

HAWK - HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFT UND KUNST

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

Baukonstruktion und Bauphysik in der Fakultät Bauwesen in Hildesheim

**Vorlesungsskripte zur Bauphysik
Masterstudium
Messen in der Bauphysik**

Thermografie

1. Thermografie in der Bauphysik

- 1.1 Wozu wendet man sie an?**
- 1.2 Wie funktioniert Thermografie?**
- 1.3 Was das bloße Auge niemals sehen könnte!**

2. Physik der Thermografie

- 2.1 die Physik des Infrarotlichts**
- 2.2 die Natur der Wärmestrahlung**

3. Messverfahren

- 3.1. Vom Motiv bis zu den Daten**
- 3.2. Bildverarbeitung und Bildrekonstruktion**
- 3.3. Dokumentation und Archivierung**

4. Kamerasysteme

- 4.1. Das Funktionsprinzip einer Scannerkamera**
- 4.2. Die Aufnahme von Thermogrammen**
- 4.3. Temperaturskala der Scannerkamera**
- 4.4. Auswertungsmöglichkeiten**

5. Literaturverzeichnis

1 Thermografie in der Bauphysik

Das Bauwesen ist die klassische Anwendung der Thermografie. Vom Energiegutachten über die Qualitätskontrolle am Bau bis zur Ortung von Schäden ist die Thermografie einsetzbar.

1.1 Wozu kann man Thermografie brauchen ?

Der Niedrigenergiehausstandard und die ENEC 2002 Energieeinsparverordnung sind in aller Munde. Der moderne Mensch will gesund bauen und leben. Mit Hilfe von Infrarotmesstechnik wird überprüft, ob die Baustoffproduzenten z. B. bezüglich der Wärmedämmwerte halten, was Sie dem Kunden versprechen. Seit Januar 2002 ist die Novelle der 1970 verabschiedeten Wärmeschutzverordnung die ENEC 2002 in Kraft. Sie beinhaltet eine strenge Regelung für die Wärmeverlustleistung. Auch die Luftdichtigkeit und die Luftwechselraten werden genauer unter die Lupe genommen. Zur Messung der Wärmeabstrahlung eines Gebäudes, zur Prüfung möglicher Baumängel und zum Nachweis der Qualität der Bauausführung eignet sich die Infrarottechnik besonders gut. Wärmeverlust, Feuchtigkeit und Luftundichtigkeiten an Gebäuden werden als farbiges Wärmebild sichtbar. Die Thermografie wird in der Qualitätssicherung und zur Abnahme von Neubauten eingesetzt, aber auch zur Planung von Sanierungsmaßnahmen. Schnell und kostengünstig sollten diese Messungen im Idealfall durchgeführt werden, denn Zeit ist ein wichtiger Faktor in der Planung eines Bau- oder Sanierungsvorhabens. Der Einsatz von Thermografie-Kameras trägt zur Beschleunigung der Entscheidungsfindung bei – Städte, Gemeinden, aber auch private und industrielle Bauherren nutzen diesen Vorteil.

Thermografie wird in der Baubranche in folgenden Bereichen eingesetzt:

- Neubauüberwachung
- Qualitätssicherung
- Sanierungsplanung
- Leckageortung
- Brandschutz
- Bautrocknung
- Taupunktbestimmung
- Schadenminimierung und Denkmalpflege

1.2. Wie funktioniert Thermografie eigentlich ?

Alle festen Oberflächen strahlen Licht ab, wenn Sie eine Temperatur haben, je wärmer das Material dabei ist, desto heller das Licht. Wenn die Temperatur etwa 500 °C übersteigt, kann man das Leuchten mit eigenen Augen als Glühen sehen. Bei Umgebungstemperatur leuchten alle festen Körper im tiefen Infrarot. Dieses langwellige Infrarotlicht "sieht" jede Thermografiekamera. Weil die Helligkeit des IR-Lichts sehr stark von der Temperatur abhängt, kann man damit die Oberflächentemperatur aus der Ferne messen.

