

1

Einführung

Sowohl die Pyrometrie, die punktförmige berührungslose Temperaturmessung, als auch die Thermografie, die bildgebende berührungslose Temperaturmessung, sind etablierte Messverfahren zur Bestimmung der Temperatur eines Körpers. Vor allem in der Thermografie gab es in den letzten beiden Jahrzehnten evolutionäre Fortschritte in der Sensortechnik, was zu einer enormen Verbreitung thermografischer Verfahren führte. So sind heute sehr preiswerte Geräte der Pyrometrie und der Thermografie bereits in Baumärkten verfügbar. Immer mehr Anwendungen findet man im Handwerker- und Heimbereich. Auch die Kombination mit anderen Messverfahren, z. B. mit der Messung der Luftfeuchte, sogenannte Taupunktscanner, in einem Gerät erhöht die Vielfalt der Anwendungen, die auch von Laien erfolgreich eingesetzt werden können.

Bei der berührungslosen Temperaturmessung wird die thermische Eigenstrahlung eines Objektes gemessen und aus ihr die Temperatur berechnet. Bei Temperaturen unterhalb von ca. 4000 °C liegt der größte Teil der Strahlungsenergie im infraroten Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums. Deshalb wird in diesem Buch auch immer von der Messung im Infrarotbereich ausgegangen. Im folgenden Abschnitt werden die Spektralbereiche der elektromagnetischen Strahlung vorgestellt und eingeordnet. Die Vorteile der Pyrometrie und Thermografie werden im Abschn. 1.2 erläutert und abschließend wird die historische Entwicklung der berührungslosen Temperaturmessung beschrieben (Abschn. 1.3).

1.1 Infrarotstrahlung

Jeder Körper sendet elektromagnetische Strahlung aus, die man auch als Wärmestrahlung bezeichnet. Die Ausstrahlung ist dabei von seiner Temperatur (Abschn. 2.3) und seinem Emissionsvermögen (Abschn. 2.4) abhängig. Die Wärmestrahlung hat eine charakteristische Wellenlängenabhängigkeit. Aus der Strahldichte oder der spektralen Verteilung der Wärmestrahlung lässt sich auf die Temperatur eines Körpers schließen. Dies wird zur berührungslosen Temperaturmessung (Pyrometrie) genutzt.

Das Maximum der Wärmestrahlung liegt für Körpertemperaturen bis ca. 3500 °C im infraroten Spektralbereich in einem Wellenlängenbereich von 780 nm bis 40 µm. Deshalb wird die Wärmestrahlung auch als Infrarot-(IR-)Strahlung bezeichnet. Die Pyrometrie und die Thermografie gehören also zur Infrarotmesstechnik.

Infrarotstrahlung ist hochfrequente elektromagnetische Strahlung, deren Ausbreitung durch die Maxwell'schen Gleichungen (Abschn. 2.1.1) beschrieben werden. In optisch linearen Medien, wie Vakuum, Luft, Silizium, Metallen usw., bleibt die Frequenz¹⁾ ν konstant, während sich die Wellenlänge λ in Abhängigkeit von der Wellenausbreitungs-(Licht-) Geschwindigkeit c in verschiedenen Medien ändert:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c_0}{n\nu}, \quad (1.1)$$

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

$$\sigma = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.2)$$

Die übliche Einheit der Wellenzahl σ ist cm^{-1} . Die Wellenzahl gibt dann die Anzahl der Schwingungen (Perioden) je Zentimeter an. Zum leichten Umrechnen hilft eine zugeschnittene Größengleichung:

$$\frac{\sigma}{\text{cm}^{-1}} = \frac{10\,000}{\frac{\lambda}{\mu\text{m}}}. \quad (1.3)$$

Durch den Welle-Teilchen-Dualismus von Licht kann die thermische Strahlung sowohl als elektromagnetische Welle als auch als Photonenstrom interpretiert werden. Mit zunehmender Wellenlänge wird die Energie W_P eines Photons geringer:

$$W_P = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.4)$$

mit dem Planck'schen Wirkungsquantum h . Deshalb nimmt bei konstanter Strahlungsenergie W die Anzahl N_P der Photonen direkt proportional mit der Wellenlänge zu:

$$N_P = \frac{W}{hc} \lambda. \quad (1.5)$$

Für die Energie W_P eines Photons in Elektronenvolt gilt:

$$\frac{W_P}{\text{eV}} = \frac{1,241}{\lambda/\mu\text{m}}. \quad (1.6)$$

Die thermische Strahlung liegt vorwiegend im infraroten Spektralbereich des elektromagnetischen Strahlungsspektrums (Abb. 1.1). Der lateinische Präfix *infra-* bedeutet *unterhalb*. Der Begriff Infrarot bezieht sich also auf die Strahlung mit einer Energie unterhalb des roten Lichtes. Infrarote Strahlung ist somit energiearm und dringt deshalb in biologisches Gewebe kaum ein (Abb. 2.37). Der Begriff *infrarot* wird seit etwa 1880 weltweit genutzt [1]. In Deutschland war danach einige Zeit lang parallel auch immer noch das Wort *ultrarot* benutzt worden, was hinsichtlich der Wellenlänge durchaus sinnvoll ist. Dieser Begriff hat dann aber schnell an Bedeutung verloren und spielt seit Langem keine Rolle mehr.

