

# Handbuch Optische Messtechnik

Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung

Bearbeitet von  
Von: Michael Schuth, und Wassili Buerakov

1. Auflage 2017. Buch. 736 S. Gebunden  
ISBN 978 3 446 43634 3  
Format (B x L): 20.8 x 27.6 cm  
Gewicht: 2107 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Technische Instrumentierung > Mess- und Automatisierungstechnik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

The logo for beck-shop.de features the text 'beck-shop.de' in a bold, red, sans-serif font. Above the 'i' in 'shop' are three red dots of varying sizes, arranged in a slight arc. Below the main text, the words 'DIE FACHBUCHHANDLUNG' are written in a smaller, red, all-caps, sans-serif font.

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



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 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 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</b>	<b>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</b>	<b>Streulichtsensor</b> .....	<b>131</b>
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
<b>11</b>	<b>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</b>	<b>Autofokussensor</b> .....	<b>145</b>
12.1	Verfahrensgrundlagen .....	145
12.2	Messverfahren des Autofokussensors .....	145
<b>13</b>	<b>Kontrastvergleichsautofokussensor</b> .....	<b>149</b>
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
<b>14</b>	<b>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</b>	<b>Konoskopische Holografie</b> .....	159
15.1	Verfahrensgrundlagen .....	159
15.2	Messverfahren der konoskopischen Holografie .....	160
<b>16</b>	<b>Ellipsometrie</b> .....	162
16.1	Verfahrensgrundlagen .....	162
16.2	Messverfahren der Ellipsometrie .....	163
<b>17</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>Deflektometrie</b> .....	184
20.1	Verfahrensgrundlagen .....	184
20.2	Messverfahren der Deflektometrie .....	185
20.3	Anwendungsbeispiele der Deflektometrie .....	186
<b>21</b>	<b>Makyoh-Sensor</b> .....	188
21.1	Verfahrensgrundlagen .....	188
21.2	Messverfahren mit Makyoh-Sensor .....	189
<b>22</b>	<b>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> .....	<b>193</b>
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> .....	<b>199</b>
24.1	Verfahrensgrundlagen .....	199
24.2	Messverfahren Shape from Shading .....	200
<b>25</b>	<b>Hybride Messverfahren</b> .....	<b>202</b>
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> .....	<b>207</b>
<b>TEIL II</b>		
<b>Temperaturerfassung</b>		
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>211</b>
1.1	Historischer Rückblick .....	211
1.2	Nichtoptische Messtechnik .....	212
1.3	Grundbegriffe .....	212
1.4	Übersicht .....	213
<b>2</b>	<b>Thermografie</b> .....	<b>215</b>
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</b>	<b>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</b>	<b>Faseroptische Temperaturmessung</b> .....	<b>249</b>
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
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil II</b> .....	<b>257</b>
<b>TEIL III</b>		
<b>Strömungsuntersuchung</b>		
<b>1</b>	<b>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> .....	<b>265</b>
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> .....	<b>270</b>
3.1	Verfahrensgrundlagen .....	270
3.2	Messverfahren der PDA .....	270
<b>4</b>	<b>Laser-2-Fokus Anemometrie (L2F)</b> .....	<b>272</b>
4.1	Verfahrensgrundlagen .....	272
4.2	Messverfahren der L2F .....	272
<b>5</b>	<b>Particle Image Velocimetry (PIV)</b> .....	<b>275</b>
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> .....	<b>281</b>
6.1	Verfahrensgrundlagen .....	281
6.2	Messverfahren der Particle Tracking Velocimetry .....	281
<b>7</b>	<b>Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)</b> .....	<b>284</b>
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> .....	<b>288</b>
8.1	Verfahrensgrundlagen .....	288
8.2	Messverfahren der Doppler Global Velocimetry .....	288
<b>9</b>	<b>Sonstige Verfahren zur Untersuchung von Fluidströmungen</b> .....	<b>290</b>
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> .....	<b>294</b>
<b>TEIL IV</b>		
<b>Optische Untersuchung mechanischer Schwingungen und Bewegungsanalyse</b>		
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>297</b>
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> .....	<b>303</b>
2.1	Verfahrensgrundlagen .....	303
2.2	Messverfahren der Vibrometrie .....	304
<b>3</b>	<b>Bildkorrelation</b> .....	<b>305</b>
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> .....	<b>311</b>
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> .....	<b>318</b>
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</b>	<b>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</b>	<b>Faseroptische Schwingungsmessung</b> .....	331
7.1	Verfahrensgrundlagen .....	331
7.2	Verfahren der faseroptischen Schwingungsmessung .....	332
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil IV</b> .....	333
<b>TEIL V</b>		
<b>Oberflächenanalyse</b>		
<b>1</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>Streulichtverfahren zur Oberflächenanalyse</b> .....	356
<b>4</b>	<b>Weißlichtinterferometrie zur Oberflächenanalyse</b> .....	357
<b>5</b>	<b>Fokusvariation zur Oberflächenanalyse</b> .....	359
<b>6</b>	<b>Streifenprojektion zur Oberflächenanalyse</b> .....	363
<b>7</b>	<b>Konfokalmikroskopie zur Oberflächenanalyse</b> .....	365
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil V</b> .....	369