Mehr zu den Grundlagen lesen Sie unter **2. Physik der Thermografie**

1.3. Was das bloße Auge niemals sehen könnte!

Energiesünden durch Undichtigkeiten



Ein gewisser Anteil der Energieverluste von Häusern entsteht durch unkontrollierten Luftaustausch aufgrund von Undichtigkeiten. Kalte Außenluft, die durch Undichtigkeiten des Gebäudes in Decken Wände, Schächte und Spalten eindringt, kann dafür verantwortlich sein. Gerade bei modernen und hoch isolierten Bauwerken kann der Energieverlust durch Luftundichtigkeit einen beträchtlichen Betrag ausmachen.

- Mit Thermografie kann in Kombination mit einem Blower- Door- Test der Luftdichtigkeitsnachweis bei modernen Energiesparhäusern erbracht werden.
- Im Wärmebild verraten sich die Stellen besonders gut, die gegen Winddruck empfindlich sind.
- Zugluftquellen werden mit dem Wärmebildverfahren lückenlos lokalisiert und können aufgrund der Kühlwirkung und Ausdehnung der gekühlten Stellen leicht klassifiziert werden. Dadurch wird eine Reparatur oder Nachbesserung effizient und wirksamer.

Energiesünden an Hausfassaden

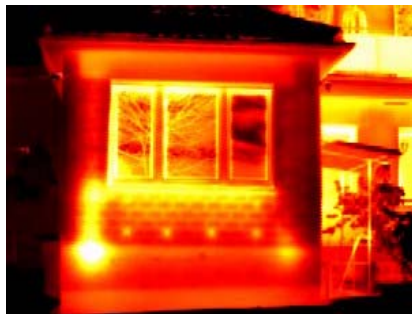


Der Löwenanteil der Energieverluste eines gewöhnlichen Hauses im Alter von etwa 20 bis 40 Jahren hat die Wärmeleitung durch die Wände und das Dach. Um Baukosten zu sparen, wurden damals die Wandquerschnitte immer schlanker konstruiert, was zu einem erheblich höheren energetischen Heiz- und somit Kostenaufwand führte. Da damals die Heizkosten zu heute noch sehr gering waren erschien dies sinnvoll auch wenn nicht sehr ökologisch.

Durch stetig steigende Heizkosten besteht heute jedoch das Bestreben, diese Konstruktionsschwäche durch Aufstockung der Dämmung sowie Verschließen von Leckagen auszugleichen.

- Das Fenster oben links ist undicht. Das ist sehr häufig, besonders bei halb vergammelten Fenstern mit Holzrahmen.
- Die Garage hat eine auffällig erhöhte Temperatur, obwohl sie nicht beheizt wird. Das ist nichts anderes als zurückgehaltene Verlustwärme durch die angrenzende Wand.
- Der Keller ist nicht isoliert. Das erhöht nicht nur die Heizkostenrechnung, sondern gefährdet auch die Bausubstanz durch Feuchtigkeit.

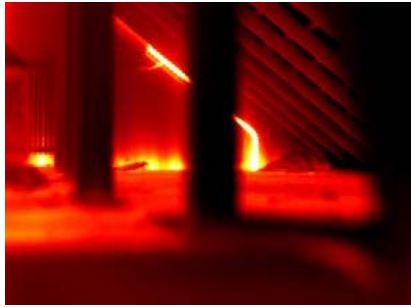
Energiesünden an Heizungsanlagen



Es gibt an Fassaden sehr häufig vier Ursachen von Energieverlusten, die durch Thermografie sehr schnell verdeutlicht werden können:

1. In die nicht isolierte Außenwand verlegte Heizungsrohre. Sie erwärmen nicht nur die Innenwand, sondern die Außenluft gleich mit. Ein großer Teil der Heizenergie verpufft ungenutzt.
2. Die Fassade ist nicht isoliert. Durch normales Mauerwerk gehen bis zu 2 Watt pro Quadratmeter Energie als Verlust hindurch. Mit moderner Isolation kann man bis zu 90% Energie einsparen.
3. Die vier Befestigungsbolzen des Heizkörpers leiten die Wärme noch besser durch die Wand. Diese nicht isolierten Wanddurchbrüche tragen zum Wärmeverlust bei.
4. Das Fenster ist undicht. Die Wärmekapazität der unkontrolliert ausströmenden Luft leitet weitere Wärme ab.

