



**Falconing**

Flying  
Viewing  
Marketing  
Inspecting

## Thermografie Grundlagen

---

Falconing Andreas Schröter  
Beethovenstr. 9  
40670 Meerbusch  
[andreas.schroeter@falconing.de](mailto:andreas.schroeter@falconing.de)

[www.falconing.de](http://www.falconing.de)

02159 6789-31

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Darstellung der Wärmestrahlungsbilder .....	2
3	Physikalische Grundlagen der Thermografie .....	3
3.1	Elektromagnetische Strahlung .....	3
3.2	Einstrahlung, Absorption, Reflektion, Transmission .....	4
4	Kameratechnik.....	5
5	Auswertungs-Software.....	5
6	Anwendungsbereiche und deren Randbedingungen.....	5
6.1	Bauthermografie.....	5
6.2	Thermografie von Photovoltaik Modulen und Anlagen.....	5
7	Zusammenfassung .....	7

### 1 Einleitung

Thermografie ist den meisten wohl aus dem Bauwesen bekannt, wo insbesondere die Wärmedämmung von Häusern untersucht und Mängel anschaulich dargestellt werden können. Auch gerade diese Darstellungen in bunten Falschfarbenbildern sind geläufig. Gerade hier lauert aber auch die Möglichkeit einer Fehlberatung, da die Interpretation dieser Darstellungen Sachverstand erfordert. Wir möchten unseren interessierten Kunden hiermit einen kurzen Überblick über die Materie und die Einsatzmöglichkeiten bieten.

Wir setzen Thermografie in einer besonderen Weise ein, da unsere Leichtbau Wärmebildkamera an einem Multikopter (Drohne) montiert ist und somit Luftbilder aus Perspektiven möglich sind, die mit Handkameras, selbst mit Aufstiegshilfen, Steigern oder Gerüsten unmöglich wären.

Generell gestattet die Thermografie durch das Aufspüren von Temperaturanomalien konstruktive, materialbedingte oder elektrische Mängel an Gebäuden oder Industrieanlagen aufzudecken – hierzu gehören im Speziellen auch Photovoltaikanlagen, da deren Defekte durch Erwärmung auffällig werden. Ertragseinbußen können durch regelmäßige Inspektion und Wartung vermieden werden.

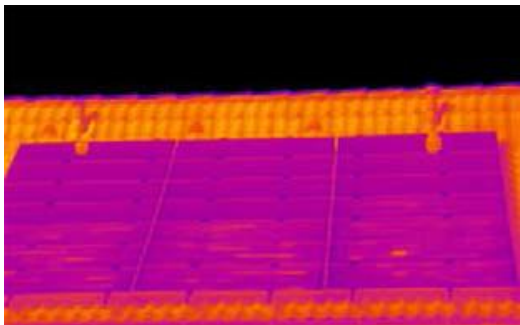
### 2 Darstellung der Wärmestrahlungsbilder

Statt mit den physikalischen Grundlagen zu beginnen, möchten wir hier zunächst die Darstellung der Wärmestrahlung für die Auswertung in Gutachten erläutern – die sogenannte Falschfarbendarstellung.

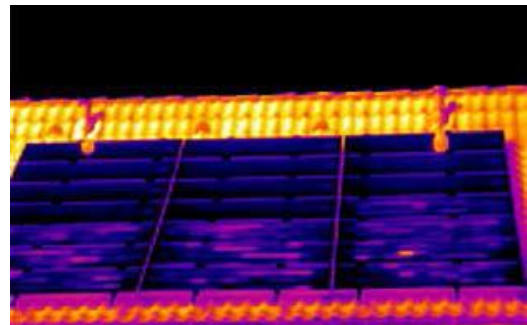
Die Wärmebildkamera registriert die Wärmestrahlung, die in Richtung der Kamera von Objekten ausgestrahlt wird. Grundsätzlich würde man diese Strahlung Temperaturen

zuordnen – zu den Details kommen wir später noch. Ziel ist es daher, ein „Temperaturbild“ durch eine berührungslose Messung zu bekommen. Menschen können aber im Allgemeinen keine „Temperaturen“ sehen, so wie wir andererseits auch keine Röntgenstrahlen sehen können. Man wählt daher den Weg, dass man die Strahlungsintensität entweder in Grauwerten wiedergibt (starke Strahlung hell, wenig Strahlung dunkel) oder eine Farbskala aus dem für Menschen sichtbaren Bereich zuordnet.