1) Um die optische und die elektrische Frequenz zu unterscheiden, wird die optische Frequenz mit ν und die elektrische Frequenz mit f bezeichnet. Analog wird das auch verwendet, wenn es um die Frequenz ν der optischen Strahlung und die Frequenz f der Chopperung dieser Strahlung geht.

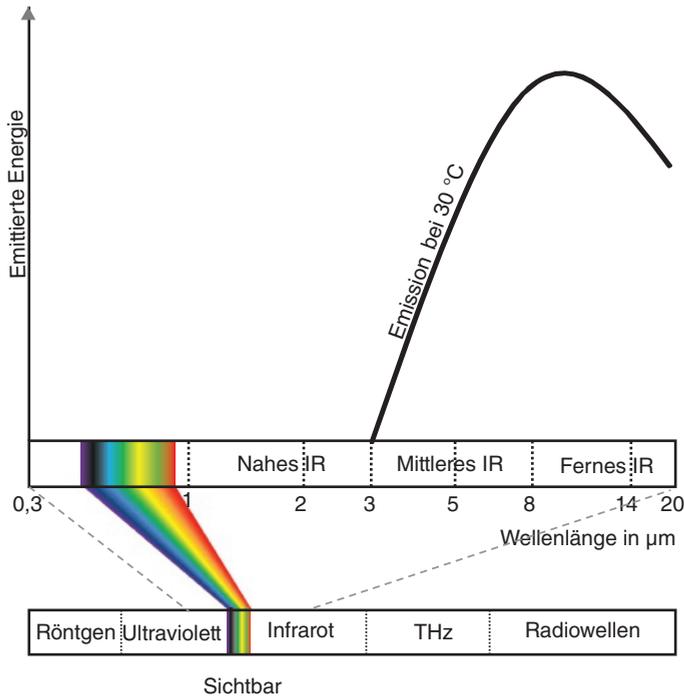


Abb. 1.1 Einordnung der thermischen Strahlung in das elektromagnetische Strahlungsspektrum.

Wie ausgeführt, ist die Wellenlänge von infraroter Strahlung größer als die von rotem Licht bzw. ganz allgemein von sichtbarem Licht. Der IR-Spektralbereich schließt sich somit dem sichtbaren (visuellen) Bereich (VIS) direkt an.

Alle bekannten Verfahren und Grundsätze der geometrischen und der Fourier-Optik, der Strahlungsausbreitung, der Abbildung, der Beugung, der Polarisation und der Interferenz können praktisch uneingeschränkt auf die Infrarotstrahlung angewandt werden. Zu beachten ist aber, dass lichttechnische Größen, die das Sehvermögen eines Menschen berücksichtigen, im infraroten Spektralbereich nicht anwendbar sind, da das menschliche Auge im Infraroten unempfindlich ist. Deshalb werden im IR-Bereich ausschließlich radiometrische Größen verwendet (Abschn. 2.2).

Die Untergliederung der Infrarotstrahlung erfolgt nach technischen Gesichtspunkten. Tabelle 1.1 zeigt die in diesem Buch verwendete Einteilung in den nahen (NIR), mittleren (MIR) und fernen (FIR) Infrarotbereich. Die Einteilung orientiert sich an den atmosphärischen Fenstern (Abschn. 2.6.3). Der ultraferne Bereich (UFIR) wird heutzutage meist als THz-Bereich bezeichnet, da sich aktuelle technische Entwicklungen der THz-Technik erheblich von der klassischen Infrarotmesstechnik unterscheiden. Im THz-Bereich ($> 40 \mu\text{m}$) ist praktisch keine thermische Eigenstrahlung von Objekten mehr nachweisbar.

In Tab. 1.2 sind weitere bekannte Einteilungen des Infrarotbereichs angegeben. Eine Einteilung nach ISO 20473 ist in Tab. 1.2a gezeigt. Vor allem außerhalb der IR-Messtechnik ist diese Einteilung weit verbreitet. Besonders bei den Thermografen im amerikanischen Sprachraum wird die Einteilung des IR-Bereichs nach Tab. 1.2b verwendet. Die angegebenen Abkürzungen (oft nur SW, MW oder LW) sind häufig auf IR-Objektiven eingraviert.

