

## Pixelzahl ist **Qualitätskriterium.**

Informationen für die Wahl einer geeigneten Wärmebildkamera.



**Mussten vor einigen Jahren noch mindestens 5.000 Euro für eine Wärmebildkamera investiert werden und war damit die Technologie nur professionellen Thermografen und Industrieunternehmen vorbehalten, so ist die Thermografie längst auch für ein breiteres Spektrum von Anwendungen und Anwendern interessant und erschwinglich geworden. Immer mehr Anbieter, immer mehr Modelle und nun auch noch Wärmebildkamera-Aufsätze für Smartphones: Der Markt für professionelle Wärmebildkameras ist vor allem für Einsteiger unüberschaubar geworden. Dieser Beitrag erläutert die Bedeutung des Detektors als wesentliches Kriterium zur Auswahl der angemessenen Wärmebildkamera.**

Thermografieanwender im Bauhandwerk, im Elektrohandwerk, in der Entwicklung oder in der industriellen Instandhaltung stehen vor der Herausforderung, die geeignete Wärmebildkamera auszuwählen, mit der nutzbringend thermische Analysen von weit entfernten Objekten oder auch von kleinsten Objekten erstellt werden können. Welche Kamera ist am besten und dabei am kostengünstigsten geeignet, um die für eine Anwendung aussage- und beweiskräftigen Wärmebilder von Defekten oder Wärmebrücken zu erstellen?

Die Anwendungsbeschreibungen und technischen Beschreibungen der meisten Hersteller sind häufig schwer verständlich, von den Auswirkungen her unklar und erleichtern den Entscheidungsprozess nur ungenügend. Mit einer Kamera im Einstiegssegment für 1.000 Euro scheinen genauso gut Aufnahmen gemacht werden zu können wie mit einer Profi-Kamera für etwa 6.000 Euro. Was macht den Qualitätsunterschied aus und welche Qualität ist für die angedachte Anwendung erforderlich?

## **Die Qualität des Detektors einer Wärmebildkamera.**

Den größten Einfluss auf das Messergebnis der Thermografie hat der Detektor. Infrarotdetektoren in Wärmebildkameras sind aufgebaut wie Detektoren in Digitalkameras. Der wesentliche Unterschied liegt in der zu detektierenden Wellenlänge. Während Detektoren in Digitalkameras die für das menschliche Auge sichtbaren Wellenlängen erfassen, nimmt ein Infrarotdetektor die für das menschliche Auge nicht sichtbaren Infrarotstrahlungen auf. Zur Bestimmung der Qualität eines Detektors wird zwischen der geometrischen Auflösung und der thermischen Auflösung unterschieden.

Die geometrische Auflösung ist der wichtigste Faktor für die Qualität eines Infrarotbildes. Sie entscheidet darüber, ob thermische Auffälligkeiten im Wärmebild ausreichend erkannt werden können.

Die thermische Auflösung (NETD) wird in Millikelvin (mk) angegeben und benennt den kleinsten Temperaturunterschied, den eine Wärmebildkamera erkennen kann. Bei Objekten mit geringen Temperaturunterschieden ist deshalb die thermische Auflösung sehr wichtig. Je kleiner der Wert der thermischen Auflösung ist, desto besser fällt die Qualität der Messung aus.

Wie bei einer Digitalkamera erfasst auch der Detektor einer Wärmebildkamera im Thermogramm viele Bildpunkte (Pixel), die in einer sogenannten Sensormatrix angeordnet sind. Eine Sensormatrix von 160 x 120 Pixeln umfasst insgesamt 19.200 Pixel und gibt damit auch 19.200 einzelne Messwerte wieder.

Eine Kamera mit einem Detektor von 320 x 240 Pixeln erzeugt daher viermal so viele Messwerte wie eine Kamera von 160 x 120 Pixeln. Dadurch können auch kleinere Objekte innerhalb einer umgebenden großen Fläche, wie etwa eine Wärmebrücke an einer Gebäudefassade, exakt identifiziert werden. Infrarot-Detektoren haben aus technologischen und physikalischen Gründen im Vergleich zu Detektoren von Digitalkameras nur eine geringe Auflösung von 160 x 120, 320 x 240 oder 640 x 480 Pixeln, sehr spezielle Wärmebildkameras 1280 x 960 Pixeln.

