

**Einführung in Theorie und Praxis  
der  
Infrarot-Thermografie**



## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Physikalische Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Prinzip der Infrarot-Strahlungstemperaturmessung .....</b>	<b>3</b>
1.1.1. Infrarotstrahlung im Elektromagnetischen Spektrum.....	3
1.1.2. Pyrometrisch/thermografische Messanordnung .....	4
<b>1.2. Strahlungsgesetze des Schwarzen Strahlers .....</b>	<b>5</b>
1.2.1. Modell des Schwarzen Strahlers .....	5
1.2.2. PLANCKsches Strahlungsgesetz .....	5
1.2.3. STEFAN-BOLTZMANNsches Gesetz .....	6
1.2.4. WIENsches Verschiebungsgesetz.....	6
<b>1.3. Besonderheiten realer Messanordnungen .....</b>	<b>7</b>
1.3.1. Einflüsse durch das Messgerät.....	7
1.3.2. Einflüsse durch die Messstrecke .....	7
1.3.3. Einflüsse durch das Messobjekt .....	8
<b>1.4. Pyrometrisch / thermografische Grundgleichung .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Messtechnische Betrachtung .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Fehlereinflüsse auf eine berührungslose Temperaturmessanordnung .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Quantitative Fehlerbetrachtung .....</b>	<b>16</b>
2.2.1. Temperaturkennlinie des Messgerätes.....	16
2.2.2. Emissionsbedingter Temperaturmessfehler .....	17
<b>2.3. Möglichkeiten zur Fehlerminimierung .....</b>	<b>19</b>
<b>3. Aufbau und Parameter von Thermografiegeräten .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Historische Entwicklung der Thermografietechnik.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Klassifizierung der Thermografiesysteme .....</b>	<b>22</b>
3.2.1. Thermografische Bildaufnahmeprinzipien .....	22
3.2.1.1. Pyroelektrisches Vidicon.....	22
3.2.1.2. Scanner-Kameras.....	23
3.2.1.3. Focal Plane Array - Kameras.....	24
3.2.2. Weitere Klassifikationskriterien.....	25
<b>3.3. Definition und Bewertung wichtiger Geräteparameter .....</b>	<b>26</b>
3.3.1. Spektraler Messbereich .....	26
3.3.2. Thermische Auflösung .....	26
3.3.3. Geometrische Auflösung .....	27
3.3.4. Bildaufnahmefrequenz.....	28
3.3.5. Detektorkühlung.....	28

<b>3.4. Das Thermografiesystem VARIOSCAN.....</b>	<b>29</b>
3.4.1. VARIOSCAN-Modellreihen .....	29
3.4.2. Aufbau und Parameter von VARIOSCAN .....	31
<b>3.5. Das Thermografiesystem VarioTHERM™ head .....</b>	<b>34</b>
<b>3.6. Die Thermografiesysteme VarioCAM™ und VarioCAM™ head.....</b>	<b>36</b>
3.6.1. Das Thermografiesystem VarioCAM™ .....	36
3.6.2. Das Thermografiesystem VarioCAM™ head.....	37
3.6.3. Optikausstattung von VarioCAM / VarioCAM head .....	37
<b>4. Einsatzmöglichkeiten der Infrarot-Thermografie .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1. Typische Anwendungsgebiete und Einsatzbeispiele .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2. Bauthermografie .....</b>	<b>40</b>
4.2.1. Besonderheiten der Gebäudethermografie.....	40
4.2.2. Bauthermografie - Aufdeckung der häufigsten Bauschäden .....	41
4.2.3. Bauthermografie - Ortung verdeckter Konstruktionselemente .....	42
4.2.4. Bauthermografie - Feuchtigkeitsschäden .....	43
<b>4.3. Besonderheiten bei der Leckageortung .....</b>	<b>44</b>
<b>4.4. Vorbeugende Instandhaltung an Industrie- und Elektroanlagen.....</b>	<b>46</b>
4.4.1. Vorteile der vorbeugenden Instandhaltung mit Thermografiesystemen .....	46
4.4.2. Besonderheiten der Thermografie bei der vorbeugenden Instandhaltung.....	47
<b>4.5. Zustandsorientierte Instandhaltung an Industrieanlagen .....</b>	<b>48</b>
<b>4.6. Thermografie an Kunststoffen.....</b>	<b>50</b>
4.6.1. Besonderheiten thermografischer Messungen an Kunststoffen .....	50
4.6.2. Anwendungsbeispiele in der Kunststoffindustrie .....	51
<b>5. Auswertung von Thermografieaufnahmen .....</b>	<b>53</b>
<b>5.1. Auswerte-, Speicherungs- und Dokumentationsmöglichkeiten .....</b>	<b>53</b>
5.1.1. Vor-Ort-Auswertung .....	53
5.1.2. Datenspeicherung, -transfer und -sicherung.....	56
<b>5.2. Softwarewerkzeuge zur PC-gestützten Thermografieauswertung .....</b>	<b>57</b>
5.2.1. Auswerteprinzip .....	57
5.2.2. Besonderheiten thermografischer Bilddaten .....	57
5.2.3. Thermografie-Softwarefamilie IRBIS®.....	58
5.2.4. Druck von Thermografieaufnahmen .....	60
<b>6. Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen .....</b>	<b>61</b>
<b>7. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>63</b>

## 1. Physikalische Grundlagen

### 1.1. Prinzip der Infrarot-Strahlungstemperaturmessung

Die Verfahren der Infrarot-Strahlungstemperaturmessung, als welche quantitative Infrarot-Thermografie und Pyrometrie auch bezeichnet werden, beruhen auf dem physikalischen Phänomen, dass Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes von 0 K (-273,15 °C) elektromagnetische Strahlung aussenden. Bestimmt man deren Intensität, ist man in der Lage, daraus die Temperatur des aussendenden Körpers berührungslos zu ermitteln.

#### 1.1.1. Infrarotstrahlung im Elektromagnetischen Spektrum

Infrarotstrahlung ist jener Teil des elektromagnetischen Spektrums, der sich an der langwelligen Seite des sichtbaren Spektrums an das rote Licht bei einer Wellenlänge von ca. 760 nm anschließt und sich bis zu ca. 1 mm Wellenlänge erstreckt.

##### Wellenlänge

##### Wellenart

1000 km  
100 km  
10 km  
1 km  
100 m  
10 m  
1 m  
10 cm  
1 cm  
1 mm  
100 µm  
10 µm  
1 µm  
100 nm  
10 nm  
1 nm  
0,1 nm  
0,01 nm  
0,001 nm  
0,000 1 nm  
0,000 01 nm

Tonfrequente Wechselströme
Rundfunkwellen
Mikrowellen
<b>Infrarotstrahlung</b>
sichtbares Licht
Ultraviolettstrahlung
Röntgenstrahlung
Gammastrahlung

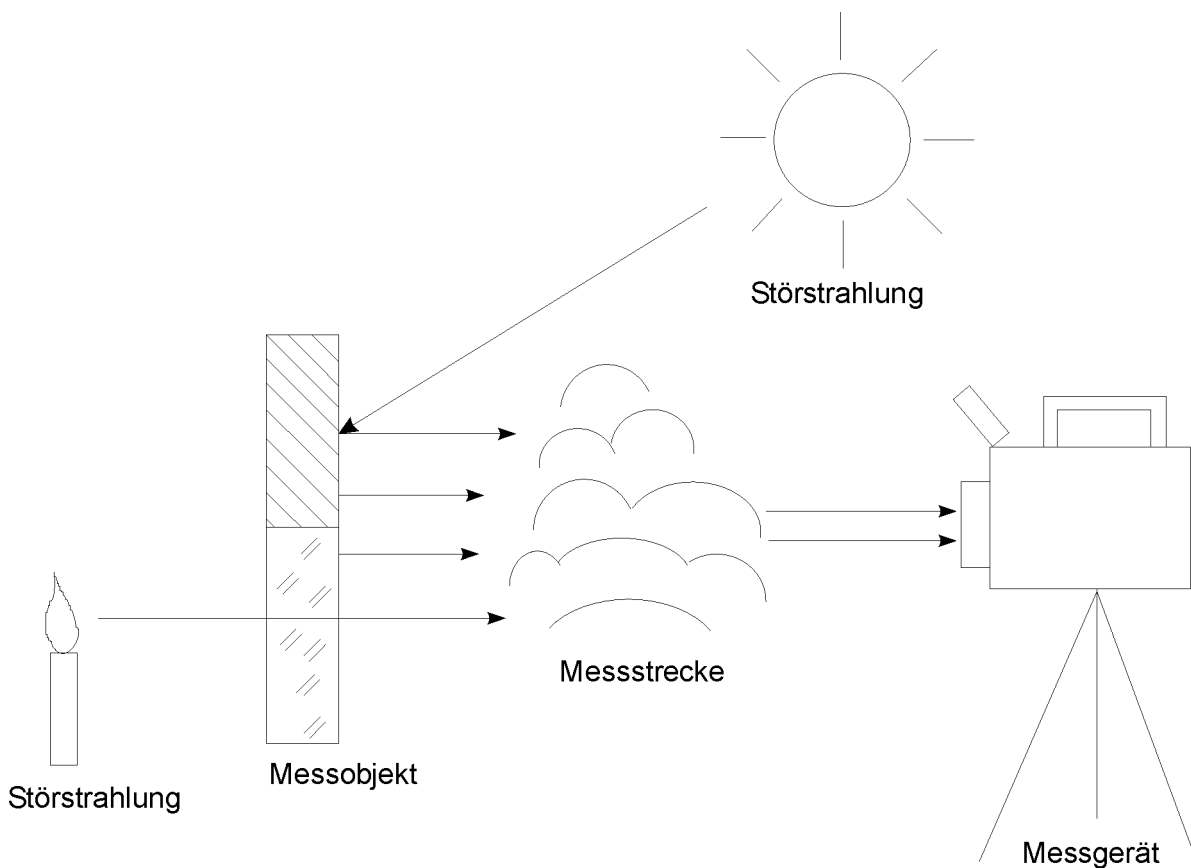
**Tab. 1:** Elektromagnetisches Spektrum

Für die technische Temperaturmessung von Bedeutung ist dabei der Bereich bis etwa 20µm Wellenlänge. Dieser lässt sich nochmals in folgende Abschnitte untergliedern:

Wellenlänge	Teilbereich des Infrarot
0,8 $\mu\text{m}$ ... 2 $\mu\text{m}$	nahes Infrarot
2 $\mu\text{m}$ ... 6 $\mu\text{m}$	mittleres Infrarot
6 $\mu\text{m}$ ... 20 $\mu\text{m}$	fern Infrarot

## 1.1.2. Pyrometrisch/thermografische Messanordnung

Bei der Pyrometrie bzw. der quantitativen Thermografie sind einige physikalisch bedingte Besonderheiten gegenüber berührenden Temperaturmessverfahren zu beachten. So handelt es sich um ein optisches Prüfverfahren, bei dem die Oberfläche des Messobjektes vom Messgerät aus sichtbar sein muss. Neben diesen beiden Elementen der Messanordnung spielen aber auch die Beschaffenheit der Messstrecke sowie das Vorhandensein von Störstrahlungsquellen im Vorder- und ggf. im Hintergrund des Messobjektes eine entscheidende Rolle.



**Abb. 1:** Pyrometrisch-thermografische Messanordnung

## 1.2. Strahlungsgesetze des Schwarzen Strahlers

### 1.2.1. Modell des Schwarzen Strahlers

Die in der Praxis vorkommenden Körper weisen sehr vielfältige Strahlungseigenschaften auf. So hat es sich bewährt, zunächst die vereinfachten Gesetzmäßigkeiten für einen Modellkörper mit idealen Strahlungseigenschaften zu betrachten, um sie dann auf die real vorkommenden Objekte anzuwenden. Dieser Modellkörper ist in der Strahlungsphysik der Schwarze Strahler. Er zeichnet sich dadurch aus, dass er von allen Körpern gleicher Temperatur die größtmögliche Intensität der ausgesandten Strahlung aufweist.

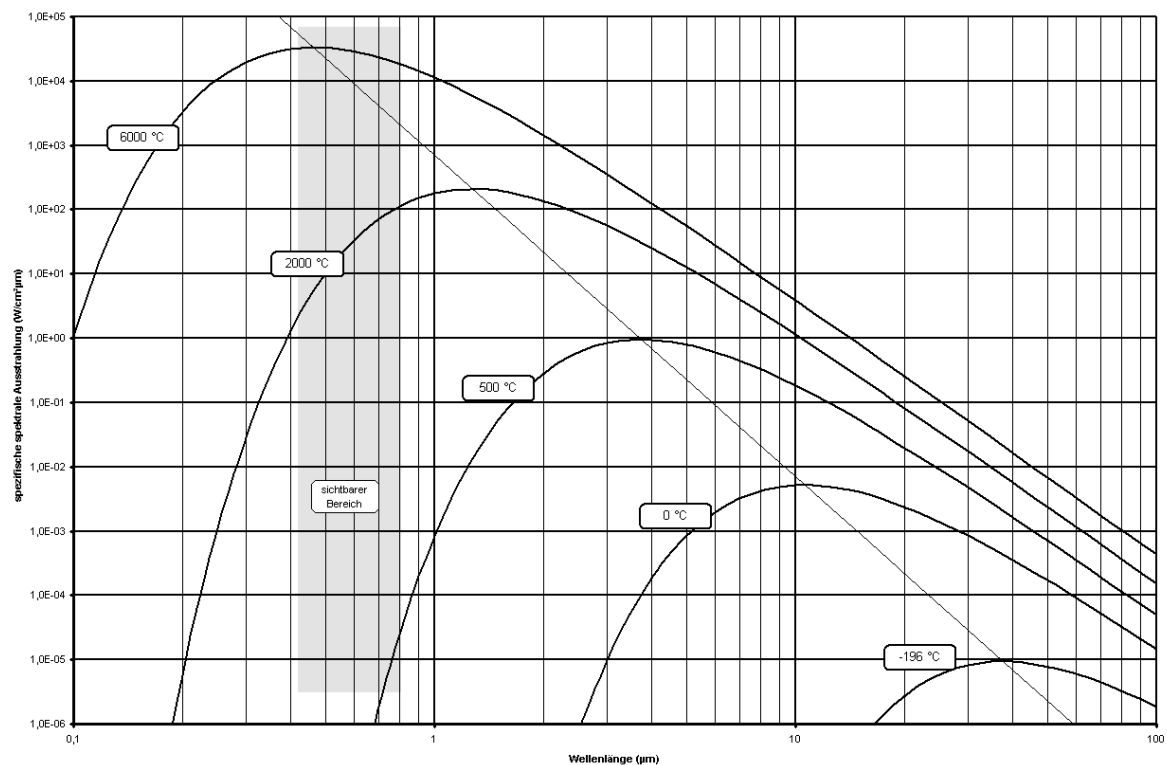
### 1.2.2. PLANCKsches Strahlungsgesetz

Die spektrale Verteilung der von einem Schwarzen Strahler ausgesandten Strahlung wird durch das PLANCKsche Strahlungsgesetz beschrieben:

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( \exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right)} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

$$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}$$



**Abb. 2:** PLANCKsches Strahlungsgesetz

Aus dieser Darstellung ist erkennbar, dass die spektrale Zusammensetzung der ausgesandten Strahlung mit der Objekttemperatur variiert. So senden beispielsweise Körper mit Temperaturen oberhalb von ca. 500 °C auch Strahlungsanteile im sichtbaren Bereich aus. Weiterhin ist festzustellen, dass bei jeder Wellenlänge die Strahlungsintensität bei steigender Temperatur zunimmt.

### 1.2.3. STEFAN-BOLTZMANNsches Gesetz

Das PLANCKsche Strahlungsgesetz stellt den grundlegendsten Zusammenhang für die berührungslose Temperaturmessung dar. Aufgrund seiner Abstraktion ist es jedoch für viele praktische Berechnungen in dieser Form nicht direkt anwendbar. Aus ihm lässt sich jedoch eine Vielzahl weiterer Zusammenhänge ableiten, von denen zwei im folgenden kurz benannt werden sollen. So erhält man durch Integration der spektralen Strahlungsintensität über alle Wellenlängen den Wert für die gesamte vom Körper ausgesandte Strahlung. Dieser Zusammenhang wird als STEFAN-BOLTZMANNsches Gesetz bezeichnet.

$$M = \sigma \cdot T^4 \qquad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \qquad (\text{Gl. 2})$$

Aufgrund des einfachen mathematischen Zusammenhanges eignet es sich sehr gut zu groben Abschätzungen insbesondere bei Berechnungen zum Wärmehaushalt von Objekten sowie für die Zusammenhänge bei Gesamtstrahlungsipyrometern. Der spektrale Messbereich der meisten Messgeräte ist jedoch üblicherweise stark begrenzt und somit diese Gleichung hierfür nicht anwendbar.

### 1.2.4. WIENsches Verschiebungsgesetz

Aus der grafischen Darstellung des PLANCKschen Strahlungsgesetzes wird ersichtlich, dass sich die Wellenlänge, bei der die ausgesandte Strahlung eines Schwarzen Strahlers ein Maximum aufweist, mit der Strahlertemperatur verschiebt. Das WIENsche Verschiebungsgesetz lässt sich durch Differenziation aus der PLANCKschen Gleichung ableiten.

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2896 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K} \qquad (\text{Gl. 3})$$

Je geringer die Temperatur des zu messenden Objektes ist, desto weiter verschiebt sich dessen Strahlungsmaximum zu größeren Wellenlängen. In der Nähe der Raumtemperatur liegt dieses etwa bei 10  $\mu\text{m}$ .

Körper	Temperatur	Strahlungsmaximum
Tiefkühlkost	-18 °C	11,4 $\mu\text{m}$
Haut	32 °C	9,5 $\mu\text{m}$
kochendes Wasser	100 °C	7,8 $\mu\text{m}$
Eisen, dunkelrotglühend	600 °C	3,3 $\mu\text{m}$
Eisen, hellglühend	1200 °C	2,0 $\mu\text{m}$

**Tab. 2:** Strahlungsmaximum in Abhängigkeit von der Temperatur

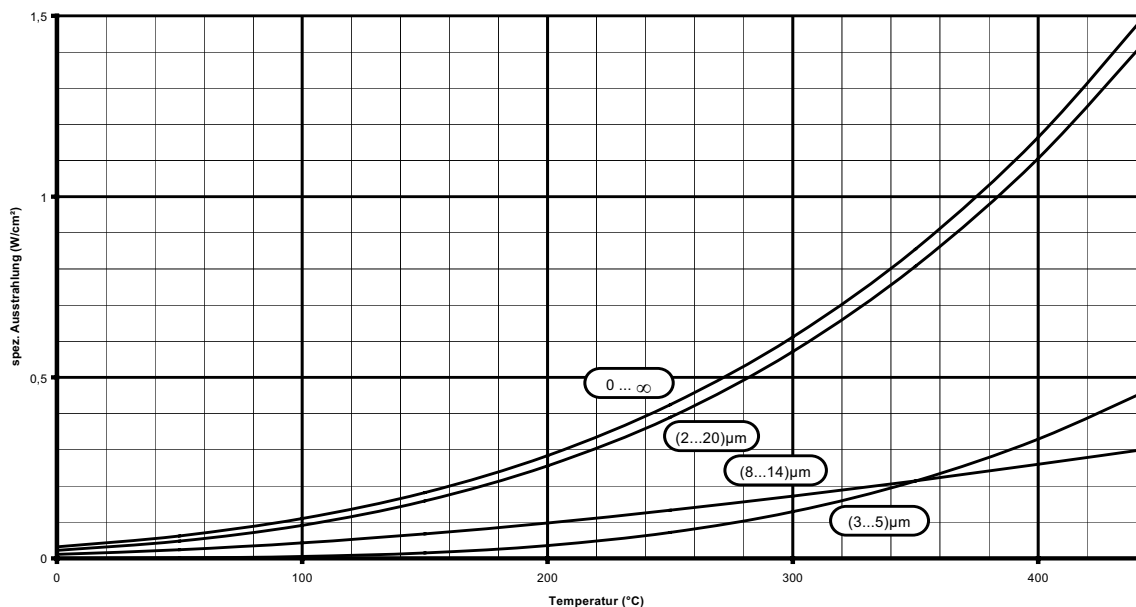


### 1.3. Besonderheiten realer Messanordnungen

Die bisher dargestellten Zusammenhänge gelten für das Modell des Schwarzen Strahlers als Messobjekt und beziehen die weiteren Bestandteile der thermografischen Messanordnung wie Messgerät, Messstrecke usw. noch nicht mit ein. Für die praktische Temperaturmessung sind diese jedoch nicht zu vernachlässigen.

#### 1.3.1. Einflüsse durch das Messgerät

Messgeräte für die berührungslose Temperaturmessung haben meist einen spektralen Messbereich, welcher von der Gesamtstrahlung, die das Messobjekt aussendet, nur einen Bruchteil erfasst. Im folgenden Diagramm ist dieser Zusammenhang für einige typische Spektralbereiche dargestellt.

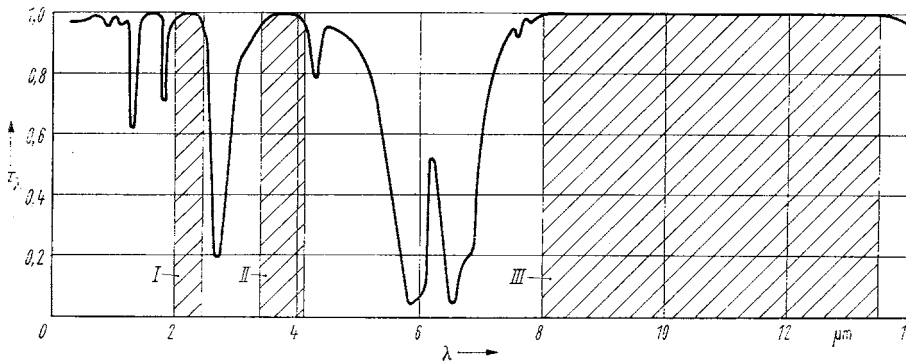


**Abb. 3:** Strahlungs-Temperatur-Kennlinien für verschiedene Spektralbereiche

Bei Temperaturen über ca. 350 °C ist bei einem Schwarzen Strahler die im Spektralbereich (3...5) µm zur Verfügung stehende Strahlungsintensität höher als im Spektralbereich (8...14) µm.

