

Norbert Schuster, Valentin G. Kolobrodov

Infrarotthermographie

This Page Intentionally Left Blank

Norbert Schuster, Valentin G. Kolobrodov

Infrarotthermographie

This Page Intentionally Left Blank

Norbert Schuster, Valentin G. Kolobrodov

Infrarotthermographie

Zweite, überarbeitete und erweiterte Ausgabe



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Autoren

Norbert Schuster
Vision & Control GmbH
Suhl, Germany
e-mail: Norbert.Schuster@vision-control.com

Valentin G. Kolobrodov
Kyiv National Technical University of Ukraine KPI
Kyiv, Ukraine
e-mail: post@ntu-kpi.kiev.ua

1. Auflage 1999

Umschlagbild

Die Dresdner Hofkirche als Thermogramm
(mit freundlicher Genehmigung der Firma
InfraTec GmbH, Dresden).

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

© 2004 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,
Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

Printed in the Federal Republic of Germany
Gedruckt auf säurefreiem Papier

Druck Strauss GmbH, Mörlenbach
Bindung Litges & Dopf Buchbinderei GmbH,
Heppenheim

ISBN 3-527-40509-7

Vorwort

Die Infrarottechnik erobert fast unbemerkt immer neue Bereiche unseres täglichen Lebens. Bewegungs- und Brandmelder und berührungslos arbeitende Thermometer beziehen aus der für den Menschen nicht sichtbaren Wärmestrahlung ihre notwendigen Informationen. Thermokameras zeigen Temperaturverteilungen auf, aus denen sich neue Diagnose-Verfahren in der Medizin, in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, im Bauwesen und im Umweltschutz entwickelt haben. Satelliten und Flugzeuge registrieren die täglichen Veränderungen auf der Erdoberfläche, wobei die Informationen aus dem thermischen Infrarot Ernteprognosen liefern und Umweltveränderungen wie das Ozonloch aufgespürt haben. Die Grenzsicherung wird zunehmend mit Thermokameras komplettiert, ermöglichen sie doch die Beobachtung bei totaler Dunkelheit und vervielfachen sie die Sichtweite bei schlechter Witterung. Wärmebildgeräte mit großer Reichweite gehören zunehmend zur Standardausrüstung moderner Wehrtechnik.

Dieses Buch hat sich die Aufgabe gestellt, die Besonderheiten dieses modernen Gebietes der Technik auf der Grundlage einer einheitlichen Methodik zu präsentieren. Zusammenfassende Darstellungen mit Lehrbuchcharakter wie Miroschnikov (1983) und Gaussorgues (1984) sind sehr selten und deutschsprachig überhaupt nicht vorhanden. Neben Monographien und Fachartikeln geben der Wissenspeicher Infrarottechnik (Hermann, Walther 1990) und die VDI/VDE-Richtlinien 3511 (1995) einen Einblick in die Infrarottechnik.

Die Wärmebildtechnik ist das Resultat moderner Empfängerentwicklung, Bildverarbeitung, Optik, Monitortechnologie und physiologischer Untersuchungen zur visuellen Wahrnehmung. Diesen Problemstellungen sind einzelne Kapitel gewidmet. Dabei werden die verschiedenen Fragestellungen so aufgearbeitet, dass die Konsequenzen für das gesamte Wärmebildgerät quantitativ abgeschätzt werden können. Für die Formeln werden möglichst einfache Zusammenhänge gewählt, so dass die grundlegenden Einflußfaktoren deutlich hervortreten. Durch umfangreiche Berechnungsbeispiele und Aufgaben in den einzelnen Kapiteln wird der Leser an eine ingenieurmäßige Arbeitsweise heran geführt. Dazu gehört der Hinweis auf die Grenzen der benutzten Modellvorstellungen und die Aufforderung zum praktischen Test.

Umfangreiche Tabellen geben einen Überblick über erreichbare technische Parameter und erleichtern die Ausführung eigener Berechnungen. Weiterführende Literatur weist den Weg zu den Spezialdisziplinen, wobei die Spezifik der infrarottechnischen Fragestellung im Text vermittelt wird...

Dieses Buch wendet sich an Ingenieure, Techniker, technische Führungskräfte, Einkäufer, Ausrüster und Marketing-Experten, die auf modern berührungslos arbeitende Erkundungstechniken angewiesen sind. Die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten reicht vom einfachen Bewegungsmelder

über die genaue Temperaturmessung bis zum hochauflösenden Nachtsichtgerät extremer Reichweite.

Insbesondere wendet sich das Buch an die Studenten technischer Fachrichtungen wie der Elektrotechnik, der Informationstechnik, der Feingerätetechnik, des Maschinenbaus und der technischen Physik. Schließlich finden in der Infrarottechnik neueste wissenschaftlich-technische Ergebnisse auf schnellstem Wege ihre praktische Umsetzung, so daß sich hier interessante und zukunfts-trächtige Arbeitsgebiete auftun.

Die Autoren haben seit 1985 unabhängig voneinander ihre Lehrveranstaltungen zur Infrarottechnik aufgebaut: V. Kolobrodov an der Technischen Universität der Ukraine (KPI) in Kiev ausgehend von der Nachrichtentechnik und N. Schuster an der Technischen Universität Ilmenau ausgehend von der Technischen Optik. Beide Erfahrungsbereiche sind die tragenden Säulen der Infrarot-Thermographie.

Die Autoren bedanken sich bei der Lektorin des Verlags WILEY-VCH Berlin, Frau Gesine Reiher, für die konstruktive Zusammenarbeit bei der Drucklegung des Buches. Unser besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. Anne Schuster für ihr umfassendes Engagement und ihre Mitarbeit bei der Fertigstellung des Manuskriptes.

Die Leser möchten wir zu einer kritischen Nachdenklichkeit anregen, die der Weiterentwicklung der Infrarottechnik zum Nutzen der Menschheit förderlich ist.

Ilmenau, Kiev im Juli 1999

Norbert Schuster, Valentin Kolobrodov

Vorwort zur 2. Auflage

Seit dem Erscheinen der ersten Auflage hat sich die Infrarotthermographie weitere Anwendungsfelder erschlossen. Systemlösungen, die früher ausschließlich der militärischen Nutzung vorbehalten waren, werden jetzt für zivile Anwendungen bereitgestellt. Zusätzlich sorgt der Siegeszug der digitalen Fotografie dafür, die Bildaufnahme ohne Film einem breiten Personenkreis nahezubringen.

Die Erweiterung des Lehrbuchinhalts orientiert sich am technischen Trend. Im Literaturverzeichnis werden die einschlägigen Neuerscheinungen der letzten Jahre berücksichtigt. Unser Dank gilt Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Michael Schuster für seine Mitarbeit bei der Fertigstellung des überarbeiteten Manuskriptes.