Die Zuordnung der Farbskala (Start, Ende, Verlauf, Spreizung) ist willkürlich und sollte vom Anwendungsfall abhängen. Sachgerecht eingesetzt, ermöglicht die farbige Darstellung, dass relevante Temperaturabweichungen sehr deutlich dargestellt werden können und die Auswertung vereinfacht wird. Die Falschfarben Darstellung kann aber auch unsachgemäß oder absichtlich irreführend eingesetzt werden. So suggerieren blaue Farbtöne Kälte und rote Wärme – wobei die Zuordnung der Farben, wie gesagt, willkürlich ist.



Automatische Wahl der Falschfarben. Foto: Testo AG



Manuelle Wahl der Falschfarben. Foto: Testo AG

Daneben spielen die physikalischen Eigenschaften der Objekte im Spektralbereich der Wärmestrahlung eine wichtige Rolle, so dass wir uns von unseren normalen Sehgewohnheiten verabschieden müssen, wenn Wärmebildszenen betrachtet werden. So ist z.B. Glas für sichtbares Licht transparent, wogegen es hinsichtlich Wärmestrahlung nahezu undurchlässig ist.

### **3 Physikalische Grundlagen der Thermografie**

Hier sollen die relevanten Aspekte für den Einsatz der Thermografie dargestellt werden. Tiefergehende Literatur ist auf unserer Web-Site [www.falconing.de](http://www.falconing.de) aufgeführt.

#### **3.1 Elektromagnetische Strahlung**

Elektromagnetische Strahlung umgibt uns in vielfältiger Form. Eine Einteilung erfolgt anhand der Wellenlänge oder Frequenz, die über eine Konstante (Lichtgeschwindigkeit) verknüpft sind. Einen kleinen Ausschnitt des Frequenzspektrums bezeichnen wir als sichtbares Licht. Den Sinneseindruck weißen Lichts bekommen wir aus der Überlagerung vieler Frequenzanteile, denen das Gehirn den Sinneseindruck verschiedener Farben zuordnet (Aufspaltung des weißen Lichts durch ein Prisma ergibt den Regenbogen Farbverlauf mit Wellenlängen zwischen 400 und 780 nm).

Hochfrequente Strahlung ist für uns unsichtbar, löst aber chemische und biologische Reaktionen (Ultraviolett) aus und kann technisch auch für andere bildgebende Verfahren (Röntgen <1 nm) genutzt werden.

Niederfrequente Strahlung (Infrarot) ist ebenfalls unsichtbar, aber als Sinneseindruck Wärme spürbar. Wenige Schlangenarten können auch Wärme sehen – mit einem speziellen Sinnesorgan.

Thermografie schafft ein künstliches Sinnesorgan für diese niederfrequente Strahlung.

Die Temperatur eines Körpers kann einer spezifischen Wellenlänge zugeordnet werden. Ein temperierter Körper strahlt aber nicht nur diese eine Frequenz ab, sondern ein komplettes Spektrum. Dieses Spektrum hat aber ein charakteristisches Intensitätsmaximum bei einer bestimmten Wellenlänge. So hat die Oberfläche der Sonne eine Temperatur von 5.800 K ( $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$ ) und eine Intensitätsmaximum bei 500 nm. Dieses Maximum liegt mitten im für uns sichtbaren Bereich – d.h. die Augen haben sich während der Evolution auf dieses Maximum eingestellt. Die Sonne strahlt aber, wie wir spüren, z.B. auch im infraroten Bereich ab.

Weitere Beispiele: Glühendes Eisen hat eine Temperatur von 1.200 K und strahlt im Maximum bei 2,42  $\mu\text{m}$ ; Wasser im Siedepunkt bei 373 K strahlt bei 7,77  $\mu\text{m}$ ; 37  $^{\circ}\text{C}$  Körpertemperatur entspricht 9,35  $\mu\text{m}$  und eine Hausaußenwand bei -5  $^{\circ}\text{C}$  strahlt bei 10,81  $\mu\text{m}$ .