#### 1.3.2. Einflüsse durch die Messstrecke

Da die Infrarot-Thermografie ein berührungsloses Verfahren ist, muss die Infrarotstrahlung auf dem Weg vom Messobjekt zum Messgerät eine mehr oder weniger lange Strecke durch ein Medium zurücklegen, dessen infrarotoptische Eigenschaften das Messergebnis beeinflussen können. In den meisten Fällen wird dies Luft sein, aber auch andere Materialien wie z.B. infrarotdurchlässige „Fenster“ kommen in der Praxis vor. Bei der Luft sind es insbesondere deren Bestandteile Wasserdampf und Kohlendioxid, welche die Durchlässigkeit für Infrarotstrahlung beeinflussen können.



**Abb. 4:** Spektraler Transmissionsgrad von Luft (10 m, 25 °C, 1013 mbar, 85 % r.F.)

Die Durchlässigkeit (Transmission) der Luft ist sehr stark wellenlängenabhängig. Bereiche mit hoher Dämpfung wechseln sich mit Bereichen hoher Durchlässigkeit (schraffiert), den sogenannten „atmosphärischen Fenstern“ ab. Während im Bereich (8...14)  $\mu\text{m}$ , dem langwelligen atmosphärischen Fenster, die Durchlässigkeit auch über große Entfernungen gleichmäßig hoch ist, treten im Bereich (3...5)  $\mu\text{m}$ , dem kurzwelligen atmosphärischen Fenster, bereits bei Messentfernungen von einigen zehn Metern messbare Abschwächungen durch die Atmosphäre auf.

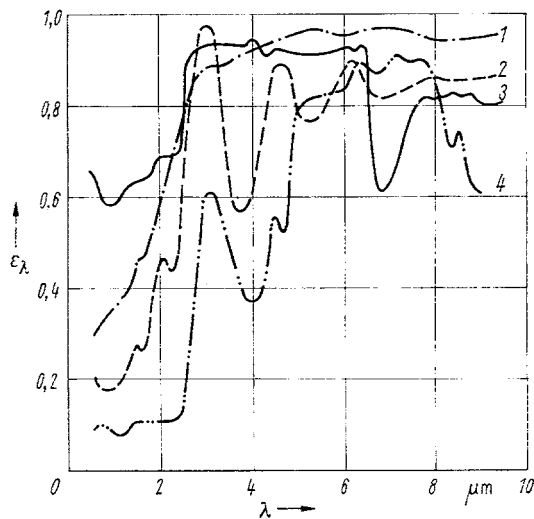
### 1.3.3. Einflüsse durch das Messobjekt

Der Schwarze Strahler als strahlungsphysikalisches Modell ist für die Betrachtung der grundlegenden Zusammenhänge unerlässlich. Da praktische Messobjekte jedoch mehr oder minder stark von diesem Modell abweichen, ist es ggf. notwendig, diesen Einfluss bei der Messung zu berücksichtigen. Hierfür eignet sich der Parameter des Emissionsgrades, welcher ein Maß für das Vermögen des Körpers ist, Infrarotstrahlung auszusenden. Der Schwarze Strahler besitzt mit dem Wert 1 den größtmöglichen Emissionsgrad, welcher zudem unabhängig von der Wellenlänge ist.

Im Gegensatz dazu kann der Emissionsgrad realer Messobjekte eine mehr oder minder starke Abhängigkeit von der Wellenlänge aufweisen. Zudem ist ein Einfluss folgender Parameter möglich:

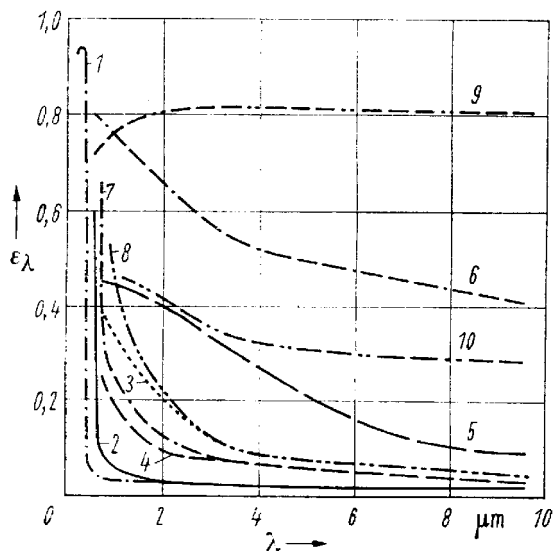
- Materialzusammensetzung
- Schichten auf der Oberfläche
- Rautiefe der Oberfläche
- Betrachtungswinkel zur Flächennormalen
- Temperatur
- Polarisationsgrad

Eine Vielzahl nichtmetallischer Stoffe weist - zumindest im langwelligen Spektralbereich - unabhängig von ihrer Oberflächenbeschaffenheit einen hohen und relativ konstanten Emissionsgrad auf. Hierzu gehören die menschliche Haut ebenso wie die meisten mineralischen Bau- und Anstrichstoffe.



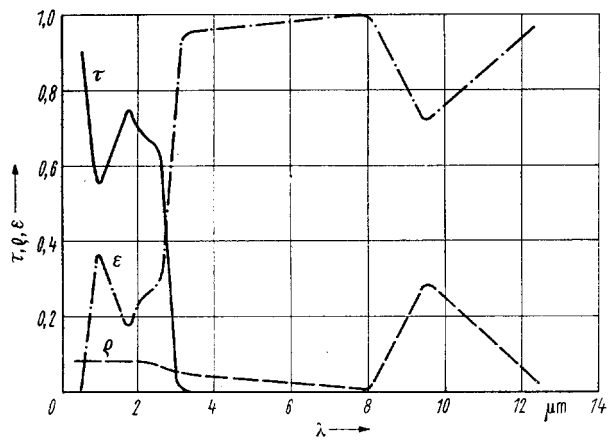
**Abb. 5:** Spektraler Emissionsgrad einiger Nichtmetalle  
(1 Emaille, 2 Gips, 3 Beton, 4 Schamotte)

Demgegenüber haben Metalle in der Regel einen niedrigen, stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängigen und zu größeren Wellenlängen hin abfallenden Emissionsgrad.



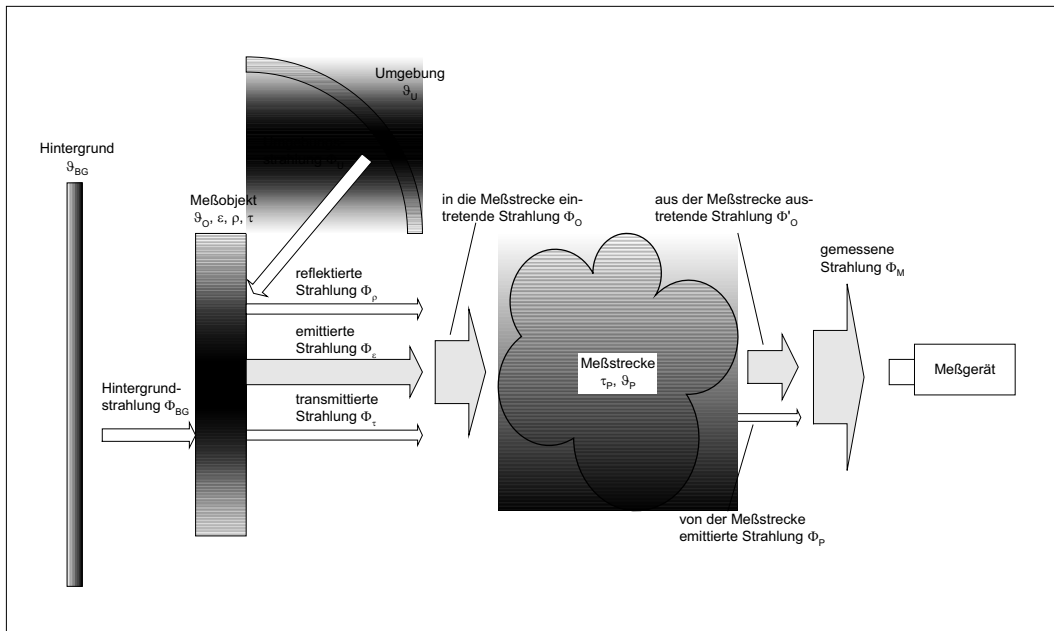
**Abb. 6:** Spektraler Emissionsgrad von Metallen und anderen reinen Stoffen  
(1 Silber, 2 Gold, 3 Platin, 4 Rhodium, 5 Chrom, 6 Graphit, 7 Tantal, 8 Molybdän, 9 Selen, 10 Antimon)

Glas ist ein relativ häufig in der messtechnischen Praxis vorkommender Werkstoff. Dieses Material ist für Infrarotstrahlung im kurzwelligen wie langwelligen Spektralbereich undurchlässig, so dass Messungen durch Fensterglas hindurch nicht möglich sind. Während sich Glas im kurzwelligen Spektralbereich nahezu wie ein Schwarzer Strahler verhält, beträgt sein Emissionsgrad im langwelligen Spektralbereich nur ca. 85 %.



**Abb. 7:** Spektraler Emissions-, Transmissions- und Reflexionsgrad von Glas

## 1.4. Pyrometrisch / thermografische Grundgleichung



**Abb. 8:** Strahlungsanteile bei pyrometrischer bzw. thermografischer Temperaturmessung

Die von einem Messobjekt der Temperatur  $\Theta_O$  mit dem Emissionsgrad  $\epsilon$  selbst ausgesandte Strahlung  $\Phi_\epsilon$  berechnet sich zu:

$$\Phi_\epsilon = \epsilon \cdot \Phi(\Theta_O) \quad (\text{Gl. 4})$$

wobei  $\Phi(\Theta_O)$  die von einem Schwarzen Strahler gleicher Temperatur ausgesandte Strahlung beschreibt. Zusätzlich hierzu gehen von der Oberfläche des Messobjektes zwei weitere Strahlungsanteile

$$\Phi_\rho = \rho \cdot \Phi(\Theta_U) \quad \text{reflektierter Strahlungsanteil} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$\Phi_\tau = \tau \cdot \Phi(\Theta_{BG}) \quad \text{transmittierter Strahlungsanteil} \quad (\text{Gl. 6})$$

aus, welche sich mit diesem additiv zu jener Strahlungsintensität verknüpfen, die in die Messstrecke eintritt:

$$\Phi_O = \Phi_\epsilon + \Phi_\rho + \Phi_\tau \quad (\text{Gl. 7})$$

Im praktisch bedeutsamen Fall eines nichttransparenten Messobjektes ist  $\tau=0$  und die Gleichung

$$1 = \varepsilon + \rho + \tau \quad (\text{Gl. 8})$$

vereinfacht sich zu

$$1 = \varepsilon + \rho \quad (\text{Gl. 9})$$

und es ergibt sich damit folgende vereinfachte Zusammenfassung für die Intensität der aus dem Messobjekt austretenden Strahlung:

$$\Phi_O = \varepsilon \cdot \Phi(\vartheta_O) + (1 - \varepsilon) \cdot \Phi(\vartheta_U) \quad (\text{Gl. 10})$$

Diese wird beim Passieren der Messstrecke entsprechend des Maßes ihrer Durchlässigkeit abgeschwächt:

$$\Phi'_O = \tau_p \cdot \Phi_O \quad (\text{Gl. 11})$$

Zusätzlich zu der durch die Messstrecke hindurchgeleiteten Strahlung wird am Messgerät die von der Messstrecke selbst emittierte Strahlung registriert:

$$\Phi_M = \Phi'_O + \Phi_P \quad (\text{Gl. 12})$$

wobei dieser Anteil sich wie folgt berechnet:

$$\Phi_P = (1 - \tau_p) \cdot \Phi(\vartheta_p) \quad (\text{Gl. 13})$$

und man erhält:

$$\Phi_M = \tau_p \cdot \Phi_O + (1 - \tau_p) \cdot \Phi(\vartheta_p) \quad (\text{Gl. 14})$$

Setzt man schließlich den Wert für die aus dem Messobjekt austretende Strahlung in diese Gleichung ein, ergibt sich das üblicherweise in einem Thermografiegerät bzw. Pyrometer hinterlegte strahlungsphysikalische Modell:

$$\Phi_M = \tau_p \cdot (\varepsilon \cdot \Phi(\vartheta_O) + (1 - \varepsilon) \cdot \Phi(\vartheta_U)) + (1 - \tau_p) \cdot \Phi(\vartheta_p) \quad (\text{Gl. 15})$$

Nach der gesuchten Größe, der Objekttemperatur  $\vartheta_O$  umgestellt, ergibt sich daraus folgender während der Messung laufend vom Messgerät zu ermittelnde Term:

$$\vartheta_O = \Phi^{-1} \left( \frac{\frac{\Phi_M - (1 - \tau_P) \cdot \Phi(\vartheta_P)}{\tau_P} - (1 - \varepsilon) \cdot \Phi(\vartheta_U)}{\varepsilon} \right) \quad (\text{Gl. 16})$$

Dabei ist  $\Phi(\vartheta)$  die gerätespezifische, insbesondere durch den spektralen Messbereich bestimmte Temperaturkennlinie des Messgerätes (vgl. **Abb. 3**) sowie  $\Phi^{-1}$  deren Umkehrfunktion.

Es ist diesem mathematischen Zusammenhang zu entnehmen, dass neben der gemessenen Strahlungsintensität  $\Phi_M$  folgende weiteren Kenngrößen in die Berechnung der Objekttemperatur eingehen:

- $\varepsilon$  . . . Emissionsgrad des Messobjektes
- $\vartheta_U$  . . . Umgebungstemperatur
- $\tau_P$  . . . Transmissionsgrad der Messstrecke
- $\vartheta_P$  . . . Temperatur der Messstrecke

Für den häufig vorkommenden Fall von Messanordnungen mit geringer Distanz, innerhalb welcher keine nennenswerte Beeinflussung der Infrarotstrahlung durch Wechselwirkung mit dem durchstrahlten Messpfad auftritt, nimmt diese Gleichung folgende vereinfachte, insbesondere in der Pyrometrie übliche Form an:

$$\vartheta_O = \Phi^{-1} \left( \frac{\Phi_M - (1 - \varepsilon) \cdot \Phi(\vartheta_U)}{\varepsilon} \right) \quad (\text{Gl. 17})$$

Es zeigt sich, dass bei Emissionsgraden verschieden von 1 die Umgebungstemperatur in die messbare Strahlungsintensität eingeht und demzufolge auch bei der Korrektur des Emissionsgradeinflusses im Gerät berücksichtigt werden muss.

Anderenfalls, also für das Ideal des Schwarzen Strahlers, vereinfacht sich die Gleichung nochmals und besteht nunmehr nur noch aus der Umkehrfunktion der Temperaturkennlinie des Messgerätes. Die Umgebungstemperatur geht nicht mehr in die gemessene Temperatur ein:

$$\vartheta_O = \Phi^{-1}(\Phi_M) \quad (\text{Gl. 18})$$

## 2. Messtechnische Betrachtung

### 2.1. Fehlereinflüsse auf eine berührungslose Temperaturmessanordnung

Wie jedes Messgerät besitzt auch ein berührungsloses Temperaturmessgerät (Pyrometer, Thermografiekamera) einen bestimmten Basisfehler, dessen Wert allerdings im allgemeinen deutlich höher ist als jener von Berührungsthermometern. In diesem Parameter sind in der Regel folgende mögliche Fehlereinflüsse zusammengefasst:

- Verbleibender systematischer Fehler des Messwandlers nach der individuellen Gerätekalibration
- Nichtkompensierte Signal - Abweichungen bei Änderung der Messgerätetemperatur
- Quantisierungsfehler von Messwertdigitalisierung, -verarbeitung, -ausgabe bzw. -anzeige
- Alterungsbedingte Drift der Wandlerkenngrößen

Es ist jedoch zu beachten, dass darüber hinaus eine Reihe von zusätzlichen Messfehlern möglich sind, die bei berührenden Verfahren nicht auftreten. Als weitere mögliche Fehlerquellen sind unter anderem in Betracht zu ziehen:

#### **Fehleinstellung von Emissionsgrad und Umgebungstemperatur am Messgerät**

Die Fehleinstellung von Emissionsgrad und Umgebungstemperatur ist in der Messpraxis die bedeutendste Ursache für - zum Teil erhebliche – verfahrensbedingte Zusatzfehler. Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, kann das Messgerät nur dann die Objekttemperatur korrekt ermitteln, **wenn die Einstellung des Emissionsgrades am Messgerät mit den realen Eigenschaften des Messobjektes übereinstimmt**. Dies ist nur dann trivial, wenn es sich bei dem Messobjekt um einen Schwarzen Strahler mit dem Emissionsgrad  $\varepsilon=1,0$  handelt. Weicht die Einstellung des Emissionsgrades von diesem Wert ab, geht darüber hinaus die Umgebungstemperatur in die Messwertbildung ein und muss daher ebenso korrekt eingestellt werden. Als Umgebungstemperatur ist die mittlere Temperatur auf der Innenfläche des die Messobjektoberfläche umgebenden Halbraumes zu verstehen.

#### **Reflexion von Störstrahlungsquellen aus dem Vordergrund des Objektes**

Bei der bereits im Messgerät (oder ggf. nachträglich bei der softwaregestützten Auswertung) stattfindenden Korrektur des Emissionsgrades, die immer dann erforderlich ist, wenn sich das Messobjekt in seinen Infrarot-Strahlungseigenschaften signifikant vom Ideal des Schwarzen Strahlers unterscheidet, wird der Wert der Umgebungstemperatur zur Korrektur herangezogen. Dies ist immer dann problematisch, wenn die Temperatur der Umgebung inhomogen ist oder punktuelle Störstrahlungsquellen im Vordergrund des Objekts auftreten.



### **Signalverluste durch Strahlungsabschwächung auf der Messstrecke**

In der Regel besteht die Messstrecke aus üblicher Atmosphäre (vgl. Abb.4), von welcher Infrarotstrahlung in großen Bereichen des infraroten Spektrums (den sogenannten atmosphärischen Fenstern) auch über größere Distanzen nahezu unbeeinflusst bleibt. Anders stellt sich die Situation bei abweichenden Eigenschaften (z.B. Nebel, Aerosole, hohe Konzentrationen von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  oder anderer Gase) dar bzw. wenn die Messung durch infrarotdurchlässige Fenster z.B. in das Innere von Öfen oder Vakuumkammern erfolgt.

### **Transmission von Störstrahlungsquellen aus dem Hintergrund des Objektes**

Diese Fehlerart tritt nur im vergleichsweise seltenen Fall der Messung an teilweise transparenten Messobjekten auf. In einem solchen Fall (z.B. Messung an Folien, Gasen, teilweise infrarotdurchlässigen Materialien) ist der Hintergrund des Messobjektes ebenso zu betrachten wie der Vordergrund der Messanordnung bezüglich von Reflexionen. Dies kann insbesondere dann problematisch werden, wenn das Messobjekt während des technologisch erforderlichen Aufheizens durch eine direkt dahinter befindliche Strahlerbaugruppe zu messen ist.

## 2.2. Quantitative Fehlerbetrachtung

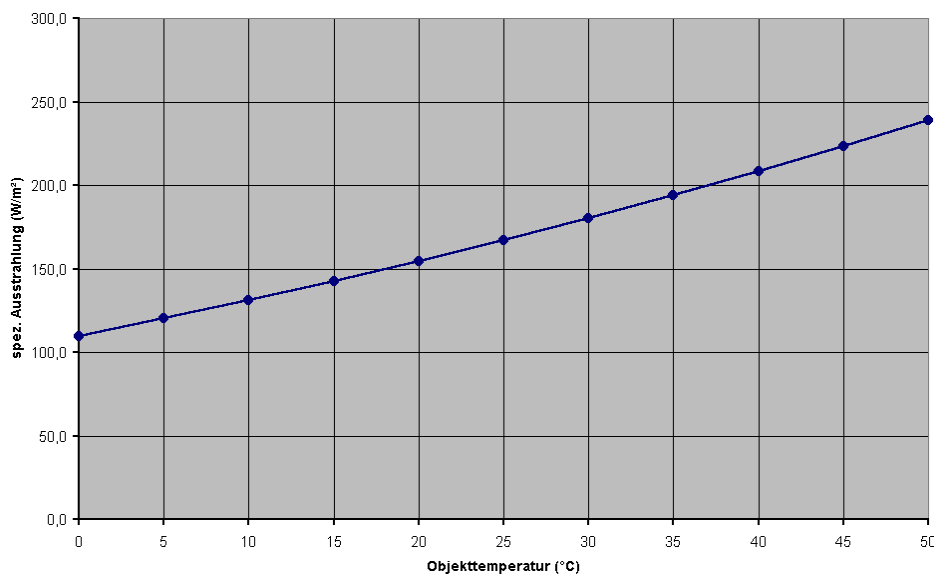
Ausgehend von Gl.17 ist es im Zuge einer numerischen Auswertung möglich, den aus einer Fehleinstellung des Emissionsgrades resultierenden maximalen Temperaturmessfehler rechnerisch zu ermitteln.

