

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** XI

**Symbolverzeichnis** XV

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	1
1.1	Infrarotstrahlung	1
1.1.1	Technische Anwendungen	1
1.1.2	Einteilung der Infrarotstrahlung	4
1.2	Historische Entwicklung	6
1.3	Vorteile der Infrarotmesstechnik	6
1.4	Vergleich thermischer und photonischer Infrarotsensoren	9
1.5	Temperatur- und Ortsauflösung von Infrarotsensoren	14
1.6	Einelement- versus Matrixsensoren	15
<b>2</b>	<b>Radiometrische Grundlagen</b>	17
2.1	Wirkung elektromagnetischer Strahlung auf Festkörper	17
2.1.1	Ausbreitung von Strahlung	17
2.1.2	Ausbreitung in verlustbehafteten Medien	20
2.1.3	Felder an Grenzflächen	24
2.1.4	Strahldurchgang an dünnen dielektrischen Schichten	25
2.2	Strahlungsgrößen	30
2.2.1	Strahlungsfeldbezogene Größen	30
2.2.2	Senderseitige Größen	31
2.2.3	Empfängerseitige Größen	31
2.2.4	Spektrale Größen	32
2.2.5	Absorption, Reflexion und Transmission	33
2.2.6	Emissionsgrad	34
2.3	Strahlungsgesetze	36
<b>3</b>	<b>Fotometrische Grundlagen</b>	43
3.1	Raumwinkel	43
3.1.1	Definition	43
3.1.2	Raumwinkelberechnungen	44
3.1.2.1	Gerader Kreiskegel	44
3.1.2.2	Beliebige Flächen	45

- 3.1.2.3 Kreisfläche mit Mittelpunkt im Abstandsvektor 48
- 3.1.2.4 Beliebige im Raum liegende Dreiecksfläche 49
- 3.1.2.5 Rechtecksfläche 50
- 3.2 Fotometrisches Grundgesetz 51
  - 3.2.1 Definition 51
  - 3.2.2 Berechnungsmethoden und Beispiele 58
    - 3.2.2.1 Reduzierter Raumwinkel 58
    - 3.2.2.2 Flächenelement und Kreisscheibe 58
    - 3.2.2.3 Natürliche Vignettierung 60
    - 3.2.2.4 Zwei parallele Kreisscheiben 61
    - 3.2.2.5 Flächenelement und Rechteckfläche 62
  - 3.2.3 Numerische Lösung des reduzierten Raumwinkels 64
- 4 Rauschen 69**
  - 4.1 Mathematische Grundlagen 69
    - 4.1.1 Einführung 69
    - 4.1.2 Zeitfunktionen 74
    - 4.1.3 Wahrscheinlichkeitsfunktionen 76
      - 4.1.3.1 Normalverteilung 78
      - 4.1.3.2 Poisson-Verteilung 79
    - 4.1.4 Korrelationsfunktionen 81
      - 4.1.4.1 Autokorrelationsfunktion 81
      - 4.1.4.2 Kreuzkorrelation 82
    - 4.1.5 Spektralfunktionen 83
    - 4.1.6 Rauschanalyse von elektronischen Schaltungen 88
  - 4.2 Rauschquellen in thermischen Infrarotsensoren 92
    - 4.2.1 Thermisches Rauschen und  $\tan \delta$ -Rauschen 92
    - 4.2.2 Stromrauschen 95
    - 4.2.3  $1/f$ -Rauschen 96
    - 4.2.4 Strahlungsrauschen 98
    - 4.2.5 Temperaturfluktuationsrauschen 101
- 5 Sensorkenngrößen 107**
  - 5.1 Empfindlichkeit 107
    - 5.1.1 Einführung 107
    - 5.1.2 Schwarze Empfindlichkeit 108
    - 5.1.3 Spektrale Empfindlichkeit 112
    - 5.1.4 Signal-Transfer-Funktion 113
    - 5.1.5 Gleichförmigkeit 116
  - 5.2 Rauschäquivalente Leistung NEP 118
  - 5.3 Detektivität 120
  - 5.4 Rauschäquivalente Temperaturdifferenz 121
  - 5.5 Optische Kenngrößen 126
  - 5.6 Modulationsübertragungsfunktion 132
    - 5.6.1 Definition 132
    - 5.6.2 Kontrast 136