Glühendes Eisen können wir erkennen, weil ein Teil des Spektrums des heißen Strahlers im für uns sichtbaren (roten) Bereich liegt, wenngleich das Maximum außerhalb des sichtbaren Bereichs liegt.

Abhängig vom Anwendungsgebiet (z.B. Hüttenwesen oder Bauthermografie), muss die Thermografiekamera für einen bestimmten Ausschnitt des Infrarotspektrums optimiert bzw. korrigiert werden.

### **3.2 Einstrahlung, Absorption, Reflektion, Transmission**

Bei der Interpretation einer Thermografischen Szene reicht diese Zuordnung allerdings nicht aus. Andere Effekte, die wir auch aus dem sichtbaren Spektrum kennen, beeinflussen die aufgenommene Strahlungsintensität. Wärmestrahlung wird absorbiert, reflektiert und durchdringt Körper abhängig von dessen Zusammensetzung bzw. dessen spezifischen physikalischen Eigenschaften. Gerade hier müssen wir aber beachten, dass diese Eigenschaften von der Frequenz bzw. Wellenlänge der Strahlung anhängen. Bereits oben wurde das Beispiel von Glas genannt, das im sichtbaren Bereich durchsichtig, im Infrarot-Bereich aber nahezu undurchsichtig ist. Daher sind die Objektive von Thermografiekameras auch nicht aus Quarzglas, sondern aus Germanium. Ein geschulter Blick und Materialkenntnis ist notwendig, um die Szene richtig zu interpretieren. Ungünstige Perspektiven führen zu Spiegelungen, falsche Aufnahmewinkel zu Fehlmessungen und müssen vermieden werden. Für manche Einsatzgebiete ist die Umgebungsstrahlung eine bedeutende Einflussgröße und muss reduziert werden (z.B. durch Aufnahmen in der Nacht), in anderen Fällen muss eine Mindesteinstrahlung vorliegen, um Effekte zu erkennen (z.B. ca. 600  $\text{W}/\text{m}^2$  bei Photovoltaik Thermografie).

## **4 Kameratechnik**

Bei der hier beschriebenen Thermografie werden Raster aus Detektoren gebildet, die eine Auflösung im Bereich von bis zu VGA Kameras haben (160 x 120 bis 640 x 480 Pixel). Damit sind gut auflösende Einzelbilder und auch Videos möglich.

Bei Videos liegt die Bildfrequenz bei bis zu 80 Hz.

Die thermische Auflösung liegt im Bereich von 0,04 bis 0,08 K, so dass kleinste Temperaturdifferenzen aufgespürt werden können.

Einsatzgebiete und Temperaturbereiche erfordern eine genaue Kalibrierung. Daher sind Festlegungen auf bestimmte Temperaturbereiche notwendig (z.B.: -20 °C bis 100 °C, 0 °C bis 250 °C, 150 °C bis 900 °C oder 200 °C bis 1.500 °C).

Wechselobjektive gestatten es, das Messfeld oder die Aufnahmedistanz zu variieren bzw. der Anwendung anzupassen. Der Field of View (FOV) liegt zwischen 13° x 10° und 38° x 29°.

Die Kameras speichern die Aufnahmen oder Videos als Rohdaten – d.h. die gemessenen Strahlungswerte. Die Auswertung erfolgt live oder zeitversetzt als Nachbearbeitung mittels einer Spezialsoftware.

## **5 Auswertungs-Software**

Die Begutachtung der Messergebnisse erfolgt mit Hilfe einer Spezialsoftware. Sie gestattet die Zuordnung von Farbverläufen zu den Messwerten, um damit die kritischen Temperaturbereiche leichter analysieren zu können. So entsteht ein farbiges Bild oder Video von der Szene oder dem Überflug mit dem Multikopter. Evtl. wird bei der Aufnahme parallel noch eine Kamera im sichtbaren Bereich betrieben, um beide Ansichten zur Analyse verfügbar zu haben. Die Software unterstützt den Gutachter noch durch weitere Features über Bereichs-Mittelwertbildung, Schwellwerte, Verlaufsanalysen etc.

