

1 Einleitung

1.1 Infrarotstrahlung

1.1.1 Technische Anwendungen

Infrarot-(IR-)Strahlung ist elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen der sichtbaren Strahlung (oft als VIS, von engl. *visible*, abgekürzt; $\lambda = 380 \dots 780 \text{ nm}$) und Mikrowellenstrahlung ($\lambda = 1 \text{ mm} \dots 1 \text{ m}$). IR-Strahlung hat einige physikalische Eigenschaften, die sie für eine Reihe von technischen Anwendungen prädestiniert:

- Jeder Körper sendet elektromagnetische Strahlung aus (siehe Abschnitt 2.3). Die Ausstrahlung ist dabei wellenlängenabhängig und wird von der Temperatur des Körpers bestimmt. Aus der gemessenen Strahlung lässt sich somit auf die Temperatur des Körpers schließen. Dies wird zur berührungslosen Temperaturmessung (Pyrometrie) benutzt.
- Für hohe Temperaturen von einigen 1.000 K liegt das Maximum im sichtbaren Bereich; so hat sich das menschliche Auge mit seiner höchsten Empfindlichkeit bei $\lambda \approx 550 \text{ nm}$ entsprechend an die Oberflächentemperatur der Sonne (ca. 6.000 K) angepasst. Die Ausstrahlung von Körpern bei Raumtemperatur hat dagegen ein Maximum im Infraroten bei rund $10 \mu\text{m}$ (siehe Abbildung 2.7). Damit können einerseits die Anwesenheit und die Bewegung von Personen detektiert werden (Bewegungsmelder, Sicherheitssysteme) oder andererseits mittels IR-Kameras ähnlich wie bei Filmkameras komplette Szenen aufgenommen werden. Letzteres hat den Vorteil, dass in Teilen des IR-Spektrums die Ausbreitung von Strahlung auch bei Nebel oder Dunkelheit möglich ist, was Nachtsichtgeräte und Fahrerassistenzsysteme für schlechte Sichtverhältnisse ermöglicht.
- IR-Kameras lassen sich auch für die Aufnahme von Wärmebildern verwenden, mit denen beispielsweise die Wärmedämmung von Gebäuden, die Temperaturverteilung von Verbrennungsvorgängen oder der Ablauf temperaturabhängiger Prozesse bildlich dargestellt werden können. Kommerzielle Wärmebildkameras erreichen inzwischen Bildauflösungen wie beim hochauflösenden Fernsehen.

- Durch elektromagnetische Strahlung können die Atome in Molekülen zu Schwingungen angeregt werden. Dabei werden z. B. Abstand und Winkel der Bindungen zwischen Atomen periodisch geändert. Jede Bindung besitzt dabei spezifische Resonanzfrequenzen, bei denen eine fast vollständige Absorption der Strahlung erfolgt. Da Strahlungsfrequenz ν und -wellenlänge λ über die Ausbreitungsgeschwindigkeit c gekoppelt sind

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (1.1)$$

weisen chemische Verbindungen bei charakteristischen Wellenlängen Absorption auf. Viele dieser Absorptionswellenlängen liegen im IR-Bereich. Mit IR-Strahlung bestimmter Wellenlänge lassen sich somit die Anwesenheit und die Konzentration bestimmter chemischer Stoffe feststellen, was für die Gasanalyse ausgenutzt wird. Nimmt man komplette Reflexions- oder Transmissionsspektren bestrahlter Proben auf, kann aus der Lage der Absorptionsbanden auf deren chemische Zusammensetzung zurückgeschlossen werden (IR-Spektrometrie).

Betrachtet man die genannten Eigenschaften und entsprechende technische Anwendungen, erkennt man den typischen Aufbau von Infrarotmesssystemen (Tabelle 1.1). Das Messobjekt kann dabei selbst die IR-Strahlungsquelle bilden (Pyrometrie, Wärmebildtechnik, Bewegungsmelder) oder die Transmission der Übertragungsstrecke beeinflussen (Gasanalyse, Spektroskopie/Spektrometrie).

Der Aufbau des Buches erfolgt entsprechend der in Tabelle 1.1 gezeigten Messkette, indem Kapitel 2 zuerst auf die Entstehung und Ausbreitung von elektromagnetischer Strahlung eingeht. Dabei wird sich bei den Strahlungsquellen auf thermische Strahler beschränkt, da sie bei Pyrometern, Wärmebildgeräten und Bewegungsmelder das Messobjekt selbst darstellen oder in der Gasanalyse und der Spektrometrie bevorzugt verwendet werden.

Die Beeinflussung der Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung, wie sie in der Übertragungsstrecke insbesondere bei der Detektion chemischer Spezies stattfindet, wird in Abschnitt 2.1 dargestellt.

Kapitel 3 schildert dann die fotometrischen Grundlagen, die die Abbildung der Fläche der Strahlungsquelle auf die des Sensors bzw. Sensorarrays beinhalten. Da in den meisten Anwendungen die Ausstrahlung der IR-Strahlung von einer Strahlerfläche aus in den Raum erfolgt, wird hier besonderer Wert auf die Raumwinkelbeziehungen zwischen Strahlungsquelle und Sensor gelegt. Klassische optische Elemente wie Linsen, Gitter oder Filter werden, wegen ihrer Vielfalt, und weil wir kein Optik-Buch verfassen wollten, nicht betrachtet. Ausnahme bildet nur der Abschnitt 5.5, wo die für Sensorarrays wichtigen optischen Kenngrößen eingeführt werden.