### 2.2.1. Temperaturkennlinie des Messgerätes

Dabei wird zunächst als Temperaturkennlinie für das Messgerät die in den Grenzen des Spektralbereiches (8...14)  $\mu\text{m}$  integrierte PLANCKsche Kurve zugrundegelegt. Im Gegensatz zur Gesamtstrahlungskennlinie (vgl. Gl.2) ist diese jedoch keine Potenzfunktion und soll daher zunächst als Wertetabelle und im Diagramm dargestellt werden:

T [°C]	M [W/m <sup>2</sup> ]
0	109,8
5	120,1
10	130,9
15	142,4
20	154,4
-25	167,0
30	180,2
35	194,0
40	208,4
45	223,5
50	239,1

**Tab. 3:** Spez. Ausstrahlung des Schwarzen Strahlers im Spektralbereich (8...14)  $\mu\text{m}$



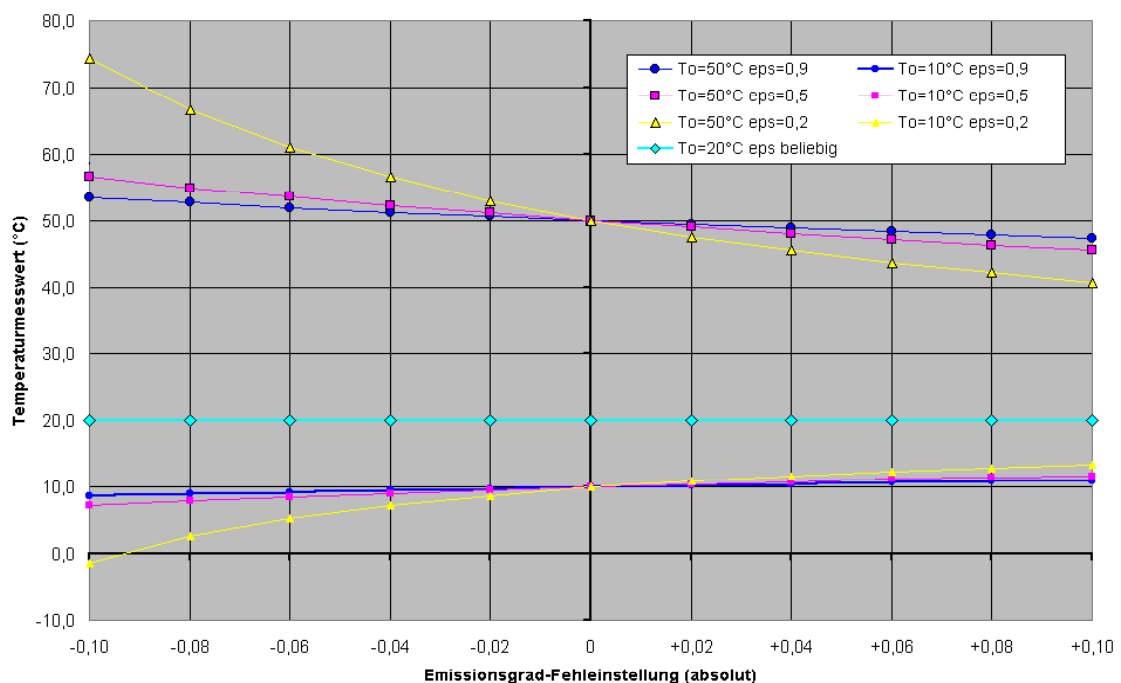
**Abb. 9:** Spez. Ausstrahlung des Schwarzen Strahlers im Spektralbereich (8...14)  $\mu\text{m}$

## 2.2.2. Emissionsbedingter Temperaturmessfehler

Darauf aufbauend lässt sich nunmehr jener Anteil am gesamten Temperaturmessfehler berechnen, der dadurch entsteht, dass für den Emissionsgrad des Messobjektes dessen Einstellung am Messgerät nicht völlig mit dem realen Wert übereinstimmt.

Fehleinstellung Emissionsgrad eps	Temperaturmesswert (°C)						
	To=50°C eps=0,9	To=50°C eps=0,5	To=50°C eps=0,2	To=20°C eps belieb.	To=10°C eps=0,9	To=10°C eps=0,5	To=10°C eps=0,2
-0,10	53,4	56,6	74,4	20,0	8,7	7,3	-1,3
-0,08	52,7	54,9	66,6	20,0	9,0	8,0	2,6
-0,06	51,9	53,6	61,0	20,0	9,2	8,5	5,3
-0,04	51,2	52,2	56,6	20,0	9,5	9,0	7,3
-0,02	50,7	51,2	52,9	20,0	9,7	9,5	8,7
0	50,0	50,0	50,0	20,0	10,0	10,0	10,0
+0,02	49,5	49,0	47,5	20,0	10,2	10,4	10,9
+0,04	48,8	48,0	45,6	20,0	10,4	10,7	11,7
+0,06	48,3	47,1	43,6	20,0	10,7	11,2	12,4
+0,08	47,8	46,3	42,2	20,0	10,9	11,4	12,9
+0,10	47,3	45,6	40,7	20,0	11,0	11,7	13,4

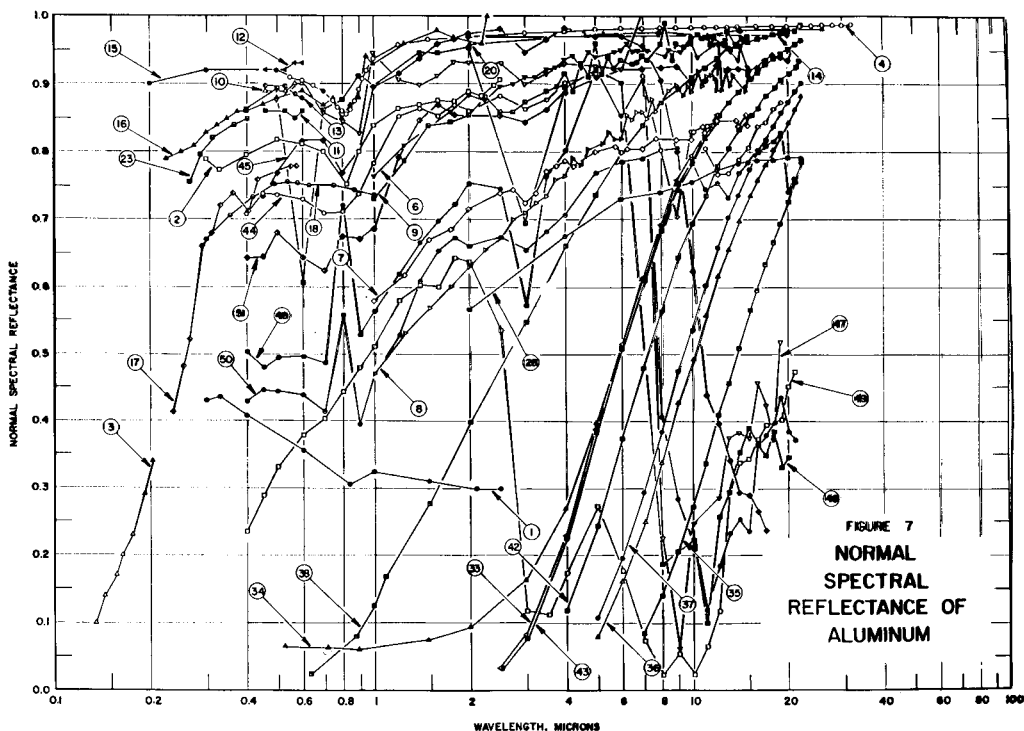
**Tab. 4:** Temperaturmessfehler durch Fehleinstellung des Emissionsgrades bei  $\lambda=(8...14)\mu\text{m}$  und 20°C Umgebungstemperatur



**Abb. 10:** Messfehler durch Fehleinstellung des Emissionsgrades [ $\lambda = (8...14)\mu\text{m}$ ,  $T_{\text{Umgebung}}=20^\circ\text{C}$ ]

Es zeigt sich, dass dieser Fehler um so größer ist, je weiter die Objekttemperatur von der Umgebungstemperatur abweicht. Außerdem ist erkennbar, dass insbesondere bei geringen Emissionsgraden der Fehlereinfluss schnell solche Größenordnungen annehmen kann, die den Grundfehler des Messgerätes um ein Vielfaches übersteigen.

Dass die Einstellung des richtigen Emissionsgrades problematisch sein kann, wird aus der folgenden Darstellung ersichtlich:



**Abb. 11:** Spektraler Reflexionsgrad verschiedener Aluminiumproben /9/

In der Praxis ist es vor allem für die berührungslose Temperaturmessung an Metallen problematisch, deren Emissionseigenschaften aus der Literatur zu ermitteln. Meist ist es nahezu unmöglich, eine Literaturstelle zu finden, welche sich auf jene Bedingungen (Spektralbereich, Oberfläche, Korrosionszustand, ...) bezieht, die man selbst am Messobjekt vorfindet. In einem solchen Fall ist eine experimentelle Bestimmung der aussichtsreichste Ausweg.

## 2.3. Möglichkeiten zur Fehlerminimierung

Während Fehlereinflüsse durch reflektierte bzw. transmittierte Störstrahlungsquellen bei einer Thermografiemessung meist durch ihr optisches Erscheinungsbild (punkt- oder kreisförmige Objekte im Bild) leicht identifiziert und somit beseitigt werden können, ist dies bei einer pyrometrischen Messung, bei welcher die bildliche Darstellung der Strahlungsverteilung verfahrensbedingt fehlt, meist nicht so einfach möglich.

Um die Temperaturmessfehler möglichst gering zu halten, sollte man daher folgende Hinweise beachten, die der Unterdrückung von Temperaturmessfehlern dienen:

- Vor Beginn der Messung sollte die Messanordnung - insbesondere bei mobilen Messungen - stets auf Reflexionen von Störstrahlungsquellen überprüft werden. Bei Vorhandensein kann durch eine oder mehrere der folgenden Maßnahmen Abhilfe geschaffen werden:
  - Änderung des Messgerätestandortes und damit des Betrachtungswinkels
  - Änderung von Ort bzw. Neigung des Messobjektes (insbesondere bei Labormessungen)
  - Abschirmung von Störstrahlungsquellen mittels infrarot-undurchlässiger Materialien (Pappe, Schaumpolystyrol, Plexiglas, Metallplatten), im Extremfall völlige Einhausung mit Ausnahme einer Öffnung für das Objektiv des Messgerätes

### **Achtung !**

Neben offensichtlichen Störstrahlungsquellen wie **Glühlampen**, **Flammen** usw. können in Abhängigkeit von den Reflexionseigenschaften des Messobjektes sowie den Anforderungen an die Präzision der Messung auch heiße (bzw. kalte) **Maschinenteile** oder gar **Personen** als solche in Frage kommen.

- Weicht der Emissionsgrad des Messobjektes deutlich von jenem des Schwarzen Strahlers ab, muss dieser mit möglichst geringer Abweichung zur Realität am Messgerät eingestellt werden. Die Information über den einzustellenden Emissionsgrad kann dabei auf verschiedenen Wegen gewonnen werden:
  - Eigene experimentelle Bestimmung am realen Messobjekt oder einem charakteristischen Referenzobjekt mit vergleichbaren Infrarot-Strahlungseigenschaften
  - Nutzung von im eigenen Haus gewonnenen oder von Lieferanten übermittelten Angaben über das spezielle Material im typischen Zustand bei der Messung
  - Suche nach Literaturangaben über Emissionsgrade von Proben gleichen Materials wie des gesuchten mit möglichst vergleichbaren Oberflächeneigenschaften

**Achtung !**

Bei einer Einstellung des Emissionsgrades abweichend von 1,0 geht die eingestellte Umgebungstemperatur in den Temperaturmesswert mit ein. In diesem Fall muss darauf geachtet werden, dass entweder die automatische Einstellung gemäß Messgerätetemperatur aktiviert ist oder - falls dies zu ungenau wäre oder die technische Möglichkeit nicht existiert – die Umgebungstemperatur manuell eingestellt wird.

- Misst man im kurzwelligen Spektralbereich über Entfernungen ab ca. 10 Metern (kommt in der Regel allenfalls bei thermografischen Messungen vor), ist es wichtig, auch die Beeinflussung der Strahlungsintensität durch die begrenzte atmosphärische Transmission in die Korrektur einzubeziehen. Auch in diesem Fall ist es wieder wichtig, neben dem Transmissionswert selbst auch die Temperatur des Messpfades möglichst korrekt einzustellen (bzw. die evtl. dafür vorhandene Automatikfunktion - wie bei der Umgebungstemperatur - zu nutzen).
- Für eine korrekte Temperaturbestimmung ist es wichtig, dass die zu messenden Strukturen auf dem Objekt nicht kleiner als der Messpunkt (dem Abbild des Strahlungsempfängers in die Objektebene) sind. Anderenfalls geht die eigentliche Objekttemperatur nur mit dem den Messfleck ausfüllenden Anteil in das Messergebnis ein, während der verbleibende Rest durch die Strahlung des Hintergrundes aufgefüllt wird. Bei Thermografiekameras gilt dies sinngemäß für jeden einzelnen Bildpunkt des Infrarotbildes.

### 3. Aufbau und Parameter von Thermografiegeräten

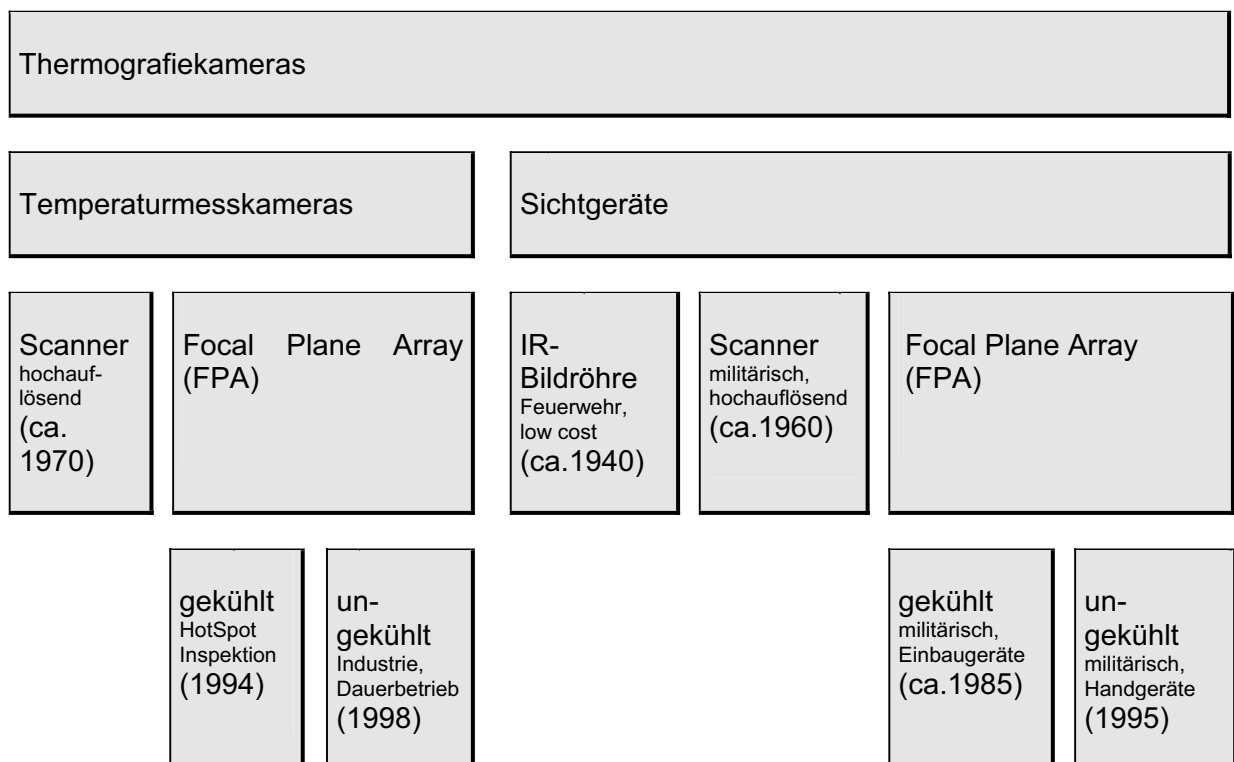
#### 3.1. Historische Entwicklung der Thermografietechnik

Bereits frühzeitig nach der Entdeckung der Infrarotstrahlung wurde erkannt, welche militärische Bedeutung den bildgebenden Verfahren zu deren Erfassung zukommt. So wurde die militärische Infrarot-Aufklärung (**f**orward **l**ooking **i**nfrar**e**d - FLIR) zur entscheidenden Triebkraft der Entwicklung der Infrarot-Thermografie.

1939 wurde in den USA mit der Entwicklung der Infrarotsichtgeräte „Sniperscope“ und „Snooperscope“ das Startsignal für eine bis heute andauernde Serie technologischer Innovationen gegeben.

Erst mit einigem zeitlichen und technologischen Abstand zu den militärischen Infrarot-Sichtgeräten waren in den 60-er Jahren auch die ersten Thermografiemessgeräte für den nichtmilitärischen Bereich verfügbar. Im Gegensatz zu den Sichtgeräten stand hier von Anfang an die Forderung im Mittelpunkt, die Intensität der sichtbar gemachten Infrarot-Strahlung zu messen und daraus nach den von der Pyrometrie bekannten Verfahren innerhalb des Thermobildes berührungslos Temperaturen zu ermitteln.

Eine zeitliche Einordnung der Einführung verschiedener Detektortechnologien in die Thermografie-Kameratechnik ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:



**Tab. 5:** Thermografiekameras / IR-Detektoren

## 3.2. Klassifizierung der Thermografiesysteme

Kernstück eines Thermografiegerätes ist dessen Infrarot-Strahlungsdetektor, welcher die Aufgabe hat, die Bildinformation des Objektes in ein elektrisch auswertbares Signal zu wandeln. Die heute kommerziell angebotenen Thermografiemesskameras und Infrarotsichtgeräte basieren auf einem der nachfolgenden Bildaufnahmeprinzipien, wobei jedoch nicht jedes Prinzip für beide der üblichen Spektralbereiche, den kurzwelligen ( $3\ldots 5\mu\text{m}$ ) bzw. langwelligen ( $8\ldots 14\mu\text{m}$ ), verfügbar ist:

	kurzwellig	langwellig
Pyroelektrisches Vidicon	-	x
Scanner-Kameras	x	x
Focal Plane Array - Kameras mit gekühltem Detektorarray	x	-
Focal Plane Array - Kameras mit ungekühltem Detektorarray	-	x

**Tab. 6:** Bildaufnahmeprinzipien von Infrarot-Thermografiekameras

Allen Thermografiegeräten gemeinsam ist die Grundfunktion, ein Abbild der Wärmeverteilung des Objektes zu erzeugen und in einer für das menschliche Auge wahrnehmbaren Form darzustellen. Dennoch unterscheiden sich Thermografiesysteme hinsichtlich einer ganzen Reihe von Eigenschaften, so dass eine Strukturierung dieser Vielfalt sinnvoll erscheint.

### 3.2.1. Thermografische Bildaufnahmeprinzipien

Kernstück eines Thermografiegerätes ist dessen Infrarot-Strahlungsdetektor, welcher die Aufgabe hat, die Bildinformation des Objektes in ein elektrisch auswertbares Signal zu wandeln. Die heute verfügbaren Thermografiegeräte basieren auf einer der nachfolgend beschriebenen Bildaufnahmeprinzipien.

#### 3.2.1.1. Pyroelektrisches Vidicon

In der historischen Entwicklung der Thermografie waren Thermografiegeräte mit pyroelektrischem Vidicon, einer infrarotempfindlichen Bildaufnahmeröhre, bereits frühzeitig verfügbar. Ausgehend von den damals üblichen Fernsehaufnahmeröhren wurden diese mit infrarotempfindlichen Targetmaterialien wie z.B. Triglycinsulfat versehen. Zwar benötigen diese Geräte physikalisch bedingt keine Detektorkühlung, sind aber aufgrund ihrer unzureichenden Stabilität nur als Sichtgerät für Beobachtungszwecke, jedoch nicht für Temperaturmesszwecke einsetzbar. Diese Technik ist aus heutiger Sicht kaum noch entwicklungsfähig, wird aber aufgrund ihrer kleinen Abmessungen und ihres günstigen Preises z.B. in der Brandbekämpfung eingesetzt.

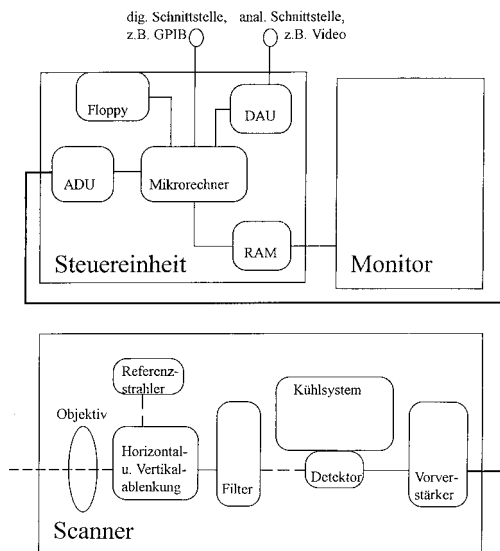




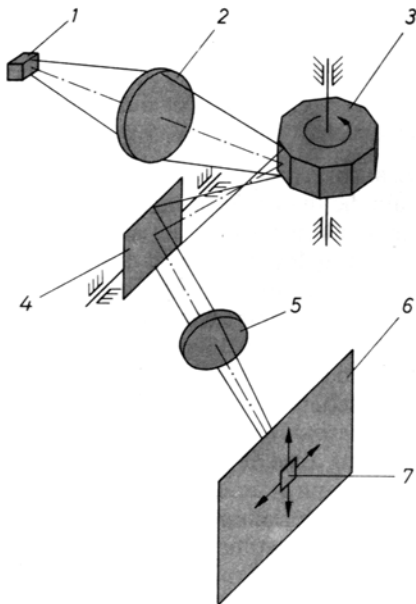
**Abb. 12:** IR-Aufnahme mit einem Sichtgerät mit pyroelektrischem Vidicon

### 3.2.1.2. Scanner-Kameras

Scanner-Kameras zeichnen sich dadurch aus, dass für die Wandlung der Infrarotstrahlung ein Einelementdetektor eingesetzt und das Messobjekt mittels eines mechanischen Ablensystems, dem sogenannten „Scanner“, abgerastert wird. Dieses Bildaufnahmeprinzip benötigt zwar zum einen Hochgeschwindigkeitsdetektoren und zum anderen präzisionsmechanische Baugruppen, bietet aber einen für die messtechnische Anwendung wichtigen Vorteil gegenüber allen anderen Verfahren. So wird die Signalwandlung jedes einzelnen Bildpunktes mit denselben Wandlerelement vorgenommen, so dass ein extrem guter Gleichlauf aller Bildpunkte durch die identischen Wandlerkennlinien gewährleistet wird.



**Abb. 13:** Blockschaltbild eines Thermografiegerätes nach dem Scannerprinzip



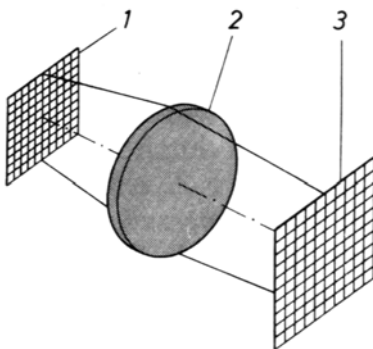
**Abb. 14:** Prinzipieller Strahlengang in einer Scannerkamera

(1 Detektor, 2+5 Objektiv, 3 Horizontalablenkspiegel, 4 Vertikalablenkspiegel, 6 Objekt, 7 Messfleck)

In diesem Beispiel für den Strahlengang innerhalb einer Scanner-Kamera ist die Horizontalablenkung mit einem rotierenden Spiegel, die Vertikalablenkung hingegen mit einem Kippspiegel realisiert. Auch andere Ausführungsformen wie z.B. rotierende Transmissionsprismen sind möglich.

