

Mark B.

INFRAROT-THERMOGRAFIE

Eine Einführung für Beginner



INHALT

Vorwort

IR-Kameras für Jedermann

Die wichtigsten Kamera-Eigenschaften

Thermografie-Grundlagen

 Elektromagnetische Strahlung

 Probleme bei der Thermografie

 Wärmekapazität

 Phasenübergänge & Wärmeübertragung

 Wärmedurchgang & thermische Trägheit

 Strahler-Typen

 Äußere Einflüsse

 Einflüsse auf den Emissionsgrad

 Hohlraumeffekt

Temperaturmessung

 Berührende Temperaturmessung

 Berührungslose Temperaturmessung

 Umgebungs- bzw. reflektierte Temperatur

 Reflektionen

 Messfehler

 Bestimmen des Emissionsgrades

Messtechnisch Relevante Geräteeigenschaften im Detail

Thermische Auflösung (NETD)
Geometrische Auflösung (FOV / IVOF)

Bildliche Darstellung

Palette
Span bzw. Kontrast
Level bzw. Ausschnitt
Autolevel

Bau-Thermografie
Elektrothermografie
Elektronik-Thermografie
Medizinische Thermografie
Drohnen- bzw. UAV-Thermografie
Analysesoftware
Die häufigsten Fehler
Anhang 1

 Tabelle gängiger Emisionswerte

Anhang 2

 Tabelle Wärmekapazität / Wärmeleitkoeffizient

Buchempfehlungen

VORWORT

Bis vor wenigen Jahren waren Infrarot- oder Wärmebildkameras für die meisten Leute unerschwinglich. Mittlerweile überfluten Hersteller aus Fernost den Markt mit bezahlbaren und teilweise sogar hervorragenden Kameras, die selbst für Privatpersonen erschwinglich sind.

Aber auch die etablierten Hersteller wie Flir und Fluke haben einige günstige Einsteigermodelle im Programm mit denen man für einen Großteil der möglichen Aufgaben gut gerüstet ist!

Die Wärmebildtechnik ermöglicht uns Perspektiven um Zusammenhänge zu erkennen, die wir mit unseren Augen so nicht sehen würden und die wir mit anderen Hilfsmitteln schwerer erkennen würden.

Thermografie hält auch mehr und mehr Einzug in neue Bereiche - in Deutschland empfiehlt der VdS (*VdS 2858*) eine Wärmebildprüfung bei Inbetriebnahme und der jährlichen Prüfung von Schaltschränken.

Dabei richtet sich dieses Buch nicht primär an Thermografen oder jene die gerade eine Ausbildung zum Thermografen machen. Vielmehr versuche ich diese spannende Technik interessierten nahezubringen und Zusammenhänge einfach und anhand kleiner und einfach selbst nachzumachender Versuche zu vermitteln.

IR-KAMERAS FÜR JEDERMANN

Bevor wir uns mit den Grundlagen näher beschäftigen will, ich Ihnen kurz Erklären wie sich bezahlbare Infrarot-Kameras entwickelt haben. Dabei werden wir uns auch gleich einen der wichtigsten Faktoren einer Wärmebildkamera, die Infrarot-Auflösung, etwas näher ansehen.

Im Vergleich zu Tageslichtkameras gibt es bei Wärmebildkameras extrem geringe Auflösungen und daher kann man hier getrost sagen - je höher die Auflösung umso besser.

Im Jahr 2013 hat Fluke das VT02 vorgestellt. Dieses Gerät sollte einen Zwischenschritt zwischen IR-Thermometer und einer echten Wärmebildkamera darstellen. Darum steht VT auch für Visual Thermometer.