## **6 Anwendungsbereiche und deren Randbedingungen**

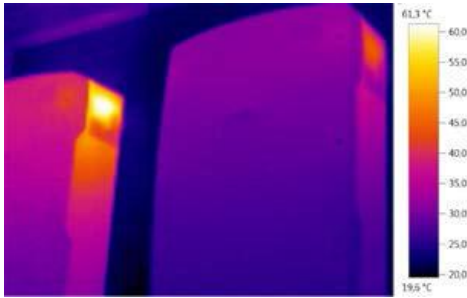
### **6.1 Bauthermografie**

Wärmebrücken und andere Baumängel können mit der Thermografie relativ leicht aufgedeckt werden. Diese können z.B. durch Pilzbefall zu gravierenden Folgeschäden führen.

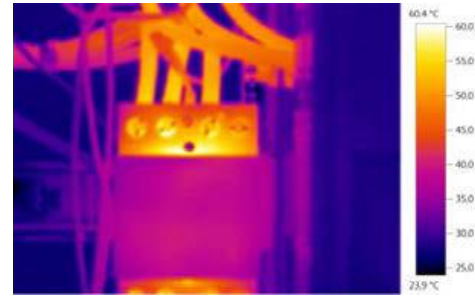
Voraussetzung ist eine Kenntnis der baujahrabhängigen Konstruktionsweise, um den Einfluss verdeckt verbauter Materialien bewerten zu können. Innen- oder Außenmessungen müssen gezielt eingesetzt werden und der Einfluss der Umgebungsstrahlung muss meist minimiert werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

### **6.2 Thermografie von Photovoltaik Modulen und Anlagen**

Schaltschränke von Photovoltaikanlagen weisen manchmal Fehler bei der Verkabelung auf, die zu hohen Übergangswiderständen und Erwärmungen führen, die thermografisch festgestellt werden können.



Wechselrichter Erwärmung. Foto: Testo AG



Anschlussbereich. Foto: Testo AG

Bedeutender sind aber die Modulschäden oder Installationsfehler, die durch den zeitsparenden Überflug der Anlage mit einer Thermografiekamera erkannt werden können:

Da viele Anlagen in der Vergangenheit unsachgemäß konzipiert und installiert wurden, müssen die Betreiber Ertragsverluste weitgehend unbemerkt hinnehmen.

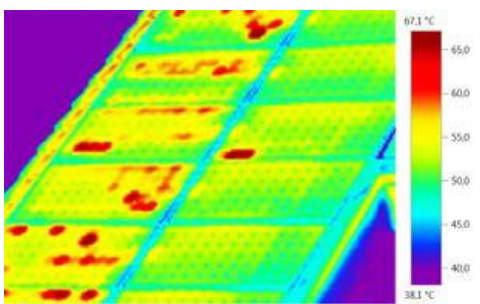


Delamination. Foto: Testo AG

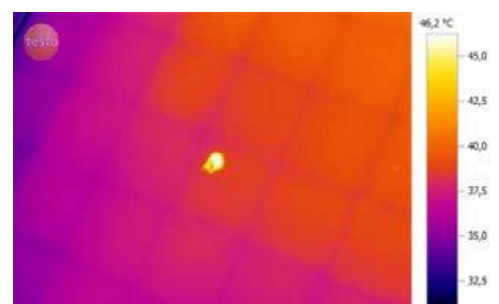
Foto: Testo AG

Defekte Bypassdioden nach Gewittern konnten bisher nur schwer lokalisiert werden. Die Aufnahmen der Module aus der Luft liefern schnell Ergebnisse.

Mit der Wärmebildkamera kann man die defekten Bypassdioden, Kontaktfehler und Kurzschlüsse, gar nicht angeschlossene Module im Leerlauf, eingedrungene Feuchtigkeit, Risse, Mismatch der Module und Hotspots durch Abschattungen schnell aufdecken und die Verluste vermeiden.



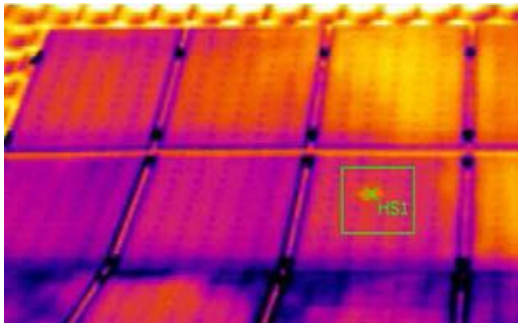
Blitzeinschlag. Foto: Testo AG



Zellbruch. Foto: Testo AG

Aussagekräftige thermografische Aufnahmen – insbesondere von PV-Modulen – sind allerdings stark vom Aufnahmewinkel abhängig, da die spiegelnden Oberflächen bei schräger Aufsicht leicht fremde Strahlung oder Abschattung auf die Aufnahme bringen.



