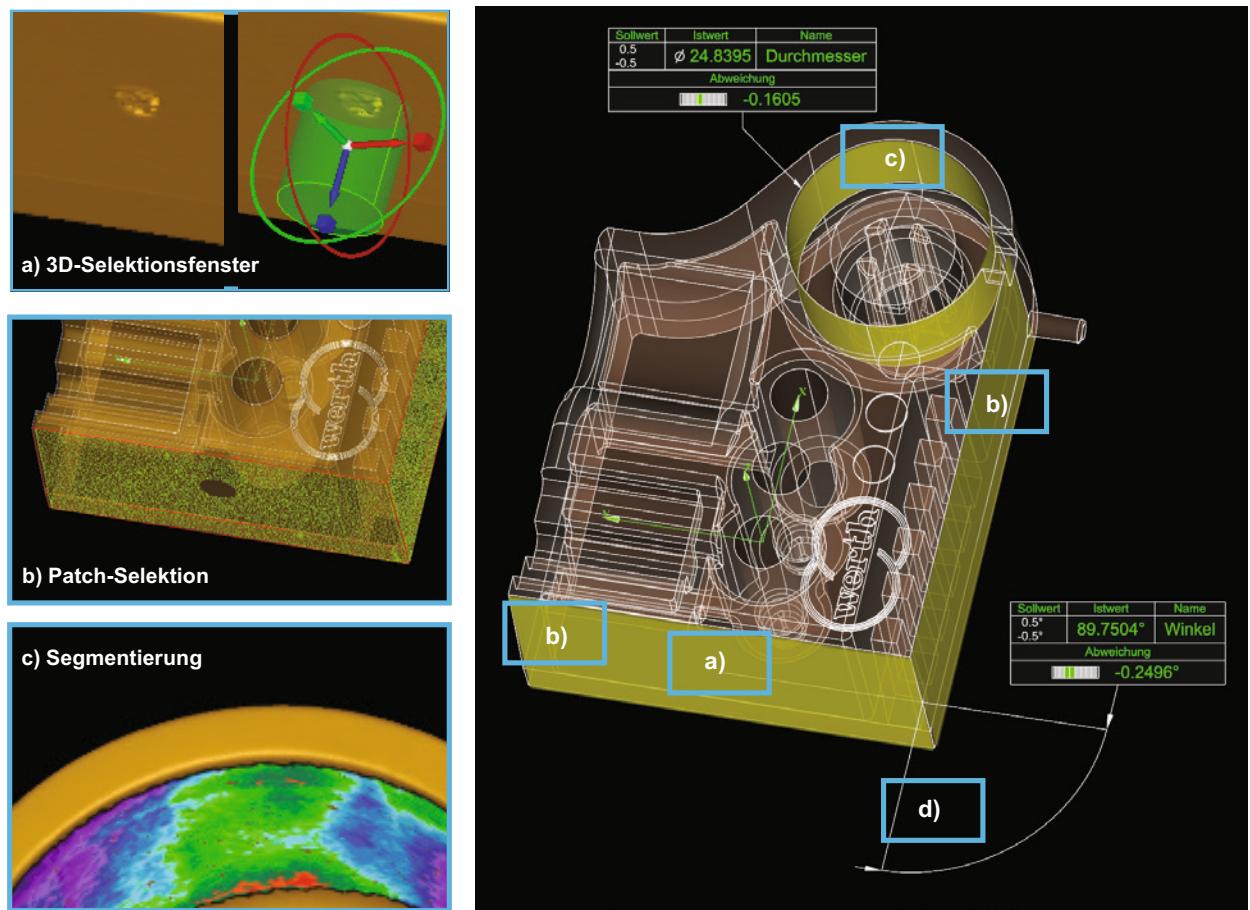


Bild 9.21 Links: Verfahren zur Selektion von Grenzflächenpunkten: Ausgrenzen eines Anspritzpunktes mittels a) 3D-Selektionsfenster, b) CAD-Patch-Selektion von Punkten zweier Ebenen und c) Segmentierung eines Zylinders basierend auf einer triangulierten Punktwolke des Werkstücks. Rechts: Aus den Messpunkten berechnete Regelgeometrieelemente und hieraus berechnete geometrische Eigenschaften

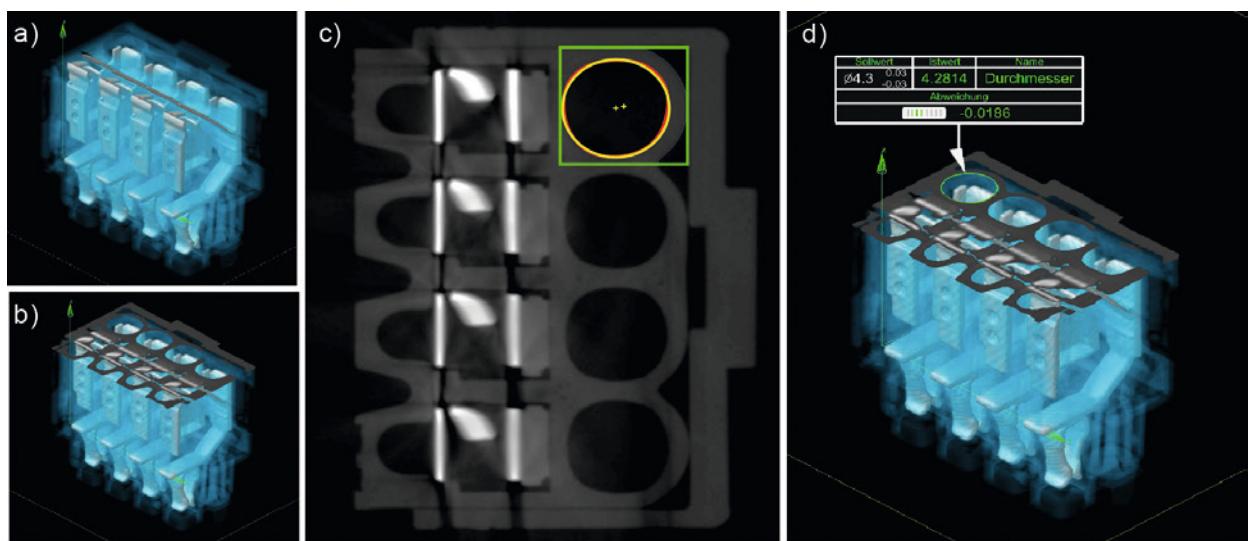


Bild 9.22 Auswertung von geometrischen Eigenschaften anhand von Volumenschnitten

des Geometrieelements deutlich vergrößert. Die Vorgabe eines Randabstands ist sinnvoll, um in Übergangsbereichen zu anderen Geometrieelementen befindliche Punkte aus der Selektion auszuschließen.

Sowohl bei Verwendung der 3D-CAD-Patchselektion als auch bei der Segmentierung erfolgt die Berechnung des Regelgeometrieelements anschließend automatisch mit nahezu maximaler Punktanzahl (Bild 9.1d). Die gesuchte geometrische Eigenschaft entspricht entweder einem Parameter eines Regelgeometrieelements, beispielsweise dem Durchmesser eines Zylinders (Bild 9.21), oder wird durch Verknüpfung mehrerer Regelgeometrieelemente bestimmt, beispielsweise durch Berechnung des Winkels zwischen zwei Ebenen (Bild 9.21).