Die Eigenschaften von infrarot-optischen Sensoren und Sensorarrays werden in Kapitel 5 beschrieben. Da die minimal detektierbaren Strahlungsflüsse bzw. Temperaturdifferenzen durch physikalisch unvermeidliche Rauschprozesse bestimmt werden, führt Kapitel 4 vorbereitend dazu in die Grundlagen und die wichtigsten Rauschquellen bei IR-Sensoren ein.

Tabelle 1.1 Typischer Aufbau von Infrarotsensoren und -messsystemen.

Anwendung	Strahlungsquelle	Übertragungsstrecke	Abbildungssystem	Sensor/-array
Pyrometer	Messobjekt (mit Hintergrund)	Atmosphäre, Lichtwellenleiter	Objektiv, Filter	Ein- oder Mehrelementsensor (meist thermo- oder pyroelektrisch)
Wärmebildgerät	Messobjekt mit Hintergrund/Wärmebildszene	Atmosphäre	Objektiv, Filter	Sensormatrix (FPA Focal Plane Array, meist Bolometer)
Passiv-Bewegungsmelder	Messobjekt mit Hintergrund	Atmosphäre	FRESNEL-Optik	Zweielementsensor (meist pyroelektrisch)
Gassensor	Thermischer (z. B. Glühstrahler, Hotplate) oder nichtthermischer Strahler (LED, Laser)	Gasküvette oder Atmosphäre mit Messgas	Linse, Filter	Mehrelement-sensoren (meist thermo- oder pyroelektrisch)
Spektrometer	Thermische (z. B. Glühstrahler) oder durchstimmbare nicht-thermische Strahler (LED, Laser)	chemische Verbindung	Gitter, Spiegel	Einelement- oder Zelleinsensoren (meist thermo- oder pyroelektrisch)
Behandlung im Buch	Kapitel 2	Abschnitt 2.1	Kapitel 3, Abschnitt 5.5	Abschnitt 2.1, Kapitel 4 bis 6

Kapitel 6 schließlich beschreibt Aufbau und Eigenschaften der wichtigsten thermischen Infrarotsensoren. Wir haben uns hier auf thermische IR-Sensoren beschränkt, weil diese keine Kühlung benötigen und daher auch als Sensorarray miniaturisiert und inzwischen relativ preisgünstig (Wärmebildkameras mit HDTV-Auflösung sind inzwischen zu Preisen von wenigen 1.000 bis 10.000 Euro verfügbar) zur Verfügung stehen. Sie dominieren inzwischen den Markt für zivile Anwendungen deutlich.

Kapitel 7 stellt schließlich überblicksmäßig die Grundlagen aus den vorangegangenen Kapiteln für die in Tabelle 1.1 gezeigten Anwendungen zusammen.

1.1.2

Einteilung der Infrarotstrahlung

Infrarotstrahlung ist hochfrequente elektromagnetische Strahlung. Bei der Ausbreitung in linear-optischen Komponenten (Vakuum, Luft, Glas, Silizium) bleibt die Frequenz ν konstant, während sich die Wellenlänge λ in Abhängigkeit von der Wellenausbreitungs- (Licht-) geschwindigkeit c in verschiedenen Medien ändern kann:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c_0}{n\nu} \quad (1.2)$$

mit c_0 der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und n der Brechzahl. In der Spektroskopie wird häufig die Wellenzahl σ als Kehrwert der Wellenlänge verwendet:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.3)$$

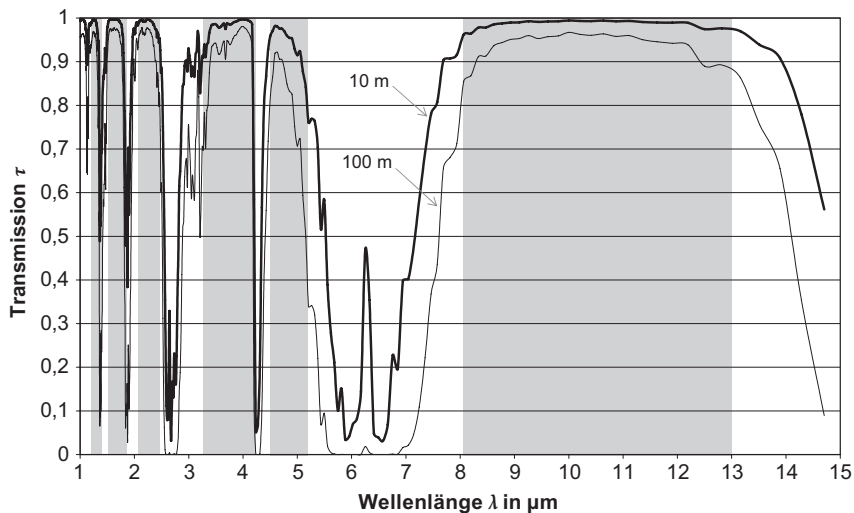


Abbildung 1.1 Typische Transmission der Atmosphäre im Sommer in Mitteleuropa. Parameter: Länge der Übertragungsstrecke.

Tabelle 1.2 Atmosphärische Fenster.