Im Einstiegssegment werden sogar bereits Kameras mit Auflösungen ab 80 x 60 Pixel angeboten. Diese geringe Auflösung wirkt sich vor allem dann nachteilig aus, wenn besondere kleine Objekte zu erkennen und zu messen sind - wie etwa ein heißer Draht im Schaltschrank - oder wenn Objekte sich in ein paar Metern Entfernung befinden - wie etwa bei Aufnahmen von einem Gebäude.

| Auflösung: | Anzahl Pixel / Messwerte |
|------------|--------------------------|
| 15 x 15    | 225                      |
| 80 x 60    | 4.800                    |
| 160 x 120  | 19.200                   |
| 320 x 240  | 76.800                   |
| 640 x 480  | 307.200                  |

Tabelle 1: Detektorauflösungen und Anzahl zur Messung verfügbarer Messwerte.

### **IFOVgeo: Sichtfeld und Messabstand.**

Das wesentliche Qualitätskriterium der geometrischen Auflösung wird durch die Bestimmung des sogenannten „momentanen Sichtfelds“ oder „Instantaneous Field of View“ (IFOV-geo) definiert.

Um mit dem IFOVgeo die geometrische Auflösung bestimmen zu können, ist das Sichtfeld (Field of View = FOV) einer Wärmebildkamera relevant. Das Sichtfeld einer Wärmebildkamera ist vergleichbar mit dem Gesichtsfeld beim Menschen. Der Mensch ist es gewohnt,

dass er in der Horizontalen einen Blickwinkel von bis zu 180° abdecken kann.

Das Sichtfeld der Wärmebildkamera wird im Winkelmaß angegeben und bestimmt die für eine Wärmebildkamera sichtbare Fläche. Sein Umfang ist vom Detektor der Wärmebildkamera und vom verwendeten Objektiv abhängig. Bei gleichem Detektor umfassen Weitwinkelobjektive im Gegensatz zu Teleobjektiven ein weit größeres Sichtfeld.

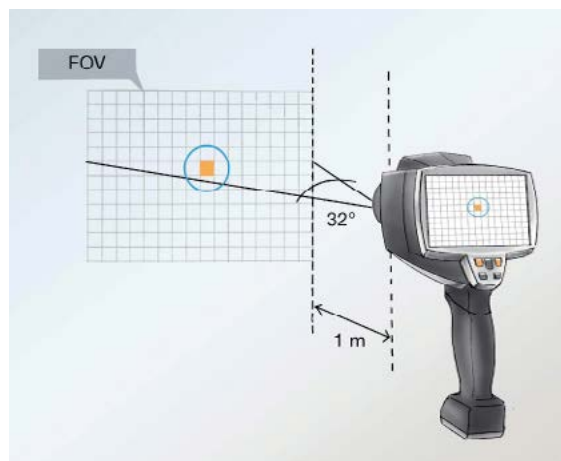


Abbildung 3: Das Sichtfeld einer Wärmebildkamera wird im Winkelmaß, hier 32° in der Horizontalen, angegeben.

In Abhängigkeit von der Entfernung zum gemessenen Objekt werden auf Grund des Sichtfelds größere Abmessungen ins Bild aufgenommen. Da durch die fest vorgegebene Auflösung der Wärmebildkamera die Anzahl der abgespeicherten Pixel gleich bleibt (z. B. 160 x 120 Pixel), sinkt entsprechend bei größerer Entfernung die Genauigkeit dessen, was als kleinstes Objekt, als einzelner Pixel, auf dem Wärmebild noch zu erkennen ist.

Dieses kleinste noch erkennbare Objekt wird als Messfleck bezeichnet und in Milliradian (mrad) angegeben. Bei einer Entfernung von 1 m, einer Auflösung von 160 x 120 Pixeln und einem Objektivöffnungswinkel von 34° (=FOV) umfasst dieser Messfleck beispielsweise eine Sichtfleckgröße von 3,3 mrad. Mit der im Beispiel verwendeten Kamera könnten also in einem Abstand von 1 m zum Messobjekt noch Defekte ab einer Größe von 3,3 mm erkannt werden.

