

# HANSER



## 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

<b>Vorwort .....</b>	V
<b>Die Autoren .....</b>	XXV
<b>Firmen, die mit Praxisbeispielen im Handbuch vertreten sind .....</b>	XXVII
<b>Einleitung .....</b>	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**

<b>1    Einleitung .....</b>	3
1.1    Historischer Rückblick .....	3
1.2    Nichtoptische Messtechnik .....	3
1.3    Übersicht .....	5
<b>2    Lichtschnittverfahren .....</b>	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	Laserscantechnik in einer Zinkdruckgießerei .....	42
<b>3</b>	<b>Streifenprojektion .....</b>	<b>44</b>
3.1	Verfahrensgrundlagen .....	44
3.2	Beschreibung des Streifenprojektionverfahrens .....	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 Codierverfahren .....	48
3.2.7	Vergleich der Codierverfahren .....	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
<b>4</b>	<b>Photogrammetrie .....</b>	<b>75</b>
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
<b>5</b>	<b>Triangulationssensor .....</b>	<b>101</b>
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
<b>6</b>	<b>Weißlichtinterferometrie .....</b>	<b>106</b>
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
<b>7</b>	<b>Optische Kohärenztomografie .....</b>	<b>111</b>
7.1	Verfahrensgrundlagen .....	111
7.2	Messverfahren der optischen Kohärenztomografie .....	111
<b>8</b>	<b>Konfokale Mikroskopie .....</b>	<b>113</b>
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
<b>9 Chromatisch-konfokales Messverfahren .....</b>	<b>125</b>
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
<b>10 Streulichtsensor .....</b>	<b>131</b>
10.1 Verfahrensgrundlagen .....	131
10.2 Messverfahren des Streulichtsensors .....	132
10.3 Anwendungsbeispiele des Streulichtsensors .....	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
<b>11 Lasertracer .....</b>	<b>136</b>
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
<b>12 Autofokussensor .....</b>	<b>145</b>
12.1 Verfahrensgrundlagen .....	145
12.2 Messverfahren des Autofokussensors .....	145
<b>13 Kontrastvergleichsautofokussensor .....</b>	<b>149</b>
13.1 Verfahrensgrundlagen .....	149
13.2 Messverfahren des Kontrastvergleichsautofokussensors .....	149
13.2.1 Telezentrische Zoomobjektive für die Kontrastvergleichsautofokussoren .....	150
13.2.2 Optische Grenzen des Kontrastvergleichsautofokussensors .....	151
<b>14 Interferometrische Abstands- bzw. Entfernungsmeßung .....</b>	<b>153</b>
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

<b>15 Konoskopische Holografie</b>	159
15.1 Verfahrensgrundlagen	159
15.2 Messverfahren der konoskopischen Holografie	160
<b>16 Ellipsometrie</b>	162
16.1 Verfahrensgrundlagen	162
16.2 Messverfahren der Ellipsometrie	163
<b>17 3D-Formprüfinterferometrie</b>	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
<b>18 Mehrwellenlänge-Interferometrie</b>	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
<b>19 Fokus-Variation</b>	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
<b>20 Deflektometrie</b>	184
20.1 Verfahrensgrundlagen	184
20.2 Messverfahren der Deflektometrie	185
20.3 Anwendungsbeispiele der Deflektometrie	186
<b>21 Makyoh-Sensor</b>	188
21.1 Verfahrensgrundlagen	188
21.2 Messverfahren mit Makyoh-Sensor	189
<b>22 Schattenwurfverfahren</b>	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
<b>23</b>	<b>Terrestrisches Laserscanning</b> . . . . .	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
<b>24</b>	<b>Shape from Shading</b> . . . . .	199
24.1	Verfahrensgrundlagen . . . . .	199
24.2	Messverfahren Shape from Shading . . . . .	200
<b>25</b>	<b>Hybride Messverfahren</b> . . . . .	202
25.1	Verfahrensgrundlagen . . . . .	202
25.2	Beschreibung der hybriden Messverfahren . . . . .	203
25.3	Anwendungsbeispiele der hybriden Messverfahren . . . . .	205
<b>26</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil I</b> . . . . .	207