Ilmenau, Kiev im Mai 2004

Norbert Schuster, Valentin Kolobrodov

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 Strahlungscontrast | 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 | Infraroptische Materialien..... | 106 |
| 5.2.1 | Linsematerialien..... | 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 | Linseoptiken..... | 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 Bestrahlungsstärkedifferenz..... | 161 |
| 6.1.4 | Modulationsübertragungsfunktion..... | 161 |
| 6.2 | Thermische Empfänger..... | 163 |
| 6.2.1 | Arten thermischer Eielementempfänger..... | 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 ₁ | 269 |
| 10.5.3 | Entdeckungsreichweite unter Berücksichtigung der Kontrastempfindung MDR ₂ | 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 |

1 Technische Besonderheiten der Wärmebildtechnik

Das menschliche Auge nimmt elektromagnetische Strahlung aus einem sehr schmalen Spektralband wahr. Die Reflexion, Transmission und Streuung dieses Strahlungsanteils an den Gegenständen unserer Umwelt gestattet es dem Menschen, Gegenstände zu sehen. Körper mit einer Temperatur $T > 900 \text{ K}$ emittieren in diesem visuellen Spektralband einen registrierbaren Energieanteil. Die Wärmebildtechnik stellt sich die Aufgabe, die Eigenstrahlung von Gegenständen mit Umgebungstemperatur sichtbar zu machen. Dazu müssen Gerätelösungen entwickelt werden, die Strahlung im Bereich des thermischen Infrarots registrieren, berührungslos arbeiten und die räumliche und energetische Struktur der Objektszene anzeigen. Das ist nur auf elektronischem Umwege möglich, da Speichermedien nach dem Vorbild des fotografischen Films allein durch die Strahlung der Umgebung belichtet würden.

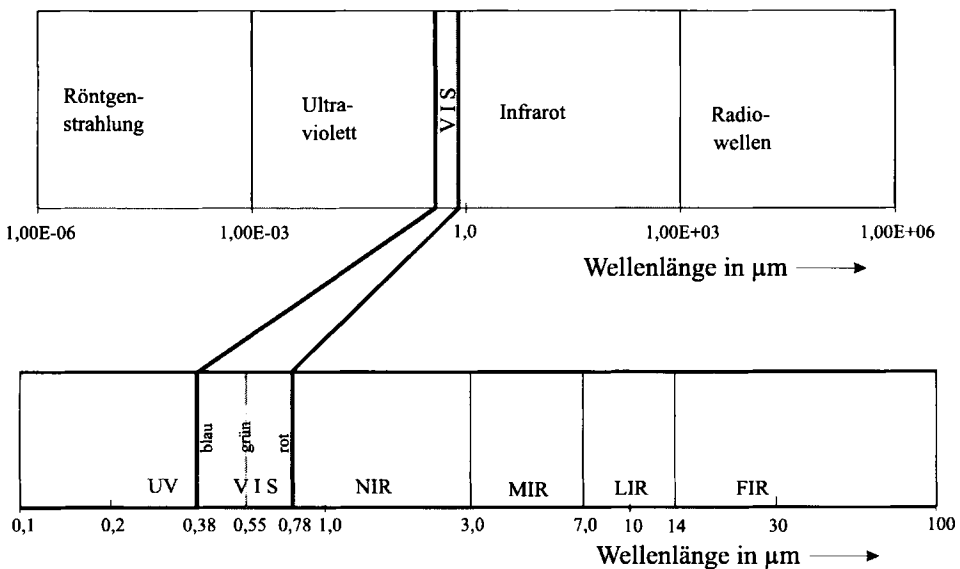


Abb. 1.1: Einordnung der Spektralbereiche der Wärmebildtechnik in das elektromagnetische Spektrum

In Abb. 1.1 ist das elektromagnetische Spektrum und vergrößert die besonders interessierenden Spektralbereiche für die Wärmebildtechnik eingetragen. Die unterschiedlichen Wellenlängen des sichtbaren Bereichs (im Folgenden mit VIS für visuell abgekürzt) werden vom menschlichen Auge

als Farben von Violett, Blau über Grün, Gelb, Orange bis Rot empfunden. Das Auge hat sein Empfindlichkeitsmaximum bei $0,55\ \mu\text{m}$ Strahlung dieser Wellenlänge wird als Grün empfunden. Unterhalb von $0,38\ \mu\text{m}$ wird die Strahlung für unser Auge unsichtbar, der energiereiche ultraviolette Strahlungsbereich (UV) beginnt. Oberhalb von $0,78\ \mu\text{m}$ schließt sich der infrarote Spektralbereich (IR) an. Die Unterteilung des IR unterliegt einer gewissen Willkür, sie spiegelt aber Grenzen bezüglich der Anwendung und der technischen Lösungsvarianten wider. Der IR-Bereich bis $3\ \mu\text{m}$ soll mit NIR (nahes Infrarot) abgekürzt werden, der Bereich von 3 bis $7\ \mu\text{m}$ mit MIR (mittleres Infrarot) und der Bereich von 7 bis $14\ \mu\text{m}$ mit LIR (langwelliges Infrarot). Der Bereich oberhalb $14\ \mu\text{m}$ (mit FIR als fernes IR abgekürzt) hat für die Wärmebildtechnik nur untergeordnete Bedeutung. MIR und LIR werden auch als thermisches Infrarot bezeichnet.

1.1 Radiometrische Kette

Die Funktion von Wärmebild- oder Thermographiesystemen wird durch die radiometrische Kette in Abb. 1.2 veranschaulicht, deren einzelne Komponenten in den nachfolgenden Kapiteln behandelt werden.

Die Aufklärung der Wirkungsweise von Thermographiesystemen beginnt mit den Strahlungsgesetzen der Objektszene. Diese setzt sich zusammen aus dem zu erkennenden oder zu vermessenden Objekt und dem Hintergrund. Die von Objekt und Hintergrund ausgesandte Strahlung durchdringt die Atmosphäre und wird von der IR-Optik auf den IR-Empfänger fokussiert. Da es für die Thermographie keine dem fotografischen Film adäquaten Empfängermaterialien gibt, wird die Objektszene in einzelne Pixel zerlegt, die zeitlich nacheinander abgetastet und in einer Signalfolge verschlüsselt werden.

Hauptfunktion der Signalverarbeitung ist die Rekonstruktion der Objektszene. Diese wird meist auf einem Monitor zur Anzeige gebracht und kann elektronisch gespeichert und bearbeitet werden. Die Funktionsauslösung kommt in Überwachungssystemen zum Einsatz. Am Ende der Kette steht der Beobachter. Ihm obliegt es, die erhaltenen Informationen zu deuten und angemessen zu reagieren.

Nach dem Schema in Abb. 1.2 kann die Eigenstrahlung von Gegenständen zur Anzeige gebracht werden. Zusätzliche Lichtquellen werden nicht benötigt. Da jeder Gegenstand Eigenstrahlung aussendet, erlaubt diese Technik den Bau passiver Nachtsichtgeräte. Ohne Lichtquellen werden Gegenstände aufgrund ihrer Eigenstrahlung sichtbar. Diese militärisch sehr interessante Möglichkeit hat in den letzten 25 Jahren zu einer rasanten Entwicklung der Wärmebildtechnik geführt. Quasi nebenbei wird die verbesserte Sicht im IR bei Nebel genutzt.

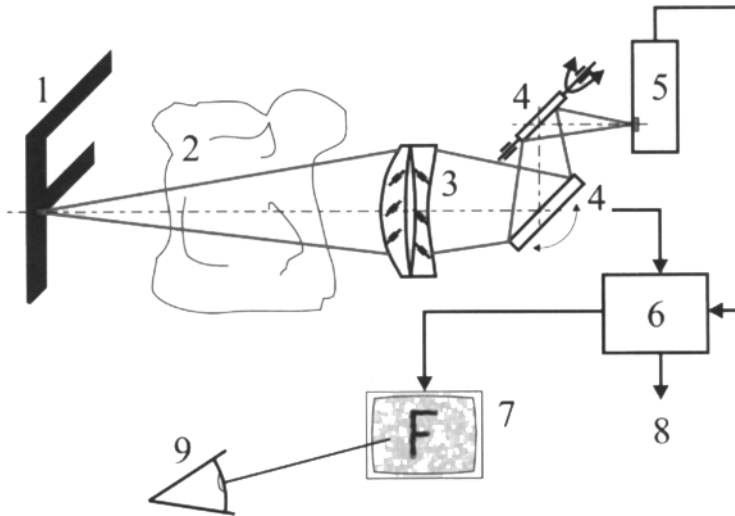


Abb. 1.2: Radiometrische Kette

- 1 Objekt mit Hintergrund, 2 Atmosphäre, 3 sammelnde IR-Optik,
 4 optomechanisches Abtastsystem, 5 IR-Empfänger, 6 Signalverarbeitung,
 7 Anzeigeeinheit, 8 Funktionsauslösung, 9 Beobachter, 10 Koordinatensystem

Zivile Anwendungen wie das Anzeigen von Temperaturfeldern und Strahlungsverteilungen profitieren von der IR-Empfängerentwicklung. Sie haben heute einen festen Platz als zusätzliche Diagnoseverfahren in Industrie, Bauwesen und Medizin gefunden.

