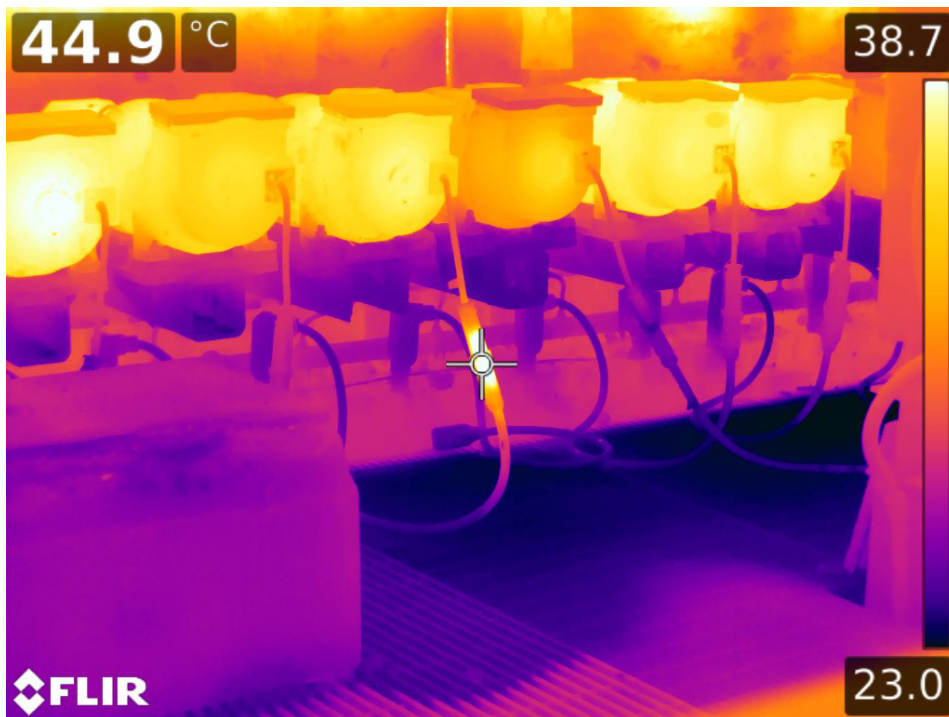


Einführung
in die
Infrarotmesstechnik



Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	6
1.1 Vorteile der Infrarot Temperaturmessung	8
1.2 Nachteile	9
2 Grundlagen	10
2.1 Temperatur	10
2.2 Strahlung	11
2.2.1 Grundlagen der Strahlung	11
2.2.2 Sichtbares Licht	22
2.2.3 Infrarotstrahlung	23
2.2.4 Radiowellen	24
2.2.5 Ermittlung des Emissionsgrades	24
3 Die Infrarotmessung	26
3.1 Messobjekte	26
3.1.1 Metalle	26
3.1.2 Kunststoffe	27
3.1.3 Glas	29
3.2 Atmosphäre	30
3.3 Störgrößen	31
3.3.1 Optik und Fenster	32
3.3.2 Detektoren	35
3.3.3 Messdatenerfassung	39
4 Klassifizierung der Messsysteme	41
4.1 Subjektive Messsysteme	43
4.2 Objektive Messsysteme	44
4.2.1 Punktmessende Systeme	44
4.2.2 Zeilenkameras (Linienscanner)	48
4.2.3 Bildgebende Systeme	50

5	Anwendungsbeispiele	52
5.1	Medizintechnische Anwendungen	52
5.2	Vorbeugende Wartungsmaßnahmen	52
5.3	Ausrichtungsfehler von rotierenden Teilen	54
5.4	Kontrolle des Riemenschlupfs bei Riemengetrieben	56
5.5	Füllstands und Durchflussüberprüfung	56
5.6	Ortung von Leckagen und Undichtheiten	56
5.7	Gebäudethermografie	57
5.8	Diagnose in der Elektrotechnik und Elektronik	59
5.9	Anwendungen im automotiven Bereich	60
5.10	Sicherheitstechnik	61
5.11	Brandortungssysteme	62
6	Schulungsprogramm	63
7	Begriffe und Definitionen	64
8	Emissionsgradtabellen	65
8.1	Referenzen	65
8.2	Tabellen	65
9	Symbole und Abkürzungen	75
9.1	Zeichen und Konstanten	75
9.2	Physikalische Vorsatzsilben	76
10	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	77
10.1	Abbildungsverzeichnis	77
10.2	Tabellenverzeichnis	78
11	Index	79
12	Literaturverzeichnis	84

Vorwort

Das vorliegende Schulungshandbuch sollte einen Querschnitt für den Einstieg in das Themengebiet der Strahlungsthermometrie bieten.

Es wird sowohl auf die zugrunde liegende Theorie als auch auf die praktische Umsetzung eingegangen. Unterschiedliche Infrarotmesssysteme sowie Anwendungsbeispiele bilden den Abschluss dieses Buches.

Zeichenerklärung


Symbol oder Abkürzung	Beschreibung
	Mit diesem Symbol gekennzeichnete Stellen beinhalten eine Zusammenfassung wesentlicher Inhalte oder praktische Tipps
[Nummer]	Verweis auf Literatur, siehe Kapitel 12

Tabelle 1 Zeichenerklärung

1 Zusammenfassung

Die Temperaturmessung wird allgemein in die zwei Hauptbereiche „Berührende-“ und „Berührungslose Temperaturmessung“ aufgeteilt. Während bei der berührenden Temperaturmessung durch den Messsensor immer ein Kontakt zum Messobjekt besteht, wird bei der berührungslosen Temperaturmessung die Strahlung des Messobjekts berührungslos über einen infrarotempfindlichen Sensor gemessen. Auf Grund von physikalischen Zusammenhängen, die in den weiteren Kapiteln noch näher erläutert werden, lässt sich bei Kenntnis bestimmter Parameter die Strahldichte des Messobjektes in eine Temperatur umwandeln. Die Infrarot-Technologie ist keine neue Erfindung – seit Jahrzehnten wird sie bereits erfolgreich in Industrie und Forschung eingesetzt – doch haben in jüngster Zeit eingeführte Innovationen die Kosten gesenkt, die Zuverlässigkeit erhöht und für immer kleinere Abmessungen der Sensoren gesorgt. Diese Faktoren haben die Infrarot-Technologie für neue Anwendergruppen und Einsatzgebiete interessant gemacht. Die Infrarot Messtechnik wird in folgenden Gebieten eingesetzt:

Gebäudethermografie	Schnelle und rationelle Analyse von Wärmeverlusten bei der Beheizung von Häusern und Wohnungen. Ortung von feuchten Stellen und defekten Rohrleitungen.
Industriethermografie	Kontrollmessungen an Kraftwerken oder Industrieanlagen zur Überprüfung von Isolationen von Hochöfen, Schornsteinen und Rohrleitungen sowie der Ortung etwaiger Überhitzungen, vorbeugende Instandhaltung, Detektion von Temperaturanomalien an Lagerstellen.
Energiewirtschaft	Vorbeugende Untersuchungen von Energieversorgungs- und Verteilungssystemen. Defekte Isolationen von Leitungen oder überhitzte Zonen in elektrischen Anlagen, verursacht durch erhöhte Übergangswiderstände, werden sofort berührungslos erkannt.
Qualitätssicherung	Überall wo mechanische, thermodynamische oder elektromagnetische Vorgänge in industriellen Anwendungsprozessen mit einer lokalen Wärmeentwicklung verbunden sind, kann die Thermografie zur Sicherung solcher Prozesse eingesetzt werden. Heiße Zonen werden sichtbar, zum Beispiel durch Reibung bei Lagern, Verbrennungsvorgänge bei Motoren oder stromdurchflossene Leitungsbahnen in Schaltkreisen.
Umweltschutz	Kontrolle etwaiger Gewässereinleitungen, Deponieüberwachung und Analyse beziehungsweise Feststellung des Schädigungsgrades von Land- und forstwirtschaftlichen Kulturen
Medizin	Mit Hilfe der Thermografie können zum Beispiel Durchblutungsstörungen und Entzündungsherde im menschlichen Körper (auch bei Tieren) sichtbar gemacht und dokumentiert werden.

Tabelle 2 Einsatzgebiete der IR-Thermografie

Der technische Einsatzbereich der Infrarot Thermometrie umfasst:

Bereich	Aufgabe	Einsatzbereiche
Elektronikindustrie	Funktionsprüfung und thermische Verteilung, Belastbarkeitsprüfung, Früherkennung von erhöhten oder abnormalen Temperaturen in der Forschung, Entwicklung und Qualitätssicherung, sowie in der Fertigung und Produktion	Haushaltsgeräte, Computer, Elektronische Geräte, Halbleitern, Lampen, Maschinen, Trafowicklungen, Generatoren, Motoren, Motorengetriebe, Motorenlager und Gehäuse, Halbleitern, IC's und Kühlkörpern, Netzteile und elektronische, Baugruppen, Kühlgebläse und Klimaanlage, Gefrierschränke, Kühltruhen, Mikrowellenherde, Elektroherde und Backöfen, Schaltanlagen, Starkstromanlagen und Hochspannungsanlagen, Lötbadertemperaturen sowie Siliziumwafer
Automobilindustrie		Autos & Nutzfahrzeuge, Katalysatoren, Abgassysteme, Klimaanlage, Motoren & Antriebe, Bremsanlagen, Bremsen und Verstärker, Kühler, Motoren, Gebläse, Defroster und Heckscheibenheizung, Stossdämpfer, Autoreifen und Felgen, beheizte Sitze, beheizte Sprühdüsen
Chemie		Düsen für Produktionsmaschinen, Plastikfolien, Isolationsmaterialien, Raffinerieöfen
Metallindustrie		Druckmaschinen, Lager und Getriebe, Fräsmaschinen und Fräsköpfe, Schweißautomaten, Guss- und Schmiedetechnik, Schmelzöfen, Material- oder Ermüdungsfehler in Hubschrauberrotoren, Turbinen, Prüfung von Schweißnähten, Walzen und Rotationsmaschinen
Sonstiges		Brenner, Öfen und Heizungen, Pflanzen, Blättern und Bäumen, Verunreinigungen von Gewässern, Strömungen in Seen, Flüssen und Gewässern, Geschwindigkeitsmessung, Justierung von IR-Laser, Gewebeuntersuchung von Textilien

Tabelle 3 Technische Einsatzgebiete der IR-Thermografie

1.1 Vorteile der Infrarot Temperaturmessung

Schnelligkeit:

Die Infrarottemperaturmessung bewegt sich im ms-Bereich. Dadurch erreicht man eine Zeitersparnis bzw. sind in derselben Zeit mehrere Messungen und mehr Informationsgewinn möglich.

Bewegte Objekte:

Messungen sind an bewegten Objekten möglich (Bandprozesse).

Gefährliche oder schwer zugängliche Bereiche:

Messungen sind an gefährlichen oder schwer zugänglichen Stellen durchführbar. Z.B. Messung an unter Hochspannung stehenden Teilen, Messung bei großer Messentfernung, Messung von giftigen Chemikalien.

Hohe Messtemperaturen:

Mit Infrarottemperaturmesstechnik sind Messtemperaturen über 1500 °C kein Problem. Kontaktthermometer würden dabei versagen oder nur eine eingeschränkte Lebensdauer haben.

Keine Rückwirkung auf das Messobjekt:

Man spricht dann von rückwirkungsfrei, wenn dem Messobjekt keine Energie entzogen wird. Speziell bei schlechten Wärmeleitern wie Plastik und Holz ergeben sich damit eine hohe Messgenauigkeit und keine Verfälschung der Messwerte im Vergleich zur Berührung mit Kontaktthermometern.

Hygienisch und keine mechanische Einwirkung auf die Oberfläche:

Durch diese weiteren Eigenschaften können beispielsweise empfindliche Oberflächen, wie z.B. lackierte Oberflächen ohne Verschleiß oder auch weiche Oberflächen gemessen werden. In der Lebensmittelindustrie werden durch den Einsatz von berührlosen Messsystemen Verunreinigungen des Messobjektes durch das Messsystem vermieden.

Flächenhaftes Messen:

Der Einsatz von Thermokameras ermöglicht das Messen von Temperaturfeldern (z.B. Messung von kompletten Schaltschränken oder Untersuchungen an Gebäuden).

1.2 Nachteile

Infraoptische Sichtbarkeit des Messobjektes:

Das Objekt muss optisch (infraroptisch) für das IR-Thermometer sichtbar sein. Starker Staub oder Rauch beeinträchtigen die Messung. Feste Hindernisse, wie z.B. Wände oder geschlossene Gefäße lassen im Inneren keine Messung zu.

Empfindlichkeit des Messkopfes:

Die Optik des Messkopfes muss vor Staub und kondensierenden Flüssigkeiten geschützt werden.

Messung von Oberflächentemperaturen:

Es lassen sich in der Regel nur Oberflächentemperaturen messen, wobei die unterschiedlichen Abstrahlungseigenschaften verschiedener Werkstoffoberflächen beachtet werden müssen.

2 Grundlagen

2.1 Temperatur

Der physikalischen Definition zufolge ist die Temperatur eine Zustandsgröße, die Systeme oder Körper im so genannten thermodynamischen Gleichgewicht charakterisiert. Der physikalische Begriff Temperatur entstand, als man Wärmeunterschiede von Körpern messen wollte. Man erkannte, dass ein Körper, solange er nicht schmilzt oder verdampft, heißer wird, wenn man ihm Wärme zuführt. Haben zwei Körper unterschiedliche Temperaturen und befinden sie sich in engem Kontakt miteinander, so fließt Wärme vom heißeren zum kühleren Körper, bis beide dieselbe Temperatur haben.

Ändert ein Körper seinen Aggregatzustand, z.B.: er schmilzt oder verdampft, so muss diesem Körper zusätzliche Energie in Form von Wärme zugeführt werden. Man spricht hier von Schmelz- beziehungsweise von Verdampfungswärme. Die Temperatur ändert sich im Allgemeinen während dieser Umwandlung nicht. Wird der Prozess umgedreht, erstarrt oder kondensiert der Körper, so wird zusätzliche Energie abgegeben.

Neben dem Messen der Zeit ist die Temperatur die am zweithäufigsten gemessene physikalische Größe. Sowohl in der Fertigung und Qualitätskontrolle als auch bei Wartungsarbeiten spielt die Temperatur als Indikator für den Zustand eines Produktes oder einer Maschine eine große Rolle.

Durch präzise Temperaturüberwachung wird eine Steigerung der Produktqualität und der Produktivität erreicht. Stillstandszeiten werden verringert, da die Fertigungsprozesse kontinuierlich unter optimalen Bedingungen ablaufen können.

Physikalisch betrachtet stellt die Temperatur respektive die Wärmeenergie ein Maß der mittleren kinetischen Energie E_{kin} der Moleküle des untersuchten Körpers dar. Das heißt, jene Energie, die in der Bewegung der Teilchen gespeichert ist. Die Bewegung der Moleküle erfolgt im Allgemeinen zufällig und regellos [1]. Eine allgemeine und vollständige Beschreibung wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

Dabei entspricht m der Masse, v der mittleren Geschwindigkeit, k der Boltzmann Konstante $1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ und T der Temperatur in K¹.

¹ Grad Kelvin. 0 K, der absolute Nullpunkt, entspricht -273,15 °C

2.2 Strahlung

2.2.1 Grundlagen der Strahlung

Als Strahlung werden in der Physik sich ausbreitende Elementarteilchen und Wellen bezeichnet, die immer mindestens Energie und Impuls transportieren. Besitzt das Strahlungsteilchen auch Masse, Ladung und weitere Eigenschaften so werden auch diese transportiert. Ursprüngliche Diskussionen über die Natur des Lichtes, ebenfalls Strahlung, ob sie aus Teilchen oder Wellen besteht wurde in der Quantenphysik mit dem Wellen-Teilchen Dualismus beantwortet. Licht besteht aus Photonen, die sowohl Teilchen als auch Wellencharakter haben. Eine der Eigenschaften tritt aber im Allgemeinen dominant hervor [1].

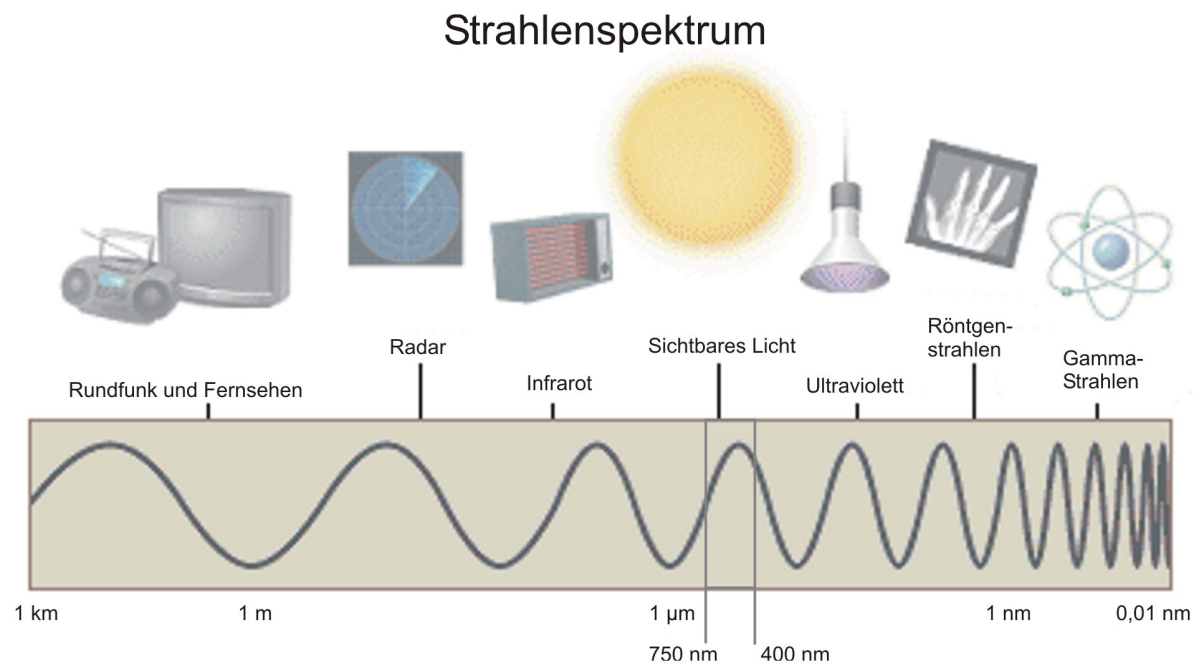


Abbildung 1 Einteilung der Strahlung

Wellenlänge	Spektralgebiet	Strahlungsempfänger
< 10 nm	γ - und Röntgenstrahlung	Ionisationskammer, Photoplatte, Zählrohr
10 – 180 nm	Vakuum Ultraviolett	Schumann-Photoplatte
180 – 400 nm	Quarz Ultraviolett	Photoplatte
400 – 750 nm	Sichtbares Licht	Photoplatte
750 – 1 000 nm (0,7 – 1 μ m)	Photografisches Infrarot	IR-Sensible Photoplatte
1 000 – 5 000 nm (1 – 5 μ m)	Kurzwelliges Infrarot	Photowiderstand
5 000 – 40 000 nm (5 – 40 μ m)	Mittleres Infrarot	Thermosäule, Thermoelement, Bolometer, Golay-Zelle
40 000 – 400 000 nm (40 – 400 μ m)	Langwelliges Infrarot	Thermosäule, Thermoelement, Bolometer, Golay-Zelle
> 400 000 nm (> 400 μ m)	Mikro und Radiowellen	Spezielle Hoch- und Höchstfrequenztechnik

Tabelle 4 Wellenlängen unterschiedlicher Strahlungen

Jeder Körper, dessen Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes liegt, strahlt Energie in Form elektromagnetischer Strahlung ab. Die physikalischen Grundlagen der Strahlung gehen auf Untersuchungen des „Schwarzen Strahlers“ durch Max Planck im Jahr 1900 zurück. Als „Schwarzer Strahler“ oder „Schwarzer Körper“ wird ein Körper bezeichnet, der alle auftreffende Strahlung absorbiert, das heißt aufnimmt und in Wärme umsetzt und diese aufgenommene Energie wieder abstrahlt, das heißt emittiert. Diese Eigenschaft kann mit einem innen geschwärzten Hohlkörper, der eine im Vergleich zu seiner Oberfläche eine sehr kleine Öffnung besitzt, erreicht werden. In der Praxis reicht eine Bohrung in einen Körper, die achtmal tiefer ist als der Durchmesser der Bohrung.

Der Begriff des „schwarzen Körpers“ beziehungsweise des „schwarzen Strahlers“ wurde 1862 von Gustav Kirchhoff geprägt. Im Zuge der Entwicklung der klassischen Physik, statistischen Physik und der Elektrodynamik versuchten die Physiker jener Zeit, das Abstrahlungsspektrum des schwarzen Körpers aus grundlegenden Gesetzen zu verstehen.

Einander widersprechende Ergebnisse durch das Wiensche Strahlungsgesetz,

$$\rho(\nu, T) d\nu \approx \frac{8 \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot e^{\frac{-h \cdot \nu}{k \cdot T}} d\nu$$

dass nur die höheren Frequenzen hinreichend beschreibt, und dem Rayleigh-Jeansschen Strahlungsgesetz,

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8 \cdot h \cdot \nu^2}{c^3} \cdot k \cdot T d\nu$$

dass für niedrige Frequenzen Gültigkeit besitzt, führte zu einer nicht zufrieden stellenden Situation. Beide Gesetze besitzen in ihrem Frequenzbereich Gültigkeit, ergeben aber am anderen Ende des Frequenzspektrums vollkommen falsche Ergebnisse.

Ein ideal schwarzer Körper absorbiert nicht nur Strahlung. Nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz sind Strahlungsabsorption α und Emission ε proportional.

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$$

Ein schwarzer Körper, der wärmer als der absolute Nullpunkt ($-273,15 \text{ °C} = 0 \text{ K} - \text{Kelvin}$) ist, gibt elektromagnetische Strahlung ab. Die Abhängigkeit des Energie- bzw. Wellenlängen-Spektrums von der Temperatur beschreibt das Plancksche Strahlungsgesetz. Ideale schwarze Körper gibt es in der Natur nicht, aber sie sind eine wichtige Abstraktion und Approximation, um das Absorptions- und Emissionsverhalten realer Körper zu beschreiben. Die beste Näherung eines schwarzen Körpers ist ein lichtdichter Hohlraum, in dem die Hohlraumstrahlung im thermodynamischen Gleichgewicht ist. Ruß ist ein Beispiel für einen grauen Körper. Er absorbiert die Strahlung nicht vollständig, zeigt aber ein Absorptionsvermögen, das unabhängig von der Wellenlänge ist². Der ideale schwarze Strahler kann mit einem Hohlraumstrahler (siehe Abbildung 2) angenähert werden.

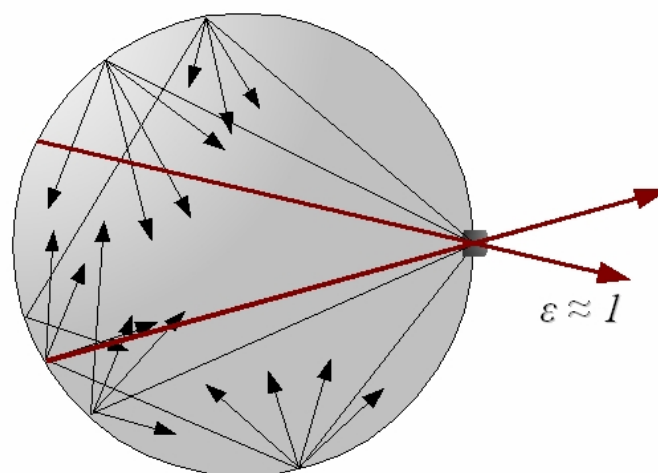


Abbildung 2 Hohlraumstrahler

² Aus <http://www.net-lexikon.de/>

Der Emissionsgrad stellt das Verhältnis der Strahlungsenergie des realen Objektes zur Strahlungsenergie des schwarzen Strahlers dar und ist für diesen 1.

Für reale Objekte gilt, dass sich die Gesamtheit der Abstrahlung aus Emission ε , Transmission τ und Reflexion ρ zusammensetzt. Deren Summe ist 1 (siehe Abbildung 3).

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$



Für reale Körper gilt, dass sich die Gesamtheit der Abstrahlung aus Emission ε , Transmission τ und Reflexion ρ zusammensetzt. Deren Summe ist 1

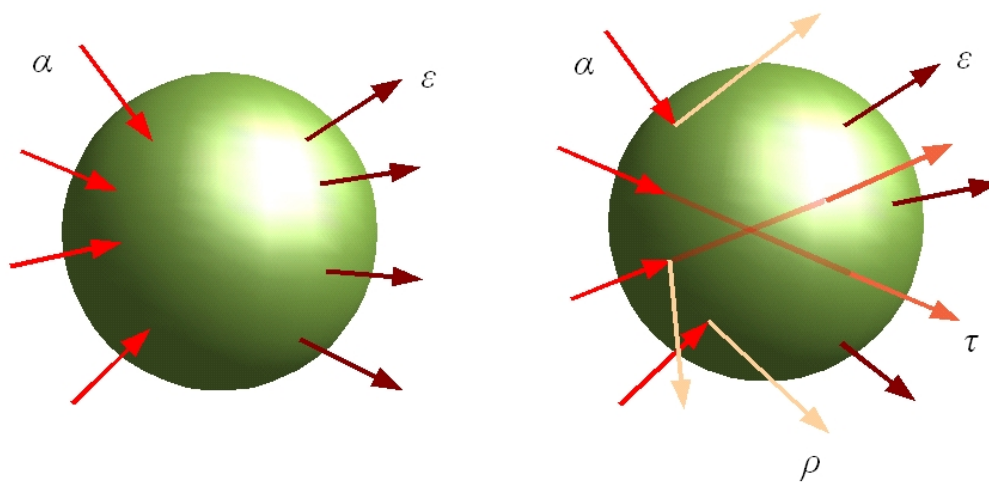


Abbildung 3 Schwarzer Strahler (links) und realer Körper (rechts)

Man unterteilt in drei unterschiedliche Körper, die sich durch ihren Emissionsgrad unterscheiden.