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

<b>1</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>Thermoelastische Spannungsanalyse (TSA)</b> .....	396
4.1	Verfahrensgrundlagen .....	396
4.2	Funktionsweise der TSA .....	397
4.3	Anwendungsbeispiel der TSA .....	398
<b>5</b>	<b>Shearografie zur Messung von Spannungen</b> .....	400
5.1	Verfahrensgrundlagen .....	400
5.2	Funktionsweise der Shearografie zur Spannungsmessung .....	401
<b>6</b>	<b>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</b>	<b>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 Zahnrads .....	412
7.3.2	Untersuchung einer Rohrzange .....	412
7.3.3	Untersuchung von zugbelasteten Rundproben .....	413
7.3.4	Untersuchung von scherbelastrerten Proben .....	414
7.3.5	Untersuchung von Rissen .....	414
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil VI</b> .....	416
<b>TEIL VII</b>		
<b>Abstands- und Geschwindigkeitsmessung</b>		
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	419
1.1	Historischer Ruckblick .....	419
1.2	Nichtoptische Messtechnik .....	419
1.3	Grundbegriffe .....	421
1.4	Übersicht .....	421
<b>2</b>	<b>Interferometrische Abstands- und Geschwindigkeitsmessung</b> .....	423
2.1	Verfahrensgrundlagen .....	423
2.2	Das Messverfahren zur interferometrischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung .....	424
<b>3</b>	<b>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</b>	<b>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 Spannstaht .....	433
4.3.2	Automatische Positionierung von Synchronringen .....	433
<b>5</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil VII</b> .....	<b>444</b>
<b>TEIL VIII</b>		
<b>Verformungsmessung</b>		
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>447</b>
1.1	Historischer Rückblick .....	447
1.2	Nichtoptische Messtechnik .....	448
1.3	Übersicht .....	449
<b>2</b>	<b>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</b>	<b>Shearografie zur Verformungsmessung</b> .....	<b>461</b>
3.1	Verfahrensgrundlagen .....	461
3.2	Das Messverfahren Shearografie .....	462
<b>4</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>Literaturverzeichnis zu Teil VIII</b>	497
<b>TEIL IX</b>		
<b>Detektion von Schäden</b>		
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	501
1.1	Historischer Rückblick	501
1.2	Nichtoptische Messtechnik	502
1.3	Übersicht optischer Messverfahren	505
<b>2</b>	<b>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</b>	<b>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 Fügenähten 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	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
<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 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 Weltraums (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*