Atmosphärisches Fenster	Infrarot-Region	Wellenlängenbereich in μm	Temperaturbereich der max. Ausstrahlung nach Gl. (2.127) in K	Bemerkungen
I	Nahes Infrarot (NIR)	1,2 ... 1,3	2.415 ... 2.229	Emission heißer Körper ($>1.000\text{ }^\circ\text{C}$)
		1,5 ... 1,7	1.932 ... 1.705	
		2,1 ... 2,4	1.380 ... 1.208	
II	Mittleres Infrarot (MIR)	3,2 ... 4,1	906 ... 707	Emission heißer Körper ($>300\text{ }^\circ\text{C}$) Absorption von CO_2 und anderen Gasen
		4,4 ... 5,2	659 ... 557	
III	Fernes Infrarot (FIR)	8 ... 13	362 ... 223	Emission von Körpern bei Raumtemperatur

Die Einteilung der Wellenlängenbereiche kann nach verschiedenen Kriterien vorgenommen werden. Wir wollen uns im Folgenden auf die Einteilung stützen, die in der Infrarotmesstechnik am häufigsten benutzt wird und die sich aus der Transmission τ der Atmosphäre infolge der Absorption von Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) in der Luft ergibt (Abbildung 1.1). Bei allen Anwendungen, bei denen die Atmosphäre als Übertragungstrecke verwendet wird, kann nur in ausgewählten Wellenlängenbereichen, den atmosphärischen Fenstern, gearbeitet werden (grau gezeichnete Bereiche in Abbildung 1.1; Tabelle 1.2).

Im optimalen Fall liegt das Maximum der spezifischen Ausstrahlung der Strahlungsquelle genau im ausgewählten Bereich (Wiensches Verschiebungsgesetz gemäß Gl. (2.127)).

Entsprechend den atmosphärischen Fenstern von Tabelle 1.2 kann der Infrarotstrahlungsbereich in nahes (NIR), mittleres (MIR), fernes (FIR) und ultrafernes Infrarot (UFIR) unterteilt werden (Tabelle 1.3).

Tabelle 1.3 Einteilung der Infrarotstrahlung.

Bereich	Wellenlänge λ in μm	Wellenzahl σ in cm^{-1}	Frequenz $\nu^{1)}$	Photonenenergie $E^2)$ in eV	
VIS	0,38 ... 0,78	26.316 ... 12.821	789 THz ... 384 THz	3,27 ... 1,59	
IR	NIR	0,78 ... 3	12.821 ... 3.333	384 THz ... 100 THz	1,59 ... 0,41
	MIR	3 ... 6	3.333 ... 1.667	100 THz ... 50 THz	0,41 ... 0,21
	FIR	6 ... 40	1.667 ... 250	50 THz ... 7,5 THz	0,21 ... 0,03
	UFIR	40 ... 1.000	250 ... 10	7,5 THz ... 300 GHz	0,03 ... $1,2\text{ E} - 3$

$$1) E/\text{eV} = \frac{1,241}{\lambda/\mu\text{m}}$$

$$2) \nu/\text{Hz} = \frac{299,8\text{E}12}{\lambda/\mu\text{m}}$$

Monochromatische Strahlung ist dabei Strahlung einer einzelnen Frequenz bzw. Wellenlänge. In den meisten Fällen tritt jedoch Strahlung auf, die sich aus Anteilen vieler Wellenlängen (oder Frequenzen) zusammensetzt, so dass hier die entsprechenden spektralen Bereiche zu betrachten sind.

1.2

Historische Entwicklung

Tabelle 1.4 fasst die historische Entwicklung der Infrarotmesstechnik zusammen. Ausgangspunkt war der Nachweis von Sir WILHELM HERSCHEL im Jahr 1800, dass bei spektraler Zerlegung des Lichtes die größte Erwärmung im unsichtbaren Spektralbereich jenseits des Roten erfolgt (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, XIII, Read April 24, 1800, Seite 272, zitiert in [1.2]). Später zeigte er, dass unsichtbare Strahlung auch von anderen heißen Quellen wie Feuer, einer Kerzenflamme oder einem rotglühenden Ofen emittiert wird und dass sie sich entsprechend den Gesetzen der Optik hinsichtlich Reflexion und Beugung verhält. Nachdem diese Strahlung zuerst „Ultraschwarz“ genannt worden war, erhielt sie später die Bezeichnung „Infrarot“.

Die weiteren Etappen der Entwicklung beschäftigen sich zunächst mit dem Nachweis, dass Wärmestrahlung und elektromagnetische Wellen wesensgleich sind (erste Hälfte des 19. Jhd.). Die Arbeiten von MAX PLANCK zur Formulierung der Lichtquantenhypothese und die Ableitung des PLANCKSchen Strahlungsgesetzes 1900 sowie die Formulierung der Gesetze des äußeren Photoeffekts 1905 und die Annahme stimulierter Emission durch ALBERT EINSTEIN waren dann die entscheidenden Grundlagen für die Quanten-Natur der Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Festkörpern. Damit waren die wesentlichen physikalischen Grundlagen für die technische Nutzung der Infrarotstrahlung für die IR-Messtechnik gelegt.

1.3

Vorteile der Infrarotmesstechnik

Infrarotstrahlung besitzt eine Reihe von Vorteilen, die sie für die berührungslose Temperaturmessung im Speziellen und die Infrarotmesstechnik im Allgemeinen so bedeutungsvoll machen:

- Sie ist berührungslos und damit (fast) rückwirkungsfrei. Da ein Strahlungsenergieaustausch auch vom Sensor zur Strahlungsquelle erfolgt, darf man korrekterweise nicht von Rückwirkungsfreiheit sprechen. Diese Rückwirkung auf die Strahlungsquelle kann aber im Allgemeinen vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 6.1 und Abbildung 6.3).
- Sie trennt Strahlungsquelle und -empfänger räumlich, so dass auch sehr heiße oder auch sonst schwer zugängliche Objekte gemessen werden können.