Schwarzer Körper	$\alpha = \varepsilon = 1$	$\varepsilon = \text{const}$, keine Funktion der Wellenlänge λ
Grauer Körper	$\alpha = \varepsilon < 1$	$\varepsilon = \text{const}$, keine Funktion von λ
Farbiger Körper bzw. Selektive Strahler	$\alpha = \varepsilon < 1$	$\varepsilon = f(\lambda)$

Tabelle 5 Einteilung der Emissionsgrade

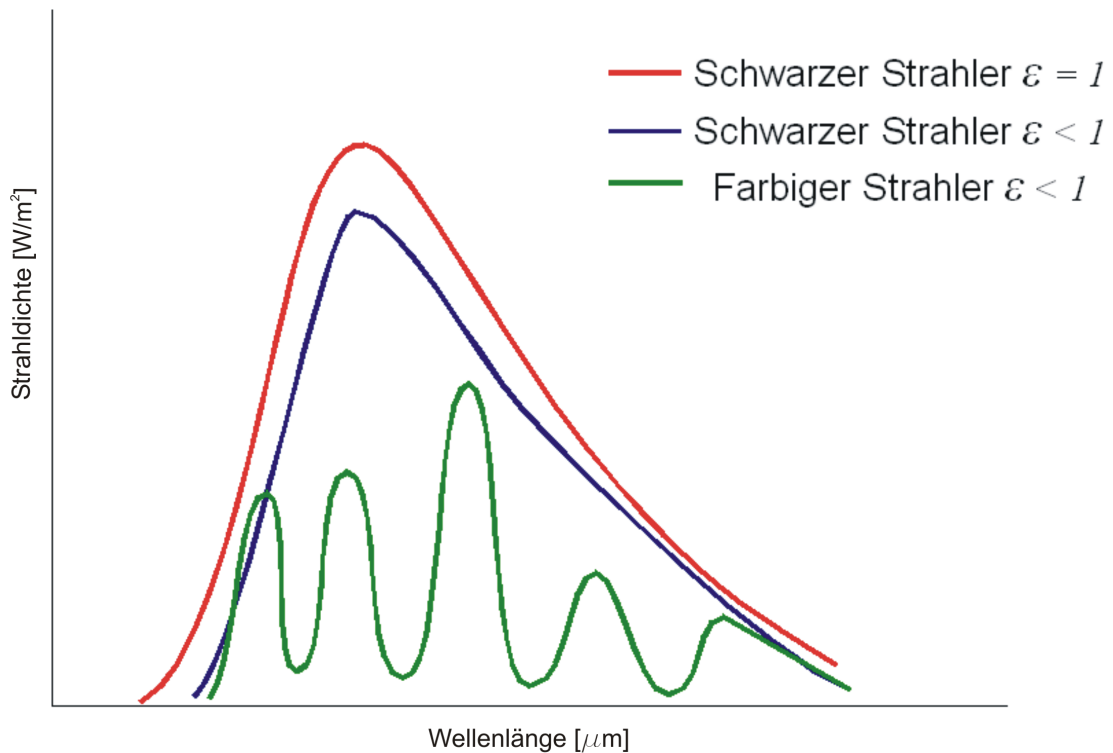
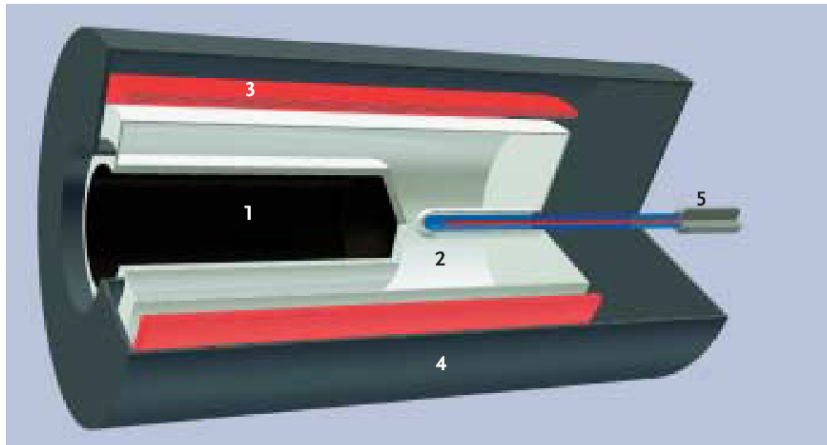


Abbildung 4 Spezifische Ausstrahlung bei verschiedenen Emissionsgraden

Reale Oberflächen weisen immer einen Emissionsgrad kleiner 1 auf. Auch ist der Werkstoff von entscheidender Bedeutung für den Emissionsgrad. Hier kann zwischen Metallen und Nichtleitern unterschieden werden. Blanke Metalle haben einen sehr geringen Emissionsgrad. Durch Reflexion ist eine genaue Bestimmung des Emissionsgrades schwierig. Außerdem weist dieser eine starke Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit auf. Je rauer eine Oberfläche ist, desto größer ist auch der Emissionsgrad. Dies lässt sich modellhaft über Mehrfachreflexion an mikroskopischen Vertiefungen in der Oberfläche beschreiben. Eine eventuell vorhandene Oxidschicht erhöht den Emissionsgrad stark. Blanke Metalle neigen zu einer ausgeprägten Winkelabhängigkeit des Emissionsgrads. Er nimmt bei vielen Metallen mit steigender Wellenlänge ab.

Isolatoren, Dielektrika wie Holz, Mauerwerk, lackierte Oberflächen usw. liegen mit ihrem Emissionsgrad sehr viel näher bei 1. Sie haben neben der höheren abgestrahlten Leistung auch eine sehr geringe Winkelabhängigkeit aufzuweisen. Meist gilt, dass bei diesen Werkstoffen mit steigender Wellenlänge der Emissionsgrad zunimmt.

Für die Kalibrierungs- und Forschungszwecke werden so genannte Wärmrohröfen-Hohlraumstrahler eingesetzt. Sie dienen als „Schwarze“ beziehungsweise „Graue Strahler“. Wärmrohröfen besitzen eine sehr hohe Güteklasse und decken einen Temperaturbereich von -50 bis $+650$ °C ab [3].



Schematische Darstellung eines Wärmerohren-Hohlraumstrahlers: 1 = Strahlerhohlraum, 2 = geschlossener Wärmerohr-Raum mit Wärmeträgermedium, 3 = Heizung, 4 = Gehäuse, 5 = Normal-Widerstandsthermometer.

Abbildung 5 Wärmerohren³

Typische Bauformen von Wärmerohröfen

Bezeichnung	Temperaturbereich
Ammoniak-Wärmerohrofen	-50 °C bis 50 °C
Wasser-Wärmerohrofen	50 °C bis 270 °C
Cäsium-Wärmerohrofen	300 °C bis 650 °C

Tabelle 6 Typen von Wärmerohröfen

Besitzt ein Strahler eine richtungsunabhängige Strahlungsichte, so spricht man von einem „Lambert Strahler“ (siehe Abbildung 6). Näherungsweise kann eine mattweiße Fläche (Blatt Papier), ein schwarzer Körper oder ein Hohlraumstrahler als Lambert-Strahler betrachtet werden. Für die spektrale Strahlendichte L_λ gilt:

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{dI}{dA \cdot d\lambda \cdot \cos\vartheta}$$

Das Lambert-Gesetz beschreibt den Zusammenhang der Strahlendichte I zur Abstrahlrichtung und gilt, wenn die Strahlendichte einer Fläche A in alle Abstrahlrichtungen ϑ konstant ist.

$$I = I_n \cdot \cos\vartheta$$

Die spektrale Strahlendichte ist für einen Lambert-Strahler somit:

³ Aus metINFO Vol. 10 No. 3/2003, Seite 6

$$L = \frac{dI_n}{dA}$$

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{d^2 I_n}{dA \cdot d\lambda} \neq f(\vartheta)$$

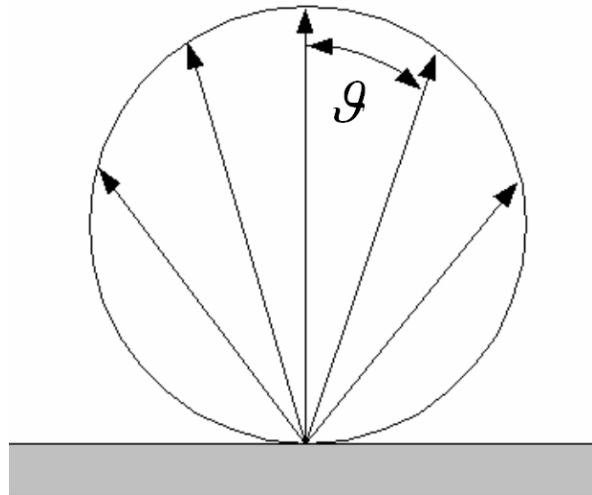


Abbildung 6 Lambert-Strahler

Einen Lambert Strahler kann man sich als einen Körper mit rauer, diffuser Oberfläche vorstellen der den nicht absorbierten Anteil der Strahlung entsprechend dem Lambertschen Gesetz in den darüber befindlichen Halbraum reflektiert.

Die Untersuchungen von Max Planck über den schwarzen Strahler bilden die Grundlage der Quantentheorie. Danach kann ein Strahler nicht beliebige Energieportionen austauschen, sondern nur ganzzahlige Vielfache des Energiequantums $h \cdot \nu$. Das Plancksche Wirkungsquantum, h , ist eine Naturkonstante mit $h = 6,626 \cdot 10^{-23} \text{ Js}$. Die Frequenz der Strahlung ist mit ν bezeichnet.

Für eine einfache Erklärung betrachtet man nun eine Gruppe von Teilchen und unterwerfen diese einer Bestrahlung mit der Frequenz ν . Nachdem die Teilchen die Strahlung absorbiert haben, kann die Teilchenmenge in zwei Gruppen unterteilt werden. Jene Menge n^* , die eine um den Faktor $h \cdot \nu$ höhere Energie besitzen und die Menge n_0 , die nicht angeregt wurden. Das Verhältnis der energiereicheren und energieärmeren Teilchen lässt sich über die Boltzmann-Verteilung ermitteln.

$$\frac{n^*}{n_0} = e^{\frac{-W}{k \cdot T}} = e^{\frac{-h \cdot \nu}{k \cdot T}}$$

Die Energieverteilung $\rho(\nu, T)$ wird durch die Ableitung von Einstein mit

$$\rho(\nu, T) = \frac{A \cdot e^{-\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}}}{B \left(1 - e^{-\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}}\right)} = \frac{A}{B \left(e^{\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}} - 1\right)}$$

beschrieben. A und B werden als Einstein Koeffizienten bezeichnet. Von Max Planck stammt die Beschreibung des schwarzen Strahlers.

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8 \cdot h \cdot \nu}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}} - 1} d\nu$$

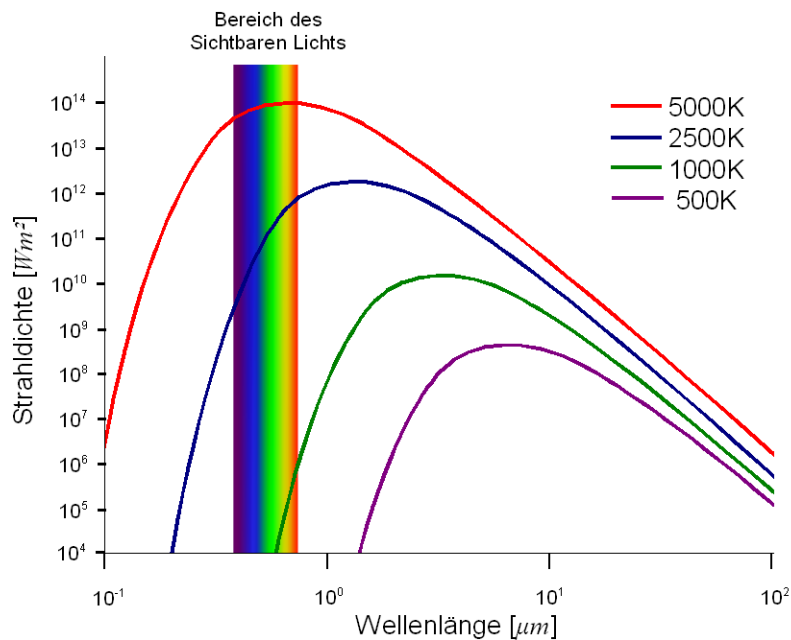


Abbildung 7 Strahlungscharakteristik eines schwarzen Strahlers

Aus dem Planckschen Strahlungsgesetz ergibt sich durch Ableiten und Nullsetzen die Frequenz ν_m des Maximums der Strahlungsdichte.

$$\nu_m = \frac{2,82 \cdot k}{h} T = 5,88 \cdot 10^{10} T$$

Dies wird als „Wien-Verschiebung“ bezeichnet.

Die Gesamtenergiedichte eines schwarzen Strahlers entspricht der Fläche unter der Planck-Kurve. Dieses Integral ist als Stefan-Boltzmann-Gesetz bekannt.

$$R = \frac{4 \cdot \pi^5}{15} \cdot \frac{k^4}{c^2 \cdot h^3} \cdot T^4$$

Aus diesen Gesetzen lässt sich die von einer Fläche A nach einer Seite abgestrahlte Leistung P mit

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

errechnen. Dabei bezeichnet σ die Stefan-Boltzmann-Konstante.

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Mit Hilfe dieser Gesetzmäßigkeiten wird auch versucht, die kosmische Hintergrundstrahlung zu analysieren und stellt eine Grundlage der Urknall-Hypothese dar.

Aus diesen physikalischen Zusammenhängen kann die sogenannte „Pyrometrische Grundgleichung“ aufgestellt werden. Die gesamte empfangene Strahlungsmenge M_{ges} ergibt sich aus:

$$M_{ges} = \varepsilon \cdot M(T_0) + (1 - C) \cdot M(T_u)$$

Die Temperatur des Messobjekts wird mit T_0 und die Umgebungstemperatur mit T_u bezeichnet.

Zusammenfassend kann die Strahlung als die magnetische Wechselwirkung der inneren Ladungsenergien zwischen Atomkern und Elektronen erzwungenen Eigenschwingungen im Raumgitter verstanden werden, die als elektromagnetische Strahlung emittiert werden.

Bei 0 K tritt keinerlei elektromagnetische Strahlung mehr auf. Deshalb wird diese Temperatur als absoluter Nullpunkt definiert.

2.2.1.1 Temperaturbestimmung bei Schwarzen Körpern

Zur Bestimmung der Temperatur eines „Schwarzen Körpers“ schreibt die Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS-90) vor, das Verhältnis der spektralen Strahlendichte $L_\lambda(\lambda, T)$ bei der unbekanntem Temperatur T und der Spektralen Strahlendichte $L_\lambda(\lambda, T_{Au})$ bei der Temperatur $T_{Au} = 1337,58 K$ des erstarrenden Goldes zu bestimmen [8]. Dieses Verhältnis kann auf verschiedene Arten experimentell bestimmt werden. Vorschriften zur Bestimmung existieren nicht.

Da aber die spektrale Strahlendichte nie gemessen werden kann, da jede physikalische Messeinrichtung nur deren Integral über einen bestimmten Spektralbereich bestimmt, wird in der Praxis immer das Verhältnis Q der spektralen Strahlendichte $L_\lambda(\lambda, T)$ mal dem spektralen Durchlassgrad $F(\lambda)$ des optischen Systems bestimmt [4] [5].

$$Q = \frac{\int L_{\lambda,S}(\lambda, T) \cdot F(\lambda) \cdot d\lambda}{\int L_{\lambda,S}(\lambda, T_{Au}) \cdot F(\lambda) \cdot d\lambda}$$

2.2.1.2 Effektive Wellenlänge

Die in Kapitel 2.2.1.1 vorgeschlagene Methode zur Bestimmung der Temperatur ist numerisch sehr aufwendig, kann aber durch die Einführung der mittleren effektiven Wellenlänge λ_{mEff} erheblich vereinfacht werden.

Die mittlere effektive Wellenlänge λ_{mEff} für zwei Temperaturen T_1 und T_2 entspricht jener Wellenlänge bei der das oben eingeführte Verhältnis Q jenem Verhältnis Q' der spektralen Strahlendichten bei dieser effektiven Wellenlänge entspricht.

$$Q = \frac{L_{\lambda_{mEff},s}(\lambda_{mEff}, T_1) \cdot F(\lambda_{mEff})}{L_{\lambda_{mEff},s}(\lambda_{mEff}, T_2) \cdot F(\lambda_{mEff})}$$

Wäre die mittlere effektive Wellenlänge bekannt, so könnte einfach aus dieser Gleichung die unbekannte Temperatur ermittelt werden. Drückt man diese Gleichung mit Hilfe des Wienschen Verschiebungsgesetzes aus, so erhält man für Q' :

$$Q' = e^{-\frac{c_2}{\lambda_{mEff}} \cdot \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)}$$

Diese Gleichung lässt sich durch Logarithmieren und der Darstellung als Verhältnis zweier Funktionen weiter vereinfachen.

$$\int_{I_2}^{I_1} \frac{dI}{I} = \frac{c_2}{\lambda_{mEff}} \cdot \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)$$

Durch die Bildung des Grenzwertes $T_1 \rightarrow T_2$ erhält man die effektive Wellenlänge λ_{Eff} . Es hat sich gezeigt, dass sich der Kehrwert der effektiven Wellenlänge als hinreichend genaue Funktion des Kehrwertes der Temperatur T darstellen lässt. Daraus lässt sich für die mittlere effektive Wellenlänge λ_{mEff} zwischen zwei Temperaturen T_1 und T_2 wie folgt bestimmen:

$$\frac{1}{\lambda_{mEff}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{Eff} T_1} + \frac{1}{\lambda_{Eff} T_2} \right)$$

Diese Formel alleine kann nicht direkt zur Bestimmung der mittleren effektiven Wellenlänge λ_{mEff} verwendet werden, da eine effektive Wellenlänge λ_{Eff} von der gesuchten Temperatur T_1 abhängig ist. Dieses Problem kann aber iterativ behoben werden [4] [5].

2.2.1.3 Bestimmung der Strahlungstemperatur

Zur Bestimmung der Temperatur mittels Pyrometrie wird das Ausgangssignal V mit Hilfe eines Kalibrierungsfaktors k bestimmt, der eine direkte Umrechnung in die beobachtete Strahlungstemperatur ermöglicht.

$$V = \frac{k}{\frac{c_2}{e^{\lambda_{\text{Eff}} \cdot T}} - 1}$$

Die Modellrechnungen zeigen, dass der Kalibrierungsfaktor k für schmalbandige Pyrometer geringe Abweichungen besitzt und im Vergleich zu anderen Störeinflüssen vernachlässigbar beziehungsweise durch Bildung arithmetischer Mittel beherrschbar, ist [4].

Radioaktive Strahlung

1896 entdeckte Antoine Henri Becquerel, dass Uran enthaltende Stoffe eine Strahlung aussenden, die Stoffe durchdringt und Fotoplatten schwärzt. Diese radioaktive Strahlung ist nicht einheitlich, sondern kann verschiedene Komponenten enthalten:

- Komponente mit hohem Durchdringungsvermögen, die im elektrischen Feld nicht abgelenkt wird (γ -Strahlung)
- Komponente, die im elektrischen Feld zum Pluspol abgelenkte Komponente mit mittlerem Durchdringungsvermögen (β -Strahlung)
- Komponente, die im elektrischen Feld zum Minuspol abgelenkte Komponente mit geringem Durchdringungsvermögen (α -Strahlung).

Die radioaktive Strahlung ist aufgrund der hohen Energie in der Lage, Elektronen aus Atomen und Molekülen herauszuschlagen. Damit werden Elektronen und Ionen erzeugt; radioaktive Strahlen sind demnach ionisierende Strahlen. Auch wenn der Begriff „Radioaktive Strahlung“ in der Alltagssprache sehr verbreitet und damit richtig ist, ist seine Ableitung ungenau: Radioaktiv bedeutet so viel wie Strahlen aussendend und kann damit nur für die Atomkerne selbst verwendet werden. Die genauere Bezeichnung „Beim Zerfall radioaktiver Atome entstehende ionisierende Strahlung“ ist jedoch unhandlich.

Die Energiebereiche der γ - und Röntgenstrahlen überschneiden sich in einem weiten Bereich. Beide Strahlungsarten sind elektromagnetische Strahlung und bei gleicher Energie deshalb äquivalent. Das Unterscheidungskriterium ist die Herkunft: Röntgenstrahlen entstehen im Gegensatz zu den Gammastrahlen nicht bei Prozessen im Atomkern, sondern durch hochenergetische Elektronenprozesse. Röntgenphotonen haben eine Energie von etwa 100 eV bis 250 keV. Das entspricht einer Frequenz von ca. 3×10^{16} Hz bis 6×10^{19} Hz und einer Wellenlänge von ca. 5 pm – 10 nm, wobei weiche Röntgenstrahlen die kleinste Energie und Frequenz und die größte Wellenlänge haben, harte Röntgenstrahlen dementsprechend die größte Energie und Frequenz und die kleinste Wellenlänge.

Alle Formen radioaktiver Strahlung können für Lebewesen gesundheitsschädlich sein. Die Kurzzeitfolge einer zu hohen Dosis radioaktiver Strahlung wird Strahlenkrankheit genannt. Sie äußert sich durch ein geschwächtes Immunsystem und Verbrennungen. Die Langzeitfolgen radioaktiver Strahlen sind Mutationen und Krebs.

2.2.2 Sichtbares Licht

Licht ist der Teil der elektromagnetischen Strahlung, der von unserem Auge erkannt werden kann. Dies sind die elektromagnetischen Wellen im Bereich von etwa 400 – 750 Nanometer (nm) Wellenlänge. (750 nm: rot, 400 nm: violett/blau). Das sichtbare Spektrum ist Teil des elektromagnetischen Spektrums. Die unterschiedliche Empfindlichkeit des menschlichen Auges für verschiedene Wellenlängen ($V(\lambda)$ -Kurve) ist Grundlage der Photometrie.

Das in der Umwelt vorkommende Licht ist eine Mischung unterschiedlicher Wellenlängen. Durch ein Beugungsgitter oder ein Prisma kann man dieses polychromatische Licht in monochromatisches Licht (Licht einer Wellenlänge) zerlegen. Jeder dieser monochromatischen Lichtkomponenten entspricht ein spezifischer menschlicher Farbeindruck, die so genannten Spektralfarben oder Regenbogenfarben (siehe Abbildung 8). Die Übergänge zwischen Farben sind fließend, der Eindruck einzeln benennbarer abzählbarer Farben ist subjektiv und durch Sprache, Tradition sowie Denken bedingt. Die in verschiedenen Sprachen (ursprünglich) vorkommenden Worte für Farben belegen diese Subjektivität.

Violett	400 – 420 nm
Blau	420 – 490 nm
Grün	490 – 575 nm
Gelb	575 – 585 nm
Orange	585 – 650 nm
Rot	650 – 750 nm

Tabelle 7 Spektrum des sichtbaren Lichtes

Die einzelnen Farbbereiche enthalten jeweils verschiedene Farbtöne. So ist der Zwischenbereich zwischen Blau und Grün etwa mit Türkis oder Cyan zu bezeichnen. Andere wahrgenommene Farben (z.B. Braun) ergeben sich bei Licht, in dem mehrere Wellenlängen vorkommen (additive Farbmischung) oder durch subtraktive Farbmischung aus gefiltertem weißem Licht.

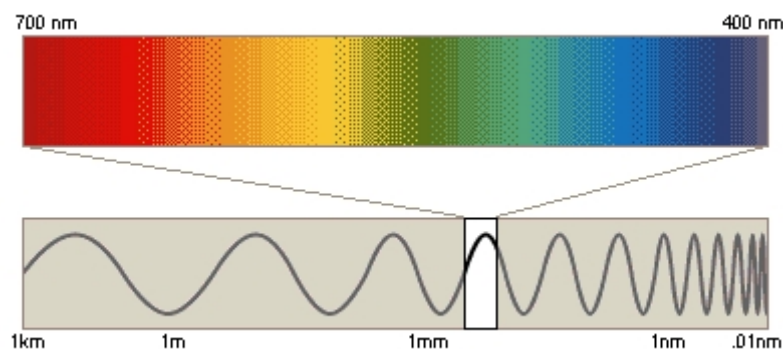


Abbildung 8 Farbspektrum des sichtbaren Lichtes

Jenseits von violett liegt das für Menschen unsichtbare Ultraviolett, jenseits von rot die auch Infrarot genannte Wärmestrahlung.

Neben der Wellenlänge bzw. Farbe ist Licht noch durch die Kohärenz und die Polarisation charakterisiert.

Licht hat wie beschrieben Wellencharakter, gleichzeitig aber auch Teilchencharakter, der so genannte Welle-Teilchen-Dualismus. Die Lichtteilchen werden als Photonen bezeichnet. Licht wird in folgenden Einheiten gemessen (siehe Tabelle 8).

Lichtstrom	φ ist ein Maß für die Leistung der Lichtquelle und ist der Quotient aus der Lichtmenge Q und der Zeit t	Lumen [lm]
Lichtmenge	Die Lichtmenge Q ist die photometrische Entsprechung zur Strahlungsmenge $Q(\lambda)$ der Radiometrie	Lumen·sec [lm.s]
Lichtstärke	Der Lichtstärke I ist die photometrische Entsprechung zur Strahlungsstärke $I(\lambda)$	Candela [cd]
Leuchtdichte	Die Leuchtdichte L ist das Verhältnis der ausgestrahlten Lichtstärke I und der Größe A einer leuchtenden Fläche	Candela/m ² [cd/m ²]
Beleuchtungsstärke	E ist der Quotient aus dem einfallenden Lichtstrom φ pro Element der Empfängerfläche A_e . Die Beleuchtungsstärke ist also eine reine Empfängergröße	Lux [lx]

Tabelle 8 Größen der Lichtmessung

2.2.3 Infrarotstrahlung

Bei Infrarotstrahlung handelt es sich um elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 780 nm und 1 mm (= 1.000.000 nm). Strahlung, deren Wellenlänge kürzer ist als die Infrarotstrahlung, wird Licht genannt; langwelligere Strahlung nennt man Mikrowellen.

Infrarotstrahlung ist für das menschliche Auge normalerweise nicht sichtbar. Da der Frequenzbereich unter dem des roten Lichts liegt, wurde dieser als „infra-“ (lat. Unterhalb) rot bezeichnet.

Elektromagnetische Strahlung im Bereich des Infraroten wird bei der Thermographie verwendet, um Wärmebilder zu erzeugen. Optische Elemente, also zum Beispiel Linsen, Prismen und Fenster, sollten dabei wegen zu starker Absorption nicht aus Glas bestehen, sondern aus Quarz.

Zur Ausbreitung von Infrarotstrahlung wird kein Trägermedium benötigt. Beispielsweise erreicht die Wärme von der Sonne die Erde durch das Vakuum des Weltalls.

Umgangssprachlich wird die Infrarotstrahlung manchmal auch als Wärmestrahlung bezeichnet.

Infrarotstrahlung wird in folgende Bereiche unterteilt:

- IR-A: Frequenzbereich von 780 nm – 1400 nm
- IR-B: Frequenzbereich von 1,4 μm – 3 μm
- IR-C: Frequenzbereich von 3 μm – 1 mm

Beziehungsweise wird die Infrarotstrahlung gemäß technischen Anwendungen in 2 Bereiche eingeteilt:

- Kurzwelliges Infrarot (Short Wave) : Frequenzbereich von 900 nm – 5000 nm
- Langwelliges Infrarot (Long Wave) : Frequenzbereich von 7500 nm – 14000 nm

Der für die Temperaturmessung mittels Infrarot Thermometrie interessante Bereich liegt bei 0,7 μm bis 14 μm (siehe dazu auch Kapitel 8). Der Grund für dieses relativ schmale Messfenster liegt im Transmissionsverhalten der Luft. Diese ist in diesem Bereich nahezu vollkommen transparent.

2.2.4 Radiowellen

Radiowellen sind elektromagnetische Wellen in einem Frequenzbereich (75 kHz – etwa 10 GHz), der für die Übertragung von Sprache, Bildern und anderen Daten z.B. für Rundfunk verwendet wird. Radiowellen entstehen auch auf natürliche Weise, z.B. liegen einige der von der Radioastronomie untersuchten Frequenzen im Bereich der Radiowellen. Sie tragen allerdings keine rundfunkähnlichen Inhalte.