Die Auflösung war so schlecht, dass diese nicht mal im offiziellen Datenblatt des Geräts erwähnt wurde. Auf Grund der optischen Leistung des Gerätes wird die Auflösung ca. 24x24 bis 32x32 Pixel betragen. Dennoch konnte man durch die Überblendung des Wärmebildes mit einem Kamerabild ungefähr sehen wo die Hitzeentwicklung stattfindet. Um zu verstehen warum dies eine Revolution war, sollten wir kurz klären was eine Wärmebildkamera eigentlich ist...

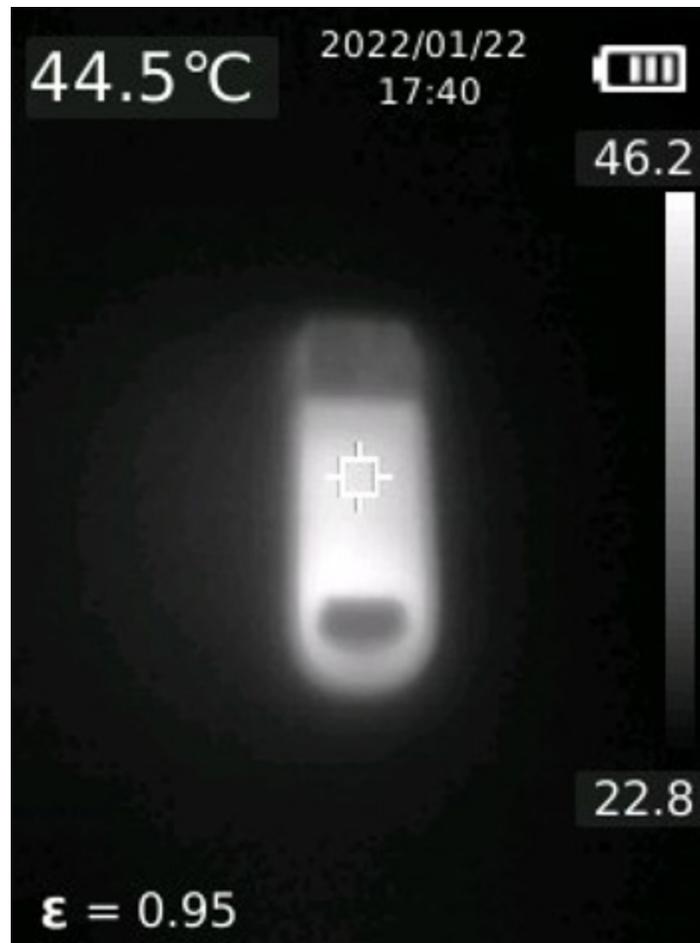
Wir alle kennen IR-Thermometer mit denen man berührungslos die Temperatur messen kann. Eine Thermokamera ist im Grunde genau das gleiche nur dass jeder Pixel ein solches Infrarot-Thermometer ist und die IR-

Kamera die ganzen einzelnen Messpunkte zu einem Gesamtbild zusammenfügt.

Bei einem IR-Thermometer ist das Verhältnis zwischen Entfernung und Messfeldgröße sehr wichtig für eine genaue Messung - sehen wir uns dies anhand folgender Thermogramme genauer an:



Zu weit weg! Das Objekt füllt den Messfleck nicht komplett aus.



Der Messfleck passt nun auf das zu messende Objekt.

Thermokameras zeigen den Messfleck mit einem kleinen Quadrat an. Bei Infrarot-Thermometern ist oftmals nur ein einzelner Laser verbaut und derjenige der das Gerät bedient muss sich den Messfleck bzw. dessen Größe denken. Das ist jedoch fehleranfällig!

Ich habe hier einen USB-Stick auf einen Schreibtisch gelegt und die zwei Thermogramme aus 2 Metern Abstand und aus 15 cm Abstand aufgenommen.

Beim ersten Bild ist der kleine weiße Punkt zwar erkennbar aber die Temperaturmessung zeigt **25,9°C** an. Dieser Messwert ist die Durchschnitts-temperatur innerhalb des Messbereichs (*das Quadrat mit den Linien in der Bildmitte*).