Energiesünden in Dachböden

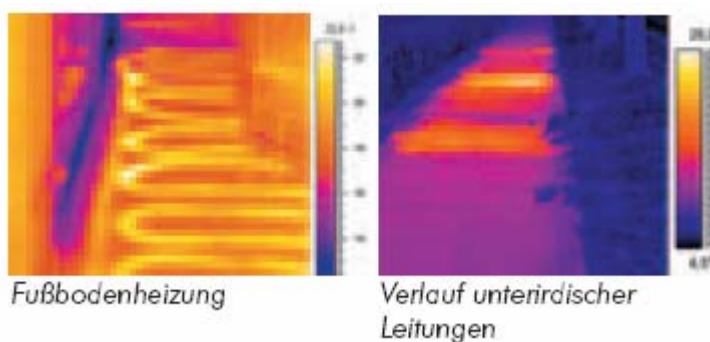


In vielen ungeheizten Innenräumen gibt es Stellen, an denen Energie verloren geht. Gerade der exponierte Dachbereich ist empfindlich für diese Wärmelecks:

- Der Boden ist die Decke des obersten bewohnten Stockwerks. Eine fehlende Isolation führt etliches an Heizenergie ab.
- Reste der Heizungsinstallation ragen ohne Isolation in den ungeheizten Raum.
- Die Knotenpunkte des Bodens zur Wand sind nicht luftdicht verschlossen. Austretende, erwärmte Raumluft führt weitere Energie ab.

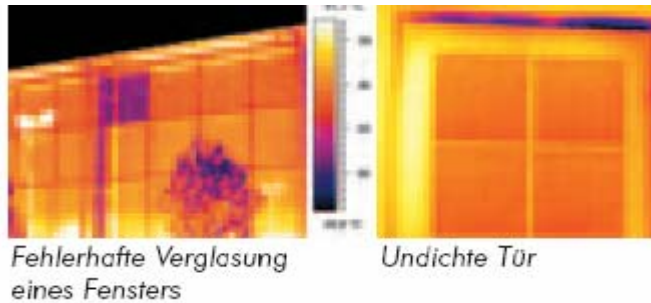
Ortung von Leckagen:

Bei der Ortung und Überprüfung von Rohrleitungen sowie Rohrleitungsleckagen leistet die Thermografie sehr gute Dienste. Selbst wenn die Wasserleitungen im Fußboden oder unter Putz verlegt sind. Typische Beispiele sind die Ortung von Lage und Länge von Fußbodenheizungen oder Leckagen im System. Auch Leckagen in Fernwärmesystemen können mit Hilfe der Thermografie schnell detektiert und dokumentiert werden.



Baumängel aufspüren:

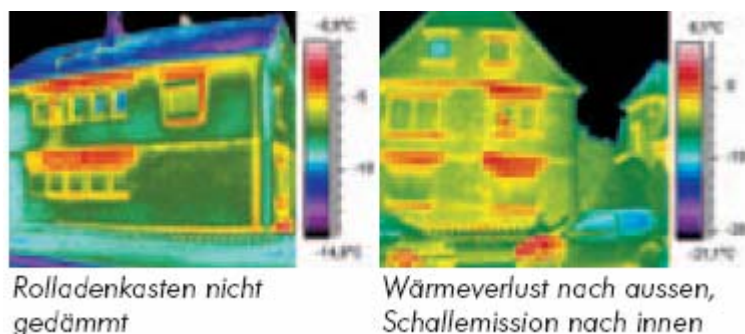
Es ist die schnellste und beste Methode, um mögliche Baumängel aufzudecken und eignet sich als Nachweis der Qualität und der richtigen Ausführung der baulichen Maßnahmen. Die Thermografie macht entstehenden Wärmeverlust, Feuchtigkeit und auch Luftundichtheiten von Gebäuden als farbiges Wärmebild sichtbar.