Eine Alternative ist die Auswertung von Volumenschnitten mittels 2D-Bildverarbeitung, welche nachfolgend anhand von Bild 9.22 erläutert wird. Zunächst muss die Ebene, in dem der 2D-Volumenschnitt erzeugt werden soll, definiert werden (Bild 9.22a). Dies erfolgt beispielsweise manuell, anhand eines gerenderten Volumens, oder automatisiert, anhand von Patches eines eingepassten CAD-Modells. Jeder Pixelwert eines 2D-Volumenschnitts (Bild 9.22b) wird mittels mathematischer Verfahren aus den benachbarten Voxelwerten im Voxelvolumen berechnet. Die weiteren Verarbeitungsschritte erfolgen mittels Methoden der 2D-Bildverarbeitung. Nach einer optionalen Filterung des Volumenschnitts werden Grenzflächenpunkte (Bild 9.22c, rot) und Regelgeometrieelemente (Bild 9.22c, gelb) bestimmt und hieraus geometrischen Eigenschaften d) berechnet.

9.2.3.2 3D-Soll-Ist-Vergleich

Die Berechnung eines Soll-Ist-Vergleiches von Nominaldaten wie einem CAD-Modell oder einer Meisterteilmessung zu einer Ist-Geometrie beschrieben durch eine CT-Messpunktewolke findet breite Anwendung. Nicht nur für Freiformflächen, sondern auch zur Bestimmung der Formabweichung an Regelgeometrieelementen oder Paarungsgeometrien wie Lochbildern und formschlüssigen Verbindungen können Abweichung berechnet, dargestellt und analysiert werden. Nachdem Soll- und Ist-Daten aufeinander eingepasst oder abgeglichen wurden erfolgt die Berechnung der Abweichung in wenigen Bedienschritten. Die Abweichungen können optional abhängig von Vorzeichen, Betrag und Toleranzehinhaltung farbcodiert dargestellt werden (Bild 9.23).

Die Toleranzen können entweder global oder einzelnen Geometrieelementen, z.B. anhand von CAD-Patches oder zuvor berechneten Regelgeometrieelementen, zugeordnet werden. Toleranz-Fit-Funktionen ermöglichen die Berücksichtigung der lokal definierten Toleranzen bei der Lageoptimierung, sodass die hierdurch definierten Zonen

möglichst wenig ausgenutzt bzw. überschritten werden (Christoph 2017).

9.2.4 Gemeinsame Lösung von Inspektions- und Messaufgaben

Die Integration der für Inspektions- und Messaufgaben notwendigen Softwaremodule in ein gemeinsames Softwarepaket ermöglicht nicht nur rückführbare Ergebnisse, sondern auch kurze Berechnungszeiten. Beispielsweise entfallen bei Verwendung eines Softwarepakets zeitintensive Speicher- und Ladevorgänge die zudem häufig nicht automatisierbar sind. Alle Inspektions- und Messergebnisse können in einer Grafik dargestellt (Bild 9.24) und Problemstellen schnell identifiziert werden.

9.3 Abbildungsgeometrie

Das Ziel der Tomografie ist die volumetrische Abbildung aller zu messenden geometrischen Eigenschaften des Messobjekts in möglichst kurzer Messzeit mit für die Messaufgabe ausreichend geringen Artefakten (Bildfehlern) und einer ausreichenden (nicht immer möglichst hohen) Struktur- und Ortsauflösung. Sowohl der zur Verfügung stehende Messbereich als auch die erreichbare Strukturauflösung hängen hierbei von der eingestellten Vergrößerung ab.

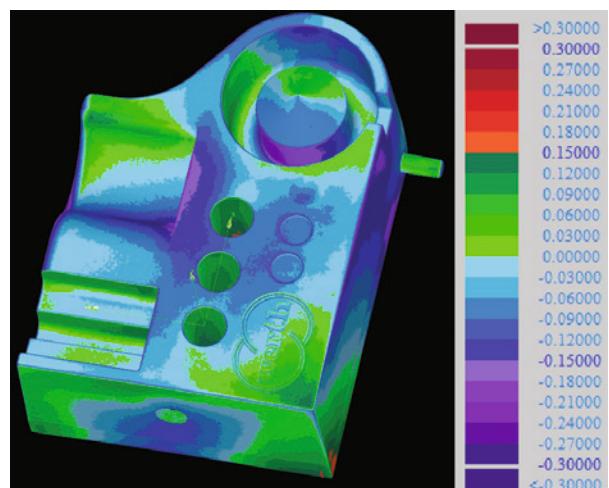


Bild 9.23 Farbcodierte Darstellung der Abweichungen zwischen CAD und Punktewolke

Stichwortverzeichnis

Symbolle

1D-Messmaschine 250
2,4 GHz-Frequenztechnologie 660
2D-Bildverarbeitung 474
2D-Messmaschinen 265
2D-Visualisierung
- bei Ultraschalluntersuchungen 622
3D-Distanzoffset-Bestimmung 528
3D-Farbkartenerstellung 657
3D-Formfehler 664
3D-Koordinatenmessgerät 268
3D-Koordinatenmesssysteme 286
3D-Messmaschinen
- Steuerung 270
3D-Messverfahren 256
3D-Modelle 98
3D-Punktwolke 389
5M 379
6D-Datenerfassung 529
6DOF 557
6D-Sensoren 530
6D-Visualisierung 530
8D-Report 97

A

AAS *siehe* Asset Administration Shell
Abbildung 501, 504, 510
Abbildungsfehler 503, 504, 549
Abbildungsgeometrie
- Messbereich 475
- Optimierung 477
- Ortsauflösung 475
- Strukturauflösung 475
- Vergrößerung 475
Abbildungsmaßstab 502, 503, 545
Abrissverfahren 604
Absolutdistanzmesser 522, 527
Abstandsmessung 189, 255
Abstandssensoren 189, 301, 302, 303, 314
Abstand-Verstärkung-Größe-Verfahren 621, 623
ADM-Schema 523
Advanced Product Quality Planning 98
Advanced Quality Data Exchange Format 697

Ähnlichkeitstransformation 557
AIAG *siehe* Automotive Industry Action Group
AIAG MSA 105, 109, 209, 221, 230
aktive Thermografie 631
Aktualität
- Datenqualitätsdimensionen 778
Akzeptanzgrenze 166
Akzeptanzwinkel 423
Allgemeintoleranz *siehe* Form und Lage geometrischer Elemente; *siehe* Größenmaß
Alpha-Fehler 166
Analyse-Software 81
Analysetechniken 787
Anode 462
ANOVA 83
ANOVA-Analyse 170
ANOVA-Methode 125
Antastabweichung 192, 193, 303, 304, 305, 311, 492, 512, 559
Antastkraft 308
Antaststrategien 603
Antastung 287
Apertur 502, 503, 504, 510, 511
APQP *siehe* Advanced Product Quality Planning
AQDEF *siehe* Advanced Quality Data Exchange Format
Arbeitsabstand 303, 304, 305, 502, 503, 504, 506, 514
Arbeitspunkt 227
Arbeitsvorbereitung 196
ARL *siehe* Average Run Length
Asset Administration Shell 683
Atline-Prüfungen 18
Attributprüfungen 18
Auditdaten
- Datenart 778
Audits 98
Auflösung 133, 502, 510, 511, 512, 514, 578
Auflösungsvermögen 418, 440
Ausreißer 429
Auswertung 196
Autoencoder 28
Autokollimator 256
automatisierter Messdatentransfer 9
Automatisierung 381
- Greifersysteme 389