Sobald der Messfleck zumindest komplett ausgefüllt ist oder in das zu messende Objekt hineinpasst, stimmt die Temperaturmessung und es werden die korrekten **44,5°C** angezeigt.

Ein Messfleck ist dabei entweder rund oder quadratisch und das macht zB die Messung von einzelnen länglichen Leitungen schwerer außer man kann an diese so nahe heran, dass der Messfleck in die Leitung hineinpasst.

Ein visuelles Thermometer zeigt uns also ob wir richtige Ergebnisse bei der Messung erhalten oder nicht bzw. zeigt es uns ob wir näher heran gehen müssen. Außerdem erleichtert es die Kommunikation mit anderen Leuten denn ein Bild sagt bekanntlich mehr als tausend Worte!

Damals kosteten richtige Wärmebildkameras einige tausend Euro und das VT02 war für deutlich weniger als 1000 EUR zu haben und ein 4x höher auflösendes VT04 kam sehr kurz darauf heraus. Schnell pendelte sich der Preis um die 600 Euro ein und damit wurde ein ganz neuer Markt geschaffen.

2014 steigt dann Flir in diesen Markt ein mit einem etwas höher auflösenden IR-Pyrometer; dem TG165 mit 80x60 Pixel Auflösung. Auch dieses Gerät war binnen kürzester Zeit etwas im Preis gefallen und für wenige hundert Euro zu haben.

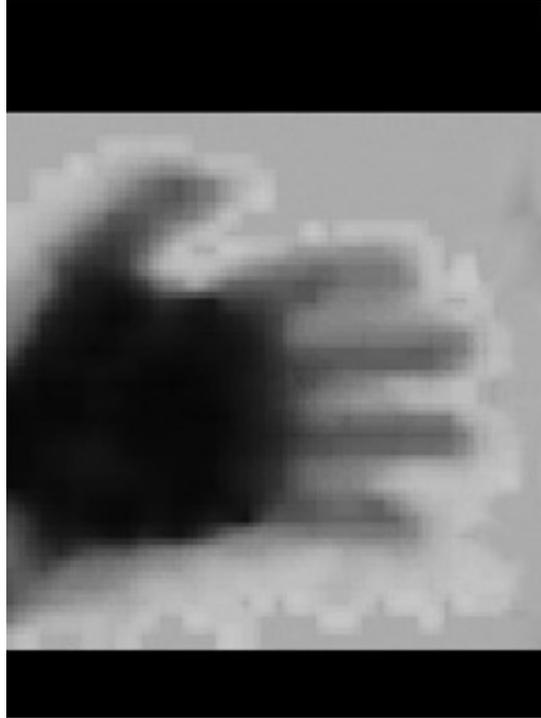
Neben den zwei großen Herstellern in dieser Branche drängten diverse fernöstliche Hersteller auf den Markt. Diese baten ähnliche Produkte wie das VT02, VT04 und TG165 für einen noch geringeren Preis an.

Kürzlich hat ein etablierter chinesischer Hersteller von Infrarot-Bolometern namens InfiRay angefangen günstige und sehr gute Einsteiger-Geräte wie die C200/C210 oder P200 auf den Markt zu bringen.

Außerdem ist Hikvision mit seiner Marke Hikmicro in den IR-Kameramarkt eingestiegen und hat mit Modellen wie einer E1L, B20, Pocket2 oder M10 Geräte auf den Markt gebracht die Auflösungen von 160x120 Pixeln unter 500 Euro und Auflösungen wie 256x192 Pixel für etwas mehr als 600 Euro bieten. Die M10 bietet für ca. 1200 eine manuell fokussierbare Kamera mit echter Makro-Funktion.