Tabelle 1.4 Zeittafel zur Entwicklung der Infrarotmesstechnik (nach [1.1] und [1.2]).

Jahr	Ereignis
1800	Entdeckung der Existenz von Wärmestrahlung im Unsichtbaren jenseits von Rot durch W. HERSCHEL
1822	Entdeckung des thermoelektrischen Effekts an einem Antimon-Kupfer-Paar durch T.J. SEEBECK
1830	Thermoelement zur Wärmestrahlungsmessung von L. NOBILI
1833	Thermosäule aus 10 in Reihe geschalteten Sb-Bi-Thermopaaren von L. NOBILI und M. MELLONI
1834	Entdeckung des PELTIER-Effekts an einem stromgespeisten Paar aus zwei unterschiedlichen Leitern durch J.C. PELTIER
1835	Formulierung der Hypothese der gleichen Natur von Licht und elektromagnetischer Strahlung durch A.M. AMPÈRE
1839	Solares Absorptionsspektrum der Atmosphäre und die Rolle des Wasserdampfs durch M. MELLONI
1840	Entdeckung der drei atmosphärischen Fenster durch J. HERSCHEL (Sohn von W. HERSCHEL)
1857	Vereinheitlichung der drei thermoelektrischen Effekte (SEEBECK, PELTIER, THOMSON) durch W. THOMSON (Lord KELVIN)
1859	Zusammenhang zwischen Absorption und Emission durch G. KIRCHHOFF
1864	Theorie der elektromagnetischen Strahlung von J.C. MAXWELL
1879	Empirischer Zusammenhang zwischen Strahlungsintensität und Temperatur eines schwarzen Körpers durch J. STEFAN
1880	Studium der Absorptionseigenschaften der Atmosphäre mittels eines Pt-Bolometerwiderstands durch S.P. LANGLEY
1883	Studium der Transmissionseigenschaften IR-transparenter Materialien durch M. MELLONI
1884	Thermodynamische Ableitung des Gesetzes von STEFAN durch L. BOLTZMANN
1894, 1900	Ableitung der Wellenlängenabhängigkeit der Schwarzkörperstrahlung durch J.W. RAYEIGH und W. WIEN
1903	Messung der Temperatur von Sternen und Planeten mittels IR-Radiometrie und -Spektrometrie durch W.W. COBLENTZ
1914	Nutzung von Bolometern für die Fernerkundung von Menschen und Flugzeugen
1930	IR-Peilgeräte auf Basis von PbS-Quantendetektoren im Wellenlängenbereich 1,5 ... 3,0 μm für militärische Anwendungen (GUDDEN, GÖRLICH und KUTSCHER), Erweiterung der Reichweite im 2. Weltkrieg auf 30 km für Schiffe und 7 km für Panzer (3 ... 5 μm)
1934	Erste IR-Bildwandler
1939	Entwicklung der ersten IR-Sichtgeräte in den USA (Sniperscope, Snooperscope)
1947	Pneumatisch wirkender Strahlungsdetektor mit hoher Detektivität von M.J.E. GOLAY
1954	Erste bildgebende Kameras auf Thermosäulen- (20 min Belichtungszeit pro Bild) und auf Bolometer-Basis (4 min)
1955	Beginn der Massenfertigung von IR-Suchköpfen für IR-gelenkte Raketen in den USA (PbS- und PbTe-, später Sb-Detektoren für die Sidewinder-Rakete)

Tabelle 1.4 (Fortsetzung).

Jahr	Ereignis
1965	Beginn der Massenfertigung von IR-Kameras für zivile Anwendungen in Schweden (Einelementsensoren mit optomechanischem Scanner: AGA Thermografiesystem 660)
1968	Beginn der Produktion von IR-Sensorarrays (monolithische Si-Arrays: R.A. SOREF 1968; IR-CCD: 1970; SCHOTTKY-Diodenarrays: F.D. SHEPHERD und A.C. YANG 1973; IR-CMOS: 1980; SPRITE: T. ELIOTT 1981)
1995	Beginn der Fertigung von IR-Kameras mit ungekühlten FPAs (Focal Plane Arrays; Mikrobolometer-basiert und pyroelektrisch)

- Sie erlaubt sehr schnelle Messungen, da sie sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet und die charakteristischen Zeitkonstanten des Messvorgangs durch Miniaturisierung sehr klein gehalten werden können (siehe Beispiel 6.3 und Abbildung 6.10).
- Sie erlaubt die Messung der Temperatur einer Festkörperoberfläche und nicht der diese umgebende Atmosphäre.

Diese Eigenschaften ermöglichen die berührungslose Untersuchung bzw. Temperaturmessung folgender Messobjekte:

- Schnell bewegliche Objekte. Die berührungslose Messung vermeidet die Störeinflüsse infolge Kontaktierung berührender Temperatursensoren, Rotation oder Reibung.
- Stromführende Objekte. Stromführende Komponenten und Geräte stellen eine potenzielle Gefährdung sowohl für die Messvorrichtung als auch für das Bedienpersonal dar. Durch die berührungslose Fernmessung kann diese Gefahr ausgeschlossen werden.
- Messung kleiner Objekte. Die Verfälschung der gemessenen Temperatur durch den Temperatursensor nimmt bei berührenden Messungen umso mehr zu, je größer der Temperatursensor im Verhältnis zum Messobjekt ist. Wegen des anpassbaren Abbildungssystems (siehe Tabelle 1.1) im Falle von IR-Messsystemen kann dieser Störeinfluss weitgehend vermieden werden.
- Messung an unzugänglichen Messstellen. Viele industrielle Messprozesse weisen sehr harsche Messbedingungen auf, z. B. hohe Temperaturen, die berührende Temperatursensoren zerstören würden. Durch die IR-basierte berührungslose IR-Messtechnik werden auch solche Messaufgaben technisch lösbar.
- Parallele Messung vieler Messstellen. Die Messung vieler Messpunkte in einem Messprozess erfordert im Fall von Kontaktsensoren aufwendige Lösungen. Durch abtastende Messsysteme oder durch bildgestützte Messverfahren lassen sich solche Messaufgaben deutlich effizienter und kostengünstiger lösen (quantitative Thermoprogramme bzw. messende Wärmebilder).