Tab. 1.1 Einteilung der Infrarotstrahlung bei Berücksichtigung der atmosphärischen Fenster.

Bereich		Wellenlänge λ in μm	Wellenzahl σ in cm^{-1}	Frequenz ν in THz	Photonenergie W_p in eV
VIS		0,38–0,78	26 316–12 821	789–384	3,27–1,59
IR	NIR	0,78–3	12 821–3 333	384–100	1,59–0,41
	MIR	3–6	3 333–1 667	100–50	0,41–0,21
	FIR	6–40	1 667–250	50–7,5	0,21–0,03
THz	UFIR	40–1 000	250–10	7,5–0,3	0,03–0,0012

Tab. 1.2 Weitere Einteilungsvarianten des IR-Bereichs.

a) Nach ISO 20473			
IR-Bereich	Abkürzung	Wellenlänge λ in μm	
Nahes	NIR	IR-A	0,78–1,4
		IR-B	1,4–3,0
Mittleres	MIR	IR-C	3,0–50
Fernes	FIR		50–1000

b) Im US-amerikanischen Sprachraum verbreitet			
IR-Bereich	Abkürzung	Wellenlänge λ in μm	
Near	NIR		0,78–1,4
Short wave	SWIR		1,4–3,0
Mid wave	MWIR		3,0–8,0
Long wave	LWIR		8,0–15

Neben der Einteilung der Infrarotbereiche wird auch oft von Temperaturbereichen gesprochen. Die üblichen Temperaturbereiche in der Pyrometrie bzw. Thermografie sind [4]:

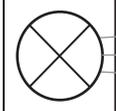
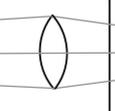
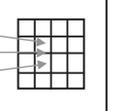
- Niedertemperaturbereich: -100 – 100 °C,
- Mitteltemperaturbereich: 100 – 500 °C,
- Hochtemperaturbereich: 500 – >2000 °C.

1.2 Technische Anwendungen

Infrarotmesssysteme weisen eine charakteristische Struktur auf (Tab. 1.3). Die von einer Strahlungsquelle ausgehende IR-Strahlung durchquert ein Medium (Übertragungsstrecke) und wird auf einem IR-Sensor oder IR-Sensorarray abgebildet.

In der Pyrometrie und Thermografie ist die Strahlungsquelle das Messobjekt, da ja dessen Temperatur gemessen werden soll. Die vom Messobjekt ausgehende Strahlung wird mittels einer Optik (Linse, Objektiv) auf einen Sensor geleitet, der ein zur Strahldichte proportionales elektrisches Signal ausgibt. Zuvor muss die Strahlung die Atmosphäre und/oder einen Lichtleiter durchqueren. Das Abbildungssystem und der Sensor legen dabei den Wellenlängenbereich der Messung fest (Filter, spektrale Empfindlichkeit des Sensors).

Tab. 1.3 Typische Struktur von Infrarotsystemen. In diesem Buch werden die Pyrometrie und die Thermografie behandelt.

Anwendung	Strahlungsquelle	Übertragungsstrecke	Abbildungssystem	Sensor/-array
				
Pyrometrie/berührungslose Temperaturmessung	Messobjekt/-Fleck	Atmosphäre, Lichtleiter	Objektiv, Filter	Ein- oder Mehrelementsensoren
Thermografie/Wärmebildtechnik	Messobjekt/Thermoszene	Atmosphäre	Objektiv, Filter	Sensormatrix (FPA Focal Plane Array)
Bewegungsmelder	Messobjekt vor Hintergrund	Atmosphäre	Fresnel-Optik	Zweielementsensoren, meist pyroelektrisch
Gassensor	Schwarze Strahler, LED, Laser usw.	Gasküvette, Atmosphäre mit Messgas	Linse, Filter	Mehrelementsensoren
Spektrometer	Schwarze Strahler, LED, Laser usw.	Chemische Verbindung	Gitter, Prisma, Interferometer	Einelement- oder Zeilensensoren
Behandlung im Buch	Abschn. 2.4	Abschn. 2.6	Abschn. 3.2	Kap. 4

Bewegungsmelder erkennen Änderungen der Strahldichte in einer Szene. Dazu wird eine statische Szene, der Hintergrund, beobachtet. Bewegt sich nun ein Objekt, z. B. ein Mensch, in der Szene, wird er detektiert und dann z. B. ein Lichtschalter betätigt. In Bewegungsmelder verwendet man vorzugsweise pyroelektrische Sensoren, da diese von Hause aus nur Strahlungsflussänderungen detektieren. Die Abbildung der Szene erfolgt dabei mit Fresnel-Optiken. Die Übertragungsstrecke ist ebenfalls die Atmosphäre. Bewegungsmelder arbeiten im LWIR.