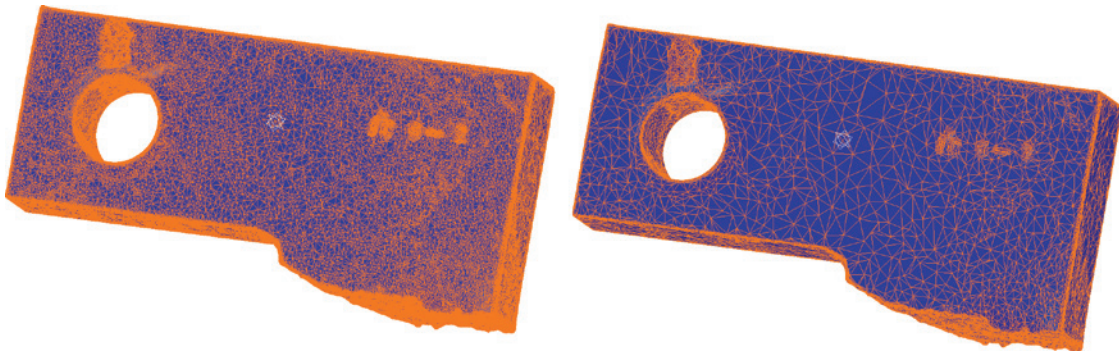
### **PS:**

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](mailto: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 Netz-simplifizierung nicht empfehlenswert, da die Genauigkeit vermindert wird.

## **2.7 Anwendungsbeispiele für das Lichtschnittverfahren**

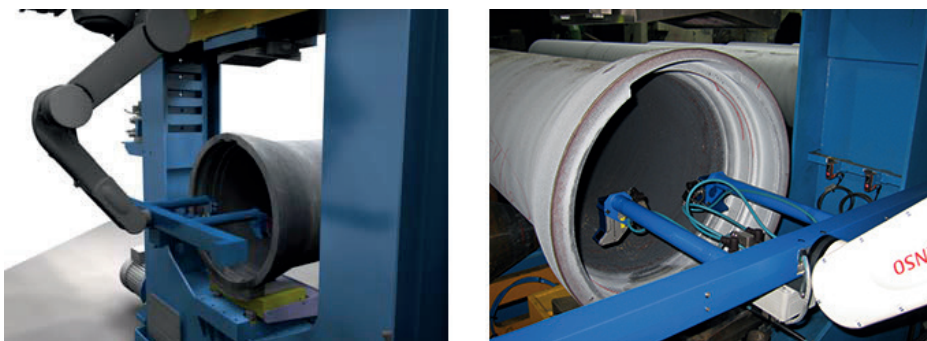
Im Folgenden werden einige industrielle Anwendungsbeispiele vorgestellt. Es geht dabei um beispielsweise Geometrie- und Schweißnahtkontrolle in laufender Produktion.

### **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 robotergeführten 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).

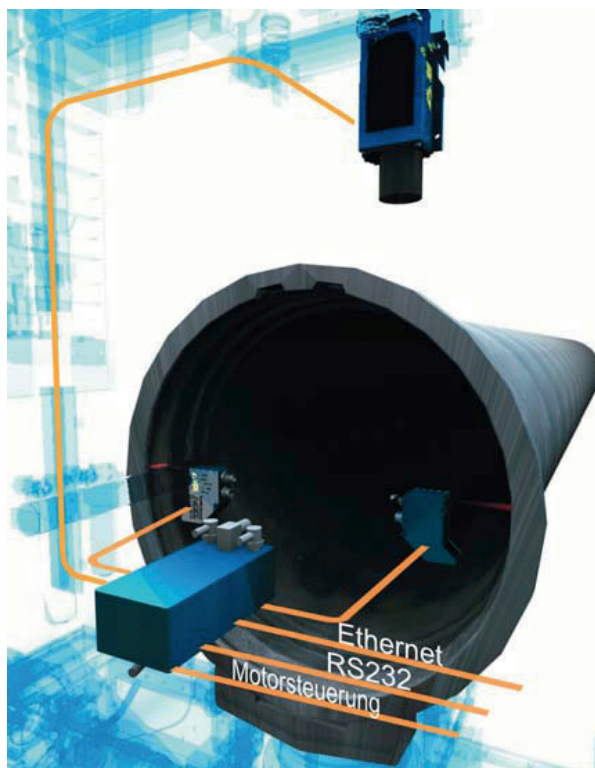
Der Rohrdurchmesser wird vor dem Einfahren der Messvorrichtung in das Rohr mit einem M10L-Lasersensor bestimmt. So können der Rohrrinnendurchmesser sowie der geometrische Mittelpunkt des Rohres bestimmt werden. Beim Messvorgang wird der Lineartisch um 180° gedreht. Die beiden Scanner erfassen während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