2.2.5 Ermittlung des Emissionsgrades

Es gibt verschiedene Methoden, den Emissionsgrad eines Objektes zu bestimmen. Der Emissionsgrad für eine Reihe häufig verwendeter Materialien ist in Tabellen zusammengefasst. Die Bestimmung des Emissionsgrades zur Temperaturmessung mit Hilfe der Infrarot Thermometrie können folgende Methoden angewandt werden:

1. Erhitzen der Materialprobe. Messen der Temperatur mit Hilfe eines Kontaktthermometer (z. B. Thermoelement). Anschließend wird die Temperatur mit dem IR-Thermometer gemessen. In der Regel wird sich ein Temperaturunterschied zwischen den beiden Messverfahren einstellen. Durch die Anpassung des bei der IR-Messung verwendeten Emissionsgrades kann die damit gemessene Temperatur der durch Kontaktmessung ermittelten angepasst werden. Der bei Übereinstimmung der gemessenen Temperaturen eingestellte Emissionsgrad entspricht der des gemessenen Materials.
2. Bei geringen Temperaturen (bis 260 °C) kann mit Kunststoffaufklebern mit bekanntem Emissionsgrad, die auf dem Messobjekt angebracht werden, die Temperatur des

Aufklebers mit dem Infrarotmessgerät bestimmt werden. Durch Vergleichsmessungen an der Oberfläche ohne Aufkleber und einer Anpassung des Emissionsgrades kann der Emissionsgrad des Werkstoffes bestimmt werden.

3. Erzeugung eines Schwarzen Strahlers. In einen Probekörper des zu untersuchenden Materials wird eine Bohrung mit dem Durchmesser d angebracht. Der Durchmesser der Bohrung muss der Größe des Messflecks des verwendeten Messgerätes entsprechen. Die Tiefe der Bohrung ist mindestens $5d$. Bei einem Emissionsgrad der Innenwände größer als 0, beträgt der Emissionsgrad des Hohlraumstrahlers jetzt etwa 1 und die in dem Loch gemessene Temperatur ist die korrekte Temperatur des Messobjektes. Wenn Sie das IR-Thermometer jetzt auf die Oberfläche des Objektes richten, verändern Sie den Emissionsgrad, bis die Temperaturanzeige mit dem zuvor am „schwarzen Strahler“ ermittelten Wert übereinstimmt. Den so erhaltenen Emissionsgrad können Sie für alle Messungen am gleichen Material verwenden.
4. Messobjekte können mit matter schwarzer Farbe⁴ oder mit Grafitsspray, für die ein Emissionsgrad von etwa 0,95 angenommen wird, beschichtet werden. Diese Stelle kann als „Schwarzer Strahler“ betrachtet werden. Der Temperaturabgleich von beschichteter zu unbeschichteter Fläche ergibt den Emissionsgrad des Messobjektes.



Der Emissionsgrad ist durch verschiedene Methoden ermittelbar. Tabellenwerte sollten jedoch nur als Orientierung genutzt werden, bzw. für die Auswahl des geeigneten Messgerätes herangezogen werden.

⁴ zum Beispiel: 3-M Black“ der Fa. Minesota Mining Company oder „Senotherm“ der Fa. Weilburger Lackfabrik

3 Die Infrarotmessung

Die menschlichen Augen sind Detektoren, welche für die Erfassung des sichtbaren Lichts ausgelegt sind. Das Auge kann aber nur einen kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums detektieren. An einem Ende des Spektrums bildet das ultraviolette Licht die Grenze und am anderen Ende bleibt die Information des Infraroten Lichts dem Auge verborgen. Ein IR-Messsystem lässt sich mit dem menschlichen Auge vergleichen. Die Linse des Auges stellt die Optik dar, durch welche die Strahlung (Photonenfluss) vom Objekt über die Atmosphäre zur lichtempfindlichen Schicht (Netzhaut) gelangt. Dort findet eine Umwandlung in ein Signal statt, welches zum Gehirn geleitet wird. Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau eines Infrarot-Meßsystems.

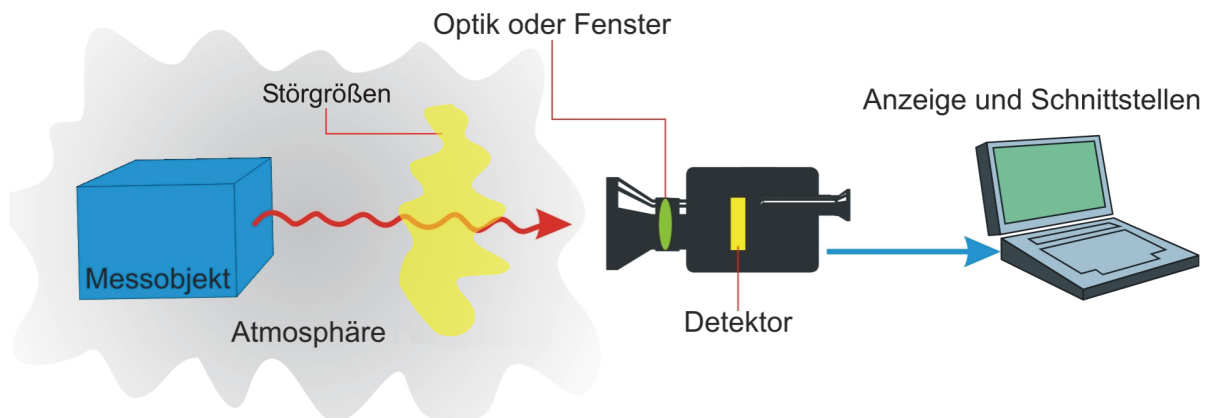


Abbildung 9 Prinzip des IR-Messsystems

3.1 Messobjekte

In den folgenden Kapiteln werden die Eigenschaften von verschiedensten Materialien und die daraus resultierenden Spezifikationen für richtiges Messen abgeleitet. Im Detail handelt es sich um Metalle, Kunststoffe und Glas.

3.1.1 Metalle

Metalle sind in die Kategorie der nicht grauen Strahler einzuordnen. D.h. der Emissionsgrad abhängig von der Wellenlänge und der Temperatur.

In diesen Fällen ist es wichtig, ein Instrument auszuwählen, das die Infrarot-Strahlung bei einer bestimmten Wellenlänge und in einem bestimmten Temperaturbereich misst, bei dem die Metalle einen möglichst hohen Emissionsgrad haben. Da Metalle häufig reflektieren, besitzen sie

tendenziell einen niedrigeren Emissionsgrad, was unterschiedliche und unzuverlässige Messergebnisse zur Folge haben kann. Wie in der folgenden Abbildung ersichtlich ist, vergrößert sich der Messfehler bei vielen Metallen mit größer werdender Wellenlänge.

Daher sollte die kürzeste für die Messung verfügbare Wellenlänge genutzt werden.

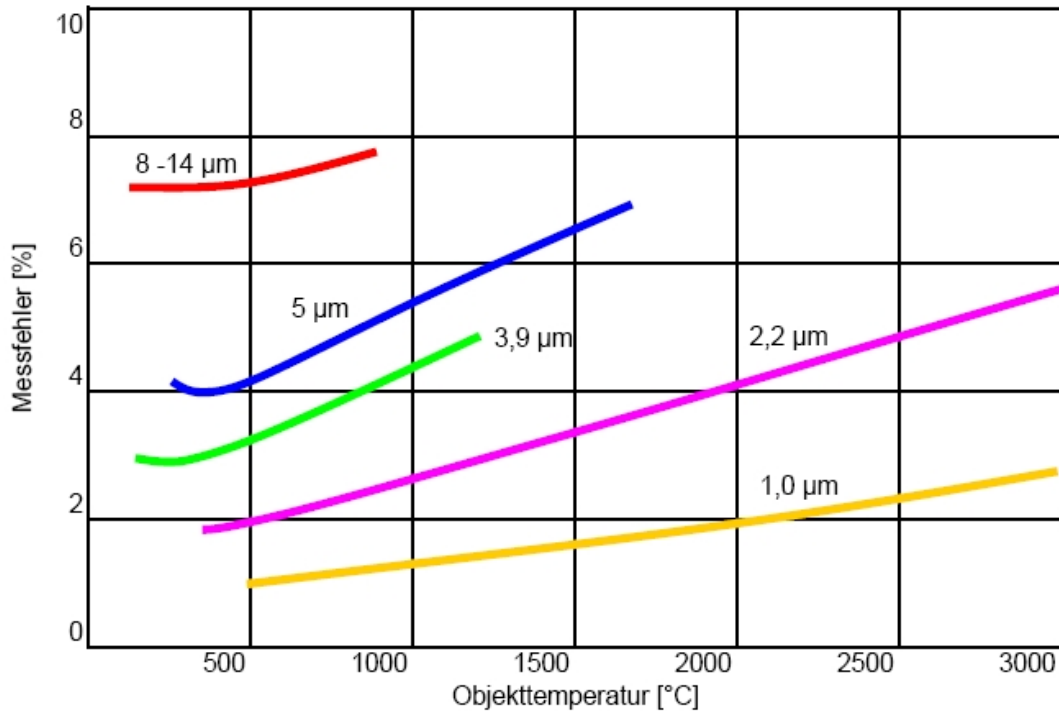


Abbildung 10 Messfehler bei 10 % falsch eingestelltem Emissionsgrad



Bei Messungen von Metallen ist es wichtig, ein Instrument auszuwählen, das die Infrarot-Strahlung bei einer bestimmten Wellenlänge und in einem bestimmten Temperaturbereich misst, bei dem die Metalle einen möglichst hohen Emissionsgrad haben.



Bei Messung von hohen Temperaturen liegt die optimale Wellenlänge bei 0,8 bis 1,0 μm an der Grenze zum infraroten Bereich. Wellenlängen von 1,6; 2,2 und 3,9 μm sind ebenfalls möglich.

3.1.2 Kunststoffe

Bei Messungen an Kunststofffolien ist der Transmissionsgrad zu berücksichtigen. Genauer betrachtet variieren die Transmissionsgrade mit der Wellenlänge und verhalten sich proportional zur Dicke der Folie. Dabei gilt, dass dünne Materialien durchlässiger sind als dicke. Um eine

optimale Messungsergebnisse zu bekommen, ist es wichtig, jene Wellenlänge auszuwählen, bei der der Transmissionsgrad annähernd null ist.



Bei der Messung von Kunststoffen sollte die Wellenlänge so gewählt werden, dass der Transmissionsgrad annähernd null ist.

Einige Kunststoffe (Polyäthylen, Polypropylen, Nylon und Polystyrol) sind bei $3,43\ \mu\text{m}$ undurchlässig (siehe Abbildung 11), andere, wie Polyester, Polyurethan, Teflon, FEP und Polyamid bei $7,9\ \mu\text{m}$ (siehe Abbildung 11).

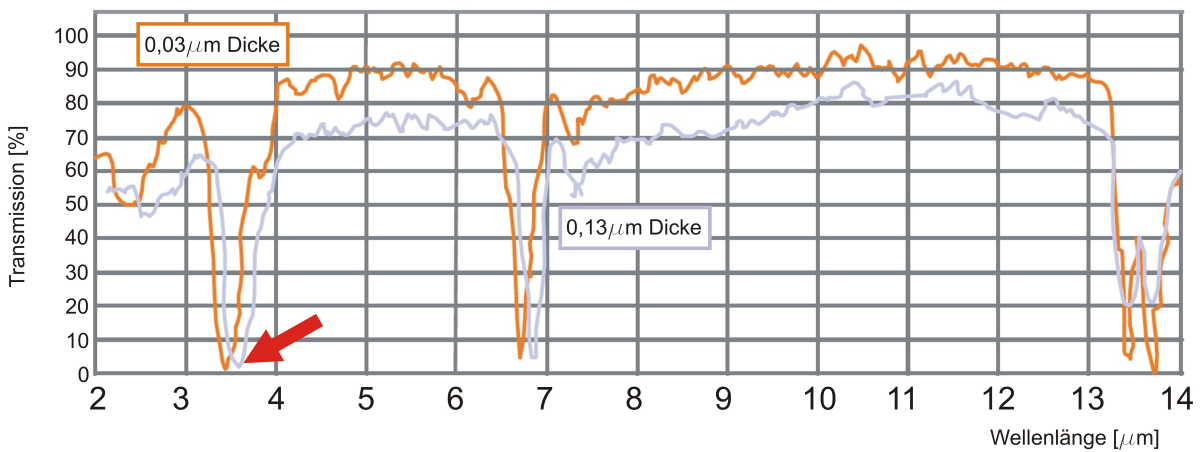


Abbildung 11 Transmissionssgrad von Polyäthylen

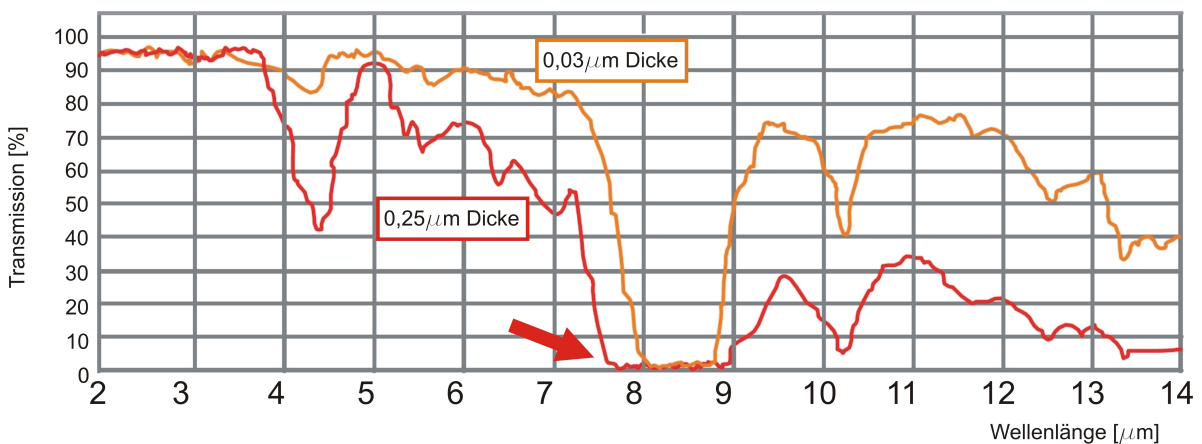


Abbildung 12 Transmissionssgrad von Polyester

Bei Folien, welche dicker als 0,4 mm und eine starke Pigmentierung aufweisen, sollte eine Wellenlänge zwischen 8 und 14 μm gewählt werden. Im Fall von Unsicherheit, kann dem Infrarotgerätehersteller eine Probe des Kunststoffes geschickt werden, um die für die Messung optimale spektrale Bandbreite zu bestimmen.

Der Reflexionsgrad liegt bei fast allen Kunststofffolien zwischen 5 und 10 %.



Die optimale Wellenlänge für Polyäthylen, Polypropylen, Nylon und Polystyrol beträgt 3,43 μm .



Für Polyester, Polyurethan, Teflon, FEP und Polyamid ist eine Wellenlänge von 7,9 μm optimal.

3.1.3 Glas

Bei der Temperaturmessung von Glas mit einem Infrarot-Thermometer sind Reflexion und auch Transmission zu berücksichtigen.

Durch sorgfältige Auswahl der Wellenlänge ist es möglich, sowohl die Temperatur der Oberfläche des Glases als auch die Temperatur unterhalb der Oberfläche zu messen. In der folgenden Tabelle sind die optimalen Wellenlängen für typische Messaufgaben aufgelistet.

Messaufgaben	Empfohlene Wellenlänge des Sensors
Ermittlung der mittleren Temperatur bei der Warmglasproduktion	5 μm
Oberflächenmessung bei Raumtemperatur	8 – 14 μm mit Emissionsgrad = 0,85

Tabelle 9 Empfohlene Wellenlängen in Abhängigkeit der Messaufgabe

Bei Oberflächenmessungen ist zusätzlich danach zu trachten, Messgeräte mit kurzer Ansprechzeit zu verwenden, da Glas ein schlechter Wärmeleiter ist und sich dadurch die Temperatur sehr schnell ändern kann.



Durch sorgfältige Auswahl der Wellenlänge ist es möglich, sowohl die Temperatur der Oberfläche des Glases als auch die Temperatur innerhalb zu messen.

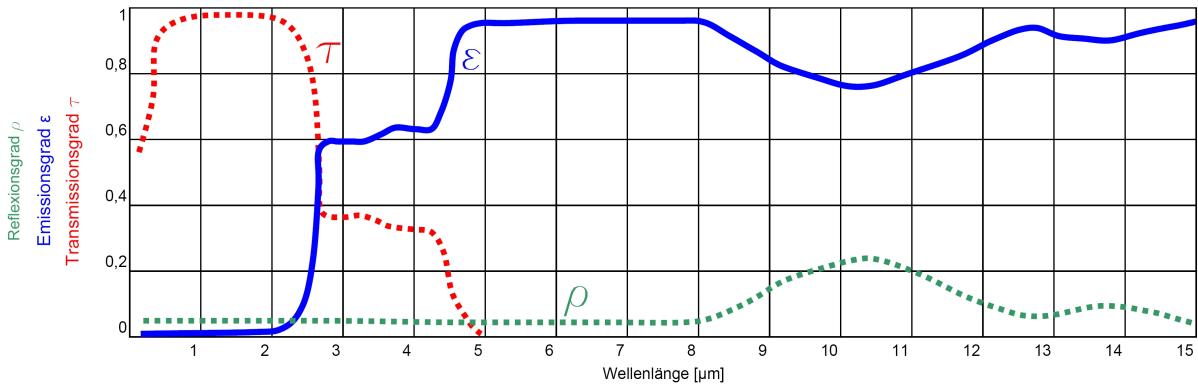


Abbildung 13 Spektrale Eigenschaften von Glas

3.2 Atmosphäre

Ein weiterer Grund, ein Infrarot Messsystem nur für einen bestimmten Spektralbereich auszulegen (Bandstrahlungs-pyrometer), ist das Transmissionsverhalten der Übertragungstrecke, in der Regel die Umgebungsluft. Bestandteile der Atmosphäre, wie z.B. Wasserdampf und Kohlendioxid absorbieren infrarote Strahlung und bewirken dadurch Transmissionsverluste. Bei Nichtberücksichtigung dieser Absorption wird unter Umständen eine Temperatur angezeigt, welche niedriger ist als die tatsächlich vorhandene am Objekt. Im Infrarotspektrum sind jedoch Bereiche vorhanden, in denen diese Absorptionserscheinungen nicht auftreten.

Die typischen Messfenster sind dabei 1,1 bis 1,7 μm, 2 bis 2,5 μm, 3 bis 5 μm, 8 bis 14 μm und in der folgenden Abbildung als blaue schattierte Felder ersichtlich.

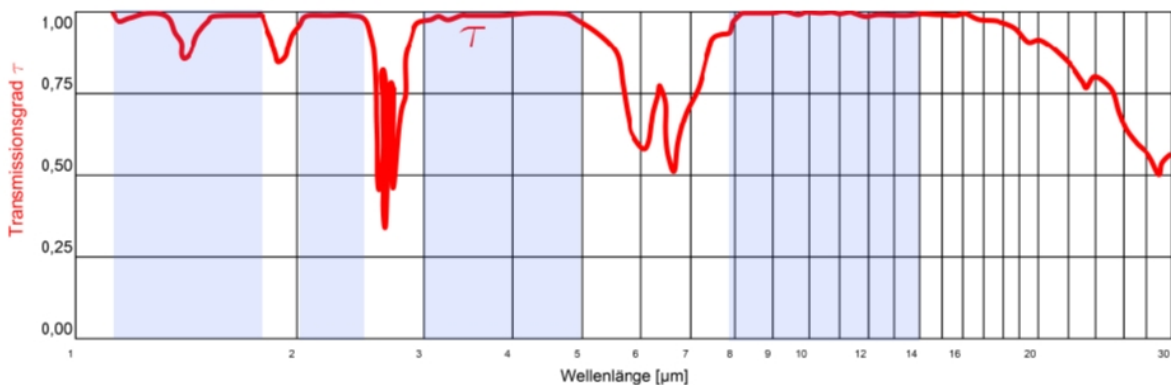


Abbildung 14 Transmissionsgrad einer 1 m langen Luftstrecke bei 32 °C und rel. Feuchte von 75 %

3.3 Störgrößen

Als Störgrößen sind Energiequellen in der Umgebung des Messobjektes zu berücksichtigen. So könnte z.B. die Temperaturmessung von Metallstücken in einem Industrieofen durch die höheren Temperaturen der Ofenwandung verfälscht werden (siehe Abbildung 15). Diese Wirkung der Umgebungstemperatur auf das Messergebnis wird von vielen Infrarotmessgeräten durch eine entsprechende Kompensation berücksichtigt. Anderenfalls würde für das Messobjekt ein zu hoher Temperaturwert angezeigt werden.



Ein korrekt eingestellter Emissionsgrad in Verbindung mit der Umgebungstemperaturkompensation gewährleistet die genauesten Messergebnisse.

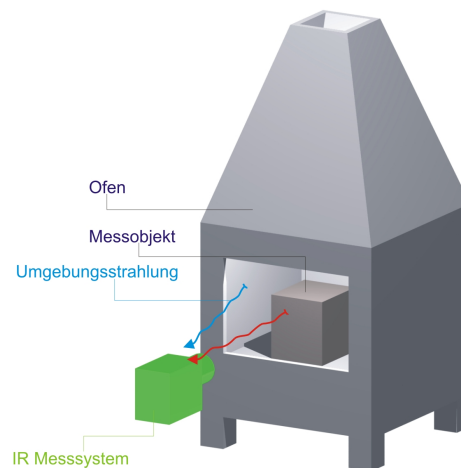


Abbildung 15 Umgebungstemperaturkompensation

Weitere Störgrößen bilden Staub, Rauch und Schwebstoffe in der Atmosphäre. Diese können zur Verschmutzung der Optik und damit zu falschen Messwerten führen. Um Ablagerungen von Schwebstoffen zu verhindern, werden als Zubehör so genannte Luftblasvorsätze angeboten. Das sind in der Regel anschraubbare Rohrstutzen mit Druckluftanschluss. Die Luft sorgt für einen Überdruck vor der Optik und hält somit Schmutzteilchen fern.



Staub, Rauch und Schwebstoffe in der Atmosphäre können zur Verschmutzung der Optik und damit zu falschen Messwerten führen.

IR-Sensoren sind elektronische Geräte und können nur innerhalb bestimmter Betriebs-temperaturbereiche arbeiten. Bei einigen Sensoren sind bis zu 85 °C als obere Grenze zulässig. Darüber hinaus müssen Luft- bzw. Wasserkühlzubehöriteile verwendet und spezielle Anschlusskabel für den Hochtemperatureinsatz vorgesehen werden. Beim Einsatz einer Wasserkühlung ist es unter Umständen erforderlich, diese zusammen mit dem Luftblasvorsatz zu verwenden, um die Kondenswasserbildung auf der Optik zu verhindern.

3.3.1 Optik und Fenster

Wesentliche Bestandteile der Infrarotmesssysteme stellen die optischen Komponenten dar. Diese können aus infrarotdurchlässigen Fenstern, Linsen, Spiegel, Filter und Antireflexschichten bestehen.

Das optische System eines Infrarotthermometers fängt die abgestrahlte Infrarotstrahlung des Messobjektes auf und fokussiert sie auf einen Detektor. Die folgende Abbildung zeigt einen möglichen Aufbau und den Weg der Infrarotstrahlung zum Okular und zum Detektor, wobei darauf hingewiesen wird, dass nicht alle Messsysteme über ein Okular verfügen, und somit dieser angeführte Strahlengang nur eine ganz grundsätzliche Darstellung beschreibt.

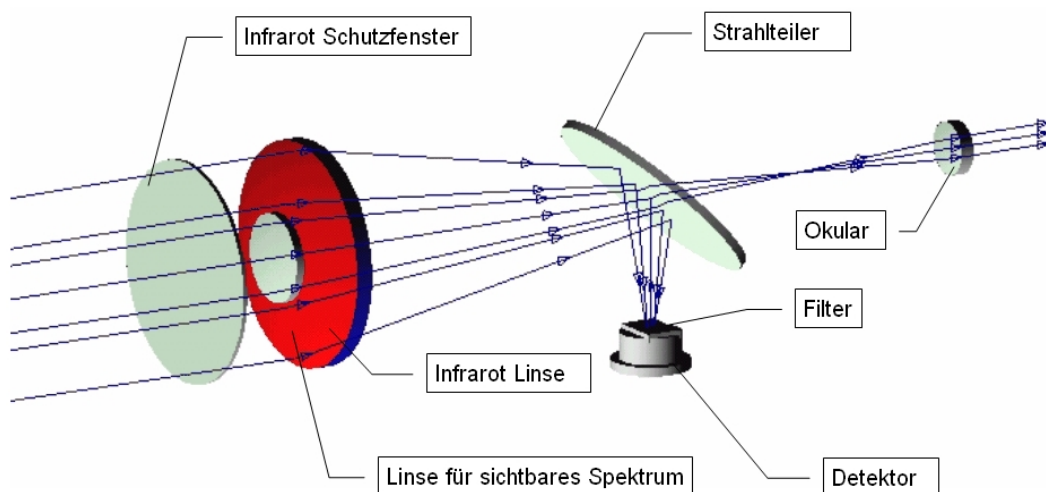


Abbildung 16 Optik und Fenster

Bei der Anvisierung des Messobjekts ist darauf zu achten, dass das Messobjekt diesen Messfleck voll ausfüllt. Ansonsten detektiert das IR-Messsystem auch noch andere, nicht vom Messobjekt kommende Infrarotstrahlung, das wiederum den Messwert verfälschen würde (siehe Abbildung 17).

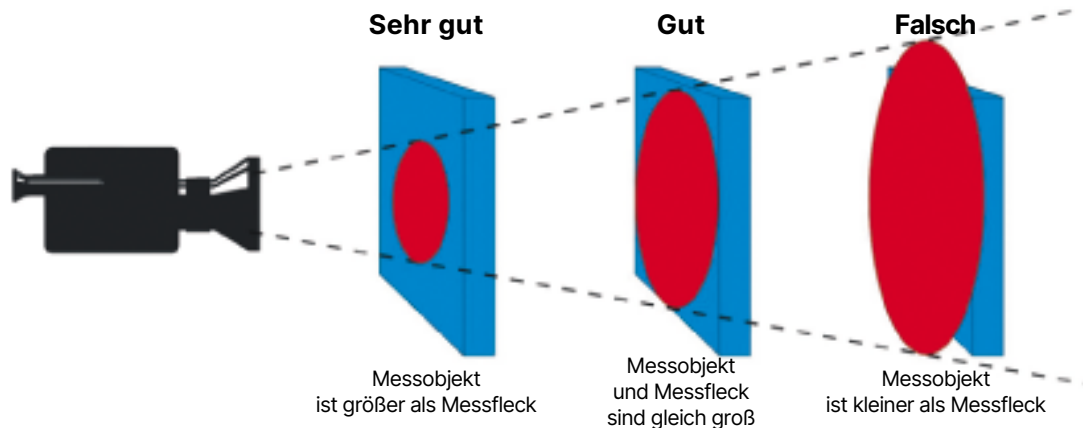


Abbildung 17 Der richtige Messfleck

Als Qualitätsmerkmal bei Infrarotmessgeräten ist in diesem Zusammenhang die so genannte optische Auflösung zu nennen. Sie gibt das Verhältnis zwischen der Entfernung des Messgerätes und dem Messfleckdurchmesser an. Je größer dieser Verhältniswert, desto besser ist die optische Auflösung des Messgerätes und desto kleinere Messobjekte können bei gleicher Entfernung gemessen werden.