1.4

Vergleich thermischer und photonischer Infrarotsensoren

Prinzipiell können zwei Arten von Infrarotsensoren unterschieden werden (Abbildung 1.2):

- thermische Sensoren und
- photonische bzw. Quantensensoren.

Thermische Sensoren sind Strahlungsdetektoren, die durch eine Absorption von IR-Strahlung eine Änderung ihrer Temperatur erfahren und diese in ein elektrisches Ausgangssignal umwandeln (Abbildung 1.2a). Sie werden deshalb oft auch als Strahlungstemperatursensoren bezeichnet. Betrachtet man ohne Beschränkung der Allgemeinheit einen Sensor mit Stromausgang I_S , ergibt sich ein Zusammenhang für die Stromempfindlichkeit (Index I):

$$R_I = \frac{\Delta I_S}{\Delta \Phi_S} \quad (1.4)$$

mit der Änderung ΔI_S des Stromsensors infolge einer Änderung des im Sensor absorbierten Strahlungsflusses $\Delta \Phi_S$ (Einheit Watt) (siehe Gl. (5.2)). Aus energetischen Gründen führt ein bestimmter Strahlungsfluss zu einer proportionalen Temperaturerhöhung ΔT_S im Sensor und damit zu einem wiederum proportionalen Ausgangsstrom ΔI_S . Theoretisch ist die Energieabsorption und damit die Temperaturabhängigkeit ΔT_S wellenlängenunabhängig, so dass auch R_I wellenlängenunabhängig ist. Praktisch weist die Strahlungsabsorption eine gewisse Wellenlängenabhängigkeit auf.

Die spezifische Detektivität D^* gibt das Verhältnis aus der Sensitivität R_I und dem Effektivwert der Rauschströme \tilde{i}_{RN} , die den Sensorausgangsstrom verfälschen, an und ist damit ein Maß für den Signal-Rausch-Abstand SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). D^* ist dabei auf die Wurzel der Sensorfläche A_S normiert:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_S}}{\tilde{i}_{RN}} R_i . \quad (1.5)$$

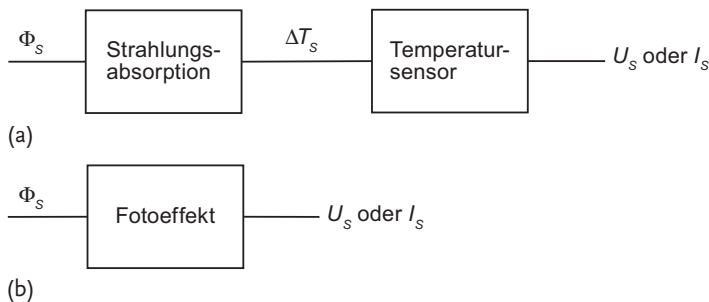


Abbildung 1.2 Wirkprinzip von (a) thermischen und (b) photonischen bzw. Quanten-Strahlungsdetektoren.

Abgesehen von der Dynamik der einfallenden IR-Strahlung ergeben sich ein wellenlängenunabhängiger Effektivwert des Sensorausgangsstroms und damit eine wellenlängenunabhängige spezifische Detektivität D^* thermischer Sensoren:

$$D^* \neq D^*(\lambda) . \quad (1.6)$$

Natürlich ist praktisch zu beobachten, dass durch die Wellenlängenabhängigkeit der Absorption der Sensormaterialien eine Wellenlängenabhängigkeit der Responsivität R_1 bzw. der spezifischen Detektivität D^* thermischer Sensoren auftritt.

Im Unterschied dazu bewirkt der einfallende Strahlungsfluss Φ_S auf Photonen-detektoren eine völlig andere Wellenlängenabhängigkeit.

Der auf den Sensor einfallende Strahlungsfluss (Strahlungsleistung) Φ_S ist die pro Zeiteinheit dt auf den Sensor auftreffende Strahlungsenergie dQ (vgl. die ausführliche Darstellung in Abschnitt 2.2):

$$\Delta \Phi_S = \frac{dQ}{dt} . \quad (1.7)$$

Die Strahlungsenergie Q ergibt sich aus der Summe der Energiebeiträge $h\nu$ der N Photonen:

$$\Delta \Phi_S = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(Nh\nu)}{dt} = h\nu \frac{dN}{dt} . \quad (1.8)$$

Bei Quantendetektoren bewirkt jedes Photon, dass im Mittel η Elektronen zur Stromleitung beitragen. η ist die Quantenausbeute bzw. -effektivität. Der Sensorstrom ΔI_S wird damit zu

$$\Delta I_S = \frac{d(\text{Ladungen})}{dt} = \frac{d(\eta N e)}{dt} = \eta e \frac{dN}{dt} . \quad (1.9)$$

