



Leseprobe

Michael Schuth, Wassili Buerakov

Handbuch Optische Messtechnik

Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und
Qualitätssicherung

ISBN (Buch): 978-3-446-43634-3

ISBN (E-Book): 978-3-446-43661-9

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43634-3>

sowie im Buchhandel.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Die Autoren	XXV
Firmen, die mit Praxisbeispielen im Handbuch vertreten sind	XXVII
Einleitung	XXIX
1 Geschichte der Optik	XXIX
2 Bedeutung der optischen Technologien heute	XXXV
2.1 Bedeutung der optischen Technologien in der Technik	XXXV
2.2 Bedeutung der optischen Technologien im Militärsektor	XXXVIII
2.3 Bedeutung der optischen Technologien in der Medizin	XXXVIII
3 Bedeutung der optischen Technologie in Zukunft	XL
4 Literaturverzeichnis	XLIII

TEIL I

3D-Formerfassung

1 Einleitung	3
1.1 Historischer Rückblick	3
1.2 Nichtoptische Messtechnik	3
1.3 Übersicht	5
2 Lichtschnittverfahren	9
2.1 Verfahrensgrundlagen	9
2.2 Beschreibung des Lichtschnittverfahrens	10
2.3 Messeinflüsse beim Lichtschnittverfahren	13
2.4 Grenzen des Lichtschnittverfahrens	14
2.5 Kalibrierung beim Lichtschnittverfahren	15
2.6 Nachbearbeitung der Messdaten beim Lichtschnittverfahren	16
2.7 Anwendungsbeispiele für das Lichtschnittverfahren	17
2.7.1 Geometriekontrolle von Gussrohren	17
2.7.2 Prüfung von Jochprofilträgern ohne Taktzeitverlust	19

2.7.3	Vermessen eines Traktors	20
2.7.4	Engineering eines Flugzeuginnenraums – vom Scan zum 3D-CAD-Modell	21
2.7.5	Robotergeführte optische CMM-Scanner	23
2.7.6	Verbau von Windschutzscheiben	24
2.7.7	Spalt-Bündigkeitsmessung an Karosserieteilen	25
2.7.8	Nietenprüfung im Flugzeugbau	25
2.7.9	Vermessen von Karossen	25
2.7.10	Reverse Engineering im Rennsport	26
2.7.11	Vermessen und Auswerten der Tornadolinie	29
2.7.12	Das messtechnische Geheimnis der Poleposition von Red Bull Technology	31
2.7.13	Einsatz multisensorischer Messsysteme in Fertigung von hochpräzisen Bauteilen ..	33
2.7.14	Optische Qualitätssicherung im Fahrzeugbau bei Volvo	35
2.7.15	Optische Untersuchung von im Gesenk geschmiedeten Implantaten	36
2.7.16	Vermessung von Blechteilen im Automobilbau	38
2.7.17	Digitalisieren eines komplexen Türschließsystems	38
2.7.18	Laserscantchnik in einer Zinkdruckgießerei	42
3	Streifenprojektion	44
3.1	Verfahrensgrundlagen	44
3.2	Beschreibung des Streifenprojektionsverfahrens	45
3.2.1	Zeitlich codierte Verfahren	45
3.2.2	Gray-Code	46
3.2.3	Phasen-codierte Verfahren	46
3.2.4	Frequenzcodierte Verfahren	47
3.2.5	Örtlich codierte Verfahren	47
3.2.6	Sonstige Codierv Verfahren	48
3.2.7	Vergleich der Codierv Verfahren	48
3.2.8	Streifenprojektionstechniken	49
3.2.9	Zweikamerasysteme	49
3.2.10	Vermessung von Kleinstrukturen bzw. kleinen Objekten	50
3.3	Kalibrierung bei der Streifenprojektion	50
3.4	Anwendungsbeispiele der Streifenprojektion	50
3.4.1	Systemlösung ATOS (GOM GmbH): Vollflächige Geometriemessung	51
3.4.2	3D Digitalisierung eines Gebissabdrucks	55
3.4.3	Schadensanalyse bei Pkw-Pkw-Kollisionen	56
3.4.4	Fahrzeuginnenraumvermessung	57
3.4.5	Nicht-industrielle Anwendungen (Archäologie)	57
3.4.6	3D-Vermessung von Jagdwaffen	58
3.4.7	3D-Vermessung im Werkzeugbau	60
3.4.8	3D-Vermessung im Formenbau	61
3.4.9	Digitalisierung eines Fahrzeugdesignmodells	61
3.4.10	Optische Qualitätssicherung des neuen Honda Civic	63
3.4.11	Schnelle Nietenprüfung im Flugzeugbau	66
3.4.12	Untersuchung von Spaltmaßen im Automobilbau	67
3.4.13	Untersuchung eines Turbinenlaufrads	68
3.4.14	3D-Qualitätsprüfung von Getriebegehäusen für Nutzfahrzeuge	70

3.4.15	3D-Qualitätsprüfung von Lagergehäusen für Vier-Takt-Motoren	71
3.4.16	3D-Qualitätsprüfung von Turbinenschaufeln	72
3.4.17	3D-Qualitätsprüfung und Fahrzeugvermessung in der Formel 1™	73
4	Photogrammetrie	75
4.1	Prinzip der Photogrammetrie	75
4.1.1	Verfahrensgrundlagen	75
4.1.2	Messverfahren der Photogrammetrie	76
4.2	Anwendungsbeispiele der Photogrammetrie	78
4.2.1	Einsatz mobiler optischer Koordinatenmesstechnik beim Aufbau von Offshore-Windenergieanlagen	78
4.2.2	Qualitätssicherung an BMW-Cabriolets	83
4.2.3	Mobile 3D-Koordinatenmesstechnik für den Schiffbau	90
4.2.4	3D-Vermessung von Fenstern für Luxusyachten	95
4.2.5	Vermessung der Rotorblattflansche von Windkraftanlagen	95
4.2.6	Messen unter anspruchsvollen Bedingungen	97
4.2.7	3D-Inspektion von Zügen	99
5	Triangulationssensor	101
5.1	Verfahrensgrundlagen	101
5.2	Messverfahren des Triangulationssensors	101
5.3	Anwendungsbeispiele der Triangulationssensoren	102
5.3.1	Dickenmessung von Gummibahnen für das Baugewerbe	102
5.3.2	Dickenmessung von Folie	103
5.3.3	Zweiseitige Dickenmessung mit Laserprofilsensoren	103
6	Weißlichtinterferometrie	106
6.1	Verfahrensgrundlagen	106
6.2	Beschreibung des Weißlichtinterferometrieverfahrens	107
6.3	Anwendungsbeispiele der Weißlichtinterferometrie	108
6.3.1	Vergleich zu taktilen Messsystemen	108
6.3.2	Oberflächenuntersuchungen mit Weißlichtinterferometrie	109
7	Optische Kohärenztomografie	111
7.1	Verfahrensgrundlagen	111
7.2	Messverfahren der optischen Kohärenztomografie	111
8	Konfokale Mikroskopie	113
8.1	Verfahrensgrundlagen	113
8.2	Messverfahrens der konfokalen Mikroskopie	114
8.3	Anwendungsbeispiele der konfokalen Mikroskopie	116
8.3.1	Vermessung der Schneidkante einer Gewindeschneidplatte	116
8.3.2	Oberflächenstruktur- und Rauheiterfassung	118
8.3.3	Anwendungsbeispiele aus der Medizintechnik	120

8.3.4	Konfokale Mikroskopie bei additiven Fertigungsverfahren	121
8.3.5	Untersuchung von Mikrostrukturen in Forschung und Produktion	122
9	Chromatisch-konfokales Messverfahren	125
9.1	Verfahrensgrundlagen	125
9.1.1	Beschreibung des chromatisch-konfokalen Messverfahrens	125
9.1.1.1	Chromatisch-konfokale Spektralinterferometrie	127
9.2	Anwendungsbeispiele der chromatisch-konfokalen Mikroskopie	128
9.2.1	Untersuchung von Dichtelementen und -flächen	128
9.2.2	Anwendungsbeispiele aus der Medizin	129
10	Streulichtsensor	131
10.1	Verfahrensgrundlagen	131
10.2	Messverfahren des Streulichtensors	132
10.3	Anwendungsbeispiele des Streulichtensors	134
10.3.1	Rauheitsmessung während des Walzenschleifens	134
10.3.2	Flächenrauheitsmessung von Kegelrollen	134
10.3.3	100%-Messung bei gehonten Lagerringen	135
11	Lasertracer	136
11.1	Verfahrensgrundlagen	136
11.2	Messverfahren des Lasertracers	137
11.3	Anwendungsbeispiele der Lasertracer	138
11.3.1	Inspektion von Flugzeugen	138
11.3.2	Steigerung der Effizienz von Wasserkraftwerken	140
11.3.3	Vermessung von Schienenfahrzeugen und deren Komponenten	143
12	Autofokussensor	145
12.1	Verfahrensgrundlagen	145
12.2	Messverfahren des Autofokussensors	145
13	Kontrastvergleichsautofokussensor	149
13.1	Verfahrensgrundlagen	149
13.2	Messverfahren des Kontrastvergleichsautofokussensors	149
13.2.1	Telezentrische Zoomobjektive für die Kontrastvergleichsautofokussensoren	150
13.2.2	Optische Grenzen des Kontrastvergleichsautofokussensors	151
14	Interferometrische Abstands- bzw. Entfernungsmessung	153
14.1	Verfahrensgrundlagen	153
14.2	Messverfahren zur interferometrischen Abstands- bzw. Entfernungsmessung	154
14.2.1	Homodyne Interferometrie	154
14.2.2	Homodyne Interferometrie mit Quadraturerfassung	155
14.2.3	Heterodyne Interferometrie	155
14.2.4	Vermessung von großen Bauteilen mithilfe eines Laserradars	156

15	Konoskopische Holografie	159
15.1	Verfahrensgrundlagen	159
15.2	Messverfahren der konoskopischen Holografie	160
16	Ellipsometrie	162
16.1	Verfahrensgrundlagen	162
16.2	Messverfahren der Ellipsometrie	163
17	3D-Formprüfinterferometrie	165
17.1	Verfahrensgrundlagen	165
17.2	Beschreibung des Messverfahrens der 3D-Formprüfinterferometrie	166
17.3	Aufbau und Funktionsweise des Prismeninterferometers	167
17.4	Anwendungsbeispiele der 3D-Formprüfinterferometrie	169
17.4.1	Ebenheitsprüfung von polierten, geläppten, flachgehonten und feingeschliffenen Präzisionsteilen	170
17.4.2	Messung großer Flächen	170
18	Mehrwellenlänge-Interferometrie	172
18.1	Verfahrensgrundlagen	172
18.2	Messverfahren der Mehrwellenlänge-Interferometrie	173
18.3	Anwendungsbeispiele der Mehrwellenlänge-Interferometrie	176
18.4	Linsenvermessung mithilfe eines Mehrwellenlängen-Interferometers	176
19	Fokus-Variation	179
19.1	Verfahrensgrundlagen	179
19.2	Messverfahren der Fokus-Variation	180
19.3	Anwendungsbeispiele der Fokus-Variation	181
19.3.1	Hochgenaue Oberflächenmessung von Schaftwerkzeugen in der spangebenden Industrie	181
19.3.2	3D Oberflächenmessungen in der Mikropräzisionsfertigung	182
20	Deflektometrie	184
20.1	Verfahrensgrundlagen	184
20.2	Messverfahren der Deflektometrie	185
20.3	Anwendungsbeispiele der Deflektometrie	186
21	Makyoh-Sensor	188
21.1	Verfahrensgrundlagen	188
21.2	Messverfahren mit Makyoh-Sensor	189
22	Schattenwurfverfahren	190
22.1	Verfahrensgrundlagen	190

22.2	Beschreibung des Schattenwurfverfahrens	191
22.3	Anwendungen des Schattenwurfverfahrens	191
22.3.1	Berührungslose Schneidkantenvermessung	191
22.3.2	Automatische Holzplattenvermessung	192
23	Terrestrisches Laserscanning	193
23.1	Verfahrensgrundlagen	193
23.2	Messverfahren des terrestrischen Laserscannings	194
23.3	Anwendungsbeispiele des terrestrischen Laserscannings	196
23.3.1	Terrestrische Flugzeugvermessung	197
23.3.2	Digitalisierung des Wasserkraftwerkes Atlantis	197
23.3.3	Terrestrische Truck-Vermessung	198
24	Shape from Shading	199
24.1	Verfahrensgrundlagen	199
24.2	Messverfahren Shape from Shading	200
25	Hybride Messverfahren	202
25.1	Verfahrensgrundlagen	202
25.2	Beschreibung der hybriden Messverfahren	203
25.3	Anwendungsbeispiele der hybriden Messverfahren	205
26	Literaturverzeichnis zu Teil I	207
TEIL II		
Temperaturerfassung		
1	Einleitung	211
1.1	Historischer Rückblick	211
1.2	Nichtoptische Messtechnik	212
1.3	Grundbegriffe	212
1.4	Übersicht	213
2	Thermografie	215
2.1	Verfahrensgrundlagen	215
2.2	Messverfahren der Thermografie	216
2.2.1	Wichtige Einflussgrößen bei thermografischen Messungen	217
2.2.1.1	Emissionsgrad	217
2.2.1.2	Atmosphäreneinfluss bei thermografischen Messungen	219
2.2.1.3	Einfluss von Strahlungsquellen bei thermografischen Messungen	219
2.2.1.4	Aufbau einer modernen Thermografiekamera	220
2.2.1.5	Einfluss der Auflösung einer Thermografiekamera	220
2.2.1.6	Kalibrierung	221