1.2 Prinzipien der räumlichen Abtastung

Die Zerlegung der Objektszene in eine Folge zeitlich nacheinander abgetasteter Pixel ist in jedem Camcorder realisiert. Die Objektszene wird vom Objektiv auf eine Empfängermatrix, dem so genannten Focal Plane Array FPA, abgebildet. In jedem Pixel werden Ladungen gesammelt und in einem vorgegebenen Takt nacheinander ausgelesen. Befriedigende Thermographic-Ergebnisse werden auf diesem Wege erst durch die jüngsten IR-FPA-Entwicklungen möglich, deren Herstellung immer noch teuer ist.

Die ersten hochauflösenden Wärmebildsysteme arbeiten mit einem gekühlten Einelement-IR-Empfänger und einem optomechanischen Abtastsystem, welches den Empfängerchip über die Objektszene projiziert. Dieses Prinzip ist in Abb. 1.2 dargestellt.

In Tab. 1.1 sind die wichtigsten, heute zur Anwendung kommenden Kombinationen von Empfängerstruktur und Abtastsystem zusammengestellt. Zwischen den beiden Extremen Einelementempfänger und formatfüllende Matrix erlangen eine Reihe von Kombinationen technische Bedeutung. Sie legen verschiedene Gerätekonzepte fest, deren praktische Umsetzung vom Preis und Anwendungszweck bestimmt ist.

Einelementgeräte zeichnen sich durch eine hohe Gleichmäßigkeit der einzelnen Bildpixel aus. Begrenzend auf die Anzahl der pro Zeiteinheit abgetasteten Bildpixel wirkt der Schwingspiegel, der eine oszillierende Bewegung ausführen muss.

Formatfüllende Zeilen erlauben kostengünstige Lösungen bei Überwachungsaufgaben, wobei die Relativbewegung zwischen Kamera und Objektszene vom Prozess vorgegeben und mit der Bildaufnahme gekoppelt ist.

Tab. 1.1: Moderne Abtastprinzipien der Wärmebildtechnik

| Empfängerstruktur | optomechanisches Abtastsystem | typische Anwendung | Gerätebeispiele |
|---|---|--|--|
| Einelementempfänger | Schwingspiegel und Spiegelpolygon | Messkamera hoher thermischer Auflösung | AGEMA 900 LW FSI IQ 812 inframetrics 760 |
| formatfüllende Zeile | ohne | Überwachung von Fertigungslinien, Luftaufklärung | ZKS 128 (Hermann et al. 1991) |
| Zeile mit ganzzahligem Bruchteil der Bildzeilenzahl | Spiegelpolygon mit unterschiedlich geneigten Facetten | Messkamera mäßiger räumlicher Auflösung | Avio TVS 2100 FSI IQ 325 |
| Matrix mit ganzzahligen Bruchteilen der horizontalen und vertikalen Bildpixelzahl | Spiegelpolygon mit unterschiedlich geneigten Facetten | Geräte hoher Reichweite | Orphelios-Modul (Nolting 1994) |
| pyroelektrisches Vidikon | ohne | Sichtgerät geringer thermischer Auflösung | EEV Thermal Cameras (1987) |
| formatfüllende Matrix | ohne | Sichtgeräte hoher thermischer Auflösung | Amber Sentinel Mitsubishi IR M500 inframetrics Therma-CAM |

Schnelldrehende Spiegelpolygone mit unterschiedlich geneigten Facetten führen eine gleichförmige Drehbewegung aus und tasten bei einer Polygonumdrehung die Objektszene vollständig ab. Die Polygondrehung realisiert die Abtastung entlang der Zeilen, die unterschiedliche Facettenneigung die Abtastung des Bildes (vgl. Kap. 5.4.3). Die Pixelzahl der dazugehörigen IR-Empfänger-Arrays ist dem Polygon angepasst: Das Produkt aus Facettenzahl und Zeilenzahl des Arrays ist gleich der Zeilenzahl des IR-Bildes, die Pixelzahl in der IR-Bild-Zeile ist ein ganzzahliges Vielfaches der Pixelzahl der Empfänger-Array-Zeile. Diese auch als Mikro-Scan-Systeme bezeichneten Kombinationen erlauben die Minimierung der Rauschbandbreite.

Pyroelektrische Vidikons sind die ältesten bildauflösenden IR-Empfänger: Das klassische Vidikonprinzip mit Elektronenstrahlabtastung der abgebildeten Objektszene wird durch Verwendung spezieller Empfängermaterialien für den thermischen IR-Strahlungsbereich sensibilisiert. Nachteil dieser Lösung ist die schlechte thermische und räumliche Auflösung.

Formatfüllende IR-Matrizen kommen ohne mechanisch bewegte Teile aus. Die Gleichmäßigkeit der Empfängerpixel, ihre schnelle Auslesung und ihre Kalibrierung muss im Herstellungsprozess berücksichtigt werden.

Die klassische Halbleitertechnik ist nicht für die Empfängerpixel einsetzbar, da die Halbleitermaterialien Ge, Si und GaAs im thermischen IR transparent sind und als Linsenmaterialien eingesetzt werden.

1.3 Historische Fakten zur Thermographie

Im Jahre 1800 entdeckt William Herschel Wärmestrahlung, die für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. Er lässt Sonnenlicht durch ein Dispersionsprisma fallen und weist die Strahlung jenseits des sichtbaren roten Lichtes mit einem Thermometer nach. Diese infrarote Strahlung gehorcht den gleichen physikalischen Gesetzen wie sichtbares Licht.

1830 entdeckt Nobili die ersten Thermoelemente, 1833 schaltet Melloni diese in Reihe und realisiert die erste Thermosäule. Mit diesen kann die IR-Strahlung in ein elektrisches Signal gewandelt werden.

1880 wird erstmals die Änderung des elektrischen Widerstandes mit der Temperatur zur Detektion infraroter Strahlung benutzt. Mit der Anordnung dieser Thermistoren als Brückenschaltung ist das erste Bolometer realisiert.