**Überprüfung von Trocknungsmaßnahmen:**

Nach Ortung der Leckage erfolgt die Trocknungsmaßnahme. Durch Setzen von Einflut- und Entlastungsbohrungen wird der Wasserschaden getrocknet. Um beim Bohren nicht die verborgenen Leitungen zu beschädigen, liefert die IR-Kamera ein Bild deren Lage. Mit Hilfe der Infrarotkamera kann auch der Erfolg der Trocknungsmaßnahme geprüft und belegt werden.

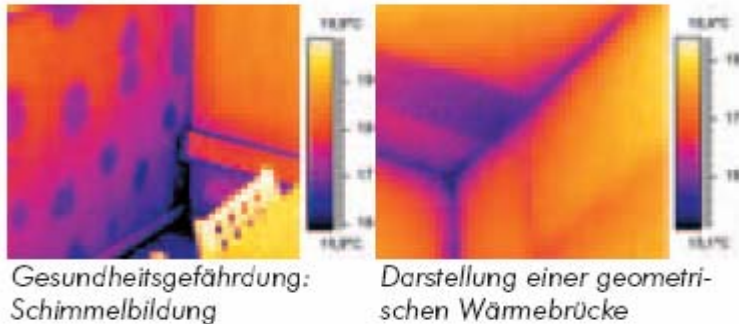
Energieverluste visualisieren:

Wärmebrücken sind nicht nur Energieverschwender. An solchen Stellen kann es zur Kondensation bzw. zum Niederschlag von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft kommen. In der Folge kann an diesen Stellen Schimmelpilzbefall mit den damit verbundenen Risiken für die Gesundheit der Bewohner entstehen. Und Wärmebrücken sind manchmal auch Schallbrücken. Eine optimale Wärmedämmung ist meistens auch gleichzeitig eine gute Schallsolierung. Die Thermografie zeigt fehlerhafte Stellen sofort.

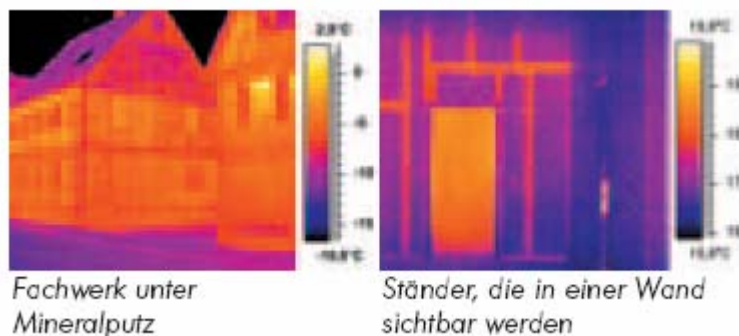


Planung und Sanierung:

Die Infrarottechnik wird bei der Planung von Sanierungsmaßnahmen, aber auch in der Qualitätssicherung und der Abnahme von Neubauten eingesetzt. Bei der Bautrocknung ermöglicht das Wärmebild den Fortschritt der Trocknungsmaßnahmen zu erkennen und somit Einsatz und Dauer der Trocknung zu optimieren.

**Renovierung von Gebäuden:**

Infrarotthermografie gibt wertvolle Hinweise bei der Renovierung von Gebäuden und Denkmälern. Durch Mineralputz verdeckte Fachwerkkonstruktionen werden im Infrarotbild sichtbar. So kann zum Beispiel entschieden werden, ob eine Freilegung sinnvoll ist. Auch die Ablösungen von Putz an Wänden können lokalisiert und Maßnahmen zu Erhaltung ergriffen werden.



Im Thermogramm steckt noch mehr Information

Energieströme

Berechnung des Wärmestroms aus Puffer D ...