- Handhabung 381, 382, 383
- sortieren 382
Automotive Industry Action Group 81, 93
Average-Range-Methode (ARM) 125
Average Run Length 31
AVG-Diagramm 623
axiale Auflösung 578
Azimuth 594

B

Batchfingerprinting 751
Batch-Maturity 751
Batwings 438
Bauteilausrichtung 601
Bauteilpositionierung 598
Bauweise 310, 311, 318
Bediener 134
Bedienereinfluss 125
Belastungen
- thermische 390
Beleuchtung 503, 504, 505, 506, 547
berührungslos 301, 303, 308, 514
bestärkendes Lernen
- maschinelles Lernen 780
Bestätigung 122
Best-Fit-Applikation 657
Beta-Fehler 166
Betrachtungswinkel 380
Betriebsmodelle 681
Bias 174
Big Data 752, 777
Bildmessung 551
Bildverarbeitung 499, 501, 512, 515
- Abbildungsmaßstab 395
- Bilderfassung 385
- Bildmerkmale 386
- Binärbild 394, 397
- Entscheidungsfindung 387
- Kalibrierbild 395
- Merkmalsextraktion 386
- Objekterkennung 386
- Otsu 396
- Thermografie 637
- Vorverarbeitung 385
Bildverarbeitungsfilter 509
Bildverarbeitungssensoren 301, 302, 303, 304, 305, 308, 309, 311, 312, 313, 314, 315, 317
Bildzuordnung 545
Binning 483
Blackbox-Modelle 756
Bleiglas 485
Blickwinkel 382
Blitzthermografie 641
Bolzen-Beispielanlage 607
Bosch Heft 10 211
Brennfleckgröße 477, 478, 479, 480
Brinellhärte 352

Bügelmessschraube 243
Bündelausgleichung 554
Bypass-Zelle 611

C

CAD-basierte Messsoftware 652
CAD-Daten 198
CAD-Modell 469
- einpassen 469
CAD-to-Part-Vergleich 657
Calibration Data Exchange-Format 200, 684
calibration of reference 174
Capability of Measurement Processes 118
CAQ-System 98
Cäsiumjodid 482
CCD-Sensor 506, 507, 546
chromatische Sensoren 304, 305, 312, 313, 314, 315
Clusteranalyse 28
- maschinelles Lernen 780
CMC-Einträge 285
CMOS-Sensor 507, 546, 547
Coherence Scanning Interferometry 413
Color-Maps 657
Companion Specification 686
Comptoneffekt *siehe* Wechselwirkungsprozesse
Computertomografie 190, 288, 289, 290, 301, 302, 306, 307, 310, 311, 316, 317, 461, 462
Computertomograph 720
Condition-Monitoring 767
Confidential Computing 687
Conformance 790
Convolutional Neural Network 393
CT *siehe* Computertomografie
cyberphysikalische Sensorsysteme 680

D

Data Mining 788, 795
Data Warehouse 791
Datenanalyse 787
Datenanalysemethoden 754
Datenanalyse-Trichter 779
Datenaufbereitung 794
Datenaustausch 688, 791
- unternehmesübergreifender 687
Datenbanken 745
Datenbereinigung 749
Datenerfassung 196
Datenformate 693
Datenheterogenität 677
Datenhoheit
- Sicherung der 687
Datenmanagement 388, 678
Datenmodell 695
Datenqualität 794
Datenqualitätsdimensionen 778
Datenquellen 791

- Datenschnittstelle 744
 Datenstruktur 701
 Datentreuhänder-Plattform 688
 Datentypen 778
 Datenvalidierung 747
 Datenverarbeitung 270
 Datenverfügbarkeit 794
 DCC *siehe* Digital Calibration Certificate
 Deep Learning 495
 Defekterkennung 454
 defektselektiv 642, 643
 Deformationsmessung 562
 Descriptive Analytics 33, 766
 - Data Analytics-Modell 779
 Design der Infrastruktur 682
 Diagnostic Analytics 33, 766
 - Data Analytics-Modell 779
 DIC 552
 Dichtheitsanforderung 327
 Dichtheitsprüfung 319
 Dickenmessung 623
 Digital Calibration Certificate 684
 digitaler Kalibrierschein 684
 digitaler Wandel 774
 Digitale Transformation 774
 - digitaler Wandel 775
 digital image correlation 552
 Digitalisierung 765
 - digitaler Wandel 774
 Digitalkamera 546
 Digital Twinning 9
 Digitisierung
 - digitaler Wandel 774
 DIN 32937 31, 107
 DIN 55350-15 93
 DIN EN ISO 5393 372
 DIN EN ISO 9000:2015 81
 DIN EN ISO 9001 107
 DIN EN ISO 10012 108
 DIN EN ISO 14253-1 106
 DIN ISO 286-1 227
 DIN ISO 22514-2 230
 Direkte Lineare Transformation 554
 Discovery 789
 Disruption
 - digitaler Wandel 775
 Distanz-Amplituden-Korrektion (DAK)-Verfahren 623
 Distanzmesser 523
 Distanzmessung 519, 593
 DLT 554
 DMIS-Standard 198
 DOE *siehe* statistische Versuchsplanung
 Dokumentation 20, 27
 Dokumentenmanagement 98
 Doppler-OCT 581
 drahtlose Messsysteme 9
 Drehachse 482
 Drehgeber 248
 Drehmoment 733
 Drehmomentschlüssel 362
 Drehmomentschraubwerkzeuge 371
 Drehschrittzahl 478
 Drehwinkelmessung 365
 Dreibein-Messwerk 654
 Drift 176
 Druckabfallmessung 334
 Druckanstiegsverfahren 338
 Druckmessmethoden 334
 Druckmessung 336
 Dunkelfeld-Auflicht 503, 504, 505, 506
 Durchflussmessung 338
 Durchflusssensoren 340
 Durchlicht 504
 Durchschallungsverfahren 617
 Dynamic Depth Focussing 620
- E**
- Ebenheit 259, 260, 733
 Ebenheitsmessabweichung 559
 Ebenheitsmessung 407
 Edge-Devices 681
 Effusivität 633
 Eigenfilterung 480
 Eignungserklärung 82
 Eignungsindex nach VDA Band 5 231
 Eignungsindizes
 - Grenzwerte 209
 Eignungskennwerte 89, 224, 716
 Eignungsnachweis 81, 221
 - für Messprozesse 115
 - gemäß VDA 5 129
 - Kennwerte 133
 - Vorgehensweise 168
 Eindringprüfung 390
 - fluoreszierende 393
 - Prüfmittel 391
 Einfachprüfwerkstück 713
 Einflussparameter 380
 Einhüllende 415
 Elevation 594
 Ellipsenmessung 551
 Emissionskoeffizient 631
 EMPB *siehe* Erstmusterprüfbericht
 Endkontrolle von Bauteilen 651
 Enhancement 790
 Entscheidungsbäume 755
 Epipolareometrie 555
 Ereignisprotokolle 789
 Erfolgsfaktoren 775
 Erodierbearbeitung 202
 Erschöpfung 380
 Erstbemusterung 93
 Erstmusterprüfbericht 93
 - digitaler 94