2.3	Anwendungsbeispiele der Thermografie	221
2.3.1	Bauthermografie	222
2.3.2	Thermografische Untersuchung von Elektrobauteilen	223
2.3.3	Thermografische Untersuchung einer Großraumpumpe	223
2.3.4	Thermografische Untersuchung von Elektroanlagen	224
2.3.5	Thermografie in der vorbeugenden Instandhaltung	225
2.3.6	Automatische Zustandsüberwachung von Gießpfannen (Transport von Flüssigstahl)	227
2.3.7	Steuerung der Temperaturverteilung in Druckgussformen	231
2.3.8	Steuerung der Temperaturverteilung bei Thermoformingprozessen	232
2.3.9	Kontrolle von Bierfässern	232
2.3.10	Detektion von Mikroleckagen	233
2.3.11	Erfassung der Temperaturverteilung bei Überwachungsaufgaben	234
2.3.12	Schlackedetektion	235
2.3.13	Detektion von Reststoffen in Edelstahlformen	236
2.3.14	Wahrnehmung menschlicher Gefühle	237
2.3.15	Thermografische Untersuchungen der Zerspanzone	239
2.3.16	Wärmebildkameras im Bereich der Brennstoffzellen- und Batterietechnologie	241
3	Pyrometrie	243
3.1	Verfahrensgrundlagen	243
3.2	Messverfahren der Pyrometrie	243
3.2.1	Bauarten der Pyrometer	244
3.2.2	Einfluss des Messabstands auf pyrometrische Messungen	246
3.2.3	Kalibrierung	248
4	Faseroptische Temperaturmessung	249
4.1	Verfahrensgrundlagen	249
4.2	Messverfahren der faseroptischen Temperaturmessung	250
4.2.1	Integriertes faseroptisches Messsystem (DTS) mit Messung der Raman-Streuung	251
4.2.2	Integriertes faseroptisches Messsystem (DTS) mit Messung der Rayleigh-Streuung	252
4.2.3	Faseroptische Temperaturmessung mit Faser-Bragg-Gittern	253
4.2.4	Kombination aus faseroptischer und pyrometrischer Temperaturmessung	254
4.2.5	Thermochrome faseroptische Temperaturmessung	255
4.2.6	Weitere faseroptische Messprinzipien	256
5	Literaturverzeichnis zu Teil II	257
TEIL III		
Strömungsuntersuchung		
1	Einleitung	261
1.1	Historischer Rückblick	261
1.2	Nichtoptische Messtechnik	262

1.3	Übersicht	263
1.4	Dopplereffekt	263
2	Laser-Doppler-Anemometrie (LDA/LDV)	265
2.1	Verfahrensgrundlagen	265
2.2	Messverfahren der LDA	266
2.2.1	Zweistrahl-Laser-Doppler-Anemometrie	267
2.2.2	Referenzstrahl-Laser-Doppler-Anemometrie	268
2.2.3	Weitere Laser-Doppler-Anemometrie-Ausführungen	269
3	Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA)	270
3.1	Verfahrensgrundlagen	270
3.2	Messverfahren der PDA	270
4	Laser-2-Fokus Anemometrie (L2F)	272
4.1	Verfahrensgrundlagen	272
4.2	Messverfahren der L2F	272
5	Particle Image Velocimetry (PIV)	275
5.1	Verfahrensgrundlagen	275
5.2	Messverfahren der Particle Image Velocimetry	276
5.3	Anwendungsbeispiele	278
5.3.1	Anwendung des Verfahrens PIV in der Motorenentwicklung	278
5.3.2	Anwendung des Verfahrens PIV in der Fluidmechanik	279
6	Particle Tracking Velocimetry (PTV)	281
6.1	Verfahrensgrundlagen	281
6.2	Messverfahren der Particle Tracking Velocimetry	281
7	Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)	284
7.1	Verfahrensgrundlagen	284
7.1.1	Messverfahren der laserinduzierten Fluoreszenz	284
7.2	Anwendungsbeispiele	285
7.2.1	Anwendung des Messverfahrens LIV bei Untersuchung von Zerstäubungsprozessen	285
7.2.2	Anwendung des Messverfahrens PLIF bei Untersuchung von Verbrennungen	287
8	Doppler Global Velocimetry (DGV)	288
8.1	Verfahrensgrundlagen	288
8.2	Messverfahren der Doppler Global Velocimetry	288
9	Sonstige Verfahren zur Untersuchung von Fluidströmungen	290
9.1	Global Phase Doppler (GPD), Interferometric Particle Imaging (IPI)	290

9.2	Teilchenbasierte Stoß-Visualisierung (TSV)	291
9.3	Filtered Rayleigh Scattering (FRS)	291
9.4	Anwendungsbeispiele der Verfahren IMI (Interferometric Mie Imaging) und Shadow bei Untersuchung von Partikeln	292
9.5	Sonderverfahren – Interferometrische Mehrwellenlängen-Kinematografie	293
10	Literaturverzeichnis zu Teil III	294
 TEIL IV		
Optische Untersuchung mechanischer Schwingungen und Bewegungsanalyse		
1	Einleitung	297
1.1	Historischer Rückblick	297
1.2	Nichtoptische Messtechnik	298
1.3	Übersicht	298
1.4	Grundbegriffe	298
1.4.1	Mechanische Schwingung	299
1.4.2	Darstellung von Schwingungen	300
1.4.3	Übertragungsfunktion	300
1.4.4	Messen von Schwingungen	301
2	Laservibrometrie	303
2.1	Verfahrensgrundlagen	303
2.2	Messverfahren der Vibrometrie	304
3	Bildkorrelation	305
3.1	Verfahrensgrundlagen	305
3.2	Messverfahren der Bildkorrelation	306
3.3	Anwendungsbeispiele für die Bildkorrelation zur Schwingungsmessung	309
4	Holografie zur Schwingungsmessung	311
4.1	Verfahrensgrundlagen	311
4.2	Messverfahren der Holografie	311
4.2.1	Elektronische Speckle-Pattern-Interferometrie (ESPI)	313
4.2.2	Erweiterung der klassischen Holografie auf dynamische Schwingungsanalyse	316
5	Bildbasierte Schwingungsanalyse und Videostroboskopie	318
5.1	Verfahrensgrundlagen	318
5.2	Messverfahren der Videostroboskopie und der bildbasierten Schwingungsanalyse	319
5.3	Anwendungsbeispiele der bildbasierten Schwingungsanalyse und der Videostroboskopie ..	320
5.3.1	Vibrationsanalyse an einer Elektronikplatine	320
5.3.2	Prüfung der Rotorblätter von Windenergieanlagen	320
5.3.3	Hochgeschwindigkeitsmessung von Radbewegungen	322

6	Shearografie zur Schwingungsmessung	325
6.1	Verfahrensgrundlagen	325
6.2	Verfahren der Shearografischen Schwingungsmessung	326
6.3	Anwendungsbeispiel der Shearografischen Schwingungsanalyse	328
7	Faseroptische Schwingungsmessung	331
7.1	Verfahrensgrundlagen	331
7.2	Verfahren der faseroptischen Schwingungsmessung	332
8	Literaturverzeichnis zu Teil IV	333
TEIL V		
Oberflächenanalyse		
1	Einleitung	337
1.1	Historischer Rückblick	337
1.2	Mechanische Grundlagen	338
1.2.1	Oberflächenrauheit, Form- und Lagetoleranzen	338
1.2.2	Rauheitskenngrößen	339
1.2.3	Übersicht der Normen	350
1.3	Nichtoptische Messtechnik	350
2	Optische Verfahren vs. taktile Verfahren	353
2.1	Messbereich/Messgenauigkeit der optischen Verfahren	354
2.2	Typische Anwendungen der Verfahren	354
2.3	Übersicht der optischen Verfahren	354
3	Streulichtverfahren zur Oberflächenanalyse	356
4	Weißlichtinterferometrie zur Oberflächenanalyse	357
5	Fokusvariation zur Oberflächenanalyse	359
6	Streifenprojektion zur Oberflächenanalyse	363
7	Konfokalmikroskopie zur Oberflächenanalyse	365
8	Literaturverzeichnis zu Teil V	369

TEIL VI**Messen von mechanischen Spannungen**

1	Einleitung	373
1.1	Historischer Rückblick	373
1.2	Nichtoptische Messtechnik	373
1.3	Mechanische Grundlagen der Spannungen	374
1.4	Übersicht	376
2	Spannungsoptisches Durchlichtverfahren (klassische Spannungsoptik)	378
2.1	Verfahrensgrundlagen	378
2.2	Messverfahren der Durchlicht-SPO	379
2.3	Anwendungsbeispiele des Verfahrens der Spannungsoptik (SPO)	383
2.3.1	Untersuchung von Brillengläsern und Gestellen	383
2.3.2	Untersuchung von Kerbwirkungen und Spannungsverläufen zur Bauteiloptimierung und mechanischen Analyse	385
2.3.3	Spannungsverläufe „einfrieren“	387
2.3.4	Messung von Restspannungen in Glasflaschen	387
3	Spannungsoptisches Reflexionsverfahren	391
3.1	Verfahrensgrundlagen	391
3.2	Funktionsweise des Reflexionsverfahrens	392
3.3	Anwendungsbeispiele des Reflexionsverfahrens	393
3.3.1	Untersuchung des Spannungsverhaltens in Knochen durch Implantate	394
3.3.2	Messungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie	394
4	Thermoelastische Spannungsanalyse (TSA)	396
4.1	Verfahrensgrundlagen	396
4.2	Funktionsweise der TSA	397
4.3	Anwendungsbeispiel der TSA	398
5	Shearografie zur Messung von Spannungen	400
5.1	Verfahrensgrundlagen	400
5.2	Funktionsweise der Shearografie zur Spannungsmessung	401
6	Holografie zur Messung von Spannungen	404
6.1	Verfahrensgrundlagen	404
6.2	Funktionsweise der holografischen Spannungsmessung	405
6.3	Anwendungsbeispiel Scheibenbremsuntersuchung zur holografischen Spannungsmessung	407

7	Bildkorrelation zur Messung von Spannungen	409
7.1	Verfahrensgrundlagen	409
7.2	Funktionsweise der Bildkorrelation zur Spannungsmessung	410
7.3	Anwendungsbeispiele der Bildkorrelation	412
7.3.1	Untersuchung eines Zahnrads	412
7.3.2	Untersuchung einer Rohrzange	412
7.3.3	Untersuchung von zugbelasteten Rundproben	413
7.3.4	Untersuchung von scherbelastraten Proben	414
7.3.5	Untersuchung von Rissen	414
8	Literaturverzeichnis zu Teil VI	416
TEIL VII		
Abstands- und Geschwindigkeitsmessung		
1	Einleitung	419
1.1	Historischer Ruckblick	419
1.2	Nichtoptische Messtechnik	419
1.3	Grundbegriffe	421
1.4	Übersicht	421
2	Interferometrische Abstands- und Geschwindigkeitsmessung	423
2.1	Verfahrensgrundlagen	423
2.2	Das Messverfahren zur interferometrischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung	424
3	Laserdistanzmessung	426
3.1	Verfahrensgrundlagen	426
3.2	Das Messverfahren zur Laserdistanzmessung	427
3.2.1	Einzelpulsmessung	427
3.2.2	Phasenvergleichsmessung	428
3.2.3	Puls-Akkumulations-Messverfahren	428
4	Lasertriangulation	430
4.1	Verfahrensgrundlagen	430
4.2	Das Messverfahren zur Lasertriangulation	431
4.3	Anwendungsbeispiele der Lasertriangulation	433
4.3.1	Vermessung von Spannstaht	433
4.3.2	Automatische Positionierung von Synchronringen	433
5	Konfokale und chromatisch-konfokale Abstandsmessung	434
5.1	Verfahrensgrundlagen	434
5.2	Das Messverfahren der konfokalen und der chromatisch-konfokalen Abstandsmessung	435

5.2.1	Konfokale Abstandsmessung	435
5.2.2	Chromatisch-konfokale Abstandsmessung	436
6	Radiointerferometrie	438
6.1	Verfahrensgrundlagen	438
6.2	Das Messverfahren der Radiointerferometrie	439
6.3	Astronomische Abstandsmessung	439
6.3.1	Parallaxe	440
6.3.2	Rotverschiebung	442
7	Literaturverzeichnis zu Teil VII	444
TEIL VIII		
Verformungsmessung		
1	Einleitung	447
1.1	Historischer Rückblick	447
1.2	Nichtoptische Messtechnik	448
1.3	Übersicht	449
2	Holografie zur Verformungsmessung	451
2.1	Verfahrensgrundlagen	451
2.2	Das Verfahren der Holografie	452
2.3	Anwendungsbeispiele der Holografie zur Verformungsmessung	455
2.3.1	Verformungsmessung eines Bremssattels und Vergleich mit FEM-Berechnungen	456
3	Shearografie zur Verformungsmessung	461
3.1	Verfahrensgrundlagen	461
3.2	Das Messverfahren Shearografie	462
4	Bildkorrelation zur Verformungsmessung	467
4.1	Verfahrensgrundlagen	467
4.2	Das Messverfahren Bildkorrelation	468
4.3	Anwendungsbeispiele der Bildkorrelation	470
4.3.1	Formänderungsanalyse von Umformvorgängen	470
4.3.2	Messen der Verformung von Zug-, Druck- und Biegeproben	471
4.3.3	Dynamische Verformungsmessung	473
4.3.4	Einsatz der Bildkorrelation in der Medizin	475
4.3.5	Untersuchung von Brücken mithilfe der Bildkorrelation	478
4.3.6	Einsatz der Bildkorrelation in der Fahrzeug- bzw. Luftfahrtindustrie	479
4.3.7	Untersuchung einer Flugzeugtür	481
4.3.8	360°-Untersuchung eines Druckbehälters	482