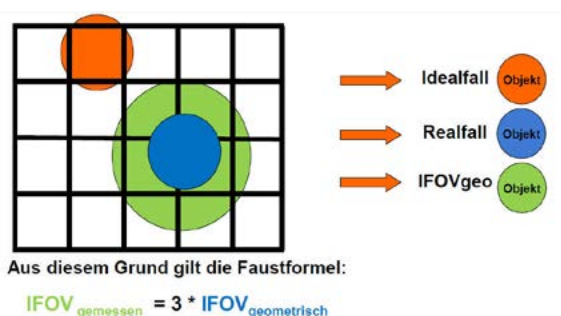


Abbildung 2: Die Abbildung zeigt stark schematisiert die Auflösung eines Detektors. Ein Feld entspricht dabei einem Pixel. Das kleinste tatsächlich messbare Objekt entspricht etwa dem Dreifachen erkennbaren Objekts (IFOVgeo).

Der IFOVgeo ist allerdings nur ein theoretischer Wert, da ein zu messendes Objekt in der Realität nicht in das von der Auflösung einer Kamera vorgegebene Raster passen wird. Für Thermografien kann als Regel angesetzt werden, dass das kleinste real messbare Objekt etwa dem Dreifachen des nach IFOVgeo zu erkennenden Objekts entsprechen wird.

Ausgehend von der Größe des zu thermografierenden Objektes lässt sich für erfahrene Thermografen aus der Anzahl der Pixel, dem Sichtfeld des Objektivs und der Entfernung zum Objekt der IFOVgeo überschlägig ermitteln. Präziser und einfacher ist die Ermittlung mit internetbasierten Tools wie dem IFOV-Rechner der Testo AG unter [www.testo.de/ifov](http://www.testo.de/ifov).

Ist das zu thermografierende Objekt kleiner als der IFOVgeo, dann kann der Thermograf daraus ableiten, dass die Messung des Objektes nicht korrekt sein wird. Zu empfehlen wäre dann, entweder die Distanz zum thermografierenden Objekt zu verringern oder ein anderes Teleobjektiv bzw. eine andere Kamera mit einem besseren IFOVgeo (größerer Detektor/kleineres Sichtfeldverhältnis) zu verwenden.

### Die Bedeutung der geometrischen Auflösung in der Praxis.

Wie wichtig eine gute Auflösung bei gleichem Sichtfeld für die Mess- und Aussagequalität der Wärmebildkamera ist, verdeutlicht das Beispiel in folgender Tabelle. Wird ein Objekt aus 1 m Entfernung mit einem Sichtfeld von 32° x 23° und einer Auflösung von 160 x 120 Pixeln thermografiert, so würden Auffälligkeiten ab einer Größe von 3,3 mm erkannt werden, bei einer Auflösung von 320 x 240 Pixeln sind diese bereits ab 1,7 mm zu erkennen.

diese bereits ab 1,7 mm zu erkennen.

Wärmebildkameras mit eher kleinen Detektoren haben physikalisch bedingt Probleme, detaillierte Messergebnisse zu liefern. Um diesen offensichtlichen Nachteil auszugleichen

| Detektor    | 80 x 60     | 160 x 120 | 320 x 240 | 640 x 480 |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>FOV</b>  | 19,5° x 26° | 32° x 23° | 32° x 23° | 40° x 32° |
| <b>IFOV</b> | 5,6 mrad    | 3,3 mrad  | 1,7 mrad  | 1,13 mrad |
| <b>1 m</b>  | 5,6 mm      | 3,3 mm    | 1,7 mm    | 1,13 mm   |
| <b>2 m</b>  | 11,2 mm     | 6,6 mm    | 3,4 mm    | 2,26 mm   |
| <b>5 m</b>  | 28 mm       | 16,5 mm   | 8,5 mm    | 5,65 mm   |
| <b>10 m</b> | 56 mm       | 33 mm     | 17 mm     | 11,3 mm   |

Tabelle 2: Unterschiedliche geometrische Auflösung der Detektor.

und den IFOVgeo zu optimieren, werden für solche Wärmebildkameras häufig Teleobjektive mit geringerem Sichtfeld verwendet. Rechnerisch zwar plausibel, birgt diese Verfahrensweise in der Praxis aber auch klare Nachteile. Aufgrund des geringen Öffnungswinkels des Objektivs können immer nur kleinere Ausschnitte in einem einzelnen Wärmebild festgehalten werden. Dadurch müssen zur vollständigen Thermografie eines gesamten Objektes oft mehrere Wärmebilder erstellt werden, worunter die Übersichtlichkeit leidet.