erweiterte Messunsicherheit 133

Event Logs 789

F

Fähigkeitsindex 119

Fähigkeitsnachweis 120

- gemäß Firmenrichtlinie 120

Fähigkeitsuntersuchung gemäß MSA 128

Failure Mode and Effects Analysis 97

FAIR-Prinzipien 677, 678

Feature-based Matching 552

Fehlentscheidung 381

Fehlerkosten 21

Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse 17

Feintaster 245

fertigungserne Messung 7

Fertigungsintegration 17

Fertigungskette 16

fertigungsnaher Messung 7

Fertigungsprozessstreuung 229, 230

Fertigungsregelkreis 202

Fertigungssystem 202

Fertigungsüberwachung 514, 712

Fertigungszelle 201

Filament 480

Fine Tolerances (FT)-Regelung 214

Firmenrichtlinien 110

Fisheye-Kamera 546

Flächendetektor 461, 465

Flächenform 733

Flächentexturparameter 433

Fluchtfermrohr 259

FMEA 17 *siehe* Failure Mode and Effects Analysis

Fokussierspule 480

Fokusvariationssensoren 303, 305, 314

Fokusvariationsverfahren 511, 513, 514

Formabweichung 492

Formiergasleckprüfung 345

Formmessgeräte 185

Formmessung 257

Formtoleranzen 733

Form und Lage geometrischer Elemente 56

- Allgemeintoleranz 76

- Bezug/Bezüge 61

- Situationselemente 62

- Zeichnungseintragung 61

- Bezugssystem 66, 68

- Freiheitsgrad 67

- Freiheitsgradbindung 67

- Koordinatensystem 68

- Formtoleranz 60

- Allgemeintoleranz 61

- Ebenheit 60

- Ebenheitsabweichung 60

- Formabweichung 60

- Rundheit 61

- Rundheitsabweichung 61

- Toleranzgröße festlegen 61

- Lauftoleranzen 73

- Gesamtrundlauf - radial 75

- Rundlauf - axial 74

- Rundlauf in spezifizierter Richtung 75

- Rundlauf - radial 73

- Ortstoleranz 69

- Flächenprofil 71

- Flächenprofilabweichung 73

- Koaxialität 70

- Koaxialitätsabweichung 70

- Linienprofil 71

- Ortsabweichung 69

- Position 69

- Positionsabweichung 69

- Symmetrie 71

- Richtungstoleranz 63

- Parallelität 64

- Parallelitätsabweichung 64

- Rechtwinkligkeit 65

- Richtungsabweichung 64

- Toleranzindikator 58

- Bezüge und Bezugssysteme 60

- Symbole für geometrische Eigenschaften 58

- Toleranzzone und Parameter 58

- Toleranzzonen 59

- Zeichnungseintragung 58, 60

Form- und Lageprüfung 378

FPGA 547

Freiformfläche 565

Frequency Domain OCT 576

Frequenzanalyse 580

Fühlhebelmessgerät 245

Führungssysteme 269

Funktechnologie 659

G

Gadoliniumoxysulfid 482

Gasturbinen 390

- Turbinenschaufeln 390

Gaußfilter 430

gefilterte Rückprojektion 466

- Genauigkeit 303, 304, 307, 502, 507, 511, 558, 661

Geometrieelement

- integrales 60

- zusammengesetztes 72

- zentrales 60

Geometriekorrektur 484

geometrische Eigenschaft 472

geometrische Produktspezifikation 39, 378

- Normensystem 40

Geradheit 258, 733

Geradheitsmessung 258

Glühwendel 480

Golden Device 332

GPS *siehe* geometrische Produktspezifikation

- GPS-Grundsatz
 - der allgemeinen Spezifikation 55
 - der bestimmenden Zeichnung 42
 - der Dualität 45
 - der Funktionsbeherrschung 44
 - der Referenzbedingung 44
 - der Unabhängigkeit 43
 - der Verantwortung 47
 - des Aufrufens 42
 - des Geometrieelementes 43
 - des Standards (Default) 44
 - Operatorkonzept 47
 grafische Benutzeroberfläche 399
 Grenzflächenpunkte 467
 - Punktanzahl 472
 - Selektion 473
 Größenmaß 47
 - Allgemeintoleranz 54
 - Grenzmaße festlegen 54
 - spezifizieren 54
 - Toleranzen festlegen 54
 - Toleranzen für Normteile 56
 - Toleranzsystem 56
 - Zeichnungseintragung 48
 Größenmaßelement 47
 - Kugel 48
 - Parallelebenenpaar 48
 - Zylinder 47
 Größenmaßmerkmal 49
 - Gauß-Element 51
 - Größenmaß der kleinsten Abweichungsquadrate 51
 - Hüllbedingung 52
 - Maß des größten einschreibbaren Geometrieelementes 51
 - Maß des Hüllelements 50
 - Maß des kleinsten umschreibbaren Geometrieelementes 50
 - Maß des Pferchelements 51
 - Paarungsmaß 50, 51
 - wirksames Größenmaß 50, 51
 - Zweipunktgrößenmaß 49
 Großverzahnungen 293
 GUI *siehe* grafische Benutzeroberfläche
 GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) 118, 280, 281, 282, 283, 297, 667, 724
 GUM Typ B 175
- H**
- Handmessgeräte 242
 Härtemessverfahren 354
 Härteprüfung 351
 Heeleffekt 480
 Helium Bombing 345
 Heliumleckprüfung 342
 Hellfeld-Auflicht 504, 505
 Hintergrundkorrektur 580
 Hochpräzisionsmesstaster 654
 Höhen-Basis-Verhältnis 558
 Höhenmessgerät 251
- Honstruktur 420
 Hüllbedingung *siehe* Größenmaßmerkmal
- I**
- IATF 16949:2016 81, 93, 108
 ideales Gasgesetz 323
 image matching 545
 Impuls-Echo-Verfahren 617
 Impulsschrauber 363
 Impulsthermografie 641
 Induktionsthermografie 642
 Industrie 4.0 388, 675
 Industrieknickarmroboter *siehe* Roboter
 industrielle Revolution 381
 Inertialsensoren 529
 Informationsressourcen 122
 Infrarot 546
 Infrarotkamera 633
 Inclinometer 254
 Inline-Messung 7
 Inline-Prüfungen 18
 Innenmessschrauben 244
 In-Prozess-Messung 8
 Inspektion 469, 470
 - Baugruppen virtuell demontieren 470
 - Grate 471
 - Lunker 471
 - Materialproben 481
 - Risse 471
 - Störungen 471
 Instrumenten-Transfer-Funktion 444
 Integrationszeit 633
 Intelligent Machine Control 105
 Intel Software Guard Extensions 687
 Intensitätsbild 465
 Interessensgruppen 676
 Interest-Operator 552
 Interferenz 408
 Interferenzdetektion 576
 Interferenzstreifen 412
 Interferometer 519
 Interferometrie 408
 interferometrische Sensoren 301, 306, 312, 314
 Internationales Wörterbuch der Metrologie 661
 Internet of Production 33, 766
 Inventardaten
 - Datenart 778
 IoT-Infrastrukturen 681
 IoT-Stack 682
 iqs Supply Chain Quality Center 98
 IR-Kamera 633
 Ishikawa-Diagramm 169, 379
 ISO 10360-Reihe 272
 ISO 16610 433
 ISO 21920 433
 ISO 22514-7 81
 ISO 25178-1 433