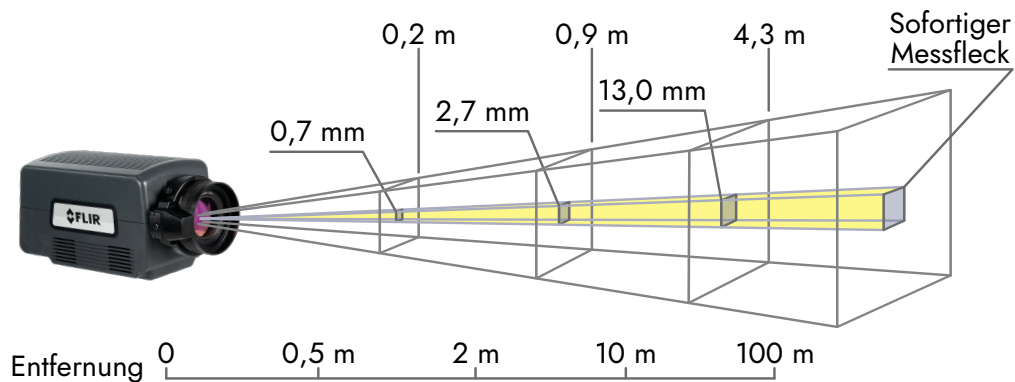


Abbildung 18 Optische Auflösung

Bei der Auswahl der Materialien für die optischen Bestandteile des Messsystems sollte auf eine Reihe von Parametern geachtet werden, wie z.B.:

- Transmissionsverhalten und Temperaturabhängigkeit
- Brechungsindex und Temperaturabhängigkeit
- Oberflächenvergütung und Antireflexschichten
- Resistenz gegen Gase, Wasser und chemische Substanzen
- Schmelzpunkt, usw.

Bei der Auswahl sollte besonders auf die Durchlässigkeit und den Brechungsindex geachtet werden. Die anderen Faktoren sind von der Anwendung abhängig. Es steht eine Vielzahl von Materialien zur Auswahl, von denen die wichtigsten und meistgebräuchlichsten in der folgenden Tabelle beschrieben sind.

Bezeichnung	Eigenschaften
Saphir (Al ₂ O ₃)	Saphir ist ein farbloses Kristall mit einem hohen Härtegrad. Des weiteren hat dieses Glas einen kleinen Brechungsindex bei einer gleichmäßigen Durchlässigkeit im Bereich von 0,17 µm bis 6,5 µm. Auffallend ist die große mechanische Festigkeit von Minimum 2000 kg/cm ² und der hohe Schmelzpunkt von 2040 °C. Allerdings löst es sich im Wasser oder chemischen Lösungen langsam auf und hat einen sehr hohen Preis.
Kalcium Fluorid (CaF ₂)	Dieses Material ist ebenfalls farblos und hat eine kubische Form. In Ammoniak-Salz-Lösungen löst es sich sehr leicht auf. Der empfohlene Temperaturbereich liegt bei ca. 150 °C unter Berücksichtigung der Sicherheit, da Kalcium Fluorid in höheren Temperaturen sehr leicht bricht und ab ca. 500 °C oxidiert (CaO). Preislich in etwa identisch mit Saphir.
Barium Fluorid (BaF ₂)	Obgleich dieses Material relativ billig ist und sich ähnlich wie Calcium Fluorid verhält, ist die mechanische Festigkeit viel schlechter als bei Calcium Fluorid. Deshalb kann es nicht bei großen Druckunterschieden verwendet werden. Im Hinblick auf die Temperatur kann es in Umgebungen bis ungefähr 600 °C eingesetzt werden.
Zink Selenid (ZnSe)	Zink Selenid ist ein schwach gelbliches Kristall, welches auch noch in geringem Maße sichtbares Licht durchlässt und für viele Bereiche eingesetzt wird, z.B. Linsen, Fenster für Laser, usw. Auch bei Zink Selenid müssen wie bei Germanium Antireflexschichten aufgetragen werden. Seine mechanische Festigkeit ist etwas niedriger als die von Germanium. Nachteilig ist der relativ hohe Preis.
Germanium	Germanium hat einen hohen Brechungsindex, d.h. dass es ohne Antireflexschichten nur ca. 50 % der Strahlung im 2 µm bis 15 µm- Bereich durchlässt. Deswegen werden meistens für den verwendeten Bereich Antireflexschichten aufgetragen. Es lässt sich für Temperaturen bis zu 300 °C verwenden. In Verbindung mit Antireflexschichten kann die verwendete Schicht dem Temperaturbereich angepasst werden.
Amtir-1	Amtir-1 (Amorphous Material Transmitting Infrared Radiation) ist ein glasähnliches amorphes Material mit einer hohen Homogenität. Amtir-1 ist durchlässig für Infrarot und wird für die Herstellung von Fenstern, Linsen und Prismen verwendet. Der Wellenlängenbereich beträgt bei dabei 1 bis 14 µm. Amtir-1 ist wasserunlöslich. Die geringe thermische Abhängigkeit des Brechungsindex ist ein großer Vorteil dieses Materials. Der maximale Temperatureinsatzbereich beträgt 300 °C. Der optimale Einsatzbereich von Amtir-1 liegt bei 8 bis 12 µm, da hier neben der guten Transmission die Absorption und Lichtbrechung minimal sind.

Tabelle 10 Optische Materialien – Gegenüberstellung

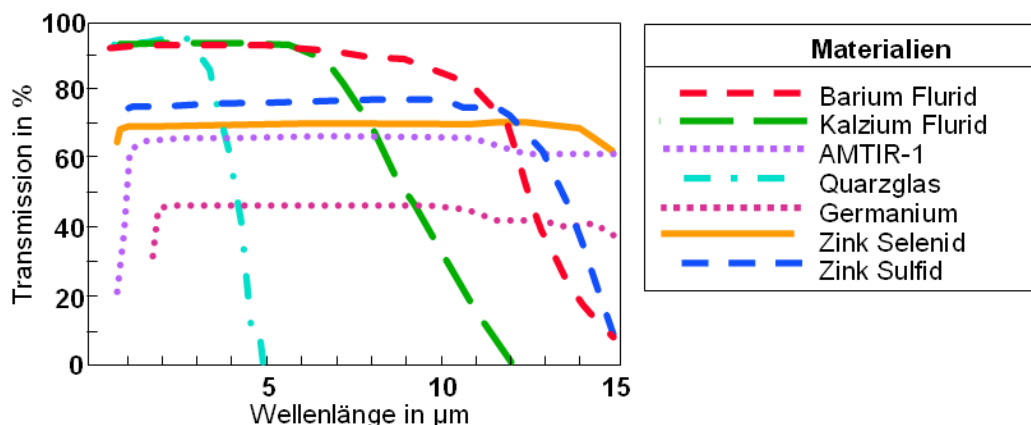


Abbildung 19 Transmission der optischen Materialien

3.3.2 Detektoren

Der Detektor ist das Kernstück des IR-Thermometers. Er wandelt die empfangene Infrarotstrahlung in elektrische Signale um, die von der nachfolgenden Elektronik als Temperaturwerte ausgegeben werden. Neueste Prozessortechniken haben bei gleichzeitiger Senkung der Kosten die Systemstabilität, die Zuverlässigkeit, die Auflösung und die Geschwindigkeit der Infrarot-Thermometer erhöht.

Es gibt 2 Hauptgruppen von Infrarotdetektoren:

- thermische Detektoren und
- Quantendetektoren.

3.3.2.1 Thermische Detektoren

Die thermischen Detektoren reagieren auf die Strahlleistung. Die auftreffende Strahlung bewirkt eine thermische Änderung im Detektor. Diese Änderung (z.B. thermische Widerstandsabhängigkeit) ist ein Maß für die empfangene Strahlung. Die Detektoren sind von der Wellenlänge unabhängig. Der Nachteil dieser Detektoren besteht in der langsamen Ansprechempfindlichkeit und dem geringen Nachweisvermögen der Strahlung, die selbst durch Kühlung nicht wesentlich verbessert werden können. Der Vorteil ist, dass diese Detektoren sehr preiswert sind. In der folgenden Abbildung sind zwei typische Bauformen (links – Pyroelektrischer Detektor, rechts – Thermopile) der thermischen Detektoren abgebildet.

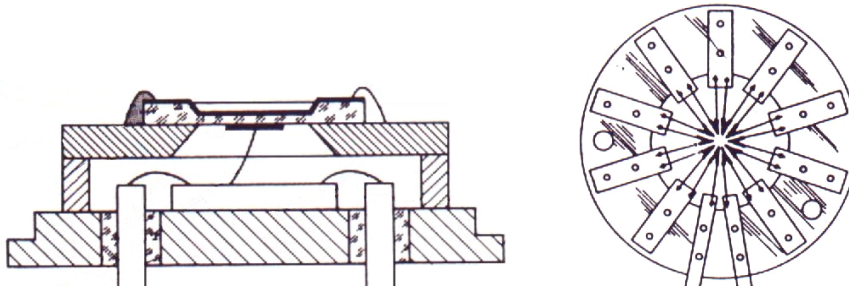


Abbildung 20 Beispiele von Thermischen Detektoren



Thermische Detektoren reagieren auf die Strahlleistung und sind von der Wellenlänge unabhängig. Sie besitzen eine langsame Ansprechempfindlichkeit.

Die thermischen Detektoren werden am Beispiel der Mikrobolometer detaillierter erläutert.

Die Detektorzelle besteht aus einer nur wenige μm dicken strahlungsempfindlicher Scheibe, welche durch zwei gebogene Kontakte über dem eigentlichen Detektor gehalten wird (so genannte Microbridges). Die Scheiben bestehen aus einem Material mit einem stark temperaturabhängigen Widerstand (z.B. Vanadiumoxid). Die einfallende Infrarotstrahlung wird absorbiert und führt zu einer Temperaturänderung des Scheibchens, was wiederum zu einer Widerstandsänderung führt. Der dadurch gemessene Spannungsabfall wird als Messsignal ausgegeben.

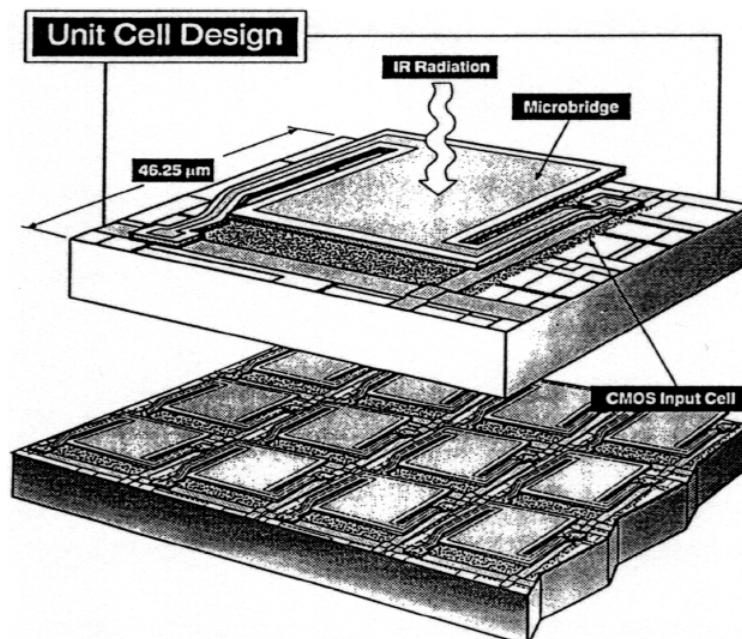


Abbildung 21 Schema – Mikrobolometer

3.3.2.2 Quantendetektoren

Die Quantendetektoren nutzen zwei Effekte aus:

- innerer Fotoeffekt, innerer lichtelektrischer Effekt
- äußerer Fotoeffekt, äußerer lichtelektrischer Effekt

Der äußere Fotoeffekt ändert seine Leitfähigkeit bei einer Befreiung von freien Elektronen (äußerer Fotoeffekt), bei dem anderen (inneren Fotoeffekt) werden durch Absorption von Quanten Elektronen befreit. Bei den scannenden Thermographie-Systemen werden Quantendetektoren mit dem inneren Fotoeffekt und mit dem äußeren Fotoeffekt verwendet. Im Gegensatz zu den thermischen Detektoren haben die Quantendetektoren ein sehr hohes Nachweisvermögen bei einer schnellen Ansprechzeit. Die Detektoren sind wellenlängenabhängig und mehr oder weniger aufwendig gekühlt. Wegen der Rauscherzeugung von den Ladungsträgern, die das Signal-Rausch-Verhältnis verschlechtern, müssen diese Detektoren im Betrieb gekühlt werden. Je langwelliger der Empfindlichkeitsbereich, desto tiefer die Kühltemperatur.



Quantendetektoren haben eine hohe Ansprechzeit, sind wellenlängenabhängig und müssen mehr oder weniger aufwendig gekühlt werden.

Bei den Quantendetektoren wird weiters noch das Prinzip des Quantum Well Infrared Photon Detector, kurz QWIP näher erläutert.

Als Ausgangsbasis für diesen Detektor dient GaAs Substrat. Auf dieses Substrat wird abwechselnd eine dünne Schicht AlGaAs und GaAs aufgebracht. Durch diese Anordnung werden so genannte Subbänder. Durch diesen Aufbau kann die spektrale Empfindlichkeit des QWIPs durch konstruktive Maßnahmen beeinflusst werden. Bei den QWIP-Detektoren handelt es sich um spektral schmalbandige Sensoren. Die spektrale empfindlichkeitsbandbreite liegt üblicherweise in der Größenordnung von ca. 10 % der Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit. Ein im langwelligeren Infrarotbereich bei ca. 10 μm empfindlicher Detektor hat demnach eine spektrale Bandbreite von ca. 1 μm . Die thermische Empfindlichkeit ist abhängig von den Schichten. Momentan werden Detektoren von 20 bis 50 Schichten realisiert.

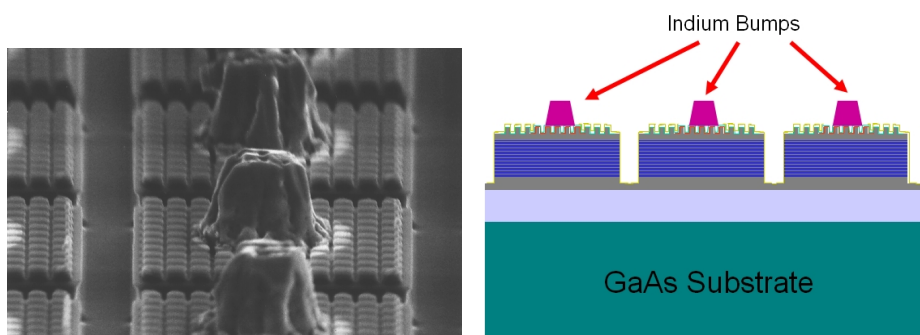


Abbildung 22 QWIP-Detektor

Bei bildgebenden Kameras werden diese Detektoren in einer Matrix angeordnet. Man erhält dann z.B. ein Focal Plane Array (siehe dazu auch Kapitel 4.2.3.2) von 320 mal 240 Detektoren bei einer Zellengröße (Pitch) von z.B. 30 μm eines Einzeldetektors. Die Detektormatrix wird über die so genannte Flip Chip Technik mit einem speziell dafür entwickelten Ausleseschaltkreis (ROIC-Schaltkreis, siehe Abbildung 23, links) verbunden. Die Flip Chip Technik besteht aus applizierten Indium Perlen (engl. Indium Bump).

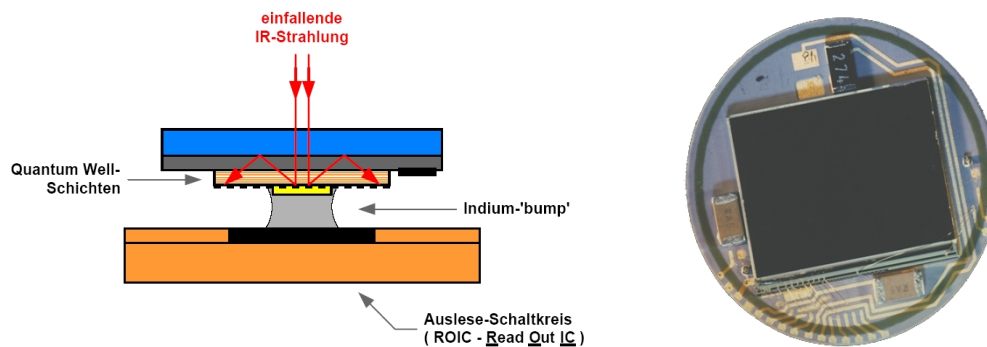


Abbildung 23 QWIP-Detektor mit ROIC-Schaltkreis

Die hybride Struktur wird auf einem Keramikträger (siehe Abbildung 23, rechts) montiert und mit den elektrischen Anschlüssen versehen. Für ein optimales Betrieben eines QWIP-Detektors ist es notwendig, den Detektor zu kühlen. Dies wird üblicherweise durch den Einsatz von Stirling Kühlern realisiert.

3.3.2.3 Detektorenvergleich

Detektortyp Spezifikationen	Quantendetektoren	Thermische Detektoren
Funktionsprinzip	Photonen-Absorption über Energielücke wie InSb, CdHgTe, GeAs (QWIP)	Erwärmung führt zu temperatur-abhängigen elektrischen Effekten (Spannung als Funktion der Temperatur, elektrischer Widerstand als Funktion der Temperatur)
Empfindlichkeit	empfindlich	Mittlere Empfindlichkeit
Zeitkonstanz	Kleine Zeitkonstanten	Mittlere Zeitkonstanten
Kühlung	Kühlung erforderlich (T = 77 K oder 4,2 K)	Raumtemperaturbetrieb möglich (T = 300 K)
Sensorempfindlichkeit	Stark abhängig von der Wellenlänge	Unabhängig von der Wellenlänge des Sensors
Typische Applikationen	Fotodioden, Fotoleiter (z.B. QWIP), Fotowiderstand	Pyroelektrische Detektoren, Thermolemente, Thermistoren, Widerstandsbolometer, Thermosäulen, Mikrobolometer

Tabelle 11 Detektoren – Gegenüberstellung

3.3.3 Messdatenerfassung

Wichtig für den Anwender sind die verfügbaren Schnittstellen und Arten der Messwertanzeige. Die bei einigen, insbesondere Handgeräten, direkt vorhandene Anzeige-/Bedienfeldkombination kann als Primärausgang des Messgerätes betrachtet werden. Analoge oder Digitalausgänge dienen der Ansteuerung von zusätzlichen Anzeigen in der Messwarte oder können zu Regelzwecken verwendet werden. Der direkte Anschluss von Datenschreibern, Druckern und Computern ist ebenso möglich.

In der folgenden Abbildung sind die derzeit aktuellen Schnittstellen ersichtlich.

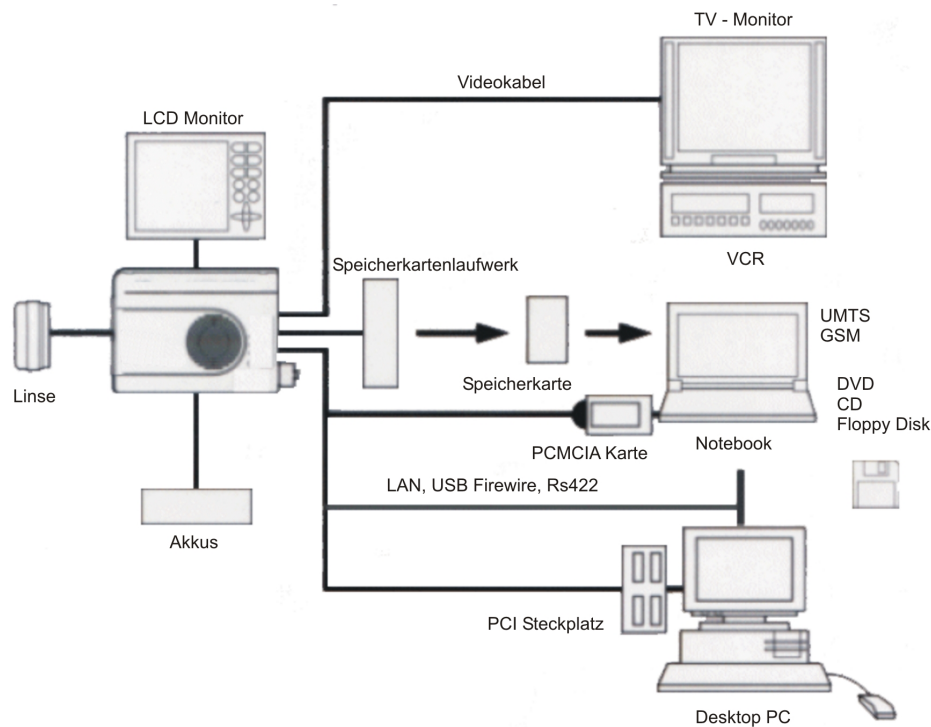


Abbildung 24 Messdatenerfassung

Industrielle Feldbussysteme spielen eine immer größere Rolle und erlauben dem Anwender mehr Flexibilität. Z.B. kann der Anwender von der Schaltwarte aus, die Sensoren einstellen, ohne den Fertigungsprozess unterbrechen zu müssen. Ebenfalls möglich ist die Veränderung von Parametern, wenn auf der gleichen Fertigungslinie unterschiedliche Produkte laufen. Ohne diese Ferneinstellung müsste jede Veränderung der Sensorparameter, wie zum Beispiel Emissionsgrad, Messbereich oder Grenzwerte, manuell am Sensor selbst vorgenommen werden. Da die Sensoren aber oft an schwer zugänglichen Stellen montiert sind, gewährleistet der intelligente Sensor eine kontinuierliche Prozessüberwachung und -steuerung bei minimalem Arbeitskräfteeinsatz. Bei Eintritt einer Störung, d.h. bei z.B. zu hohen Umgebungstemperaturen, Kabelunterbrechungen, Ausfall von Komponenten – erscheint automatisch eine Fehlermeldung. Nicht zu unterschätzen ist ebenfalls die Möglichkeit der Feldkalibrierung mit Hilfe verfügbarer Kalibriersoftware des Geräteherstellers.

4 Klassifizierung der Messsysteme

In Abbildung 25 ist der grobe Aufbau eines Infrarotmessgerätes skizziert. Im Wesentlichen besteht das Messsystem immer aus der Optik bzw. dem Fenster, dem Detektor, der Umgebungstemperaturkompensation und einer Einstellung für den Emissionsgrad, um das Messgerät auf die Eigenschaften des Messobjekts abzustimmen zu können.

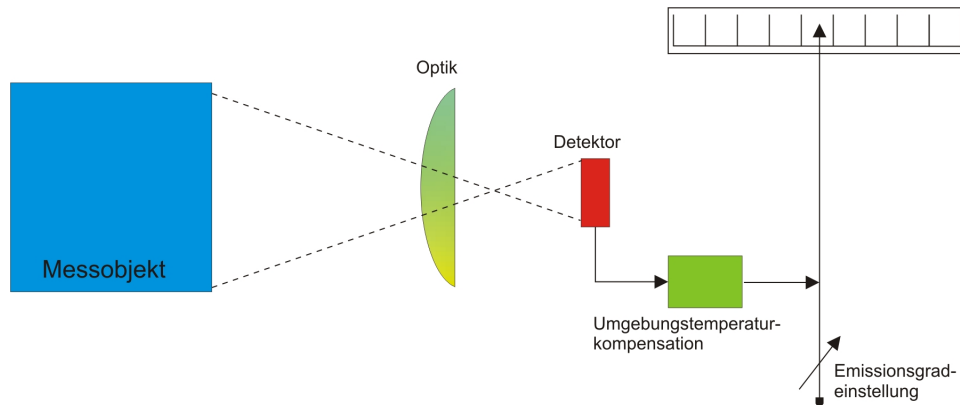


Abbildung 25 Prinzip des IR-Meßsystems

Moderne Infrarotmesstechnik baut auf diesem Grundkonzept auf, ist jedoch im Laufe der Zeit wesentlich verfeinert worden. Wichtigste Unterschiede sind die Verwendung einer Vielzahl unterschiedlicher Detektortypen, selektives Filtern des IR-Signals, Linearisierung und Verstärkung des Detektor-Signals sowie standardisierte Temperatur-Ausgangssignale wie 4–20 mA oder 0–10 V DC.

Die Messsysteme können in folgenden Hauptgruppen eingeteilt werden:

- Subjektive Messsysteme
- Objektive Messsysteme

Bei den objektiven Messsystemen kann man weiters folgende Einteilung treffen (siehe Abbildung 26):

- Punktmessende Systeme (Pyrometer)
- Zeilenkameras (Infrarot Linienscanner)
- Bildgebende Systeme

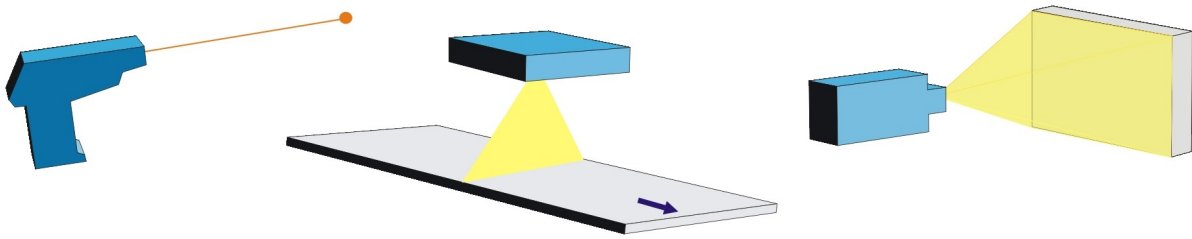


Abbildung 26 Objektive Messsysteme – Einteilung

Bei den Pyrometern wird noch in folgende Gruppen eingeteilt:

- Gesamtstrahlpyrometer
- Bandstrahlpyrometer
- Teilstrahlpyrometer
- Quotienten- oder Mehrfarbenpyrometer

Bei den bildgebenden Systemen kann weiters zwischen

- Bilderzeugung durch mechanisches Abscannen und
- Focal Plane Array Kamera unterschieden werden.

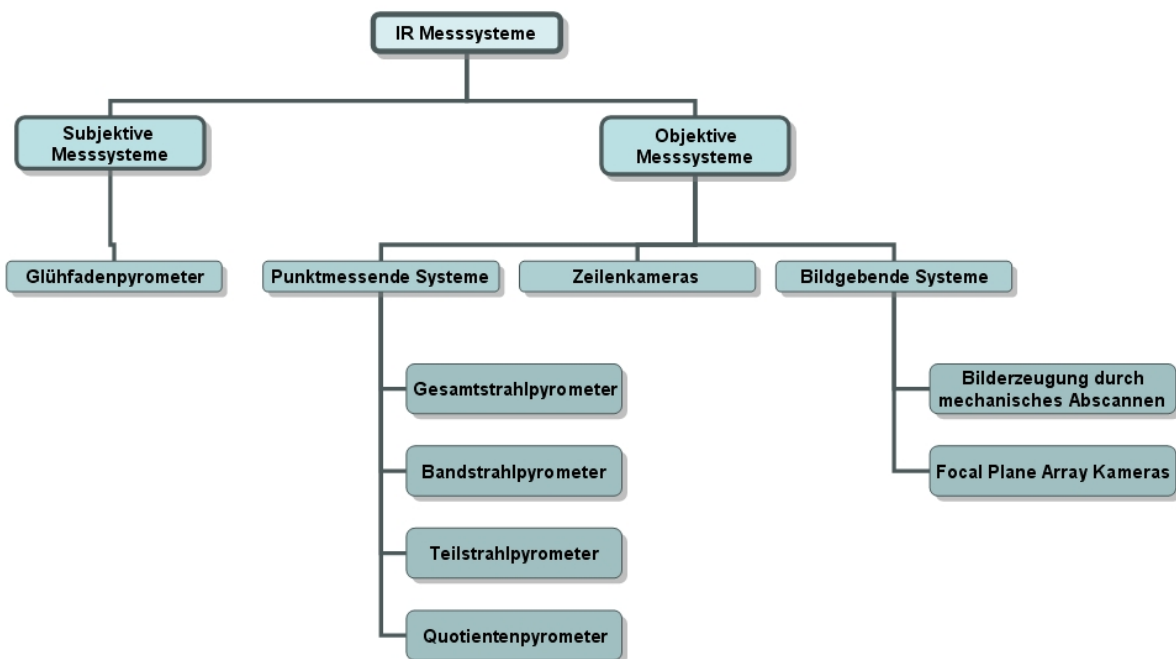


Abbildung 27 Klassifizierung der Infrarotmesssysteme



Die objektiven Messsysteme werden in punktmessende Systeme (Pyrometer), Zeilenkameras (Infrarot Linienscanner) und bildgebende Systeme eingeteilt.