Zwischen 1870 und 1920 erlaubt der technische Fortschritt die Herstellung der ersten Quantendetektoren. Ihr völlig neues Wirkprinzip kommt ohne die Umsetzung der Strahlung in eine Temperaturänderung aus und führt zu um Größenordnungen höheren Empfindlichkeiten und kürzeren Reaktionszeiten. Ihr Empfindlichkeitsbereich endet im NIR. Als erstes Wärmebildgerät kann der in den 20er Jahren entwickelte Evapograph gelten. Genutzt wird der schon von Herschel entdeckte temperaturabhängige Niederschlag von organischen Dämpfen auf einer Membran. Die thermische Szene wird auf die Membran abgebildet, deren Strahlungsabsorption mittels spezieller Schwärzungsschichten maximiert ist. Hinter der Membran wird in einer speziellen Zelle durch gezielte Temperierung und Druckeinstellung der sichtbare Dampf-niederschlag optimiert. Bei Belichtungszeiten von 30 s können Temperaturentwürfe bis 1 K erreicht werden (Kriksunov, Padalko 1987). Militärische Anwendung findet der von 1930 von Gudden, Görlich und Kutscher in Deutschland entwickelte PbS-Quantenempfänger. Sein Empfindlichkeitsbereich von 1,5...3 μm verlängert den Sichtbereich von Peilgeräten. Mit InSb-Quantenempfängern (Empfindlichkeitsbe-

reich von 3...5 μm) wird die Reichweite deutscher Peilgeräte im II. Weltkrieg bis zu 30 km für Schiffe und 7 km für Panzer gesteigert. Die dazu notwendigen Optiken liefert Carl Zeiss Jena, wo ab 1940 das bis ins LIR durchlässige Linsenmaterial KRS-5 als Kristall aus der Schmelze gezogen wird.

Die weitere Entwicklung der Quantenempfänger wird durch Militäranwendungen vorangetrieben: Mitte der 50er Jahre werden die ersten selbstlenkenden Raketen mit IR-Zielsuchköpfen in Dienst gestellt.

Die thermischen Detektoren bleiben vorrangig der zivilen Nutzung vorbehalten: Im Jahre 1954 werden bildgebende Kameras auf Thermosäulenbasis (20 min Belichtungszeit pro Bild) und auf Bolometerbasis (4 min Belichtungszeit pro Bild) vorgestellt.

1960 wird der Halbleiter HgCdTe als Empfängerwerkstoff vorgeschlagen: Mit ihm kann der LIR-Bereich schnell und empfindlich aufgelöst werden.

1964 stellt die schwedische Firma AGA ihr Thermographiesystem 660 vor. Es ist 40 kg schwer, benutzt einen optomechanischen Scanner mit gekühltem InSb-Einelementsensor und benötigt 1/16 s für den Aufbau eines Bildes. Parallel dazu werden die ersten FLIR (Forward Looking Infra-Red)-Systeme auf Kampfflugzeugen installiert: Mit gekühlten InSb- und Ge: Hg-Einelementempfängern und optomechanischen Scannern wird die thermische Eigenstrahlung von weit entfernten Objekten sichtbar gemacht.

Mitte der 70er Jahre gelingt es, Vidikons durch Aufbringen pyroelektrischer Empfängermaterialien bis in den LIR-Bereich zu sensibilisieren. Diese „Pyrikons“ mit ihrer unmittelbaren Anbindung an die Fernsehtechnik liefern Echtzeitbilder mit einer thermischen Auflösung von 1 K. Die Fernsehtechnik hält Einzug in die Konzipierung von Wärmebildgeräten.

In den 80er Jahren profitieren die kommerziellen Thermokameras von den Fortschritten der Quantenempfängerentwicklung: Mit der Beherrschung der HgTeCd-Technologie kann das LIR-Gebiet genutzt werden. 1986 stellt AGEMA das Thermographiesystem 870 mit einem Sprite-Empfänger vor, dessen Funktion mit der einer Empfängerzeile vergleichbar ist.

Anfang der 90er Jahre entdecken viele Hersteller den zivilen Markt: Mit Flüssigstickstoff gekühlte Einelementempfänger-Systeme erreichen die besten Auflösung, Software-Pakete erleichtern die Speicherung und Interpretation der Thermogramme. Die Errungenschaften der Computertechnik werden integriert.

Seit 2000 drängen thermische Empfängerarrays auf den Markt, die keine Kühlung und keine optomechanische Abtastung benötigen und für viele kommerzielle Anwendungen eine sinnvolle thermische und räumliche Auflösung bieten. Zusätzlich werden Systemlösungen mit gekühlten FPA, die früher ausschließlich der militärischen Nutzung vorbehalten waren, für zivile Anwendungen bereitgestellt (Thermosensorik 2001).

Die Empfängerentwicklung führt zur Unterscheidung von drei Generationen von Wärmebildgeräten (Kürbitz 1997): Mit der ersten Generation werden Echtzeitbilder realisiert, wobei die geometrische Auflösung und die Bildhomogenität im Vergleich zu normalen Fernsehbildern Wünsche offen lassen. Die Temperaturentauung dieser durchweg scannenden Systeme erreicht 0,2 K. Wärmebildgeräte der zweiten Generation kommen der Fernsehqualität nahe und verwenden thermische Referenzen, um die Nichtuniformität des Bildes zu korrigieren. Die thermische Auflösung liegt unter 0,1 K. Wärmebildgeräte der dritten Generation arbeiten mit großen Empfängerar-

rays, die ohne oder höchstens mit kleinen optomechanischen Scanbewegungen (sog. Mikro-Scans) auskommen. Fernsehqualität soll bei einer Temperrauflösung unter 0,05 K erreicht werden.

2 Mathematische Grundlagen zur Beschreibung der Signalverarbeitung

Die Prinzipdarstellung zur Funktion von Wärmebildsystemen in Abb. 1.2 enthält in der Objektszene zwei Signalarten: die determinierte Objektstruktur mit einer bestimmten Temperatur und das durch statistische Größen beschreibbare Hintergrundrauschen. Zur Vereinfachung wird im Folgenden immer vorausgesetzt, dass das Wärmebildgerät eine thermische Szene sichtbar macht, in der die Strahlungsverteilung zeitlich konstant angenommen wird. Die energetischen Größen des Objektes $f_{opt}(x, y)$ sind damit eine Funktion des Ortes, wobei x und y ein rechtwinkliges Koordinatensystem in der Objektszene aufspannen. Die dazu senkrecht stehende z -Achse kennzeichnet den Abstand der Objektszene vom Thermographiesystem.

Die Abtastverfahren aus Tab. 1.1 zerlegen die Objektszene in eine zeitliche Folge elektrischer Größen $f_{el}(t)$. Ihr Verhalten über der Zeit t bestimmt letztendlich die Qualität des Thermographiesystems. Dem determinierten Signal sind ein thermisches und elektrisches Rauschen überlagert, welche durch statistische Größen beschrieben werden müssen.

2.1 Frequenzanalyse determinierter Signale

Die Signalwandlung entlang der radiometrischen Kette verlangt eine einfache Beschreibung der Beeinflussung durch die einzelnen Komponenten. Die lineare Filtertheorie (Kreß, Irmer 1990) bietet dazu einen zweckmäßigen Ansatz. Die Einwirkung der einzelnen Komponenten wird als Frequenzverhalten modelliert. Dazu wird auf die Fourier-Transformation zurückgegriffen, deren allgemeines Bildungsgesetz im eindimensionalen Fall durch die Integrale

$$f(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(v) \cdot \exp[j2\pi \cdot r \cdot v] \cdot dv \quad \text{und} \quad \tilde{f}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} f(r) \cdot \exp[-j2\pi \cdot r \cdot v] \cdot dr \quad (2.1)$$

beschrieben werden. Die Funktion $f(r)$ charakterisiert den räumlichen oder zeitlichen Verlauf einer physikalischen Größe, $\tilde{f}(v)$ ist das Spektrum oder die Frequenzfunktion der physikalischen Größe.