ISO/TR 11462-4 84

IT-Infrastruktur 26

K

Kalibrierdaten 199

Kalibrieren 19

Kalibrierintervalle 20

Kalibrierpyramide 278, 279

Kalibrierstatus 684

Kalibrierung

- Leckageprüfung 331

Kalibrierungsmessungen

- bei Lasertrackern 525

Kalibrierunsicherheit 133

Kamera

- Consumer- 546

- Highspeed- 546, 547

- Industrie- 546

- Mess- 547

- Multispektral- 546

- Spiegelreflex- 546

- Stereo- 546

- Thermal- 546

- Time-of-flight- 546

Kamerakalibrierung 544, 547, 549, 561

Kamerasystem 377, 381, 393

- Bildwiederholungsrate 384

- CCD 384

- CMOS 384

Kappa-Koeffizient

- Kappa nach Cohen 144

- Kappa nach Fleiss 150

Kappa nach Cohen

- Alternativhypothese 146

- Annahmekriterien 147

- beobachtete Anteile 144

- beobachtete Urteilskombinationen 144

- Bestimmungsgleichung 145

- Datenaufbereitung gemäß AIAG-Heuristik 147

- erwartete Anteile 145

- Fallbeispiel 147

- Nullhypothese 146

- Prüfgröße für den Signifikanztest 146

- Rechenschema 144

- Testentscheid 150

- Varianz-Schätzer 146

- Wahrscheinlichkeit P 146

Kappa nach Fleiss

- Alternativhypothese 152

- Annahmekriterien 153

- Anteil übereinstimmender Urteile 151

- Anteil zufälliger Übereinstimmungen 151

- Bestimmungsgleichung 151

- Fallbeispiel 153

- Nullhypothese 152

- Prüfgröße für den Signifikanztest 152

- Rechenschema 150

- Rechenschema für den Signifikanztest 152

- Standardabweichung 152

- Testentscheid 152

- Wahrscheinlichkeit P 152

Kathode 462

Kegelstrahlartefakte 483, 484, 486

Kegelstrahlwinkel 484

KFU *siehe* Kurzzeitfähigkeitsuntersuchung

Kleinlängenmesser 251

k-Linearisierung 580

Klinometer 254

KMG *siehe* Koordinatenmessgerät

KMG-Kalibrierung 271

Koaxialität 733

Kohärenz 573

Kohärenzlänge 415

Kohärenztomographie 573

Kollinearitätsgleichungen 554

Kollisionskontrolle 657

Kompaktgeräte 307, 311

Konfidenzinterval 400

konfokale Sensoren 305

Konformitätsbewertung 14

Konformitätsprüfung 106

Konsistenz

- Datenqualitätsdimensionen 778

Konturbildverarbeitung 467, 509

Konturmessgeräte 185, 719

Kontursensoren 309

Konversion

- digitaler Wandel 774

Koordinatenmessgerät 184, 478, 501, 502, 506, 511, 512,

514, 515, 719

Koordinatenmesssysteme 184, 189

Koordinatenmesstechnik 183

Koordinatenmessungen 264

Koordinatensystem 556

Koplanaritätsbedingung 555

Körperkanten 77

Korrekttheit

- Datenqualitätsdimensionen 778

Korrelationen 562

Korrelationsanalysen 754

Korrelogramm 411

Kosten

- qualitätsbezogene 21

Kreisscan 462

Kreuzkorrelationskoeffizient 552

Kugelabstandsabweichung 193, 559

künstliche Intelligenz 495, 765

Kurzzeitfähigkeitsuntersuchung 707

L

Lagetoleranzen 733

Lambert-Beer-Gesetz 465, 616

Laminografie 471

Längenkomparator 250

Längenmaße 733
 Längenmessabweichung 192, 310, 311, 312, 492, 512, 559, 560
 Längenmessung 249, 276
 Langzeitfähigkeit 716
 Large-Scale-Metrology-Systeme 683
 Laser-Anregung 643
 Laserdurchstrahlschweißen 587
 Laserinterferometer 249
 Laserlichtschnittverfahren 553
 Lasermaterialbearbeitung 585
 Laserprojektion 548
 Laserprozesskontrolle 584
 Laserradar 591
 Laserscanner 658
 Laserscanning 657
 Lasersensoren 302, 303, 304, 308, 309, 312, 313, 314, 315, 317
 Laserthermografie 643
 Lasertracker 185, 683
 Laser-Triangulation 654
 Lastenheft 112, 715
 laterale Auflösung 578
 Lateralsensoren 189
 least-squares matching 552
 Lebenszyklus von Messdaten 676
 Leckagegrenzwerte
 - massebezogene 328
 Leckageprüfung 321
 - mit Durchflussmessung 339
 Leckagerate 322
 Leckgeometrie 328
 Leckprüfmethoden 333
 Leckprüfung
 - druckbasierte 338
 Leckratenbestimmung 328
 Leckströmung 325
 LED-Marker 530
 Leica-6D-Lasertrackersystem 538
 Leitfaden MSA 81
 lernende Fabrik
 - zukunftsfähige Produktionssysteme 775
 Lichtschnittverfahren 190
 LIDAR 389
 Linearachsen 477, 484
 Linearencoder 248
 lineare Interpolation 467
 Linearitätsabweichung 134
 Linearitätsstudie 128
 Linienform 733
 Linienscanner 535
 Liniensensoren 190
 Lobing 662
 Lockin-Thermografie 641
 lokale Kontrasterhöhung 470
 LVDT-Sensor 246
 LWIR 633

M

Machine Learning 33, 766, 768
 - Convolutional Neural Networks (CNN) 386
 Machine-Learning-Algorithmen 33
 Machine Vision 384
 Makrofokusröhren 480
 Manufacturing Execution System 745, 792
 Mapping 622
 Maschinelles Lernen 9
 Maschinenabnahme 713
 Maßabweichung 492
 Massebilanzen 746
 maßliche Prüfung 7
 Maßverkörperung 185
 Materialressourcen 122
 Materialverteilung
 - Prüfung der 453
 Maximum Permissible Error (MPE) 492
 Measurement Systems Analysis (MSA) 19, 109, 118
 Medianfilter 431
 Mehrfachmessung 217
 Mehrkugeldistanznormal 493
 Mehrmedienphotogrammetrie 550
 Merkmale 378, 716
 - einseitig begrenzte 221
 Merkmalsauswertung 604
 Merkmalsdetektor 552
 Merkmalsextraktion 638
 Merkmalspriorisierung 17
 Merkmalstoleranz 111
 MES *siehe* Manufacturing Execution System
 Messabweichung 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 312, 313, 315, 485
 - systematische 134, 485
 - zufällige 485, 487
 - zulässige 192
 Message Queuing Telemetry Transport 685
 Messbereich 475, 483, 484, 489
 Messdatenerfassung 675, 743
 Messdatenlebenszyklus 676
 Messdatenspeicherung 743
 Messdatenvalidierung 746
 Messen 14, 106
 Messergebnis 130
 Messfehler *siehe* Messabweichung
 Messfenster 475
 Messgenauigkeit 492
 Messgerät
 - optisches 384
 Messgeschwindigkeit 301, 303, 307, 308, 314
 Messkamera 547
 Messkopfprinzipien
 - taktile 287
 Messkopfsysteme 286, 288
 Messmikroskop 265
 Messmittel 105, 107
 Messprogramm 316, 317, 318