### 3.2.1.3. Focal Plane Array - Kameras

In den letzten Jahren ist die zunehmende Verbreitung von FPA-Kameras in der Infrarot-Thermografie zu beobachten. Beim Einsatz dieses Detektortyps erübrigen sich mechanische Ablenkeinheiten, so dass der mechanische Kameraaufbau einfacher und kompakter wird.



**Abb. 15:** Prinzipieller Strahlengang in einer Focal Plane Array - Kamera

(1 Detektor, 2 Objektiv, 3 Objekt)

So verblüffend einfach sich der prinzipielle Aufbau des optischen Strahlenganges bei einer Focal Plane Array - Kamera darstellt, stecken doch die Probleme dieser modernen Technologie in den Details. So besteht das messtechnische Hauptproblem darin, dass jeder Bildpunkt von einem separaten Detektorelement gewandelt wird, dessen Wandlerkennlinie sich von jener seines Nachbarn zwar gering, aber messbar unterscheiden kann. Um diese Ungleichförmigkeit weitestgehend zu kompensieren, ist ein nicht unerheblicher Echtzeit-Bildverarbeitungsaufwand notwendig. Dies spiegelt sich insbesondere darin wider, dass Kameras mit Focal Plane Array – Detektoren zunächst ohne Temperaturmessfunktion angeboten wurden und es den Kameraherstellern erst später gelungen ist, diese Funktionalität – zuerst für einen Messpunkt in der Bildmitte, später für alle Bildpunkte – in die Gerätetechnik zu integrieren. Der weitaus größte Anteil an Kameras, die mit Focal Plane Array – Detektoren bestückt sind, arbeitet im kurzwelligen Spektralbereich, da für diesen sowohl besonders leistungsfähige (InSb, CdHgTe) als auch besonders kostengünstige (PtSi) Detektormaterialien verfügbar sind.

Für gekühlte Focal Plane Array – Detektoren dieser Technologie im langwelligen Spektralbereich kommt als Detektormaterial nur das vergleichsweise sehr teure und in diesem Zusammenhang auch nicht mit größeren Pixelzahlen verfügbare CdHgTe in Frage. Eine Alternative hierzu stellt die vergleichsweise jüngere „Quantum well“ - Detektortechnologie dar, mit welcher der Versuch unternommen wird, auch den langwelligen Spektralbereich für die thermisch und geometrisch höchstaflösende Thermografie zu erschließen.

In jedem Fall hat die Focal Plane Array - Technologie aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Anforderungen an das Zeitverhalten der Wandler die Möglichkeit eröffnet, neben den gekühlten auch ungekühlte Detektoren in Thermografiegeräten einzusetzen. Diese sind allerdings aus strahlungsphysikalischen Gründen nur als langwellige Gerätevarianten mit der erwarteten guten Temperaturlösung im Niedertemperaturbereich realisierbar.

### **3.2.2. Weitere Klassifikationskriterien**

Neben dieser Klassifikation bieten sich weitere davon unabhängige Einteilungen an, so z.B.:

- nach der Aufnahmewellenlänge (kurzwellig / langwellig)
- nach der Bildaufnahmefrequenz (Echtzeit / Slow Scan)
- nach dem Geräteaufbau (kompakt / mehrkomponentig)

### 3.3. Definition und Bewertung wichtiger Geräteparameter

Hat man die prinzipielle Eignung der Infrarot-Thermografie zur Lösung der eigenen Prüfaufgaben festgestellt und bereitet den Einsatz eines solchen Gerätes vor, wird man bei der Recherche auf eine Vielzahl technischer Parameter stoßen, deren Bewertung und Wichtung sich als nicht unkompliziert darstellen dürfte. Stellt der geplante Einsatzfall nicht gerade eine der "Standardapplikationen" dar, liefert sicher nur eine praktische Probemessung den letzten Beweis. Allerdings lassen sich bereits im Vorfeld eines solch aufwendigen Tests Überlegungen zu dessen Eignung anstellen, wenn man die angegebenen Parameter richtig zu bewerten weiß. Im Folgenden sollen einige wesentliche Geräteparameter vorgestellt und hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Anwender bewertet werden.

#### 3.3.1. Spektraler Messbereich

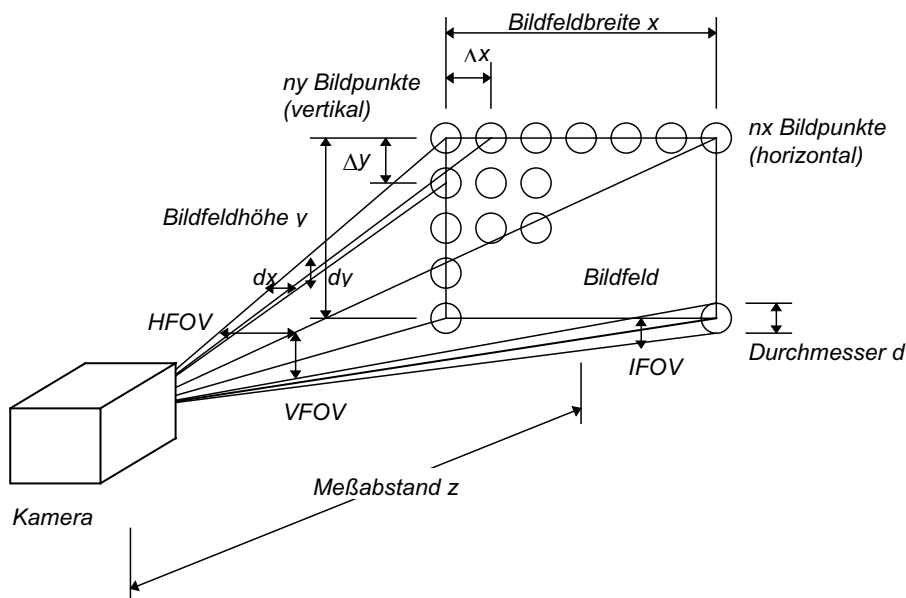
Der für die berührungslose Messung technisch relevanter Temperaturen geeignete Infrarotbereich beginnt bei ca.  $0,8\ \mu\text{m}$  und erstreckt sich bis etwa  $20\ \mu\text{m}$ . Während für die der Infrarot-Thermografie verwandte Pyrometrie eine Vielzahl von spektralen Messbereichen genutzt wird, beschränkt sich der für die Thermografie verwendete Teil des Infrarotspektrums im wesentlichen auf die Intervalle ( $3\text{ [2]} \dots 5\ \mu\text{m}$  bzw.  $(8 \dots 14\text{ [12]})\ \mu\text{m}$ ), das sogenannte kurzwellige und langwellige atmosphärische Fenster. Während die Atmosphäre im langwelligen Bereich eine nahezu unbeeinträchtigte Durchlässigkeit aufweist und dieser somit für Messungen im Freien und über große Entfernungen prädestiniert ist, sind Bestandteile der Atmosphäre wie Wasserdampf, Kohlendioxid bzw. Kohlenwasserstoffe in der Lage, Messungen im kurzwelligen atmosphärischen Fenster bereits bei Entfernungen im Bereich von einigen Metern deutlich zu beeinflussen. Was sich in diesem Fall als Nachteil präsentiert, hat allerdings auch einen positiven Effekt - so lassen sich mit einem kurzwelligen Thermografiegerät z.B. Temperaturen von Flammen bzw. Verbrennungsgasen ermitteln, während diese für ein langwelliges weitestgehend transparent sind. Möglicherweise soll mit Hilfe eines infrarotdurchlässigen Fensters von außerhalb in einem abgeschlossenen Raum gemessen werden. Auch hier zeigen verschiedene Materialien deutliche spektrale Unterschiede, die man beachten sollte. Nicht zuletzt ist es möglich, dass das spektrale Emissionsverhalten der zu erwartenden Messobjekte einen der beiden Bereiche gegenüber dem anderen deutlich begünstigt.

#### 3.3.2. Thermische Auflösung

In vielen Fällen - vor allem, wenn im Bereich der Raumtemperatur bis hinab zur unteren Temperaturmessbereichsgrenze gemessen werden soll - ist dieser Parameter entscheidend für die Bildqualität, da er ein Maß für den Rauschanteil im Infrarotbild ist. NETD steht für "Noise Equivalent Temperature Difference" (rauschäquivalente Temperaturdifferenz) und beschreibt die Änderung der Objekttemperatur, die dem Effektivwert des geräteeigenen Rauschens (meist angegeben bei  $30^\circ\text{C}$ ) entspricht. Bei anderen Temperaturangaben ist Vorsicht geboten, da insbesondere bei kurzwelligen Geräten die NETD bei Verringerung der Objekttemperatur deutlich ansteigt. Die "Rauschfreiheit" des Bildes für das Auge des Betrachters hängt zwar vom gewählten Temperaturbereich ab, aber als Richtwert kann gelten, dass ein NETD-Wert von  $1/100$  des darzustellenden Temperaturintervalls erreicht werden sollte, z.B.  $0,1\ \text{K}$  für ein in der Gebäudethermografie übliches Intervall von  $10\ \text{K}$ .

### 3.3.3. Geometrische Auflösung

Neben dem thermischen hat das geometrische Auflösungsvermögen erheblichen Einfluss auf die mit einem Thermografiegerät erzielbare Bildqualität. Der Parameter IFOV "Instantaneous Field of View" (augenblickliches Bildfeld) beschreibt jenen Raumwinkel, der von einem einzigen Bildpunkt erfasst wird. Um eine gute Wiedergabe von Details zu erreichen, muss dieser Wert möglichst klein sein. Beispielsweise besagt ein Wert von 1,5 mrad, dass bei 1 m Objektentfernung der jedem Pixel zugeordnete Einzelmessfleck einen Durchmesser von 1,5 mm aufweist. Es muss beachtet werden, dass dieser Wert abhängig ist von der verwendeten Optik, so dass vor einer Bewertung dieses Parameters überprüft werden muss, ob das zugrundeliegende Objektiv aufgrund seines Bildfeldes geeignet ist. Während einige Thermografiegeräte mit Wechselobjektiven angeboten werden, ist es bei anderen möglich, zusätzlich zu den fest eingebauten Objektiven Tele-, Weitwinkel- bzw. Makro-Vorsatzoptiken zu verwenden. Allen diesen Varianten gemeinsam ist die Bemühung, einen möglichst breiten Bereich für das erreichbare Bildfeld - "Horizontal Field of View" (HFOV) bzw. "Vertical Field of View" (VFOV) und den Bildabstand abzudecken. Darüber hinaus verfügen scannende Geräte meist über einen zusätzlichen geräteinternen elektrooptischen Zoom, der Bildvergrößerungen unter Beibehaltung der Einzelbildpunktgröße gestattet. Gegenüber den im lichteoptischen Bereich bereits von low-cost Videokameras erzielten Pixelzahlen von 300.000 (ca. 480 Zeilen mit je 640 Bildpunkten) nehmen sich die üblichen (60.000 ... 80.000) Bildpunkte von Thermografiegeräten recht bescheiden aus. Dieser Parameter hängt im übrigen sehr eng mit den beiden vorangegangenen zusammen, wobei zusätzlich der Füllfaktor eine Rolle spielt. Während dieser bei Geräten mit Detektorarrays den Wert 1 nicht überschreiten kann, ist dies bei scannenden Systemen möglich.



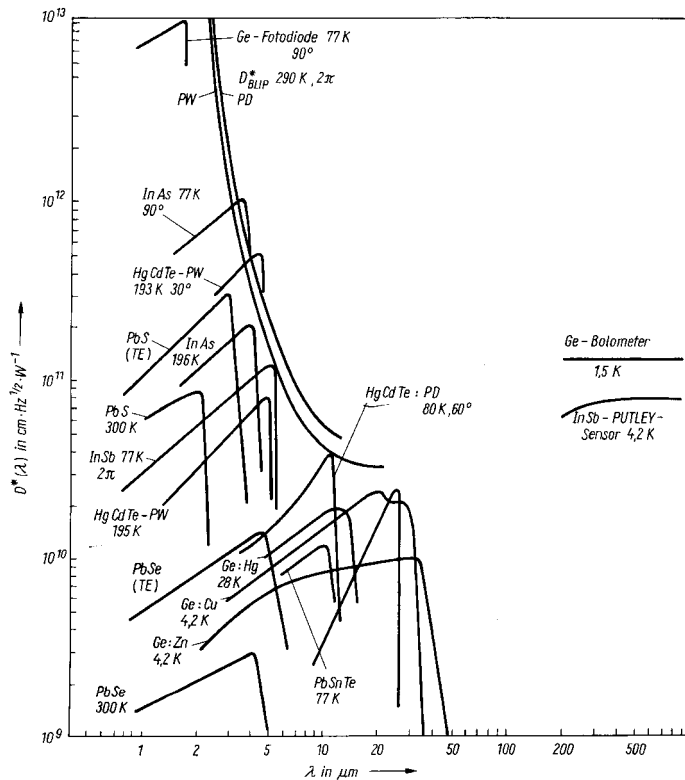
**Abb. 16:** Parameter der Bildfeldgeometrie

### 3.3.4. Bildaufnahmefrequenz

Die heute am Markt befindlichen Thermografiegeräte decken einen breiten Bereich der Bildaufnahmefrequenz ab - üblicherweise wird zwischen sogenannten "Slow Scan"-Geräten mit bis ca. 1 Hz und "Echtzeit"-Geräten ab ca. 20 Hz unterschieden, wobei auch Zwischenstufen bekannt sind. Dieser Parameter kann sich sehr deutlich auf den Preis auswirken, so dass man gut abwägen sollte, welche Bildaufnahmefrequenz maximal benötigt wird. Thermische Prozesse haben (mit wenigen Ausnahmen) meist große Zeitkonstanten und solange das Objekt unbewegt ist, genügt in vielen Fällen ein Bild je Sekunde.

### 3.3.5. Detektorkühlung

Während für reine Visualisierungsaufgaben ohne die Notwendigkeit einer Temperaturmessung heute bereits mehrere Geräte zur Verfügung stehen, deren Detektoren ohne Kühlung auskommen, werden in messenden Thermografiegeräten üblicherweise gekühlte Ein- bzw. Mehrelementdetektoren aus infrarotempfindlichen Halbleitermaterialien wie HgCdTe (MCT), InSb oder PtSi eingesetzt. Die kostengünstige Kühlung mittels flüssigem Stickstoff (LN<sub>2</sub>) bekommt zunehmende Konkurrenz durch die Fortschritte bei der Erhöhung der Zuverlässigkeit der Miniaturkältemaschinen (Stirling-Kühler). Diese erlauben den ansonsten nicht möglichen Betrieb in beliebiger Gebrauchslage und sind - da sie keine zusätzlichen Betriebsmittel benötigen - auch für den Dauerbetrieb geeignet. Für bestimmte Detektorarten ist als weitere Alternative die thermoelektrische Kühlung mittels Peltier-Element verfügbar, mit der jedoch nicht so tiefe Temperaturen erreicht werden.



**Abb. 17:** Detektivität (Nachweisvermögen) verschiedener Infrarotdetektoren

### 3.4. Das Thermografiesystem VARIOSCAN

#### 3.4.1. VARIOSCAN-Modellreihen

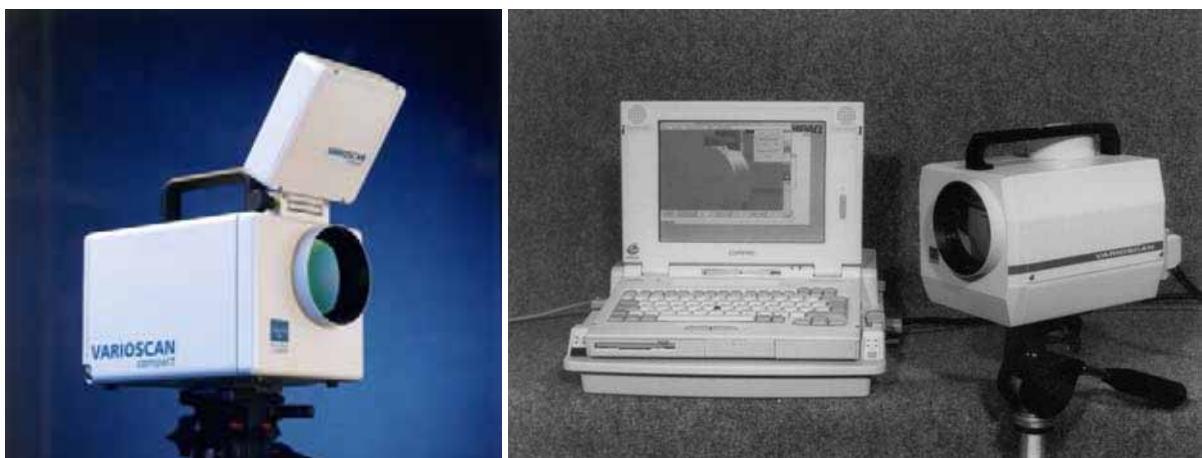
Beim Thermografiesystem VARIOSCAN handelt es sich um eine Familie von Thermografiegeräten mit Bildaufnahme nach dem Scannerprinzip. Allen gemeinsam ist der grundlegende optisch-mechanische Aufbau der Bildaufnahme, wesentliche Unterschiede existieren hinsichtlich der Signalverarbeitung, Bedienung, Anzeige und Speicherung.

Die Modellreihe **VARIOSCAN 1** zeichnet sich dadurch aus, dass die Funktionen Bildaufnahme und Bedienung jeweils innerhalb separater Gehäuse realisiert sind, so dass das Gerät zweiteilig ist. Die Bildspeicherung erfolgt mit einem im Controllerteil integrierten Diskettenlaufwerk. Mittels der ebenfalls darin untergebrachten Folientastatur wird das Gerät bedient, während die Thermobilder wahlweise in einem Sucher oder auf einem externen Monitor angezeigt werden. Es ist möglich, VARIOSCAN 1 alternativ zum Controller auch an einem PC über ein spezielles ISA-Board zu betreiben.

Bei **VARIOSCAN 2** werden die Funktionen des Controllers durch einen Notebook-PC mit einer speziellen Docking Station wahrgenommen. Bedienung, Thermobildanzeige und -speicherung erfolgen darauf, alternativ ist auch bei VARIOSCAN 2 der Betrieb an einem Desktop-PC möglich.

Bei **VARIOSCAN 3 compact** sind alle Gerätefunktionen in ein gemeinsames Gehäuse integriert, so dass sich dieses Kompaktgerät durch hohe Mobilität auszeichnet. Die Bildspeicherung erfolgt wahlweise intern bzw. auf PCMCIA-Speicherkarten.

Als Alternative steht mit **VARIOSCAN 3 PC** auch eine zweiteilige Gerätevariante zur Verfügung, bei welcher die Bedienung, Bildspeicherung und -anzeige auf einem Desktop- bzw. Notebook-PC realisiert werden.



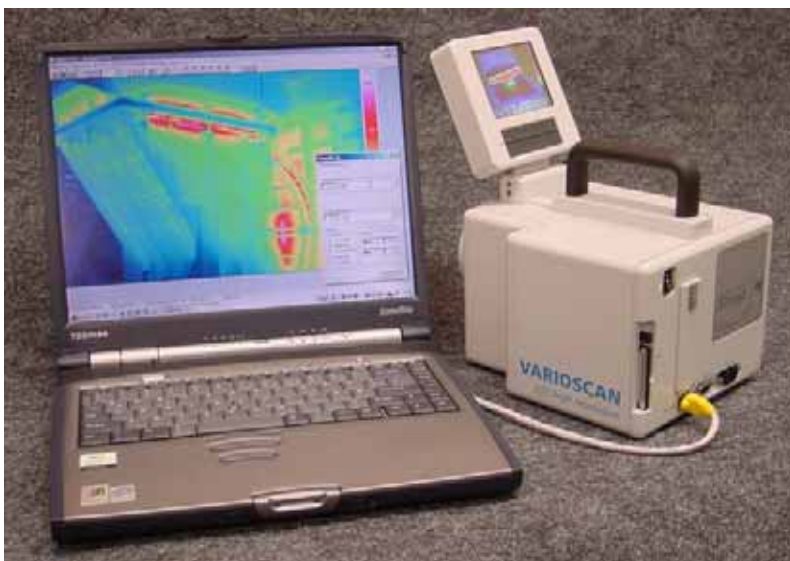
**Abb. 18:** VARIOSCAN 3 compact und VARIOSCAN 3 PC mit Notebook-PC



Die jüngsten Produkte der VARIOSCAN-Modellreihe sind die Systeme **VARIOSCAN high resolution**, die als Kompaktgeräte für den portablen stand-alone-Einsatz, als PC-gestützte Geräte, z.B. für Langzeitmessungen oder zur Prozessüberwachung, sowie als Universalgeräte mit einem nahezu unbegrenzten Einsatzspektrum angeboten werden. Sie zeichnen sich – aufbauend auf der Scanner-Technologie von VARIOSCAN 3 – durch eine auf über 80.000 Bildpunkte erhöhte Pixelzahl (240 Zeilen zu je 360 Pixeln), eine erweiterte Funktionalität im Bereich von Linescan- und Spotmessungen sowie eine Lithium-Ionen-Akkutechnologie aus. Die Ankopplung der PC-Versionen von VARIOSCAN high resolution an beliebige Windows-Rechner erfolgt über Ethernet. Dies ermöglicht neben der kompletten Steuerung des Systems, der frei konfigurierbaren Anzeige und der unbegrenzten Online-Speicherung der Thermografiebilder auch die Online-Anwendung von Funktionen, die üblicherweise erst in der Offline-Auswertung zum Tragen kommen.