## TEIL II

### Temperaturerfassung

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> . . . . .	211
1.1	Historischer Rückblick . . . . .	211
1.2	Nichtoptische Messtechnik . . . . .	212
1.3	Grundbegriffe . . . . .	212
1.4	Übersicht . . . . .	213
<b>2</b>	<b>Thermografie</b> . . . . .	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
<b>3 Pyrometrie .....</b>	<b>243</b>
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
<b>4 Faseroptische Temperurmessung .....</b>	<b>249</b>
4.1 Verfahrensgrundlagen .....	249
4.2 Messverfahren der faseroptischen Temperurmessung .....	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 Temperurmessung mit Faser-Bragg-Gittern .....	253
4.2.4 Kombination aus faseroptischer und pyrometrischer Temperurmessung .....	254
4.2.5 Thermochrome faseroptische Temperurmessung .....	255
4.2.6 Weitere faseroptische Messprinzipien .....	256
<b>5 Literaturverzeichnis zu Teil II .....</b>	<b>257</b>
<b>TEIL III</b>	
<b>Strömungsuntersuchung</b>	
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>261</b>
1.1 Historischer Rückblick .....	261
1.2 Nichtoptische Messtechnik .....	262

1.3	Übersicht	263
1.4	Dopplereffekt	263
<b>2</b>	<b>Laser-Doppler-Anemometrie (LDA/LDV)</b>	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
<b>3</b>	<b>Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA)</b>	270
3.1	Verfahrensgrundlagen	270
3.2	Messverfahren der PDA	270
<b>4</b>	<b>Laser-2-Fokus Anemometrie (L2F)</b>	272
4.1	Verfahrensgrundlagen	272
4.2	Messverfahren der L2F	272
<b>5</b>	<b>Particle Image Velocimetry (PIV)</b>	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
<b>6</b>	<b>Particle Tracking Velocimetry (PTV)</b>	281
6.1	Verfahrensgrundlagen	281
6.2	Messverfahren der Particle Tracking Velocimetry	281
<b>7</b>	<b>Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)</b>	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
<b>8</b>	<b>Doppler Global Velocimetry (DGV)</b>	288
8.1	Verfahrensgrundlagen	288
8.2	Messverfahren der Doppler Global Velocimetry	288
<b>9</b>	<b>Sonstige Verfahren zur Untersuchung von Fluidströmungen</b>	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
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil III</b> .....	294

**TEIL IV****Optische Untersuchung mechanischer Schwingungen und Bewegungsanalyse**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	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
<b>2</b>	<b>Laservibrometrie</b> .....	303
2.1	Verfahrensgrundlagen .....	303
2.2	Messverfahren der Vibrometrie .....	304
<b>3</b>	<b>Bildkorrelation</b> .....	305
3.1	Verfahrensgrundlagen .....	305
3.2	Messverfahren der Bildkorrelation .....	306
3.3	Anwendungsbeispiele für die Bildkorrelation zur Schwingungsmessung .....	309
<b>4</b>	<b>Holografie zur Schwingungsmessung</b> .....	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
<b>5</b>	<b>Bildbasierte Schwingungsanalyse und Videostroboskopie</b> .....	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

<b>6 Shearografie zur Schwingungsmessung .....</b>	325
6.1 Verfahrensgrundlagen .....	325
6.2 Verfahren der Shearografischen Schwingungsmessung .....	326
6.3 Anwendungsbeispiel der Shearografischen Schwingungsanalyse .....	328
<b>7 Faseroptische Schwingungsmessung .....</b>	331
7.1 Verfahrensgrundlagen .....	331
7.2 Verfahren der faseroptischen Schwingungsmessung .....	332
<b>8 Literaturverzeichnis zu Teil IV .....</b>	333

## TEIL V

### Oberflächenanalyse

<b>1 Einleitung .....</b>	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
<b>2 Optische Verfahren vs. taktile Verfahren .....</b>	353
2.1 Messbereich/Messgenauigkeit der optischen Verfahren .....	354
2.2 Typische Anwendungen der Verfahren .....	354
2.3 Übersicht der optischen Verfahren .....	354
<b>3 Streulichtverfahren zur Oberflächenanalyse .....</b>	356
<b>4 Weißlichtinterferometrie zur Oberflächenanalyse .....</b>	357
<b>5 Fokusvariation zur Oberflächenanalyse .....</b>	359
<b>6 Streifenprojektion zur Oberflächenanalyse .....</b>	363
<b>7 Konfokalmikroskopie zur Oberflächenanalyse .....</b>	365
<b>8 Literaturverzeichnis zu Teil V .....</b>	369

**TEIL VI****Messen von mechanischen Spannungen**

<b>1 Einleitung .....</b>	373
1.1 Historischer Rückblick .....	373
1.2 Nichtoptische Messtechnik .....	373
1.3 Mechanische Grundlagen der Spannungen .....	374
1.4 Übersicht .....	376
<b>2 Spannungsoptisches Durchlichtverfahren (klassische Spannungsoptik) .....</b>	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
<b>3 Spannungsoptisches Reflexionsverfahren .....</b>	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
<b>4 Thermoelastische Spannungsanalyse (TSA) .....</b>	396
4.1 Verfahrensgrundlagen .....	396
4.2 Funktionsweise der TSA .....	397
4.3 Anwendungsbeispiel der TSA .....	398
<b>5 Shearografie zur Messung von Spannungen .....</b>	400
5.1 Verfahrensgrundlagen .....	400
5.2 Funktionsweise der Shearografie zur Spannungsmessung .....	401
<b>6 Holografie zur Messung von Spannungen .....</b>	404
6.1 Verfahrensgrundlagen .....	404
6.2 Funktionsweise der holografischen Spannungsmessung .....	405
6.3 Anwendungsbeispiel Scheibenbremsuntersuchung zur holografischen Spannungsmessung .....	407

<b>7 Bildkorrelation zur Messung von Spannungen .....</b>	409
7.1 Verfahrensgrundlagen .....	409
7.2 Funktionsweise der Bildkorrelation zur Spannungsmessung .....	410
7.3 Anwendungsbeispiele der Bildkorrelation .....	412
7.3.1 Untersuchung eines Zahnrad .....	412
7.3.2 Untersuchung einer Rohrzange .....	412
7.3.3 Untersuchung von zugbelasteten Rundproben .....	413
7.3.4 Untersuchung von scherbelasteten Proben .....	414
7.3.5 Untersuchung von Rissen .....	414
<b>8 Literaturverzeichnis zu Teil VI .....</b>	416

## **TEIL VII**

### **Abstands- und Geschwindigkeitsmessung**

<b>1 Einleitung .....</b>	419
1.1 Historischer Rückblick .....	419
1.2 Nichtoptische Messtechnik .....	419
1.3 Grundbegriffe .....	421
1.4 Übersicht .....	421
<b>2 Interferometrische Abstands- und Geschwindigkeitsmessung .....</b>	423
2.1 Verfahrensgrundlagen .....	423
2.2 Das Messverfahren zur interferometrischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung .....	424
<b>3 Laserdistanzmessung .....</b>	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
<b>4 Lasertriangulation .....</b>	430
4.1 Verfahrensgrundlagen .....	430
4.2 Das Messverfahren zur Lasertriangulation .....	431
4.3 Anwendungsbeispiele der Lasertriangulation .....	433
4.3.1 Vermessung von Spannstahl .....	433
4.3.2 Automatische Positionierung von Synchronringen .....	433
<b>5 Konfokale und chromatisch-konfokale Abstandsmessung .....</b>	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
<b>6 Radiointerferometrie .....</b>	<b>438</b>
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
<b>7 Literaturverzeichnis zu Teil VII .....</b>	<b>444</b>

## TEIL VIII Verformungsmessung

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>447</b>
1.1 Historischer Rückblick .....	447
1.2 Nichtoptische Messtechnik .....	448
1.3 Übersicht .....	449
<b>2 Holografie zur Verformungsmessung .....</b>	<b>451</b>
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
<b>3 Shearografie zur Verformungsmessung .....</b>	<b>461</b>
3.1 Verfahrensgrundlagen .....	461
3.2 Das Messverfahren Shearografie .....	462
<b>4 Bildkorrelation zur Verformungsmessung .....</b>	<b>467</b>
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

<b>5 Streifenprojektion zur Verformungsmessung</b> .....	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
<b>6 Photogrammetrie zur Verformungsmessung</b> .....	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
<b>7 Literaturverzeichnis zu Teil VIII</b> .....	497

## **TEIL IX**

### **Dektection von Schäden**

<b>1 Einleitung</b> .....	501
1.1 Historischer Rückblick .....	501
1.2 Nichtoptische Messtechnik .....	502
1.3 Übersicht optischer Messverfahren .....	505
<b>2 Terahertz</b> .....	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
<b>3 Thermografie</b> .....	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
<b>4</b>	<b>Computertomografie .....</b>	<b>535</b>
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 Fügenähnen an Faserverbundbauteilen ..	549
<b>5</b>	<b>Shearografie zur Detektion von Schäden .....</b>	<b>552</b>
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
<b>6</b>	<b>Holografie zur Detektion von Schäden .....</b>	<b>576</b>
6.1	Verfahrensgrundlagen .....	576
6.2	Verfahren der holografischen Detektion von Schäden .....	577
6.3	Anwendungsbeispiel der Holografie zur Detektion von Fehlstellen .....	580

<b>7</b>	<b>Laservibrometrie zur Detektion von Schäden</b>	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
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil IX</b>	587
<b>TEIL X</b>		
<b>Normen in der optischen Messtechnik</b>		
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	591
1.1	Historie, Rückblick im Bereich Normung	591
1.2	Qualitätsmanagement, Normenbezug auf die Qualität von Produkten	592
<b>2</b>	<b>Basiswissen Normung</b>	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
<b>3</b>	<b>Übersicht von Normen in der Messtechnik, optischen Messtechnik</b>	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
<b>4</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil X</b>	601

## **TEIL XI**

### **Laserschutz**

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

## **TEIL XII**

### **Optische Komponenten und Grundlagen**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	629
<b>2</b>	<b>Licht und Optik</b>	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
<b>3</b>	<b>Optische Bauelemente</b>	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	Fassungarten .....	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
<b>4</b>	<b>Lasertechnik .....</b>	<b>661</b>
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
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Interferometrie .....</b>	<b>673</b>
<b>6</b>	<b>Allgemeines zu flächendeckenden Prüf- und Messverfahren, Einführung .....</b>	<b>675</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil XII .....</b>	<b>677</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>679</b>	

# 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 Krebsgehwüren, 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 Weltalls (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 Handbuchs beigetragen haben.

Trier, den 24.07.2017

*Wassili Buerakov*

*Michael Schuth*

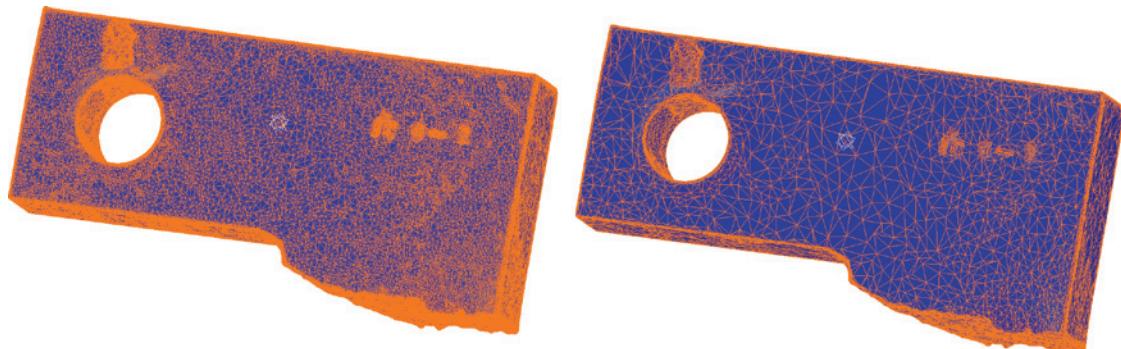
PS:

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 Punktewolke 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 Flächenherstellung 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 Punktewolke 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.

### 2.7.1 Geometriekontrolle von Gussrohren

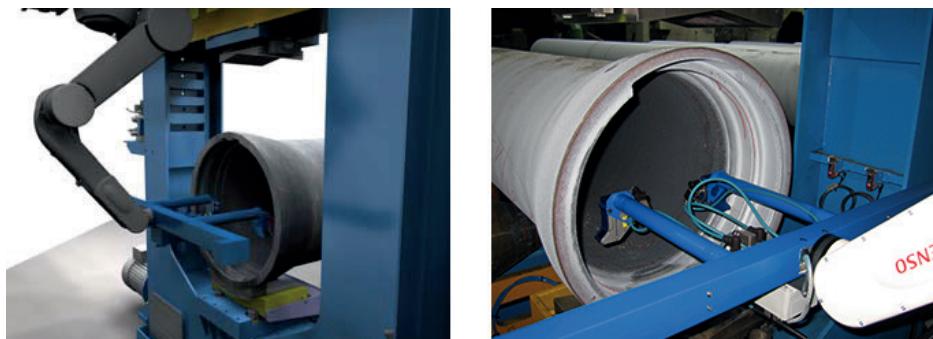
Um die Ovalität und die Flansch-Geometrie an Gussrohren zu prüfen, hat zum Beispiel die Firma MEL eine Systemlösung mit M2-iLAN-Laserscannern realisiert. Das System ist in der Lage, eine Genauigkeit von 0,1 mm zu sichern. Große Bedeutung hat dabei das flexible Ethernet-Kabel, das durch den Roboterarm 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 Bie gepresse gefahren. Diese dient gleichzeitig als Messplatz. Die Messeinrichtung besteht aus einem Lineartisch mit Präzisionsantrieb, der die Abstände der beiden Scanner zueinander je nach

## 2.7 Anwendungsbeispiele für das Lichtschnittverfahren

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

**Bild 2.15**

Biegepresse mit dem roboter geführten Lasermesssystem.  
Der Messaufbau wird von einem Roboterarm in das zu vermessende 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).

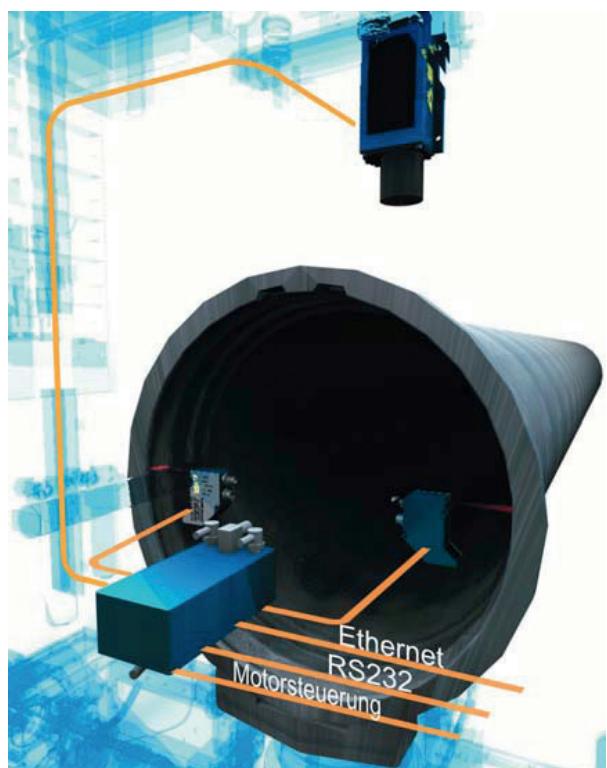
Der Rohrdurchmesser wird vor dem Einfahren der Messvorrichtung in das Rohr mit einem M10L-Lasersensor bestimmt. So können der Rohrinnendurchmesser sowie der geometrische Mittelpunkt des Rohres bestimmt werden. Beim Messvorgang wird der Lineartisch um 180° gedreht. Die beiden Scanner erfassen während 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 orchestriert<sup>3</sup> 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 gewonnenen 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)

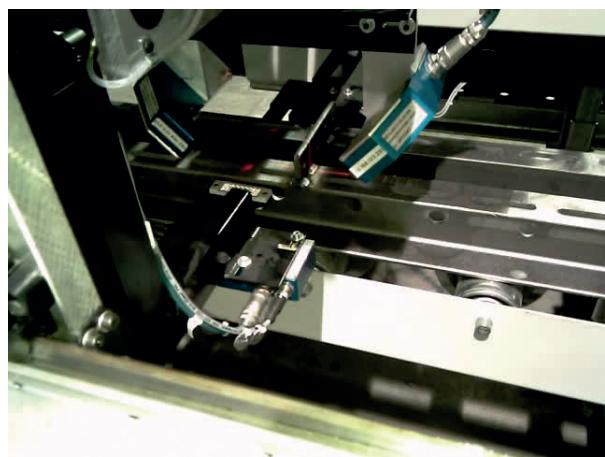
3 instrumentiert

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.

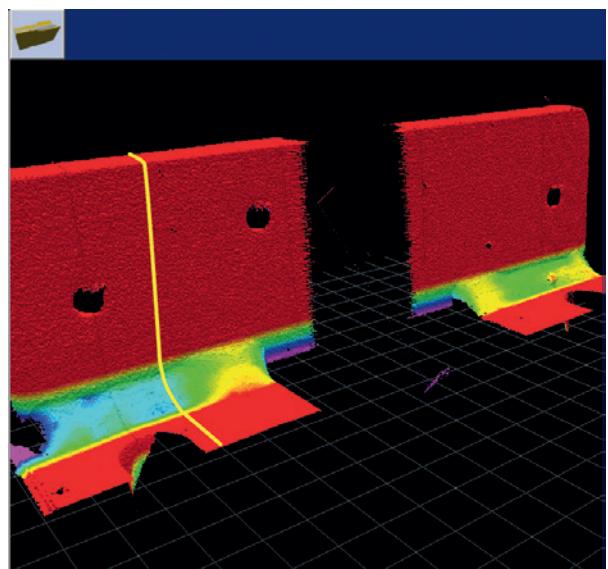


**Bild 2.17** Schweißnahtkontrolle mit dem M2-iLAN-Laserscanner der MEL (mit freundlicher Genehmigung der MEL GmbH)

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 Positions値 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 Prüfvorgangs 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 Framegrabbern auf und können ohne signifikante Netzwerkbelaistung 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

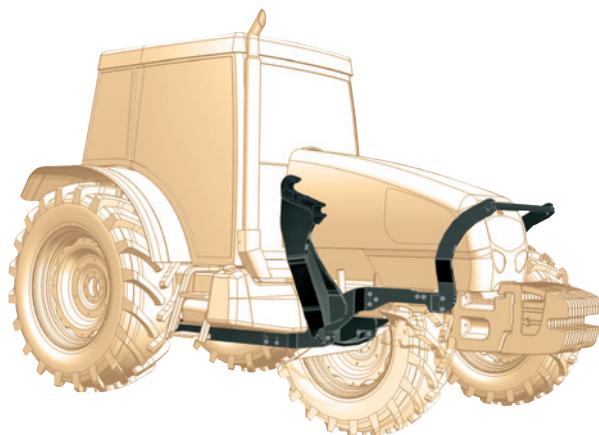
Im Herbst 2012 erwarb MX ein Scan- und Abtastsystem bestehend aus dem tragbaren Koordinatenmessgerät HandyPROBE, dem optischen 3D-Scanner MetraSCAN 3D, dem DualKamera-Sensor C-Track 780 und der Nachbearbeitungssoftware Geomagic Solutions von 3D Systems. Seither nutzt MX die Technologien von Creaform 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 Riemscheibe). 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 Geschäftsluftfahrt, 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 Ingenieu-

ren, 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 Flugzeugbetreiber, 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-



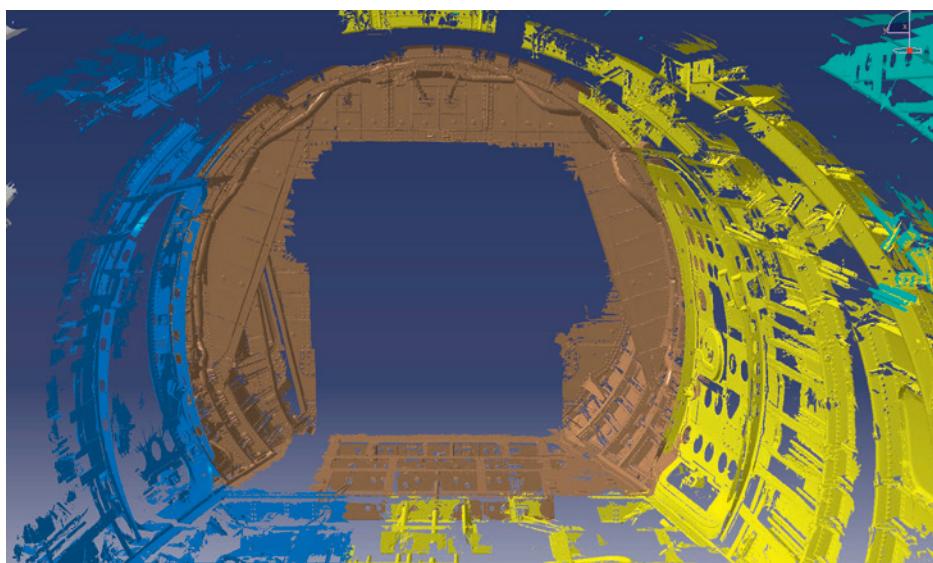
**Bild 2.21**  
Scanarbeiten in einem Flugzeuginnenraum (mit freundlicher Genehmigung von Creaform)

dySCAN-3D-Scannern, einem Leica-Long-Range-Scanner, dem optischen 3D-Laserscanner MetraSCAN 3D mit C-Track und einem System für Fotogrammetrieaufnahmen (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.

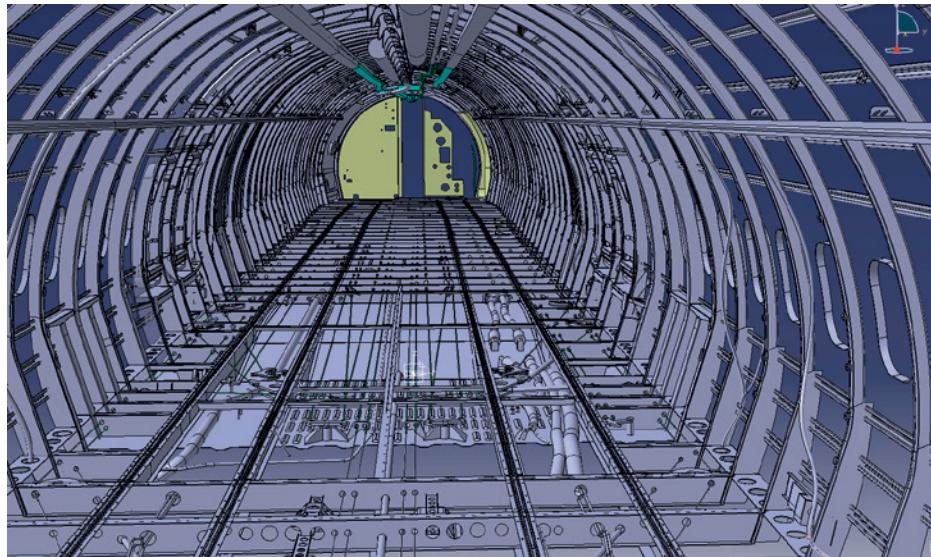
### Datenverarbeitung und Konstruktion eines 3D-Scanners

Mit der Software CATIA V5 rekonstruierten die Designer den Innenraum des Flugzeugs, einschließlich der verschiedenen Flugzeugelemente wie Decken- sowie Bodenspannen 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 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, Vibratoren, 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-

schüttungen und hohen Temperaturschwankungen standhalten können. Dafür entscheidend ist ein einwandfreier Kleberaupeauftrag auf den Scheibenrand, bevor die Scheiben durch Roboter im automatisierten Verbauprozess in die Karosserie eingesetzt werden. Hierzu überprüft ein Laserscanner die Höhe der Kleberaupe 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 Kleberaupe 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