Messprozesse 81
– nicht fähige 209
Messprozesseignung 716
Messprozessfähigkeitsuntersuchung
– für Dichtheitsprüfung 329
Messprozessoptimierung 212
Messprozessstreuung 215
Messpunkt 413
Messschieber 242
Messschraube 243
Messsoftware 301, 315, 316, 317, 474
Messstellen 134
Messsystemanalyse 118, 233
– nach AIAG MSA 209
Messsystembeurteilung 109
Messsysteme 184
– nicht fähige 209
Messsystemeignung 716
Messsystemoptimierung 212
Messtaster 270
Messtasterkalibrierung 665
Messtastersysteme 269
Messtechnik 241
Messtechnikintegration 8
Messuhren 245
Messunsicherheit 120, 130, 172, 177, 217, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 287, 290, 297, 492, 502, 503, 507, 511
Messunsicherheitsbestimmung 493
Messunsicherheitskomponenten 110
Messzeit 301, 303, 307, 308, 314, 422, 472, 478, 483, 512, 513
Messzelle 201
Metadaten 388
– Datenart 778
Metal-as-a-Service 681
metrologische Strukturauflösung 510, 511
MFU-Maschinenfähigkeit 372
MHz-OCT 582
Michelson-Interferometer 409, 574
Micro Electro Mechanical System 451
Mikrofokusröhren 480
Mikrometer 244
Mikrooptiken 586
Mikrotaster 301, 302, 303, 308, 309, 312, 314
Mikroverzahnungen 292
minimal unterscheidbarer Effekt 167
Mittelwert-Spannweiten-Methode 125
Modellbildung 170, 173
Modellierung 756
Modellierungssprachen 789
Monotonie 387
Montageendprüfsysteme 719
Montageendprüfung 718
Monte-Carlo Simulation 177
MPE 272 *siehe* Messabweichung
MQTT 769 *siehe* Message Queuing Telemetry Transport
MSA *siehe* Measurement System Analysis

MTConnect 686, 769
multiple lineare Regression 782
Multisensorik 301, 310, 311, 312, 313, 314, 485
Multisensor-Koordinatenmesstechnik 299, 301, 312, 313, 317, 318
Mustererkennung 450
MWIR 633
myYET® 755

N

Nachfokussierung 480
NBS-Stufennormal 421
ndc-Faktor 129
Neigung 733
Neigungsmessung 253
Nennmaß 227
Nesting-Index 433
Neubeschaffung eines Messsystems 213
nichtmaßliche Prüfung 6
Nivelliergerät 254, 258, 259
No-Code Plattform 767
Nonius 242
Normal 331, 559
Normale 133, 279, 283, 284, 285, 288, 290, 291, 292, 293, 294
Normen 380
Nyquist-Shannon-Theorem 30

O

Oberfläche
– Beschaffenheit 379
– Fehler 379
– Qualität 378
– Risse 393
– Textur 379
Oberflächenbeschaffenheit
– flächenhafte 77
– im Senkrechtschnitt 77
Oberflächenerfassung 191
Oberflächenmessgeräte 719
Oberflächenmessungen 425
Oberflächenunvollkommenheit 77
Objekterkennung 379
optische Kohärenztomographie (OCT) *siehe* Kohärenztomographie
Offline-Photogrammetrie 561
Offline-Zellen 610
One-Shot-Kalibrierung 550
Online-Photogrammetrie 565
Online-Prüfungen 18
OPC Unified Architecture (OPC UA) 685, 703, 744
OPC UA-Schnittstelle 769
Optik 384
Optimierer 760
optisch angeregte Lock-in-Thermografie 641
optischer Fluss 556

- optische Sensoren 288, 290, 292
 ORB-Operator 552
 Orientierung 554
 - äußere 545, 554
 - innere 544, 549
 Orthophoto 555
 Ortsauflösung 475, 502, 510, 511
- P**
- Parallelität 733
 Parallelkoordinaten 754
 Parameterraum 169
 passive Thermografie 631
 perceived quality 378
 Phased-Array-Prüfkopf 619
 Phased-Array-Rollsensor 627
 Phasenauswertung 414
 Phasenvergleichsverfahren 524
 Phaseshift-Methode 417
 Photoeffekt *siehe* Wechselwirkungsprozesse
 Photogrammetrie 185, 190, 389, 543
 Piezoeffekt 616
 PIS *siehe* Prozessinformationssysteme
 Pixelgröße 477
 Planlauf 733
 Platform-as-a-Service 681
 PMI-Daten 316, 317
 Polarisationsmodulation 522
 Portalgeräte 311
 Portalkoordinatenmessgeräte 185
 Pose 557
 Positionsdetektor 520
 Positionstoleranz 733
 PPAP *siehe* Production Part Approval Process
 PPE *siehe* Prüfprozesseignung
 PPS *siehe* Produktionsplanung und -steuerung
 prädiktives Qualitätsmanagement 6
 präskriptives Qualitätsmanagement 6
 Präzision 661
 Predictive Analytics 33, 766
 - Data Analytics Modell 779
 Predictive Maintenance 31, 675, 769
 Predictive Quality 675, 771, 773
 Prescriptive Analytics 33, 766
 - Data Analytics Modell 779
 Pre-Travel 662
 Pre-Travel Variation 654
 Principal Feature Analysis 28
 Process Mining 787
 Production Part Approval Process 93
 Production Process Mining 35
 Produktentstehungsprozess 96
 Produkt-FMEA 17
 Produkthaftung 105
 Produktions-IT 679
 Produktionsplanung und -steuerung 200
 Produktionsprozess- und Produktfreigabe 93
 Produktprüfung 202
 Produktspezifikation 183, 196
 Produktverfolgung 750
 Profilprojektor 267
 Projektionsbild 465
 Projektionszentrum 549
 Projektor 548
 Prozesseinrichtung 650
 Prozessfähigkeit 715
 Prozessfähigkeitsindex 119
 Prozess-FMEA 17
 Prozessinformationssysteme 744
 Prozesskamera 595
 Prozessmodell 789, 793
 Prozessmodellierung 795
 Prozessoptimierung 675
 Prozessüberwachung 650
 Prüfart 34
 Prüfdatenauswertung 32
 Prüfdatenerfassung 32
 Prüfen 13, 106
 Prüfentscheid 167
 Prüffrequenz 29
 Prüfkörper 193, 559
 Prüflehre 378
 Prüfmerkmale 27, 198
 Prüfmerkmalsdefinition 16
 Prüfmittel 19, 105, 107
 Prüfmittelbeschaffung 112
 Prüfmitteleignung 19
 Prüfmittelüberwachung 31
 Prüfobjekt 16, 134
 Prüfort 18
 Prüfpersonal 34
 - Erfahrung 381
 Prüfplanung 13, 14, 15, 22, 196
 - adaptive 25
 Prüfprozesse 81, 117
 Prüfprozesseignung 165, 608, 715
 Prüfstände 165
 Prüfsystem-Effektivität
 - Annahmekriterien 157
 - Anteil der Übereinstimmungen 156
 - Betrachtungsfälle 156
 - Fallbeispiel 155
 - Fehlentscheidungsrisiko 159
 - Häufigkeit der Fehlurteile 158
 - Rechenschema 155
 - zweiseitig begrenzter Vertrauensbereich 155
 Prüfumfang 18
 Prüfung
 - fertigungsorientierte 14
 - Prüfdauer 392
 - Prüfentscheid 383
 Prüfverfahren
 - visuelles 377
 - zerstörungsfreies 615
 Prüfzeitpunkt 34