☐ Mit theoretischen Annahmen
☒ Mit praktischer Umgebung

Praktische Werte

☒ Naturkonvektion
☒ Anströmkonvektion
☒ Strahlung

T Umgebung: 5.8°C
 T Luft: 5.8°C

Ausrichtung: Senkrechte Char. Länge: 15 m
 Windstärke: 0.6 m/s Anströmwinkel: senkrecht

Theoretische Annahmen

Flächentyp: Außenwand zur Umgebung
☐ Außenseite
☐ Innenseite

Ziel:
 ☐ Puffer A
 ☐ Puffer B
 ☐ Puffer C
 ☒ Puffer D

Gut Abbrechen

Was liegt näher aus den sichtbar gemachten Temperaturen auf die Wärmeströme durch eine Oberfläche zu schließen. Mit Umweltbedingungen aus der DIN 4108 oder richtig gemessenen Umweltverhältnissen zusammen mit den Wärmeaustauschgesetzen aus dem VDI-Wärmeatlas lassen sich die Wärmeströme berechnen und selbst als Bild darstellen.

Energiekosten von Puffer D ...



Energiequelle

Energielieferant: Heizöl EL
 Preis: 0.50 Einheit: DM/L
☒ Standard
☐ Brennwert
☐ Wärmep.

Wirkungsgrad: 0.615

Standort

Gradtagzahl: Bonn T innen: 21°C

Meßfeld

Bildfeld: 30 * 20°
☐ Ganzes Bild
 X: 127 Y: 79 Meßfeld 29 * 49

Jährliche Energiekosten / CO₂-Ausstoß

Calc	8.01 DM/qm	42.30 kg/qm
mal	2440 qm	
=	19549.09 DM	103.22 t

Energiekosten: Speichern ... Laden ... Drucken ... Gut

Hat man erst einmal die Wärmeströme, so kann von Teilfläche zu Teilfläche jeweils der k-Wert ausgemessen werden. Noch weitergehend kann auch der spezifische Energieverbrauch und die spezifischen Energiekosten berechnet werden. Mit den architektonischen Daten und den jeweiligen Flächenanteilen kann dann der Wert für das ganze Gebäude errechnet werden.

2 Physik der Thermografie

2.1 Die Physik des Infrarotlichts

Grundlagen

Die beiden Wissenschaftler Stefan und Boltzmann entdeckten vor 150 Jahren das Naturgesetz, dass alle Körper Energie in Form von Lichtwellen ausstrahlen und Max Planck erklärte dann um die Jahrhundertwende, dieses Phänomen. Für Körper bei Raumtemperatur ist dieses Licht allerdings unsichtbar, denn es strahlt im Infraroten. Nur wenige Tiere wie einige Schlangen und Insekten können diese Strahlung direkt wahrnehmen, wir Menschen brauchen dazu spezielle Kameras.

Die Helligkeit des abgestrahlten Infrarotlichtes hängt dabei sehr stark von der Temperatur ab. Den Zusammenhang beschreibt das Gesetz von Stefan und Boltzmann. Dieser starke Zusammenhang wird für die Thermografie ausgenutzt, indem der Helligkeit an einem Bildpunkt die entsprechende Temperatur entsprechend dem Naturgesetz zugeordnet wird.

Ein Beispiel ist ein glühendes Stück Metall. Ist es sehr heiß, so leuchtet es sehr hell. Kühlt es ab, so wird sein Glühen immer röter und dunkler: Das Maximum der Lichtausstrahlung verschiebt sich mit sinkender Temperatur immer weiter zum langwelligen Spektralbereich hin und die Intensität nimmt stark ab. Erreicht die Temperatur die Umgebungstemperatur, so ist das Maximum der Abstrahlung in das ferne Infrarot gerutscht. Diese Wellenlängen werden von Thermografie-Kameras beobachtet.