5	Streifenprojektion zur Verformungsmessung	484
5.1	Verfahrensgrundlagen	484
5.2	Das Verfahren der Streifenprojektion	485
5.3	Anwendungsbeispiele der Streifenprojektion	486
5.3.1	Untersuchung einer Membran	486
6	Photogrammetrie zur Verformungsmessung	488
6.1	Verfahrensgrundlagen	488
6.2	Das Verfahren der Photogrammetrie	489
6.3	Anwendungsbeispiele der Photogrammetrie	490
6.3.1	Untersuchung von Solarpanels	490
6.3.2	Verformungsmessung in der Klimakammer	491
6.3.3	Photogrammetrie zur Verformungsmessung in der Raumfahrt	493
7	Literaturverzeichnis zu Teil VIII	497
TEIL IX		
Detektion von Schäden		
1	Einleitung	501
1.1	Historischer Rückblick	501
1.2	Nichtoptische Messtechnik	502
1.3	Übersicht optischer Messverfahren	505
2	Terahertz	506
2.1	Verfahrensgrundlagen	506
2.2	Messverfahren für Terahertz-Strahlung	507
2.3	Anwendungsbeispiele	510
2.3.1	Erkennung verborgener Ondulationen in GFK-Materialien	510
2.3.2	Porenartige Materialdefekte in einem keramischen Kühlkörper	512
2.3.3	Untersuchung von Dichtringen in Kunststoffrohren	512
3	Thermografie	514
3.1	Verfahrensgrundlagen	514
3.2	Messverfahren der Thermografie	515
3.2.1	Passive Thermografie	517
3.2.2	Aktive Thermografie	518
3.2.3	Verfahren der aktiven Thermografie zur Überprüfung von Solarzellen	523
3.3	Anwendungsbeispiele der Thermografie zur Schadensdetektion	524
3.3.1	Detektion von Gaseinschlüssen im Schaum von Instrumententafeln (passive Thermografie)	524
3.3.2	Prüfung von Faserverbundwerkstoffen (Lockin-Thermografie)	525
3.3.3	Qualitätskontrolle an Leder (Lockin-Thermografie)	526

3.3.4	Kontrolle des Rumpfs von Flugzeugen (Lockin-Thermografie)	527
3.3.5	Inspektion von Laserschweißnähten (Puls-Thermografie)	528
3.3.6	Inspektion von Faserverbundwerkstoffen (Transienten-Thermografie)	529
3.3.7	Inspektion von Instrumententafeln (Transienten-Thermografie)	530
3.3.8	Inspektion von Turbinenschaufeln (ultraschallangeregte Thermografie)	530
3.3.9	Inspektion von Bauteilen aus Faserkeramik und aus Faserverbundwerkstoff (ultraschallangeregte Thermografie)	531
3.3.10	Prüfverfahren mit aktiver Thermografie in der Solarzellenproduktion	532
3.3.11	Thermografische Überprüfung von Faserverbundwerkstoffen (Lockin-Thermografie)	533
4	Computertomografie	535
4.1	Verfahrensgrundlagen	535
4.2	Messverfahren der Computertomografie	536
4.2.1	Erzeugung der Röntgenstrahlung	537
4.2.2	Detektion der Röntgenstrahlung	538
4.2.3	Einteilung der Röntgengeräte	540
4.3	Anwendungsbeispiele der Computertomografie	542
4.3.1	Computertomografie als Teil der Produktentwicklung	544
4.3.2	Fehler- und Maßanalyse im Leichtbau und Messdatengewinnung für Simulationen	545
4.3.3	Poren- und Restwandstärkeanalyse mittels der CT	546
4.3.4	Untersuchung von Turbinenschaufeln	547
4.3.5	Computertomografische Untersuchung von mechanischen Maschinen	547
4.3.6	Computertomografische Untersuchung von Einspritzinjektoren	547
4.3.7	Computertomografische Überprüfung von Fügenähten an Faserverbundbauteilen	549
5	Shearografie zur Detektion von Schäden	552
5.1	Verfahrensgrundlagen	552
5.2	Verfahren der shearografischen Detektion von Schäden	554
5.3	Anregungsarten zur shearografischen Fehlerdetektion	556
5.4	Anwendungsbeispiele der Shearografie zur Detektion von Schäden	565
5.4.1	Shearografische Untersuchung einer CFK-Platte	565
5.4.2	Shearografische Untersuchung von Druckleitungen	566
5.4.3	Endoskopische Untersuchung einer beschädigten Turbinenschaufel	567
5.4.4	Shearografische Inspektion von Helikopter-Rotorblättern	568
5.4.5	Shearografische Untersuchung der Windkrafträder	570
5.4.6	Shearografische Untersuchungen im Schiffbau	572
5.4.7	Automatisierte shearografische Untersuchungen in der Produktion	574
6	Holografie zur Detektion von Schäden	576
6.1	Verfahrensgrundlagen	576
6.2	Verfahren der holografischen Detektion von Schäden	577
6.3	Anwendungsbeispiel der Holografie zur Detektion von Fehlstellen	580

7	Laservibrometrie zur Detektion von Schäden	582
7.1	Verfahrensgrundlagen	582
7.2	Verfahren zur Detektion von Schäden mittels Laservibrometrie	583
7.2.1	Laservibrometrische Detektion von Fehlstellen mittels Lamb-Wellen	584
7.2.2	Detektion von strukturellen Fehlstellen mittels Laservibrometrie	585
8	Literaturverzeichnis zu Teil IX	587
TEIL X		
Normen in der optischen Messtechnik		
1	Einleitung	591
1.1	Historie, Rückblick im Bereich Normung	591
1.2	Qualitätsmanagement, Normenbezug auf die Qualität von Produkten	592
2	Basiswissen Normung	594
2.1	Normen im Alltag	594
2.2	Zuordnung von Normen	595
2.2.1	Nationale (Deutsche) Normen	595
2.2.2	Europäische Normen	595
2.2.3	Internationale Normen	596
3	Übersicht von Normen in der Messtechnik, optischen Messtechnik	597
3.1	Allgemeine Normen der Messtechnik	597
3.2	Definitionen in der optischen Messtechnik	597
3.3	Magnetpulverprüfung (optisch)	598
3.4	Koordinatenmessgeräte (optisch)	598
3.5	Bestimmung und Messung von optischen Größen	598
3.6	Optische Komponenten und Messgeräte	598
3.7	Kalibrierung von optischen Systemen	599
3.8	Herstellung optischer Komponenten	599
3.9	Qualitätskontrolle für optische Systeme	599
3.10	Sicherheit optischer Systeme	599
3.11	Allgemeine Zahlen optischer Normen	600
4	Literaturverzeichnis zu Teil X	601

TEIL XI**Laserschutz**

1	Einleitung	605
2	Gefahren von Laserstrahlung	606
2.1	Schädigung des Auges	606
2.2	Schädigung der Haut	607
2.3	Schädigungen im Umfeld von Laserstrahlung	607
3	Klassifizierung von Laserstrahlung	609
4	Rechtliche Grundlagen	611
5	Schutzmaßnahmen	613
5.1	Technische und bauliche Schutzmaßnahmen	613
5.2	Organisatorische Schutzmaßnahmen	618
5.3	Persönliche Schutzmaßnahmen	619
6	Zusammenfassung	624
	Literaturhinweis zu Teil XI:	624

TEIL XII**Optische Komponenten und Grundlagen**

1	Einleitung	629
2	Licht und Optik	630
2.1	Eigenschaften des Lichts	630
2.2	Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes	631
2.3	Beugung	632
2.4	Brechung	632
2.5	Reflexion	634
2.6	Polarisation	635
2.6.1	Linear polarisiertes Licht	635
2.6.2	Unpolarisiertes Licht	636
2.6.3	Zirkular und elliptisch polarisiertes Licht	636
2.6.4	Polarisatoren	636
3	Optische Bauelemente	639
3.1	Linsen	639
3.2	Spiegel	644
3.3	Prismen, Reflexionsprismen	644

3.4	Okulare	648
3.5	Blende	649
3.6	Objektive	650
3.7	Strahlteiler	651
3.7.1	Geometrische Strahlteiler	651
3.7.2	Physikalische Strahlteiler	651
3.7.3	Periodische Strahlteiler	652
3.8	Fassungen optischer Bauelemente	652
3.8.1	Fassungsarten	653
3.8.2	Konstruktionsgrundsätze für das Fassen optischer Bauelemente	653
3.8.3	Gläseraufnahmen, Halterungen verschiedenster Art	654
3.9	Glasfaserkabel (Lichtwellenleiter LWL, Endoskope)	655
3.9.1	Arten von Fasern	658
3.9.2	Fügen von Lichtwellenleitern (LWL)	660
4	Lasertechnik	661
4.1	Allgemeines zur Lasertechnik	661
4.2	Stationen in der Geschichte der Lasertechnik und Optoelektronik	662
4.3	Grundlagen der Lasertechnik	662
4.3.1	Anregungsformen	663
4.3.2	Wechselwirkung von Photonen und Atomen	663
4.3.3	Absorption eines Photons	664
4.3.4	Ionisation eines Atoms	664
4.4	Laser und Lasersysteme	666
4.4.1	Prinzipieller Aufbau eines Lasers	666
4.4.2	Festkörperlaser	667
4.4.3	Gaslaser	670
4.4.4	Flüssigkeitslaser	672
4.4.5	Weitere Laser	672
5	Grundlagen der Interferometrie	673
6	Allgemeines zu flächendeckenden Prüf- und Messverfahren, Einführung	675
7	Literaturverzeichnis zu Teil XII	677
	Stichwortverzeichnis	679

Vorwort

Wohl keine Technologie dieser Welt hat in den letzten Jahren ein so rasantes Wachstum erlebt wie die Photonik. Computer, Smartphones, 3D-Filme, digitale Fotokameras. Optische Technologien im weitesten Sinne haben unser Leben wesentlich verändert und werden es weiterhin tun. Zum Beispiel in der Medizintechnik sind Geräte, die auf der Photonik begründet sind, wegweisende Hilfsmittel, um unsere Mediziner zu unterstützen. Operationen werden von Kameras überwacht und liefern, eingebunden in Analysegeräte, wichtige Informationen. Beispiele sind: Tumorbehandlungen im Gehirn, Vermessung von Implantaten bei künstlichen Knie- und Hüftgelenken, Detektionen von Krebsgeschwüren, ja sogar die Formfassungen von Zahnprothesen werden mit optischen Systemen erfasst, ausgewertet und umgesetzt.

Auch in der Industrielandschaft sind optische Technologien nicht mehr wegzudenken und stehen auf Wachstumskurs. Weitreichende, zukünftige Entwicklungen sind zu erwarten, in denen optische Sensoren Messergebnisse liefern:

- Beim autonomen Fahren, um die Mobilität des Menschen zu verbessern
- In der Informationsverarbeitung in Form von Bildern, Videos, Animationen usw.
- Bei der Erforschung neuer Galaxien und des Welt-raums (z.B. Rohstoffgewinnung auf dem Mond, dem Mars oder von Kometen, sowie die Erschließung neuer Lebensräume)
- Beim Einsatz individueller, robotergestützter Pflegedienste für ältere und erkrankte Menschen, um den Bedarf an Pflegekräften, zumindest teilweise zu kompensieren.
- Bei der Miniaturisierung von Schaltkreisen und der Erhöhung der Speicherkapazität zur Datenverwaltung (Stichwort optische Computer)
- Bei Analysegeräten, auch für den häuslichen Gebrauch, welche beispielsweise mit dem Smartphone

in Verbindung stehen (Beantwortung einfacher Fragen, wie „Was habe ich noch im Kühlschrank?“, „Sind meine Rollläden unten?“, „Ist der Herd abgeschaltet?“, „Sind Einbrecher im Haus?“).

- Analysegeräte zur Energieberatung („Welche Geräte sind ein- bzw. ausgeschaltet?“, „Wie ist die Temperaturverteilung rund um die Firma bzw. ums Haus?“)
- Veränderungen in der Arbeitswelt durch verstärkten Einsatz von „Home-Office-Systemen“, gekoppelt mit optischer Signalverarbeitung
- In der Agrarwirtschaft, zur Analyse des Pflanzenwachstums, mit Hilfe optischer Sensoren, welche direkt am Traktor befestigt werden.
- Industrie 4.0 ist ohne optische Messtechnik nicht umzusetzen

Die weitreichenden Einsatzmöglichkeiten optischer Messtechnik sind verbunden mit den Hauptvorteilen der Systeme wie:

- Zerstörungsfreie Prüf- und Messmethode
- Materialunabhängige Einsatzmöglichkeit
- Ganzflächige Überprüfbarkeit
- Kontaktlose Analyse
- Digitale Datenermittlung, -aufbereitung, -transfer und -protokollierung in einem Ablauf

Motivation

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an Büchern, Firmenbroschüren und Forschungsberichte, welche die Grundlagen der optischen Systeme erläutern. Dabei werden die physikalischen Zusammenhänge hergeleitet sowie die mathematischen Wege und Herleitungen diverser Algorithmen beschrieben. Genau hierin unterscheidet sich das Ihnen vorliegende „Handbuch Optische Messtechnik (HOM)“.