Aus den Gln. (1.8) und (1.9) folgt die Stromempfindlichkeit R_1 eines Quantenempfängers (vgl. Abschnitt 5.1):

$$R_1 = \frac{\Delta I_S}{\Delta \Phi_S} = \frac{\eta e}{h\nu} = \frac{\eta e}{hc} \lambda . \quad (1.10)$$

Die Empfindlichkeit von Photonensensoren wächst also mit steigender Wellenlänge. Dies kann anschaulich erklärt werden, wenn die Strahlung bei zwei unterschiedlichen Wellenlängen λ_1 und $\lambda_2 = 2\lambda_1$ betrachtet wird:

$$Q = N_1 h\nu = N_1 \frac{hc}{\lambda_1} = N_2 \frac{hc}{\lambda_2} . \quad (1.11)$$

Ist in beiden Fällen die Strahlungsenergie Q gleich, beinhaltet die Strahlung der Wellenlänge λ_2 genau doppelt so viele Photonen

$$N_2 = N_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 2N_1 , \quad (1.12)$$

weil deren Photonenenergie $h\nu_2$ nur halb so groß ist wie $h\nu_1$:

$$h\nu_2 = h \frac{c}{\lambda_2} = h \frac{c}{2\lambda_1} = \frac{1}{2}(h\nu_1). \quad (1.13)$$

Problematisch wird es allerdings, wenn die Wellenlänge λ so groß und damit die Photonenenergie so klein wird, dass die Energie nicht mehr ausreicht, um die Elektronen aus dem Valenzband über die Energielücke E_G in das Leitungsband zu transportieren:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} < E_G \quad (1.14)$$

bzw.

$$\lambda > \frac{hc}{E_G}. \quad (1.15)$$

Dann stehen keine Leitungselektronen mehr zur Verfügung und die Empfindlichkeit wird zu null:

$$R_I = \begin{cases} \frac{\eta e}{hc} \lambda & \text{für } \lambda \leq \lambda_C = \frac{hc}{E_G} \\ 0 & \text{für } \lambda > \lambda_C = \frac{hc}{E_G} \end{cases}, \quad (1.16)$$

wobei λ_C als Grenzwellenlänge bezeichnet wird.

Der Verlauf der Stromempfindlichkeit von Quantensensoren ist schematisch in Abbildung 1.3a dargestellt. Prinzipiell lassen sich daraus folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Empfindlichkeit von Photonensensoren ist prinzipiell wellenlängenabhängig.

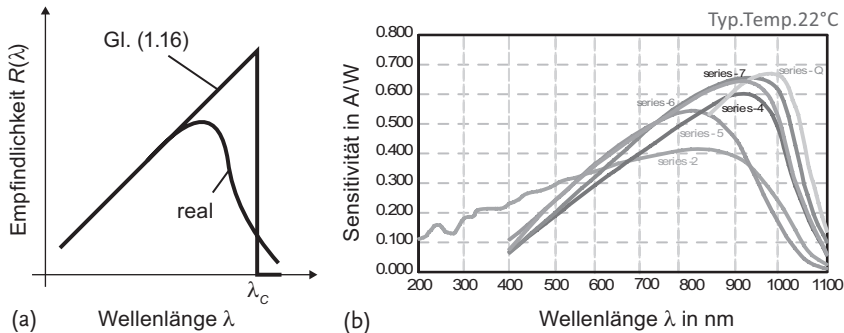
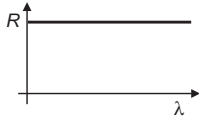
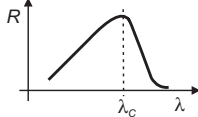


Abbildung 1.3 Wellenlängenabhängigkeit der Empfindlichkeit bei Photonensensoren. (a) Schematisch, (b) Si-pin-Fotodioden der Fa. Silicon Sensor GmbH (mit freundlicher Genehmigung), die Seriennummern charakterisieren Fotodioden mit jeweils speziell optimierten Eigenschaften.

Tabelle 1.5 Vergleich der wesentlichen Eigenschaften von thermischen und von Photonensensoren.

Kenngroße	Thermische Sensoren	Photonensensoren
Empfindlichkeit		
	<ul style="list-style-type: none"> Wellenlängenabhängigkeit nur durch Strahlungsabsorption bestimmt 	<ul style="list-style-type: none"> Wellenlängenabhängigkeit proportional zu λ bis zur Grenzwellenlänge λ_C
Detektivität D^*	<ul style="list-style-type: none"> wellenlängenunabhängig Temperaturabhängigkeit als Potenz der Temperatur durch Kühlung nur geringe Verbesserung von D^* 	<ul style="list-style-type: none"> stark wellenlängenabhängig (Abbildung 1.3) im NIR-Bereich sehr große D^*-Werte erreichbar meist exponentielle Temperaturabhängigkeit Kühlung kann D^* stark vergrößern
Betriebsweise	ungekühlt	meist gekühlt
Frequenzbereich	bis einige 100 Hz	bis GHz (Fotodioden, Fotozellen)

- Photonendetektoren haben einen eingegrenzten Arbeitswellenlängenbereich. Dies wird im Wesentlichen von der Bandstruktur bzw. der Bandlücke E_G bestimmt. Für Silizium mit $E_G = 1,1 \text{ eV}$ ergibt sich als Grenzwellenlänge

$$\lambda_C = \frac{hc}{E_G} = \frac{6,626 \text{ E-34 W s}^2 \times 2,998 \text{ E8 m/s}}{1,12 \text{ eV}} = 1,11 \text{ } \mu\text{m} .$$

Dies ist der Grund, warum Silizium nur für Detektoren im nahen IR-Bereich Verwendung finden kann, während für den MIR- und den FIR-Bereich auf andere Halbleiter zurückgegriffen werden muss.