Die Variable r bezeichnet eine Ortskoordinate (Maßeinheit mm bzw. mrad) oder eine Zeitkoordinate (Maßeinheit s). Die Variable ν kennzeichnet eine Ortsfrequenz (Maßeinheit mm^{-1} bzw. mrad^{-1}) oder eine zeitliche Frequenz (Maßeinheit Hz). Rein mathematisch sind für die Variablen r und ν positive und negative Werte zugelassen. Physikalisch sinnvoll sind nur positive Frequenzen, so dass in den Lösungsbeispielen nur Darstellungen $\tilde{f}(\nu)$ für positive ν angegeben werden. Die in Tab. 2.1 aufgeführten allgemeinen Eigenschaften der Fourier-Transformation können zur Lösung von Übungsaufgaben herangezogen werden.

Tab. 2.1: Eigenschaften der Fourier-Transformation (Korn, Korn 1968)

| Theorem | Orts- oder Zeitfunktion | Fourier-Spektrum |
|----------------------|--|---|
| Linearität | $c_1 \cdot f_1(r) + c_2 \cdot f_2(r)$ | $c_1 \cdot \tilde{f}_1(\nu) + c_2 \cdot \tilde{f}_2(\nu)$ |
| Ähnlichkeitssatz | $f(a \cdot r)$ | $\frac{1}{ a } \cdot \tilde{f}\left(\frac{\nu}{a}\right)$ |
| Verschiebungssatz | $f(r - r_0)$ und $f(r) \cdot \exp(+j2\pi \cdot \nu_0 r)$ | $\tilde{f}(\nu) \cdot \exp(-j2\pi \cdot r_0 \nu)$ und $\tilde{f}(\nu - \nu_0)$ |
| Faltungssatz | $f_1(r) * f_2(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(s) \cdot f_2(r - s) \cdot ds$ $f_1(r) \cdot f_2(r)$ | $\tilde{f}_1(\nu) \cdot \tilde{f}_2(\nu)$ $\tilde{f}_1(\nu) * \tilde{f}_2(\nu)$ |
| Differentiationssatz | $\frac{df(r)}{dr}$ und $(-j2\pi \cdot r) \cdot f(r)$ | $(j2\pi \cdot \nu) \tilde{f}(\nu)$ und $\frac{d\tilde{f}(\nu)}{d\nu}$ |
| Integrationsatz | $\int_{-\infty}^r f(s) \cdot ds$ und $\left[\frac{-1}{j2\pi \cdot r} + \frac{1}{2} \delta(r) \right] f(r)$ | $\left[\frac{1}{j2\pi \nu} + \frac{1}{2} \delta(\nu) \right] \tilde{f}(\nu)$ und $\int_{-\infty}^{\nu} \tilde{f}(\mu) \cdot d\mu$ |

Wichtige Funktionen zur Beschreibung technischer Zusammenhänge sind in Tab. 2.2 zusammengestellt. Im Allgemeinen sind die Fourier-Spektren Funktionen komplexer Zahlen, die sich in der Form $\tilde{f}(\nu) = |\tilde{f}(\nu)| \exp [j\psi(\nu)]$ darstellen lassen. Der Betrag kennzeichnet den Amplitudenfrequenzgang, $\psi(\nu)$ den Phasenfrequenzgang. Je nach der Natur der physikalischen Größe, die mit der Fourier-Transformation beschrieben wird, muss entschieden werden, ob $|\tilde{f}(\nu)|$ den Vorgang ausreichend beschreibt oder ob der Phasenfrequenzgang ebenfalls berücksichtigt werden muss. Die Gaußsche Glockenkurve verändert bei der Fourier-Transformation ihre grundlegende Form nicht. Der Dirac-Impuls mit den Eigenschaften $\int_{-\epsilon}^{\epsilon} c \cdot \delta(r) \cdot dr = c$ für beliebige ϵ und $c \cdot \delta(r) = 0$ für $r \neq 0$ dient der Simulation der Signalverformungen durch die Systemkomponen-

ten. Die Spaltfunktion eignet sich z. B. zur Beschreibung der Empfindlichkeitsverteilung von Empfängerpixeln. Ihre Fourier-Transformierte $(\sin X)/X$ wird oft als sinc-Funktion bezeichnet. Eine exponentiell abklingende Zeitfunktion entspricht in ihrem Frequenzverhalten einem Tiefpass.

Für die Kreisfunktion, den idealen Tiefpass und die ideale optische Abbildung werden rotationsymmetrische Verteilungen vorausgesetzt, so dass zur Lösung der Integralgleichungen (2.1) Eigenschaften der Hankel-Transformation genutzt werden können. \mathfrak{J}_1 kennzeichnet dabei die Bessel-Funktion erster Ordnung.

Tab. 2.2: Beispiele wichtiger Transformationsbeziehungen (Papoulis 1968)

| | Orts- oder Zeitfunktion | Fourier-Spektrum |
|---|--|--|
| Bedeutung der Variablen | Ortsabhängigkeit: $r \equiv x, y$, Radius Zeitabhängigkeit: $r \equiv t$ | $v \equiv \psi$ objektseitige Ortsfrequenz $v \equiv v'$ empfängerseitige Ortsfrequenz $v \equiv f$ zeitliche Frequenz |
| Gauß-Verteilung mit $r_0 =$ Breite der Verteilung | $f(r) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right]$ | $\tilde{f}(v) = \sqrt{2\pi} \cdot r_0 \cdot \exp\left[-2 \cdot (\pi \cdot r_0 \cdot v)^2\right]$ |
| Dirac-Impuls | $f(r) = c \cdot \delta(r)$ | $\tilde{f}(v) = c$ |
| Spaltfunktion mit $r_0 =$ Breite des Spaltes | $f(r) = \begin{cases} \frac{1}{r_0} & \text{für } r \leq \frac{r_0}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ | $\tilde{f}(v) = \frac{\sin \pi \cdot r_0 \cdot v}{\pi \cdot r_0 \cdot v}$ |
| Tiefpass mit $a =$ Abklingkonstante | $f(r) = \begin{cases} a \cdot \exp(-ar) & \text{für } r \geq 0 \\ 0 & \text{für } r < 0 \end{cases}$ | $\tilde{f}(v) = \frac{1}{1 + j \cdot 2\pi \frac{v}{a}}$ $ \tilde{f}(v) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi \frac{v}{a}\right)^2}}$ |
| Kreisfunktion mit $r_0 =$ Radius des Kreises | $f(r) = \begin{cases} 1 & \text{für } r = \sqrt{x^2 + y^2} \leq r_0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ | $\tilde{f}(v) = \frac{r_0}{2\pi \cdot v} \mathfrak{J}_1(r_0 \cdot 2\pi \cdot v)$ |
| Idealer Tie fpass mit $v_g =$ Grenzfrequenz | $f(r) = 2\pi \cdot v_g^2 \left[\frac{\mathfrak{J}_1(2\pi \cdot v_g \cdot r)}{2\pi \cdot v_g \cdot r} \right]$ | $\tilde{f}(v) = \begin{cases} 1 & \text{für } 0 \leq v \leq v_g \\ 0 & \text{für } v > v_g \end{cases}$ |

2.1.1 Fraunhofersche Beugung

Ein praktisches Beispiel für die Nutzung der Fourier-Transformation ist die beugungsbe-grenzte optische Abbildung. Beugungsbe-grenzt heißt, dass die Unschärfe des Bildes durch die Beugung der Strahlung an den Öffnungen der IR-Optik bestimmt ist. Schon die mathematische Formulierung der Fraunhoferschen Beugung ist als Fourier-Integral interpretierbar: Die komplexe Amplitude der Lichterregung in der Empfängerebene berechnet sich nach

$$\tilde{a} = c \iint_{x_p, y_p} f_O \cdot \exp \left\{ \frac{2\pi j}{\lambda} [(\alpha_0 - \alpha)x_p + (\beta_0 - \beta)y_p] \right\} dx_p dy_p, \quad (2.2)$$

wobei $(\alpha_0 - \alpha)$ und $(\beta_0 - \beta)$ die Richtungsänderung des Lichtes infolge Beugung kennzeichnen (Mathieu 1965). Die Maßeinheit dieser beiden Differenzen ist Eins. Alle geometrischen Größen sind in Abb. 2.1 dargestellt. c ist eine energetische Konstante, f_O die Ein-flussfunktion in der Öffnung, x_p und y_p sind die Koordinaten der beugenden Öffnung. Die Koordinaten x', y' in der Empfängerebene werden vom Durchstoßpunkt der optischen d'_0 Achse durch die Empfängerebene gemessen.