Es wird bewusst auf seitenlange, mathematische Herleitungen verzichtet. Im Vordergrund steht der Anwender, der ein Verfahren sucht, um eine komplexe, messtechnische Aufgabe zu lösen und dafür ein schnelles,

anwenderfreundliches, präzises und aussagekräftiges Messsystem benötigt. Das Handbuch ist daher ein Nachschlagewerk, um gezielt für verschiedene Messaufgaben das geeignete System zu finden und gleichzeitig Alternativen aufzuzeigen. Alle Messsysteme werden daher in diesem Buch anhand einer sorgfältig aufbereiteten Struktur erläutert. Die physikalischen Grundlagen werden durch übersichtliche Prinzipskizzen vorgestellt und beschrieben. Mehrere Anwendungsbeispiele aus der Industrie werden aufgeführt, die zudem zur Findung eigener Lösungswege anregen. Innerhalb kürzester Zeit ist jeder in der Lage, geeignete Systeme anhand der Übersichtstabellen, Verfahrensbeschreibungen und Anwendungsbeispiele für die vorliegende Messaufgabe auszuwählen. Ebenfalls können gezielt Fragen an Systemlieferanten gestellt werden.

Dank

Zum Schluss möchten wir uns bei den Mitarbeitern des Hanser Verlages bedanken, ohne dessen Unterstützung dieses Handbuch nicht zustande gekommen wäre. Insbesondere gilt unser Dank Herrn Herzberg, der uns bei der Gestaltung stets zur Seite gestanden hat.

Weiterhin gilt unser aufrichtiger Dank den über 40 beteiligten Firmen, den Mitarbeitern und Fachleuten, dessen Informationen und Anwendungsbeispiele wesentlich zum Gelingen dieses Handbuches beigetragen haben.

Trier, den 24.07.2017

Wassili Buerakov

Michael Schuth

PS:

Sollten Sie Anregungen, Hinweise und Ergänzungen haben, so sprechen Sie bitte den Hanser Verlag oder direkt die Autoren an. Wir freuen uns über jeden kreativen Hinweis.

Prinzipiell sind viele optische Messmethoden bekannt, aber die Umsetzung in die tägliche, industrielle Anwendung steht noch weit am Anfang.

Brauchen Sie weitere Unterstützung? Sprechen Sie uns an. Wir freuen uns auf Sie um ggf. weitere Details mit Ihnen zu besprechen.

Kontakt: schuth@hochschule-trier.de, Betreff: HOM

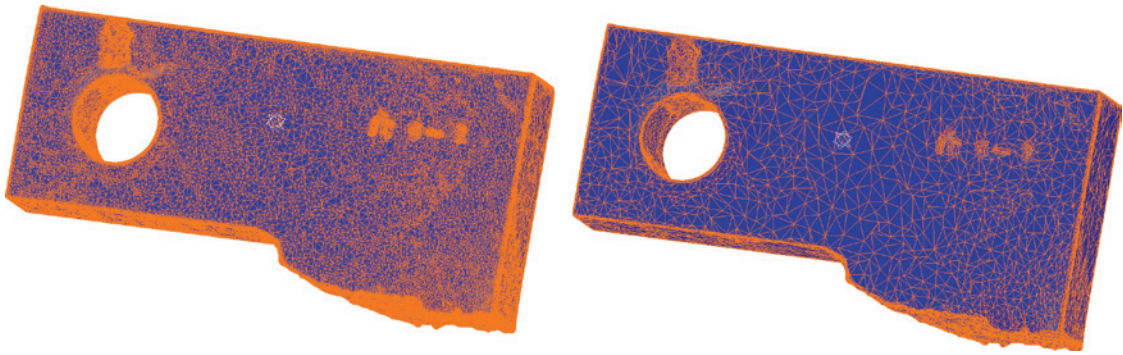


Bild 2.14 Netz vor der Reduzierung (links) und nach der 60%igen Reduzierung (rechts)

Aufnahmen zu einer Punktwolke können Fehlstellen im Polygonnetz entstehen. Zu den häufigsten Fehlerarten zählen doppelte Netze, fehlangeordnete Dreiecke und zu spitze Dreiecke. Diese Unregelmäßigkeiten führen dazu, dass eine nachträgliche Flächenerzeugung nicht mehr möglich ist. Die meisten Messprogramme verfügen über leistungsstarke Funktionen zum Auffinden und Beseitigen der Fehlstellen.

Zu d) Ändern der Dichter der Punktemenge

Eine nach der Geometrievermessung zur Verfügung stehende Punktwolke besteht nicht selten aus vielen hunderttausenden oder sogar Millionen von Einzelpunkten. Nach der Polygonisierung entstehen dadurch Netze, die eine große Datenmenge haben. Solche Datenmengen sind schlecht für die nachträgliche Bearbeitung geeignet. Große ebene Flächen können aber ohne an Genauigkeit einzubüßen durch eine geringere Punktemenge beschrieben werden. Bereiche mit vielen feinen Details müssen dabei durch viele Messpunkte beschrieben werden. An diesen Stellen ist eine Netzsimplifizierung nicht empfehlenswert, da die Genauigkeit vermindert wird.

2.7 Anwendungsbeispiele für das Lichtschnittverfahren

Im Folgenden werden einige industrielle Anwendungsbeispiele vorgestellt. Es geht dabei um beispielsweise Geometrie- und Schweißnahtkontrolle in laufender Produktion.

2.7.1 Geometriekontrolle von Gussrohren

Um die Ovalität und die Flansch-Geometrie an Gussrohren zu prüfen, hat zum Beispiel die Firma MEL eine Systemlösung mit M2-iLAN-Laserscannern realisiert. Das System ist in der Lage, eine Genauigkeit von 0,1 mm zu sichern. Große Bedeutung hat dabei das flexible Ethernet-Kabel, das durch den Roboterarm verlegt wird.

Die Herstellung von Rohren aus Stahl unterliegt meist einem thermischen Prozess. Die Firma Duktus stellt Rohre komplett mit Flansch und Anschlussprofil im Schleudergussverfahren her. Beim Abkühlen eines Rohres entsteht häufig unterschiedlicher Materialverzug. Dadurch erhält das Rohr eine ovale Form. Damit das Rohr den hohen Qualitätsanforderungen entspricht, muss es nach dem Abkühlen genauestens vermessen und gegebenenfalls mechanisch nachbearbeitet werden. Neben der Qualität wird auch der Flansch und das Anschlussprofil an den Rohrenden auf Fehler und Ausbrüche hin untersucht. Bisher wurde die Messung mit einem manuell zu bedienenden taktilen Messsystem an einzelnen Punkten gemessen. Der anschließende Biegeprozess wurde manuell initiiert und gesteuert. Die Firma Duktus setzt nun eine Systemlösung auf Basis von zwei M2-iLAN-Scannern der MEL Mikroelektronik GmbH ein. Die Lösung wurde in den automatisierten Fertigungsprozess integriert und steuert mit eigener Logik den gesamten Mess- und Biegeprozess vollautomatisch.

Die zu vermessenden Rohre werden über ein SPS-gesteuertes Transportsystem in die Haltevorrichtung der hydraulischen Biegepresse gefahren. Diese dient gleichzeitig als Messplatz. Die Messeinrichtung besteht aus einem Lineartisch mit Präzisionsantrieb, der die Abstände der beiden Scanner zueinander je nach

**Bild 2.15**

Biegepresse mit dem roboter-
geführten Lasermesssystem.
Der Messaufbau wird von einem
Roboterarm in das zu vermes-
sende Rohr gefahren (mit
freundlicher Genehmigung der
MEL GmbH)

zu messendem Rohrdurchmesser variabel anpasst. Der Lineartisch selbst ist an einem Roboterarm befestigt und wird von diesem in das zu vermessende Rohrende geführt (Bild 2.15).

Der Rohrdurchmesser wird vor dem Einfahren der Messvorrichtung in das Rohr mit einem M10L-Lasersensor bestimmt. So können der Rohrrinnendurchmesser sowie der geometrische Mittelpunkt des Rohres bestimmt werden. Beim Messvorgang wird der Lineartisch um 180° gedreht. Die beiden Scanner erfassen während einer Messdauer von ca. zwei Sekunden die Ovalität des Rohres sowie die Geometrie des umlaufenden Anschlussprofils.

Die von den Scannern erfassten Daten werden in Echtzeit über Ethernet an den Auswertungs-PC geschickt. Die Software von MEL ermittelt die Abweichungen vom Sollmaß und errechnet die sich daraus ergebenden Biegeparameter. Anschließend steuert die Software die Drehung des Rohrs in die richtige Biegeposition. Die Biegemaschine wird mit den nötigen Parametern adressiert und der Biegeprozess erfolgt. Nach dem Biegen erfolgt eine Kontrollmessung, um den Erfolg der Biegung zu dokumentieren (Bild 2.16).

Verschiedene Rohrdurchmesser sowie Unterschiede in den Flansch- und Anschlussprofilen erfordern ein flexibel einsetzbares Messsystem. Die eingesetzte Lösung ist in der Lage, Rohre mit Durchmessern von 350 bis 1100 mm zu erfassen. Unterschiedliche Flanschprofile lassen sich in der Software hinterlegen. So kann der Anwender das System an Veränderungen in der Produktionslinie anpassen. Die MEL-Software orchestriert³ und stimmt die einzelnen am Prozess beteiligten Komponenten aufeinander ab. Initiiert von der Materialsteuerung, die das zu vermessende Rohr in die Haltevorrichtung der Biegemaschine fährt, übernimmt die

MEL-Software während des gesamten Mess- und Biegevorgangs die Kontrolle.

Die Systemlösung erstellt von jedem erfassten Rohr umfangreiche Statistiken. Diese weisen gegenüber manuellen oder einfachen taktilen Systemen weitaus mehr Messpunkte auf. Die so gewonnen Erkenntnisse lassen sich nun wesentlich präziser und verbindlicher mit den Werten, die aus der Materialmischung im Hochofen stammen, vergleichen. So können eindeutige Rückschlüsse von der Materialbeschaffenheit im Be-

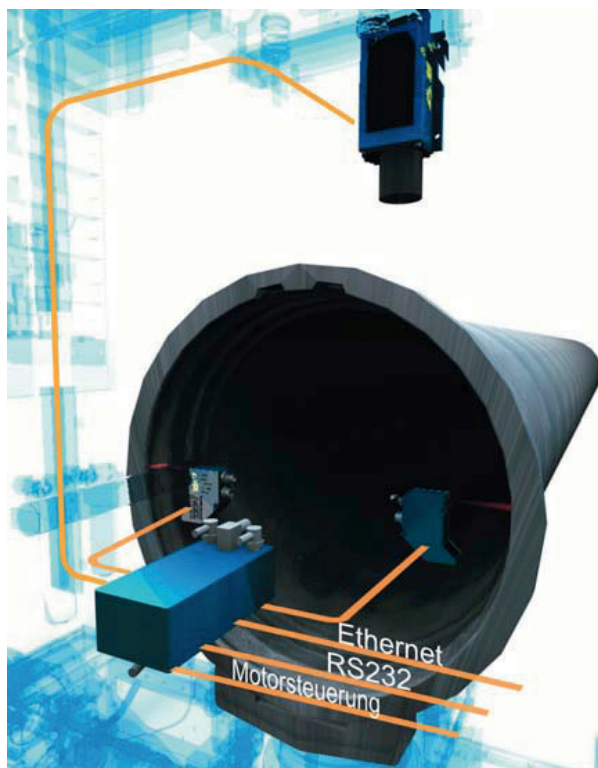


Bild 2.16 Die MEL-Systemlösung ist trotz komplexer Aufgabenstellung und Steuerung mit überschaubarem Aufwand zu realisieren. Die Administration erfolgt über das Ethernet (mit freundlicher Genehmigung der MEL GmbH)

³ instrumentiert

zug zur Art der Verformung der Rohre gezogen werden. Der Fertigungsprozess kann so schon bei der Mischung des Gussmaterials hinsichtlich der Fertigungsqualität optimiert werden.

2.7.2 Prüfung von Jochprofilträgern ohne Taktzeitverlust

Bei der Herstellung von Jochprofilträgern aus Stahl treten fertigungsbedingt Toleranzen auf, die inline, fehlerfrei und prozesssicher überprüft werden müssen. Um diese verwinkelten Bauträger schnell und präzise zu prüfen, hat die MEL Mikroelektronik GmbH eine Systemlösung mit M2-iLan-Laserscannern realisiert. Das System ist in der Lage, bei einer Toleranz von 0,3 mm eine Taktzeit von 100 mm/sec einzuhalten, dabei werden vier Instanzen gleichzeitig geprüft und von der eigens entwickelten Software ausgewertet.

Die Herstellung von Bauträgern erfordert ein hohes Maß an Verantwortung. Die Firma IAG als Hersteller entsprechender Fertigungsanlagen wollte daher einen separaten Prüfprozess in die Anlage integrieren, der die Taktzeit der Produktion nicht direkt beeinflusst. Es galt die Produktion zu protokollieren, die Produktivität zu steigern und die Ausschussrate gegen Null zu bringen. Um die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu erhöhen und die 100%ige Stabilität und Sicherheit der Bauträger zu gewähren, müssen die Schweißnähte (Kehlnähte) ohne Zeitverlust auf ihre Qualität geprüft, die exakten Lochabstände nachgemessen und die Löcher der Längs- und Querseite auf Werkzeugbruch, Position und Form (rund/oval) kontrolliert werden.