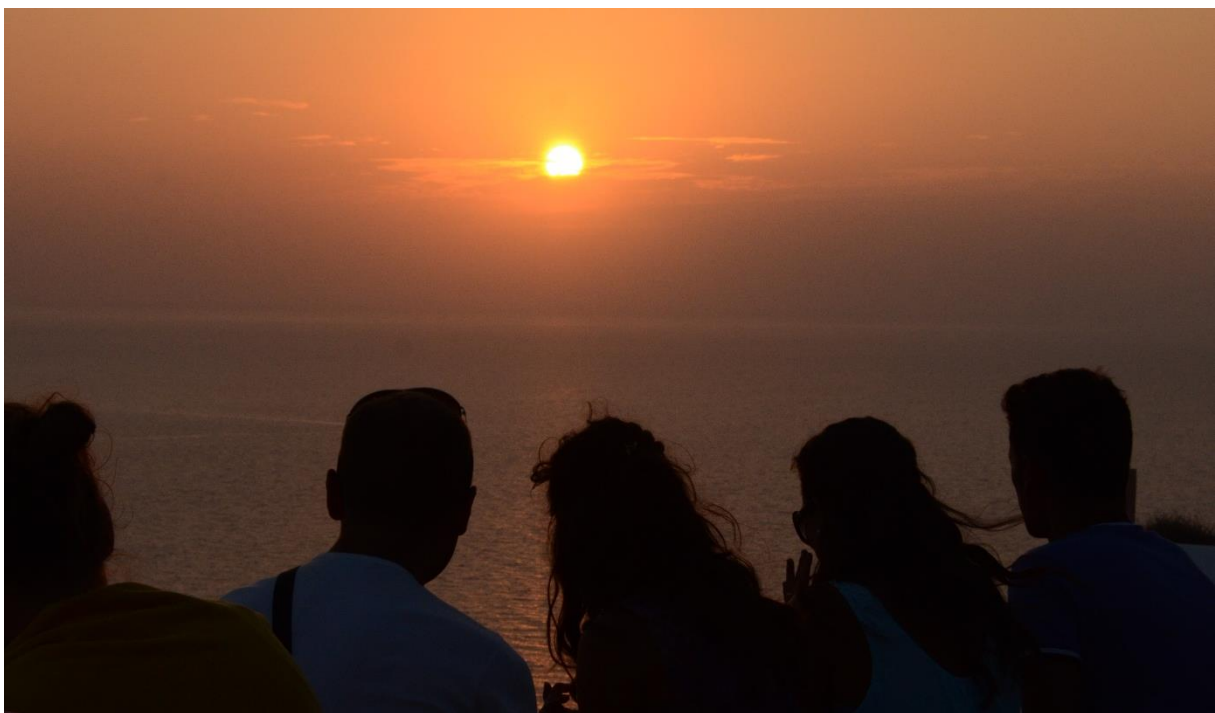


Wolkenspiegelungen. Foto: Testo AG

Die Thermografie mit dem Multikopter ermöglicht die freie Wahl des Aufnahmestandpunktes und umgeht diese Probleme daher. Außerdem können auch große Flächen schnell überflogen werden und teure Aufstiegshilfen oder Steigen entfallen.

## **7 Zusammenfassung**

Thermografie in Verbindung mit Flugrobotern ermöglicht die Begutachtung großer Anlagen oder unzugänglicher Stellen. Wärmedifferenzen können berührungslos aus der Luft ermittelt werden. Die Interpretation der erzeugten thermografischen Luftbilder erfordert allerdings Sachverstand, um nicht zu Fehlschlüssen zu gelangen, da unsere normalen Sehgewohnheiten nicht immer angewendet werden dürfen.



Besuchen Sie uns auf [www.falconing.de](http://www.falconing.de) und nehmen Sie direkt Kontakt mit uns auf, um mehr über die Möglichkeiten und Vorteile zu erfahren, die wir Ihnen mit unseren Multikoptern und der Thermografie bieten können.