**Abb. 19:** VARIOSCAN high resolution

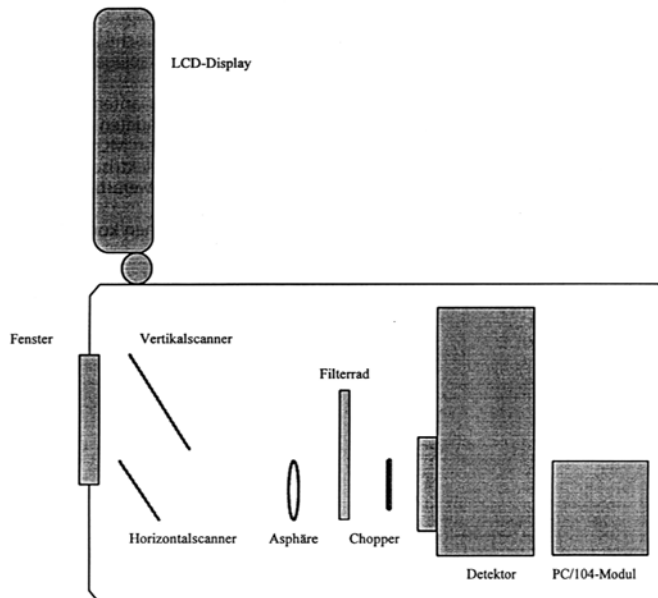


**Abb. 20:** VARIOSCAN high resolution mit Ethernet- Fernsteuerung durch Notebook-PC



### 3.4.2. Aufbau und Parameter von VARIOSCAN

Alle VARIOSCAN - Modellreihen bauen auf dem gleichen Scannermodul auf, so dass die nachfolgende Beschreibung mit minimalen Abweichungen für alle VARIOSCAN-Modelle gilt.



**Abb. 21:** Innenaufbau von VARIOSCAN 3 compact, schematisch

Das Messobjekt wird durch einen zweidimensionalen Spiegelscanner objektseitig abgetastet. Der Horizontalscanner realisiert die zeilenweise Abtastung, wobei mit einer Abtastfrequenz von 130 Hz jeweils 300 Pixel aufgenommen werden. Dieser Scanner arbeitet als Resonanzschwinger und wird von einem Gleichstrommotor angetrieben. Der Vertikalscanner baut aus den einzelnen Zeilen das komplette Bild innerhalb einer Zeit von 0,8 s auf. Wahlweise lässt sich auch eine verringerte Bildaufnahmezeit von 0,4 s bzw. 0,2 s realisieren. Wird nur eine Zeile gescannt, arbeitet VARIOSCAN compact als Zeilenkamera (Time-Trace-Modus). Die vom Scanner kommende Bildinformation wird durch die asphärische Abbildungsoptik auf einen MCT-Single-Element-Detektor fokussiert. Während das Modell mit thermoelektrischer Kühlung keinerlei Zusatzmedien benötigt, kann in der durch Flüssigstickstoff gekühlten Ausführung mit einer vollständigen Füllung des Metall-Dewars 10 Stunden lang ununterbrochen gearbeitet werden. Die Brennweite der Optik beträgt 35 mm, die Öffnung ist f:1. Zur Fokussierung auf unterschiedliche Objektentfernungen wird die Abbildungsoptik axial verschoben, wobei die mögliche Objektentfernung zwischen 0,3 m und unendlich liegt. Der VARIOSCAN - Scanner ist mit einem Filterrad bestückt, mit dessen Hilfe eine softwaregesteuerte Auswahl von Temperatur- bzw. spektralen Teilmessbereichen möglich ist. Nach jeweils einem aufgenommenen Bild wird ein Referenzstrahler (Chopper) in den Strahlengang eingebracht, dessen Temperatur durch ein Thermoelement gemessen wird. Durch Vergleich der Strahlungsintensitäten des Choppers und des Objektes ist eine Online-Temperaturmessung realisierbar. Das verwendete Prinzip der objektseitigen Abtastung ermöglicht eine elektrooptische Zoomfunktion. Dies erfolgt durch eine Änderung der Schwingungsamplituden der Scannerspiegel, wobei maximal ein 6-fach Zoom möglich ist. Das Detektorausgangssignal wird im Kamerakopf verstärkt und digitalisiert und zur Weiterverarbeitung an die Steuereinheit übertragen.

Typ	VARIOSCAN 3011	VARIOSCAN 3011 ST	VARIOSCAN 3012
Spektralbereich	8 ... 12 µm		2 ... 5 µm
Aufnahmeverfahren	Scansystem		
Detektormaterial	HgCdTe		
Detektorkühlung	Flüssigstickstoff	Stirling-Kühler	thermoelektrisch
Dewar-Haltezeit	ca. 10 h	-	
Bildfrequenz	1,2 (2,5 ; 5) Hz		
Temperaturauflösung @ 30°C	± 0,03 K		± 0,12 K
Temperaturmessbereich	-40 ... 1200°C *		-10 ... 1200°C *
Messgenauigkeit	< 2 K (Messbereich bis 100°C), sonst 1% d.E.		
geometrische Auflösung	1,5 mrad		3,0 mrad
Bildfeld mit Standardoptik	30° x 20° (ohne Zoom) bis 5° x 3,3° (mit max. Zoom)		
Bildformat	300 x 200 Pixel		
elektrooptischer Zoom	max. 6-fach, horizontal/vertikal auch getrennt		
Digitalzoom	2-fach ; 5-fach		
Digitalisierungstiefe	16 Bit		
min. Messentfernung	0,2 m		
Arbeitstemperatur	- 10 ... 40°C		
Lagertemperatur	-25 ... 70°C		

\* optional erweiterbar bis max. 2500°C

### VARIOSCAN 3 compact:

Leistungsaufnahme	10 W	13 W	12 W
Masse	5,0 kg	4,8 kg	4,6 kg
Abmessungen L x B x H	240 x 192 x 200 mm		
Display	11,5 cm Farb-LCD (TFT)		
Speichermedium intern	nichtflüchtiger RAM		
Speicherkapazität	ca. 25 Aufnahmen		
Speichermedium extern	Flash-Card 4 MB (optional 12 MB / 20 MB)		
Speicherkapazität	ca. 50 Aufnahmen (optional 150 / 250 Aufnahmen)		

### VARIOSCAN 3 PC:

Masse	3,5 kg	3,5 kg	3,2 kg
Abmessungen L x B x H	220 x 150 x 185 mm		
Speichermedium	PC – Festplatte		
Speicherkapazität	ca. 15.000 Aufnahmen je GB Festplatte		

**Tab. 7:** Geräteparameter VARIOSCAN 3

Typ	VARIOSCAN 3021	VARIOSCAN 3021 ST	VARIOSCAN 3022
Spektralbereich	8 ... 12 $\mu\text{m}$		2 ... 5 $\mu\text{m}$
Aufnahmeverfahren	Scansystem		
Detektormaterial	HgCdTe		
Detektorkühlung	Flüssigstickstoff	Stirling-Kühler	thermoelektrisch
Dewar-Haltezeit	ca. 10 h	-	
Bildfrequenz	1,1 Hz		
Temperaturauflösung @ 30°C	$\pm 0,03 \text{ K}$		$\pm 0,12 \text{ K}$
Temperaturmessbereich	-40 ... 1200°C *		-10 ... 1200°C *
Messgenauigkeit	< 2 K (Messbereich bis 100°C), sonst 1% d.E.		
geometrische Auflösung	1,5 mrad		3,0 mrad
Bildfeld mit Standardoptik	30° x 20° (ohne Zoom) bis 5° x 3,3° (mit max. Zoom)		
Bildformat	360 x 240 Pixel		
elektrooptischer Zoom	max. 6-fach, horizontal/vertikal auch getrennt		
Digitalzoom	2-fach ; 5-fach		
Digitalisierungstiefe	16 Bit		
min. Messentfernung	0,2 m		
Arbeitstemperatur	- 10 ... 40°C		
Lagertemperatur	-25 ... 70 °C		

\* optional erweiterbar bis max. 2500°C

**VARIOSCAN 302x high resolution universal:**

Masse	5,1 kg	5,0 kg	4,7 kg
Abmessungen L x B x H	240 x 192 x 200 mm		
Display	11,5 cm Farb-LCD (TFT)		
Speichermedium intern	nichtflüchtiger RAM		
Speicherkapazität	ca. 12 Aufnahmen		
Speichermedium extern	Flash-Card 10 MB (optional 32 MB / 64 MB)		
Speicherkapazität	ca. 58 Aufnahmen (optional 120 / 245 Aufnahmen)		
PC-Kopplung / Speichermedium	Ethernet (5m [Standard] bis 100m) / PC - Festplatte		
Speicherkapazität	ca. 6.000 Aufnahmen je GB Festplatte		
Akku – Betrieb (NiMH – Akku: 3,9 Ah)	>2 h	>2 h	>2 h

**VARIOSCAN 302x high resolution PC:**

Masse	3,9 kg	3,7 kg	3,5 kg
Abmessungen L x B x H	240 x 192 x 200 mm		
PC-Kopplung / Speichermedium	Ethernet (5m [Standard] bis 100m) / PC - Festplatte		
Speicherkapazität	ca. 6.000 Aufnahmen je GB Festplatte		
Akku – Betrieb (NiMH – Akku: 3,9 Ah)	>2 h	>2 h	>2 h

**Tab. 8:** Geräteparameter VARIOSCAN 302x high resolution

### 3.5. Das Thermografiesystem VarioTHERM™ head



**Abb. 22:** Thermografiesystem VarioTHERM™ head und VarioTHERM™ head universal

VarioTHERM™ head ist ein Thermografiesystem, das für vielfältige stationäre und portable Anwendungen (z. B. Prozessüberwachung, Qualitätssicherung und Produktentwicklung) geeignet ist. Das universelle Schnittstellenkonzept von VarioTHERM™ head verknüpft die Vorteile eines mobilen Thermografiesystems mit denen einer PC-gestützten Thermografie-Workstation. VarioTHERM™ head basiert auf einem bewährten leistungsstarken PtSi-FPA-Detektor mit 256 x 256 Pixeln, welcher 50 volle Infrarotbilder je Sekunde liefert und von einem robusten Langlebensdauer-Stirlingkühler gekühlt wird.

Durch Zusammenwirken von integrierter Optomechanik, spektraler Empfindlichkeit im Bereich (3,4 ... 5)  $\mu\text{m}$  und dem Schutzgrad IP54 erschließen sich eine Reihe von neuen industriellen Anwendungen z. B. in der Glas- und Kunststoffherstellung. Ein breites Spektrum von Spezialoptiken ermöglicht die flexible Anpassung von VarioTHERM™ head an die unterschiedlichsten Messaufgaben. VarioTHERM™ head kann in kunden- und anwendungsspezifischen Ausstattungsvarianten geliefert werden. Das Echtzeit-Digitalinterface gestattet in Verbindung mit der Software IRBIS® online die Steuerung und Datenaufzeichnung bei Echtzeitmessungen.

Die Version VarioTHERM™ head universal mit einer Bedien- und Anzeigeeinheit erlaubt die Nutzung einer Vielzahl von Online-Messfunktionen, die während des Gebrauchs der Kamera vor Ort sehr hilfreich sind und bereits von der Betriebssoftware der Kamera realisiert werden. Die Speicherung der Bilddaten für die Offline-Auswertung erfolgt über den integrierten PCMCIA-Typ-2-Slot auf Flash-Karten. Hier können bis zu mehrere Hundert, auf einer PCMCIA-Harddisk (1GB) bis zu mehrere Tausend Bilder gespeichert werden. Die 32-bit-Windows-PC-Auswertesoftware der IRBIS®-Familie ermöglicht die komfortable Auswertung der aufgezeichneten Bilder.

Die VarioTHERM™ head kann mit einer optionalen Anzeige- und Bedieneinheit aufgerüstet werden, um das Thermografiesystem auch für weitere Aufgaben im Industriebereich einsetzen zu können. Der Schutzgrad IP54 empfiehlt die VarioTHERM™ head für den Industrieinsatz auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen.

### Technische Spezifikation:

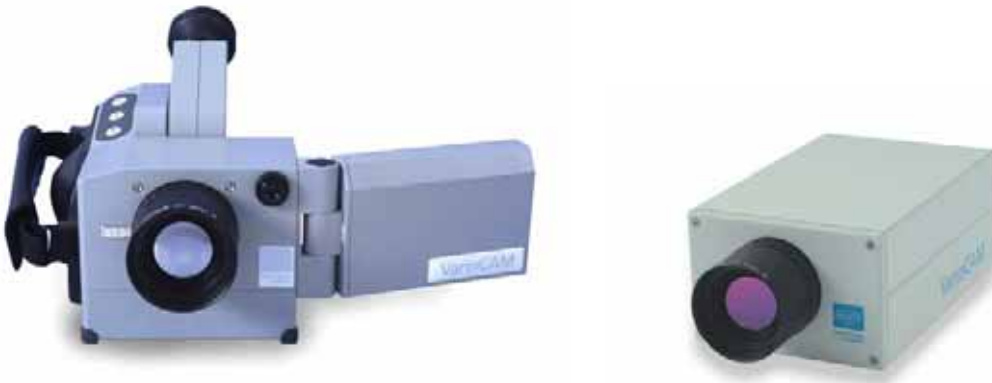
Spektralbereich	3,4 ... 5 µm
Aufnahmeverfahren	Focal Plane Array
Detektor	PtSi-CMOS-Hybrid
Detektorkühlung	Stirling-Kühler
Bildfrequenz	50 Hz
Temperaturauflösung @ 30°C	<0,1 K (0,01 K mit Akkumulation)
Temperaturmessbereich	-25 ... 1.200°C
geometrische Auflösung mit Standardoptik	1,0 mrad
Bildfeld mit Standardoptik	14° x 14°
Bildformat	256 x 256 Pixel
Digitalisierungstiefe	16 Bit
Arbeitstemperatur / Schutzgrad	-15 ... 50°C, IP54
Masse	ca. 4,2 kg
Display	Anzeige- und Bedieneinheit
Datenausgabe	PAL-FBAS, Y/C, digital Video (opt.)
Speichermedium	PC-Flash-Card, PC-HDD

### Bedienfunktionen (gilt für VarioTHERM™ head universal):

Darstellungsfunktionen	Zoomfunktion, Freeze-Modus, Farb- und SW-Paletten, Bildglättung, Galerie, Rücklesen gespeicherter Aufnahmen
Automatikfunktionen	Auto-Range, Auto-Level, Auto-Image
Temperaturmessfunktionen	Vermessung von Punkten und Flächen mit editierbarem Emissionswert, Isothermeneinblendung, automatischer Kalibrierbereichswechsel

**Tab. 9:** Geräteparameter und Bedienfunktionen von VarioTHERM™ head

### 3.6. Die Thermografiesysteme VarioCAM™ und VarioCAM™ head



**Abb. 23:** Thermografiesystem VarioCAM® und die Industrievariante VarioCAM® head

#### 3.6.1. Das Thermografiesystem VarioCAM®

VarioCAM® ist ein Thermografiesystem der neuesten Generation, das auf Basis eines ungekühlten Mikrobolometer-FPA-Detektors mit (320 x 240) Pixeln arbeitet. Die Neuentwicklung von JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH ist für den portablen Betrieb konzipiert und kann dabei leicht mit einer Hand bedient werden. Ein leuchtstarkes, sonnenlichttaugliches Farbdisplay gibt die Thermografiebilder mit äußerster Brillanz wieder und erlaubt einen hervorragenden Überblick über die aktuelle Messsituation sowie den Betriebszustand des Gerätes. Bei angeklapptem Display ist automatisch ein lichtstarker hochauflösender Farbsucher zugeschaltet, der über einen Dioptrienausgleich verfügt und alle o. g. Visualisierungsmöglichkeiten besitzt. Zahlreiche Automatikfunktionen unterstützen den Nutzer und erleichtern ihm die Konzentration auf den fachlichen Teil der thermografischen Messung.

VarioCAM® ist modular aufgebaut, bietet vielfältige integrierte Messfunktionen und wird in anwendungsspezifisch ausgestatteten Versionen angeboten. VarioCAM® ermöglicht die thermografische Temperaturmessung in verschiedensten industriellen Anwendungsfeldern, die von der vorbeugenden Instandhaltung an elektrischen Anlagen und mechanischen Baugruppen über die Prozesskontrolle bis hin zur Qualitätssicherung reichen.

Das System verfügt über einen weiten Standard-Temperaturmessbereich, verschiedene Zusatzoptiken und ein umfangreiches Zubehör, das auch verschiedene Softwarepakete für die Thermografieanalyse umfasst. Neueste Lithium-Ionen-Akku-Technologie und ein sehr niedriger Energieverbrauch sichern eine lange Einsatzdauer. Das optionale FireWire-Interface macht VarioCAM® zu einem hocheffizienten Werkzeug für thermografische Echtzeit-Analysen bei Aufgabenstellungen aus Forschung und Entwicklung.

#### Anwendungsgebiete:

- thermische Maschinendiagnose
- thermische Inspektion von Elektroanlagen
- Echtzeit-Thermografie in Forschung und Entwicklung
- Bau thermografie und Leckagesuche

### 3.6.2. Das Thermografiesystem VarioCAM<sup>®</sup> head

Das neuentwickelte, radiometrierte Thermografiesystem VarioCAM<sup>®</sup> head des deutschen Herstellers JENOPTIK AG basiert auf einem ungekühlten FPA-Mikrobolometer-Detektor mit (320 x 240) Pixeln und wurde für den universellen Einsatz konzipiert.

Mit dem kompakten industrietauglichen Metallgehäuse (IP65) der VarioCAM<sup>®</sup> head sind Installationen in Fertigungsprozessen problemlos und kostengünstig zu realisieren. Die unterschiedlichen Ausstattungsvarianten ermöglichen eine optimale Anpassung von VarioCAM<sup>®</sup> head an die Messaufgabe: Das Leistungsspektrum reicht von der über RS232 konfigurierbaren automatischen Schwellwelterkennung und -signalisierung bis hin zur digitalen 50 Hz-Echtzeitbildakquisition über IEEE 1394 und Online-Verarbeitung zur Prozesssteuerung auf einem PC.

Der große Standard-Temperaturmessbereich, verschiedene Optiken sowie umfangreiches Zubehör und leistungsfähige Software zur Thermografiedatenakquisition und -auswertung empfehlen VarioCAM<sup>®</sup> head für vielfältige Anwendungen in Forschung und Entwicklung. Anwendungsspezifisch konfiguriert lässt sich dieses einfach handhabbare Thermografiesystem auch für Überwachungsaufgaben einsetzen, die Dauerlauffähigkeit und automatischen Betrieb erfordern.

#### Anwendungsgebiete:

- Fertigungssteuerung und Prozessüberwachung
- Maschinen- und Anlagenüberwachung
- Echtzeit-Thermografie in Forschung und Entwicklung
- Sicherheitstechnik und Brandfrüherkennung

### 3.6.3. Optikausstattung von VarioCAM / VarioCAM head

Objektive			
Optik	Brennweite(mm)	min. Fokus (m)	FOV (°)
Weitwinkelobjektiv	12,5	0,2	(64 x 50)
Normalobjektiv	25	0,5	(32 x 25)
Teleobjektiv	50	2,0	(16 x 12)

Close-Up-Linsen (für Normalobjektiv)		
Close-Up-Linse	Fokus (mm)	Bildfeld (mm <sup>2</sup> )
0,17x	149	(87 x 66)
0,5x	50	(28 x 22)



## 4. Einsatzmöglichkeiten der Infrarot-Thermografie

### 4.1. Typische Anwendungsgebiete und Einsatzbeispiele

#### **Bauwirtschaft**

- Bestimmung des Zustandes der Wärmeisolation von Wohn- und Industriegebäuden
- mittelbare Bestimmung des Zustandes von anderen Bauwerken wie Brücken und Tunneln (Schwachstellenlokalisierung, Umbauten)
- Vorbereitung von Bausanierungsmaßnahmen, Kontrolle der Qualität der Ausführung
- Auffinden von verdeckten Konstruktionselementen (Anker, Fachwerk, Hohlräume, Leitungen)
- Ursachenermittlung bei Durchfeuchtungen

#### **Haus- und Klimatechnik**

- Leckageortung
- Ortung und Lagebestimmung verdeckt verlegter Leitungen
- Bewertung der Effizienz von klimatechnischen Anlagen
- Funktionskontrolle an Heiz- und Kühldecken

#### **Energiewirtschaft**

- Analyse des Zustandes von Elektroanlagen in Umspannwerken (beispielsweise Transformatoren, Isolatoren, Trenner, Leistungsschalter, Verteilungen in Hoch-, Mittel- und Niederspannungsanlagen)
- Analyse des Zustandes von Wärmeverteilungsnetzen wie Fernwärmeleitungen
- Abwärmeverlusterfassung
- Rohr- und Anlagenisolierungen

#### **Industrielle Anwendungen in Entwicklung, Fertigung und Prozessüberwachung**

- Entwicklung und Optimierung von Produkten und deren Baugruppen mit speziellen thermischen Anforderungen
- Optimierung von Fertigungsprozessen mit speziellen Anforderungen an die Prozesstemperatur (z. B. Kontrolle der Einstellung von Heiz- oder Kühlelementen)
- zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Qualitätskontrolle
- Fehlersuche in elektronischen Baugruppen und mikroelektronischen Schaltungen
- Elektroanlageninspektion (Haupt- und Unterverteilungen, Schaltschränke einzelner Anlagen und Maschinen...)
- ständige oder zyklische Überwachung oder Kontrolle des Zustandes von Anlagen wie Brandüberwachungssysteme (z. B. Müllbunkerüberwachung oder Ausmauerungs-Überprüfung an Schmelzöfen, Lagerdiagnostik ...)
- Füllstandsmessung (nichtisolierte Behälter und Rohrleitungen)



**Landwirtschaft und Umweltanalytik** (insbesondere luftgestützte Thermografie)

- Erfassung von spezifischen, schlagbezogenen Daten in Pflanzenbau und Züchtung
- Altlastenerkundung, Deponieuntersuchungen
- mikroklimatische Untersuchungen
- Waldbrandüberwachung und Glutnesterkennung bei Waldbrandbekämpfung
- Erkennung und Kartierung thermischer Belastungen von Gewässern bzw. Gewässereinleitungen

**Medizinische Anwendungen**

- Human- und Veterinärmedizin
- Diagnostik bei Tumoren und Entzündungen sowie peripheren Zirkulationsstörungen