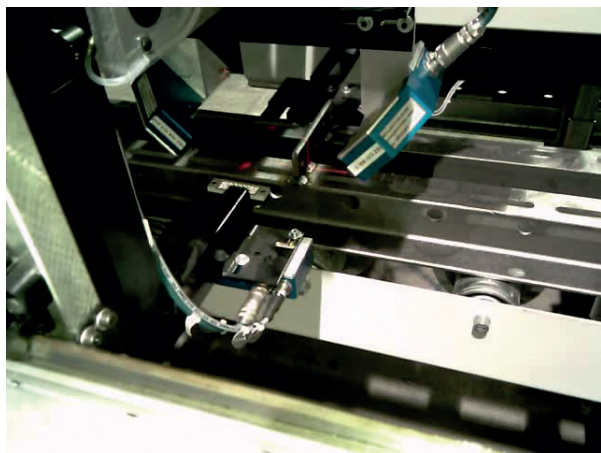


Bild 2.17 Schweißnahtkontrolle mit dem M2-iLan-Laserscanner der MEL (mit freundlicher Genehmigung der MEL GmbH)

Die Firma IAG setzt nun eine Systemlösung auf Basis von drei M2-iLan-Scannern der MEL Mikroelektronik GmbH ein. Berührungslos werden in kürzester Zeit mehrere hundert Bauträger über das Prinzip der Lasertriangulation überprüft, vermessen, klassiert, sortiert und protokolliert. Bei einer Taktzeit von lediglich 100 mm/sec kann immer noch auf 0,3 mm genau gemessen werden. Das System wurde in den automatisierten Fertigungsprozess integriert und steuert mit eigener Logik den gesamten Prüfungsprozess inklusive dem Ausstoß fehlerhafter Bauträger – und das vollautomatisch.

Die zu vermessenden Bauträger werden auf einem Rollenförderer transportiert. Auf jeder Seite des Rollenförderers wird ein Laserscanner positioniert, der die Löcher erfasst. Ein Encodersystem liefert Impulse vom Rollenförderer an den Scanner, sodass jeder Scannermesslinie ein Positionswert des Rollenförderers zugeordnet werden kann. Ein durch Lichtschranken gesteuertes Start-/Stopp-Signal steuert Beginn und Ende der Messfahrt (Bild 2.17).

Die Schweißnaht (Kehlnaht) der Stege muss auf Maßhaltigkeit in Länge, Höhe und Lage geprüft werden. Da die Schweißnähte quer zur Laufrichtung des Rollenförderers liegen, wird der Rollenförderer jeweils an den Positionen der Stegbleche angehalten. Es folgt der Prüfprozess der parallel verlaufenden Kehlnähte (Bild 2.18). Speziell hierfür werden zwei Laserscanner in

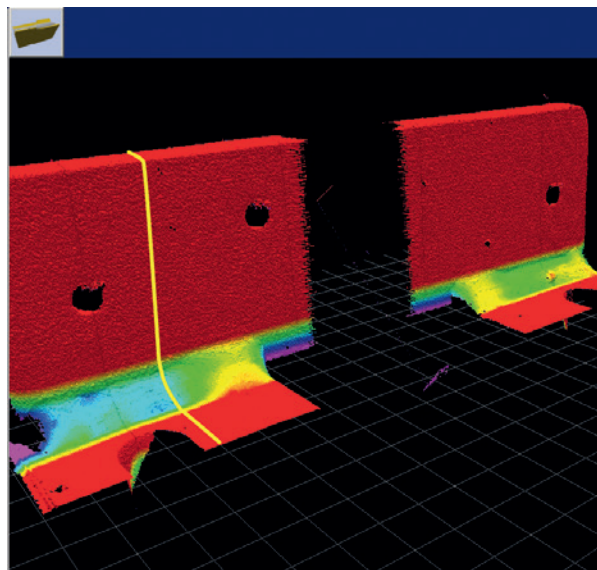


Bild 2.18 3D-Aufzeichnung der Schweißnaht durch Laserscanner (die rote Laserlinie ist gelb markiert), (mit freundlicher Genehmigung der MEL GmbH)

einem 45°-Winkel zur Oberfläche geneigt. Die Prüfung erfolgt auf Kriterien wie A-Maß, Nahtlänge, Einbrandkerben und Nahtposition. Unmittelbar nach erfolgter Schweißnahtprüfung wird die Fahrt für die Lochabstandsmessung fortgesetzt, bis zum nächsten Steg.

Die MEL-Software orchestriert und stimmt die einzelnen, am Prozess beteiligten Komponenten aufeinander ab. Initiiert durch den Rollenförderer, der die Bauträger avanciert, übernimmt die MEL-Software während des gesamten Mess- und Prüfungsvorgangs die Kontrolle. Möglich ist das, da neben der Erfassung der Messwerte auch deren Auswertung innerhalb der Software stattfindet.

Am Ende der Messfahrt werden die Ergebnisse beider Messaufgaben an eine SPS ausgegeben und auf dem Bildschirm eines Leitstandes angezeigt. Teile die nicht den Anforderungen entsprechen, werden sofort ausgeschleust.

Die vollautomatische Inlineprüfung dieser beiden Messkriterien erstellt von jedem Bauträger eine umfassende Statistik, die zur Anlagenoptimierung unerlässlich ist. Gegenüber manuellen oder einfachen taktilen Systemen kann nicht nur wesentlich genauer und schneller gemessen werden, weitaus mehr Messdaten aller Prüflinge werden als Nachweis permanent abgespeichert. Die Auswertung der Daten erfolgt bereits im Sensorkopf und wird zu konsolidierten Daten verarbeitet. Diese Daten weisen ein drastisch reduziertes Volumen gegenüber üblichen Framgrabbern auf und können ohne signifikante Netzwerkbelastung über den integrierten Ethernet-Anschluss übertragen werden.

2.7.3 Vermessen eines Traktors

MX (vormals MAILLEUX) ist ein 1951 in Frankreich gegründetes Familienunternehmen, das sich auf die Entwicklung, Herstellung und Vermarktung von Anbaukonsolen für landwirtschaftliche Schlepper spezialisiert hat. MX ist ein weltweit führender Anbieter, der mehr als 6000 verschiedene Traktorenmodelle ausrüstet.

MX entwickelt u. a. Konstruktionen für die Befestigung von Frontkrafthebern an allen derzeit erhältlichen Traktormodellen sowie dazugehörige Steuerungssysteme.

Das Problem

Traktorenhersteller geben selten Informationen zu ihren Produkten heraus, geschweige denn 3D-Modelle.

Für die Entwicklung und Herstellung von Ausrüstungen und Zubehör wie den MX-Frontkrafthebern sind solche Modelle jedoch unerlässlich. MX muss daher 3D-Messungen aller Traktoren vornehmen, für die das Unternehmen speziell adaptiertes Zubehör entwickelt und herstellt (Bild 2.19).

Bis vor kurzem verwendete MX für das Vermessen, Scannen und Rekonstruieren eines Traktors 3D-Scanner Messarme. Dieses Verfahren nahm jedoch eine ganze Woche in Anspruch und war mit entsprechend hohen Arbeitskosten verbunden. Darüber hinaus mussten die Messarme während der Messung häufig neu positioniert sowie in einer stabilen Umgebung kalibriert und anschließend wieder installiert werden.

Um die Messzeiten zu verkürzen und die Kosten einzudämmen, suchte MX eine Alternative, die schneller und flexibler als die vorhandene Lösung war und unabhängig von den Umgebungsbedingungen präzise, zuverlässige Messergebnisse lieferte.

Technologische Integration in den Arbeitsablauf

Im Herbst 2012 erwarb MX ein Scan- und Abtastsystem bestehend aus dem tragbaren Koordinatenmessgerät HandyPROBE, dem optischen 3D-Scanner MetraSCAN 3D, dem DualKamera-Sensor C-Track 780 und der Nachbearbeitungssoftware Geomagic Solutions von 3D Systems. Seither nutzt MX die Technologien von Creaform zur Digitalisierung von Traktoren und zum Scannen der Bereiche, die für die Entwicklung der adaptierten Komponenten erforderlich sind, einschließlich der Befestigungspunkte und der umliegenden Strukturen (Traktorkabine, Auspuff, Tank, Batteriegehäuse, Filter, Leitungen, Kühler, Motor und Riemenscheibe). Anschließend werden die Oberflächen mit Geomagic Solutions bearbeitet, zugeschnitten und bereinigt und in eine CAD-Software exportiert.

Durch die Integration der tragbaren 3D-Messtechnologien von Creaform war MX außerdem in der Lage, ein flexibles Messsystem einzurichten, das von sechs Mitarbeitern des Konstruktionsbüros genutzt werden kann.

Die Messzeiten wurden mit dem optischen Sensor mehr als halbiert. Dadurch konnte die Anzahl der Projekte von 50 auf 100 pro Jahr verdoppelt werden. Die riesige Menge an erfassten Daten kann somit optimal genutzt werden.

**Bild 2.19**

Messung eines Traktorteils mit dem optischen Scanner MetraSCAN 3D (mit freundlicher Genehmigung von Creaform)

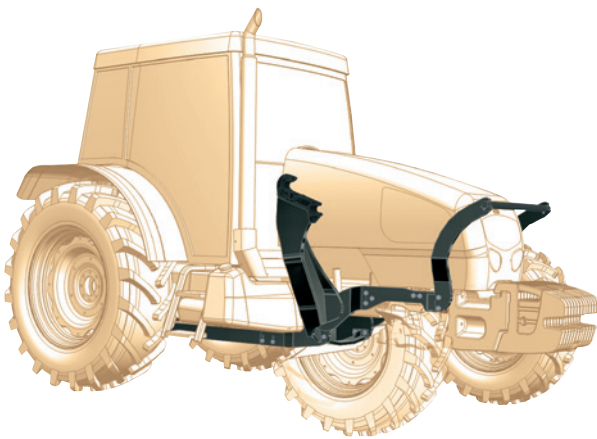


Bild 2.20 Von MX hergestellte Befestigung für einen Traktor (mit freundlicher Genehmigung von Creaform)

2.7.4 Engineering eines Flugzeuginnenraums – vom Scan zum 3D-CAD-Modell

Das Schweizer Unternehmen Jet Aviation AG, eines der weltweit führenden Dienstleistungsunternehmen innerhalb der Geschäftsflurfahrt, hat den Creaform 3D Engineering Service beauftragt, einen 3D-Scanner eines leeren Boeing-737-800-Innenraums zu erstellen. Ziel war es, den Innenraum virtuell darzustellen, damit Jet Aviation das Interieur designen und fertigen kann. 3D-Scanner können vor der Verfügbarkeit des Flugzeugs bereitgestellt werden. Dies erlaubt den Ingenieuren,

schon vorab mit dem Design für den Umbau zu beginnen und dabei die Sicherheit zu haben, dass die Konstruktion nur ein Minimum an Eingriffen in die vorhandenen Systeme und Strukturen des Flugzeugs erfordert. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist, dass die Risiken des Projekts im Vorfeld gesenkt werden, indem potenzielle mechanische Störzonen und kostenintensives Design im Voraus erkannt sowie reduziert werden. Die 3D-Modellierung bietet außerdem ein erweitertes Context Management (d. h. eine visuelle Plattform, welche die Wechselbeziehung der Konstruktion über alle Ingenieurdisziplinen aufzeigt und potenzielle Konflikte offenbart/verhindert).

Der Creaform 3D Engineering Service wurde beauftragt, die Kabine und den Laderaum einer leeren Boeing 737-800 zu scannen. Der Prozess beinhaltete ein Vorbereitungstreffen auf einem Flugplatz in Deutschland zwischen dem Flugzeugsbetreiber, Jet Aviation und Creaform.

Im Sommer 2011 wurde das Flugzeug in einen Hangar gerollt und für drei Wochen auf Stützfüße gehoben. Die Stützvorrichtung stellte sicher, dass das Flugzeug während der Dauer des Scans fixiert war, um eine gleichmäßige Datenerfassung sicherzustellen. Im Innenraum wurden die Bodenplatten und die Verkleidungen entfernt, um die zu scannende Struktur und Systeme freizulegen.

Ein Team von Applikations-Ingenieuren von Creaform digitalisierte dann den Flugzeuginnenraum mit Han-



Bild 2.21
Scanarbeiten in einem
Flugzeuginnenraum (mit
freundlicher Genehmigung von
Creaform)

dySCAN-3D-Scannern, einem Leica-Long-Range-Scanner, dem optischen 3D-Laserscanner MetraSCAN 3D mit C-Track und einem System für Fotogrammetrie-aufnahmen (Bild 2.21). Sobald ein Abschnitt erfasst, zusammengeführt und nachbearbeitet war, wurden die Dateien an die CAD-Abteilung von Creaform nach Kanada gesendet, um zu einem CAD-Modell rekonstruiert zu werden (Bild 2.22). Während das Modell konstruiert wurde, hat Creaform fortlaufend Zwischenergebnisse an den Kunden Jet Aviation geschickt, damit die Arbeit parallel bewertet und validiert werden konnte.

Datenverarbeitung und Konstruktion eines 3D-Scanners

Mit der Software CATIA V5 rekonstruierten die Designer den Innenraum des Flugzeugs, einschließlich der verschiedenen Flugzeugelemente wie Decken- sowie Bodenspannten und -platten, Rahmen, mechanische Komponenten und verschiedene Arten von Verrohrungen und Verkabelung.