Viele Gase haben im mittleren IR (MWIR) ihren sogenannten Fußabdruck. Das bedeutet, dass sie in bestimmten, meist sehr schmalen Wellenlängenbereichen, den sogenannten Absorptionsbanden, die Strahlung stark absorbieren (siehe Abschn. 2.6.3). Da die Gaskonzentration proportional zur Absorption ist, lässt sich durch Messung der Absorption die Konzentration eines Gases bestimmen. Dazu wird ein Gasgemisch in eine Küvette (Übertragungsstrecke) eingeleitet. Die von einer Strahlungsquelle abgegebene, bekannte Strahldichte durchquert die Küvette und wird wellenlängenselektiv gemessen. Als Strahlungsquellen kommen sowohl thermische Strahler (Abschn. 2.4.2) als auch nichtthermische Strahler, wie Laser, LED (engl.: Light-Emitting Diode) usw., infrage. Das Abbildungssystem besteht aus Filtern und gegebenenfalls Strahlteilern. Um mehrere Wellenlängenbereiche

gleichzeitig messen zu können, werden Mehrelementensensoren (zwei bis acht empfindliche Elemente) oder wellenlängendurchstimmbare Messanordnungen eingesetzt.

In Spektrometern wird die Strahlung, nachdem sie eine Probe (Übertragungsstrecke) passiert hat, spektral vermessen. Als Strahlungsquelle kommen thermische oder nichtthermische Strahler zum Einsatz. Bei dispersiven Spektrometern erfolgt die spektrale Zerlegung der Strahlung mit Gittern oder Prismen (Monochromator). In Fourier-Transform-IR-Geräten (FTIR) werden Interferometer eingesetzt. Die spektrale Zerlegung kann auch mit Filtern oder Interferenzkeilen erfolgen, was oft in kleinen und kostengünstigen Spektrometern der Fall ist.

1.3 Vorteile der berührungslosen Temperaturmessung

Die Nutzung der thermischen Strahlung zur Bestimmung der Oberflächentemperatur bietet eine Reihe von Vorteilen [2]:

- Das Messobjekt, also die Strahlungsquelle, ist vom Messsystem, d. h. dem Strahlungsempfänger, räumlich getrennt. So können auch sehr heiße oder schwer zugängliche Objekte gemessen werden.
- Da die Messung berührungslos erfolgt, ist sie (fast) rückwirkungsfrei. Das Messobjekt und der Sensor tauschen aber gegenseitig Strahlungsenergie aus, deshalb darf man korrekterweise nicht von Rückwirkungsfreiheit sprechen. Die Rückwirkung ist allerdings sehr gering und kann im Allgemeinen vernachlässigt werden.
- Die Ausbreitung der Temperaturstrahlung erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit. Eine Temperaturänderung kann also „sofort“ detektiert werden. Die charakteristischen Zeitkonstanten des Messvorgangs liegen bei der Messung mit thermischen Sensoren im unteren Millisekunden- (Abschn. 4.1) und mit Photonensensoren im unteren Mikrosekundenbereich (Abschn. 4.2).
- Weder das Messobjekt noch das Messgerät werden – von falscher Verwendung bzw. Fehlbedienung abgesehen – bei der Messung beeinträchtigt oder gar beschädigt.

Diese Vorteile erlauben die berührungslose Temperaturmessung von folgenden Objekten [2, 3]:

- Schnell bewegte Objekte: Die berührungslose Messung vermeidet die Störeinflüsse infolge der Kontaktierung mit berührenden Temperatursensoren, Rotation oder Reibung.
- Spannungsführende Objekte: Spannungsführende Komponenten und Geräte stellen eine potentielle 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 der im Falle von IR-Systemen nahezu rückwirkungsfreien Messung kann dieser Störeinfluss weitgehend vermieden werden.
- Messung von aggressiven Medien: In aggressiven Medien, wie Säuren oder Laugen, können oft keine Messfühler eingetaucht werden. Da das Temperaturmesssystem räumlich vom Messobjekt getrennt ist, können auch aggressive Medien gefahrlos gemessen werden.

- Messung hoher Temperaturen: Viele industrielle Messprozesse weisen sehr harsche Messbedingungen auf, z. B. hohe Temperaturen, die berührende Temperatursensoren zerstören würden. Durch die berührungslose Temperaturmessung werden auch solche Messaufgaben technisch lösbar.
- Messung an unzugänglichen Messstellen: Die berührungslose Temperaturmessung kann auch aus großer Entfernung erfolgen.
- Messung durch Sichtfenster: In geschlossenen Räumen, Rezipienten, Vakuumkammern usw. können oft Sichtfenster eingebracht werden. Durch diese hindurch kann berührungslos die Temperatur gemessen werden.
- Kontaminationsfreie Messung an biologischen Materialien.
- Parallele Messung vieler Messstellen. Die Messung vieler Messpunkte in einem Messprozess erfordert im Fall von Kontaktsensoren aufwendige Lösungen. Durch die Thermografie lassen sich solche Messaufgaben deutlich effizienter und kostengünstiger lösen.

Leider existiert auch ein wesentlicher Nachteil: Der Emissionsgrad des zu messenden Objekts muss bekannt sein (Abschn. 2.4). Die Unkenntnis des Emissionsgrades oder ein sehr niedriger Emissionsgrad ($< 0,1$) kann die Bestimmung der Temperatur unmöglich machen bzw. zu völlig falschen Messergebnissen führen.

Außerdem ist zu beachten, dass bei – für die verwendete IR-Strahlung – opaken Objekten die Oberflächentemperatur gemessen wird. Die Oberflächentemperatur hängt aber von den Umgebungsbedingungen des Messflecks, wie z. B. der Wärmeleitung im Körper und zur Umgebung und der Konvektion in der Luft, ab. Deshalb kann die Kerntemperatur eines Körpers deutlich von der Oberflächentemperatur abweichen. Dieser Sachverhalt wird bei der zerstörungsfreien Prüfung mittels thermografischer Verfahren ausgenutzt (Abschn. 6.8).

1.4 Historische Entwicklung

Die Tab. 1.4–1.7 fassen die historische Entwicklung der Infrarotmesstechnik zusammen.

Ausgangspunkte waren die Entdeckung von Isaac Newton im Jahr 1672, dass sich Licht aus verschiedenen Farben zusammensetzt, und der Nachweis von Sir William (Friedrich Wilhelm) Herschel 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 [2, 7]) (Tab. 1.4). Später zeigte Herschel, 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 „Ultrarot“ 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. Jahrhunderts). Die Arbeiten von Max Planck zur Formulierung der Lichtquantenhypothese und die Ableitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes 1900 sowie die Formulierung der Gesetze des äußeren Fotoeffekts 1905 und die Annahme stimulierter Emission durch Albert Einstein waren dann die entscheidenden Grundlagen für die Quantennatur

Tab. 1.4 Zeittafel zur Entdeckung der Infrarotstrahlung und der relevanten Strahlungsgesetze (nach [1, 4, 5]).

Jahr	Ereignis
1672	Entdeckung, dass sich Licht aus verschiedenen Farben zusammensetzt, durch Isaac Newton
1737	Postulat von Émile de Chatelet: Es gibt eine Wärmestrahlung, die von gleicher Natur wie das Licht sein müsse
1800	Entdeckung der Existenz von Wärmestrahlung im Unsichtbaren jenseits von Rot beim Versuch, die Temperatur der verschiedenen Farben des Sonnenlichtes zu messen, durch Friedrich Wilhelm Herschel (engl.: William Herschel) [6, 7]
1835	Formulierung der Hypothese der gleichen Natur von Licht und elektromagnetischer Strahlung durch André-Marie Ampère
1839	Bestimmung des solaren Absorptionsspektrums der Atmosphäre und Identifizierung der Absorptionslinien von Wasserdampf durch Macedonio Melloni
1840	Entdeckung der drei atmosphärischen Fenster durch John Herschel (Sohn von William Herschel)
1859	Formulierung des Zusammenhangs, dass Strahlungsabsorption und -emission bei gegebener Wellenlänge einander entsprechen, durch Gustav Kirchhoff
1860	Begriff „Schwarzer Körper“ von Gustav Kirchhoff geprägt
1864	Theorie der elektromagnetischen Strahlung von James Clerk Maxwell
1872	Quantitative Messungen an den IR-Absorptionsbanden der in der Atmosphäre enthaltenen Gase durch John Tyndall
1879	Empirischer Zusammenhang zwischen Strahlungsintensität und Temperatur eines schwarzen Körpers durch Joseph Stefan
1883	Studium der Transmissionseigenschaften IR-transparenter Materialien durch Macedonio Melloni
1884	Thermodynamische Ableitung des Gesetzes von Stefan durch Ludwig Boltzmann
1888	Entdeckung des äußeren fotoelektrischen Effekts durch Wilhelm Hallwachs (Hallwachs-Effekt). Eine erste umfassende Deutung dieses Effekts wurde 1905 von Albert Einstein gegeben.
1894	Entdeckung der spektralen Verschiebung des Strahlungsmaximums mit der Temperatur durch Wilhelm Wien (Wien'sches Verschiebungsgesetz)
1896	Beschreibung der von einem Schwarzen Körper ausgesendeten thermischen Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge durch Wilhelm Wien (Wien'sches Strahlungsgesetz). Es beschreibt die spektrale Energieverteilung für kleine Wellenlängen.
1900	Ableitung der Wellenlängenabhängigkeit der Schwarzkörperstrahlung durch Lord Rayleigh (John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh)
1900	Ableitung der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von dessen Temperatur als Funktion der Wellenlänge oder der Frequenz durch Max Planck. Grundlage ist ein neues Postulat, nach dem der Energieaustausch zwischen Oszillatoren und dem elektromagnetischen Feld nicht kontinuierlich, sondern in Form kleinster Energiepakete (Quanten) stattfindet. Geburtsstunde der Quantenphysik
1905	Korrekturen des Strahlungsgesetzes von Rayleigh durch James Jeans: Rayleigh-Jeans-Gesetz. Es beschreibt die spektrale Energieverteilung für große Wellenlängen.

Tab. 1.5 Zeittafel zur Entwicklung der IR-Detektoren bzw. -Sensoren (nach [1, 4, 5, 7, 8]).

Jahr	Ereignis
1821	Entdeckung des thermoelektrischen Effekts an einem Antimon-Kupfer-Paar durch Thomas Johann Seebeck
1823	Konstruktion der ersten Thermosäule aus Antimon und Bismut durch Hans Christian Ørsted und Joseph Fourier
1823	Erste thermoelektrische Spannungsreihe durch Thomas Johann Seebeck
1833	Thermosäule aus zehn in Reihe geschalteten Sb-Bi-Thermopaaren von Macedonio Melloni und Leopoldo Nobili
1857	Vereinheitlichung der drei thermoelektrischen Effekte (Seebeck, Peltier, Thomson) durch Lord Kelvin
1873	Entdeckung der Lichtempfindlichkeit des elektrischen Widerstands von Selen durch Willoughby Smith
1878	Erfindung des Bolometers, das zur Strahlungsmessung die thermisch erzeugte Änderung des elektrischen Widerstands nutzt, durch Samuel Pierpont Langley, Studium der Absorptionseigenschaften der Atmosphäre mittels eines Pt-Bolometers
1917	Erster NIR-Fotoleiter auf der Basis von Thalliumsulfid („Thallofide Cell“) durch Theodore W. Case
um 1930	Entwicklung fotoleitender Bleisulfid-Zellen durch Edgar W. Kutzscher, Bernhard Gudden und Paul Görlich
um 1938	Verbesserung der Sensitivität und Erweiterung des spektralen Arbeitsbereichs für PbS, PbTe und PbSe durch kryogene Kühlung
1947	Pneumatisch wirkender Strahlungsdetektor mit hoher Detektivität (Goley-Zelle) von Marcel J. E. Golay
1957	Entdeckung von Cadmium-Quecksilber-Tellurid (HgCdTe oder MCT) als IR-Material mit einstellbarer Wellenlängenempfindlichkeit durch William D. Lawson, Stan Nielsen und Alex S. Young [9]
ab 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)
um 1970	Kleinkältemaschinen (Stirling-Kühler) ersetzen Dewar-Gefäße mit Flüssigkeitskühler für gekühlte IR-Detektoren
1973	Erster IR-Schottky-Barrieredetektor aus Metallsilicid/Silizium durch F.D. Shepherd und Alex Young
1985	Beobachtung eines starken Intersubband-Übergangs in Mehrfach-Quantentöpfen (MQW) durch Stephen Eglash und Lawrence West als Ausgangspunkt für die Verwendung von Quantentöpfen für IR-Detektoren
ab 1990	Quantenphysikalische Detektoren (Quantum Well IR Photoconductor QWIP)
1996	Erste Quantenpunktsensoren (Quantum Dot IR Photoconductor QDIP)

der Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Festkörpern. Damit waren die wesentlichen physikalischen Grundlagen für die technische Nutzung der Infrarotstrahlung für die IR-Messtechnik gelegt.

Tabelle 1.5 stellt die wesentlichen Meilensteine der Entwicklung von Detektoren zur Messung der Strahlungstemperatur, im Wesentlichen von infraroter Strahlung, dar. Ein großer Fortschritt im Vergleich zu bisher verwendeten Glasthermometern war die Entdeckung des thermoelektrischen Effekts 1821 durch Thomas Johann Seebeck, die die Entwicklung von Thermosäulen als sehr sensitive Strahlungsthermometer ermöglichte. Erst

Tab. 1.6 Zeittafel zur Entwicklung der IR-Wärmebildtechnik (nach [1, 4–6]).