Welche konkreten Auswirkungen eine geringere Auflösung des Detektors auf das Messergebnis auch noch haben kann, zeigt folgendes Beispiel: Ein Draht wird durch durchfließenden Strom auf eine tatsächliche Temperatur von 65 °C erhitzt. Die Temperaturentwicklung wird aus 1 m Entfernung alternativ über eine Wärmebildkamera mit einer Auflösung von 160 x 120 Pixeln und über eine Kamera mit 320 x 240 Pixeln kontrolliert: Im Ergebnis zeigt sich eine Temperaturdifferenz von über 10 °C.

#### Woher rührt dieser eklatante Unterschied?

Bei der Kamera mit der geringeren Auflösung ist der erfasste Messfleck für den zu untersuchen Draht zu groß - die umgebende Temperatur wird in die Messung einbezogen und daraus ein Durchschnittswert für den betreffenden Messfleck bestimmt. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen einem Objekt und der Umgebung ist, desto stärker kann die durchschnittliche und damit angezeigte Temperatur des Messflecks von der eigentlichen Temperatur des Objekts (etwa eines Drahts) abweichen. Punktuell können dann auch unentdeckt die aus Sicherheitsgründen vorgegebenen Maximalwerte überschritten werden.



#### INFO-BOX

##### Normen, Richtlinien und Empfehlungen für Anwendungen

Die technisch bedingten Herausforderungen und Problemstellungen bei der Thermografie haben auch Eingang in Normen und Richtlinien gefunden.

Die **DIN EN 13187** sieht für den Nachweis von Wärmebrücken in Gebäuden eine – ohne dies genauer zu spezifizieren – „geeignete Auflösung“ vor.

Die **VDI-Richtlinie 2878** beschreibt im Blatt 1 die Anwendung der Thermografie zur Diagnose in der Instandhaltung. Die **DIN ISO 18434-1** erläutert die Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen mittels Thermografie.

In der **DIN 54162** wird die Qualifizierung und Zertifizierung von Personal für die thermografische Prüfung beschrieben.

Nach Anforderungen der **VdS 2859** (20111-03) müssen Wärmebilddaufnahmen in der Elektrothermografie mindestens eine Auflösung von 320 x 240 Pixeln (76.600 Messpunkten) haben.

#### Weitere Empfehlungen:

- Für Außenaufnahmen von größeren Flächen, etwa bei energetischer Sanierung eines Daches oder Prüfung einer Photovoltaikanlage, sollte eine Wärmebildkamera mit Teleobjektiv verwendet werden. Bei Außenaufnahmen sollte die Kamera sowohl eine möglichst große Auflösung als auch ein möglichst großes Sichtfeld bieten. Damit bleibt die Messgenauigkeit erhalten. Zudem kann die Kamera eine größere Fläche erfassen, wodurch weniger Thermogramme zu erstellen sind.
- Um eine Leckage bei einem Heizungsrohr oder einer Flächenheizung zu lokalisieren, sind auch Wärmebildkameras mit einer geringeren Auflösung von 160 x 120 Pixeln und nur 19.200 Messpunkten ausreichend. Bei dieser Anwendung ist die Qualität der thermischen Auflösung (NETD) entscheidend.

## Lösungen wie SuperResolution optimieren Messqualität.

Damit kleinste Messobjekte oder sehr geringe Temperaturdifferenzen in Schaltschränken, Anlagen oder Maschinen auch ohne noch hochwertigere Detektoren mess- und sichtbar gemacht werden können, haben Hersteller wie Testo fortschrittliche Technologien wie Super-Resolution zur Optimierung der Messqualität entwickelt.