Tabelle 1.5 fasst die Unterschiede in den Eigenschaften von thermischen Sensoren und von Photonensensoren noch einmal zusammen.

Beispiel 1.1 Empfindlichkeit und Detektivität von thermischen Sensoren und von Photonensensoren

Die Auflösungsgrenze eines Infrarotsensors wird absolut durch das Rauschen der empfangenen Strahlung, also des zu messenden Signals selbst, begrenzt. Bei thermischen Sensoren ist es das Strahlungsrauschen (Abschnitt 4.2.4) und bei Photonensensoren das Photonenrauschen. Die daraus resultierende maximale Detek-

tivität wird als BLIP-Detektivität bezeichnet (BLIP: Background Limited Infrared Photodetection oder für thermische Sensoren Background Limited Infrared Performance). Die BLIP-Detektivität für thermische Sensoren wird im Abschnitt 5.3 vorgestellt. Sie beträgt:

$$D_{\text{BLIP,TH}}^* = \frac{1}{\sqrt{16\varepsilon k_B \sigma T_S^5}} \quad (1.17)$$

mit dem Emissionsgrad ε , der BOLTZMANN-Konstante k_B , der STEFAN-BOLTZMANN-Konstante σ sowie der Sensortemperatur T_S . Daraus ergibt sich für $T_S = 300$ K gemäß Beispiel 5.7 eine wellenlängenunabhängige BLIP-Detektivität von $D_{\text{BLIP,TH}}^* = 1,81 \text{ E8 mHz}^{\frac{1}{2}} \text{ W}^{-1}$.

Für Photonensensoren gilt [1.1]:

$$D_{\text{BLIP,PH}}^* = \frac{\lambda}{hc} \sqrt{\frac{\eta}{2Q_B}}, \quad (1.18)$$

mit der Quantenausbeute η , der Wellenlänge λ und der integralen Photonenstrahlung des Hintergrundes Q_B :

$$Q_B = \sin^2 \frac{\text{FOV}}{2} \int_0^{\lambda_c} Q_{\lambda_s} d\lambda. \quad (1.19)$$

Dabei ist FOV der Öffnungswinkel des Sensors (siehe Abschnitt 5.5, Abbildung 5.14). Für die Photonenstrahlung gilt analog zur spektralen Ausstrahlung

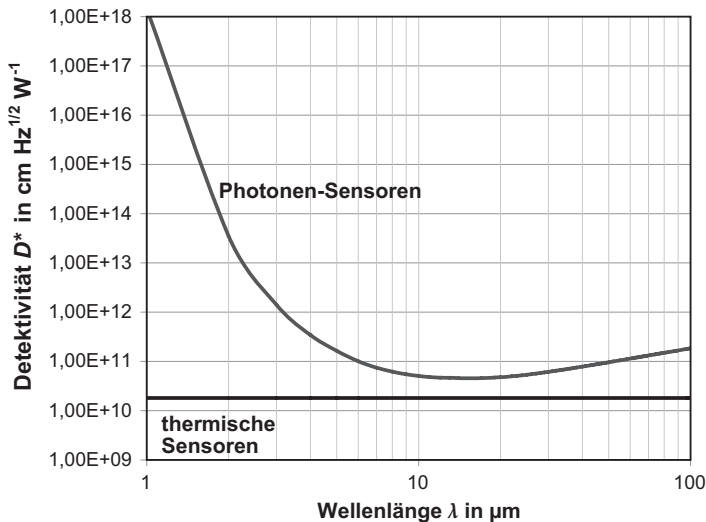


Abbildung 1.4 Verlauf der BLIP-Detektivität von thermischen und Photonensensoren. FOV = 180° ; $\eta = \varepsilon = 1$; $T_B = T_S = 300$ K.

$M_{\lambda S}$ schwarzer Wärmestrahler (siehe Gl. (2.124))

$$Q_{\lambda S} = \frac{c'_1}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_B}} - 1} \quad (1.20)$$

mit den Strahlungskonstanten c'_1 und c_2 und der Hintergrundtemperatur T_B .

Im nahen Infrarotbereich ist die BLIP-Detektivität eines Photonensensors um mehrere Größenordnungen höher als die Detektivität thermischer Sensoren. Im fernen Infrarot, also im Bereich der maximalen Strahlung von Körpern im Umgebungstemperaturbereich, sind beide dann ungefähr in der gleichen Größenordnung (Abbildung 1.4).

1.5

Temperatur- und Ortsauflösung von Infrarotsensoren

Der in Tabelle 1.1 dargestellte Aufbau von Infrarotsensoren und -messsystemen zeigt, dass die Strahlungsenergie eines Messobjektes oder einer Strahlungsquelle, beeinflusst durch die Transmissionseigenschaften der Übertragungstrecke, auf einen Einelementsensor oder einen Matrixsensor (Sensorarray) abgebildet wird. Praktisch bedeutsam sind die Fragen

1. welcher kleinste Temperaturunterschied der Strahlungsquelle bzw. des Messobjektes vor dem Hintergrund von einem einzelnen Sensorelement und
2. welcher kleinste räumliche Abstand von zwei Punkten mit einem bestimmten Temperaturunterschied vom Matrixsensor noch detektiert werden können.