4.1 Subjektive Messsysteme

Bei diesen Messsystemen wird das menschliche Auge zur Bewertung der Leuchtdichtegleichheit eines glühenden Pyrometerfadens mit dem anvisierten Messobjekt herangezogen. Dieser Gruppe ist unter anderem das klassische Glühfadenpyrometer zuzuordnen. In der folgenden Abbildung ist der schematische Aufbau ersichtlich.

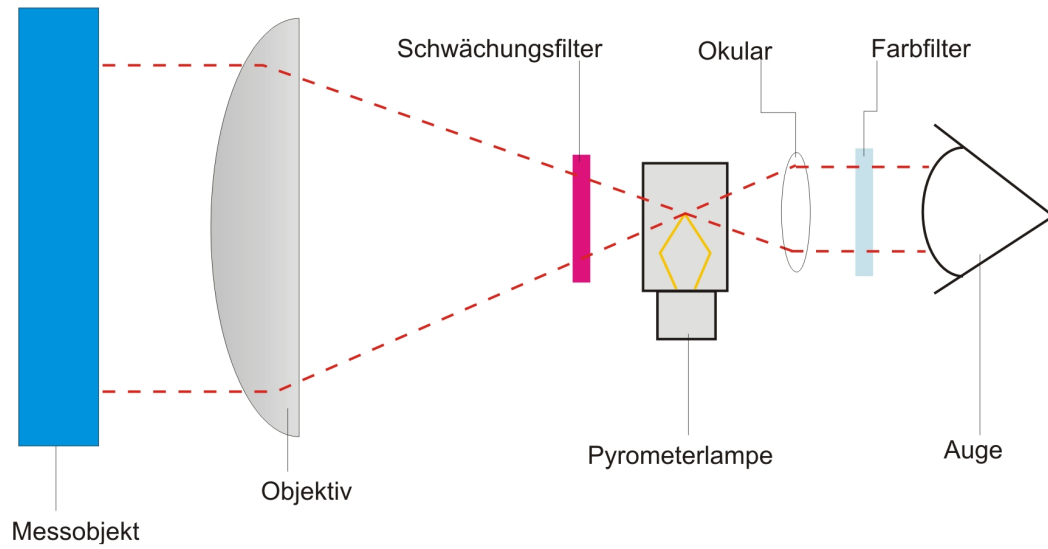


Abbildung 28 Prinzip des Glühfadenpyrometers

Die strahlende Fläche des Messobjektes wird durch das Objektiv in der Ebene der Pyrometerlampe abgebildet. Das Auge betrachtet mit Hilfe des Okulars über ein Farbfilter sowohl den Glühfaden der Pyrometerlampe als auch das Bild des Objektes. Ist das Bild des Objektes bei der Pyrometerlampe zu hell, so kann durch einen Schwächungsfilter die Leuchtdichte des Objektes messbar erniedrigt werden. Die Leuchtdichte wird über elektrische Helligkeitsregelung des Glühfadens der Pyrometerlampe abgeglichen. Der Temperaturmessbereich bestimmt die Wahl des Filters. So können z.B. durch den Einsatz eines Rotfilters bei einer Messtemperatur von 750 °C Helligkeitsunterschiede festgestellt werden, welche einer Temperaturänderung von 2 K und weniger entsprechen. Grünfilter werden bei Temperaturen von 900 °C bis ca. 1050 °C verwendet, und mit Hilfe eines Blaufilters sind Messungen ab 1050 °C möglich.

Durch Verstellen des Pyrometerlampenstromes wird nun erreicht, dass der hellste Teil des Glühfadens im Bild des Objektes verschwindet, d.h. die Leuchtdichten des Glühfadens und des Objektes sind nun gleich groß. Die auftretende Temperatur ist eine Funktion des Lampenstromes. Dieser funktionale Zusammenhang wird durch Kalibrierung ermittelt.



Abbildung 29 Glühfadenpyrometer

4.2 Objektive Messsysteme

Bei den objektiven Messsystemen werden anstelle des menschlichen Auges physikalische Empfänger zur Bewertung herangezogen. Derartige Messsysteme haben gegenüber den subjektiven Geräten den Vorteil der kürzeren Messzeit und verfügen über eine größere Empfindlichkeit.

In den folgenden Kapiteln werden die Messgeräte der punktmessenden und bildgebenden Systeme näher erläutert.

4.2.1 Punktmessende Systeme

4.2.1.1 Gesamtstrahlpyrometer

Bei dem Gesamtstrahlpyrometer (siehe folgende Abbildungen) wird der gesamte Spektralbereich aufgenommen. Dabei kann man zwischen zwei Bauarten unterscheiden, Pyrometer mit Hohlspiegel und mit Linsenoptik. Die Hohlspiegelausführung wird bei Messtemperaturen von -40 bis $+600$ °C eingesetzt, der Einsatzbereich der Linsenbauform liegt bei $+400$ bis $+2000$ °C.

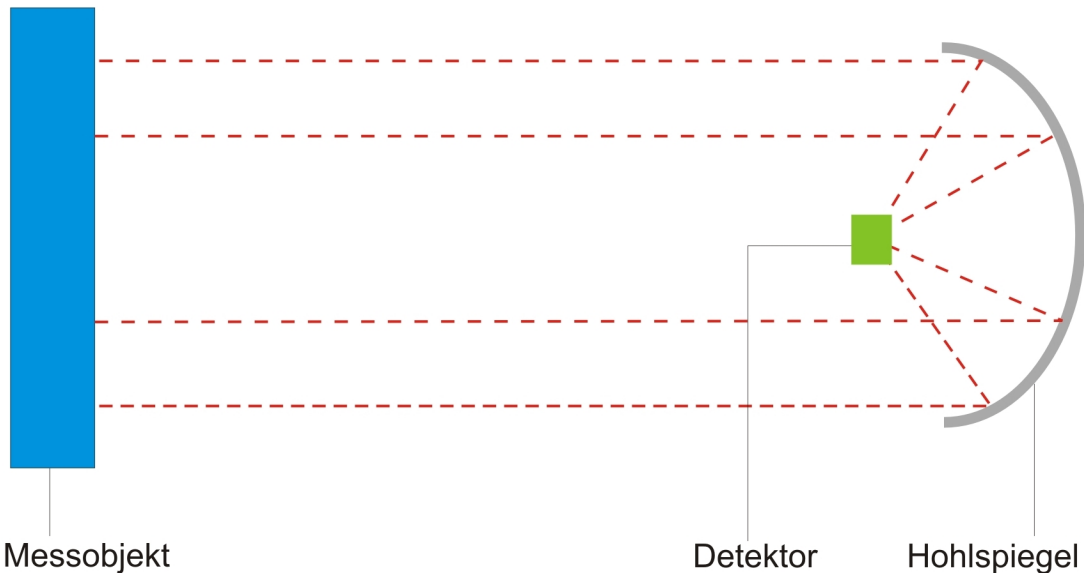


Abbildung 30 Prinzip des Gesamtstrahlpyrometers mit Hohlspiegel

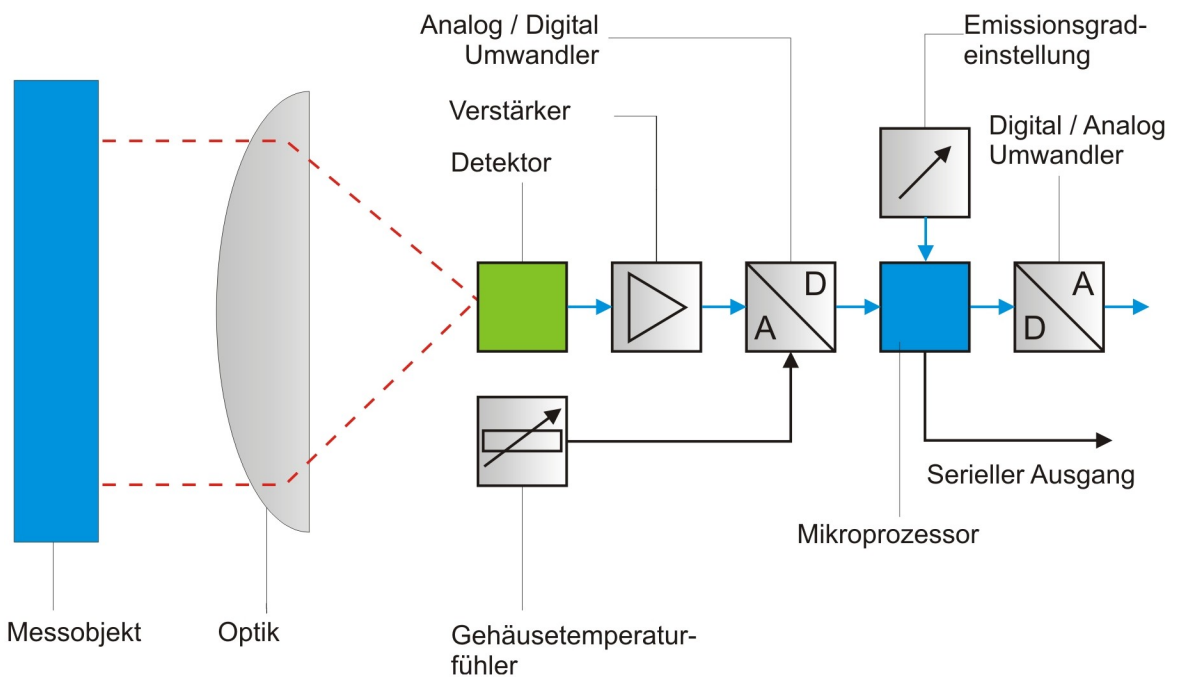


Abbildung 31 Gesamtstrahlpyrometer mit Linse

4.2.1.2 Bandstrahlpyrometer

Bei der Bandstrahlpyrometerbauform (siehe Abbildung 32) wird die Bandbreite der Infrarotstrahlung eingegrenzt. Dadurch erfolgt eine Verbesserung der Unabhängigkeit der Transmissions- und Emissionsgrade. Die Bandbegrenzung erfolgt durch die Positionierung eines Filters.

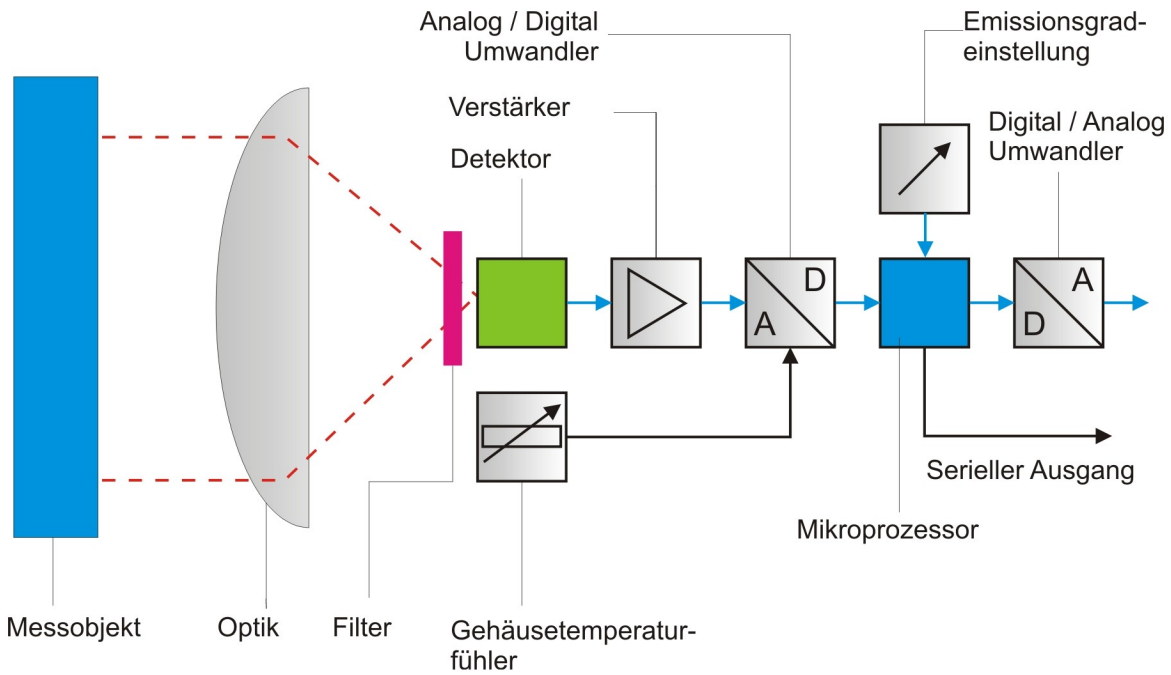


Abbildung 32 Bandstrahlpyrometer

4.2.1.3 Teilstrahlpyrometer

Bei der Bauform des Teilstrahlpyrometers (siehe Abbildung 33) erfolgt eine weitere Einschränkung der Wellenlängenbandbreite durch den Einsatz von Halbleiterdetektoren. Dabei kommen Germanium- und Siliziumfotoelemente zum Einsatz.

Detektoren	Wellenlängenbandbreite
Germanium Fotoelemente	0,5 bis 1,6 μm
Silizium Fotoelemente	0,6 bis 1,6 μm

Tabelle 12 Bandbreitenbegrenzung durch Halbleiterdetektoren

Weitere Informationen über die Eigenschaften der Detektoren sind in Kapitel 3.3.2 ersichtlic.

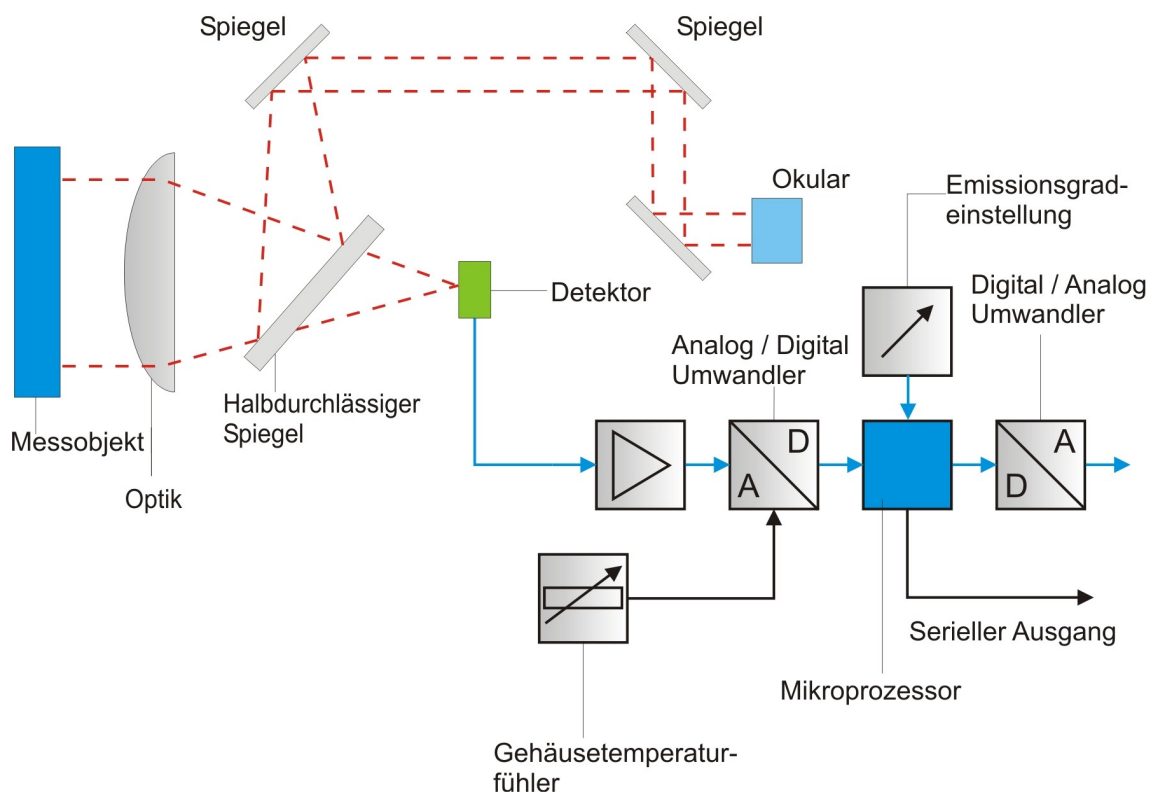


Abbildung 33 Teilstrahlpyrometer

4.2.1.4 Quotientenpyrometer

Bei dem Quotientenpyrometer erfolgen zwei Messungen bei zwei eng benachbarten Wellenlängen. Dieses Verfahren misst anstelle des absoluten Energiebetrages einer Wellenlänge das Verhältnis der Energie an zwei verschiedenen Wellenlängen. Die Effektivität dieses Konzepts beruht darauf, dass Änderungen in den Oberflächeneigenschaften des Messobjekts oder Hindernisse, die sich im Sichtkegel zum Messobjekt befinden, von den beiden Detektoren gleich wahrgenommen werden. Daher bleibt das Verhältnis zwischen den Sensor-Ausgangssignalen gleich und somit auch die gemessene Temperatur. Durch die Messung des Verhältnisses anstelle des Absolutwertes können unter den oben beschriebenen Bedingungen Ungenauigkeiten vermieden werden, die aufgrund eines unbekanntes oder sich ändernden Emissionsfaktors entstehen. Eine korrekte Temperaturmessung erfolgt auch dann, wenn ein Teil des Sichtfeldes durch kältere Materialien, wie Staub, Dampf, Halterungen oder Fenster verdeckt werden. Solange das zwischen Objekt und Sensor tretende Medium nicht selektiv bestimmte Wellenlängen dämpft, bleibt das Verhältnis konstant und somit auch die vom Thermometer gemessene Temperatur.

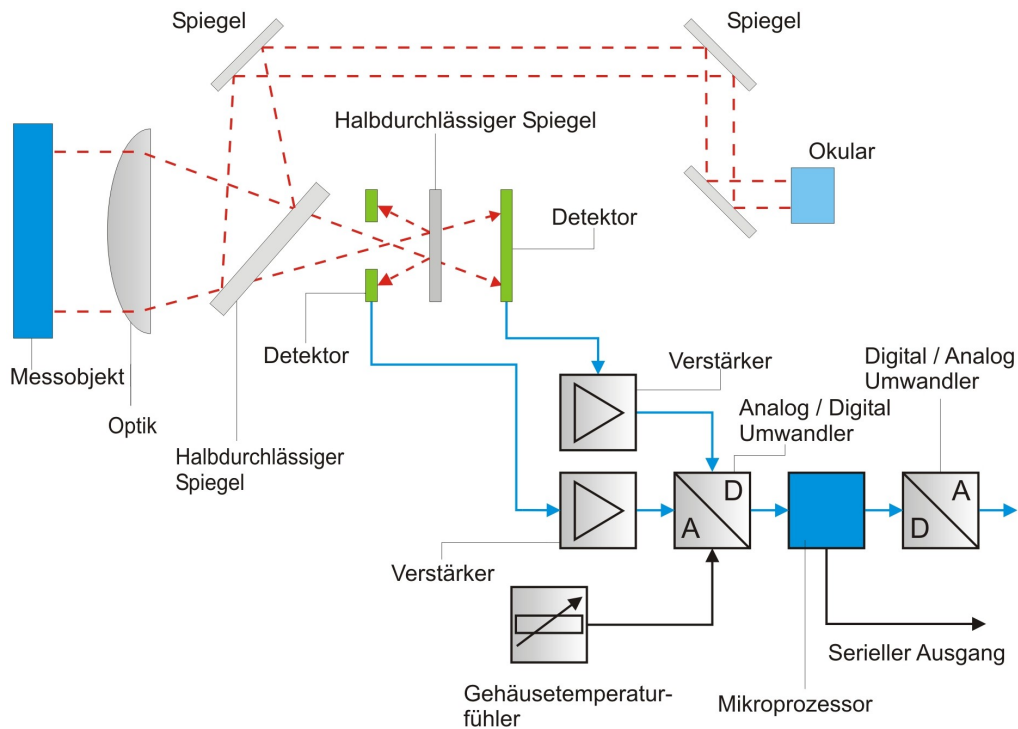


Abbildung 34 Quotientenpyrometer



Mit einem Quotientenpyrometer erfolgt auch dann eine korrekte Temperaturmessung, wenn ein Teil des Sichtfeldes durch kältere Materialien, wie Staub, Dampf, Halterungen oder Fenster verdeckt werden.

4.2.2 Zeilenkameras (Linienscanner)

Linescanner sind durch einen rotierenden Abtastspiegel in der Lage, entlang einer Zeile berührungslos Temperaturwerte zu messen. Der Linienscanner tastet das Messfeld während 25 % (bzw. 12,5 % bei einem 45°-Sichtfeld) einer Umdrehung des Spiegels ab. Das entspricht einem Messwinkel von 90°. Der restliche Drehbereich dient der Eigenkalibrierung des Sensors. Die Eigenkalibrierung erfolgt mit Hilfe eines integrierten Schwarzkörpers. Der rotierende Spiegel reflektiert die auftreffende Infrarotenergie auf ein Linsensystem, das die Strahlung auf einen thermoelektrisch gekühlten Sensor fokussiert. Das eingehende analoge Signal wird abgetastet, digitalisiert und vom internen Mikroprozessor in Temperaturwerte umgerechnet.

In den folgenden Abbildungen ist das das Prinzip des Scannens von translatorisch bewegten und rotierenden Objekten ersichtlich.

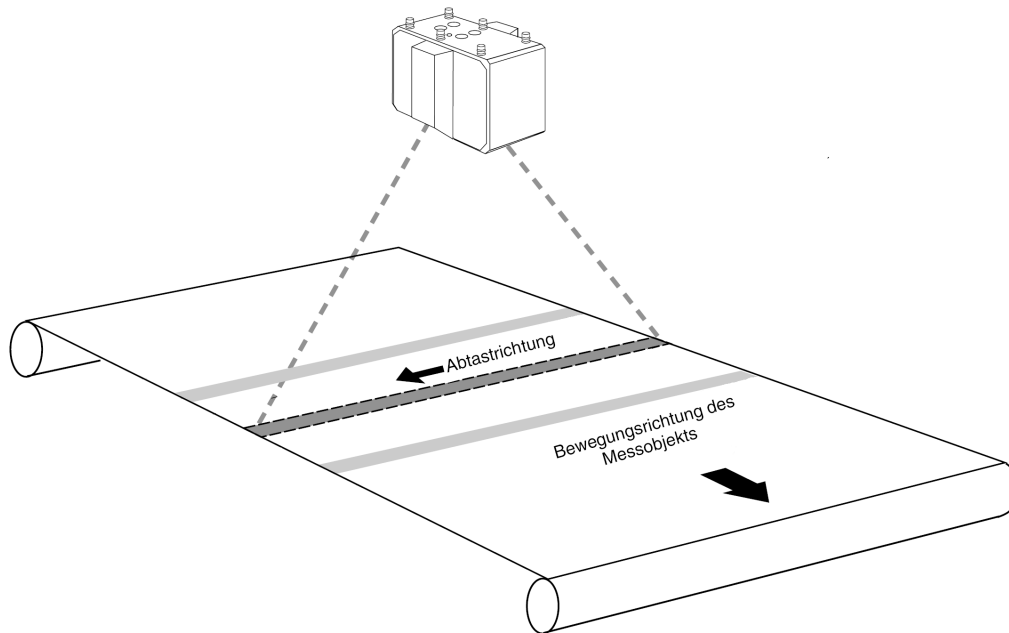


Abbildung 35 Linienscanner

Bei rotierenden Messobjekten und Abtastung durch Linienscanner sind zwei Möglichkeiten zu nennen. Bei der ersten erfolgt keine Synchronisierung von Scanner und der Drehzahl des rotierenden Messobjektes. Als Ergebnis bekommt man ein Bild, welches der tatsächlichen Oberfläche nicht entspricht. Will man ein wahres Bild der Oberfläche darstellen, so ist es notwendig, den Scanner synchron zum Objekt messen zu lassen (siehe Abbildung 36). Der Scanner startet die Erfassung der ersten Temperaturzeile an der 0-Position. Mit Beginn der zweiten Umdrehung des Objektes wird die Erfassung der Zeilen an der 0-Position plus eines Offsets fortgesetzt. Nach einigen Umdrehungen ist die gesamte Oberfläche erfasst. Die Software sortiert die aufgenommenen Zeilen zu einem Thermobild mit exakter geometrischer Zuordnung zur Objekt-oberfläche. Für die Temperaturdaten können in der Software, Grenzwerte gesetzt werden, die im Fehlerfall einen Alarm bewirken. Unabhängig von der Erfassungszeit für ein Thermobild kann über ein vom Scanner geliefertes Echtzeit-Hardware-Signal auch ein sofortiger Alarm ausgelöst werden.

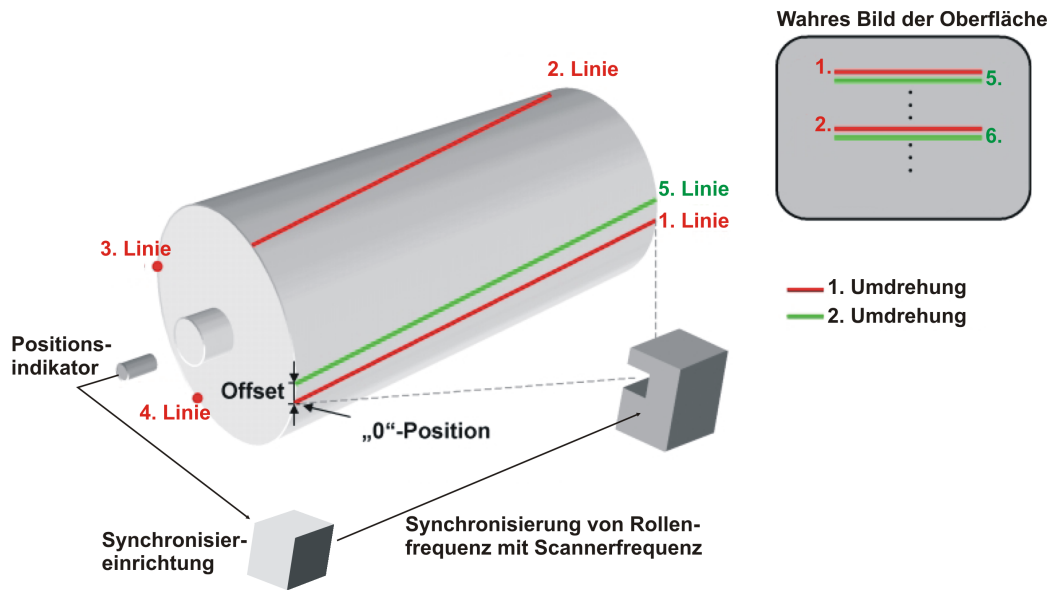


Abbildung 36 Linienscanner, rotierendes Messobjekt

4.2.3 Bildgebende Systeme

4.2.3.1 Scannerkameras

Die Bilderstellung durch mechanisches Abscannen (siehe Abbildung 37) wird durch zwei Scannerspiegel vor dem Objektiv erzeugt. Der horizontale Scannerspiegel vibriert um seine senkrechte Achse, während der vertikale Scannerspiegel sich auf und ab bewegt. Um eine gleichförmige Belichtung für jedes Pixel zu erreichen, ist die Spiegelbewegung eine Dreiecksfunktion. Damit das Innere vor Staub und Feuchtigkeit geschützt wird, ist ein Eintrittsfenster vor die ganze Optik eingebaut. Das Signal des Sensors wird mit der Bewegung der Scannerspiegel synchronisiert und dann digitalisiert und auf einer Speicherkarte abgespeichert. Dadurch wird eine hohe Mobilität der Kamera garantiert.