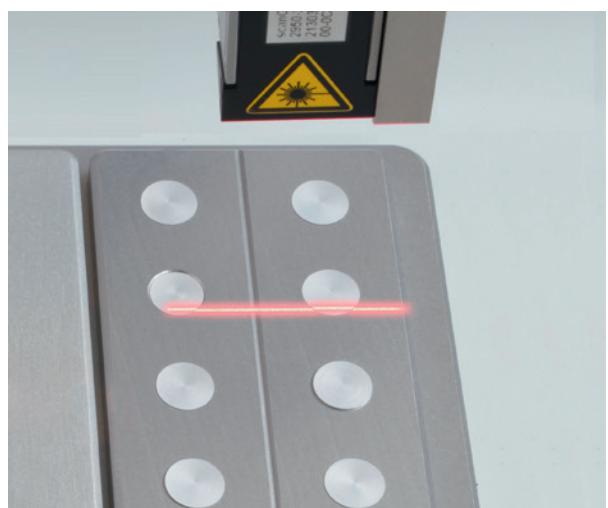
**Bild 2.26** Optische Sensoren prüfen die Autokarosserie nach dem Verbauprozess (mit freundlicher Genehmigung von Mikro-Epsilon Messtechnik GmbH)

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 Nietverbindungen 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 Karosse 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 einzige 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.

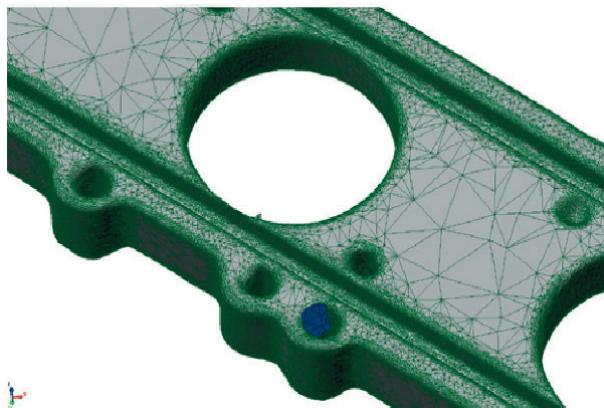
Einige Teile des Motors sind Gussteile aus Magnesium. Bei einem Unfall oder Feuer würden diese Teile wahrscheinlich zerstört. Die Aufgabenstellung: Von fünf Teilen, darunter eine Ansaugbrücke und ein Flachschiebergehäuse, soll die Rücker Testing Services GmbH CAD-Modelle erstellen, die man bei Bedarf 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 Punktfolke.

Durch Polygonisierung erstellt PolyWorks aus der Punktfolke 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 Dreieckflächen 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



**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).

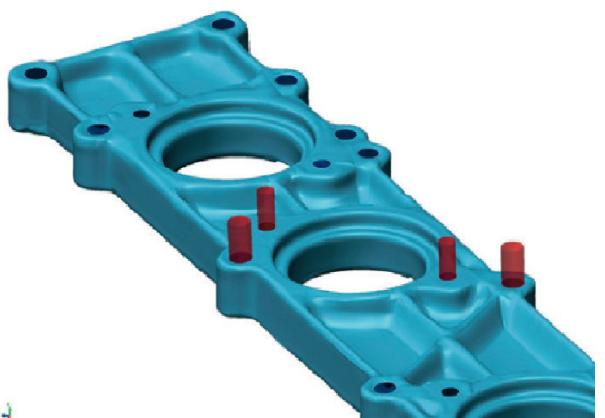
Für die Analyse der NURBS-Flächen stehen in PolyWorks verschiedene Tools und Visualisierungen zur Verfügung. Fitting-Fehler, Abweichungen gegenüber



**Bild 2.32** Falschfarbendarstellung erleichtert die Beurteilung der NURBS-Flächen (oben), unten: Das Zebramuster 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 Bohrlöchern, die mit optischen Scans nicht zu 100 % erfasst werden, lassen sich taktil 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

## Symbolen

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

Abbildungfehler 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  
Autofokusensor 145  
- mit Kontrastvergleich 149  
Autokarosse 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  
Codierverfahren 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-Kinematographie 293  
 Interferoskop 567  
 IPI 290  
 Isochromaten 381  
 Isoklinen 381  
 Istoberfläche 338

**J**

Jagdwaffenvermessung 58  
 Jochprofilträger 19

**K**

Kalibrierung von optischen Systemen  
 - Normen 599  
 Karosserienvermessung 25  
 Karosserieteile 25  
 Karosserieteilevermessung 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  
Laserprofilsensoren 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  
– heterodyn 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  
 Polygontz 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  
Reflexionspolariskop 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  
Schlackendetektion 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
- Ultraschalsensoren 420
- Umformvorgänge
  - Formänderungsanalyse 470

**U**

- 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