Die Temperaturlösung wird durch die rauschäquivalente Temperaturdifferenz NETD bestimmt (siehe Abschnitt 5.4). Diese ist die Temperaturdifferenz im Objekt, für die im Sensor das Rauschsignal gleich dem Messsignal ist (Signal-Rausch-Abstand $SNR = 1$). Die NETD betrifft jedes einzelne Pixel (Sensorelement) eines Sensorarrays. Je kleiner der Raumwinkel ist, der vom Abbildungssystem auf ein Sensorpixel projiziert wird, desto kleiner ist das Sensorsignal und damit auch die NETD. Kleinere IR-Messsysteme mit kleinerem Abbildungssystem führen damit in der Regel zu schlechterer Temperaturlösung.

Als Maß für die räumliche Auflösung der kleinsten darstellbaren Struktur dient die Modulationsübertragungsfunktion MTF (siehe Abschnitt 5.6). Prinzipiell wird die Ortsauflösung auch durch thermische und elektrische Verkopplungen zwischen den Pixeln eines Sensorarrays beeinflusst. Besonders großen Einfluss haben jedoch Beugungserscheinungen der Optik und das Verhältnis der Abmessung eines Pixels zur abbildenden Strukturgröße. Gerade bei letzterem wird schnell deutlich, dass Pixel zwei Punkte der Quelle dann nicht mehr unterscheiden können, wenn die Pixelabmessung größer als die halbe Periodendauer der Punkte ist.

Prinzipiell kann eine bessere räumliche Auflösung nur durch kleinere Pixel erreicht werden. Allerdings führt das zu einer schlechteren Temporaufklärung, wie oben erläutert wurde.

Temperatur- und Ortsauflösung sind zwei völlig unterschiedliche Eigenschaften von Sensorarrays. Die Optimierung der beiden Eigenschaften erfordert teilweise gegenläufige Änderungen der Entwurfsparameter, wie das Beispiel der Pixelgröße zeigt.

1.6

Einelement- versus Matrixsensoren

In diesem Buch werden die Sensorkenngrößen in den Abschnitten 5.1 bis 5.5 für ein einzelnes Sensorelement abgeleitet, das einerseits ein separater Einelementsensor oder andererseits ein einzelnes Pixel eines Matrixsensors sein könnte. Die räumliche Auflösung von IR-Sensoren, die nur bei Mehrelementsensoren relevant wird, ist dann in Abschnitt 5.6 separat für Matrixsensoren behandelt.

Wie Abbildung 1.5 anhand der Signalkette eines Systems zur berührungslosen Temperaturmessung zeigt, können Sensoren mit einer Sensorfläche (Einelementsensoren) und Sensoren mit vielen einzelnen Sensorflächen (Mehrelementsensoren, Matrixsensoren) bezüglich der thermischen Auflösung theoretisch völlig gleich behandelt werden. Jedes Pixel eines Thermobildes misst die Temperatur eines Bildpunktes des Objektes und stellt für sich ein Pyrometer dar. Es existieren aber unterschiedliche Randbedingungen für die Sensoren in Pyrometern und in Wärmebildgeräten. Wesentlicher Unterschied ist die verfügbare Sensorfläche (Bildfeldgröße). Sie wird praktisch durch die Optik bestimmt. Bei Pyrometern kann sie bis zu einigen Quadratmillimeter betragen. Die Bildfeldgröße ist bei Pyrometern gleich der Sensorfläche. Bei Wärmebildgeräten sind Bildfelder mit einer Diagonale von bis zu 20 mm üblich. Vor allem optische Verzeichnung und Vignettierung begrenzen in bildgebenden Systemen die Bildfeldgröße. Einem Pixel des Sensors steht davon nur ein kleiner Bruchteil zur Verfügung. Je größer das Bildfeld wird, umso größer müssen Optiken und Sensoren ausgelegt werden, was zu einer nicht unerheblichen Erhöhung der Gesamtkosten des Systems führt. Die Sensorfläche

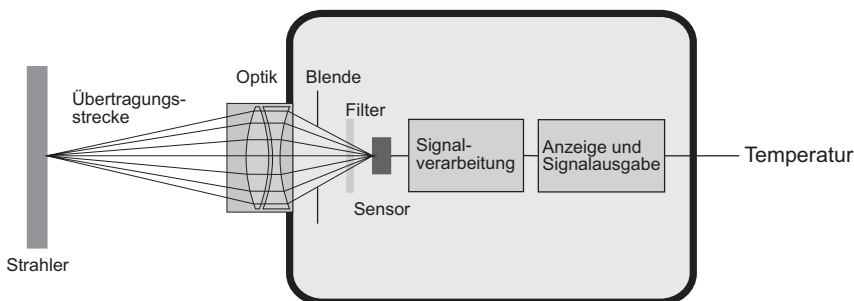


Abbildung 1.5 Signalkette eines Systems zur berührungslosen Temperaturmessung.

sollte aus diesen Gründen also möglichst klein gehalten werden. Aus der Sicht des Sensors muss sie aber möglichst groß sein (Gl. (5.56)).

Alle vorgestellten Arten von thermischen Sensoren können sowohl als Einzelelemente als auch als Matrixsensoren gefertigt werden. Beispielhaft vorgestellt werden jeweils nur typische Anordnungen, wie z. B. pyroelektrische Dualsensoren und Mikrobolometerarrays. So existiert z. B. die Mikrobrückentechnologie, wie sie bei den Mikrobolometerarrays vorgestellt wird, auch für pyroelektrische und thermoelektrische Sensoren.