

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *IX*

Symbolverzeichnis *XI*

Abkürzungsverzeichnis *XV*

1 Einführung *1*

- 1.1 Infrarotstrahlung *1*
- 1.2 Technische Anwendungen *4*
- 1.3 Vorteile der berührungslosen Temperaturmessung *6*
- 1.4 Historische Entwicklung *7*
 - Literatur *12*

2 Radiometrische Grundlagen *13*

- 2.1 Strahlungsphysik *13*
 - 2.1.1 Ausbreitung von Strahlung *13*
 - 2.1.2 Ausbreitung in verlustfreien Medien *16*
- 2.2 Strahlungsgrößen *22*
 - 2.2.1 Strahlungsfeldbezogene Größen *22*
 - 2.2.2 Senderseitige Größen *23*
 - 2.2.3 Empfängerseitige Größen *24*
 - 2.2.4 Spektrale Größen *24*
 - 2.2.5 Absorption, Reflexion und Transmission *26*
- 2.3 Strahlungsgesetze *27*
 - 2.3.1 Planck'sches Strahlungsgesetz *27*
 - 2.3.2 Wien'sches Verschiebungsgesetz *31*
 - 2.3.3 Stefan-Boltzmann-Gesetz *34*
 - 2.3.4 Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz *36*
 - 2.3.5 Fotometrisches Grundgesetz *37*
- 2.4 Emission *46*
 - 2.4.1 Emissionsgrad *46*
 - 2.4.2 Schwarze Strahler *48*
 - 2.4.3 Emission realer Körper *56*
 - 2.4.4 Bestimmung des Emissionsgrades *61*
- 2.5 Reflexion *64*

VI | *Inhaltsverzeichnis*

- 2.5.1 Reflexionsgrad 64
- 2.5.2 Reflexion an Grenzflächen 65
- 2.5.3 Reflexion an dünnen dielektrischen Schichten 66
- 2.6 Transmission 70
- 2.6.1 Transmissionsgrad 70
- 2.6.2 Transmission von Körpern 71
- 2.6.3 Transmission der Atmosphäre 75
- 2.6.4 Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration 81
- Literatur 82

- 3 Sensor- und Gerätekenwerte 85**
- 3.1 Thermische Auflösung 85
- 3.1.1 Empfindlichkeit 85
- 3.1.2 Rauschen 89
- 3.1.3 Rauschäquivalente Leistung *NEP* 106
- 3.1.4 Detektivität 108
- 3.1.5 Rauschäquivalente Temperaturdifferenz *NETD* 110
- 3.1.6 Inhomogenitätsäquivalente Temperaturdifferenz *IEDT* 113
- 3.2 Räumliche Auflösung 115
- 3.2.1 Optisch-geometrische Beziehungen einer scharfen Abbildung 115
- 3.2.2 Begrenzung der Ortsauflösung 117
- 3.2.3 Spaltbildfunktion und Messfleckgröße 119
- 3.2.4 Modulationsübertragungsfunktion *MTF* 121
- 3.3 Zeitliche Auflösung 132
- 3.3.1 Zeitkonstante 133
- 3.3.2 Einstellzeit 135
- 3.3.3 Erfassungszeit 137
- 3.4 Zusammenfassung 137
- Literatur 137

- 4 Infrarotsensoren 139**
- 4.1 Thermische Infrarotsensoren 140
- 4.1.1 Wirkprinzipien 140
- 4.1.2 Thermoelektrische Strahlungssensoren 145
- 4.1.3 Pyroelektrische Sensoren 147
- 4.1.4 Mikrobolometer 149
- 4.2 Photonensensoren 153
- 4.2.1 Wirkprinzipien 154
- 4.2.2 Fotowiderstände 162
- 4.2.3 Fotodioden 166
- 4.2.4 Bildgebene Photonensensoren 168
- 4.3 Vergleich von thermischen und photonischen Sensoren 170
- 4.3.1 Thermische Auflösung 172
- 4.3.2 Zeitliche Auflösung 173
- 4.3.3 Kosten 173

