

*Norbert Schuster, Valentin G. Kolobrodov*

# **Infrarotthermographie**

Zweite, überarbeitete und erweiterte Ausgabe



**WILEY-**  
**VCH**

**WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA**

# Inhaltsverzeichnis

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Technische Besonderheiten der Wärmebildtechnik .....                                | 12 |
| 1.1   | Radiometrische Kette .....  | 13 |
| 1.2   | Prinzipien der räumlichen Abtastung .....   | 14 |
| 1.3   | Historische Fakten zur Thermographie .....  | 16 |
| 2     | Mathematische Grundlagen zur Beschreibung der Signalverarbeitung.....               | 19 |
| 2.1   | Frequenzanalyse determinierter Signale .....  | 19 |
| 2.1.1 | Fraunhofersche Beugung.....   | 22 |
| 2.1.2 | Normiertes Beugungsbild PSF .....   | 25 |
| 2.1.3 | Übertragungsfunktion MTF.....   | 27 |
| 2.2   | Beschreibung nichtdeterminierter Signale .....                                      | 28 |
| 2.3   | Lineare Systeme .....   | 33 |
| 2.3.1 | Faltung.....  | 33 |
| 2.3.2 | Übertragungsfunktion.....   | 35 |
| 2.3.3 | Rauschsignale .....   | 37 |
| 2.4   | Zeitliche und räumliche Abtastung .....   | 38 |
| 2.5   | Berechnungsbeispiele.....   | 42 |
| 3     | Eigenstrahlung von Objekt und Hintergrund.....                                      | 50 |
| 3.1   | Energetische und photometrische Größen.....   | 50 |
| 3.2   | Strahlungsausbreitung .....   | 53 |
| 3.3   | Energiebilanz des Strahlungstransportes.....  | 56 |
| 3.4   | Strahlungsgesetze des Schwarzen Körpers.....  | 58 |
| 3.5   | Eigenstrahlung realer Körper.....   | 61 |
| 3.5.1 | Emissionsgrade realer Körper.....   | 62 |
| 3.5.2 | Berechnung der Eigenstrahlung.....  | 65 |
| 3.5.3 | Störquellen und thermischer Hintergrund .....                                       | 67 |
| 3.5.4 | Thermische Auflösung und Strahlungskontrast .....                                   | 68 |
| 3.6   | Berechnungsbeispiele.....   | 72 |
| 4     | Atmosphärische Transmission.....  | 78 |
| 4.1   | Berechnung der Transmission infolge des in der Luft gelösten Wasserdampfes.....     | 80 |
| 4.2   | Berechnung der Transmission infolge des in der Luft vorhandenen Kohlendioxids ..... | 83 |
| 4.3   | Atmosphärische Fenster .....  | 85 |
| 4.4   | Berechnung des Transmissionsgrads infolge Streuung aus der Sichtweite .....         | 88 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.5   | Berechnungsbeispiele.....                               | 90  |
| 5     | Optische Systeme.....                                   | 95  |
| 5.1   | Thermographische Abbildung.....                         | 95  |
| 5.1.1 | Abbildungsbeziehungen.....                              | 95  |
| 5.1.2 | Thermische Auflösung.....                               | 98  |
| 5.1.3 | Räumliches Auflösungsvermögen.....                      | 100 |
| 5.1.4 | Räumliche Abtastung.....                                | 104 |
| 5.2   | Infrarootoptische Materialien.....                      | 106 |
| 5.2.1 | Linsenmaterialien.....                                  | 106 |
| 5.2.2 | Antireflexbeläge.....                                   | 110 |
| 5.2.3 | Spiegelmaterialien.....                                 | 112 |
| 5.3   | Optomechanische Abtastung.....                          | 113 |
| 5.3.1 | Abtastung mit Planspiegel.....                          | 114 |
| 5.3.2 | Abtastung mit Spiegelpolygon.....                       | 115 |
| 5.3.3 | Abtastung durch Polygonprismen.....                     | 118 |
| 5.3.4 | Abtastung durch Drehkeilpaar.....                       | 120 |
| 5.4   | Konzipierung des optischen Systems.....                 | 121 |