## 4.2. Bauthermografie

### 4.2.1. Besonderheiten der Gebäudethermografie

**Ziel:** objektive und vollständige Erfassung des Zustandes der Wärmeisolation des Gebäudes

**Thermografie liefert eine Momentaufnahme der Oberflächentemperaturverteilung, die von einer Vielzahl unterschiedlicher Messbedingungen beeinflusst wird.**

#### Quantitative Thermografieuntersuchung:

Aussage über komplette flächenhafte Verteilung des Wärmestromes bzw. des Wärmedurchgangskoeffizienten

- hoher Auswertungsaufwand
- starke Einschränkungen hinsichtlich Tageszeit und Witterungsbedingungen
- nur nach mehreren niederschlagsfreien Tagen und nur bei Windstille
- nur bei stationären Wärmestrombedingungen (frühe Morgen- oder späte Abendstunden)
- zusätzliche Innenmessungen zur Bestimmung von Bezugsgrößen erforderlich

#### Qualitative Thermografieuntersuchung:

Aussagen über Wärmebrücken und Gesamteindruck des Objektes

- weniger Einschränkungen hinsichtlich der Messbedingungen

Außenthermografie	Innenthermografie
+ in der Regel wärmeabgebende Wand vollständig einsehbar (meist guter Überblick)	- nur kleiner Teil der Wände erfassbar, wesentliche Teile der Flächen können nicht erfasst werden
+ Aufnahmeposition meist variabel	- meist Ansicht durch Möbel und sonstige Einrichtung eingeschränkt
+ geringerer Zeitaufwand, keine Belästigung	+ größerer Vorbereitungsaufwand, Belästigung der Nutzer
- stark witterungsabhängig	+ kein direkter Einfluss der unmittelbaren Witterungseinflüsse (Wirkung abgeschwächt) + unter bestimmten Voraussetzungen auch am Tag durchführbar
- problematisch bei Messungen im Dachgeschoss und hinterlüfteter Fassaden	+ bessere Aussagen bei ausgebauten Dachgeschossen sowie hinterlüfteten Fassaden
- Verdeckung von Fassadenteilen durch Balkone, Bäume usw.	+ Luftundichtigkeiten bei Wind leichter auszumachen

**Tab. 10:** Unterschiede zwischen Außen- und Innenmessungen

#### **allgemein empfohlene Voraussetzungen/Bedingungen**

- Aufnahmezeit in späten Abendstunden/frühen Morgenstunden
- Differenz Außentemperaturen - Raumtemperaturen > (15 ... 20) K
- trockene Witterung und Wind < 2 m/s
- Innenräume gleichmäßig temperiert (Innentüren offen) und Fenster geschlossen
- eventuell vorhandene automatische Nachtabsenkung der Heizung außer Betrieb nehmen

#### **4.2.2. Bauthermografie - Aufdeckung der häufigsten Bauschäden**

##### **Wärmebrücken:**

- Abschätzung des Sanierungsaufwandes bei Altbauten, z. B. Zustand der Fenster, Dämmvermögen der verwendeten Bauteile, Zustand der Fugen
- Kontrolle der Ausführung von Außendämmungen bei Sanierungen und Neubauten, Anschlussbereiche vom Mauerwerk an Balkone oder Erker
- konstruktionsbedingte Wärmebrücken durch Trägerelemente (Stahlträger)
- Fugen (bei Plattenbauten interessant), Mörtelbrücken, Heizkörpernischen (nur von außen)
- Installationsschlitze in Außenwänden

##### **Luftundichtigkeiten**

- Messung erfolgt in der Regel in Verbindung mit einem "Blower-Door": im Inneren des Gebäudes wird über ein Gebläse eine Druckdifferenz von 50 Pa zu außen aufgebaut
- erzeugter Unterdruck bewirkt ein Nachströmen der kälteren Außenluft durch die undichten Bauteile
- von der Außenluft abgekühlte Bauteile lassen sich thermografisch detektieren, wie z. B. Verbindungsstelle Fensterrahmen-Mauerwerk, defekte Fensterdichtungen
- Rolladen-Revisionsdeckel ohne elastische Dichtung
- Verzug von Haustüren durch große Temperaturunterschiede
- Bodenklappen von hinterlüfteten Spitzböden
- Einbau von Steckdosen oder Lichtschaltern in einer Gipskartonwand
- Verkleidungen an Dachschrägen, an den Übergangsbereichen Leichtbauwand-Massivgiebel oft Wind-/Dampfsperre nicht sachgemäß verlegt
- Anschlüsse bei Holzständerbauweisen

## 4.2.3. Bauthermografie - Ortung verdeckter Konstruktionselemente

- **Ankersuche an Plattenbauten**

Durch unterschiedliches Wärmeleitvermögen von Metall (Anker) und Beton (Platte) können bei ausreichendem Wärmestrom (empfohlene Außen-/Innentemperaturen ca.  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  /  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) die Metallanker an der Betonoberfläche sichtbar gemacht werden. So kann vor der Sanierung eines Plattenbaus festgestellt werden, welche Anzahl und Dimensionierung die Anker der einzelnen Platten aufweisen.

- **Lage und Dimensionierung von Trägern**

An der Oberfläche des Mauerwerks können bei hinreichendem Wärmestrom Konstruktionselemente aus Holz oder Stahl sichtbar gemacht werden.

- **Verputzte Fachwerkhäuser**

Die Erkennung der Konstruktion von Fachwerken ist sowohl im Sommer, nachdem die Gebäudehülle tagsüber aufgeheizt wurde, als auch im Winter (umgekehrter Wärmestrom) möglich. Hierbei wird das unterschiedliche Wärmespeichervermögen von Fachwerk und Ausfachung genutzt.

- **Lage und Dichte von Heizungsleitungen**

Grundsätzlich wird während der Aufheizphase thermografiert, da eine homogene Temperaturverteilung an der Oberfläche noch nicht erreicht ist. Somit können nachträglich zerstörungsfrei die Verlegeweise, Dichte und Länge der Heizleitungen festgestellt und Mängel in der Ausführung erkannt werden.

## 4.2.4. Bauthermografie - Feuchtigkeitsschäden

### Tauwasserbildung

#### Ursachen für Feuchteschäden:

- fehlerhafte Dämmung (besonders in den Raumecken erkennbar)
- falsches Verhalten der Gebäudenutzer (unzureichendes Heizen oder Lüften)

Die Luft in einem Gebäude enthält stets ein gewisses Maß an Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf. Die Fähigkeit der Luft, Wasserdampf festzuhalten, ist abhängig von der Lufttemperatur. Unter dem Taupunkt versteht man die Temperatur, bei deren Unterschreitung der Wasserdampf kondensiert und in die flüssige Phase zurückfällt. Dies kann in Form von **Kondenswasser** an kühlen Oberflächen, genauso aber auch im Innern einer Wand erfolgen.

Lufttemperatur	relative Luftfeuchte						
	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %
24 °C	5,4 °C	9,6 °C	12,9 °C	15,8 °C	18,2 °C	20,3 °C	22,3 °C
22 °C	3,6 °C	7,8 °C	11,1 °C	13,9 °C	16,3 °C	18,4 °C	20,3 °C
20 °C	1,9 °C	6,0 °C	9,3 °C	12,0 °C	14,4 °C	16,4 °C	18,3 °C
18 °C	0,2 °C	4,2 °C	7,4 °C	10,1 °C	12,5 °C	14,5 °C	16,3 °C
16 °C	-1,4 °C	2,4 °C	5,6 °C	8,2 °C	10,5 °C	12,6 °C	14,4 °C
14 °C	-2,9 °C	0,6 °C	3,7 °C	6,4 °C	8,6 °C	10,6 °C	12,4 °C
12 °C	-4,5 °C	-1,0 °C	1,9 °C	4,5 °C	6,7 °C	8,7 °C	10,4 °C
10 °C	-6,0 °C	-2,6 °C	0,1 °C	2,6 °C	4,8 °C	6,7 °C	8,4 °C

**Tab. 11:** Taupunkte in Abhängigkeit von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte

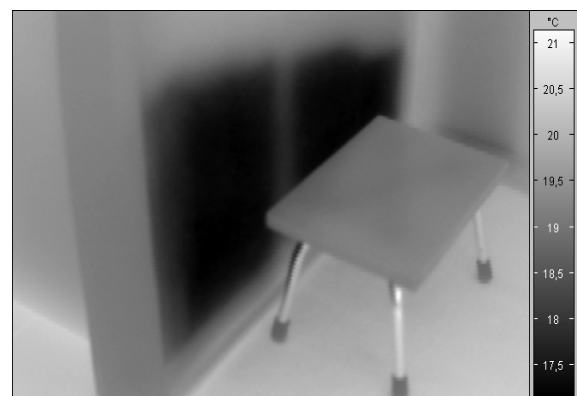
Ein Beispiel zur Benutzung von Tabelle 11:

- Bei einer Lufttemperatur von 20 °C und
- einer relativen Luftfeuchte von 60 %
- bildet sich bei einer Oberflächentemperatur von 12 °C (Wand) Kondenswasser aus!

#### Erkennung aufsteigender Feuchte

- durch Thermografie wird Ausmaß der Durchfeuchtung einer am Erdreich angrenzenden Wand festgestellt
- Erfassung der bei Verdunstung der Feuchtigkeit entstehenden negativen Wärme (Kälte)
- Erkennung der von außen eindringenden Feuchtigkeit im Thermobild

**Abb. 24:** Thermografiebild einer durchfeuchteten Trockenbauwand

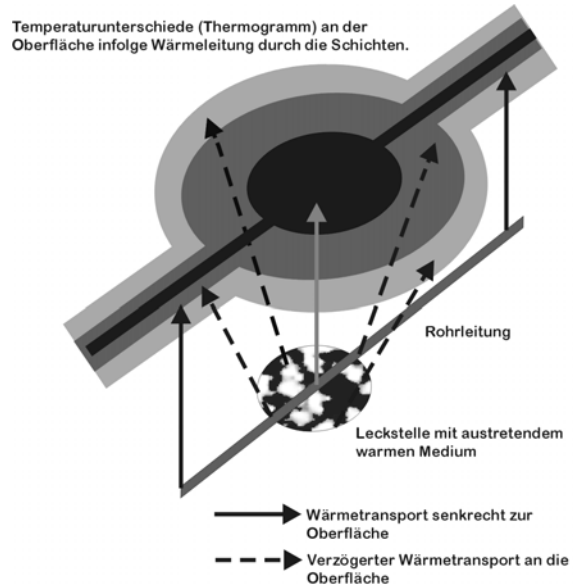


## 4.3. Besonderheiten bei der Leckageortung

**Ziel:** Leckagen verdeckt liegender Leitungssysteme möglichst genau orten

Die thermografische Leckageortung beruht auf den **Prinzipien der Wärmeübertragung**.

Das Medium (meist Wasser) strömt durch das Leitungssystem. Ist es wärmer als die Umgebung (Heizungsleitungen, Warmwasser, Fußbodenheizungen), erfolgt ein Wärmeabtransport (vorrangig durch Wärmeleitung) durch die darüber liegenden Schichten an die Oberfläche. Somit wird zunächst der Verlauf der Leitung thermografisch sichtbar. An der vorhandenen Leckstelle tritt das wärmere Medium aus und kann sich je nach Schichtaufbau entlang der Leitung sowie seitlich oder nach unten ausbreiten. Der allseitige Wärmetransport erfolgt nun durch Wärmeleitung und möglicherweise Konvektion des ausgeströmten Mediums durch die benachbarten Schichten. Thermografisch kann eine Temperaturabweichung vom eindimensionalen Leitungsverlauf festgestellt werden.



**Abb. 25:** Prinzip einer Leckage

**Generell gilt, Leckortung mit Thermografie ist nur möglich**, wenn an der Leckstelle eine Temperaturdifferenz vorhanden ist oder erzeugt werden kann.

### Anforderungen an das Kamerasystem:

- hohe thermische Auflösung
- geringes Rauschen
- Temperaturbereich von ca.  $-20\text{ °C}$  bis ca.  $+200\text{ °C}$
- gute Handhabbarkeit
- zusätzliches LCD-Display oder Anzeige für gleichzeitige Betrachtung durch mehrere Beobachter

Bei **vermuteten Leckstellen** sollte eine Betrachtung aus verschiedenen Blickwinkeln erfolgen, um z. B. Reflexionen auszuschließen. Das Öffnen der Leckstelle muss mit dem Betreiber abgesprochen werden. Ggf. kann eine Probebohrung vorgenommen werden.

**Ergänzend zur Thermografie** können hier Feuchtefühler für Materialfeuchtegehalt und/oder Endoskope für die Probebohrungen eingesetzt werden.

Die Leckageortung kann an verschiedenen Leitungssystemen erfolgen: Kaltwasser, Warmwasser, Abwasser/Abflüsse, Heizungsleitungen, Fußbodenheizung (Wandheizung), Fernwärmeleitung. Für die verschiedenen Leitungssysteme sind folgende **Hinweise** hilfreich:

## Fußboden- und Wandheizung:

- Bei kleinen Leckagemengen kann durch ein Hochdruckgerät die Leckagemenge vergrößert werden (maximale Druckbelastung von Leitungen, Register und Ausgleichsgefäß beachten!)

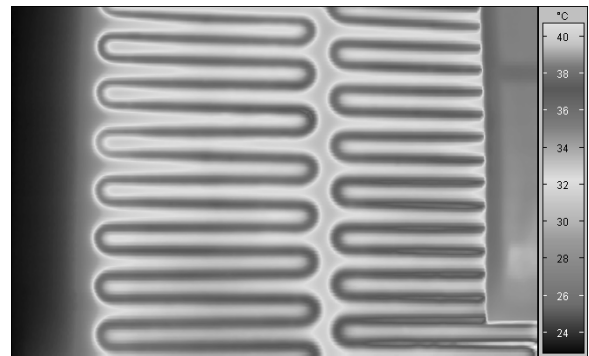


Abb. 26: Thermografiebild Wandheizung

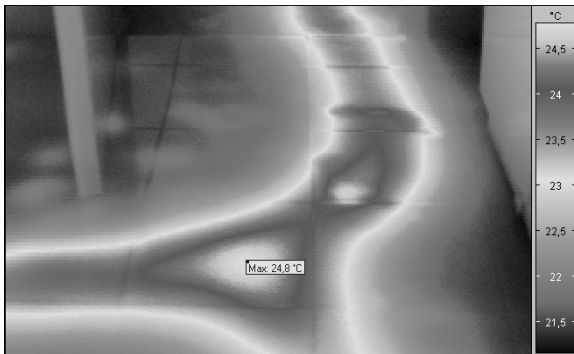


Abb. 27: Thermografiebild Wasserleitung

## Kaltwasser:

- Kaltwasserleitungen müssen so umgeschlossen werden, dass sie mit Warmwasser beaufschlagt werden können. Danach wird wie bei Heizungsleitungen vorgegangen.

## Abwasser:

- Durch die Abwasserleitungen muss Warmwasser geführt werden. Der Einsatz von Sperrblasen ist in der Regel notwendig.

## Leitungen in Kanälen:

- In großen Systemen ist eine Befahrung mit einem Fahrwagen für Video- und Infrarottechnik möglich.

## Erdverlegte Leitungen:

- Leckortung nur bei großen Verlustmengen möglich
- Genauer Bodenaufbau und dessen Feuchtegehalt sind zu berücksichtigen
- Eine möglichst gleichmäßige Oberflächentemperatur (keine Sonneneinstrahlung - auch im Vorfeld der Messung) ist Voraussetzung.
- Es sollte möglichst ein erhöhter Standpunkt z. B. von benachbarten Gebäuden, Hubwagen, Teleskopmasten oder u. U. vom Hubschrauber gewählt werden.



Abb. 28: Thermografiebild Fernwärmeleitung

## 4.4. Vorbeugende Instandhaltung an Industrie- und Elektroanlagen

### **Infrarot-Thermografie: Ein effektives Messverfahren für die vorbeugende Instandhaltung**

**Ziel:** Effektive Inspektion von elektrischen Anlagen und mechanischen Baugruppen, kostspielige Ausfälle rechtzeitig durch die Erkennung von thermischen Unregelmäßigkeiten oder übermäßige Erwärmungen zu verhindern.

Die **vorbeugende Instandhaltung** hilft, Betriebsstörungen durch eine frühzeitige Erkennung ernstzunehmender Fehler besonders an elektrischen und mechanischen Bauteilen zu verhindern. Die Thermografie ist eine der effektivsten und bewährtesten Technologien für die **vorbeugende Instandhaltung**, um anhand des wichtigsten physikalischen Parameters, der Temperatur, abweichende Zustände festzustellen. Diese Inspektion wird turnusmäßig durchgeführt, bevor sich an Maschinen oder Anlagen Verschleißerscheinungen zeigen.

**Thermografiesysteme können Wärmebilder von allen sichtbaren Teilen der Anlagen liefern.**

### **4.4.1. Vorteile der vorbeugenden Instandhaltung mit Thermografiesystemen**

- kein direkter Kontakt zum Messobjekt erforderlich (berührungslos)
- während der gesamten Messung wird das Messobjekt unter normalen Lastbedingungen betrieben
- schneller Überblick über die Messsituation
- reduziert unplanmäßige Stillstandszeiten
- senkt Kosten, da kein Verlust von Arbeitszeit sowie ausfallender Produktion
- steigert die Effektivität des Wartungspersonals
- spart Zeit und Geld, wenn die thermischen Inspektionen vor einer geplanten Instandhaltung durchgeführt werden
- Qualitätskontrolle von neuen oder reparierten Anlagenteilen
- Energieeinsparung (überhitzte Verbindungen verbrauchen zusätzlich elektrische Leistung)
- lose bzw. korrodierte Verbindung können in einem Bruchteil der Zeit ausfindig gemacht werden
- moderne, ungekühlte Thermografiesysteme sind leicht und einfach zu bedienen

### **Die Infrarot-Thermografie wird vorwiegend in folgenden Applikationen eingesetzt:**

- Inspektion von Schaltanlagen, besonders in Kraftwerken
- Inspektion von Sammelschienen und Kabelkanälen
- Kontrolle von Transformatoren
- Inspektion von Schaltschränken
- Untersuchung von Motoren und mechanischen Lagern
- Zustandsanalysen an allen Anlagen und Installationen



**Dabei können vor allem folgende elektrische Fehler lokalisiert werden:**

- fehlerhafte Verbindungen an jedem Gerättyp
- defekte Kabelendverteiler, Durchführungen, Überspannungsableiter
- schlechte Kontakte an Sicherungselementen, Trennern und Schützen
- fehlerhafte Hauptschalter und Schaltfehler in Elektroverteilern
- ungleiche Phasenlast bei dreiphasigen Abgängen
- Überlastung durch Oberwellen
- überhitzte Motoren oder Generatoren durch Kurzschlüsse in den Wicklungen
- verschmutzte Transformatorkühlrippen
- fehlerhafte Kondensatoren und Leistungshalbleiter

**Allgemeine mechanische Fehler an Anlagen:**

- defekte Lager an allen Produktionsanlagen
- übermäßige Reibung auf Gleitflächen
- überlastete Riemen und Gurte von Förderanlagen und deren Kupplungen
- unsachgemäße Getriebeanpassung oder fehlende Schmierung

**Die Wartungsaktivitäten der vorbeugenden Instandhaltung bestehen aus folgenden Maßnahmen:**

- Liste der zu wartenden Geräte oder Anlagen
- Liste der bei der Wartung durchzuführenden Arbeiten (anhand vorliegender Thermografien)
- Planung, welche weiteren Arbeiten später noch durchgeführt werden müssen
- nachfolgende Überwachungsarbeiten zur Kontrolle der ausgeführten Reparaturen

**4.4.2. Besonderheiten der Thermografie bei der vorbeugenden Instandhaltung**

- Die Temperaturmessung hängt vom Emissionsgrad der unterschiedlichen Oberflächen ab. Besondere Beachtung erfordern glänzende Metalloberflächen, die einen hohen Reflektionsgrad haben und deren Temperatur nicht ohne zusätzliche Maßnahmen (Schwärzung) ausreichend genau bestimmt werden können.
- genaue Kenntnis der Anlage und deren Lastverhältnisse
- gekapselte Teile einer Anlage können nicht direkt gemessen werden (kein Sichtkontakt)
- das Öffnen von Sicherheitstüren ist notwendig und verlangt Maßnahmen zur Sicherstellung des Berührungsschutzes und der Sicherheit des Thermografen
- bei Messungen an kleinen Kontaktbereichen aus größeren Abständen (Erreichbarkeit aus Sicherheitsgründen nicht gegeben) sind möglicherweise Teleobjektive erforderlich
- an Messstellen, bei denen nur ein geringer Messabstand möglich ist, ist ein Weitwinkelobjektiv empfehlenswert
- verlangt ausgebildetes Personal, um die aufgenommenen Thermografiebilder zu interpretieren, die entsprechenden Maßnahmen abzuleiten und deren Ausführung zu überwachen
- es wird eine thermografische Analysesoftware für die Auswertung benötigt

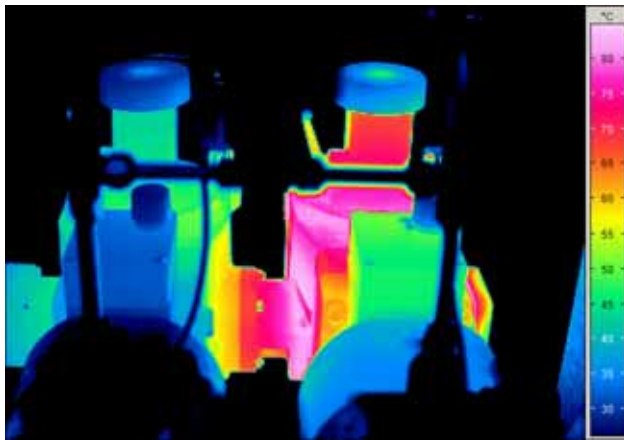
## 4.5. Zustandsorientierte Instandhaltung an Industrieanlagen

Dieses Verfahren basiert auf einer permanenten Zustandsüberwachung (monitoring) von verschiedenen Parametern, die den Zustand einer Anlage bestmöglich beschreiben. Durch Verfolgen der Tendenz der erfassten Werte kann anhand vorliegender Vergleichsdaten ein bevorstehender Ausfall rechtzeitig erkannt werden. Außerdem kann mit den aufgezeichneten Daten abgeschätzt werden, in welchem Zeitraum eine Maschine ausfällt, wenn keine geeigneten Maßnahmen ergriffen werden.