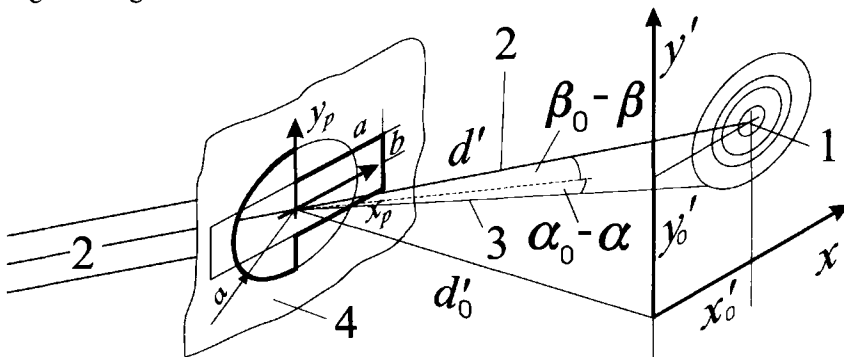


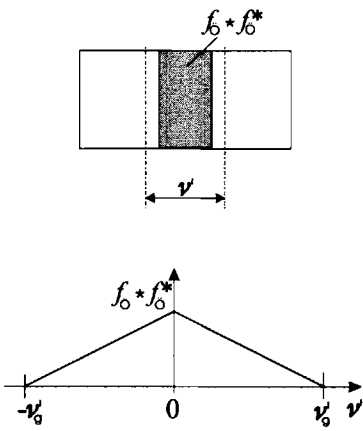
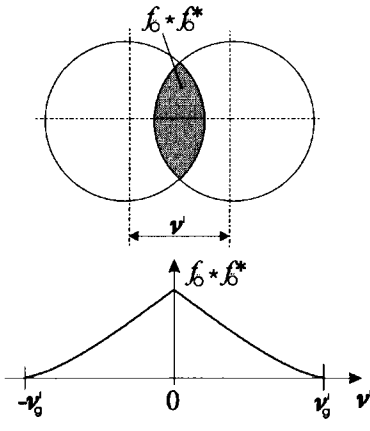
Abb. 2.1: Geometrische Verhältnisse bei der Fraunhoferschen Beugung

- 1 Auftreffpunkt des ungebeugten Lichtes auf der Empfängerebene und Zentrum der Beugungsfigur mit den Koordinaten (x'_0, y'_0) ,
- 2 Richtung der ungebeugten Strahlung,
- 3 Richtung eines gebeugten Strahles, 4 beugende Öffnung

Das z. B. in (Born, Wolf 1975) abgeleitete Ergebnis folgt auch durch Anwenden der in Tab. 2.2 angegebenen Korrespondenzen. Mit der f_O -Definition in Tab. 2.3 können die Integrationsgrenzen unendlich gesetzt werden. Für die Beugung an der Rechtecköffnung mit der Fläche $4ab$ wird die Transformation der Spaltfunktion entlang der beiden unabhängigen Koordinaten x_p, y_p angewendet. Der Spaltbreite r_0 entsprechen $2a$ bzw. $2b$, der Frequenz ν die Quotienten

$(\alpha_0 - \alpha)/\lambda$ bzw. $(\beta_0 - \beta)/\lambda$. Die daraus folgende komplexe Amplitude ist in Tab. 2.3 angegeben.

Tab. 2.3: Anwendung der Fourier-Transformation für die beugungsbegrenzte optische Abbildung (Anfang)

| Objektivöffnung | Rechteck mit Fläche $4 a \cdot b$ | Kreis mit Fläche πa^2 |
|--|---|---|
| Einflussfunktion der Öffnung | $f_{\tilde{O}} = \begin{cases} 1 & \text{für } \begin{cases} x_p \leq a \\ y_p \leq b \end{cases} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ | $f_{\tilde{O}} = \begin{cases} 1 & \text{für } r = \sqrt{x^2 + y^2} \leq a \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ |
| komplexe Amplitude der Lichterregung in der Empfängerebene | $\tilde{a} = c \cdot a \cdot b \cdot \frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} (\alpha_0 - \alpha) \cdot a}{\frac{2\pi}{\lambda} (\alpha_0 - \alpha) \cdot a}$ <ul style="list-style-type: none"> • $\frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} (\beta_0 - \beta) \cdot b}{\frac{2\pi}{\lambda} (\beta_0 - \beta) \cdot b}$ | $\tilde{a} = \frac{c \cdot \lambda \cdot a}{2\pi \cdot (\gamma_0 - \gamma)} \mathfrak{S}_1 \left[\frac{2\pi}{\lambda} a \cdot (\gamma_0 - \gamma) \right]$ |
| numerische Apertur | $NA'_x = a/d', NA'_y = b/d'$ | $NA' = a/d'$ |
| normiertes Beugungsbild PSF (Point Spread Function) | $\text{PSF}(x', y') = \left[\frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} (x' - x'_0) \cdot NA'_x}{\frac{2\pi}{\lambda} (x' - x'_0) \cdot NA'_x} \right]^2$ <ul style="list-style-type: none"> • $\left[\frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} (y' - y'_0) \cdot NA'_y}{\frac{2\pi}{\lambda} (y' - y'_0) \cdot NA'_y} \right]^2$ | $\text{PSF}(r') = \left[\frac{2\mathfrak{S}_1 \left(\frac{2\pi}{\lambda} r' NA' \right)}{\left(\frac{2\pi}{\lambda} r' NA' \right)} \right]^2$ |
| Faltung der Einflussfunktion der Öffnung im Frequenzraum |  |  |

Tab. 2.3: Anwendung der Fourier-Transformation für die beugungsbegrenzte optische Abbildung (Fortsetzung)

| Objektivöffnung | Rechteck mit Fläche $4 a \cdot b$ | Kreis mit Fläche πa^2 |
|-------------------------------------|---|---|
| Modulationsübertragungsfunktion MTF | $M_O(v'_x) = 1 - \frac{v'_x}{v'_{gx}} \quad \text{mit } v'_{gx} = \frac{2}{\lambda} NA'_x$ bzw. $M_O(v'_y) = 1 - \frac{v'_y}{v'_{gy}} \quad \text{mit } v'_{gy} = \frac{2}{\lambda} NA'_y$ | $M_O(v') = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \frac{v'}{v'_g} - \frac{v'}{v'_g} \sqrt{1 - \left(\frac{v'}{v'_g} \right)^2} \right]$ mit $v'_g = \frac{2}{\lambda} NA'$ |

Für die Beugung an der Kreisöffnung mit der Fläche πa^2 wird die Transformation der Kreisfunktion mit dem Radius $r_0 = a$ angewendet. Für die Frequenz wird $v = \frac{2\pi}{\lambda} (\gamma_0 - \gamma)$ gesetzt, wobei $(\gamma_0 - \gamma)$ die Richtungsänderung der Strahlung infolge Beugung als Polarkoordinaten beschreibt

$$(\gamma_0 - \gamma)^2 = (\alpha_0 - \alpha)^2 + (\beta_0 - \beta)^2.$$

Die damit folgende komplexe Amplitude enthält die Bessel-Funktion. Beide komplexen Amplituden der Lichterregung sind proportional der energetischen Konstanten c und einer Fläche. Sie beschreiben die Überlagerung der Wellenfronten in der Empfängerebene.