### Wie funktioniert SuperResolution?

Um die Messwerte je Pixel korrekt darzustellen, müssen auf einer Sensorfläche die einzelnen Pixel gegeneinander thermisch isoliert werden. Diese Isolierschicht reagiert nicht auf die Infrarotstrahlung und es werden in diesem Bereich gezielte „blinde Stellen“ erzeugt. Super-Resolution nutzt diese blinden Stellen für die Abspeicherung zusätzlicher Informationen: Die durch natürlichen Tremor (bei jedem Menschen auftretenden) minimalen Bewegungen werden für den Benutzer unmerklich in mehreren leicht versetzten Bildern hintereinander festgehalten. Durch sogenanntes Super-Sampling wird die gesamte Detektormatrix um eine halbe Pixelbreite in jede Richtung verschoben und die so entstandene Bildsequenz zu einem Bild zusammengesetzt. Die „blinden Stellen“ zwischen den Pixeln werden mit diesen zusätzlichen Informationen gefüllt.

Die bei Testo entwickelte Super-Resolution-Technologie ermöglicht damit eine 1,6-fach verbesserte geometrische Auflösung. Durch dieses zum Patent angemeldete Verfahren werden aus Thermografien mit einer Auflösung von 320 x 240 Pixeln Wärmebilder mit 640 x 480 Pixeln und aus 640 x 480 Pixeln gar welche mit 1280 x 960 Pixeln.

|  |           |           |
|--|-----------|-----------|
| Detektorauflösung  | 160 x 120 | 320 x 240 |
| Auflösung mit SuperResolution                                  | 320 x 240 | 640 x 480 |
| FOV  | 32° x 23° | 32° x 23° |
| Kleinstes erkennbare Objekt ohne SuperResolution (Abstand 1 m) | 6,67 mm   | 3,31 mm   |
| Kleinstes erkennbare Objekt mit SuperResolution (Abstand 1 m)  | 4,17 mm   | 2,07 mm   |

Tabelle 3: Vergleichstabelle Darstellung mit und ohne Super Resolution.

**Fazit: Auflösung und Anwendung müssen zueinander passen.**

Kosten und Qualität einer Wärmebildkamera werden maßgeblich durch den Detektor bestimmt. Im Vorfeld ist zu überprüfen, welche geometrische und thermische Auflösung zur professionellen Durchführung der geplanten Anwendung erforderlich ist.

Größe des zu thermografierenden Objekts, voraussichtlicher Abstand zum Messort und gewünschte Detailgenauigkeit sind die entscheidenden Kriterien, die die Mindestanforderungen an den Detektor festlegen. Nur mit dem richtigen Detektor kann die für eine Anwendung passende Aussage- und Beweiskraft und damit der gewünschte Nutzen und die Qualität der Thermogramme gewährleistet werden. Eine Beratung durch den Fachmann und die Durchführung von Testaufnahmen ist in jedem Fall zu empfehlen. Um Thermografie-Fachmann zu werden, bietet bspw. die Testo-Akademie bundesweit Seminare für Einsteiger, Fortgeschrittene und Experten an: [www.testo.de/seminare/thermografie](http://www.testo.de/seminare/thermografie).



#### INFO-BOX

##### **Softwareanalyse erhöht Nutzen der Thermografie**

Die Benutzung einer Software zur Bearbeitung, Visualisierung und Archivierung der Thermografien ist grundsätzlich zu empfehlen. Zum Beispiel können mit der bei Testo kostenlosen Thermografie-Software IRSoft die Thermogramme bearbeitet und präzise analysiert werden. Für die professionelle Bearbeitung der Wärmebilder stehen umfassende Untersuchungsfunktionen zur Verfügung.

So können beispielsweise nachträglich die unterschiedlichen Emissionsgrade verschiedener Materialien für Bildbereiche bis hin zu einzelnen Pixeln korrigiert werden. Zur Visualisierung kritischer Temperaturen im Bild können mit der Thermografie-Analyse-Software sowohl Über- und Unterschreitungen von Grenzwerten als auch Pixel in einem bestimmten Temperaturbereich hervorgehoben werden. Außerdem können Messpunkte gesetzt, Hot- und Cold-Spots ermittelt und Kommentare zur thermografischen Anwendung verfasst werden. Eine Exportfunktion reduziert den Aufwand für Dokumentation und Präsentation.