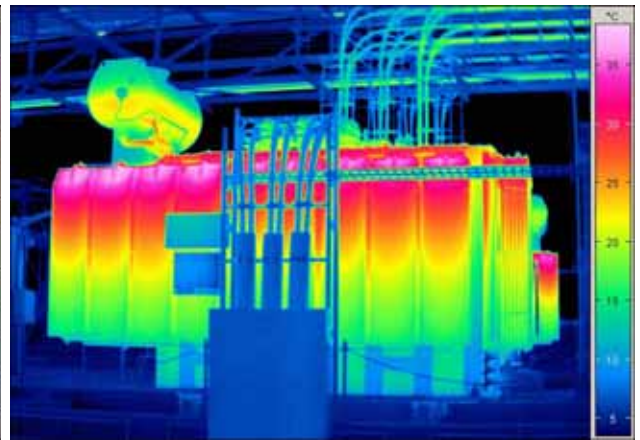
Die zustandsorientierte Instandhaltung wird meist nur an besonders kritischen oder sehr teuren Anlagen durchgeführt, da der Aufwand deutlich höher als bei einer vorbeugenden Instandhaltung ist. Die Verlängerung der Lebenszeit solcher Anlagen rechtfertigt jedoch den erhöhten Aufwand bei weitem.

### Eine Auswahl der gebräuchlichsten Methoden:

- Schwingungsanalyse
- Thermografie
- Schmierölanalyse
- Überwachung des Isolierungswiderstandes
- Lecksuche mit Ultraschall



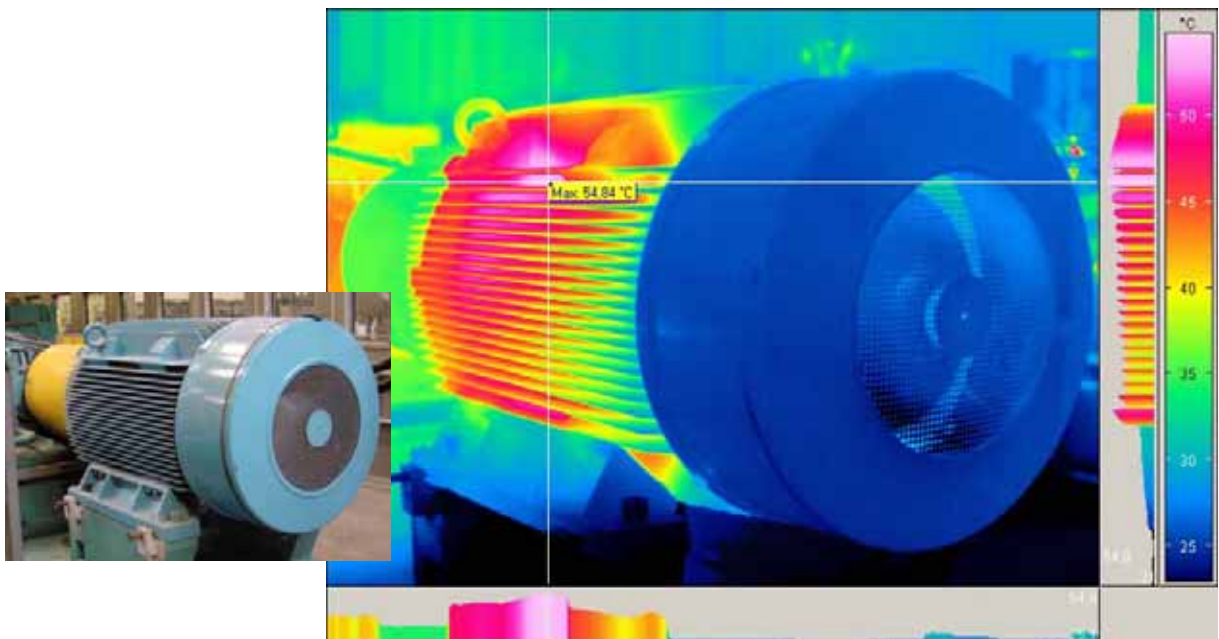
**Abb. 29:** Lokalisierung einer defekter Pumpe



**Abb. 30:** Thermische Kontrolle eines Transformators



**Abb. 31:** Thermograf bei der Inspektion



**Abb. 32:** Zustandsanalyse eines Motors

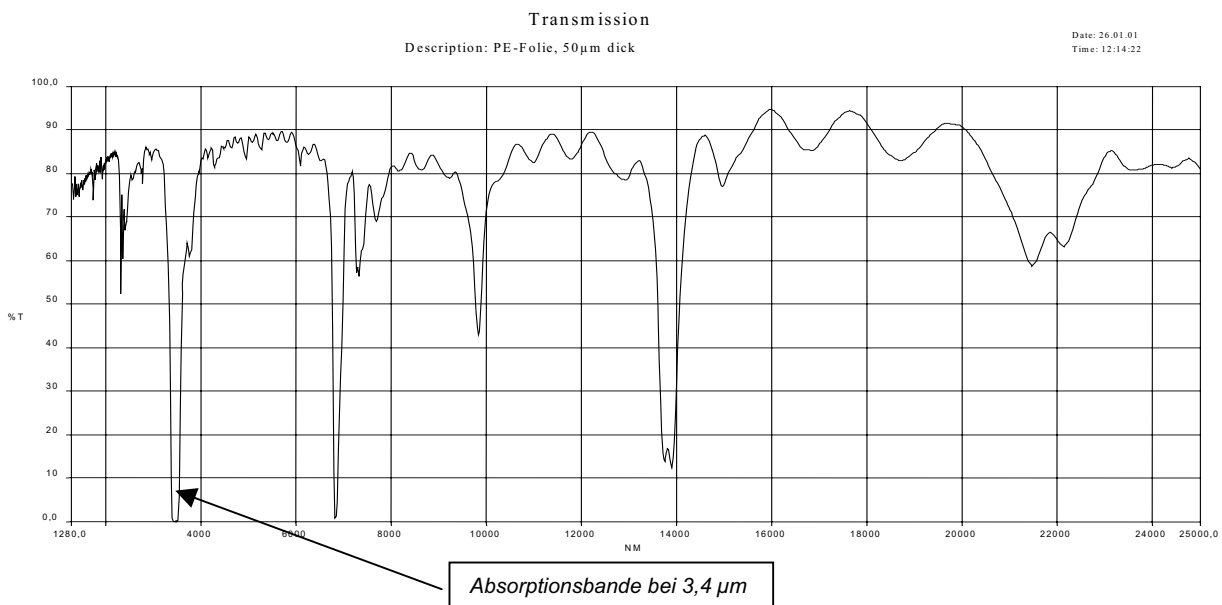
## 4.6. Thermografie an Kunststoffen

### 4.6.1. Besonderheiten thermografischer Messungen an Kunststoffen

Kunststoffe treten in der thermografischen Praxis entweder als massive Teile mit einer Dicke von mindestens einigen Millimetern oder alternativ dazu als dünne Folien auf. Als massives Material zeichnen sie sich im allgemeinen durch ein hohes Emissionsvermögen sowohl im kurzwelligen als auch im langwelligen Spektralbereich aus. Komplizierter ist die Messung an Kunststofffolien, da deren Emissionsvermögen abhängig von der Foliendicke ist.

Ebenso wie bei allen anderen Materialien weisen Kunststoffe entsprechend ihrer chemischen Zusammensetzung einen charakteristischen Verlauf des spektralen Emissionsgrades bzw. Transmissionsgrades auf. Dieser ist aufgrund der polymeren Molekularstruktur der Kunststoffe als sogenanntes Bandenspektrum ausgebildet. Größeren spektralen Bereichen mit hoher Durchlässigkeit stehen dabei schmale „Absorptionsbanden“ gegenüber. Diese sind gleichfalls Emissionsbanden und erlauben somit eine verlässliche Infrarot-Temperaturmessung bereits an dünnen Folien. Für diese Messungen werden die Thermografiekameras mit speziellen Kunststofffiltern ausgerüstet und kalibriert. Eine der wichtigsten, nutzbaren Absorptionsbanden z. B. von dünnen Kunststofffolien aus PE oder PTFE liegt bei  $3,4\ \mu\text{m}$ .

Die Vielfalt der verfügbaren Kunststoffe einschließlich ihrer Variationen hinsichtlich Zuschlag- und Farbstoffen erlaubt es nicht, an dieser Stelle einen allumfassenden Fundus an spektralen Emissionsgraden von Kunststoffen darzustellen, in welchem jedes erdenkliche Messobjekt wiedergefunden werden kann. Daher wird es in vielen Fällen notwendig sein, eine charakteristische Probe des Materials zu untersuchen. Im IR-Messlabor von InfraTec ist die dafür notwendige gerätetechnische Ausstattung vorhanden.



**Abb. 33:** Spektraler Transmissionsgrad von PE-Folie (50µm)

## 4.6.2. Anwendungsbeispiele in der Kunststoffindustrie

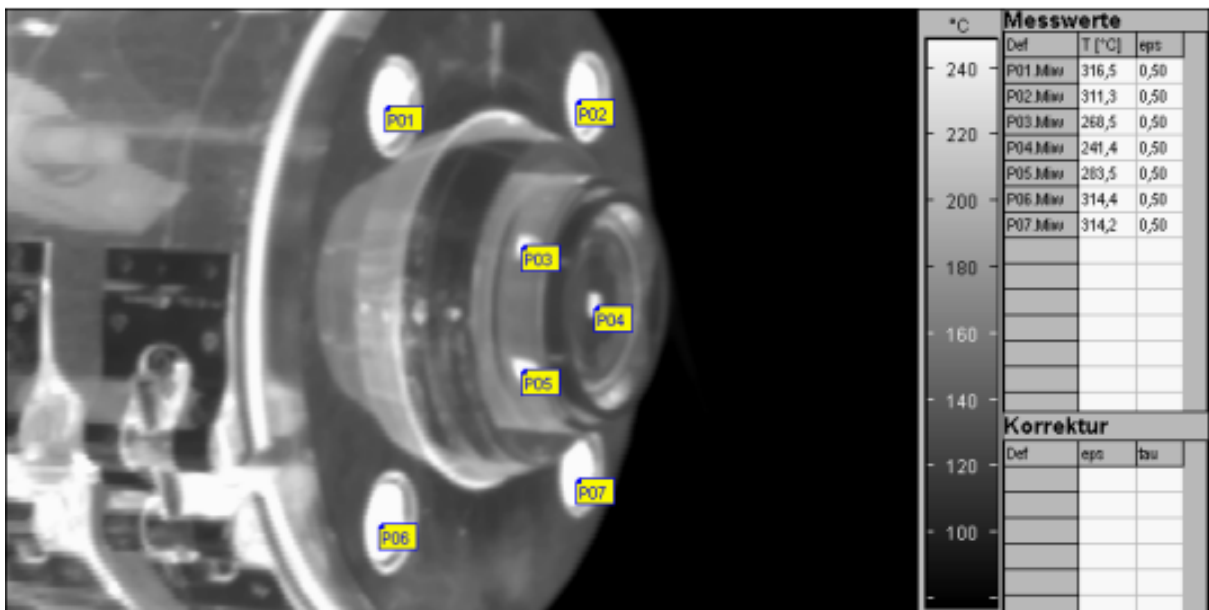
In der Kunststoffindustrie werden sehr oft thermografische Messungen an Kunststoffteilen eingesetzt, um Prozessoptimierungen durchzuführen oder Qualitätsverbesserungen zu erreichen. Die Thermografie eignet sich hier besonders zur anschaulichen Darstellung von Temperaturabweichungen in technologisch kritischen Bereichen. Qualitätsmängel werden z.B. durch nicht optimale Temperierung oder Defekte im Kühlsystem der Spritzgussformen verursacht.

Während die Oberflächentemperaturmessung mit Thermografie an den meist hochpolierten Spritzgussformen während des Produktionsprozesses sehr schwierig und aufwendig ist, führt eine Messung am Kunststoffteil zu gut auswertbaren Ergebnissen. Zur Messung sollte das Kunststoffteil nicht entformt werden (Auslassen des Entformtaktes). Man erhält ein praktisch exaktes Temperaturabbild der Formoberfläche und gleichzeitig ist die geometrische Zuordnung gewährleistet.

Andererseits ist es bei der Entwicklung von Heiz- und Kühlsystemen für spezielle Spritzgussformen oft möglich, die Innenseiten der Form z. B. mit Mattlack zu schwärzen. In diesem Fall sind Thermografiemessungen an den Oberflächen der Innenseite gut möglich. Weiterhin ist die Anwendungen der Thermografie besonders bei Tiefziehprozessen (gleichmäßige Erwärmung besonders bei großen Teilen oder von kritischen Bereichen) bekannt. Je nach Prozessanforderung (Messgeschwindigkeit) kommen Echtzeit- oder Slowscansysteme zum Einsatz.

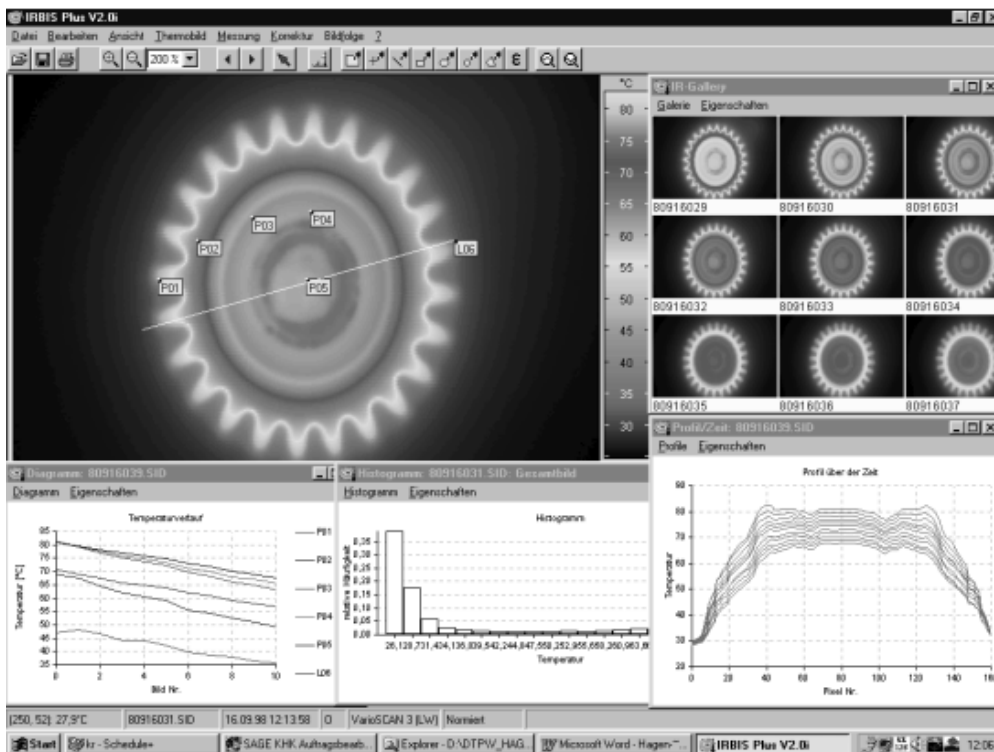


**Abb. 34:** Tiefziehformteil (Abkühlungsprozess)

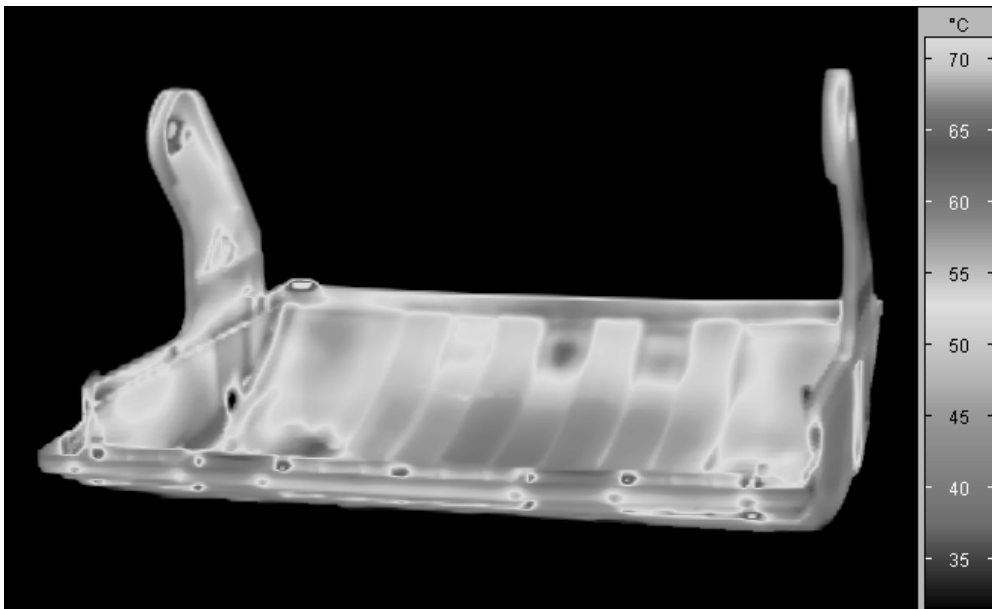


**Abb. 35:** Temperaturverteilung an einem Spritzgusswerkzeug mit Messpunkten

Der Emissionsgrad der Oberfläche wurde in Abb. 35 mit 0,50 bestimmt und die Temperaturmesswerte korrigiert.



**Abb. 36:** Auswertung der Temperaturverteilung eines Kunststoffzahnades (Spritzguss) inkl. Analyse des Temperatur-Zeitverhaltens der Messpunkte und Messgerade (Auswertung mit der Thermografiesoftware IRBIS® Plus)



**Abb. 37:** Temperaturverteilung der Abdeckung eines Kunststoffmüllcontainer (Spritzguss)



## 5. Auswertung von Thermografieaufnahmen

Die Thermografie als abbildendes Temperaturmessverfahren hat vorwiegend die Gewinnung von Messdaten zum Ziel, die während oder nach der eigentlichen Messung zunächst entsprechend konditioniert und anschließend in geeigneter Form dokumentiert werden müssen. In Abhängigkeit von der konkreten Messaufgabe gibt es sehr unterschiedliche Anforderungen an die Auswertung von Thermografieaufnahmen. So genügt in manchen Fällen die Erfassung der numerischen Werte einzelner Messpunkte, während in anderen Fällen die Erfassung kompletter Bildfolgen erforderlich ist, um beispielsweise Temperatur-Zeit-Verläufe zu dokumentieren. Die folgenden Ausführungen beschreiben die einzelnen Verfahren im Zusammenhang mit dem Einsatz der Thermografiesystemfamilien VARIOSCAN/VarioTHERM™.

### 5.1. Auswerte-, Speicherungs- und Dokumentationsmöglichkeiten

#### 5.1.1. Vor-Ort-Auswertung

Bereits während der Messung sind Auswertungen der aufgenommenen Thermografieaufnahmen sinnvoll und erforderlich. Die sogenannte Vor-Ort-Auswertung setzt im Prinzip auf die zur Bedienung des Gerätes ohnehin vorhandenen Funktionen der Betriebssoftware des jeweiligen Thermografiesystems auf. Bei VARIOSCAN sind die Auswertefunktionen der Betriebssoftware mit jeder Gerätegeneration erweitert worden, wie aus **Tab. 12** ersichtlich wird.

Funktion	VS 10xx	VS 20xx	VS 301xc	VS 302xc	Vario-THERM™
Temperaturskala	x	x	x	x	x
Punkttemperaturanzeige in Bildmitte	x	(x)	(x)	(x)	x
Kursortemperaturanzeige	(x)	x	(x)	(x)	(x)
Multipoint-Messung		x	x	x	x
Multiarea-Messung			x	x	x
Zahl der Farbpaletten	5	3	5	7	5
Isothermeneinblendung	(x)	x	x	x	x
Rücklesen von Aufnahmen		x	x	x	x
PCX-Screenshot		(x)	x	x	x
Galeriedarstellung			x	x	x
Differenzbildmodus				x	
Mosaikdarstellung Hintergrundspeicher				x	

**Tab. 12:** Auswertefunktionen der Betriebssoftware

Unter Nutzung dieser Auswertefunktionen ist so im einfachsten Fall die manuelle Datenübernahme von numerischen Einzelmesswerten oder prinzipiellen Inspektionsaussagen (i.S.v.: „...es wurde an den inspizierten Objekten keine Temperaturerhöhung über 50°C festgestellt...“) möglich, ohne dass eine weitere Datenspeicherung und -auswertung stattfindet.

Sollte sofort vor Ort die Notwendigkeit bestehen, farbige Hardcopies der Thermografieaufnahmen zu erstellen, so gibt es dafür in Abhängigkeit vom konkreten Gerätetyp verschiedene Möglichkeiten, wie **Tab. 13** zeigt.