Jahr	Ereignis
1840	Erstmals Sichtbarmachung eines Wärmebildes mittels der Evaporografie durch John Herschel. Diese beruht auf der differentiellen Verdunstung eines Flüssigkeitsfilms.
1929	Erfindung der ersten IR-(Nachtsicht-)Videokamera für die Flugabwehr durch Kálmán Tihanyi
1937	Praktikables Wärmebildgerät auf der Basis der Evaporografie von Marianus Czerny
1939	Entwicklung der ersten IR-Sichtgeräte in den USA (Sniperscope, Snooperscope)
1944	Wärmebildgerät „Potsdam“ der Fa. E. Leybold's Nachfolger als Prototyp vieler weiterer Wärmebildgeräteeentwicklungen bis Mitte der 1990er-Jahre. Ein Scan-Spiegel lenkt gleichzeitig die Wärmestrahlung auf einen IR-Detektor und das Licht einer sichtbaren Strahlungsquelle auf einen Bildschirm, wobei die Helligkeit der sichtbaren Lichtquelle vom Signal des IR-Detektors moduliert wird.
1954	Erste bildgebende Kameras auf Thermosäulen- (20 min Belichtungszeit pro Bild) und auf Bolometer-Basis (4 min)
1955	IR-Kamera Pyroscan der Fa. Kelvin Hughes/GB
1956	Kommerzielle Evaporografen der Fa. Baird Ass./USA
1956	Beginn der Entwicklung von Line-Scanner-Kameras bei Texas Instruments/USA
1963/1964	Erstes Forward-Looking-Infra-Red-(FLIR-)System mit 20 Bildern pro Sekunde von Texas Instruments/USA
1963–	Pyroscan Mark II der Fa. S. Smith & Sons/GB für medizinische Anwendungen
1965	Beginn der Massenfertigung von IR-Kameras für zivile Anwendungen durch die Fa. AGA/Schweden (Einelementsensoren mit optomechanischem Scanner: Thermografiesystem 660)
1970	Wärmebildgeräte mit linearen Detektorarrays mit 25 bzw. 50 Elementen durch Carl Zeiss/D
1995	Beginn der Fertigung von IR-Kameras mit ungekühlten FPAs (Focal Plane Arrays; mikrobolometerbasiert und pyroelektrisch)
2014	Erstes Smartphone mit integrierter IR-Kamera (mikrobolometerbasiert)

wesentlich später, im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts, rückten mit der Entdeckung der Lichtempfindlichkeit des elektrischen Widerstands von Selen durch Willoughby Smith auch andere Detektorarten in den Fokus der Technik. Das betraf beispielsweise die Erfindung des Bolometers 1878, der Goley-Zelle 1947 oder der Schottky-Barrieredetektoren 1973. Weitere Meilensteine waren 1957 die Entdeckung von Cadmium-Quecksilber-Tellurid als IR-Material, bei dem durch die Zusammensetzung die Wellenlängenempfindlichkeit gezielt eingestellt werden kann, und die Nutzung von Intersubband-Übergängen in Mehrfach-Quantentöpfen, mit denen die halbleitertechnologische Herstellung sehr schmalbandiger gekühlter IR-Sensoren möglich wurde.

Schon frühzeitig bestand das Bestreben, nicht nur die Temperaturstrahlung an einem einzelnen Ort zu messen, sondern flächenhafte Temperaturverteilungen einer Szene zu erfassen. John Herschel, Sohn von William Herschel, gelang dies erstmalig 1840, als er Wärmebilder durch lokale Verdunstung eines Flüssigkeitsfilms sichtbar machen konnte (Tab. 1.6). Einen technisch wichtigen Meilenstein bildete dann 1944 das Wärmebildgerät „Potsdam“ der Fa. E. Leybold's Nachfolger, bei dem ein Scan-Spiegel gleichzeitig die Wärmestrahlung auf einen IR-Detektor und das Licht einer sichtbaren Strahlungsquelle auf

Tab. 1.7 Zeittafel zur Entwicklung weiterer Anwendungen der IR-Messtechnik (nach [1, 4, 5]).