- 4.3.4 Energieverbrauch 174
- 4.4 Kühlung von Sensoren 174
 - 4.4.1 Thermoelektrische Kühler 175
 - 4.4.2 Direktkontaktkühlung 176
 - 4.4.3 Joule-Thomson-Kühler 177
 - 4.4.4 Kleinkältemaschinen 178
 - 4.4.5 Vergleich der Kühlverfahren 180
- Literatur 182

- 5 Pyrometer 187**
 - 5.1 Aufbau und Funktionsweise 187
 - 5.1.1 Grundaufbau 187
 - 5.1.2 Funktionsweise 188
 - 5.1.3 Berücksichtigung parasitärer Strahlungsanteile 191
 - 5.1.4 Pyrometergleichung 192
 - 5.2 Grundtypen 193
 - 5.2.1 Gleichlichtpyrometer 194
 - 5.2.2 Wechsellichtpyrometer 194
 - 5.3 Messverfahren 196
 - 5.3.1 Gesamtstrahlungspyrometer 198
 - 5.3.2 Spektralpyrometer 202
 - 5.3.3 Bandstrahlungspyrometer 206
 - 5.3.4 Verhältnispyrometer 212
 - 5.3.5 Mehrkanalpyrometer 218
 - 5.4 Messunsicherheit 220
 - 5.4.1 Kalibrierung 220
 - 5.4.2 Absolute und relative Messunsicherheit 221
 - 5.4.3 Umfeldfaktor SSE 223
 - 5.5 Kenngrößen und Klassifizierung 226
 - 5.5.1 Kenngrößen 226
 - 5.5.2 Klassifizierung von Pyrometern 227
 - 5.5.3 Spezielle Baugruppen für Pyrometer 231
 - 5.6 Auswahl eines für eine Messaufgabe geeigneten Pyrometers 234
 - 5.6.1 Allgemeine pyrometrische Messungen 235
 - 5.6.2 Pyrometrische Temperaturmessungen an speziellen Materialien 238
 - 5.6.3 Applikationen mit Quotientenpyrometern 240
 - Literatur 241

- 6 Thermografie 243**
 - 6.1 Aufbau und Funktionsweise 244
 - 6.1.1 Aufbau 244
 - 6.1.2 Funktionsweise 245
 - 6.2 Bauarten 247
 - 6.2.1 Scannende Thermobildgeräte 247
 - 6.2.2 Zeilenkameras 248

VIII | *Inhaltsverzeichnis*

6.2.3	Starrende Thermobildkameras	249
6.3	Messverfahren	256
6.3.1	Bandstrahlungsthermobildgeräte	257
6.3.2	Spektralkameras	258
6.3.3	Räumliche Auflösung	259
6.4	Justage	264
6.4.1	Ursachen der Ungleichförmigkeit	265
6.4.2	Arbeitspunkteinstellung	269
6.4.3	Korrektur defekter Pixel	272
6.4.4	Korrektur der Ungleichförmigkeit (<i>NUC</i>)	279
6.4.5	Radiometrische Justage	297
6.4.6	Zusammenfassung	299
6.5	Messunsicherheit	301
6.5.1	Ungleichförmigkeit	301
6.5.2	Umfeldeinfluss (Size-of-Source-Effekt)	302
6.5.3	Kalibrierung	304
6.6	Kenngößen und Klassifizierung	305
6.6.1	Kenngößen von Thermobildgeräten	305
6.6.2	Klassifikation von Thermobildgeräten	308
6.7	Auswahl einer für eine Messaufgabe geeigneten Thermobildkamera	311
6.7.1	Allgemeine Messungen mit Bandstrahlungsthermobildgeräten	313
6.7.2	Bandstrahlungsthermobildgeräte für konkrete Anwendungen	314
6.7.3	Spektralkameras	314
6.8	Anwendungen	315
6.8.1	Passive Thermografie	315
6.8.2	Aktive Thermografie	317
6.8.3	Auswertemethoden in der Thermografie	318
	Literatur	319

Stichwortverzeichnis	323
-----------------------------	-----