Selbst die etablierten großen Hersteller haben mittlerweile einige Einsteigermodelle im Programm, die mit Auflösungen von 120x90 und 160x120 Pixeln durchaus für viele Bereiche ausreichend gute Auflösung bieten um ordentlich damit arbeiten zu können! Dabei sind wir immer noch weit unter der 1.000 Euro Marke. Spitzenreiter in Punkto Auflösung ist die Firma Seek mit 320x240 Pixeln für deutlich unter 1.000 Euro. Allerdings rauschen Seek-Sensoren deutlich stärker und die etwas blässeren Farben und der damit geringere Kontrast gepaart mit der fehlenden Analysesoftware sind Nachteile, die kein anderer der genannten Hersteller hat.

Wir sind mittlerweile an einem Punkt an dem Thermografie für jeden interessierten nutzbar und bezahlbar wird. Sehen wir uns nun anhand einiger Beispiele an, welche Entwicklung in den letzten paar Jahren stattgefunden hat:



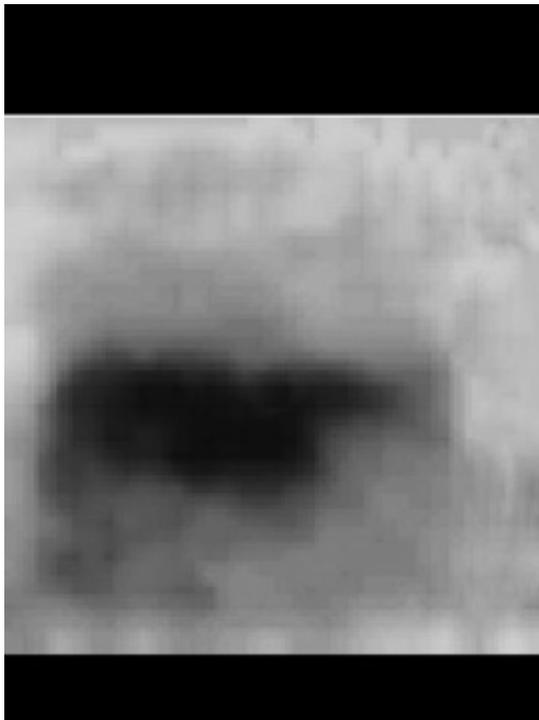
32x32 Pixel



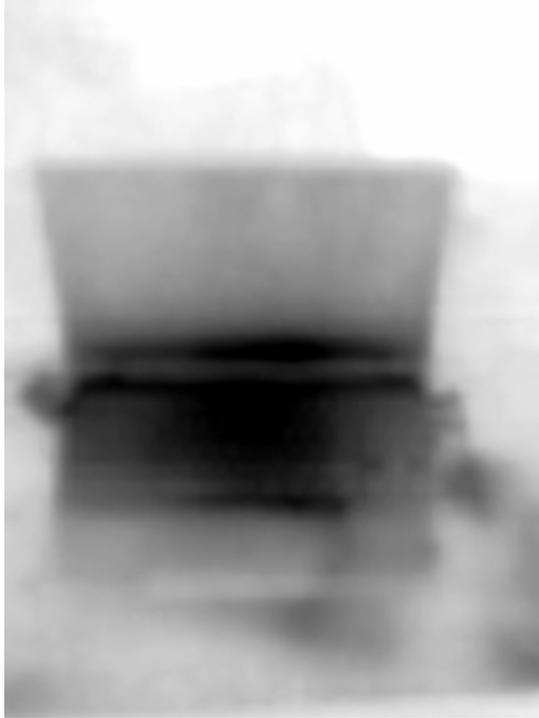
80x60 Pixel



256x192 Pixel



32x32 Pixel



80x60 Pixel



256x192 Pixel

Die Kameras mit den 32x32 Pixel Sensoren sind zwar schon ab 150 Euro zu haben aber wenn Sie mich fragen ist das Geldverschwendung denn ab 250 - 300 Euro bekommen Sie 80x60 Pixel Sensoren!

In Punkto Preis / Leistung sind die 160x120 - 320x240 Pixel Sensoren die Spitzenreiter. Man bekommt entsprechende Kameras für 400 - 800 Euro zu kaufen.