Jahr	Ereignis
1820	Erfindung des Pyrometers durch John Frederic Daniell
1839	Nachweis mittels Thermometer, dass die Temperatur bei entzündeten Organen erhöht ist, durch Antoine-Cesar Becquerel und Gilbert Breschet
1864	Apparat zur frühzeitigen Ortung von Eisbergen auf Schiffen durch den Engländer Bryson, basierend auf dem Prinzip der von Melloni konstruierten thermoelektrischen Säule [10]
um 1900	Entdeckung, dass aus einem Interferogramm mittels Fourier-Transformation ein Spektrum berechnet werden kann, durch Lord Rayleigh
1903	Messung der Temperatur von Sternen und Planeten mittels IR-Radiometrie und -Spektroskopie durch William W. Coblentz
1911	Erste Form der Fourier-Transformations-Spektroskopie (im fernen IR) durch Heinrich Rubens und Robert W. Wood
seit 1914	Nutzung von Bolometern für die Fernerkundung von Menschen (Reichweite 200 m) und Flugzeugen (1000 m) sowie die Lenkung von Torpedos
1917	Erstes IR Search & Track (IRST-) Gerät in Großbritannien entwickelt. Reichweite gegen Flugzeuge ca. eine Meile
1930	IR-Peilgeräte auf Basis von PbS-Quantendetektoren im Wellenlängenbereich 1,5–3,0 μm für militärische Anwendungen (Gudden, Görlich und Kutzscher), Erweiterung der Reichweite im 2. Weltkrieg auf 30 km für Schiffe und 7 km für Panzer (3–5 μm)
1934	Erstmalig berührungslose Messung der Hauttemperatur durch James D. Hardy
1938	Entwicklung des ersten IR-Spektrometers durch die BASF-Chemiker Erwin Lehrer und Karl Friedrich Luft. Der Ultra-Rot-Absorptions-Schreiber (URAS) konnte die Konzentration von über 100 Gasen vollautomatisch bestimmen,
seit 1955	Massenfertigung von IR-gelenkten Raketen mit PbS- und PbTe-, später InSb-Sensoren (USA: 1955 Sidewinder, 1956 Falcon; GB: 1957 Red Top, 1958 Firestreak; Frankreich: 1959 Matra)
1956	Anwendung der Wärmebildtechnik (Evaporografie) zur Detektion von Brustkrebs durch Ray Lawsen
1962	Erstes kommerzielles FTIR-Spektrometer der Fa. Sir Howard Grubb, Parsons and Co. Ltd.

einen Bildschirm lenkte, wobei die Helligkeit der sichtbaren Lichtquelle vom Signal des IR-Detektors moduliert wurde. Dieses System war der Ausgangspunkt vieler weiterer Wärmebildgeräteentwicklungen bis Mitte der 1990er-Jahre. Erst ab den 1970er-Jahren setzten sich dann zunächst immer mehr Zeilensensoren mit Linienscannern und später zweidimensionale Sensorarrays mit direkter optischer Abbildung der Thermoszene durch. Einfache Thermokameras für den Handwerker- und Heimbereich besitzen inzwischen Arrays von 10^4 – 10^5 Pixeln, Hochleistungswärmebildkameras sogar von mehreren Millionen Pixeln.

Mit dieser beeindruckenden technischen Entwicklung auf dem Gebiet der IR-Detektoren ergaben sich nicht nur Anwendungen im Bereich der berührungslosen Temperatur- und Wärmebildtechnik, sondern auch in vielen anderen Bereichen (Tab. 1.7), da sie prinzipiell einen ähnlichen Aufbau haben (siehe Tab. 1.3). Wichtige Gebiete sind hier Sensoren für die Peilung von Gegenständen, insbesondere stark befördert in den Zeiten der beiden Weltkriege, die Ortung von Personen (Bewegungsmelder), die Gasanalyse und die Spektrometrie sowie medizinische Anwendungen.

Literatur

- 1 Schlemmer, H. (2018). *Eine unsichtbare Welt sehen. Die Geschichte der Wärmebildtechnik*. Mittler.
- 2 Pauly, H. und Engel, F. (1999). *Das Pyrometer-Kompendium*. IMPAC Electronic GmbH.
- 3 Kaplan, H. (1993). *Practical Application of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*. SPIE Optical Engineering Press.
- 4 Herrmann, K. und Walther, L. (1990). *Wissensspeicher Infrarottechnik*. Fachbuchverlag.
- 5 Caniou, J. (1999). *Passive Infrared Detection, Theory and Application*. Kluwer Academic Publisher.
- 6 Herschel, W. (1800). Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 90: 284–292.
- 7 Minkina, W. (2021). How infrared radiation was discovered – Range of this discovery and detailed, unknown information. *Applied Sciences* 11: 9824.
- 8 Rogalski, A. (2012). History of infrared detectors. *Opto-Electronics Review* 20: 279–308.
- 9 Norton, P. (2002). HgCdTe infrared detectors. *Opto-Electronics Review* 10: 159–174.
- 10 Polytechnische Mittheilungen. *Illustrierte Zeitung* 3. Dezember 1864: 394, <https://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=izl&datum=18641203&seite=14> (abgerufen am 28.02.2022).