<sup>3</sup> instrumentiert

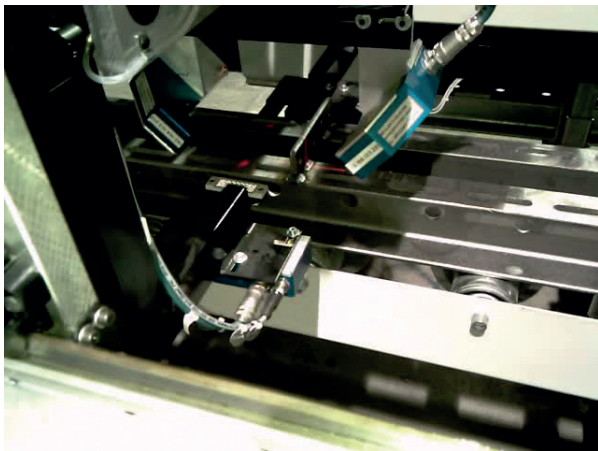


zug zur Art der Verformung der Rohre gezogen werden. Der Fertigungsprozess kann so schon bei der Mischung des Gussmaterials hinsichtlich der Fertigungsqualität optimiert werden.

### 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 gewährleisten, 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.

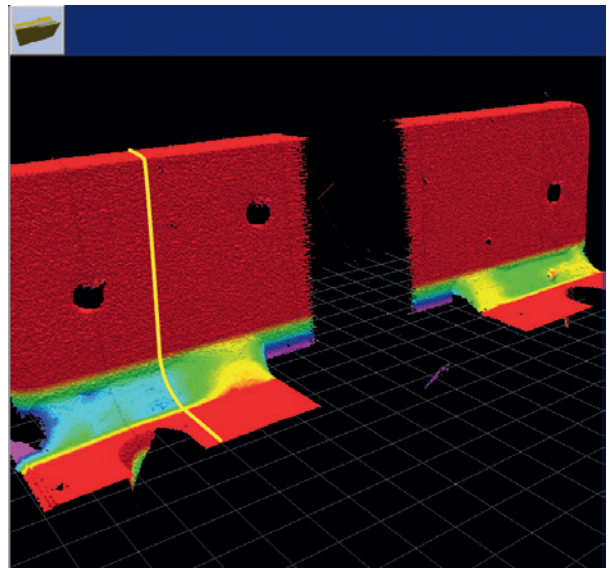


**Bild 2.17** Schweißnahtkontrolle mit dem M2-iLAN-Laserscanner der MEL (mit freundlicher Genehmigung der MEL GmbH)

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 Framegrabbern 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

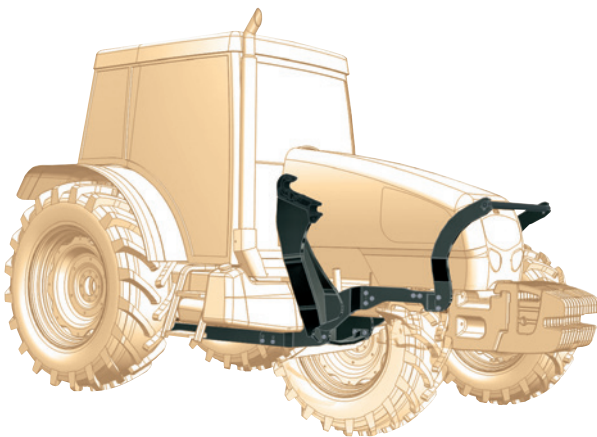
Im Herbst 2012 erwarb MX ein Scan- und Abtastsystem bestehend aus dem tragbaren Koordinatenmessgerät HandyPROBE, dem optischen 3D-Scanner MetraSCAN 3D, dem DualKamera-Sensor C-Track 780 und der Nachbearbeitungssoftware Geomagic Solutions von 3D Systems. Seither nutzt MX die Technologien von Creaform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