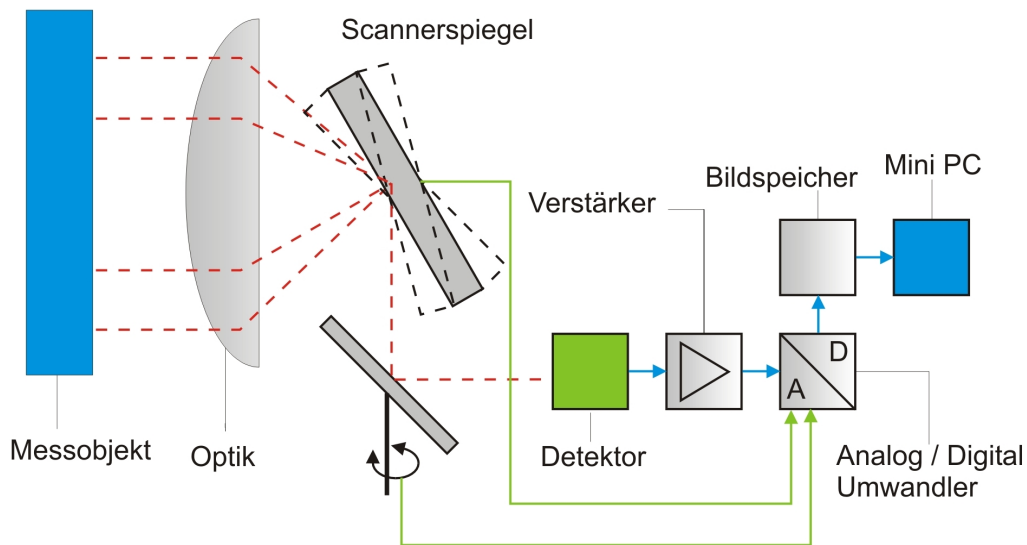


Abbildung 37 Bilderzeugung durch mechanisches Abscannen

4.2.3.2 Focal Plane Array Kamera

Die Thermografiekamera mit Flächensensor (Focal-Plane Array) wird dann verwendet, wenn hohe Aufnahmegeschwindigkeiten gefordert sind. Dieser Typ von Kamera funktioniert genauso wie die elektronischen Fotoapparate, nur dass hier spezielle Sensoren und Sondermaterialien verwendet werden.

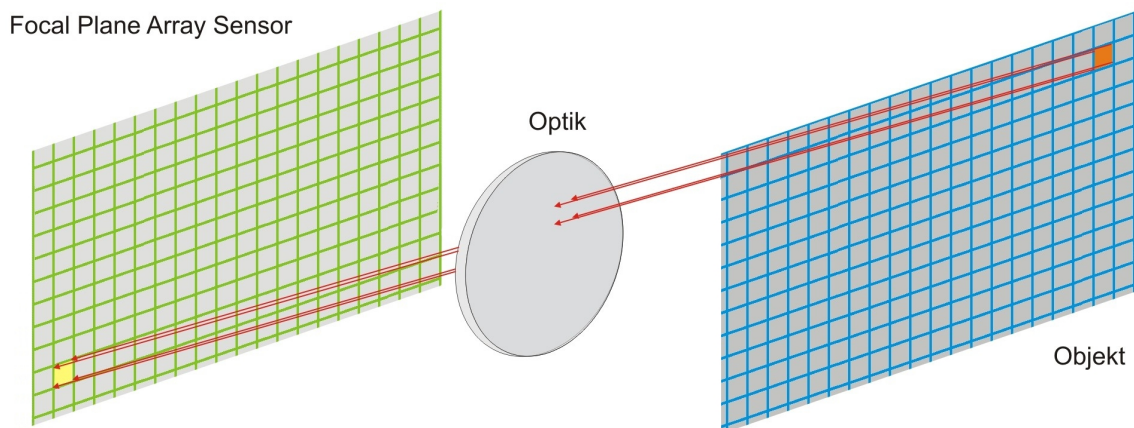


Abbildung 38 Thermografie mit Flächensensor (Focal-Plane Array)



Focal-Plane Array Kameras besitzen eine hohe Aufnahmegeschwindigkeit.

5 Anwendungsbeispiele

5.1 Medizintechnische Anwendungen

In der Medizintechnik wird die Infrarot-Thermometrie unter anderem zur Untersuchung von Durchblutungsstörungen eingesetzt. Regionen mit mangelnder Durchblutung sind im Vergleich zu gut durchbluteten Regionen kühler (siehe Abbildung 39).

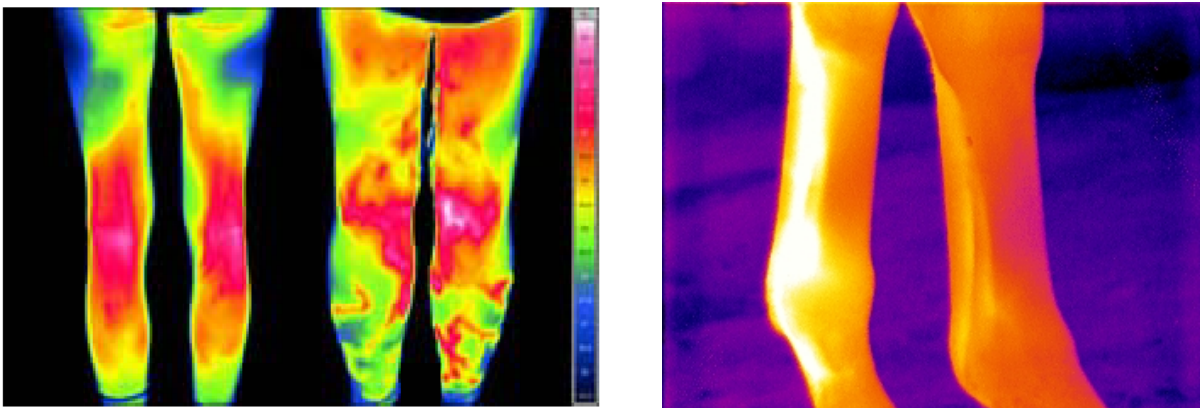


Abbildung 39 Anwendungen in der Human- und Tiermedizin

5.2 Vorbeugende Wartungsmaßnahmen

Immer wichtiger werden vorbeugende Wartungs- und Inspektionsarbeiten (Predictive Maintenance). Durch den Einsatz dieser Technik kann eine erhebliche Verbesserung des Wirkungsgrades von Anlagen und der Wirtschaftlichkeit ganzer Betriebe erzielt werden. Zur üblichen messtechnischen Datenerfassung über den Zustand einer Anlage, wie zum Beispiel Schwingungsmessung und akustische Messungen von Geräuschen, kann besonders die Infrarot Thermografie wichtige Aussagen über den Zustand und die Funktion von Bauteilen liefern.

Bezeichnung	Dringlichkeits-Level	Beschreibung	Aktion
Kritisch	Level 1	Jedes Problem, dass ein Sicherheitsrisiko darstellt oder zu einem Ausfall der Anlage führen kann	Verantwortliche Mitarbeiter müssen sofort entsprechende Maßnahmen ergreifen. Das Problem muss umgehend behoben werden.
Ernsthaft	Level 2	Ein Problem, dass zu gefährlichen Situationen führen und die Anlagen-zuverlässigkeit negativ beeinflussen kann	Die Verantwortlichen müssen die entdeckte Fehlerquelle bis zur Reparatur überwachen. Die Fehlerquelle muss in die Liste der dringenden Wartungsarbeiten aufgenommen werden.
Unkritisch	Level 3	Ein Defekt, der nicht unmittelbar Menschen gefährdet oder einen Anlagenausfall nach sich zieht.	Wird in den Service und Wartungsplan aufgenommen.
Geringfügig	Level 4	Ein Problem, dass durch die regelmäßigen Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen behoben wird.	Kontrolle des Wartungszeitplanes

Tabelle 13 Vorbeugende Wartung

Die Infrarot Thermometrie wird bei der vorbeugenden Instandhaltung unter anderem für folgende Aufgaben⁵ eingesetzt:

- Überprüfen von elektrischen Sicherungen und Kontakten
- Füllstandskontrolle
- Kontrolle von Wärmetauschern und Kühlern
- Kontrolle von Riementrieben und Kupplungen
- Kontrolle des Eingangsbereiches von Schredderanlagen
- Vorbeugender Brandschutz

⁵ Werden zum Teil in diesem Kapitel beschrieben.

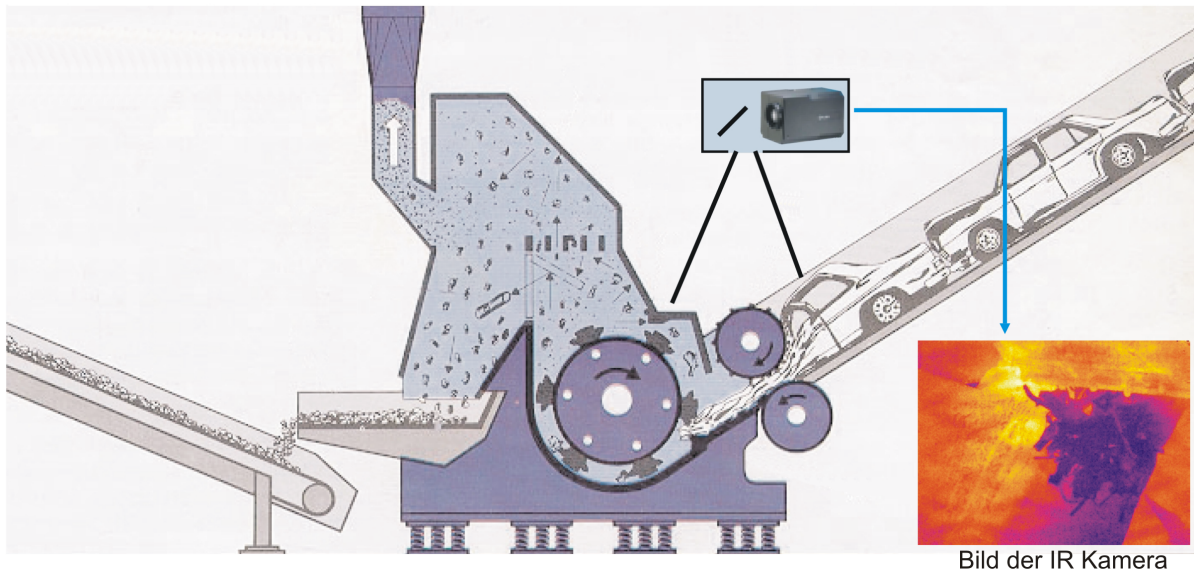


Abbildung 40 Überwachung einer Schredderanlage

In Abbildung 40 ist eine Schredderanlage ersichtlich. Durch den Zerkleinerungsvorgang wird Wärme abgegeben. Durch den entstehenden Rauch, Wasserdampf und Staub ist der Eingangsbereich unter diesen Umständen nicht einsehbar. Es kann vorkommen, dass größere Teile sich im Einzugsbereich verhaken und diesen blockieren. Damit der Anlagenbediener diesen Bereich besser kontrollieren kann, ist die Anlage mit einer Infrarotkamera ausgestattet. Dadurch werden die Vorgänge im Einzugsbereich sichtbar gemacht und der Bediener kann rechtzeitig auf eventuell auftretende Blockaden reagieren und die Anlage vor Beschädigungen schützen.

5.3 Ausrichtungsfehler von rotierenden Teilen

Häufig treten im Maschinenbau Fehler bei der Ausrichtung von Wellenverbindungen bei Maschinen auf. Üblicherweise erfolgt die Ausrichtung der Wellen mit Hilfe von Lasern. Diese Ausrichtungsmöglichkeit zeigt aber nicht immer den gewünschten Erfolg. Oft werden die durch die Fehlausrichtung verursachten zusätzlichen Belastungen falsch interpretiert, da sich der Fehler zwar in der Toleranz der im Wellenstrang integrierten Kupplung befindet. Die Einhaltung der Kupplungstoleranzen garantiert nicht, dass die Lagerstellen nicht überlastet werden.

Ausrichtungsfehler betreffen immer zwei Wellen bzw. Flansche. Für Kupplungen geben die Hersteller entsprechende Ausrichttoleranzen an. Diese Fehler können als vertikaler und horizontaler Versatz sowie vertikaler und horizontaler Winkelfehler beschrieben werden (siehe Abbildung 41). Diese Abweichungen von der idealen Verbindungslinie verursachen zusätzliche Lagerbelastungen und können im Extremfall zum Lagerschaden und so zum Totalausfall der Anlage führen.

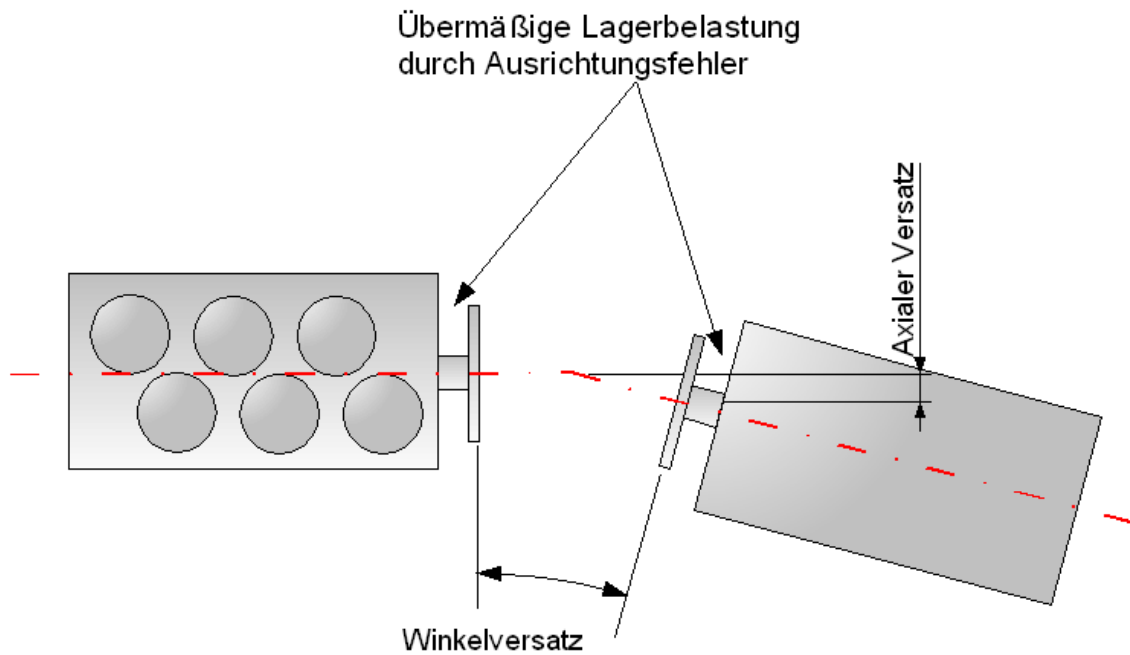


Abbildung 41 Ausrichtungsfehler

Mit Hilfe der Infrarot Thermografie lassen sich die zusätzlichen Belastungen im Betrieb der Anlage sehr gut abbilden. Durch die Erwärmung der Lagerstellen (Abbildung 42) unter radialer und axialer Belastung kann eine Bewertung der Lebensdauer durchgeführt und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

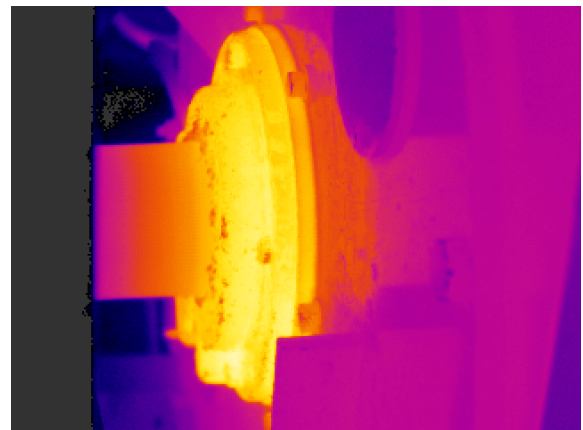
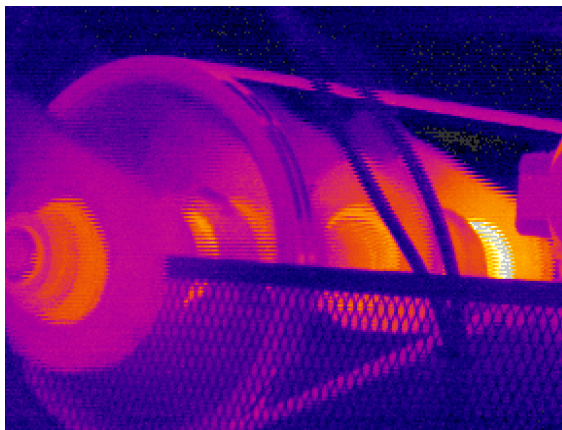


Abbildung 42 Lagererwärmung

5.4 Kontrolle des Riemenschlupfs bei Riemengetrieben

Die Infrarot Thermografie eignet sich hervorragend zur Bestimmung des Riemenschlupfs auf Walzen und Riemenscheiben. Die durch die Reibung entstehende Wärme erhöht sowohl die Temperatur des Riemens als auch der Riemenscheiben oder Walzen. Durch die Temperatur lässt sich der Verschleißzustand des Riemens feststellen. Bei überhöhten Temperaturwerten kann auf ein Ende der Riemenlebensdauer geschlossen werden und entsprechende Wartungsarbeiten eingeleitet werden.

5.5 Füllstands und Durchflussüberprüfung

Die Inspektion von Flüssigkeitsbehältern kann mit Hilfe der Infrarot Thermografie relativ einfach und schnell durchgeführt werden. Durch den Temperaturunterschied des Mediums zur Umgebung und die dadurch an der Behälterwandung hervorgerufene Temperaturverteilung lässt sich sehr einfach der Füllstand ermitteln. Die Messung und Überprüfung mittels Thermografie eignet sich aber nicht für gut isolierte Behälter und Leitungen sowie für Behälter, deren Inhalt die Temperatur der Umgebung hat (Behälter oder Leitung außer Betrieb).

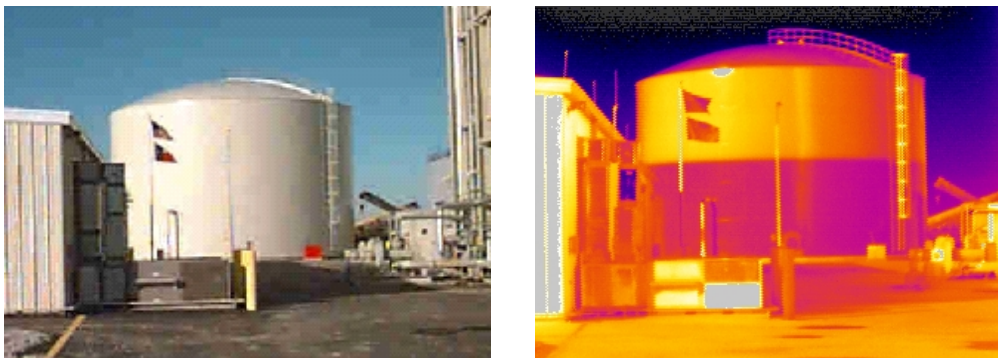


Abbildung 43 Füllstandsüberprüfung

5.6 Ortung von Leckagen und Undichtheiten

Aufspüren von Undichtheiten in Rohrnetzen (Wasser, Heizung, Gas, Abfluss), in Saugleitungen und Behältern sowie bei Sprinkler- und Druckluftleitungen hat sich der Einsatz der Infrarot Thermografie bewährt. Mit deren Hilfe ist es möglich, ein Leck punktgenau zu orten und aufzuzeigen.

Bei Wasserschäden ist es oft sehr schwierig die genaue Lage des Lecks festzustellen. Dies macht oft ein großflächiges Aufschlagen von Wänden und Böden nötig. Mit der Thermografie ist die Leckortung dagegen in der Regel schnell und problemlos zu bewältigen. Die Leitung wird hierbei

mit einer Infrarotkamera untersucht und die undichte Stelle kann somit schnell geortet werden. Dadurch kann die defekte Stelle schnell und mit erheblich geringeren Kosten wiederhergestellt werden.

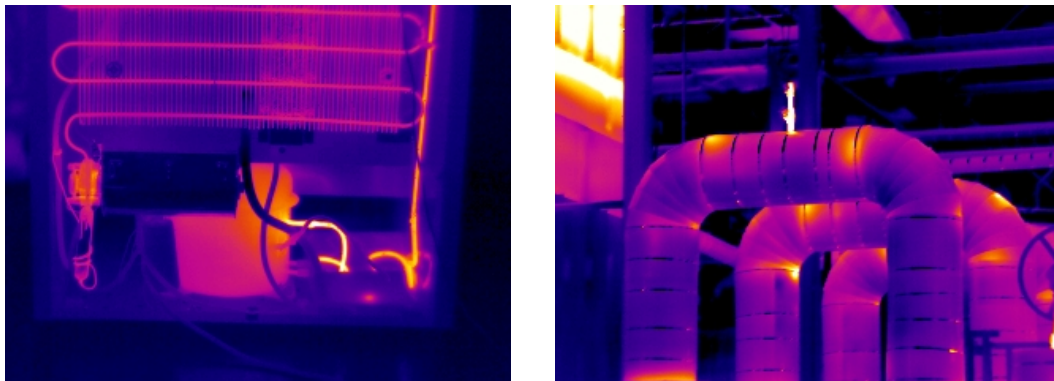


Abbildung 44 Leckageüberprüfung von Rohrleitungen

Auch für das Platzieren von Bohrlöchern bei Fußboden- und Wandheizungen, leistet die Thermografie wichtige und Kosten sparende Hilfestellung. Der Verlauf der im Boden oder in der Wand verlegten Heizschleifen wird mit Hilfe der Thermografie sichtbar. Dadurch lassen sich die Löcher, ohne eine ungewollte Beschädigung der Leitungen, gezielt platzieren.

5.7 Gebäudethermografie

Die Thermografie wird an Gebäuden und Industrieanlagen vor allem zur Auffindung von Wärmeverluststellen eingesetzt. Diese Wärmeverluststellen können dabei von unterschiedlichster Bedeutung sein. Durch großflächiges Abtasten des Messobjektes entsteht ein Thermogramm, das Temperaturverteilung an der Oberfläche des bemessenen Objektes darstellt. Durch Analyse des Thermogramms werden nicht sichtbare Mängel erkannt. Damit kann eine Vermeidung größerer Schadensfälle und kostspieliger Instandsetzungen durch Früherkennung effektiver und potenzieller Schwachstellen erzielt werden. Darüber hinaus kann die Infrarot-Thermografie eine Entscheidungshilfe bei Gewährleistungsansprüchen oder bei der Beurteilung des technischen Zustandes der Bausubstanz und des Verkehrswertes von Immobilien sein. Die Gebäudethermografie ortet:

- Wärmebrücken (siehe Abbildung 45)
- Einbaufehler an Fenstern und Türen
- Mauerwerksdefekte (Risse, Isolations- und Dämmungsfehler, siehe Abbildung 45)
- Leckagen an Fußbodenheizungen, sowie an Warm- und Kaltwasserrohren,
- Lüftungswärmeverluste
- Dämmungsfehler an Fernwärmeleitung

- Schwachstellenanalyse im Gebäudebestand sowie Lokalisierung von Wärme- oder auch Kälteverlusten an Gebäudewänden, Dächern, Rohrleitungen oder Isolationen (siehe Abbildung 45)
- Aufdecken von Feuchtigkeit im Mauerwerk und im Dachbereich,
- Inspektionen von Fußbodenheizungen (siehe Abbildung 45, rechts unten) und Rohrleitungen und deren Lokalisierung
- Ortung von Wasserschäden
- Sichtbarmachung von unter Putz liegendem Fachwerk
- Detektion von Taupunktunterschreitungen (siehe Abbildung 45, links unten)

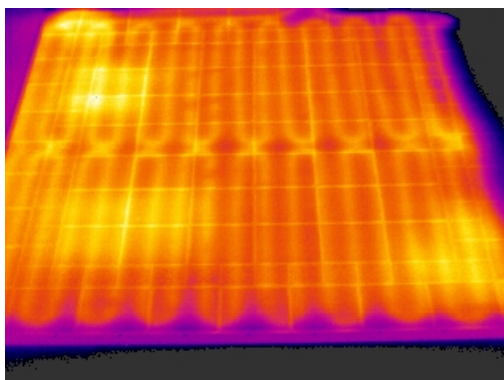
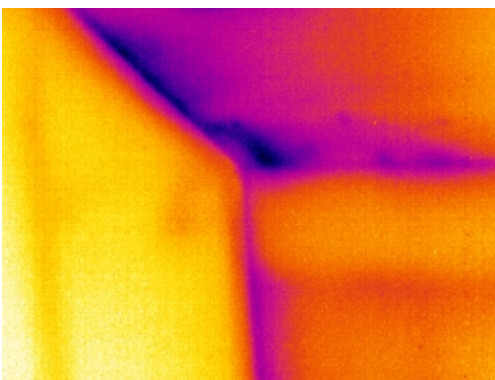
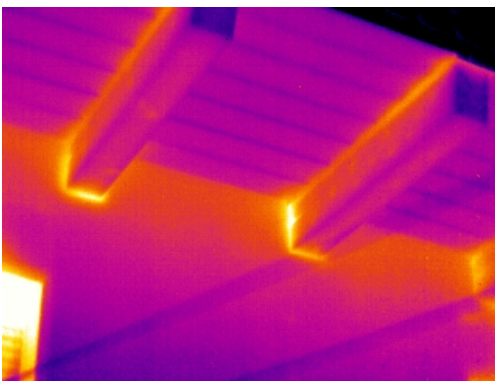
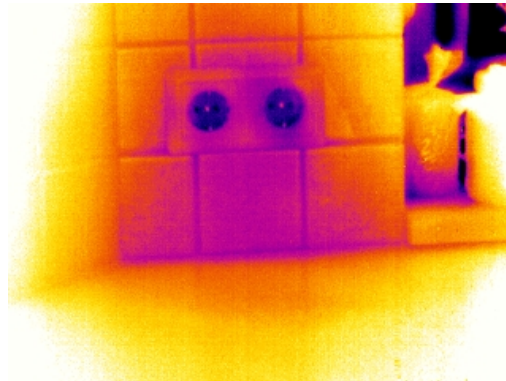
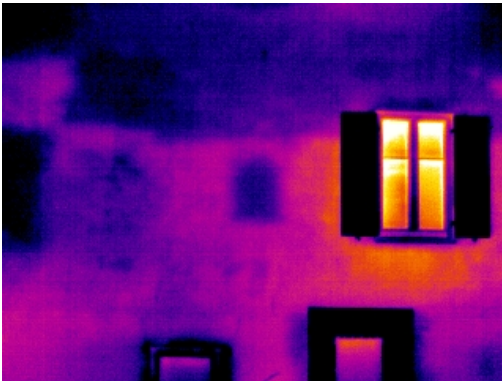


Abbildung 45 Beispiele – Gebäudethermografie

Die Infrarot Messtechnik liefert somit eine Entscheidungshilfe für die planbare, terminierte und zustandsorientierte Instandhaltung. Es kann eine Senkung der Energiekosten durch optimale Wärmedämmung und der Vermeidung von Wärmebrücken erreicht werden.

