

# Optische Meßtechnik an technischen Oberflächen

Praxisorientierte lasergestützte Verfahren  
zur Untersuchung technischer Objekte  
hinsichtlich Form, Oberflächenstruktur und Beschichtung

Prof. Dr.-Ing. Alexander W. Koch

Dipl.-Phys. Michael Ruprecht  
Dipl.-Ing. Olaf Toedter

Prof. Dr. Gerd Häusler  
Dipl.-Ing. Stefan Blossey  
Dipl.-Phys. Harald Schoenfeld  
Dipl.-Phys. Veit Windbichler

Mit 167 Bildern, 4 Tabellen und 418 Literaturstellen

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .  | 1         |
| 1.2      | Eigenschaften optischer Meßverfahren . . . . .                            | 2         |
| 1.3      | Definition einer technischen Oberfläche . . . . .                         | 4         |
| 1.4      | Definition der Meßaufgabe . . . . .                                       | 5         |
| 1.5      | Prinzipaufbau eines optischen Meßsystems . . . . .                        | 7         |
| 1.6      | Relevanz für Praxis und Lehre . . . . .                                   | 7         |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen der Lasermesstechnik</b>                                    | <b>9</b>  |
| 2.1      | Allgemeine Begriffe . . . . .   | 9         |
| 2.1.1    | Strahlen- und Wellenoptik . . . . .                                       | 9         |
| 2.1.2    | Strahlungsphysikalische und lichttechnische Größen . . . . .              | 10        |
| 2.1.3    | Brechung und Beugung von Licht . . . . .                                  | 12        |
| 2.1.4    | Diffuse Reflexion . . . . .   | 14        |
| 2.1.5    | Die optische Abbildung . . . . .  | 14        |
| 2.1.6    | Interferenz . . . . .   | 16        |
| 2.2      | Laser . . . . .   | 19        |
| 2.2.1    | Prinzip . . . . .   | 20        |
| 2.2.2    | Inversion . . . . .   | 20        |
| 2.2.3    | Moden . . . . .   | 21        |
| 2.2.4    | Beispiele von Laseranordnungen . . . . .                                  | 24        |
| 2.3      | Optische Detektoren . . . . .   | 25        |
| 2.3.1    | Lichtempfindlicher Widerstand . . . . .                                   | 25        |
| 2.3.2    | Photoelement und Photodiode . . . . .                                     | 27        |
| 2.3.3    | Photovervielfacher . . . . .  | 28        |
| 2.3.4    | Positionempfindliche optische Detektoren . . . . .                        | 30        |
| 2.3.5    | Detektor-Arrays . . . . .   | 31        |
| 2.3.6    | Bildverstärker . . . . .  | 32        |
| <b>3</b> | <b>Abstandsmessung, Geschwindigkeitsmessung und Objektklassifizierung</b> | <b>35</b> |
| 3.1      | Lichtschränken . . . . .  | 35        |
| 3.1.1    | Ausführungsformen . . . . .   | 35        |
| 3.1.2    | Flächenabdeckende Lichtschränken . . . . .                                | 42        |
| 3.1.3    | Besondere Anwendungen . . . . .   | 43        |
| 3.1.4    | Lichtschränken zur Geschwindigkeitsmessung . . . . .                      | 44        |
| 3.2      | Triangulation . . . . .   | 48        |
| 3.2.1    | Grundprinzip . . . . .  | 48        |
| 3.2.2    | Grenzen des Systems . . . . .   | 50        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.2.3    | Langreichweitige Triangulation . . . . .  | 53         |
| 3.2.4    | Anwendungen von Triangulationssensoren . . . . .  | 56         |
| 3.2.5    | Flächenhafte Triangulation . . . . .  | 56         |
| 3.3      | Laufzeitverfahren . . . . .   | 57         |
| 3.3.1    | Grundprinzip . . . . .  | 57         |
| 3.3.2    | Grenzen des Systems . . . . .   | 61         |
| 3.3.3    | Anwendungen . . . . .   | 62         |
| 3.3.4    | Flächendeckende Verfahren . . . . .   | 62         |
| 3.4      | Laser-Doppler-Velocimetrie . . . . .  | 65         |
| 3.4.1    | Prinzip des Verfahrens . . . . .  | 65         |
| 3.4.2    | Empfänger . . . . .   | 68         |
| 3.4.3    | Begrenzungen des Verfahrens . . . . .   | 69         |
| 3.4.4    | Auswertemöglichkeiten und Anwendungen . . . . .   | 70         |
| <b>4</b> | <b>Messung der Oberflächenform</b> . . . . .  | <b>73</b>  |
| 4.1      | Einführung . . . . .  | 73         |
| 4.2      | Übersicht über nicht-interferometrische Verfahren . . . . .                             | 74         |
| 4.2.1    | Einführung . . . . .  | 74         |
| 4.2.2    | Abtastende Verfahren . . . . .  | 75         |
| 4.2.3    | Projektion strukturierten Lichts . . . . .  | 78         |
| 4.3      | 2D-Interferenzverfahren . . . . .   | 79         |
| 4.3.1    | Interferenz an rauen Oberflächen mit breitbandiger Beleuchtung . . . . .                | 79         |
| 4.3.2    | Interferenz an rauen Oberflächen mit monochromatischer Beleuchtung . . . . .            | 79         |
| 4.3.3    | Praxisrelevante Grundlagen der Speckle-Interferometrie . . . . .                        | 82         |