Nahes Infrarot

Der Infrarotbereich des Elektromagnetischen Strahlungsspektrums ist selber wiederum in verschiedene Unterbereiche eingeteilt, die sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Unter nahem Infrarot verstehen wir den Bereich, der sich unmittelbar am langwelligen Ende des sichtbaren Lichtes, dem Rot bei $0,78 \mu\text{m}$, anschließt und etwa bis $3 \mu\text{m}$ Wellenlänge geht. In diesem Spektralbereich kann noch mit ganz normalen Gläsern und Spiegeln gearbeitet werden. Bis etwa $1,1 \mu\text{m}$ Wellenlänge funktionieren ganz normale SW-Videokameras und so genannte IR-Filme. Dieser nahe IR-Bereich wird häufig mit dem ganz anders gearteten Mittelwellen- und thermischen IR verwechselt.

Mittelwellen-IR

Unsere Lufthülle lässt nicht jede beliebige IR-Wellenlänge hindurch, aber sie weist verschiedene Bereiche auf, in denen sie wieder durchsichtig wird, weshalb man für diese Bereiche Spezialkameras baut. Eines der bedeutendsten Fenster liegt bei $3,5$ bis $5 \mu\text{m}$ Wellenlänge. In diesem mittleren IR-Bereich muss schon zu Sondermaterialien wie Halbleiter und Kristallen gegriffen werden, wenn man Linsen machen möchte. Auch versagt hier chemischer Film, so dass man hier zu elektronischen Sensoren greift. Dieser Bereich ist besonders wichtig, wenn es um die Thermografie höherer Temperaturen oder die Messung von Absorption geht.

Thermisches oder Langwellen-Infrarot

Wenn ein Körper etwa Umgebungstemperatur hat, so ist die Lichtabstrahlung bei $10 \mu\text{m}$ Wellenlänge am stärksten. Genau in diesem Bereich wird die Luft der Erde sehr durchsichtig. Dieses transparente Fenster im Spektrum erstreckt sich von $8 \mu\text{m}$ bis etwa $12,5 \mu\text{m}$ Wellenlänge. Wegen des dort liegenden Abstrahlungsmaximums nennt man es thermisches Infrarot. In diesem Fenster findet der Löwenanteil der Wiederabstrahlung der

Energie statt, die die Erde von der Sonne in Form von sichtbarem Licht erhält. In diesem Bereich arbeiten für Umgebungstemperatur ausgelegte Thermografiekameras besonders empfindlich und daher hochgenau. Was schon für den Mittelwellenbereich gilt, ist hier erst recht wichtig: Es kann nur mit wenigen Spezialmaterialien für die Optik und ganz speziellen elektronischen IR-Sensoren erfolgreich gearbeitet werden.

Submillimeterwellen

An den Spektralbereich des thermischen IR schließt sich der Grenzbereich zwischen Licht und Radiowellen an. Hier absorbiert der in der Luft enthaltene Wasserdampf die Strahlung schon auf kurzen Strecken, zudem ist es sehr schwierig, Sensoren für diesen recht unerforschten Wellenlängenbereich zu bauen. Daher hat der Submillimeterbereich in der Thermografie keine Bedeutung.

2.2 Die Natur der Wärmestrahlung

Das Stefan-Boltzmann- Gesetz

Die Physiker Stefan und Boltzmann stellten ein Gesetz auf, mit dem der Zusammenhang der Lichtabstrahlung und der Körpertemperatur hergestellt werden kann:

$$I = \varepsilon * \sigma * (T^4)$$

Dabei ist **I** die Intensität in Watt pro Quadratmeter, ε der Emissionskoeffizient, σ die Stefan- Boltzmann- Konstante ($5,667e-8$) und **T** die absolute Temperatur, gemessen in Kelvin, also mit dem absoluten Nullpunkt als Bezugstemperatur. Das bedeutet, dass es dann vollkommen dunkel wird, wenn die Temperatur am absoluten Nullpunkt angekommen ist. Thermografie funktioniert im Prinzip also immer. Wichtig ist die Abhängigkeit der abgestrahlten Intensität in der vierten Potenz von der Temperatur. Das bedeutet, dass eine geringe Temperatur- Veränderung schon einen sehr großen Unterschied in der Helligkeit ausmacht. Das ist die Ursache dafür, dass Thermografie ein hochgenaues Verfahren zur Temperaturmessung ist