In der praktischen Optik wird zur Beschreibung der Größe eines Strahlenbündels der Begriff der numerischen Apertur NA verwendet. Ausgehend von ihrer exakten Definition $NA = n \cdot \sin u$ mit u halber Öffnungswinkel des Strahlenbündels und n Brechzahl des Mediums, in dem das Strahlenbündel verläuft, kann nach Abb. 2.1 für die Bündelbegrenzung durch den Kreis die Näherung $NA' \approx a/d'$ eingeführt werden. Die Brechzahl im Empfängerraum ist Eins. Für die Bündelbegrenzung am Rechteck ist die numerische Apertur richtungsabhängig:

$$NA'_x = \frac{a}{d'}, \quad NA'_y = \frac{b}{d'}.$$

Damit können in den komplexen Amplituden die beugungsbedingten Richtungsänderungen ersetzt werden: Für das Rechteck gelten

$$(\alpha_0 - \alpha) = \frac{x' - x'_0}{d'} = \frac{(x' - x'_0) \cdot NA'_x}{a} \quad \text{bzw.} \quad (\beta_0 - \beta) = \frac{y' - y'_0}{d'} = \frac{(y' - y'_0) \cdot NA'_y}{b},$$

für die Beugung an der kreisförmigen Öffnung mit $r' = \sqrt{(x' - x'_0)^2 + (y' - y'_0)^2}$ die Umformung

$$(\gamma_0 - \gamma) = \frac{r'}{d'} = \frac{r' \cdot NA'}{a}.$$

Damit werden die komplexen Amplituden zu Funktionen der numerischen Aperturen und der Empfängerebenenkoordinaten.

2.1.2 Normiertes Beugungsbild PSF

Ein messbares Signal wird durch die einfallende Strahlungsleistung pro Fläche hervorgerufen. Diese ist proportional dem Betrag der Lichterregung in der Empfängerfläche und hat die Dimension W/m^2 . Sie entspricht der photometrischen Größe Bestrahlungsstärke: $E \sim \tilde{a} \cdot \tilde{a}^*$.

Die charakteristische Strahlungsverteilung im Beugungsbild ergibt sich durch die Normierung auf das zentrale Maximum. Diese relative Strahlungsverteilungsfunktion wird als PSF (Point Spread Function) bezeichnet:

$$\text{PSF}(x', y') = \frac{\tilde{a}(x', y') \cdot \tilde{a}^*(x', y')}{\tilde{a}(x' = x'_0, y' = y'_0) \cdot \tilde{a}^*(x' = x'_0, y' = y'_0)} \quad (2.3)$$

Die PSF-Formeln für die Beugung am Rechteck und am Kreis sind in Tab. 2.3 eingetragen.

Abb. 2.2 zeigt die typische Wirkung unterschiedlicher begrenzender Öffnungen: Je größer die numerische Apertur, desto schmäler ist die Beugungsfigur. Das erste Minimum folgt für den Wert π im Argument der Sinusfunktion der PSF: Sein Abstand vom Zentrum der Beugungsfigur ist $r'_{\min} = \frac{\lambda}{2NA'}$, wenn NA' die wirksame Apertur angibt.

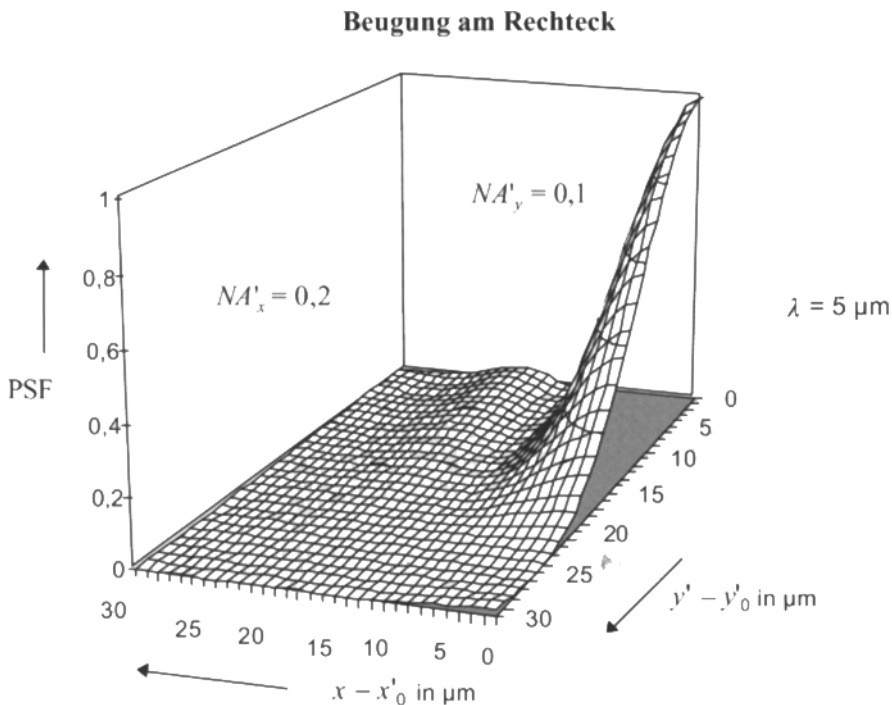


Abb. 2.2: Schnitt durch die beugungsbedingte PSF in x' - und y' -Richtung

Für das in Abb. 2.2 dargestellte Beispiel ist in x' -Richtung das erste Minimum $12,5 \mu\text{m}$ vom Zentrum entfernt, in y' -Richtung $25 \mu\text{m}$. Dieser Abstand kann auch als Kehrwert einer Ortsfrequenz interpretiert werden:

$$\nu'_g = \frac{1}{r'_{\min}} = \frac{2}{\lambda} NA'. \quad (2.4)$$

Die Ortsfrequenz ν'_g kennzeichnet in einfacher Weise die Begrenzung der räumlichen Auflösung durch die Beugung.

Die beugungsbedingte PSF des Kreises ist rotationssymmetrisch. Der Schnitt durch das Zentrum der Beugungsfigur an einer kreisförmigen Blendenöffnung ist in Abb. 2.3 dargestellt. Sie verbreitert sich mit der Wellenlänge. In ihrer Gestalt erinnert sie an die Schnitte in x' - und y' -Richtung in Abb. 2.2. Deshalb kann die recht aufwendige Berechnung der Kreis-PSF über die Bessel-Funktion durch die Näherung

$$\frac{2\mathfrak{S}_1(\pi \cdot x)}{\pi \cdot x} \approx \frac{\sin(\pi \cdot x \cdot 0,8607)}{(\pi \cdot x \cdot 0,8607)}$$

approximiert werden. In Abb. 2.3 sind die Durchmesser

$$2r'_{\min} = \frac{\lambda}{NA'}$$

eingetragen. Sie kennzeichnen die Größe der Beugungsfigur am Kreis, obwohl sie nicht genau die Nullstelle der Bessel-Funktion markieren.