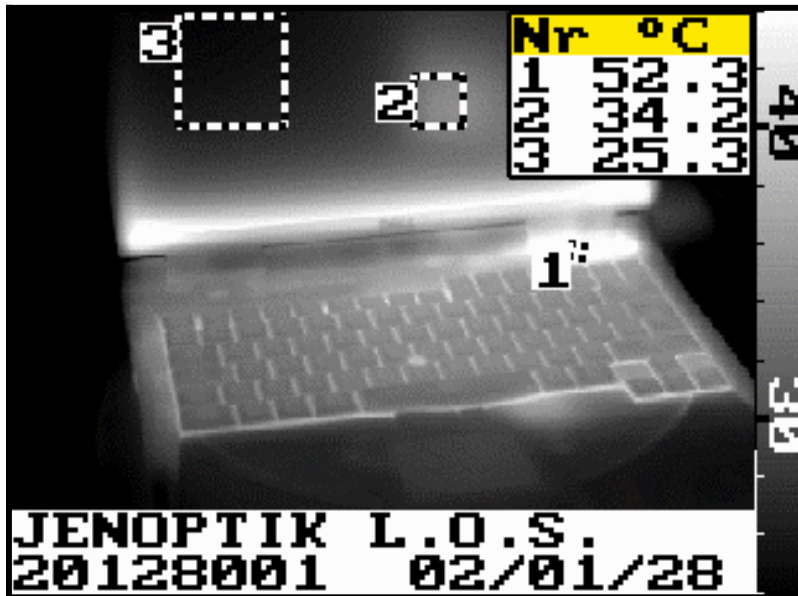
Medium für Hardcopy	VS 10xx	VS 20xx VS 30xx PC	VS 30xxc	VarioTHERM™
<b>Farbvideoprinter</b> gute Bildqualität hohe Druckkosten	Pal-FBAS (A)	Druckerport v. PC (D) oder Pal-FBAS (A) über optionalen Normwandler	Pal-RGB (A), über Speicherkarte (D)	Druckerport v. internen PC (D) Y/C (S-Video) (A), über Speicherkarte (D)
<b>Farbtintenstrahl - drucker</b> gute Bildqualität mittlere Druckkosten		Druckerport v. PC (D)		Druckerport v. internen PC (D)
<b>Polaroid-Foto</b>	Monitor an Pal-FBAS (A)	Monitor an VGA (A)	Monitor an Pal- RGB (A)	Monitor an Y/C (S-Video) (A)

(A) ... analog., (D) ... digital

**Tab. 13:** Möglichkeiten der Erstellung von Vor-Ort-Hardcopies

Generell muss angemerkt werden, dass die Qualität der so erstellten Bilder stark vom verwendeten Übertragungsweg zum „Druckmedium“ abhängt. Während die vollständig digital übertragenen Bilder von VARIOSCAN2 bzw. VARIOSCAN3 PC zum Farbtintenstrahldrucker und zum Videoprinter eine ausgezeichnete Qualität aufweisen, ist bei den analog übertragenen Bildern mit gewissen Einschränkungen zu rechnen. Die althergebrachte Methode der Polaroid-Bildschirmfotos ist mit den größten Qualitätseinbußen verbunden und kann deshalb nicht mehr empfohlen werden.





**Abb. 38:** pcx-Screenshot von VARIOSCAN 3021

Als besondere Möglichkeit der Abspeicherung von Vor-Ort-Auswertungen ist der sogenannte pcx-Screenshot (**Abb. 38**) aus der Betriebssoftware des Thermografiesystems zu sehen: Er dokumentiert 1:1 die Vor-Ort-Auswertungssituation und hat einen hohen Wiedererkennungswert und ggf. Beweiseffekt, wenn z. B. mehrere Personen an einer Messung teilgenommen haben.

Der zunehmende Einsatz von Notebooks als portable Auswerte-PC lässt die Trennlinie zwischen Vor-Ort-Auswertung und späterer „Off-line“-Auswertung immer mehr verschwimmen. Dessen ungeachtet spielt die Speicherung, der Transfer und die Sicherung der thermografischen Daten eine wichtige Rolle.

## 5.1.2. Datenspeicherung, -transfer und -sicherung

Während des Scan-Betriebsmodus schreiben alle VARIOSCAN-Systeme die aufgenommenen Bilder zunächst fortlaufend in einen unterschiedlich großen internen RAM. Dieser flüchtige RAM wird so beschrieben, dass beim Übergang in den Freeze-Betriebsmodus jeweils die zuletzt aufgenommenen Bilder vorhanden sind. Im Freeze-Betriebsmodus können diese Bilder betrachtet und für die Speicherung auf dem nichtflüchtigen Speichermedium oder zum Zwecke der Akkumulation (Verbesserung des Signal-/Rauschverhältnisses) ausgewählt werden. Das System VarioTHERM™ enthält keinen tieferen Speicher, so dass im Freeze-Betriebsmodus nur das letzte Bild als „Schnappschuss“ erhalten bleibt. Die Speicherungsmöglichkeiten auf die unterschiedlichen Speichermedien und die Möglichkeiten des Datentransfers sind in **Tab. 14** zusammengefasst.

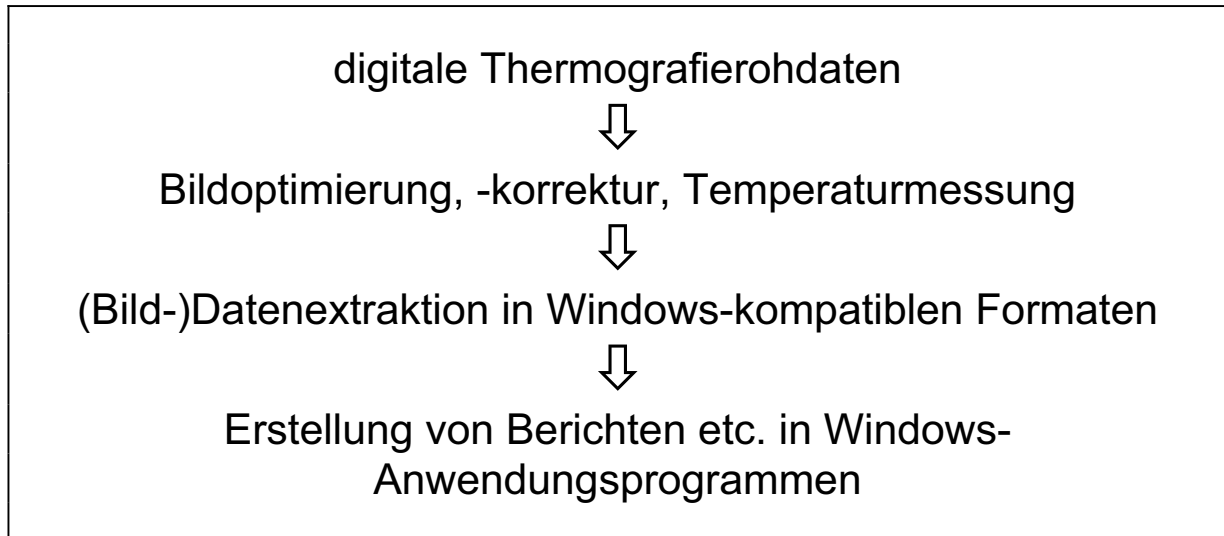
Eigenschaften	VS 10xx	VS 20xx (VS 30xx PC)	VS 301xc	VS 302xc	Vario- THERM™
Digitalisierungstiefe	8 bit	8 bit (16 bit)	16 bit	16 bit	16 bit
Größe eines Bildfiles	ca. 60 KB	ca. 60 KB (ca. 80 ... 180KB)	ca. 80 ... 100 KB	ca. 80 ... 180 KB	133 KB
Größe des internen RAM	5 Bilder	bis 50 Bilder	10 Bilder	10 Bilder	4 Bilder
interner nichtflüchtiger Speicher	nicht vorhanden	HDD	SRAM 2 MB	SRAM 2,5 MB	nicht vorhanden
Datentransfer vom internen Speicher	entfällt	PC-Schnittstellen	RS 232 PC-Card	RS 232 PC-Card	entfällt
wechselbares Speicher- und Transfermedium	1,44MB-Floppy	1,44MB-Floppy (PC-Card)	PC-Card	PC-Card	PC-Card

**Tab. 14:** Übersicht zur Datenspeicherung

Die somit gespeicherten Daten stehen als thermografische Rohdaten für die weitere Thermografiebildauswertung am PC zur Verfügung. Die Rohdaten enthalten alle notwendigen Informationen, um spätere Off-line-Auswertungen ohne Datenverlust ausführen zu können. Es ist deshalb sehr zu empfehlen, diese Rohdaten unabhängig von der weiteren Bearbeitung zu speichern und zu archivieren um später ggf. auf sie zurückgreifen zu können. Als Medien für die Speicherung und Archivierung der Rohdaten kommen heute im wesentlichen CD-ROM in Frage, wenn nicht eine Einbeziehung der thermografische Rohdaten in komplexere Sicherungssysteme vorgenommen werden kann. In Abhängigkeit von der Wichtigkeit der Aufnahmen sind übliche Verfahren der Mehrfachsisicherung zu verwenden.

## 5.2. Softwarewerkzeuge zur PC-gestützten Thermografieauswertung

### 5.2.1. Auswerteprinzip



**Abb. 39:** Auswerteprinzip

Der Erstellung von thermografischen Messprotokollen, Berichten und Dokumentationen liegt bei der hier behandelten Thermografieauswertesoftware das in **Abb. 39** dargestellte Auswerteprinzip zugrunde. Es geht davon aus, die Thermografieauswertesoftware nur für die ursächlich erforderlichen Schritte bei der Bearbeitung der Thermografierohdaten einzusetzen. Die darüber hinausgehenden Schritte werden in den üblicherweise verfügbaren und allgemein verwendeten Windows-Anwendungsprogrammen ausgeführt. Dabei ist von Vorteil, dass jeweils die neuesten und leistungsfähigsten Versionen eingesetzt werden können, die den rasanten Erneuerungsraten der PC-Hardware entsprechen.

### 5.2.2. Besonderheiten thermografischer Bilddaten

Die thermografischen Rohdaten enthalten alle notwendigen Informationen, um nachträglich im Thermografiebild die Temperatur jedes einzelnen Pixels berechnen zu können. In der Regel bestehen sie aus einer Datei, die die digitalisierten strahldichte-proportionalen Detektorsignale für jedes Pixel, Kalibrierdaten der verwendeten Kamera, weitere Angaben zur Temperaturberechnung, wie Umgebungstemperatur und eingesetzte Blende sowie Einstellparameter der Kamera, wie Entfernung und Zoomstufe und letztendlich Aufnahmedatum und einen Kommentar enthält. Bei den Systemen von JENOPTIK haben die Rohdatenfiles die Dateierweiterung xxx.SID (Scanner Image Data) oder xxx.IRB (Infrarotbilddaten). Die Rohdaten können mit herkömmlichen Grafikprogrammen meist nicht als Bild sichtbar gemacht werden und keinesfalls können Temperaturwerte erhalten werden. Voraussetzung hierfür ist die Anwendung eines Temperaturberechnungsalgorithmus, dem der funktionale Zusammenhang zwischen Strahldichte und Objekttemperatur zugrunde liegt. In diesen Temperaturberechnungsalgorithmus geht das in der jeweiligen Kamera verwendete Temperaturmodell ein, das zum Know-how der Herstellerfirma gehört und deshalb nicht frei zugänglich gemacht wird. Diese Tatsache und ein nicht unerheblicher Rechenaufwand haben dazu geführt, dass es zur Auswertung von Thermografieaufnahmen

spezielle Bildverarbeitungssoftware (sog. Thermografieauswertesoftware) gibt. Für die reine pixelweise Umrechnung der Rohdaten in numerische Temperaturwerte gibt es Konvertierungssoftware.

### 5.2.3. Thermografie-Softwarefamilie IRBIS®

Zu den Systemen der VARIOSCAN- und VarioTHERM™-Serie von JENOPTIK ist Thermografieauswertesoftware für verschiedene Anwendungen verfügbar. **Tab. 15** gibt eine Übersicht der durchgängigen Kompatibilität zwischen den einzelnen Systemen und der Thermografieauswertesoftware. Das Programm Sid2ASCII ist ein Konverter, der Thermografieaufnahmen in ASCII-Files mit numerischen Temperaturangaben für jedes Pixel umwandelt.

Software\System	VS 10xx	VS 20xx	VS 301x	VS 302x	VarioTHERM™
Sid2ASCII	x	x	x	x	x
IRBIS®	x	x	x	x	x
IRBIS plus	x	x	x	x	x
IRBIS® professional	x	x	x	x	x
IRBIS® control				x	
IRBIS® online					x
IRBIS® process					x

**Tab. 15:** Übersicht der Thermografie-Softwarefamilie IRBIS®

Für die PC-Steuerung der Systeme VARIOSCAN 302x über Ethernet (IRBIS® control) bzw. für die Echtzeitdatenerfassung (IRBIS® online) und Echtzeitprozesssteuerung (IRBIS® process) mit dem System VarioTHERM™ sind weitere Produkte aus der IRBIS®-Familie verfügbar.

In **Tab. 16** wird eine Übersicht der wesentlichen Funktionen der verschiedenen Off-line-Auswerteprogramme gegeben.

<b>Funktion</b>	<b>IRBIS®</b>	<b>IRBIS® plus</b>	<b>IRBIS® professional</b>
Standard-Farbkeile	x	x	x
frei definierbare Farbkeile			x
Veränderung von Range und Level	x	x	x
automat. Anpassung an Bildinhalt	x	x	x
automat. Anzeige von hot- und coldspots	x	x	x
Punkttemperaturanzeige	x	x	x
Temperaturanzeige für beliebige ROI	x	x	x
Emissionsgradkorrektur für beliebige ROI	x	x	x
pixelweise Emissionsgradkorrektur			x
Temperaturverteilung für beliebige ROI	x	x	x
beliebig wählbare Isothermen	x	x	x
Histogrammdarstellung		x	x
Statistikfunktionen			x
frei definierbare Vergrößerungsfaktoren	x		x
Bildzoom, Bildausschnittanzeige	x	x	x
Bildverarbeitungsfilter	x	x	x
Bildexportformate	BMP	viele	viele
Datenexportformate		ASCII, TXT	ASCII, TXT
Datenbankfunktionen			x
Bildbankfunktionen			x
automatisierte Messfunktionen		x	x
Makroprogrammierung			x

**Tab. 16:** Vergleich der Thermografieauswertesoftware

## 5.2.4. Druck von Thermografieaufnahmen

Der qualitativ hochwertige (Farb-)Druck von Thermografieaufnahmen stellt in der Regel den Abschluss einer Thermografieauswertung dar. Auch wenn heute immer häufiger die rasche Versendung in papierloser Form, z. B. als E-Mail gewählt wird, ist der Ausdruck auf Papier nicht zu ersetzen. Es hängt sehr stark vom vorhandenen Druckaufkommen, also der Zahl der Drucke pro Zeiteinheit ab, welches Druckverfahren am effizientesten ist. In jedem Falle ist die heute unter Windows verfügbare Druckerhardware verwendbar, deren wesentliche Eigenschaften beim Einsatz zum Ausdruck von Thermografieaufnahmen in **Tab. 17** aufgeführt sind.

In jedem Falle sollten vor Anschaffung eines Druckers charakteristische Aufnahmen für Probedrucke verwendet werden. Ein wichtiges Qualitätskriterium ist dabei die stufenfreie Wiedergabe der Falschfarbpaletten bei hoher Farbtiefe, die auch zur laufenden Qualitätskontrolle herangezogen werden sollte.

Typ	Qualität	Anschaffungskosten	Druckkosten	Bemerkungen
S/W-Laserdrucker	sehr gut	mittel	niedrig	nur Grauwerte
Farbtintenstrahldrucker	sehr gut	niedrig	mittel	langsam
Videoprinter mit digit. SS	sehr gut	mittel	hoch	Format begrenzt
Farbsublimationsdrucker	sehr gut	mittel	hoch	langsam
Farblaserofficedrucker	(sehr) gut	hoch	niedrig	
Farbkopierer mit digit. SS	sehr gut	Sehr hoch	niedrig	extern nutzen

**Tab. 17:** Vergleich von Druckern für Thermografieaufnahmen

## 6. Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

### Tabellen

<b>Tab. 1:</b> Elektromagnetisches Spektrum .....	3
<b>Tab. 2:</b> Strahlungsmaximum in Abhängigkeit von der Temperatur .....	6
<b>Tab. 3:</b> Spez. Ausstrahlung des Schwarzen Strahlers im Spektralbereich (8...14) $\mu\text{m}$ .....	16
<b>Tab. 4:</b> Temperaturmessfehler durch Fehleinstellung des Emissionsgrades.....	17
<b>Tab. 5:</b> Thermografiekameras / IR-Detektoren.....	21
<b>Tab. 6:</b> Bildaufnahmeprinzipien von Infrarot-Thermografiekameras .....	22
<b>Tab. 7:</b> Geräteparameter VARIOSCAN 3.....	32
<b>Tab. 8:</b> Geräteparameter VARIOSCAN 302x high resolution .....	33
<b>Tab. 9:</b> Geräteparameter und Bedienfunktionen von VarioTHERMTM head.....	35
<b>Tab. 10:</b> Unterschiede zwischen Außen- und Innenmessungen.....	40
<b>Tab. 11:</b> Taupunkte in Abhängigkeit von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte .....	43
<b>Tab. 12:</b> Auswertefunktionen der Betriebssoftware.....	53
<b>Tab. 13:</b> Möglichkeiten der Erstellung von Vor-Ort-Hardcopies .....	54
<b>Tab. 14:</b> Übersicht zur Datenspeicherung.....	56
<b>Tab. 15:</b> Übersicht der Thermografie-Softwarefamilie IRBIS®.....	58
<b>Tab. 16:</b> Vergleich der Thermografieauswertesoftware .....	59
<b>Tab. 17:</b> Vergleich von Druckern für Thermografieaufnahmen .....	60

## Abbildungen

<b>Abb. 1:</b> Pyrometrisch-thermografische Messanordnung .....	4
<b>Abb. 2:</b> PLANCKsches Strahlungsgesetz .....	5
<b>Abb. 3:</b> Strahlungs-Temperatur-Kennlinien für verschiedene Spektralbereiche .....	7
<b>Abb. 4:</b> Spektraler Transmissionsgrad von Luft (10 m, 25 °C, 1013 mbar, 85 % r.F.) .....	8
<b>Abb. 5:</b> Spektraler Emissionsgrad einiger Nichtmetalle .....	9
<b>Abb. 6:</b> Spektraler Emissionsgrad von Metallen und anderen reinen Stoffen .....	9
<b>Abb. 7:</b> Spektraler Emissions-, Transmissions- und Reflexionsgrad von Glas .....	10
<b>Abb. 8:</b> Strahlungsanteile bei pyrometrischer bzw. thermografischer Temperaturmessung .....	11
<b>Abb. 9:</b> Spez. Ausstrahlung des Schwarzen Strahlers im Spektralbereich (8...14) $\mu\text{m}$ .....	16
<b>Abb. 10:</b> Messfehler durch Fehleinstellung des Emissionsgrades .....	17
<b>Abb. 11:</b> Spektraler Reflexionsgrad verschiedener Aluminiumproben /9/ .....	18
<b>Abb. 12:</b> IR-Aufnahme mit einem Sichtgerät mit pyroelektrischem Vidicon .....	23
<b>Abb. 13:</b> Blockschaltbild eines Thermografiegerätes nach dem Scannerprinzip .....	23
<b>Abb. 14:</b> Prinzipieller Strahlengang in einer Scannerkamera .....	24
<b>Abb. 15:</b> Prinzipieller Strahlengang in einer Focal Plane Array - Kamera .....	24
<b>Abb. 16:</b> Parameter der Bildfeldgeometrie .....	27
<b>Abb. 17:</b> Detektivität (Nachweisvermögen) verschiedener Infrarotdetektoren .....	28
<b>Abb. 18:</b> VARIOSCAN 3 compact und VARIOSCAN 3 PC mit Notebook-PC .....	29
<b>Abb. 19:</b> VARIOSCAN high resolution .....	30
<b>Abb. 20:</b> VARIOSCAN high resolution mit Ethernet- Fernsteuerung durch Notebook-PC .....	30
<b>Abb. 21:</b> Innenaufbau von VARIOSCAN 3 compact, schematisch .....	31
<b>Abb. 22:</b> Thermografiesystem VarioTHERM <sup>TM</sup> head und VarioTHERM <sup>TM</sup> head universal .....	34
<b>Abb. 23:</b> Thermografiesystem VarioCAM <sup>®</sup> und die Industrievariante VarioCAM <sup>®</sup> head .....	36
<b>Abb. 24:</b> Thermografiebild einer durchfeuchteten Trockenbauwand .....	43
<b>Abb. 25:</b> Prinzip einer Leckage .....	44
<b>Abb. 26:</b> Thermografiebild Wandheizung .....	45
<b>Abb. 27:</b> Thermografiebild Wasserleitung .....	45
<b>Abb. 28:</b> Thermografiebild .....	45
<b>Abb. 29:</b> Lokalisierung einer defekter Pumpe .....	49
<b>Abb. 30:</b> Thermische Kontrolle .....	49
<b>Abb. 31:</b> Thermograf bei der Inspektion .....	49
<b>Abb. 32:</b> Zustandsanalyse eines Motors .....	49
<b>Abb. 33:</b> Spektraler Transmissionsgrad von PE-Folie (50 $\mu\text{m}$ ) .....	50
<b>Abb. 34:</b> Tiefziehformteil (Abkühlungsprozess) .....	51
<b>Abb. 35:</b> Temperaturverteilung an einem Spritzgusswerkzeug mit Messpunkten .....	51
<b>Abb. 36:</b> Auswertung der Temperaturverteilung eines Kunststoffzahnrades .....	52
<b>Abb. 37:</b> Temperaturverteilung der Abdeckung eines Kunststoffmüllcontainer .....	52
<b>Abb. 38:</b> pcx-Screenshot von VARIOSCAN 3021 .....	55
<b>Abb. 39:</b> Auswerteprinzip .....	57



## 7. Literaturverzeichnis

- /1/ Schuster, Norbert; Kolobrodov, Valentin  
Infrarotthermographie  
WILEY-VCH Verlag, Berlin 2004, ISBN 3-527-40509-7
- /2/ Stahl, K.; Miosga, G.  
Infrarottechnik  
Hüthig Verlag, Heidelberg 1986, ISBN 3-7785-1368-0
- /3/ Glückert, Udo  
Erfassung und Messung von Wärmestrahlung  
Franzis Verlag, München 1992, ISBN 3-7723-6292-3
- /4/ Wissensspeicher Infrarottechnik  
Fachbuchverlag, Leipzig 1990, ISBN 3-343-00498-7
- /5/ Walther, L.; Gerber, D.  
Infrarotmesstechnik  
Verlag Technik, Berlin 1983
- /6/ Wolfe, William L. Zissis, G. J.  
The infrared handbook  
Office of Naval Research, Washington 1978
- /7/ The infrared and electro-optical systems handbook  
SPIE Optical Engineering Press, Washington 1993, ISBN 0-8194-1072-1
- /8/ Bernhard, Frank  
Technische Temperaturmessung  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004, ISBN 3-540-62672-7
- /9/ Touloukian, Y. S.; DeWitt, D. P.  
Thermophysical properties of matter  
Vol.8: Thermal radiative properties - Metallic elements and alloys  
Vol.9: Thermal radiative properties - Nonmetallic solids  
IFI/Plenum, New York and Washington 1972
- /10/ Technische Temperaturmessungen - Strahlungsthermometrie  
VDI/VDE-Richtlinie 3511, Fachausschuss 2.6 Technische Temperaturmessung  
in VDI/VDE-Handbuch Messtechnik I, Juni 1993