PS-OCT 580

Pulsthermografie 641

Punktbildauswertung 508

Punktedichte 301, 303, 305

Punkt Wolke 184, 199, 555

- einpassen 469

- STL-Format 469

Q

Q-DAS ASCII Transferformat 199, 694

QIF-Standard 198

QML *siehe* Quality Markup Language

QMP *siehe* Eignungskennwert

QMS *siehe* Eignungskennwert

Qualitätskontrolle 453

Qualitätsmerkmale 16

Qualitätsprozesse 98

Qualitätsprüfung 675

- Dichtheit 330

- mit KMT 196

Qualitätssicherung 241

Quality Intelligence 6

Quality Markup Language 702

R

Rapidminer 756

Rasterscanning 505, 512, 513

Rauheit 263, 733

Rauheitsmessungen 257, 303, 305, 308, 309, 314

Rauheitsnormal 437

Rauheitsparameter 263, 433

Rauschen 426, 488

Rayleigheffekt *siehe* Wechselwirkungsprozesse

Realtime-Funktionalität 536

Rechtwinkligkeit 733

Rechtwinkligkeitsmessung 261

Refenzdaten

- Datenart 778

Referenzflächen 596

Referenzhandbücher 109

Referenzierung 595

Referenznetz 601

Referenzteil 223

Referenztestleck 331

Reflektorverfolgung 520

Reflexionsröhren 479, 480

Reflexionstarget 479

Regressionsanalyse

- maschinelles Lernen 780

Reinforcement Learning 33

Rekonstruktion 466

RELIEFF-Algorithmus 28

Representational State Transfer 684

Requalifikationen 94

Ressourcenmanagement 122

REST *siehe* Representational State Transfer

Reverse Engineering 658

Richtigkeit 661

Richtungsmessung 520

Risikoanalyse 213

Roboter 382, 392, 568

- Cobot 383

Rockwell-Härtetest 351

Rockwellskalen 352

Röhrenleistung 478, 479

Röntgendetektor 484

- direkt konvertierender Detektor 482, 494

- energieintegrierender Detektor 494

- Flächendetektor 483

- indirekt konvertierender Detektor 482, 494

- photonenzählender Detektor 494

- Zeilendetektor 483

Röntgenröhre 462, 478, 484

- geschlossene Röntgenröhre 481

- Monoblock-Design 481

- offene Röntgenröhre 481

Röntgenspektrum 463, 464

Röntgenstrahlung 462

- Bremsstrahlung 463

- charakteristische Röntgenstrahlung 463

Röntgentomografie 301, 302, 306, 307, 310, 311, 316, 317

Röntgenverordnung 485

Rückführung 278, 283, 290, 292, 293, 298

Rundheit 261, 733

Rundheitstester 261

Rundlauf 733

Rundlaufabweichung 261

Rundschalttisch 257

S

Scanmodus 287

Scannen *siehe* Scanmodus

Scanning 188

Scanstrategien 603

Schallfeldgeometrie 616

Schallgeschwindigkeiten 616

Schallwellen 615

Schärfentiefe 503, 511, 512

Schnittstellen

- in der KMT 197

Schnüffellecksuche 344

Schraubtechnik 357

Schraubverband 361

Schraubwerkzeug 360, 363

Schutzabstand 166

Schwächungskoeffizienten 465

schwarzer Strahler 631

Selektion von Grenzflächenpunkten 473

- 3D-Selektionsfenster 472

- Patchselektion 472

- Segmentierung 472

selektiver Strahler 631

- Semi-Global Matching 555
semisupervised learning 33
Sensitivität 578
Sensor 679
- kapazitiver 247
Sensoren
- bildgebende 190
- chromatische 189
- für Koordinatenmessgeräte 187
- optische 288
- taktile 188, 286
SensOr Interfacing Language 683
Sensorkalibrierung 599
Sensorpositionierung 597
Sensor Services 687
Sensorsysteme 680
Sensortypen 289
Separation of Concern 680
SGX *siehe* Intel Software Guard Extensions
Sicherheitsniveau 559
Sichtprüfung
- direkte 377
- dynamische 383
- indirekte 377
- stationäre 382
SI-Einheiten 275, 276, 278, 279
SIFT-Operator 552
Signalerkennung 159
- Annahmekriterien 161
- Darstellung des Entscheidungsraubereichs 159
- Ermittlung des Graubereichs 160
- Kenngröße %GRR 161
- Rechenschema 160
Signalisierung 547
Signal-Rausch-Verhältnis 507, 513
Signalübertragung
- optische 659
Signifikanztest
- allgemeines Schema für den Testentscheid 146
Simultaneous Localization and Mapping 556
Sinuslineal 255
SIPOC 749
SLAM 556
SmartCom Digital System of Units 686
Smart Data 752
Smart Factory 388, 693
SOA 685
Softsensorik 757
Software 474
Software-as-a-Service 681
Software für Koordinatenmesssysteme 195
Software Pakete mit Teach-In-Verfahren 652
Softwaretest 285
SOIL *siehe* SensOr Interfacing Language
Soll-Ist-Vergleich 474
SOM-Filterung 747
Sondensysteme 270
SOP *siehe* Start of Production
Sparrow-Kriterium 418
Sparse Principal Component Analysis 28
SPC-Prüfplan 716
Spectral Domain OCT 576
speicherprogrammierbare Steuerung 201
Spezifikation 492
Spezifikationsüberprüfung 492
Spikes 429
Spinnennetz-Diagramm 170
SPS *siehe* speicherprogrammierbare Steuerung
Spurengas 333
Spurengasleckprüfung 341
Stacking 604
Standardatmosphäre 528
Standardmessmittel 239
Standardmesstaster 654
Standards 693
Standardunsicherheit 130
Standardunsicherheitskomponenten 133, 134
Ständerbauweise 185
Standpunkttermittlung 602
Stanzlöcher 605
Start of Production 98
statische Versuchsplanung 400
Statistikpakete 756
statistische Auswertemethoden 9
statistische Prozesslenkung 97
statistische Prozessregelung 81
Stereokamera 566
Steuerungsmakros 651
Stichprobentechnik
- adaptive 29
Stoffbilanzen 746
Störgrößen 170
Strahlauflärtung 464, 485
- Korrektur 486, 487
Strahlenbelastung 485
Strahlenschutzkabine 485
Streckengrenzsteuerung 365
Streifenlichtverfahren 389
Streifenmuster 548
Streifenprojektion 190, 553, 563, 568
Streubereiche am Fertigungsprozess 230
Streustrahlung 464, 486
- Kegelstrahlartefakte 487
- Korrektur 487, 495
Structure-from-Motion 555, 563
Strukturauflösung 475, 478, 483, 484, 489, 510, 511
Sub-Mikrofokusröhren 480
Subpixeling 509, 511
Substitutionsmethode 284, 285
Subvoxeling 467, 468
supervised learning 33
Swept Source OCT 577
SWIR 633
Symmetrie 733
Synthetic Aperture Focusing Technique 622