| 5.4.1 | Sicherung der thermischen und räumlichen Auflösung..... | 121 |
| 5.4.2 | Erfasstes Bildfeld FOV (field of view).....             | 124 |
| 5.4.3 | Berechnung der IR-Optiken.....                          | 126 |
| 5.5   | Ausführungsformen.....                                  | 129 |
| 5.5.1 | Linsenoptiken.....                                      | 129 |
| 5.5.2 | Spiegeloptiken.....                                     | 130 |
| 5.5.3 | Kepler-Vorsätze .....                                   | 131 |
| 5.5.4 | Makro- und Mikrothermographie .....                     | 132 |
| 5.5.5 | Approximation der Modulationsübertragungsfunktion.....  | 133 |
| 5.6   | Berechnungsbeispiele.....                               | 137 |
| 5.7   | Aufgaben zur selbständigen Lösung.....                  | 150 |
| 6     | Infrarotstrahlungsempfänger.....                        | 155 |
| 6.1   | Empfängerkenngrößen.....                                | 155 |
| 6.1.1 | Empfindlichkeit (responsivity, sensibilité) .....       | 155 |
| 6.1.2 | Detektivität (detectivity, detectivité).....            | 158 |
| 6.1.3 | Kleinste auflösbare Bestrahlungsstärkendifferenz .....  | 161 |
| 6.1.4 | Modulationsübertragungsfunktion.....                    | 161 |
| 6.2   | Thermische Empfänger .....                              | 163 |
| 6.2.1 | Arten thermischer Einelementempfänger .....             | 164 |
| 6.2.2 | Pyroelektrisches Vidikon .....                          | 167 |
| 6.2.3 | Thermische Empfängerarrays .....                        | 172 |
| 6.3   | Quantenempfänger .....                                  | 174 |
| 6.3.1 | Grundlegende Eigenschaften .....                        | 174 |
| 6.3.2 | Funktionsprinzipien von IR-Quantenempfängern.....       | 176 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 6.3.3 | Ausführungsformen.....  | 179 |
| 6.4   | Empfängerkühlung.....   | 183 |
| 6.4.1 | Flüssiggaskühlung .....   | 184 |
| 6.4.2 | Joule-Thomson-Kühlung.....  | 185 |
| 6.4.3 | Thermoelektrische Kühlung.....  | 186 |
| 6.4.4 | Stirling-Kühler.....  | 188 |
| 6.5   | Berechnungsbeispiele.....   | 190 |
| 7     | Signalverarbeitung .....  | 198 |
| 7.1   | Elektrisches Signal am Empfängerausgang .....                         | 198 |
| 7.2   | Einstellung und Korrektur der Temperaturskala auf analogem Wege ..... | 200 |
| 7.3   | Möglichkeiten der digitalen Bildbearbeitung.....                      | 202 |
| 7.4   | Abtastung und Rauschbandbreite .....                                  | 204 |
| 7.4.1 | Abtastung mit Einelementempfängern .....                              | 204 |
| 7.4.2 | Abtastung mit Zeilenempfängern.....                                   | 205 |
| 7.4.3 | Bildaufnahme mit Matrixempfängern.....                                | 207 |
| 7.5   | Berechnungsbeispiele.....   | 208 |
| 8     | Anzeigeeinheiten.....   | 216 |
| 8.1   | Charakteristika für Anzeigen.....                                     | 216 |
| 8.1.1 | Größe und Auflösung.....  | 216 |
| 8.1.2 | Lichttechnische Größen.....   | 218 |
| 8.1.3 | Farbwiedergabe .....  | 218 |
| 8.2   | Elektronenstrahlröhre.....  | 221 |
| 8.3   | Flüssigkristallanzeigen.....  | 223 |
| 8.4   | Plasma-Bildschirme .....  | 225 |
| 9     | Gesetze der visuellen Wahrnehmung.....                                | 228 |
| 9.1   | Grundlegende Eigenschaften des Auges.....                             | 228 |
| 9.1.1 | Aufbau und Bildentstehung .....                                       | 229 |
| 9.1.2 | Photometrische Eigenschaften .....                                    | 232 |
| 9.1.3 | Geometrisch-optische Eigenschaften .....                              | 234 |
| 9.2   | Übertragungseigenschaften des menschlichen Auges .....                | 235 |
| 9.3   | Integrierende Wirkung des Auges .....                                 | 238 |
| 9.3.1 | Zeitkonstante des Auges .....   | 238 |
| 9.3.2 | Räumliche Integration .....   | 239 |
| 9.3.3 | Flimmern der angezeigten Szene.....                                   | 241 |
| 9.4   | Wahrnehmung des thermographischen Bildes .....                        | 242 |
| 9.4.1 | Reaktionen bei der Objektwahrnehmung .....                            | 242 |
| 9.4.2 | Referenzobjekte .....   | 243 |
| 9.4.3 | Entdeckungswahrscheinlichkeit .....                                   | 244 |
| 9.4.4 | Erkennungswahrscheinlichkeit .....                                    | 246 |
| 9.5   | Berechnungsbeispiele.....   | 247 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 10     | Bewertungskriterien für Wärmebildsysteme .....   | 253 |
| 10.1   | Auswahl des spektralen Arbeitsgebietes.....  | 253 |
| 10.2   | Übertragungsfunktion.....  | 254 |
| 10.3   | Rauschbegrenzte thermische Auflösung .....   | 257 |
| 10.4   | Verbindung von räumlicher und thermischer Auflösung.....   | 259 |
| 10.4.1 | Ableitung der MDTD-Beziehung.....  | 259 |
| 10.4.2 | Minimal auflösbare Temperaturdifferenz MRTD .....  | 264 |
| 10.5   | Reichweite von Wärmebildsystemen .....   | 267 |
| 10.5.1 | Rauschäquivalente Reichweite NER .....   | 268 |
| 10.5.2 | Entdeckungsreichweite unter Berücksichtigung der Integration durch das Auge MDR <sub>1</sub> ..... | 269 |
| 10.5.3 | Entdeckungsreichweite unter Berücksichtigung der Kontrastempfindung MDR <sub>2</sub> .....         | 271 |
| 10.5.4 | Erkennungsreichweite MRR.....  | 273 |
| 10.6   | Berechnungsbeispiele.....  | 274 |
| 10.7   | Aufgaben zur selbständigen Lösung.....   | 285 |
| 11     | Prüfung von Wärmebildsystemen .....  | 288 |
| 11.1   | Messung des Videosignals .....   | 289 |
| 11.1.1 | Signalübertragungsfunktion.....  | 290 |
| 11.1.2 | Rauschsignal.....  | 291 |
| 11.1.3 | Rauschäquivalente Temperaturdifferenz.....   | 292 |
| 11.2   | Messung der Modulationsübertragungsfunktion.....   | 294 |
| 11.3   | Objektive MRTD- und MDTD-Messung.....  | 295 |
| 11.4   | Weiterentwicklung von Messmöglichkeiten.....   | 298 |
| 12     | Anwendungen .....  | 300 |
| 12.1   | Pyrometrie .....   | 300 |
| 12.1.1 | Messproblem.....   | 301 |
| 12.1.2 | Schmalbandige Messung.....   | 302 |
| 12.1.3 | Eliminierung des Emissionsgrades.....  | 304 |
| 12.1.4 | Breitbandige Messung .....   | 306 |
| 12.2   | Thermographische Diagnose .....  | 306 |
| 12.2.1 | Bauthermographie .....   | 315 |
| 12.2.2 | Medizinthermographie .....   | 316 |
| 12.2.3 | Vorbeugende Instandhaltung .....   | 318 |
| 12.2.4 | Lock-in-Thermographie .....  | 319 |
| 12.2.5 | Kombination von visuellen Bildern und Thermogrammen.....   | 320 |
| 12.3   | Temperaturkontrolle in technologischen Prozessen.....  | 321 |
| 12.4   | Sicherheits- und Militärtechnik .....  | 323 |
| 12.4.1 | Objekt- und Brandschutz .....  | 323 |
| 12.4.2 | Passive Aufklärung .....   | 326 |
| 12.4.3 | Passive Fernerkundung .....  | 328 |
| 12.4.4 | Zielverfolgung .....   | 329 |
| 12.5   | Berechnungsbeispiele .....   | 331 |

|      |                                     |     |
|------|-------------------------------------|-----|
| 13   | Entwicklungstendenzen.....          | 336 |
| 13.1 | Sichtgeräte .....                   | 336 |
| 13.2 | Messkameras.....                    | 338 |
| 13.3 | High-Speed-IR-Kameras .....         | 340 |
| 13.4 | Systeme mit großer Reichweite ..... | 340 |
|      | Verwendete Formelzeichen.....       | 342 |
|      | Literaturverzeichnis .....          | 346 |
|      | Sachwortverzeichnis .....           | 352 |