| 4.4      | Anwendungen der Speckle-Interferometrie . . . . .                                       | 100        |
| 4.4.1    | Oberflächenprofilvermessung mittels Zweiwellenlängentechnik . . . . .                   | 100        |
| 4.4.2    | Deformationsmessung vertikal zur Oberfläche . . . . .                                   | 102        |
| 4.4.3    | Deformationsmessung in der Oberfläche . . . . .   | 105        |
| 4.4.4    | Schwingungsmessung . . . . .  | 108        |
| <b>5</b> | <b>Möglichkeiten und Grenzen von optischen Sensoren für die Formerfassung</b> . . . . . | <b>113</b> |
| 5.1      | Einführung . . . . .  | 113        |
| 5.2      | Zur Auswahl von Sensoren . . . . .  | 114        |
| 5.3      | Aktive Lasertriangulation zur flächenhaften Vermessung . . . . .                        | 115        |
| 5.3.1    | Theoretische Grenzen der Meßunsicherheit . . . . .                                      | 116        |
| 5.3.2    | Meßunsicherheit an technischen Oberflächen . . . . .                                    | 117        |
| 5.3.3    | Möglichkeiten zur Verringerung der Meßunsicherheit . . . . .                            | 118        |
| 5.3.4    | Beispielmessungen . . . . .   | 119        |
| 5.3.5    | Kalibrierung . . . . .  | 121        |
| 5.3.6    | Zusammenfassung für den Anwender . . . . .  | 122        |
| 5.4      | Phasenmessende Triangulation . . . . .  | 122        |
| 5.4.1    | Prinzip der Phasenmessenden Triangulation . . . . .                                     | 123        |
| 5.4.2    | Theoretische Grenzen der Meßunsicherheit . . . . .                                      | 125        |
| 5.4.3    | Modifikationen der Streifenprojektion . . . . .   | 125        |
| 5.4.4    | Probleme beim praktischen Einsatz . . . . .   | 126        |
| 5.4.5    | Beispielmessungen . . . . .   | 127        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.4.6    | Zusammenfassung für den Anwender . . . . .                                   | 127        |
| 5.5      | Kohärenzradar . . . . .  | 128        |
| 5.5.1    | Meßprinzip . . . . .   | 128        |
| 5.5.2    | Theoretische Grenzen, Vergleich zu konventionellen Sensoren . . . . .        | 131        |
| 5.5.3    | Meßergebnisse aus der industriellen Praxis . . . . .                         | 132        |
| 5.5.4    | Zusammenfassung für den Anwender . . . . .                                   | 136        |
| 5.6      | Vergleich der Meßverfahren, Resumé . . . . .                                 | 136        |
| <b>6</b> | <b>Messung der Oberflächenrauheit</b>  | <b>139</b> |
| 6.1      | Einleitung . . . . .   | 139        |
| 6.2      | Übersicht über optische Verfahren zur Rauheitsmessung . . . . .              | 142        |
| 6.2.1    | Abtastende Verfahren . . . . .   | 143        |
| 6.2.2    | Streulicht-Messung . . . . .   | 143        |
| 6.3      | Speckle-Verfahren . . . . .  | 145        |
| 6.3.1    | Zusammenhang Rauheit und Specklestatistik . . . . .                          | 145        |
| 6.3.2    | Speckle-Kontrast . . . . .   | 145        |
| 6.3.3    | Speckle Elongation . . . . .   | 147        |
| 6.3.4    | Speckle Korrelation . . . . .  | 148        |
| 6.4      | Anisotrope Oberflächenrauheiten . . . . .                                    | 153        |
| 6.5      | Bewertung mechanischer und optischer Verfahren zur Rauheitsmessung . . . . . | 155        |
| 6.5.1    | Mechanische Rauheitsmessung . . . . .  | 155        |
| 6.5.2    | Optische Rauheitsmessung . . . . .   | 156        |
| <b>7</b> | <b>Messung von Oberflächenschichten - Dünnschichtinterferometrie</b>         | <b>157</b> |
| 7.1      | Grundlagen . . . . .   | 157        |
| 7.1.1    | Interferenzeffekt an dünnen Schichten . . . . .                              | 157        |
| 7.1.2    | Einfluß der Polarisation . . . . .   | 160        |
| 7.1.3    | Bezug zur Ellipsometrie . . . . .  | 162        |
| 7.1.4    | Vorteile der Dünnschichtinterferometrie . . . . .                            | 163        |
| 7.2      | Dünnschichtinterferometrische Meßanordnungen . . . . .                       | 165        |
| 7.2.1    | Einstrahlinterferometrie . . . . .   | 165        |
| 7.2.2    | Zweistrahlinterferometrie . . . . .  | 165        |
| 7.2.3    | Konvergente Einstrahlinterferometrie . . . . .                               | 167        |
| 7.3      | Anwendungsbeispiele . . . . .  | 170        |
| 7.3.1    | Dünnschichttechnologie . . . . .   | 170        |
| 7.3.2    | Aufbau an einem Plasmabeschichtungsreaktor . . . . .                         | 170        |
| 7.3.3    | Messung der thermischen Ausdehnung . . . . .                                 | 175        |
|          | <b>Literatur</b>   | <b>181</b> |
|          | <b>Index</b>   | <b>206</b> |