5.8 Diagnose in der Elektrotechnik und Elektronik

Der Einsatz von Infrarottechnologie in der Elektrotechnik und Elektronik bildet sicherlich einen Schwerpunkt bei den Anwendungen. Die Palette der Anwendungen reicht von einer simplen Untersuchung von Kabelverbindungen (Abbildung 46, links) und geht bis zur Ermittlung von Hotspots auf Motherboards von Computern (Abbildung 46, rechts).

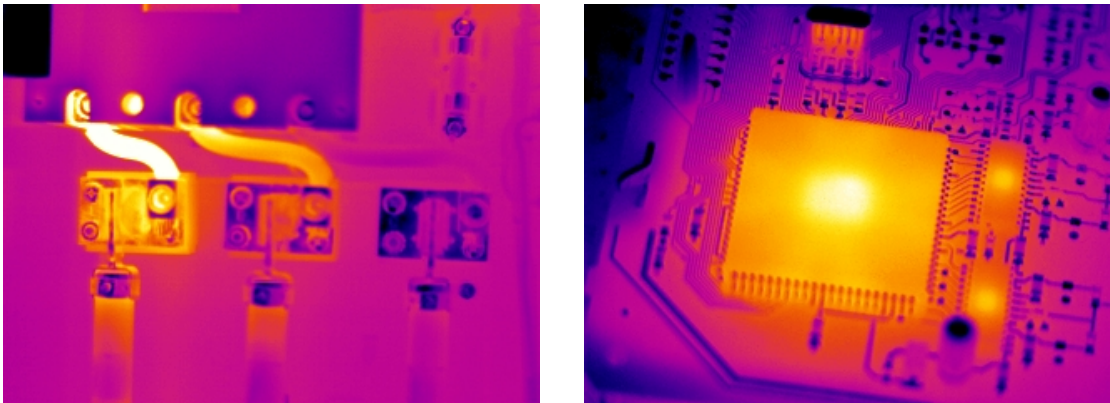


Abbildung 46 Anwendungen in der Elektrotechnik und Elektronik

Die folgenden Abbildungen zeigen zwei Elektromotore, welche bei gleichen Betriebsbedingungen im Einsatz sind. Durch die Infrarotbilder wird ersichtlich, dass sich der Motor in Abbildung 47 links, um bis zu 20 °C mehr erwärmt als der in der rechten Abbildung gezeigte baugleiche und den gleichen Betriebsbedingungen ausgesetzte Motor. Durch diese Untersuchung können Produktions- oder Montagefehler geortet werden.

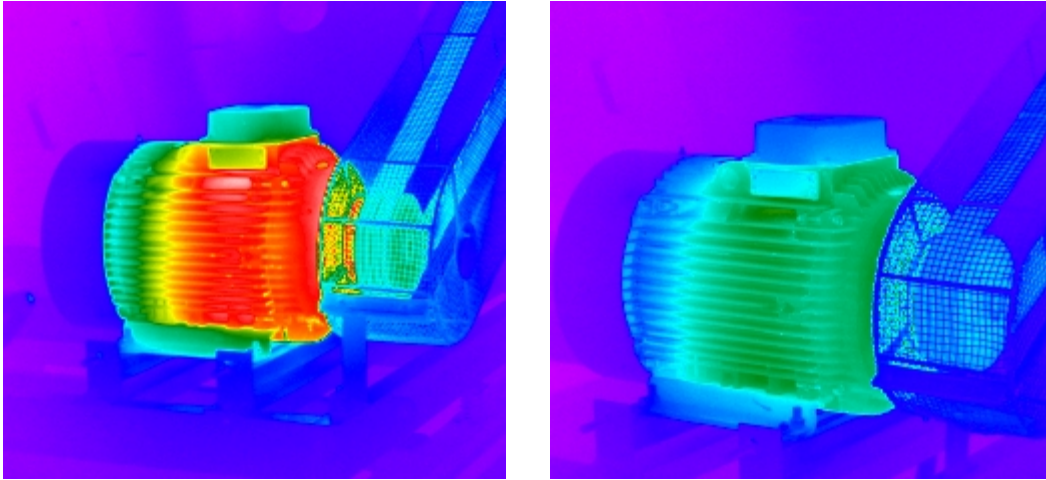


Abbildung 47 Vergleichsmessung bei gleichen Betriebsbedingungen

5.9 Anwendungen im automotiven Bereich

Sowohl im Entwicklungs- als auch im Produktionsprozess haben hier Infrarotanwendungen Platz und Notwendigkeit gefunden. Beispiele dafür sind der Einsatz von Infrarotkameras in der Motoren-Prüfstandtechnik (Abbildung 48, links) und die Anwendung bei Qualitätskontrollen, wie z.B. die Untersuchung der Funktion von Sitzheizungen (Abbildung 48, rechts).

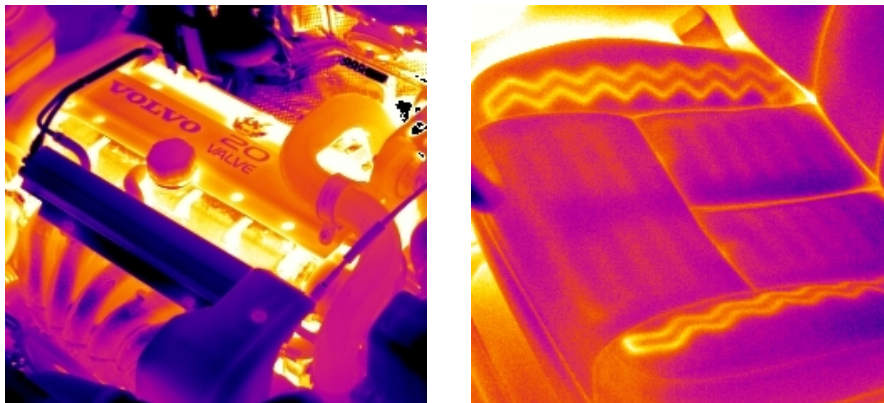


Abbildung 48 Beispiele – automotiver Bereich

In der PKW-Reifenproduktion sind Linienscanner-Systeme im Einsatz, welche Fremdkörper, oder Oberflächenanomalien detektieren. Die Fremdkörper bzw. die Anomalien werden durch den abweichenden Emissionsgrad erkannt und an das Automatisierungssystem weitergeleitet (siehe auch Abbildung 49).

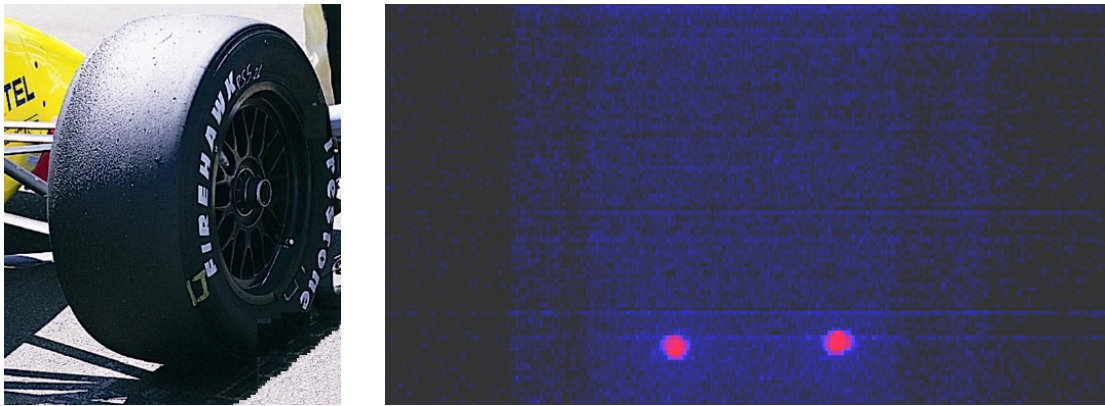


Abbildung 49 Beispiele – automotiver Bereich

5.10 Sicherheitstechnik

Die Infrarottechnik findet in zahlreichen Sicherheitssystemen ihre Anwendung. Stark vertreten ist hier der militärische Bereich. Zur Ortung und Aufspürung werden Infrarot Kameras verwendet. So genannte „Search and Destroy“ Waffensysteme bedienen sich unter anderem auch dieser Technologie. Grenzschutzüberwachung und Objektschutz bilden ebenfalls einen wichtigen Teil in dieser Anwendungsgruppe.



Abbildung 50 Beispiele – Sicherheitstechnik



Abbildung 51 Infrarotwaffensystem

5.11 Brandortungssysteme

Brandortungssysteme beinhalten als Kernstück Infrarotkameras, mit denen die zu überwachenden Objekte gescannt werden. Bei Auftreten von Brandnestern werden diese von den Kameras detektiert. Das System sendet ein Signal an die Sicherheitseinrichtungen und löst einen Alarm aus.

6 Schulungsprogramm

Aktuelle Schulungen finden Sie auf unserer Homepage unter:

<https://nbn.at/blogs/veranstaltungen/>

Schulungen bei Ihnen vor Ort oder bei uns im Haus sind auf Anfrage möglich.

Schulungen unseres Partners itc (Infrared Training Center) finden Sie auf deren Homepage unter:

<https://www.infraredtraining.com/de-de/>

Anmeldungen

Begrenzte Teilnehmerzahl, daher bitte um Anmeldung mittels E-Mail an anmeldung@nbn.at

Konditionen

Sobald die Anmeldung bei uns eingegangen ist, erhalten Sie eine entsprechende Anmeldebestätigung, eine detaillierte Programmbeschreibung, sowie Anfahrtsskizze und Nächtigungsmöglichkeiten. Die Rechnung wird Ihnen kurz vor Kursbeginn zugesandt.

Die Anmeldungen werden nach dem Datum des Eintreffens berücksichtigt. Sollten zu wenige Anmeldungen pro Kurs vorliegen, behalten wir uns eine Absage/Verschiebung vor, für diesen Fall werden Sie unverzüglich verständigt, eventuell bereits eingezahlte Seminarbeiträge werden unvermindert rückerstattet.

Die Teilnahmegebühr beinhaltet das ausführliche Seminar material, Mittagessen und Pausenverpflegung.

Kontakt

nbn Austria GmbH

Riesstraße 146
8010 Graz

+43 316 40 28 05

www.nbn.at

info@nbn.at

7 Begriffe und Definitionen

Messbereich:

Der Messbereich gibt die Temperaturen an, die das Gerät messen kann.

Messunsicherheit:

Kein Messgerät misst absolut genau. Viele Faktoren beeinflussen die Genauigkeit des Gerätes. Das Maß dafür ist die Messunsicherheit. Eine Messunsicherheit von 1 %, das bedeutet, der tatsächliche Temperaturwert kann 1 % unter oder über dem gemessenen Temperaturwert liegen.

Spektralbereich:

Bei der Infrarotmesstechnik messen Sensoren die elektromagnetischen Wellen, die ein Körper ausstrahlt. Diese liegen in einem Wellenlängenbereich oberhalb der des sichtbaren Lichts. Der Spektralbereich des Messgerätes gibt also die Wellenlängen an, die das Gerät messen kann. Die Wahl des Spektralbereiches hängt dabei von den zu messenden Materialien ab

Temperaturauflösung:

Dabei handelt es sich um den kleinsten erfassbaren Temperaturunterschied, der erzielt werden kann (z.B. 0,1 K)

Reproduzierbarkeit:

Die Reproduzierbarkeit ist ein Maß für die Genauigkeit des Messinstruments und Dauerhaftigkeit der Messqualität. Man versteht darunter die Fähigkeit eines Messinstruments ein vorausgehendes Ergebnis innerhalb eines limitierten Fehlers wiederzugeben.

8 Emissionsgradtabellen

In diesem Abschnitt finden Sie eine Aufstellung von Emissionsdaten aus der Fachliteratur und eigenen Messungen von FLIR Systems AB.

8.1 Referenzen

1	Mikaél A. Bramson: Infrared Radiation, A Handbook for Applications, Plenum press, N.Y.
2	William L. Wolfe, George J. Zissis: The Infrared Handbook, Office of Naval Research, Department of Navy, Washington, D.C.
3	Madding, R. P.: Thermographic Instruments and Systems. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin – Extension, Department of Engineering and Applied Science.
4	William L. Wolfe: Handbook of Military Infrared Technology, Office of Naval Research, Department of Navy, Washington, D.C.
5	Jones, Smith, Probert: External thermography of buildings..., Proc. of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, vol.110, Industrial and Civil Applications of Infrared Technology, Juni 1977 London.
6	Paljak, Pettersson: Thermography of Buildings, Swedish Building Research Institute, Stockholm 1972.
7	Vlcek, J: Determination of emissivity with imaging radiometers and some emissivities at $\lambda = 5 \mu\text{m}$. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
8	Kern: Evaluation of infrared emission of clouds and ground as measured by weather satellites, Defence Documentation Center, AD 617 417.
9	Öhman, Claes: Emittansmätningar med AGEMA E-Box. Teknisk rapport, AGEMA 1999. (Emissionsmessungen mit AGEMA E-Box. Technischer Bericht, AGEMA 1999.)

8.2 Tabellen

In den folgenden Tabellen sind die Emissionsgrade verschiedener Materialien bei verschiedenen Spezifikationen, Temperaturen und Wellenlängen angegeben.

Folgende Abkürzungen werden bei der Beschreibung des Spektrums verwendet:

T	Gesamtspektrum
SW	2 – 5 μm
LW	8 – 14 μm
LLW	6,5 – 20 μm

Material	Spezifikation	Temperatur [°C]	Spektrum	Emissionsgrad	Referenz
Aluminium	Blech, 4 Muster unterschiedlich zerkratzt	70	LW	0,03–0,06	9
Aluminium	Blech, 4 Muster unterschiedlich zerkratzt	70	SW	0,05–0,08	9
Aluminium	eloxiert, hellgrau, stumpf	70	LW	0,97	9
Aluminium	eloxiert, hellgrau, stumpf	70	SW	0,61	9
Aluminium	eloxiert, schwarz, stumpf	70	LW	0,95	9
Aluminium	eloxiert, schwarz, stumpf	70	SW	0,67	9
Aluminium	eloxiertes Blech	100	T	0,55	2
Aluminium	Folie	27	3 µm	0,09	3
Aluminium	Folie	27	10 µm	0,04	3
Aluminium	geraut	27	3 µm	0,28	3
Aluminium	geraut	27	10 µm	0,18	3
Aluminium	Guss, sandgestrahlt	70	LW	0,46	9
Aluminium	Guss, sandgestrahlt	70	SW	0,47	9
Aluminium	in HNO ₃ getaucht, Platte	100	T	0,05	4
Aluminium	poliert	50–100	T	0,04–0,06	1
Aluminium	poliert, Blech	100	T	0,05	2
Aluminium	polierte Platte	100	T	0,05	R
Aluminium	raue Oberfläche	20–50	T	0,06–0,07	1
Aluminium	stark oxidiert	50–500	T	0,2–0,3	1
Aluminium	stark verwittert	17	SW	0,83–0,94	5
Aluminium	unverändert, Blech	100	T	0,09	2
Aluminium	unverändert, Platte	100	T	0,09	4
Aluminium	Vakuum beschichtet	20	T	0,04	2
Aluminiumbronze		20	T	0,60	1
Aluminiumhydroxid	Pulver		T	0,28	1
Aluminiumoxid	aktiviert, Pulver		T	0,46	1
Aluminiumoxid	rein, Pulver (Aluminiumoxid)		T	0,16	1
Asbest	Bodenfliesen	35	SW	0,94	7
Asbest	Brett	20	T	0,96	1
Asbest	Gewerbe		T	0,78	1
Asbest	Papier	40–400	T	0,93–0,95	1
Asbest	Pulver		T	0,40–0,60	1
Asbest	Ziegel	20	T	0,96	1
Asphaltstraßenbelag		4	LLW	0,967	8
Beton		20	T	0,92	2
Beton	Gehweg	5	LLW	0,974	8
Beton	rau	17	SW	0,97	5
Beton	trocken	36	SW	0,95	7
Blech	glänzend	20–50	T	0,04–0,06	1
Blech	Weißblech	100	T	0,07	2
Blei	glänzend	250	T	0,08	1
Blei	Nicht oxidiert, poliert	100	T	0,05	4

Material	Spezifikation	Temperatur [°C]	Spektrum	Emissionsgrad	Referenz
Blei	oxidiert, grau	20	T	0,28	1
Blei	oxidiert, grau	22	T	0,28	4
Blei	Oxidiert bei 200 °C	200	T	0,63	1
Bleirost		100	T	0,93	4
Bleirost, Pulver		100	T	0,93	1
Bronze	Phosphorbronze	70	LW	0,06	9
Bronze	Phosphorbronze	70	SW	0,08	9
Bronze	poliert	50	T	0,1	1
Bronze	porös, rau	50–150	T	0,55	1
Bronze	Pulver		T	0,76–0,80	1
Chrom	poliert	50	T	0,10	1
Chrom	poliert	500–1000	T	0,28–0,38	1
Ebonit			T	0,89	1
Eis: Siehe Wasser					
Eisen galvanisiert	Blech	92	T	0,07	4
Eisen galvanisiert	Blech, oxidiert	20	T	0,28	1
Eisen galvanisiert	Blech, poliert	30	T	0,23	1
Eisen galvanisiert	Stark oxidiert	70	LW	0,85	9
Eisen galvanisiert	Stark oxidiert	70	SW	0,64	9
Eisen und Stahl	elektrolytisch	22	T	0,05	4
Eisen und Stahl	elektrolytisch	100	T	0,05	4
Eisen und Stahl	elektrolytisch	260	T	0,07	4
Eisen und Stahl	elektrolytisch, hochglanzpoliert	175–225	T	0,05–0,06	1
Eisen und Stahl	Frisch gewalzt	20	T	0,24	1
Eisen und Stahl	Frisch mit Schmirgelpapier bearbeitet	20	T	0,24	1
Eisen und Stahl	Geschliffenes Blech	950–1100	T	0,55–0,61	1
Eisen und Stahl	geschmiedet, hochglanzpoliert	40–250	T	0,28	1
Eisen und Stahl	Gewalztes Blech	50	T	0,56	1
Eisen und Stahl	glänzend, geätzt	150	T	0,16	1
Eisen und Stahl	Glänzende Oxidschicht, Blech	20	T	0,82	1
Eisen und Stahl	Heiß gewalzt	20	T	0,77	1
Eisen und Stahl	Heiß gewalzt	130	T	0,60	1
Eisen und Stahl	Kalt gewalzt	70	LW	0,09	9
Eisen und Stahl	Kalt gewalzt	70	SW	0,20	9
Eisen und Stahl	Mit rotem Rost bedeckt	20	T	0,61–0,85	1
Eisen und Stahl	oxidiert	100	T	0,74	1
Eisen und Stahl	oxidiert	100	T	0,74	4
Eisen und Stahl	oxidiert	125–525	T	0,78–0,82	1
Eisen und Stahl	oxidiert	200	T	0,79	2
Eisen und Stahl	oxidiert	200–600	T	0,80	1
Eisen und Stahl	oxidiert	1227	T	0,89	4
Eisen und Stahl	poliert	100	T	0,07	2
Eisen und Stahl	poliert	400–1000	T	0,14–0,38	1

Material	Spezifikation	Temperatur [°C]	Spektrum	Emissionsgrad	Referenz
Eisen und Stahl	Poliertes Blech	750–1050	T	0,52–0,56	1
Eisen und Stahl	rau, ebene Oberfläche	50	T	0,95–0,98	1
Eisen und Stahl	rostig, rot	20	T	0,69	1
Eisen und Stahl	Rostrot, Blech	22	T	0,69	4
Eisen und Stahl	Stark oxidiert	50	T	0,88	1
Eisen und Stahl	Stark oxidiert	500	T	0,98	1
Eisen und Stahl	Stark verrostet	17	SW	0,96	5
Eisen und Stahl	Stark verrostetes Blech	20	T	0,69	2
Eisen verzinkt	Blech	24	T	0,064	4
Emaile		20	T	0,9	1
Emaile	Lack	20	T	0,85–0,95	1
Erde	Mit Wasser gesättigt	20	T	0,95	2
Erde	trocken	20	T	0,92	2
Faserplatte	hart, unbehandelt	20	SW	0,85	6
Faserplatte	Ottrelith	70	LW	0,88	9
Faserplatte	Ottrelith	70	SW	0,75	9
Faserplatte	Partikelplatte	70	LW	0,89	9
Faserplatte	Partikelplatte	70	SW	0,77	9
Faserplatte	porös, unbehandelt	20	SW	0,85	6
Firnis	Auf Eichenparkettboden	70	LW	0,90–0,93	9
Firnis	Auf Eichenparkettboden	70	SW	0,90	9
Firnis	matt	20	SW	0,93	6
Gips		20	T	0,8–0,9	1
Gipsputz		17	SW	0,86	5
Gipsputz	Gipsplatte, unbehandelt	20	SW	0,90	6
Gipsputz	Raue Oberfläche	20	T	0,91	2
Gold	Hochglanz poliert	200–600	T	0,02–0,03	1
Gold	Hoch poliert	100	T	0,02	2
Gold	poliert	130	T	0,018	1
Granit	poliert	20	LLW	0,849	8
Granit	rauh	21	LLW	0,879	8
Granit	rauh, 4 verschiedene Muster	70	LW	0,77–0,87	9
Granit	rauh, 4 verschiedene Muster	70	SW	0,95–0,97	9
Gummi	hart	20	T	0,95	1
Gummi	weich, grau, rau	20	T	0,95	1
Gusseisen	bearbeitet	800–1000	T	0,60–0,70	1
Gusseisen	flüssig	1300	T	0,28	1
Gusseisen	Guss	50	T	0,81	1
Gusseisen	Gusseisenblöcke	1000	T	0,95	1
Gusseisen	oxidiert	38	T	0,63	4
Gusseisen	oxidiert	100	T	0,64	2
Gusseisen	oxidiert	260	T	0,66	4
Gusseisen	oxidiert	538	T	0,76	4
Gusseisen	Oxidiert bei 600 °C	200–600	T	0,64–0,78	1

Material	Spezifikation	Temperatur [°C]	Spektrum	Emissionsgrad	Referenz
Gusseisen	poliert	38	T	0,21	4
Gusseisen	poliert	40	T	0,21	2
Gusseisen	poliert	200	T	0,21	1
Gusseisen	unbearbeitet	900–1100	T	0,87–0,95	1
Haut	Mensch	32	T	0,98	2
Holz		17	SW	0,98	5
Holz		19	LLW	0,962	8
Holz	gehobelt	20	T	0,8–0,9	1
Holz	Gehobelte Eiche	20	T	0,90	2
Holz	Gehobelte Eiche	70	LW	0,88	9
Holz	Gehobelte Eiche	70	SW	0,77	9
Holz	geschmiregelt		T	0,5–0,7	1
Holz	Pinie,4 verschiedene Muster	70	LW	0,81–0,89	9
Holz	Pinie,4 verschiedene Muster	70	SW	0,67–0,75	9
Holz	Sperrholz, glatt, trocken	36	SW	0,82	7
Holz	Sperrholz, unbehandelt	20	SW	0,83	6
Holz	weiß, feucht	20	T	0,7–0,8	1
Kalk			T	0,3–0,4	1
Kohlenstoff	Grafit, Oberfläche gefeilt	20	T	0,98	2
Kohlenstoff	Grafitpulver		T	0,97	1
Kohlenstoff	Holzkohlepulver		T	0,96	1
Kohlenstoff	Kerzenruß	20	T	0,95	2
Kohlenstoff	Lampenuß	20–400	T	0,95–0,97	1
Kunststoff	Glasfaserlaminat (Leiterplatte)	70	LW	0,91	9
Kunststoff	Glasfaserlaminat (Leiterplatte)	70	SW	0,94	9
Kunststoff	Polyurethan-Isolierplatte	70	LW	0,55	9
Kunststoff	Polyurethan-Isolierplatte	70	SW	0,29	9
Kunststoff	PVC, Kunststoffboden, stumpf, strukturiert	70	LW	0,93	9
Kunststoff	PVC, Kunststoffboden, stumpf, strukturiert	70	SW	0,94	9
Kupfer	elektrolytisch, hochglanzpoliert	80	T	0,018	1
Kupfer	elektrolytisch, poliert	–34	T	0,006	4
Kupfer	geschabt	27	T	0,07	4
Kupfer	geschmolzen	1100–1300	T	0,13–0,15	1
Kupfer	kommerziell, glänzend	20	T	0,07	1
Kupfer	oxidiert	50	T	0,6–0,7	1
Kupfer	oxidiert, dunkel	27	T	0,78	4
Kupfer	oxidiert, stark	20	T	0,78	2
Kupfer	Oxidiert schwarz		T	0,88	1
Kupfer	poliert	50–100	T	0,02	1
Kupfer	poliert	100	T	0,03	2
Kupfer	poliert, kommerziell	27	T	0,03	4

Material	Spezifikation	Temperatur [°C]	Spektrum	Emissionsgrad	Referenz
Kupfer	poliert, mechanisch	22	T	0,015	4
Kupfer	rein, sorgfältig vorbereitete Oberfläche	22	T	0,008	4
Kupferdioxid	Pulver		T	0,84	1
Kupferoxid	rot, Pulver		T	0,70	1
Lack	3 Farben auf Aluminium-gesprüht	70	LW	0,92–0,94	9
Lack	3 Farben auf Aluminium gesprüht	70	SW	0,50–0,53	9
Lack	Aluminium auf rauher Oberfläche	20	T	0,4	1
Lack	Bakelit	80	T	0,83	1
Lack	hitzebeständig	100	T	0,92	1
Lack	schwarz, glänzend, auf Eisen gesprüht	20	T	0,87	1
Lack	schwarz, matt	100	T	0,97	2
Lack	schwarz, stumpf	40–100	T	0,96–0,98	1
Lack	weiß	40–100	T	0,8–0,95	1
Lack	weiß	100	T	0,92	2
Lacke	8 verschiedene Farben und Qualitäten	70	LW	0,92–0,94	9
Lacke	8 verschiedene Farben und Qualitäten	70	SW	0,88–0,96	9
Lacke	Aluminium, unterschiedliches Alter	50–100	T	0,27–0,67	1
Lacke	Auf Ölbasis, Mittelwert von 16 Farben	100	T	0,94	2
Lacke	chromgrün		T	0,65–0,70	1
Lacke	kadmiumgelb		T	0,28–0,33	1
Lacke	kobaltblau		T	0,7–0,8	1
Lacke	Kunststoff, schwarz	20	SW	0,95	6
Lacke	Kunststoff, weiß	20	SW	0,84	6
Lacke	Öl	17	SW	0,87	5
Lacke	Öl, diverse Farben	100	T	0,92–0,96	1
Lacke	Öl, glänzend grau	20	SW	0,96	6
Lacke	Öl, grau, matt	20	SW	0,97	6
Lacke	Öl, schwarz, matt	20	SW	0,94	6
Lacke	Öl, schwarz glänzend	20	SW	0,92	6
Leder	gebräunt, gegerbt		T	0,75–0,80	1
Magnesium		22	T	0,07	4
Magnesium		260	T	0,13	4
Magnesium		538	T	0,18	4
Magnesium	poliert	20	T	0,07	2
Magnesiumpulver			T	0,86	1
Messing	Abgerieben mit 80er-Schmirgelpapier	20	T	0,20	2
Messing	Blech, gewalzt	20	T	0,06	1
Messing	Blech, mit Schmirgelpapier bearbeitet	20	T	0,2	1