## Das 1x1 der Thermografie

### Thermografie

Thermografie ist die bildliche Darstellung der Temperaturverteilung an der Oberfläche eines festen Körpers. Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (-273,15 °C) sendet eine elektromagnetische Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) aus. Dabei gilt die Regel: Je höher die Strahlungsintensität, desto höher ist die Oberflächentemperatur. Die Infrarotstrahlung wird dabei mittels eines Germanium-Objektives auf den Detektor übertragen. Der Detektor empfängt die Infrarot-Strahlung und wandelt sie in ein elektrisches Signal um. Die thermische Auflösung wird in Millikelvin (mK) angegeben, die geometrische Auflösung des Detektors wird in Pixeln angegeben. Bei einer Auflösung einer Kamera von 320 x 240 Pixeln entstehen 76.600 Messpunkte.

### Infrarotstrahlung

Die Infrarotstrahlung erstreckt sich im Wellenlängenbereich von 0,78 m bis 1000 m (= 1 mm) und grenzt somit an den Wellenlängenbereich für Licht (0,38 – 0,78 µm) an. Wärmebildkameras messen die langwellige Infrarotstrahlung im Bereich von 8 m bis 14 m, da die Atmosphäre in diesem Wellenlängenbereich sehr durchlässig für Infrarotstrahlung ist.

### Emissionsgrad ( $\epsilon$ )

Der Emissionsgrad ( $\epsilon$ ) ist das Maß für die Fähigkeit eines Materials, Infrarot-Strahlung zu emittieren (auszusenden). Der Emissionsgrad ist von der Oberflächenbeschaffenheit, dem Material, bei einigen Materialien auch von der Temperatur des Messobjektes sowie dem Spektralbereich der verwendeten Wärmebildkamera abhängig. Der maximale Emissionsgrad  $\epsilon = 1$  tritt in der Realität nie auf. Objekte mit einem Emissionsgrad  $\epsilon$  0,8 – 0,95 gelten als gut thermografierbar.

### Reflexionsgrad ( $\rho$ )

Der Reflexionsgrad ( $\rho$ ) beschreibt die Fähigkeit eines Materials, Infrarot-Strahlung zu reflektieren. Der Reflexionsgrad hängt von der Oberflächenbeschaffen-

heit, der Temperatur und der Art des Materials ab. In der Regel reflektieren glatte, polierte Oberflächen stärker als raue, matte Oberflächen desselben Materials.

### Transmissionsgrad ( $\tau$ )

Der Transmissionsgrad ( $\tau$ ) ist das Maß für die Fähigkeit eines Materials, Infrarotstrahlung durchzulassen. Er hängt von der Dicke und der Art des Materials ab. Die meisten Materialien sind nicht durchlässig für langwellige Infrarotstrahlung.

### Instantaneous Field of View (IFOVgeo)

Das Instantaneous Field of View (IFOVgeo) gibt die Auflösung des Kamerasystems an. Die Messgröße beschreibt, welche Details das Kamerasystem in Abhängigkeit des Detektors und des Objektivs auflösen kann. Die Auflösung des Kamerasystems (IFOVgeo) wird in mrad (=Milliradian) angegeben und beschreibt das kleinste Objekt, das in Abhängigkeit vom Messabstand, auf dem Wärmebild noch abgebildet werden kann. Auf dem Wärmebild entspricht die Größe dieses Objektes einem Pixel.

### Measurement Instantaneous Field of View (IFOVmeas)

Das Measurement Instantaneous Field of View (IFOVmeas) ist die Bezeichnung für das kleinste Objekt, dessen Temperatur von der Wärmebildkamera genau gemessen werden kann. Es ist zwei- bis dreimal größer als das kleinste erkennbare Objekt (IFOVgeo). Als Faustregel gilt:  $IFOVmeas \approx 3 \times IFOVgeo$ . IFOVmeas wird auch der kleinste zu messende Messfleck genannt.

### Noise Equivalent Temperature Difference (NETD)

Die Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) ist die Kennzahl für den kleinstmöglichen Temperaturunterschied, der von der Kamera aufgelöst werden kann. Je kleiner der Wert der thermischen Auflösung ist, desto besser ist die Qualität der Messung.