Im Vergleich zu einer 32x32 Pixel Kamera kann man mit dem 3 - 4 fachen Budget die Auflösung um den Faktor 19 - 77 steigern.

Jenseits der 320x240 Pixel Marke explodieren die Preise für Kameras förmlich. Kameras, die 640x480 Pixel Auflösung bieten, kosten dann je nach Marke und Modell so viel wie ein fabrikneuer Kleinwagen!

Je höher die Auflösung umso kleinere und feinere Details kann man messen aber High-End Kameras bieten darüber hinaus natürlich noch viele weitere Zusatzfunktionen wie wechselbare Objektive, einstellbarer Fokus, Zoom, höhere Genauigkeit, größerer Temperaturbereich, etc.

Mit den günstigen Preisen für Einsteiger Infrarot-Kameras kann sich jeder Installateur, Elektriker, Elektroniker, Mechaniker oder Heimanwender diese Technik leisten und sehr viele Anwendungen sind mit einfachen Kameras mit festem Fokus und einer Auflösung zwischen 160x120 und 320x240 gut machbar!

Hier liegt auch der Sweetspot und daher würde ich keine Kamera empfehlen die weniger als 160x120 Pixel Auflösung hat. In diesem Segment ist auch die meiste Bewegung im Markt und viele neue Hersteller steigen mit Kameras in diesem Bereich ein.

DIE WICHTIGSTEN KAMERA-EIGENSCHAFTEN

Es gibt verschiedenste weitere Faktoren bei einer Wärmebildkamera zu bedenken.

Viele Modelle haben neben einer IR-Kamera auch eine Tageslicht-Kamera und erlauben es die beiden Bilder zusammenzurechnen um Kanten und Strukturen besser sichtbar zu machen. Die beste Option ist hierbei eine Technik bei der nur die Kanten überblendet werden. Dies sorgt für den Eindruck, dass die Kamera eine deutlich höhere Auflösung hätte:

Je nach Hersteller hat diese Technik verschiedene Namen:

- MSX (*Flir*)
- iMIX (*InfiRay*)
- Fusion (*Hikmicro*)

Abgesehen davon gibt es eine einfachere Realbildüberblendung die sich in den meisten Fällen Fusion nennt:



InfiRay C210 - Wärmebild



InfiRay C210 - iMIX



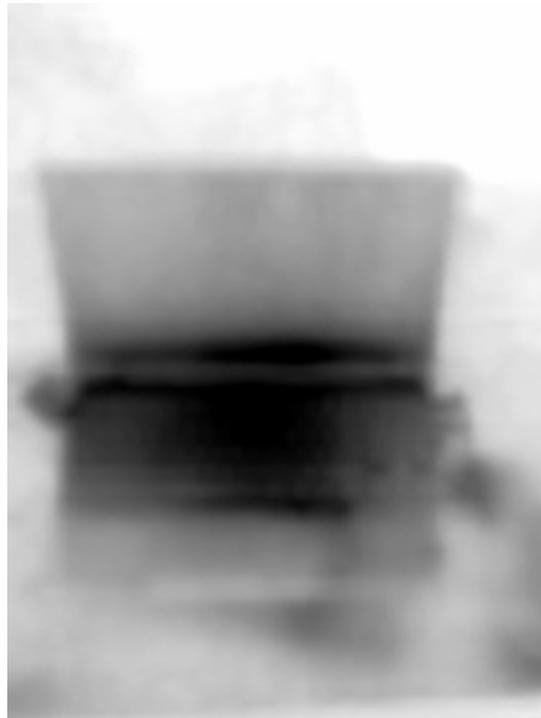
InfiRay C210 - Fusion (50%)

Wir sehen hier gut wie die Kantenbetonung mit iMIX das Bild nochmal klarer macht, ohne die Farbpalette zu verändern.