Material	Spezifikation	Temperatur [°C]	Spektrum	Emissionsgrad	Referenz
Messing	Hoch poliert	100	T	0,03	2
Messing	oxidiert	70	SW	0,04–0,09	9
Messing	oxidiert	70	LW	0,03–0,07	9
Messing	oxidiert	100	T	0,61	2
Messing	Oxidiert bei 600 °C	200–600	T	0,59–0,61	1
Messing	poliert	200	T	0,03	1
Messing	stumpf, fleckig	20–350	T	0,22	1
Molybdän		600–1000	T	0,08–0,13	1
Molybdän		1500–2200	T	0,19–0,26	1
Molybdän	Faden	700–2500	T	0,1–0,3	1
Mörtel		17	SW	0,87	5
Mörtel	trocken	36	SW	0,94	7
Nickel	Draht	200–1000	T	0,1–0,2	1
Nickel	elektrolytisch	22	T	0,04	4
Nickel	elektrolytisch	38	T	0,06	4
Nickel	elektrolytisch	260	T	0,07	4
Nickel	elektrolytisch	538	T	0,10	4
Nickel	galvanisiert, poliert	20	T	0,05	2
Nickel	Galvanisiert auf Eisen, nicht poliert	20	T	0,11–0,40	1
Nickel	Galvanisiert auf Eisen, nicht poliert	22	T	0,11	4
Nickel	Galvanisiert auf Eisen, poliert	22	T	0,045	4
Nickel	hellmatt	122	T	0,041	4
Nickel	oxidiert	200	T	0,37	2
Nickel	oxidiert	227	T	0,37	4
Nickel	oxidiert	1227	T	0,85	4
Nickel	Oxidiert bei 600 °C	200–600	T	0,37–0,48	1
Nickel	poliert	122	T	0,045	4
Nickel	rein, poliert	100	T	0,045	1
Nickel	rein, poliert	200–400	T	0,07–0,09	1
Nickelchrom	Draht, blank	50	T	0,65	1
Nickelchrom	Draht, blank	500–1000	T	0,71–0,79	1
Nickelchrom	Draht, oxidiert	50–500	T	0,95–0,98	1
Nickelchrom	gewalzt	700	T	0,25	1
Nickelchrom	sandgestrahlt	700	T	0,70	1
Nickeloxid		500–650	T	0,52–0,59	1
Nickeloxid		1000–1250	T	0,75–0,86	1
Öl, Schmieröl	0,025 mm-Film	20	T	0,27	2
Öl, Schmieröl	0,050 mm-Film	20	T	0,46	2
Öl, Schmieröl	0,125 mm-Film	20	T	0,72	2
Öl, Schmieröl	Dicke Schicht	20	T	0,82	2
Öl, Schmieröl	Film auf Ni-Basis: nur Ni-Basis	20	T	0,05	2
Papier	4 verschiedene Farben	70	LW	0,92–0,94	9
Papier	4 verschiedene Farben	70	SW	0,68–0,74	9

Material	Spezifikation	Temperatur [°C]	Spektrum	Emissionsgrad	Referenz
Papier	Beschichtet mit schwarzem Lack		T	0,93	1
Papier	dunkelblau		T	0,84	1
Papier	gelb		T	0,72	1
Papier	grün		T	0,85	1
Papier	rot		T	0,76	1
Papier	schwarz		T	0,90	1
Papier	schwarz, stumpf		T	0,94	1
Papier	schwarz, stumpf	70	LW	0,89	9
Papier	schwarz, stumpf	70	SW	0,86	9
Papier	weiß	20	T	0,7–0,9	1
Papier	weiß, 3 verschiedene Glanzarten	70	LW	0,88–0,90	9
Papier	weiß, 3 verschiedene Glanzarten	70	SW	0,76–0,78	9
Papier	weiß, gebunden	20	T	0,93	2
Platin		17	T	0,016	4
Platin		22	T	0,03	4
Platin		100	T	0,05	4
Platin		260	T	0,06	4
Platin		538	T	0,10	4
Platin		1000–1500	T	0,14–0,18	1
Platin		1094	T	0,18	4
Platin	Band	900–1100	T	0,12–0,17	1
Platin	Draht	50–200	T	0,06–0,07	1
Platin	Draht	500–1000	T	0,10–0,16	1
Platin	Draht	1400	T	0,18	1
Platin	rein, poliert	200–600	T	0,05–0,10	1
Porzellan	glasiert	20	T	0,92	1
Porzellan	weiß, leuchtend		T	0,70–0,75	1
Rostfreier Stahl	Blech, poliert	70	LW	0,14	9
Rostfreier Stahl	Blech, poliert	70	SW	0,18	9
Rostfreier Stahl	Blech, unbehandelt, etwas zerkratzt	70	LW	0,28	9
Rostfreier Stahl	Blech, unbehandelt, etwas zerkratzt	70	SW	0,30	9
Rostfreier Stahl	gewalzt	700	T	0,45	1
Rostfreier Stahl	Legierung, 8 % Ni, 18 % Cr	500	T	0,35	1
Rostfreier Stahl	sandgestrahlt	700	T	0,70	1
Rostfreier Stahl	Typ 18-8, glänzend	20	T	0,16	2
Rostfreier Stahl	Typ 18-8, oxidiert bei 800 °C	60	T	0,85	2
Sand			T	0,60	1
Sand		20	T	0,90	2
Sandstein	poliert	19	LLW	0,909	8
Sandstein	rau	19	LLW	0,935	8
Schlacke	Kessel	0–100	T	0,97–0,93	1

Material	Spezifikation	Temperatur [°C]	Spektrum	Emissionsgrad	Referenz
Schlacke	Kessel	200–500	T	0,89–0,78	1
Schlacke	Kessel	600–1200	T	0,76–0,70	1
Schlacke	Kessel	1400–1800	T	0,69–0,67	1
Schmirgelpapier	grob	80	T	0,85	1
Schnee: siehe Wasser					
Silber	poliert	100	T	0,03	2
Silber	rein, poliert	200–600	T	0,02–0,03	1
Spanplatte	unbehandelt	20	SW	0,90	6
Stukkatur	rau, gelbgrün	10–90	T	0,91	1
Styropor	Wärmedämmung	37	SW	0,60	7
Tapete	Leicht gemustert, hellgrau	20	SW	0,85	6
Tapete	Leicht gemustert, rot	20	SW	0,90	6
Teer			T	0,79–0,84	1
Teer	Papier	20	T	0,91–0,93	1
Titan	Oxidiert bei 540 °C	200	T	0,40	1
Titan	Oxidiert bei 540 °C	500	T	0,50	1
Titan	Oxidiert bei 540 °C	1000	T	0,60	1
Titan	poliert	200	T	0,15	1
Titan	poliert	500	T	0,20	1
Titan	poliert	1000	T	0,36	1
Ton	gebrannt	70	T	0,91	1
Tuch	schwarz	20	T	0,98	1
Wasser	destilliert	20	T	0,96	2
Wasser	Eis, bedeckt mit starkem Frost	0	T	0,98	1
Wasser	Eis, glatt	-10	T	0,96	2
Wasser	Eis, glatt	0	T	0,97	1
Wasser	Frostkristalle	-10	T	0,98	2
Wasser	Schicht >0,1 mm dick	0–100	T	0,95–0,98	1
Wasser	Schnee		T	0,8	1
Wasser	Schnee	-10	T	0,85	2
Wolfram		200	T	0,05	1
Wolfram		600–1000	T	0,1–0,16	1
Wolfram		1500–2200	T	0,24–0,31	1
Wolfram	Faden	3300	T	0,39	1
Ziegel	Aluminiumoxid	17	SW	0,68	5
Ziegel	Dinas-Siliziumoxid, Feuerfestprodukt	1000	T	0,66	1
Ziegel	Dinas-Siliziumoxid, glasiert, rau	1100	T	0,85	1
Ziegel	Dinas-Siliziumoxid, unglasiert, rau	1000	T	0,80	1
Ziegel	Feuerfestprodukt, Korund	1000	T	0,46	1
Ziegel	Feuerfestprodukt, Magnesit	1000–1300	T	0,38	1
Ziegel	Feuerfestprodukt, schwach strahlend	500–1000	T	0,65–0,75	1

Material	Spezifikation	Temperatur [°C]	Spektrum	Emissionsgrad	Referenz
Ziegel	Feuerfestprodukt, stark strahlend	500–1000	T	0,8–0,9	1
Ziegel	Feuerziegel	17	SW	0,68	5
Ziegel	glasiert	17	SW	0,94	5
Ziegel	Mauerwerk	35	SW	0,94	7
Ziegel	Mauerwerk, verputzt	20	T	0,94	1
Ziegel	normal	17	SW	0,86–0,81	5
Ziegel	rot, normal	20	T	0,93	2
Ziegel	rot, rauh	20	T	0,88–0,93	1
Ziegel	Schamotte	20	T	0,85	1
Ziegel	Schamotte	1000	T	0,75	1
Ziegel	Schamotte	1200	T	0,59	1
Ziegel	Silizium, 95 % SiO ₂	1230	T	0,66	1
Ziegel	Sillimanit, 33 % SiO ₂ , 64 % Al ₂ O ₃	1500	T	0,29	1
Ziegel	wasserfest	17	SW	0,87	5
Zink	Blech	50	T	0,20	1
Zink	Oxidiert bei 400 °C	400	T	0,11	1
Zink	Oxidierte Oberfläche	1000–1200	T	0,50–0,60	1

9 Symbole und Abkürzungen

9.1 Zeichen und Konstanten

α		Zeichen der Absorption bzw. des Absorptionsgrades
ε		Zeichen der Emission bzw. des Emissionsgrades
λ	m	Wellenlänge
ν	Hz (Hertz) = 1/s	Frequenz
ρ		Zeichen der Reflexion bzw. des Reflexionsgrades
T		Zeichen der Transmission bzw. des Transmissionsgrades
σ	$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} \frac{W}{m^2 K^4}$ $= 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$	Stefan-Boltzmann-Konstante (k_B Boltzmann-Konstante, h Planck-Konstante und c Lichtgeschwindigkeit)
ϑ	rad	Abstrahlwinkel
A	m ²	Fläche
A, B		Einsteinkoeffizienten
°C	°C (Celsius)	Temperatureinheit
c	$2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$	Mathematische oder Physikalische Konstante für die Lichtgeschwindigkeit
c_1	$c_1 = 2\pi \cdot h \cdot c^2$ $= 3,74 \cdot 10^{-16} Wm^2$	erste (planksche) Strahlungskonstante
c_2	$c_2 = \frac{h \cdot c}{k}$ $= 1,4388 \cdot 10^4 \mu m K$	zweite (planksche) Strahlungskonstante
eV	$1 eV = e \cdot 1V$ $\approx 1,602 \cdot 10^{-19} J$	Elektronenvolt (Das Elektronvolt ist definiert als die kinetische Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von 1 Volt gewinnt. Es ist somit gleich dem Produkt aus der Elementarladung e und der Maßeinheit Volt (V).
E	J (Joule)	Formelzeichen der Energie
F		Spektraler Durchlassgrad optischer Systeme
h	$6,626 \cdot 10^{-34} Js$ $= 4,136 \cdot 10^{-15} eV s$	Plancksches Wirkungsquantum
I		Strahlendichte
K	K (Kelvin)	Physikalische Maßeinheit der Temperatur $0 K = -273,15 °C$
k	$1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$	Boltzmann Konstante
L		Spektrale Strahlungsdichte

M		Strahlungsmenge
M	<i>kg</i>	Formelzeichen der Masse
N		Mengenangabe
P	<i>W</i>	Abgestrahlte Leistung
Q		Verhältnis der spektralen Strahlendichten
R		Gesamtenergiedichte
T	<i>K</i> (Kelvin)	Abkürzung und Formelzeichen für Temperatur
W	<i>J</i> (Joule)	Energie

Tabelle 14 Zeichen und Konstante

9.2 Physikalische Vorsatzsilben

Abkürzung	Grösse	Beschreibung
T	10^{12}	Terra
G	10^9	Giga
M	10^6	Mega
k	10^3	Kilo
h	10^2	Hekto
da	10^1	Deka
d	10^{-1}	Dezi
c	10^{-2}	Zenti
m	10^{-3}	Milli
μ	10^{-6}	Mikro
n	10^{-9}	Nano
p	10^{-12}	Piko
f	10^{-15}	Femto
a	10^{-18}	Atto

Tabelle 15 Physikalische Vorsatzsilben

10 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Einteilung der Strahlung	11
Abbildung 2	Hohlraumstrahler	13
Abbildung 3	Schwarzer Strahler (links) und realer Körper (rechts)	14
Abbildung 4	Spezifische Ausstrahlung bei verschiedenen Emissionsgraden	15
Abbildung 5	Wärmerohröfen	16
Abbildung 6	Lambert-Strahler	17
Abbildung 7	Strahlungscharakteristik eines schwarzen Strahlers	18
Abbildung 8	Farbspektrum des sichtbaren Lichts	22
Abbildung 9	Prinzip des IR-Messsystems	26
Abbildung 10	Messfehler bei 10 % falsch eingestelltem Emissionsgrad	27
Abbildung 11	Transmissionsgrad von Polyäthylen	28
Abbildung 12	Transmissionsgrad von Polyester	28
Abbildung 13	Spektrale Eigenschaften von Glas	30
Abbildung 14	Transmissionsgrad einer 1 m langen Luftstrecke bei 32 °C und rel. Feuchte von 75 %	30
Abbildung 15	Umgebungstemperaturkompensation	31
Abbildung 16	Optik und Fenster	32
Abbildung 17	Der richtige Messfleck	33
Abbildung 18	Optische Auflösung	33
Abbildung 19	Transmission der optischen Materialien	35
Abbildung 20	Beispiele von Thermischen Detektoren	36
Abbildung 21	Schema – Mikrololometer	36
Abbildung 22	QWIP-Detektor	37
Abbildung 23	QWIP-Detektor mit ROIC-Schaltkreis	38
Abbildung 24	Messdatenerfassung	40
Abbildung 25	Prinzip des IR-Meßsystems	41
Abbildung 26	Objektive Messsysteme – Einteilung	42
Abbildung 27	Klassifizierung der Infrarotmesssysteme	42
Abbildung 28	Prinzip des Glühfadenpyrometers	43
Abbildung 29	Glühfadenpyrometer	44
Abbildung 30	Prinzip des Gesamtstrahlpyrometers mit Hohlspiegel	45
Abbildung 31	Gesamtstrahlpyrometer mit Linse	45
Abbildung 32	Bandstrahlpyrometer	46
Abbildung 33	Teilstrahlpyrometer	47
Abbildung 34	Quotientenpyrometer	48
Abbildung 35	Linienscanner	49
Abbildung 36	Linienscanner, rotierendes Messobjekt	50
Abbildung 37	Bilderzeugung durch mechanisches Abscannen	51
Abbildung 38	Thermografie mit Flächensensor (Focal-Plane Array)	51
Abbildung 39	Anwendungen in der Human- und Tiermedizin	52
Abbildung 40	Überwachung einer Schredderanlage	54

Abbildung 41	Ausrichtungsfehler	55
Abbildung 42	Lagererwärmung	55
Abbildung 43	Füllstandsüberprüfung	56
Abbildung 44	Leckageüberprüfung von Rohrleitungen	57
Abbildung 45	Beispiele – Gebäudethermografie	58
Abbildung 46	Anwendungen in der Elektrotechnik und Elektronik	59
Abbildung 47	Vergleichsmessung bei gleichen Betriebsbedingungen	60
Abbildung 48	Beispiele – automotiver Bereich	60
Abbildung 49	Beispiele – automotiver Bereich ff	61
Abbildung 50	Beispiele – Sicherheitstechnik	61
Abbildung 51	Infrarotwaffensystem	61

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zeichenerklärung	5
Tabelle 2	Einsatzgebiete der IR-Thermografie	6
Tabelle 3	Technische Einsatzgebiete der IR-Thermografie	7
Tabelle 4	Wellenlängen unterschiedlicher Strahlungen	12
Tabelle 5	Einteilung der Emissionsgrade	14
Tabelle 6	Typen von Wärmerohröfen	16
Tabelle 7	Spektrum des sichtbaren Lichtes	22
Tabelle 8	Größen der Lichtmessung	23
Tabelle 9	Empfohlene Wellenlängen in Abhängigkeit der Messaufgabe	29
Tabelle 10	Optische Materialien – Gegenüberstellung	34
Tabelle 11	Detektoren – Gegenüberstellung	39
Tabelle 12	Bandbreitenbegrenzung durch Halbleiterdetektoren	46
Tabelle 13	Vorbeugende Wartung	53
Tabelle 14	Zeichen und Konstante	76
Tabelle 15	Physikalische Vorsatzsilben	76

11 Index

A

absoluter Nullpunkt.....	12
Absoluter Nullpunkt	13, 19
Absorption	13, 23
Absorption α	13
Absorptionsvermögen	13
Abstrahlrichtung.....	16
Abstrahlspektrum.....	12
Abstrahlungseigenschaft	9
Aggregatzustand.....	10
Ammoniak	16
Anlagenausfall	53
Anlagenzuverlässigkeit.....	53
Atom	19, 21
Atomkern.....	19
Augen	22
Ausgangssignal	20
Ausrichttoleranz	54
Ausrichtung.....	54
Ausrichtungsfehler.....	54
Axiale Belastung.....	55

B

Bandbegrenzung.....	46
Bandbreite	45
Bandprozesse.....	8
Bandstrahlpyrometer	30, 46
Bauteilfunktion.....	52
Becquerel Henri.....	21
Behälterwand.....	56
Beleuchtungsstärke	23
Berührende Temperaturmessung.....	6
Berührungslose Temperaturmessung.....	6
Beschichtung.....	25
Beugungsgitter	22
Bildgebende Systeme.....	41
Blanke Metalle	15

Blaufilter	43
Bohrlöcher	57
Bohrung.....	25
Boltzmann	17, 18
Boltzmann Konstante.....	10
Boltzmann-Verteilung	17

C

Cäsium.....	16
-------------	----

D

Datenerfassung	52
Defekt	53
Dielektrika	15
Diffuse Oberfläche	17
Druckluft.....	56
Dualismus	11
Durchblutungsstörung	52
Durchmesser.....	25

E

Effektive Wellenlänge	20
Einstein	17
Einstein Koeffizient.....	18
Elektrische Kontakte	53
Elektrische Sicherungen	53
Elektrodynamik	12
elektromagnetische Strahlung	12
Elektromagnetische Strahlung	19, 22
Elektron	21
Elektronen	19, 21
Elementarteilchen.....	11
Emission	13
Emission ε	13
Emission ε	14
Emissionsgrad.....	14, 15, 24

Energie.....	11, 12, 13
Energiebereich.....	21
Energiekosten.....	59
Energiequantum.....	17

F

Farbe.....	22
Farbfilter.....	43
Farbstrahlpyrometer.....	47
Fehlerquelle.....	53
FEP.....	28
Fertigung.....	10
Flächensensor.....	51
Flip Chip Technik.....	38
Flüssigkeitsstand.....	56
Focal-Plane Array.....	51
Frequenz.....	21, 23
Frequenzbereich.....	24
Früherkennung.....	57
Füllstand.....	56
Füllstandskontrolle.....	53

G

Geräuschmessung.....	52
Gesamtstrahlpyrometer.....	44
Geschwindigkeit.....	10
Glühfadenpyrometer.....	43
Grafitspray.....	25
Grauer Körper.....	13, 14
Grünfilter.....	43
Gustav Kirchhoff.....	12

H

Halbleiterdetektoren.....	46
Heizschleifen.....	57
Hohlraumstrahler.....	16
Hohlraumstrahlung.....	13
Hohlspiegelausführung.....	44
Horizontaler Versatz.....	54
Horizontaler Winkelfehler.....	54

I

Immunsystem.....	21
Impuls.....	11
Indium Bumps.....	38
Industrieanlagen.....	57
Infrarot.....	23
Infrarotstrahlung.....	23
Instandhaltung.....	53
Ion.....	21
IR Thermometer.....	24
IR- Thermometer.....	25
IR-A.....	24
IR-B.....	24
IR-C.....	24
Isolatoren.....	15
Isolierte Behälter.....	56

K

Kalibrierungsfaktors.....	20
Kelvin.....	10
kinetische Energie.....	10
Kirchhoff.....	12, 13
Kirchhoffsches Strahlungsgesetz.....	13
klassische Physik.....	12
Kohärenz.....	23
Kondenswasserbildung.....	32
Kontaktthermometer.....	8, 24
Kosmische Hintergrundstrahlung.....	19
Kühler.....	53
Kunststoffkleber.....	25
Kupplung.....	53
Kupplungstoleranz.....	54
Kurzwelliges Infrarot.....	24

L

Ladung.....	11
Ladungsenergie.....	19
Lagerschaden.....	54
Lagerstellen.....	54
Lambert Gesetz.....	16
Langwelliges Infrarot.....	24

Laser	54
Lebensdauer	55
Leckortung	56
Level 1	53
Level 2	53
Level 3	53
Level 4	53
Licht	11, 22
Licht monochromatisch	22
Licht polychromatisch	22
Lichtdichte	23
Lichtmenge	23
Lichtstärke	23
Lichtstrom	23
Linsenoptik	44
Long Wave	24
Luftblasvorsatz	32
Lüftungswärme	57

M

Masse	10, 11
Materialprobe	24
Max Planck	12, 13, 17, 18
Medizintechnik	52
Mehrfachreflexion	15
Messentfernung	8
Messfenster	24
Messfleck	25
Messkopf	9
Messobjekt	6
Messwert	8
Metall	15
Microbridge	36
Mikrobolometer	36
mittlere effektive Wellenlänge	20
Molekül	21
Moleküle	10
Monochromatisches Licht	22

N

Naturkonstante	17
Nichtleiter	15

Nylon	28
-------------	----

O

Oberfläche	8, 15
Oberflächenbeschaffenheit	17
Oberflächenmessung	29
Oberflächentemperatur	9
Objektive Messsysteme	41
Optik	23
Oxidschicht	15

P

Photometrie	22
Photonen	11, 21, 23
Physik	11
Pigmentierung	28
Planck	12, 13, 17, 18
Planck Kurve	18
Plancksches Strahlungsgesetz	13, 18
Plancksches Wirkungsquantum	17
Polarisation	23
Polyamid	28
Polyäthylen	28
Polychromatisches Licht	22
Polyester	28
Polypropylen	28
Polystyrol	28
Polyurethanl	28
Predictive Maintenance	52
Prisma	22
Produktivität	10
Punktmessende Systeme	41
Pyrometerlampe	43

Q

Qualitätskontrolle	10
Quantendetektoren	35
Quantenphysik	11
Quantentheorie	17
Quantum Well infrared Photon Detektor	37

Quotientenpyrometer	47
QWIP	37

R

Radiale Belastung	55
Radioaktive Strahlung	21
Radioastronomie	24
Radiowellen	24
Raumgitter	19
Rayleigh-Jeanssches Strahlungsgesetz	13
Reale Oberfläche	15
realer Körper	13
Reflexion ρ	14
Reparatur	53
Reproduzierbarkeit	64
Riemenschlupf	56
Riementemperatur	56
Riementrieb	53
Rohrnetz	56
Röntgenstrahlung	21
Rotfilter	43
Rundfunk	24
Ruß	13

S

Saugleitungen	56
Scannerspiegel	50
Schadensfälle.....	57
Schmelzen.....	10
Schmelzwärme	10
Schnelligkeit	8
Schwachstellenanalyse.....	58
Schwächungsfilter	43
Schwarzer Körper.....	12, 13, 14, 16
Schwarzer Strahler.....	12, 25
Schwingungsmessung	52
Selektive Strahler	14
Sensor.....	6
Service.....	53
Serviceplan.....	53
Short Wave.....	24
Sicherheitsrisiko	53

Sichtkegel	47
Spannungsabfall	36
Spektralbereich.....	64
Spektrale Strahlendichte.....	16, 19
Spektraler Durchlassgrad	19
Spektralfarbe.....	22
Spektralgebiet.....	12
Spektrum	13, 22
Sprinkler.....	56
statistische Physik.....	12
Staub	9
Stefan.....	18
Stefan Boltzmann Gesetz	18
Stefan- Boltzmann Konstante	19
Stirling Kühler	38
Strahldichte	6
Strahlenkrankheit.....	21
Strahlleistung	35
Strahlung	13
Strahlung	6, 11, 12, 13
Strahlung	19
Strahlung	21
Strahlung	23
Strahlungsdichte.....	16, 18
Strahlungsempfänger.....	12
Strahlungsenergie.....	14
Strahlungsgesetz.....	13, 18
Strahlungsmenge.....	19
Subbänder	37
Subjektive Messsysteme	41

T

Teflon	28
Teilchen	11, 23
Teilstrahlpymeter	46
Temperatur.....	10, 12, 13
Temperaturaufösung	64
Temperaturverteilung.....	56, 57
thermische Detektoren.....	35
Thermodynamisches Gleichgewicht.....	13
Thermogramm.....	57
Thermographie.....	23
Thermometrie.....	24, 52

Toleranz	54
Trägermedium	23
Transmission τ	14
Transmissionsverluste	30

U

Übertragungsstrecke	30
Ultraviolett	23
Umgebungstemperaturkompensation	41
Undichtheiten	56
Uran	21
Urknall	19

V

Verdampfen	10
Verdampfungswärme	10
Vergleichsmessung	25
Verhältnis	19
Verschleißzustand	56
Vertikaler Versatz	54
Vertikaler Winkelfehler	54
Vorbeugende Wartung	52

W

Wärmebilder	23
Wärmebrücke	57
Wärmeenergie	10
Wärmeleiter	8
Wärmerohröfen	15
Wärmestrahlung	24
Wärmetauscher	53
Wärmeunterschied	10
Wärmeverluststellen	57
Wartungsarbeit	56
Wartungsarbeiten	10, 53
Wartungsplan	53
Wartungszeitplan	53
Wasser	16
Wasserkühlzubehörteile	32
Wasserschäden	56

Welle	11, 23
Wellenlänge	12, 13, 21, 22, 23
Wellen-Teilchen Dualismus	11, 23
Wiensches Strahlungsgesetz	13
Wirkungsgrad	52
Wirtschaftlichkeit	52

Z

Zeilenkameras Systeme	41
Zustandsgröße	10

12 Literaturverzeichnis

- [1] Meschede D., Vogel H., „Gerthsen Physik“, 21. Auflage, Springer Verlag Berlin New York, 2002
- [2] „Technical Case Studies Level I“, Publ. No 1 560 108_C, Rev 0.9 E, Infrared Training Center, FLIR Systems AB, Stockholm 2003
- [3] „Neue Perspektiven durch berührungsfreie Temperaturmesstechnik, METINFO, Zeitschrift für Meteorologie 3/2003“, Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung, Lindenweg 50, CH-3003 Bern-Wabern, Schweiz, 2003
- [4] Ruprechter J., „Entwicklung und Kalibration eines Submikrosekunden-Pyrometers“, Diplomarbeit Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz, 2000
- [5] Cagran C., „Untersuchung des Emissionsverhaltens flüssiger Metalle mittels Photopolarimetrie und Mehrwellenlängenpyrometer“, Dissertation Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz, 2004
- [6] Röck M., „Untersuchung von Inhomogenitätsbereichen an Dämmen mit geophysikalischen Methoden“, Diplomarbeit Angewandte Geophysik Montanuniversität Leoben, 2003
- [7] Henning F., „Temperaturmessung“, 3. völlig neubearbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1977
- [8] Taubert D. R., „Radiometrische Messung thermodynamischer Temperaturen und Vergleich mit der Internationalen Temperaturskala (ITS-90) im Bereich von 419°C bis 660°C“, Dissertation Fakultät für Mathematik- und Naturwissenschaften der Technischen Universität Berlin, 2003