Die Arbeit wurde gemäß der Flugzeugabschnitte in mehrere Sektionen unterteilt. Mithilfe der Scandaten wurden Volumenmodelle der Flugzeugelemente rekon-

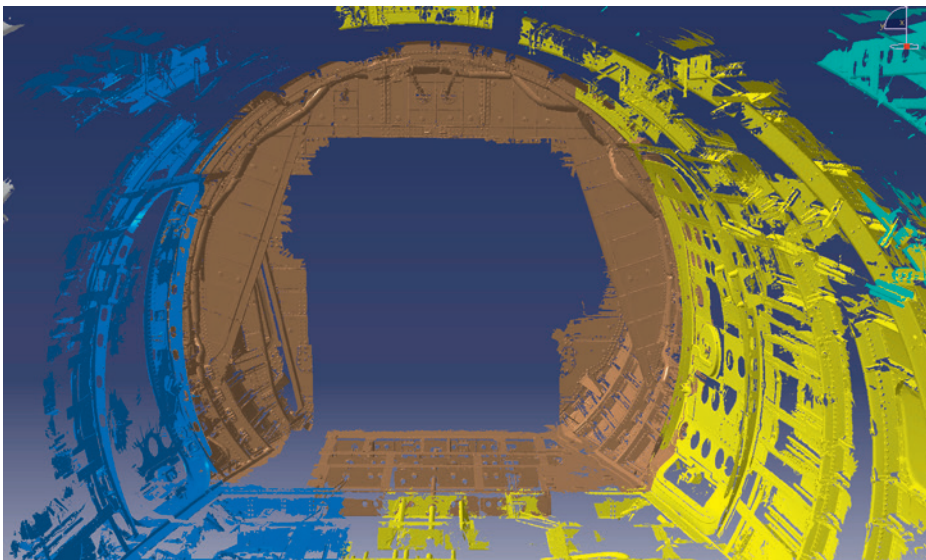
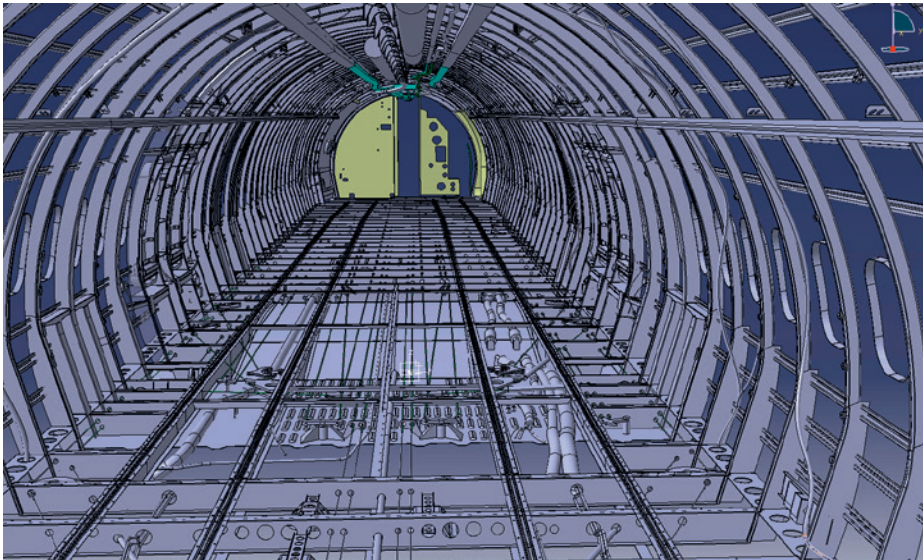


Bild 2.22
Rohdaten des Rumpfes nach
dem 3D-Scan im .stl-Format
(mit freundlicher Genehmigung
von Creaform)

**Bild 2.23**

Rekonstruierter CAD-3D-Scan des Rumpfes (mit freundlicher Genehmigung von Creaform)

struiert. Aus diesen Volumenmodellen (Bild 2.23) können Schnittzeichnungen erstellt und konstruktive Ebenen sowie Oberflächen daraus abgeleitet werden. Für einteilige Objekte wurde das Volumenmodell entweder durch die mathematische Methode der Extrusion oder durch Unterteilung des Scans in vektorisierbare Flächen erzeugt. Zusammengesetzte Teile (z.B. im Falle bestimmter Mechanismen) wurden in geometrische Grundelemente zerlegt, die mit einfachen geometrischen Funktionen erstellt werden konnten.

Oberflächenmodelle wurden verwendet, um einige Flugzeugkomponenten zu rendern, deren Formen zu komplex waren. Aus den Oberflächenmodellen wurden dann – unter Annahme einer konstanten Wandstärke – Volumenmodelle der Komponenten erzeugt, wie z.B. bei den Rollen, welche die die Steuerleitungen führen. Diese Art der Rekonstruktion ermöglichte einen hohen Grad an Präzision. Zudem konnten die rekonstruierten Komponenten an verschiedenen Stellen des 3D-Scans wiederverwendet werden.

Um das Projekt zu vollenden, wurden alle rekonstruierten Komponenten zusammengefasst und ein kompletter 3D-Scan des Boeing-737-Innenraums erzeugt. Diese virtuelle 3D-Reproduktion wurde an Jet Aviation geliefert, wo anhand dieser Datenbasis die Inneneinrichtung des Flugzeugs entworfen, produziert und montiert wird.

Jet Aviation und Creaform haben gemeinsam etwa fünf Monate an der Erstellung und Überprüfung des Modells gearbeitet.

2.7.5 Robotergeführte optische CMM-Scanner

Mit der MetraSCAN-R™ Reihe erweitert Creaform seine Palette an Lösungen für Inspektionsanwendungen für den industriellen Sektor und das produzierende Gewerbe (Bild 2.24). Die Scanner werden in zwei Versionen (70-R und R 210) angeboten und für automatische und robotisierte Inspektionen wie die Online-Prüfungen in der Serienfertigung (bis zu einigen hundert Teile pro Tag), Online-Inspektionen von Bauteilen von 0,5 bis 3 m Größe, Teil-zu-CAD-Analysen, Prüfungen der Lieferantenqualität, Konformitätsbewertung von 3D-Scannern oder Fertigungswerkzeuge und Konformitätsbewertung hergestellter Teile anhand der Originalteile eingesetzt.

Die Lösung kann vollständig konfiguriert und programmiert werden (Prüfprogramme), um die Anforderungen der automatisierten Inspektions-Projekte für Teile in verschiedenen Größen und Formen zu erfüllen. Die robotergeführten MetraSCAN-R-Scanner arbeiten mit dem Dual-Kamera-Sensor C-Track zusammen. Es besteht außerdem die Möglichkeit, den MetraSCAN-R mit zwei bis vier C-Track 780 zu verbinden, um von der C-Link-Funktionalität und einer deutlich höheren Vielseitigkeit zu profitieren.

Die TRUaccuracy-Technologie garantiert Genauigkeiten von bis zu 0,085 mm in realen Produktionsumgebungen (unabhängig von Instabilitäten, Vibrationen, thermischen Unterschieden etc.). Die Genauigkeit wird



Bild 2.24
Robotergeführter MetraSCAN-R-Scanner für automatisierte Inspektionen in der Produktionslinie (mit freundlicher Genehmigung von Creaform)

vom optischen CMM-Scanner bestimmt und ist unabhängig vom Roboter.

2.7.6 Verbau von Windschutzscheiben

Eine Windschutzscheibe im Auto ist heute weit mehr als nur eine Glasscheibe, die den Fahrer vor dem Fahrtwind schützt. Sie übernimmt tragende Funktionen bei der Konstruktion des Automobils, zudem muss sie Er-

schütterungen und hohen Temperaturschwankungen standhalten können. Dafür entscheidend ist ein einwandfreier Kleberaupenauftrag auf den Scheibenrand, bevor die Scheiben durch Roboter im automatisierten Verbauprozess in die Karosserie eingesetzt werden. Hierzu überprüft ein Laserscanner die Höhe der Kleberaube und deren Position am Scheibenrand (Bild 2.25). Danach wird von einem Roboter das Glas vor der Karosserie positioniert und nach erfolgter Positions-



Bild 2.25
Laserscanner überprüfen die Höhe der Kleberaube am Scheibenrand (mit freundlicher Genehmigung von Mikro-Epsilon Messtechnik GmbH)

bestimmung durch die Lichtschnittsensoren zentriert in die Karosserie eingesetzt. Dieser Prozess erfolgt in Echtzeit und ist im normalen Fertigungstakt im Automobilbau von unter einer Minute integriert.

2.7.7 Spalt-Bündigkeitsmessung an Karosserieteilen

Im Fahrzeugbau werden die einzelnen Karosserieteile zu einem kompletten Auto zusammengefügt. Dabei ergeben sich Spalt- und Bündigkeitsmaße zwischen den einzelnen Teilen und kein Kunde möchte am Ende einen neuen Wagen mit einer herausstehenden Heckklappe und schief sitzenden Türen. Um dies zu vermeiden, werden „sehende Roboter“ eingesetzt, deren Greifsysteme mit optischen Sensoren so ausgerüstet sind, dass der Verbauprozess für jeden einzelnen Fügevorgang in Echtzeit optimal geregelt wird. Anschließend wird auch noch überprüft, ob das Verbauergebnis



Bild 2.26 Optische Sensoren prüfen die Autokarosserie nach dem Verbauprozess (mit freundlicher Genehmigung von Mikro-Epsilon Messtechnik GmbH)

der produzierten Fahrzeuge mit ihren umlaufenden Spalt-/Bündigkeitswerten den hohen Ansprüchen der Hersteller genügt.

2.7.8 Nietenprüfung im Flugzeugbau

Wie im Automobilbau spielt auch in der Flugzeugindustrie die Sicherheit der einzelnen Verbindungen eine entscheidende Rolle. Zum Beispiel erfordern die Nahtstellen zwischen Flugzeugrumpf und Flügeln schon aus Sicherheitsgründen eine lückenlose Qualitätsprüfung, wozu bei jedem Flugzeug die Nietenverbindungen mit einem Laserscanner überprüft werden.

Bei diesem Prüfprozess werden die kompletten Nietstellen eingescannt und das gesamte 3D-Abbild wird zur Überprüfung von den einzelnen Nietverbindungen herangezogen. Ausgeschlossen werden somit abgehende Nieten, aber auch zu hoch, zu tief oder schief sitzende Nieten.

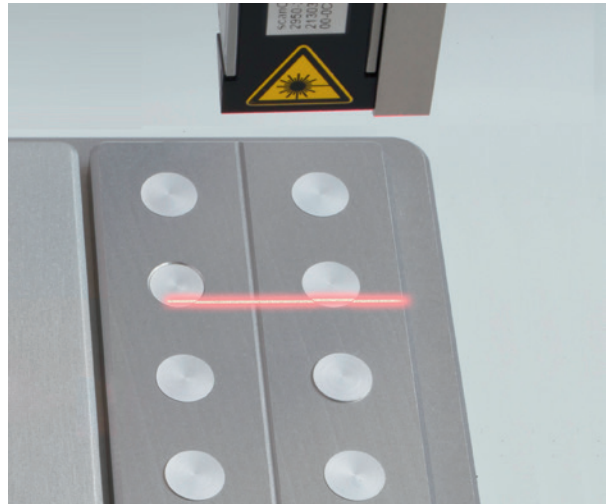


Bild 2.27 Laserscanner überprüft die Nietverbindungen (mit freundlicher Genehmigung von Mikro-Epsilon Messtechnik GmbH)

2.7.9 Vermessen von Karossen

Für moderne Fertigungsprozesse ist die ständige Überwachung von hoher Bedeutung. Insbesondere bei Produkten, die seitens der Kunden genauestens unter Augenschein genommen werden. Zu solchen Produkten gehören die Autos.

Die Position des optischen 3D-Scanners wird durch den Dual-Kamera-Sensor C-Track getrackt. Die messarmlosen optischen CMM-Scanner MetraSCAN 3D™ sind



Bild 2.28
3D-Scan einer Karosserie mit dem MetraSCAN 3D (mit freundlicher Genehmigung von Creaform)

derzeit die exaktesten Scan- und Abtastlösungen auf dem Markt und garantieren höchste Genauigkeit sowohl im Labor als auch im Fertigungsbereich. Zusammen mit der HandyPROBE™ steigert diese leistungsstarke Komplettlösung die Zuverlässigkeit, Geschwindigkeit und Vielseitigkeit von Messvorgängen, sei es für Mess- oder große Reverse-Engineering-Anwendungen (Bild 2.28).

2.7.10 Reverse Engineering im Rennsport

Oldtimer-Rennen sind Rennen gegen die Zeit. Nicht Rundenzeiten stehen im Mittelpunkt, der eigentliche Gegner ist die Vergänglichkeit. Statt die geschätzten Vehikel zu konservieren, dreht man am Rad der Zeit. Geht etwas zu Bruch oder fängt Feuer, wird es neu gefertigt. Die Vergangenheit lebt – die Methoden leiht man sich aus der Zukunft. Stichwort: Reverse Engineering. Reverse Engineering oder Flächenrückführung bezeichnet einen umgekehrten Konstruktionsprozess. Nicht eine Idee oder ein Prototyp steht am Beginn, sondern ein bereits existierendes Teil.

Das kleine Münchner Rennteam „Project Lucky Racing“ fährt einen Alfa Romeo Montreal Gruppe IV, Baujahr 1971. In Kombination mit einem Drei-Liter-Motor V8 von Autodelta war der Wagen seit 1973 im Renn-einsatz. Aktuell ist er der einzig fahrende seiner Art mit FIA HTP (historic technical Passport) und europaweit auf Rennstrecken unterwegs: Monza, Salzburgring, Nürburgring. Ersatzteile sind schwer zu beschaffen, Konstruktionsdaten existieren nicht mehr. Während einer Generalüberholung vor zwei Jahren

war klar, dieser Motor braucht ein Back-up. Man entschloss sich daher, Rücker Testing Services GmbH für die Anfertigung von Ersatzteilen zu beauftragen. Einige Teile des Motors sind Gussteile aus Magnesium. Bei einem Unfall oder Feuer würden diese Teile wahrscheinlich zerstört. Die Aufgabenstellung: Von fünf Teilen, darunter eine Ansaugbrücke und ein Flachschiebergehäuse, soll die Rücker Testing Services GmbH CAD-Modelle erstellen, die man bei Bedarf nachproduzieren kann. Bei der Umsetzung greift Rücker Testing Services GmbH auf bewährte Technik zurück, die sie auch in der Qualitätskontrolle verwenden. Für die Datenerhebung dient ein FARO Edge ScanArm ES; Interpretation und Bearbeitung der Daten erfolgt mit der Software PolyWorks.

Vom Punkt zum Dreieck

Zuerst erfasst und digitalisiert ein Mitarbeiter die Bauteile optisch mit dem Laserscanner. In PolyWorks ergibt das eine Ansammlung einzelner unverbundener Datenpunkte, genannt Punktwolke.

Durch Polygonisierung erstellt PolyWorks aus der Punktwolke Dreiecksflächen. Bei glatten Oberflächen reichen einige wenige, große Dreiecke aus. Starke Krümmungen, Radien oder Bereiche mit hohem Detailgrad sind durch viele kleine Dreiecke zu beschreiben. Dieser Prozess der Gewinnung von Oberflächendaten nennt sich auch Vernetzung.

PolyWorks bietet eine Reihe an Optionen, die erzeugten Polygonmodelle zu bearbeiten. Das betrifft Bereiche, die der Scan nicht erfassen kann: Hinterschnitte eines Bauteils verdecken die „Sicht“ des optischen Digitali-

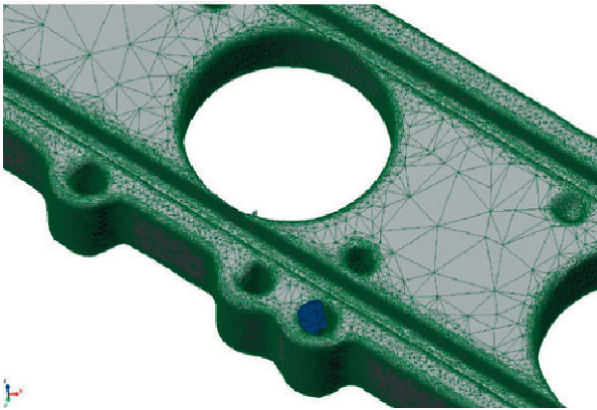


Bild 2.29 Polygonmodell bestehend aus einzelnen Punkten, die über Dreiecksflächen miteinander verbunden sind. Für verwinkelte Bereiche errechnet PolyWorks viele kleine Dreiecke, bei flächigen Partien genügen große Dreiecke (mit freundlicher Genehmigung von Duwe-3D AG).

siersystems. Diese Löcher lassen sich leicht schließen. Eine Glättung der polygonalen Struktur reduziert die Datenmenge und beseitigt fehlerhafte Daten. Auch lassen sich Regelgeometrien, wie Kreise oder scharfe Kanten, in das Polygonmodell einfügen (Bild 2.29).

Von der Kurve zur Fläche

Der nächste Schritt wandelt das Polygonmodell in

NURBS-Flächen um. NURBS sind parametrisch beschreibbare Flächen, die ein CAD-System für die Konstruktion verwendet.

Für NURBS-Flächen bilden Kurven die Basis, die PolyWorks aus dem Polygonmodell ableitet. Kurven orientieren sich in ihrem Verlauf an Kanten, Löcher, Vertiefungen und Radien des Bauteils. Zwischen Ihren Schnittpunkten fügt PolyWorks dann NURBS-Flächen ein (Bild 2.30).

Um vorerst Kurven zu erstellen, gibt es in PolyWorks verschiedene automatische und halbautomatische Erzeugungsmethoden. Auch lassen sich über vertikale und horizontale Schnitte einfach Flächen definieren.

Hier liegt die Herausforderung auch in der Wahl der richtigen Methode: „Für einige Bauteile hat sich die Erzeugung von NURBS-Flächen durch Schnitte als beste Möglichkeit erwiesen. Schnitte lassen sich in definierbaren Abständen setzen und als Kurven exportieren. Diese Methode ist extrem schnell. In verwinkelten Bereichen oder auf Kanten von Bohrungen erfordert aber auch diese Methode einige manuelle Nachbearbeitung. Für die Flächenrückführung ist Erfahrung wichtig, da je nach Bauteil die optimale Erzeugungsmethode der Kurven variieren kann.“ (R. Cristoforo) Je nach Datenqualität und Komplexität des Bauteils bringen manuell gezogene Linien für einzelne Abschnitte oft die besten



Bild 2.30

Links oben vor einer Glättung und rechts oben nach einer Glättung. Die untere Darstellung zeigt Löcher, die durch Scans unvollständig erfasst werden können. Durch wenige Klicks lassen sie sich in PolyWorks schließen (mit freundlicher Genehmigung von Duwe-3D AG).

Ergebnisse. Erfahrung und Kreativität lassen sich doch nicht vollständig automatisieren.



Bild 2.31 Für die Gewinnung von NURBS-Flächen lassen sich Schnitte auf das Polygon legen. Nach dem Export der Schnitte als Kurve, erzeugt PolyWorks zwischen ihren Schnittpunkten Flächen-Patches – die Basis für das spätere CAD (mit freundlicher Genehmigung von Duwe-3D AG).

Für die Analyse der NURBS-Flächen stehen in PolyWorks verschiedene Tools und Visualisierungen zur Verfügung. Fitting-Fehler, Abweichungen gegenüber



Bild 2.32 Falschfarbendarstellung erleichtert die Beurteilung der NURBS-Flächen (oben), unten: Das Zebromuster zeigt Stetigkeitsbedingungen an, ein gleichmäßiges Muster bedeutet Krümmungsstetigkeit der NURBS-Flächen (mit freundlicher Genehmigung von Duwe-3D AG).

dem Polygonmodell oder Stetigkeiten der einzelnen NURBS-Patches lassen sich in Falschfarben-Darstellungen zuverlässig beurteilen (Bild 2.32).

Bohrungen sind wegen ihrer Tiefe, allein durch optische Scans nicht ausreichend zu erfassen. „Hier haben wir die optischen Daten durch taktile Messungen ergänzt. In PolyWorks gibt es die Funktion „Löcher stanzen“. Nimmt man den Kreismittelpunkt mit dem Taster auf, lässt sich eine Regelgeometrie bereits in das Polygonmodell oder in das aus den NURBS Flächen erzeugte CAD einarbeiten.“ (R. Cristoforo) (Bild 2.33)

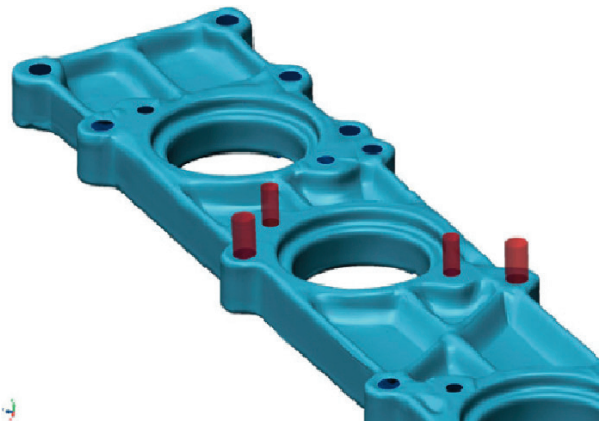


Bild 2.33 Position und Länge von Bohrlochern, die mit optischen Scans nicht zu 100 % erfasst werden, lassen sich taktill bestimmen und mit Polyworks in das fertige CAD über „Löcher stanzen“ (rote Stifte) einarbeiten (mit freundlicher Genehmigung von Duwe-3D AG).

Vom CAD auf die Rennstrecke

Mit einem CAD-Datensatz gäbe es verschiedene Möglichkeiten, an ein reales Teil zu kommen. „Man könnte es sich einfach machen und die Teile aus dem Vollen fräsen. Aber Leute, die solche Autos fahren, wollen die original Optik! Die habe ich nur, wenn ich es mit Sandguss mache.“ (D. Schumann) Diese Fertigung erfordert weitere Bearbeitungsschritte. Im Guss sind nicht alle Details des Bauteils darstellbar. Kleinere Bohrungen und einige längliche Hinterschnitte sind im CAD geschlossen und mit zusätzlichem Material überhöht. Sie erhalten erst durch eine Fräsnachbearbeitung ihre eigentliche Beschaffenheit. PolyWorks bedient die CAD-Formate .iges oder .step und ermöglicht somit die Nachbearbeitung in allen gängigen Konstruktionsprogrammen wie CATIA V5, Pro/E, SolidWorks usw.

Stichwortverzeichnis

Symbole

3D-Formprüfinterferometrie 165
3D-Koordinatenmesssystem 79
3D-Koordinatenmesstechnik 90
3D-Oberflächenerfassung 9
3D-Oberflächeninspektion 360
3D-Profilometer 363
3D-Qualitätsprüfung 70ff.
3D-Vermessung 6ff.

A

Abbildungsfehler bei Linsen 642
Abbott-Kurve 344
Abdichtung 128
Abstandsmessung 153, 419
– interferometrische 423
– konfokale 434
– kosmische 439
Additive Fertigungsverfahren 121
Anemometer 262
Antriebswelle 42
archäologische Messobjekte 57
Arithmetischer Mittenrauwert 346
Assistenzroboter 238
Astigmatismus 642
ATOS Triple Scan 51
Augenschädigung 606
Autofelge 398
Autofokussensor 145
– mit Kontrastvergleich 149
Autokarossen 311
Automobilbau 303

B

Banddickenmessung 104
Bandstrahlungspyrometer 244

Batterietechnologie 241
Baugewerbe 102
Bauteiloptimierung 385
Bauteilprüfung in der Serienproduktion 574
Bauteilvermessung 156
Bauthermografie 222
Beugung 632
Biegeprobenverformung 471
Biegeprozess 18
Bierfässer
– thermografische Kontrolle 232
Bildfeldwölbung 643
Bildkorrelation
– in der Fahrzeugindustrie 479
– zur Verformungsmessung 467
Bildkorrelation 305, 409
Bildzuordnung 306
Blechkonstruktionen 311
Blechteilvermessung 38, 53
Blende 649
BMW-Cabriolet 83
Bohrlöcher 28
Bolometerkameras 220
Bragg-Reflexion 253
Bragg-Wellenlänge 253
Brechung 632
Brechzahlen 633
Bremssattelverformung 456
Brennstoffzellentechnologie 241
Brillengläser
– SPO-Untersuchung 383

C

CFK-Platte
– shearografische Untersuchung 565
chromatisch-konfokales Messverfahren 125
Chromatische Aberration 642

Clay-Modell 61
 CMM-Scanner 23
 Codiervverfahren 47f.
 Cognitens-System 65
 Computertomografie 535
 – dreidimensionale 540
 – zweidimensionale 540
 Creaform 22

D

Dark-Lockin-Thermografie 523
 Deflektometrie 184
 Deformationen 447
 Dehnungsmessstreifen 447
 Dehnungsmessung 374
 Detektion von Fehlstellen 514
 DGV 288
 Dichtelemente 128
 Dichtigkeit 216
 Dichtringe 512
 Dickenmessung 102f.
 Dispersionsprisma 644
 Distorsion 643
 DMS 374
 DMS *Siehe* Dehnungsmessstreifen 447
 Doppler Global Velocimetry 288
 Dopplereffekt 262
 Druckbehälteruntersuchung 482
 Druckgussformen
 – Steuerung der Temperaturverteilung 231
 Durchlicht Polariskop 379
 Durchlichtverfahren
 – spannungsoptisches 378

E

Ebenheitsprüfung 170
 Eindringprüfung 502
 Eindringtiefe
 – thermische 557
 Einspritzinjektoren 547
 Einzelpulsmessung 427
 Elektroanlagen
 – thermografische Untersuchung 224
 Elektrobauteile
 – thermografische Untersuchung 223
 Elektronikplatine
 – Vibrationsanalyse 320

Ellipsometrie 162
 Emissionsgrad 217
 Emissionsgrade von Materialien 218
 Endoskop 659
 Entfernungsmessung 153
 ESPI 313

F

Faber-Perot-Interferometer 256
 Fahrerüberwachung 237f.
 Fahrzeugbau 35
 Fahrzeugdesignmodell 61
 Fahrzeuginnenraumvermessung 57
 Fahrzeugvermessung 73
 Falschfarbendarstellung 28, 31
 Falschfarbenvergleich 69
 Faser-Bragg-Gitter 253
 Faserkeramik 531
 faseroptischer Sensor 251
 faseroptisches Messsystem 252
 Faserverbundbauteile 549
 Faserverbundwerkstoff 531, 533
 Faserverbundwerkstoff-Inspektion 529
 Faserverbundwerkstoffprüfung 525
 Fassungen
 – optischer Bauelemente 652
 Fenstervermessung 95
 Fertigungskontrolle 215
 Festkörperlaser 667
 Filtered Rayleigh Scattering 291
 Flugzeugbau 25, 66, 305
 Flugzeuginnenraum 21
 Flugzeuginspektion 138
 Flugzeugrumpf-Kontrolle 527
 Flugzeugtüruntersuchung 481
 Flugzeugvermessung 197
 Fluidmechanik 279
 Fluidströmungsuntersuchung 290
 Flüssigkeitslaser 672
 Flächenmessung 170
 Flächenrückführung 62
 Fokus-Variation 179
 Fokusvariationsverfahren 359
 Folienvermessung 103
 Formabweichungen 38
 Formel 1TM 73
 Formenbau 61
 Formerfassung 3

Formtoleranzen 338
 Foucault-Methode 146
 FPA-Bolometerkameras 220
 Frequenzcodierung 47
 FRS 291

G

Gaseinschluss-Detektion 524
 Gaseous Image Velocimetry 278
 Gaslaser 670
 Gebissabdruck 55
 Gebäudethermografie 215
 Gefühlszustände detektieren 237
 Geodäsie 438
 Geometriemessung 51
 Gesamtstrahlpyrometer 244
 Geschwindigkeitsmessung 419
 Gesenkformen 36
 Gestaltabweichungen 338
 Getriebegehäuse 70
 Gewindebohrervermessung 360
 Gewindeschneidplatte 116
 Gießpfannenüberwachung 227
 GIV 278
 Glasfaser 251
 Glasfaserkabel 655
 Global Phase Doppler 290
 Glühfadenpyrometer 245
 Gläseraufnahmen 654
 Glättung 16
 Glättungstiefe 342
 GPD 290
 Grauwertbild 307
 Großraumpumpe
 – thermografische Untersuchung 223
 Gummibahnen 102
 Gussrohre
 – Geometriekontrolle 17

H

Hautschädigung 607
 HDPIV-Prinzip 277
 Helikopter-Rotorblätter
 – shearografische Inspektion 568
 Helix-Computertomografie 541
 hochpräzise Bauteilen 33
 Hodometer 420

Holografie
 – in-plane 454
 – zur Spannungsmessung 404
 – zur Verformungsmessung 451
 Holografie 159, 311
 Holografie zur Schadensdetektion 576
 Holografische Mikroskopie 579
 Hologramme 312
 Holzfaserverbundwerkstoff 550
 Holzplattenvermessung 192
 Honda Civic 63

I

Illuminated-Lockin-Thermografie 523
 IMI 292
 Implantate 36
 Implantate-Untersuchung 394
 Impulslaufzeitverfahren 194
 Infrarotkameras 215
 Infrarotthermografie 215
 Instandhaltung
 – thermografische Untersuchung 225
 Instrumententafel-Inspektion 530
 Interferometric Mie Imaging 292
 Interferometric Particle Imaging 290
 Interferometrie 172, 673
 – heterodyne 155
 – homodyne 154
 Interferometrische Mehrwellenlängen-Kinemato-
 graphie 293
 Interferoskop 567
 IPI 290
 Isochromaten 381
 Isoklinien 381
 Istoberfläche 338

J

Jagd Waffenvermessung 58
 Jochprofilträger 19

K

Kalibrierung von optischen Systemen
 – Normen 599
 Karossenvermessung 25
 Karosserieteile 25
 Karosserieteilvermessung 65

Kegelrollen 134
 keramischer Kühlkörper 512
 Kerbwirkungsuntersuchung 385
 Kleinstrukturenvermessung 50
 Klimakammer 491
 Kohärenztomografie 111
 Kollisionsanalyse 56
 Konfokalmikroskopie 365
 Konoskopie 159
 Koordinatenmessgeräte
 – Normen 598
 Koordinatenmesstechnik 78
 Kraftmessaufnehmer 316
 Kraftstoffzerstäubung 286
 Kranhakenmodell 383
 Kreisscheibe 385
 Kugellager 387

L

L2F 272
 Lagergehäuse 71
 Lagerringe 135
 Lagetoleranzen 338
 Lamb-Wellen 584
 Laminografie 541
 Langbasisinterferometrie 439
 Laser Doppler Velocimetry 265
 Laser Flow Tagging 278
 Laser Speckle Velocimetry 277
 Laser-2-Fokus Anemometrie 272
 Laser-Doppler-Anemometrie 265
 Laser-Shearografie 561
 Laserdistanzmessung 426
 Laserprofilensoren 103
 Laserraum 616
 Laserscanner 24f.
 Laserscanning
 – terrestrisches 193
 Laserscantechnik 42
 Laserschutz 605
 Laserschutzbeauftragter 611
 Laserschutzbrille 619
 Laserschweißnaht-Inspektion 528
 Laserstrahlung 605
 – Klassifizierung 609
 Lasertechnik 661
 Lasertracer 136
 Lasertriangulation 430
 Laservibrometer 303f.
 Laservibrometrie 303, 582
 LDA 265
 LDV 265
 Lederprobe 527
 Leica Absolute Tracker 141
 Leichtbau 545
 Licht 630
 Lichtschnittsensor 11
 Lichtwellenleiter 655
 Linienrauheit 340
 Linsen 639
 Linsenvermessung 176
 Lockin-Shearografie 558
 Lockin-Thermografie 515, 519
 LSV 277
 Luxusyachten 95
 Längenmessung 419

M

Magnetpulverprüfung
 – Normen 598
 Magnetpulverprüfung 503
 Makyoh-Sensor 188
 Maschinenelemente 388
 Maulschlüssel 385
 Maßanalyse 545
 Mechanik-Inspektion 547
 mechanische Analyse 385
 Medizintechnik 120
 Mehrwellenlänge-Interferometrie 172
 Membranuntersuchung 487
 Messmarker 96
 Messplan 54
 Messtechnik
 – nichtoptische 298
 Messverfahren
 – hybride 202
 Metallband 103
 MetraSCAN 3D 26
 Michelson-Interferometer 106, 423
 – heterodynes 425
 Mikrobohrer 183
 Mikroleckagen 233
 Mikromembran-Untersuchung 579
 Mikropräzisionsfertigung 182
 Mikroskopie 128
 – konfokale 113

Mikrostrukturen 122
 Montagekonsolen 84
 Motor
 – thermografische Untersuchung 226
 Motorenentwicklung 278
 Motorhaube 309
 multisensorische Messsysteme 34
 Mustermatrix 307

N

Nietenprüfung 25, 66
 Normen
 – für Oberflächenrauheit 350
 Normen 591

O

Oberflächenmessgeräte 367
 Oberflächenqualität 186
 Oberflächenrauheit 338, 345
 Oberflächentaster 351
 Oberflächenuntersuchungen 109
 Objektive 650
 Offshore-Windenergieanlagen 78
 Okulare 648
 Ondulationen in GFK 510
 Optik 630
 Optikkomponenten
 – Fertigungsnormen 598f.
 optische Bauelemente 639
 optische Sensoren 25
 OStrV 611

P

Parallaxe 440
 Particle Image Velocimetry 275
 Particle Tracking Velocimetry 281
 PDA 270
 Pelton-Turbine 142
 Pendelanemometer 261
 Pharmaglasmessung 390
 Phasen-Doppler-Anemometrie 270
 Phasenvergleichsmessung 428
 Phasenvergleichsverfahren 194
 Photogrammetrie 75
 – zur Verformungsmessung 488
 PIV 275

PIV-Systeme 277
 Planar Doppler Velocimetry 288
 Planck-Länge 421
 Plancksches Strahlungsgesetz 217
 Polarisation 635
 Polarisatoren 636
 polarisiertes Licht 382
 Polygonisierung 26
 Polygonnetz 16
 PolyWorks 27, 59, 62
 Porenanalyse 546
 Potentiometer 421
 Prismen 644
 Prismeninterferometer 167
 Profillehrenmessung 30
 Prototypenentwicklung 61
 Präzisionsteile 170
 Puls-Akkumulations-Messverfahren 428
 Puls-Shearografie 559
 Puls-Thermografie 520
 Pyrometer 244
 Pyrometrie 243

Q

Qualitätskontrolle für optische Systeme
 – Normen 599
 Qualitätssicherung 63, 83
 Quotientenpyrometer 245

R

Radbewegungen
 – Hochgeschwindigkeitsmessung 322
 Radiointerferometrie 438
 Radioteleskop 439
 Raman-Streuung 251
 Rauheit 120, 133, 181
 Rauheiterfassung 118
 Rauheitskenngrößen 339
 Rauheitsmessung
 – taktile 350
 Rauheitsmessung 134
 Raumfahrt
 – Photogrammetrieanwendung 493
 Rautiefe 341
 Red Bull Technology 31
 Referenzstrahl-Laser-Doppler-Anemometrie 268

Reflektionsarten 13
 Reflexion 634
 Reflexionspolaroskop 393
 Reflexionsprismen 644
 Reflexionsverfahren
 – spannungsoptisches 391
 Rennhelmvermessung 32
 Rennsport 26
 Resonanzfrequenzdetektion 316
 Resonanzfrequenzen 305
 Reststoffdetektion 236
 Restwandstärkeanalyse 546
 Reverse Engineering 26, 44, 93
 Riefentiefe 342
 Rissdetektion 531
 Rochon-Prisma 272
 Rohrleitungs-Detektion 566
 Rohrzange 412
 Rotorblattflansche 95
 Rotorblätterprüfung 320
 Rotverschiebung 442
 Röntgenstrahlung 537

S

Scanarbeiten 22
 Schadensanalyse 56
 Schadensdetektion 501
 Schaftwerkzeuge 181
 Schaltschrank 225
 Schartigkeit 182
 Schattenwurfverfahren 190
 Scheibenbremsuntersuchung 407
 Scherbelastungsanalyse 414
 Schienenfahrzeuge 143
 Schiffbau 90, 572
 Schlackedetektion 235
 Schmalbandpyrometer 245
 Schneidkantenvermessung 116, 191
 Schutzmaßnahmen
 – gegen Laserstrahlung 613
 Schwarzer Strahler 216
 Schweißlinien 36
 Schweißnahtkontrolle 19
 Schwingungen 297
 – mechanische 299
 Schwingungsanalyse
 – bildbasierte 318
 – dynamische 316

Schwingungsmessung 298, 301
 – faseroptische 331
 Segelyacht 572
 Shaker 316
 Shape from Shading 199
 Shearografie
 – zur Spannungsmessung 400
 Shearografie 325, 461, 552
 – dynamisch angeregte 563
 – hydrostatisch angeregte 561
 – induktiv angeregte 561
 Shearografiesensor 563
 Shutter 616
 Sicherheit optischer Systeme
 – Normen 599
 smartSCAN 70
 Solarpaneluntersuchung 490
 Solarspiegel 157
 Solarzellenproduktion 532
 Solarzellenüberprüfung 523
 Spalt-Bündigkeitsmessung 25
 Spaltmaßuntersuchung 67
 Spannstahlvermessung 433
 Spannungsanalyse
 – thermoelastische 396
 Speckle-Pattern-Interferometrie 313
 Specklemuster 554
 Spektralinterferometrie 127
 Sphärische Abweichung 642
 Spiegel 644
 stereoSCAN 68
 Strahlteiler 651
 Strahlungsquellen 219
 StrainScope-Echtzeitpolarimeter 389
 Streifenlaserscanner 41
 Streifenmuster 185
 Streifenprojektion
 – zur Verformungsmessung 484
 Streifenprojektion 44, 363
 Streifenprojektionstechniken 49
 Streulichtmessverfahren 134
 Streulichtsensor 131
 Streulichtverfahren 356
 Stroboskopie 318
 Strömungsuntersuchung 261
 Synchronringpositionierung 433

T

Taktile Messsysteme 3
 Teilchenbasierte Stoß-Visualisierung 291
 Tellerfeder 480
 Temperaturmessung 215
 – faseroptische 249
 Terahertz 506
 Terahertz-Strahlung 507
 Thermoelastische Spannungsanalyse 396
 Thermoforming-Prozesse
 – Steuerung der Temperaturverteilung 232
 Thermografie 215, 514
 – aktive 518
 – passive 517
 Thermografiekamera 220
 Thermografiemesssysteme 220
 Thermografiesystem 516
 THz-Sensor 509
 Tornadolinie 29
 Tracerpartikel 274
 Tragflügel
 – Resonanzfrequenzuntersuchung 329
 Traktorvermessung 20
 Transienten-Shearografie 559
 Transienten-Thermografie 520
 Treibstofftank 395
 Triangulation 45, 51
 Triangulationsprinzip 11, 431
 Triangulationssensor 101
 Triggersystem 316
 Truck-Vermessung 198
 TSA *Siehe* Thermoelastische Spannungsanalyse 396
 TSV 291
 Turbinenlaufrad 68
 Turbinenschaufeln 72
 – endoskopische Untersuchung 567
 Turbinenschaufel-Inspektion 530, 547
 Türschließsystem
 – Digitalisierung 38

U

Ultraschallanemometer 261
 Ultraschallanregung 564
 Ultraschallprüfung 504
 Ultraschallwellen 584
 Ultraschallsensoren 420
 Umformvorgänge
 – Formänderungsanalyse 470

Umkehrprisma 646
 Urmeter 419
 UV-Licht 606
 Übertragungsfunktion 300
 Überwachungsaufgaben 234

V

Ventilator 399
 Verbrennungsprozesse 287
 Verformungsmessung 449
 – dynamische 473
 Verkehrsüberwachung 427
 Vernetzung 12
 Verzerrungsausgleich 308
 Vibrometrie 303
 Videostroboskopie 318
 Vier-Takt-Motoren 71
 Vignettierung 643
 Volumendigitalisierung 544
 Volumenmodell 23

W

Walzenschleifen 134
 Wasserkraftwerke 140, 197
 Weißlichtinterferometer 107
 Weißlichtinterferometrie 106, 357
 Werkstoffprüfung 501
 Werkzeugbau 53, 60
 WheelWatch System 323
 Windenergieanlagen 320
 Windkraftanlagen 95, 526
 Windkrafträder
 – shearografische Untersuchung 570
 Windschutzscheiben
 – Verbau von 24
 Wirbelstromprüfung 504
 Wirbelstromsensoren 420
 Wirbelsäulenuntersuchung 475
 Wollaston-Prisma 646
 Wärmebildtechnik 238
 Wärmebrücken 222
 Wärmeleckagen 222

Z

Zahnraduntersuchung 412
 Zeitmittelungsshearografie 564

Zerspanungsuntersuchungen 239
Zerstäubungsprozesse 285
Zinkdruckgießerei 42
Zoomobjektive 150
Zuginspektion 99

Zustandsüberwachung 229
Zweikamerasysteme 49
Zweistrahl-Laser-Doppler-Anemometrie
267