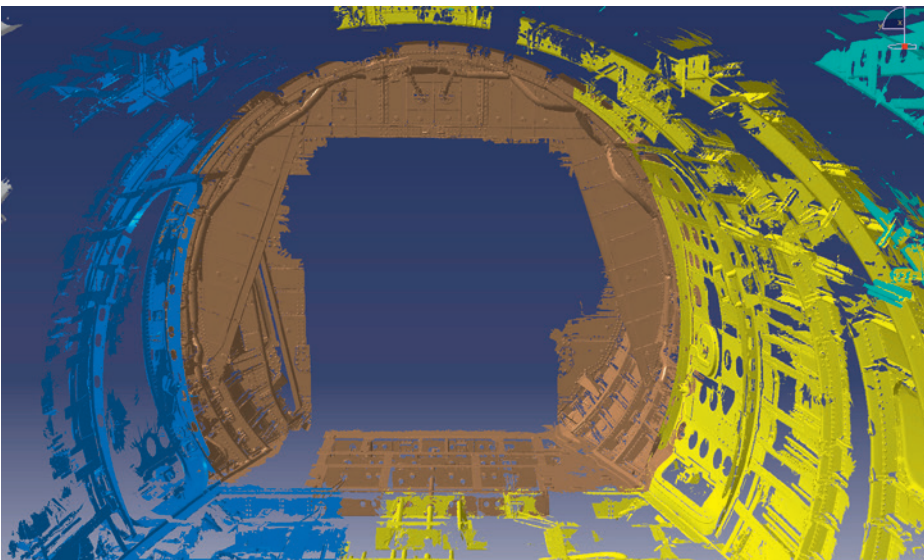
**Bild 2.21**  
Scanarbeiten in einem  
Flugzeuginnenraum (mit  
freundlicher Genehmigung von  
Creaform)

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.

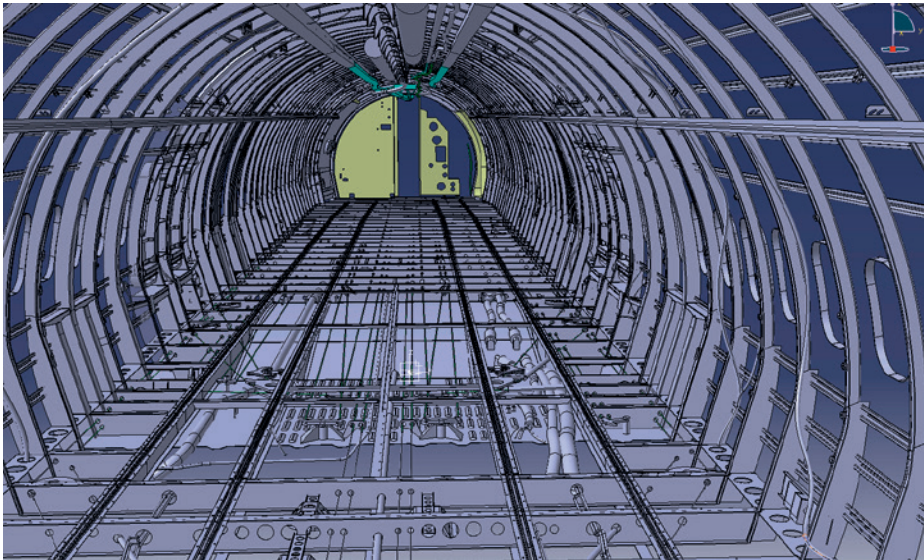
### Datenverarbeitung und Konstruktion eines 3D-Scanners