5.6.3	Modulationsübertragungsfunktion eines Sensors	137
5.6.3.1	Geometrische MTF	137
5.6.3.2	Thermische MTF	139
5.6.3.3	Kapazitive MTF	142
5.6.4	Messung der Modulationsübertragungsfunktion	146
5.6.4.1	Messung mit sinusförmig modulierter Szene	147
5.6.4.2	Messung mit rechteckförmig modulierter Szene	147
5.6.4.3	Messung mit punkt- oder linienförmiger Szene	147
5.6.4.4	Messung mit einer Kante	148
<b>6</b>	<b>Thermische Infrarotsensoren</b>	<b>151</b>
6.1	Wirkprinzipien	151
6.2	Thermische Modelle	157
6.2.1	Einfaches thermisches Modell	157
6.2.1.1	Temperaturänderung für harmonische Anregung im Bildbereich	158
6.2.1.2	Temperaturänderung bei sprunghafter Anregung	163
6.2.2	Thermisches Schichtenmodell	166
6.3	Netzwerkmodelle für thermische Sensoren	174
6.4	Thermoelektrische Strahlungssensoren	178
6.4.1	Prinzip	178
6.4.2	Thermische Auflösung	185
6.4.3	Aufbau thermoelektrischer Sensoren	188
6.5	Pyroelektrische Sensoren	193
6.5.1	Prinzip	193
6.5.1.1	Empfindlichkeit pyroelektrischer Sensoren	198
6.5.1.2	Mikrofonie	209
6.5.2	Thermische Auflösung	211
6.5.3	Aufbau von pyroelektrischen Sensoren	217
6.6	Mikrobolometer	221
6.6.1	Prinzip	221
6.6.1.1	Metall	222
6.6.1.2	Halbleiter	222
6.6.2	Thermische Auflösung	223
6.6.3	Aufbau von Mikrobolometerarrays	229
6.6.4	Auswertelektronik von Mikrobolometern	233
6.7	Andere thermische Infrarotsensoren	240
6.7.1	Bimorphe Infrarotsensoren	240
6.7.2	Mikro-GOLAY-Zellen	245
6.8	Vergleich thermischer Sensoren	252
<b>7</b>	<b>Anwendungen thermischer Infrarotsensoren</b>	<b>255</b>
7.1	Anwendungsunabhängige Betrachtungen	255
7.2	Pyrometrie	257
7.2.1	Aufbau	257
7.2.2	Emissionsgrad realer Strahler	259
7.3	Wärmebildkameras	263

7.3.1	Aufbau	264	
7.3.2	Abgleich von Wärmebildkameras	270	
7.3.2.1	Korrektur der Kennlinie	270	
7.3.2.2	Radiometrische Anbindung	272	
7.4	Passiv-Infrarot-Bewegungsmelder	274	
7.4.1	Aufbau	274	
7.4.2	Infrarotoptik	276	
7.4.3	Signalverarbeitung	277	
7.5	Infrarotspektrometrie	278	
7.5.1	Strahlungsabsorption von Gasen	278	
7.5.2	Aufbau von Infrarotspektrometern	282	
7.6	Gasanalyse	285	
<b>Anhang A</b>		<b>Verwendete Konstanten</b>	289
<b>Anhang B</b>		<b>Plancksches Strahlungsgesetz und abgeleitete Gesetze</b>	291
<b>Anhang C</b>		<b>Berechnung des Raumwinkels einer Rechtecksfläche</b>	299
		<b>Literaturnachweis</b>	303
		<b>Index</b>	307