Fusion hingegen sorgt für deutlich ausgewaschenerere Farben und mögliche Fehleinschätzungen. Nun wirken einige der Kabel im Bild als wären diese warm aber in Wirklichkeit waren diese gelb bzw. rot und die Farbe auf dem Realbild kommt nun langsam durch und verfälscht das Thermogramm. Genau darum finde ich derartige Techniken nicht gut vor allem wenn die Tageslichtkamera ein färbiges Bild aufnimmt!

Die versetzt angeordneten Kameras müssen die Bilder deckungsgleich überblenden und daher muss man der Kamera den Arbeitsabstand ständig mitteilen (*Parallaxenproblem*). Ab einer gewissen Grenze (*meist 30-50cm*) ist der Parallaxenausgleich nicht mehr möglich und man kann nur noch mit dem Wärmebild arbeiten!

Vor allem Kameras mit geringerer Auflösung (zB *80x60 Pixel*) profitieren sehr stark von diesem Effekt:



80x60 Pixel - Wärmebild



80x60 Pixel - MSX



256x192 Pixel - Wärmebild

Wir sehen hier auch wie MSX zwar sehr viele Detail zurückholt damit man sich besser im Bild orientieren kann. Aber im konkreten Beispiel wird das Wärmebild auch etwas verwaschen.

Trotzdem ist eine höhere Auflösung immer vorzuziehen denn für eine zuverlässige Temperaturmessung müssen 3x3 oder besser noch 5x5 Pixel herangezogen werden. Je mehr Pixel wir auf der Fläche haben, umso kleiner sind die messbaren Punkte.

Man spricht hier auch vom IVOF (*Instantaneous field of view*). Dies ist die Größe eines Detektorpixels in Abhängigkeit des Aufnahmeabstandes. Der IFOV bestimmt sich aus der Anzahl der Pixel und der Brennweite des Objektivs. Die Brennweite des Objektivs bestimmt das Blickfeld, das auch als FOV (*Field of View*) bezeichnet wird. Dieser Wert wird in Datenblättern in mrad (*Milliradians*) angegeben und lässt sich mit FOV-Rechnern umrechnen:

https://flir.custhelp.com/app/fl_download_datasheets

Die Formel um die Größe eines Detektorelements anhand des Abstandes auszurechnen ist folgende:

$(\text{mrad} / 1000) * \text{Entfernung}$

Nehmen wir zB die InfiRay C210 und rechnen das Beispiel mit dem USB-Stick zur Übung durch:

$(3,8 \text{ mrad} / 1000) * 2100\text{mm} = 7,98\text{mm}$

Rechnen wir grob mit 8mm dann haben wir ein Messfeld von 24x24mm bei einem 3x3er Raster und 40x40mm beim 5x5er Raster. Damit wird auch klar, dass der 12x28mm große USB-Stick das Messfeld nicht ausfüllen konnte!

Ich werde Sie in diesem Buch nicht mit sehr vielen Formeln und Berechnungen quälen - diese können Sie gerne im Rahmen einer ITC-Zertifizierung lernen aber die oben genannte Formel sollten Sie unbedingt kennen.

Rechnen Sie mit Millimetern, dann ist das Ergebnis in Millimetern zu verstehen. Rechnen Sie in Centimetern, dann erhalten Sie die Messfeldgröße in Centimetern.

Im Vergleich dazu hat eine Hikmicro M10 mit dem engeren Sichtfeld (*FOV*) bei 2100mm eine Detektorgröße von 5,75mm ($2,75\text{mrad} / 1000 * 2100$) und damit eine minimale Messfeldgröße von $17,25 \times 17,25\text{mm}$.

Als nächstes wollen wir uns das Field of View (*FOV*) an einem Beispiel ansehen. Dieses bestimmt, wie bereits gesagt, wie groß der Bildausschnitt ist, auf den sich die Messpunkte verteilen:

Vergleichen wir dazu zwei Kameras: