

# Infrarot- thermographie

Norbert Schuster

Valentin G. Kolobrodov

 **WILEY-VCH**

Berlin · Weinheim · New York · Chichester · Brisbane · Singapore · Toronto

# Inhaltsverzeichnis

1	Technische Besonderheiten der Wärmebildtechnik	11
1.1	Radiometrische Kette	12
1.2	Prinzipien der räumlichen Abtastung	13
1.3	Historische Fakten zur Thermographie	15
2	Mathematische Grundlagen zur Beschreibung der Signalverarbeitung	17
2.1	Frequenzanalyse determinierter Signale	17
2.1.1	Fraunhoferse Beugung	20
2.1.2	Normiertes Beugungsbild PSF	23
2.1.3	Übertragungsfunktion MTF	25
2.2	Beschreibung nichtdeterminierter Signale	26
2.3	Lineare Systeme	31
2.3.1	Faltung	31
2.3.2	Übertragungsfunktion	33
2.3.3	Rauschsignale	35
2.4	Zeitliche und räumliche Abtastung	36
2.5	Berechnungsbeispiele	40
3	Eigenstrahlung von Objekt und Hintergrund	47
3.1	Energetische und photometrische Größen	47
3.2	Strahlungsausbreitung	50
3.3	Energiebilanz des Strahlungstransportes	53
3.4	Strahlungsgesetze des Schwarzen Körpers	55
3.5	Eigenstrahlung realer Körper	58
3.5.1	Emissionsgrade realer Körper	59
3.5.2	Berechnung der Eigenstrahlung	61
3.5.3	Störquellen und thermischer Hintergrund	63
3.5.4	Thermische Auflösung und Strahlungskontrast	64
3.6	Berechnungsbeispiele	67
4	Atmosphärische Transmission	73
4.1	Berechnung der Transmission infolge des Wasserdampfes	75
4.2	Berechnung der Transmission infolge des vorhandenen Kohlendioxids	78
4.3	Atmosphärische Fenster	80
4.4	Berechnung des Transmissionsgrads infolge Streuung aus der Sichtweite	82
4.5	Berechnungsbeispiele	85

5	Optische Systeme	89
5.1	Thermographische Abbildung	89
5.1.1	Abbildungsbeziehungen	89
5.1.2	Thermische Auflösung	92
5.1.3	Räumliches Auflösungsvermögen	94
5.1.4	Räumliche Abtastung	98
5.2	Infrarotoptische Materialien	100
5.2.1	Linsenmaterialien	100
5.2.2	Antireflexbeläge	104
5.2.3	Spiegelmaterialien	106
5.3	Optomechanische Abtastung	107
5.3.1	Abtastung mit Planspiegel	107
5.3.2	Abtastung mit Spiegelpolygon	109
5.3.3	Abtastung durch Polygonprismen	111
5.3.4	Abtastung durch Drehkeilpaar	113
5.4	Konzipierung des optischen Systems	114
5.4.1	Sicherung der thermischen und räumlichen Auflösung	114
5.4.2	Erfasstes Bildfeld FOV (field of view)	117
5.4.3	Berechnung der IR-Optiken	119
5.5	Ausführungsformen	122
5.5.1	Linsenoptiken	123
5.5.2	Spiegeloptiken	123
5.5.3	Kepler-Vorsätze	124
5.5.4	Approximation der Modulationsübertragungsfunktion	125
5.6	Berechnungsbeispiele	129
5.7	Aufgaben zur selbständigen Lösung	141
6	Infrarotstrahlungsempfänger	145
6.1	Empfängerkenngrößen	145
6.1.1	Empfindlichkeit (responsivity, sensibilité)	145
6.1.2	Detektivität (detectivity, detectivité)	148
6.1.3	Kleinste auflösbare Bestrahlungsstärkendifferenz	151
6.1.4	Modulationsübertragungsfunktion	151
6.2	Thermische Empfänger	153
6.2.1	Arten thermischer Einelementempfänger	154
6.2.2	Pyroelektrisches Vidikon	157
6.2.3	Thermische Empfängerarrays	161
6.3	Quantenempfänger	163
6.3.1	Grundlegende Eigenschaften	164
6.3.2	Funktionsprinzipien von IR-Quantenempfängern	166
6.3.3	Ausführungsformen	169
6.4	Empfängerkühlung	172
6.4.1	Flüssiggaskühlung	173
6.4.2	Joule-Thomson-Kühlung	174
6.4.3	Thermoelektrische Kühlung	175

6.4.4	Stirling-Kühler	177
6.5	Berechnungsbeispiele	179
7	Signalverarbeitung	187
7.1	Elektrisches Signal am Empfängerausgang	187
7.2	Einstellung und Korrektur der Temperaturskala auf analogem Wege	189
7.3	Möglichkeiten der digitalen Bildbearbeitung	191
7.4	Abtastung und Rauschbandbreite	193
7.4.1	Abtastung mit Einelementempfängern	193
7.4.2	Abtastung mit Zeilenempfängern	194
7.4.3	Bildaufnahme mit Matrixempfängern	196
7.5	Berechnungsbeispiele	197
8	Anzeigeeinheiten	205
8.1	Charakteristika für Anzeigen	205
8.1.1	Größe und Auflösung	205
8.1.2	Lichttechnische Größen	207
8.1.3	Farbwiedergabe	210
8.2	Elektronenstrahlröhre	210
8.3	Flüssigkristallanzeigen	212
8.4	Plasma-Bildschirme	214
9	Gesetze der visuellen Wahrnehmung	217
9.1	Grundlegende Eigenschaften des Auges	217
9.1.1	Aufbau und Bildentstehung	218
9.1.2	Photometrische Eigenschaften	221
9.1.3	Geometrisch-optische Eigenschaften	222
9.2	Übertragungseigenschaften des menschlichen Auges	224
9.3	Integrierende Wirkung des Auges	227
9.3.1	Zeitkonstante des Auges	227
9.3.2	Räumliche Integration	228
9.3.3	Flimmern der angezeigten Szene	229
9.4	Wahrnehmung des thermographischen Bildes	230
9.4.1	Reaktionen bei der Objektwahrnehmung	231
9.4.2	Referenzobjekte	232
9.4.3	Entdeckungswahrscheinlichkeit	233
9.4.4	Erkennungswahrscheinlichkeit	234
9.5	Berechnungsbeispiele	236
10	Bewertungskriterien für Thermographiesysteme	241
10.1	Auswahl des spektralen Arbeitsgebietes	241
10.2	Übertragungsfunktion	242
10.3	Rauschbegrenzte thermische Auflösung	245
10.4	Verbindung von räumlicher und thermischer Auflösung	247
10.4.1	Ableitung einer MDTD-Beziehung	247
10.4.2	Minimal auflösbare Temperaturdifferenz MRTD	251
10.5	Reichweite von Wärmebildsystemen	254

10.5.1	Rauschäquivalente Reichweite NED	256
10.5.2	Entdeckungsreichweite unter Berücksichtigung der Integration durch das Auge	257
10.5.3	Entdeckungsreichweite unter Berücksichtigung der Kontrastempfindung des Auges	258
10.5.4	Erkennungsreichweite	260
10.6	Berechnungsbeispiele	262
10.7	Aufgaben zur selbständigen Lösung	273
11	Prüfung von Wärmebildsystemen	275
11.1	Messung des Videosignals	276
11.1.1	Signalübertragungsfunktion	277
11.1.2	Rauschsignal	278
11.1.3	Rauschäquivalente Temperaturdifferenz	279
11.2	Messung der Modulationsübertragungsfunktion	281
11.3	Objektive MRTD- und MDTD-Messung	283
11.4	Weiterentwicklung von Meßmöglichkeiten	285
12	Anwendungen und Tendenzen	287
12.1	Pyrometrie	287
12.1.1	Meßproblem	288
12.1.2	Schmalbandige Messung	289
12.1.3	Eliminierung des Emissionsgrades	291
12.1.4	Breitbandige Messung	292
12.2	Thermographische Diagnose	293
12.2.1	Bauthermographie	302
12.2.2	Medizinthermographie	303
12.2.3	Vorbeugende Instandhaltung	304
12.2.4	Impuls- Thermographie	306
12.2.5	Kombination von visuellen Bildern und Thermogrammen	307
12.3	Beobachtung technologischer Prozesse	307
12.4	Sicherheits- und Militärtechnik	309
12.4.1	Objekt- und Brandschutz	310
12.4.2	Passive Aufklärung	312
12.4.3	Passive Fernerkundung	313
12.4.4	Zielverfolgung	313
12.5	Entwicklungstendenzen	317
12.5.1	Sichtgeräte	317
12.5.2	Meßkameras	319
12.5.3	Systeme mit großer Reichweite	321
12.6	Berechnungsbeispiele	322
	Verwendete Formelzeichen	327
	Literaturverzeichnis	331
	Sachwortverzeichnis	337