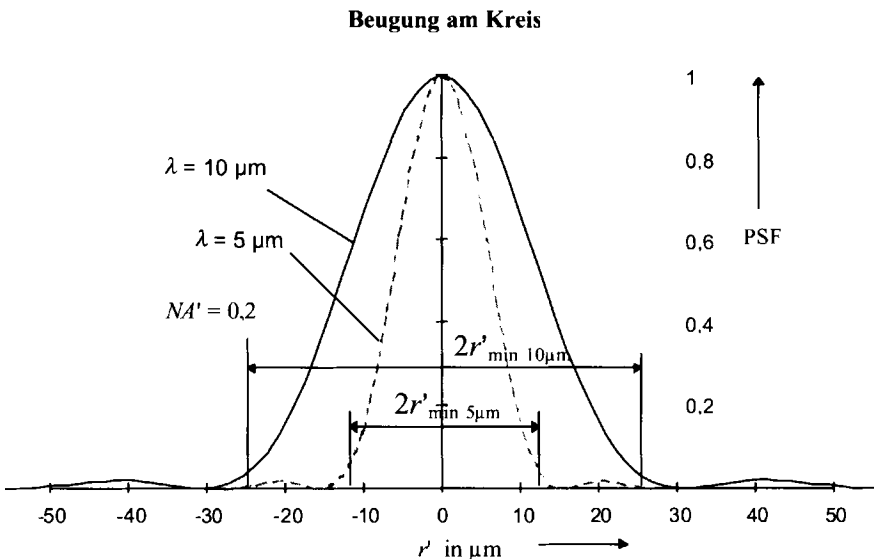


Abb. 2.3: Schnitt durch das Zentrum der beugungsbedingten Kreis-PSF

Aus photometrischen Betrachtungen (Klein, Furtak 1988) folgt die Bestrahlungsstärke in der Empfängerebene zu

$$E(x', y') = \frac{\text{PSF}(x', y')}{\lambda^2} \cdot \Phi \cdot \Omega, \quad (2.5)$$

wobei Φ der Strahlungsfluss in der beugenden Öffnung und Ω der Raumwinkel des Strahlenbündels von der Öffnung zum Punkt (x'_0, y'_0) ist. Die photometrischen Größen werden im Kap. 3 erläutert.

2.1.3 Übertragungsfunktion MTF

Entscheidend für das räumliche Auflösungsvermögen des optischen Systems ist die PSF. Sie ist eine Funktion der Empfängerebenenkoordinaten x', y' . Ihr Frequenzspektrum folgt aus der Fourier-Transformation der PSF und wird nach Normierung auf den Wert Eins bei der Ortsfrequenz Null als optische Übertragungsfunktion OTF (Optical Transfer Function) bezeichnet:

$$\text{OTF}(v') = \frac{\mathbf{F}\{\text{PSF}(x', y')\}}{\mathbf{F}\{\text{PSF}\}(v'=0)} = \text{MTF}(v') \cdot \exp[j \cdot \text{PTF}(v')] \quad (2.6)$$

\mathbf{F} kennzeichnet die Operation der Fourier-Transformation, v' die Ortsfrequenz in der Empfängerebene. Die Amplitudenübertragungsfunktion MTF (Modulation Transfer Function) ist die entscheidende Größe zur Charakterisierung des optischen Systems. Die Phasenübertragungsfunktion PTF (Phase Transfer Function) hat Bedeutung für die Überlagerung von Lichtwellen mit Eigenschaften, die zeitlich zugeordnet werden können.

Der typische Verlauf der MTF bei beugungsbegrenzter Abbildung ergibt sich aus folgender Überlegung: Die MTF ist die Fourier-Transformierte der PSF, die PSF ist die Fourier-Transformierte der komplexen Amplituden $\{\tilde{a} \cdot \tilde{a}^*\}$, diese wiederum sind die Fourier-Transformierten der Einflussfunktion in der Öffnung f_δ . Nach dem Faltungssatz aus Tab. 2.1 gilt $\mathbf{F}\{f_\delta * f_\delta^*\} = \tilde{a} \cdot \tilde{a}^*$, so dass die Faltung der Einflussfunktion in der Öffnung mit sich selbst den typischen Verlauf der MTF angibt. Eine genaue Ableitung ist in (Haferkorn 1986) angegeben. Die Faltung kann man sich vorstellen als Verschiebung der Pupillenflächen zueinander, wobei der Verschiebeweg der Pupillenflächen der Ortsfrequenz v' entspricht. Die Fläche des Überdeckungsgebietes ist der Ordinatenwert von $f_\delta * f_\delta^*$. Bei der Rechtecköffnung nimmt linear mit der Verschiebung beider Zentren zueinander das Überdeckungsgebiet ab. Für $|v'| > v'_g$ wird $f_\delta * f_\delta^* = 0$. Das Resultat ist in Tab. 2.3 für die Faltung in Richtung der Achsen x' und y' eingetragen. Die Verschiebung der beiden Zentren der Kreisapertur liefert einen nichtlinearen Abfall mit zunehmendem Abstand der beiden Zentren. Außerhalb des Überdeckungsgebietes $|v'| > v'_g$ wird $f_\delta * f_\delta^* = 0$.

Die Formeln für die beugungsbedingten MTF bei rechteckiger und runder Begrenzung der Strah-

lenbündel sind in der letzten Zeile von Tab. 2.3 eingetragen. Physikalisch sinnvoll sind nur Frequenzen $\nu' > 0$. Diese Funktionen stellen physikalische Grenzfälle dar, die bei IR-Optiken in der Nähe des technisch realisierbaren liegen. Typischerweise nehmen die MTF mit zunehmender Ortsfrequenz ab, d. h., je feiner ein zu übertragendes Gitter ist, desto größer sind die Übertragungsverluste.

2.2 Beschreibung nichtdeterminierter Signale

Beispiele für nichtdeterminierte Signale in der radiometrischen Kette sind das Photonenrauschen der Objektszene und das Detektorrauschen. Nichtdeterminierte Signale werden beschreibbar, wenn sie Wahrscheinlichkeitsgesetzen gehorchen, d. h., wenn sie mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsdichte $\varphi(X)$ auftreten. Die Zufallsgröße X kann dabei eine elektrische Spannung oder eine thermische Objektausstrahlung sein, die über die Zeit oder über den Ort bestimmte Werte annimmt. Die Wahrscheinlichkeit P , dass das Rauschsignal im Bereich $X_1 \dots X_2$ auftritt, ist durch

$$P = \int_{X_1}^{X_2} \varphi(X) \cdot dX \quad (2.7)$$

gegeben. Die Wahrscheinlichkeit, dass alle möglichen Werte angenommen werden, muss gleich

Eins sein: $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(X) \cdot dX = 1$. Dieser Wert entspricht der Fläche unter jeder Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $\varphi(X)$.

In Abb. 2.4 a) ist als Beispiel für die Zufallsgröße X die Ausgangsspannung U einer Fotodiode bei völlig abgeschirmtem Strahlungseinfall angegeben. Sie zeigt deren Änderung zu unterschiedlichen Messzeitpunkten. Die Auswertung der aufgenommenen Messwerte $i = 1, \dots, m$ erfolgt statistisch: Für die allgemeine Zufallsgröße X ist der Mittelwert

$$X_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \quad (2.8 \text{ a})$$

Für das Beispiel strebt $U_m \rightarrow 0$. Die mittlere Streuung X_σ um den Mittelwert ergibt sich aus der Varianz

$$X_\sigma^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (X_i - X_m)^2 \quad (2.8 \text{ b})$$