System-Heterogenität 678

Szintillator 482

T

Tachymeter 185

taktile Sensoren 286, 287, 291

Taktrate 383

Target 463

Targetoberfläche 479

Taster 301, 302, 308, 312, 313, 314, 315, 317

Tastermessung 441

Tasterradius 441

Tasterradiuskompensation 188

Tastschnittgerät 263

Tastsystem 188

Tastverfahren

- mechanisches 263

T-Bild 622

T-Cam-Sensor 533

Telezentrie 503

Temperaturleitfähigkeit 633

Temperaturmessstaster 655

Template Matching 552

Test

- dynamischer 607

- statischer 607

Testfeldkalibrierung 550

Textur 548

Texturparameter 433

Theodolit 255

thermische Diffusionslänge 635

thermische Eindringtiefe 635

Thermografie 629

Thermografiekamera 633, 642

Thermografieverfahren

- Auswahl 644

Tiefpassfilter 426

Time Alignment 176

Time Domain OCT 576

Toleranz(en) 221

- minimale 132

Toleranzgrenze

- einseitige 228

Toleranzinformationen 198

Tomografie

- Abschnittstomografie 489

- Ausschnitts-Tomografie 490

- exzentrische Multi-ROI-Tomografie 490

- exzentrische Tomografie 490

- Halbseitentomografie 490

- Helix-Tomografie 484, 486, 489

- Im-Bild-Tomografie 462

- Laminografie 471, 490

- laterales Rastern 490

- longitudinales Rastern 489

- OnTheFly-Tomografie 488

- Planar-Laminografie 491

- ROI-Tomografie 490

- Spiraltomografie 486

- Start-Stopp-Tomografie 488

- Swing-Laminografie 491

- Übersichtstomografie 490

Tooling-Ball 596

Topografie 301, 303, 305, 314, 315

Topografiebestimmung 408

Topografietreue 445

T-Probe 531

T-Probe-Sensor 533

Tracker-Scanner 535

Transaktionsdaten

- Datenart 778

Transaktionsstrukturdaten

- Datenart 778

Transition

- digitaler Wandel 774

Transmissionsröhren 478, 479, 480

Transmissionstarget 479

Trendprozesse 718

Triangulationsmessung 256

Triangulationsscanner 535

Triangulationssensoren 189, 190

Tribologie 455

Tropfenkräfte 327

T-Scan-Controller 531

t-Test 128

U

Übertragungsrate 384

überwachtes Lernen

- maschinelles Lernen 780

Ultraschallmessstaster 656

Ultraschallmessverfahren 617

Ultraschallmesszelle 625

Ultraschallprüfkopf 618

Ultraschallprüfung 615

Ultraschallthermografie 642

Universal-Winkelmesser 253

Unrundheit 261

Unsicherheitsbeitrag 174

Unsicherheitsbudget 607

Unsicherheitskomponenten 85

unsupervised learning 33

unternehmensweite Strukturdaten

- Datenart 778

unüberwachtes Lernen

- maschinelles Lernen 780

Unwrapping 414

Unwucht 733

V

Vakuumleckprüfung 324

Vakuumverfahren 343

Validieren 81

- Validierungsmessung 172
 Validity
 - Big Data 777
 Value
 - Big Data 777
 Variablenprüfungen 18
 Varianzfortpflanzung 176
 Variety
 - Big Data 777
 VDA 4 230
 VDA Band 5 19, 81, 105, 109, 110, 129, 212, 227
 - Sonderregelungen 214
 VDA QMC 118
 VDI 2230 361
 VDI 2851 713
 VDI/VDE 2634 545, 560
 VDI/VDE 2645 373
 VDI/VDE/DGQ-Richtlinie 2618 111
 Velocity
 - Big Data 777
 Veracity
 - Big Data 777
 Verfahren 2 (MSA) 134
 Verfügbarkeit
 - Datenqualitätsdimensionen 778
 Vergleichsmessungen 278, 285, 292, 294
 Vergleichspräzision 129
 Vergrößerung 475, 477, 484, 489, 502, 503, 504, 510, 511, 512, 513, 514
 Verifizierung 81
 Verschraubung 361
 Verwaltungsschale 683
 Verzahnungsmesstechnik 292, 295, 298
 Verzeichnung 549
 Vibrothermografie 642
 Vickershärte 353
 virtuelle Autokorrektur 487
 Visual-SLAM 556
 visuelle Odometrie 556
 Vollschutzgerät 485
 Vollständigkeit 378
 - Datenqualitätsdimensionen 778
 Volume
 - Big Data 777
 Volumen 466
 Volumendaten 290
 Volumenfluss 322, 326
 Volumenrendering 474
 Volumenschnitt 474
 Vorspannen von Schrauben 366
 Voxel 290, 466
 Voxelmodell 190
- W**
- Wanddickenmessung 626
 Wandstärkenmessung 656
- Wareneingangsprüfung 707
 Wärmebildkamera 633
 Wasserstoffleckprüfung 345
 Wasserwaage 253
 Wechselwirkungsprozesse
 - Comptoneffekt 463, 464
 - Photoeffekt 463
 - Rayleighstreuung 463
 Wegaufnehmer 247
 Wegmessung 249
 Wegsensoren 245
 Weißlichtinterferometrie 407
 Weißlichtsensoren 189
 Wellengleichung 615
 Wellenlänge 546
 Wellenoptik 573
 Welligkeitsparameter 433
 Werkerselbstprüfung 14
 Werkstoffprüfung 615
 Werkstück 241
 Wertschöpfungskette 98
 Whitebox-Modelle 756
 Wiederholbarkeit 133
 Wiederholbarkeits-Tests 607
 Wiederholgenauigkeit 661
 Wiederholmessungen 133
 Wiederholpräzision 125, 661
 Wiederholprüfungen 19
 Wiederholungsmessungen 218
 Winkelmesser 253
 Wirbelstromthermografie 642
- X**
- XGBoost 756
 XML-Schema 702
- Z**
- Zählung 7
 Zahnräder 292, 293, 296, 298
 Zeitpunkte 134
 Zeitreihen 753
 zentrale Wellenlänge 578
 Zentralprojektion 546, 549
 Zentralstrahl 483
 Zentriespule 480
 zerstörungsfreie Prüfung 191, 377, 586
 Zertifizierung
 - Personal 377
 ZfP siehe zerstörungsfreie Prüfung
 Zielmarke 547, 551
 - Adapter 547
 - kreisförmiger 547
 - retro-reflektierender 547
 zukunftsfähige Produktionssysteme 775
 Zylinderform 733