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



**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



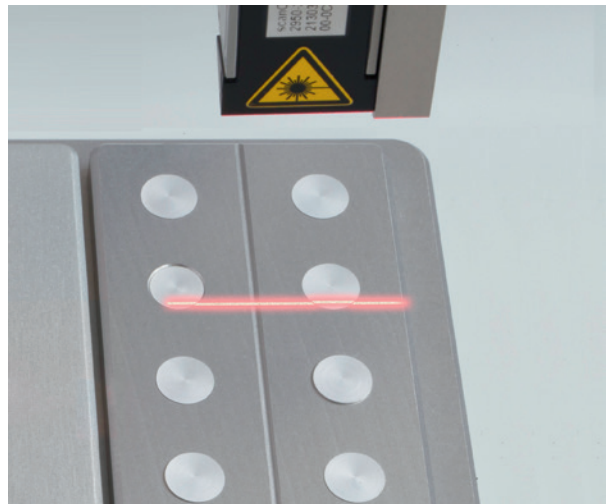
**Bild 2.26** Optische Sensoren prüfen die Autokarosserie nach dem Verbauprozess (mit freundlicher Genehmigung von Mikro-Epsilon Messtechnik GmbH)

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 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 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.

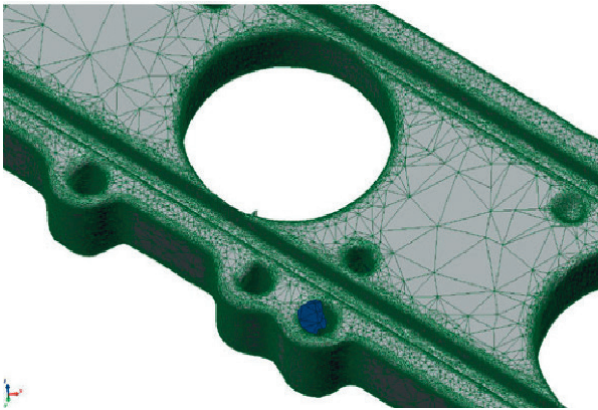
#### Vom Punkt zum Dreieck

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 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

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).

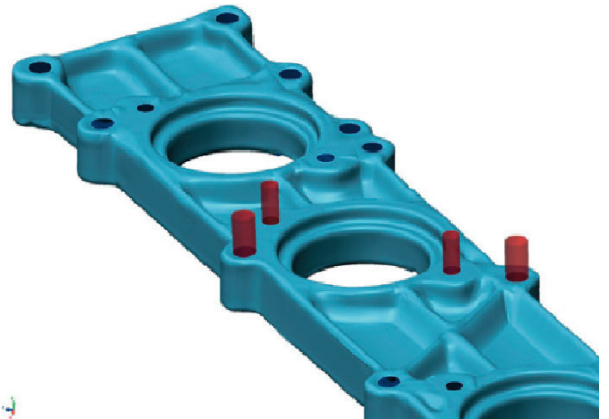
Für die Analyse der NURBS-Flächen stehen in PolyWorks verschiedene Tools und Visualisierungen zur Verfügung. Fitting-Fehler, Abweichungen gegenüber



**Bild 2.32** Falschfarbendarstellung erleichtert die Beurteilung der NURBS-Flächen (oben), unten: Das Zebra-Muster zeigt Stetigkeitsbedingungen an, ein gleichmäßiges Muster bedeutet Krümmungstetigkeit 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 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  
Autokarosserien 311  
Automobilbau 303

## B

Banddickenmessung 104  
Bandstrahlungsyprometer 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  
Bremsattelverformung 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 *ITM* 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  
 Isoklinien 381  
 Istoberfläche 338

## J

Jagdwaffenvermessung 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