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz

Der Physiker Wien beschrieb den Zusammenhang des Abstrahlungsmaximums und der Temperatur in einem einfachen Gesetz, also nichts anderes, wie rot ein glühendes Stück Eisen bei einer bestimmten Temperatur ist:

$$\lambda_{\max} = 2980 \mu\text{m} \cdot \text{K} / T$$

Hierbei ist $\lambda_{\max}$ die Wellenlänge, bei der das meiste Licht abgestrahlt wird und **T** die absolute Temperatur, gemessen in Kelvin. Nehmen wir unsere Zimmertemperatur von 20 °C, so erhalten wir eine absolute Temperatur **T** von 293 Kelvin und ein Abstrahlungs-Maximum bei 10,17 μm , also mitten im thermischen IR-Bereich.

Emission

Leider ist nichts in der Natur ganz perfekt. Die Aussendung von Licht aufgrund der eigenen Temperatur erfolgt mit einem gewissen Wirkungsgrad, der das Verhältnis des tatsächlich ausgesandten Lichtes zum theoretisch

möglichen ist. Diesen Faktor nennt man den Emissionskoeffizienten ϵ . Die Natur meint es aber gut und gibt allen nichtmetallischen Stoffen einen Emissionskoeffizienten zwischen 0,98 (Blattgrün) und etwa um 0,92 (Gips) mit. Wenn Thermografie an nicht elektrisch leitenden Oberflächen (also auch lackierten Metallen) vorgenommen wird, so ist die Emissionskorrektur sehr klein.

Metalle sind jedoch elektrisch leitend und weichen sehr stark von $\epsilon = 1$ ab. Die Abweichung hängt ebenso stark vom Blickwinkel, vom Material, von der Oberflächenrauigkeit und vom Korrosionszustand ab, so dass hier in jedem Fall mit einer Kalibrierung der Emissionskoeffizient gemessen werden muss, um verlässliche Temperaturmessungen zu bekommen. Routinierte Thermografie-Dienstleister führen solche absolut notwendigen Kalibrationen standardmäßig unaufgefordert durch. Ein Nachschlagen in Listen reicht in keinem Fall aus.

Was geschieht mit der Differenz zum nur theoretisch möglichen Idealfall

$\epsilon = 1$? Mit dem Wirkungsgrad $(1 - \epsilon)$ wird die thermische Abstrahlung der Umgebung reflektiert. Daher ist es für Präzisionsmessungen unverzichtbar, die gemittelte Strahlungstemperatur der Umgebung zu messen, da dieser Effekt bei der Berechnung der Oberflächentemperatur aus der gemessenen Intensität berücksichtigt werden muss. Dazu wird eine spezielle „Fisheye“-Optik auf Spiegelbasis verwendet.

Absorption

Auf längere Aufnahmedistanzen hin wird die verbleibende Absorption der Luft im Infraroten wirksam. Ein Teil der Infrarotstrahlung wird absorbiert und in eine Temperaturerhöhung der Luft umgewandelt. Dadurch reduziert sich die Intensität umgekehrt exponentiell mit der Entfernung vom Aufnahmeobjekt. Darunter mischt sich immer mehr die Eigenemission der Luft.

Dieser Effekt ist allerdings in der thermografischen Praxis irrelevant, da er sich erst ab mehreren Kilometern Abstand merklich auswirkt. Wenn die Aufnahmedistanzen unter 100 - 200 Metern liegen kann die Absorption selbst bei diesigem Wetter ruhigen Gewissens vernachlässigt werden.

Bei der Fernerkundung mittels Thermografie ist der Effekt jedoch nicht zu vernachlässigen. Hier sind mit Kalibrationsmessungen die Konstanten in der Strahlungstransportgleichung einzumessen und in der Auswertung zu berücksichtigen. Das ist die Aufgabe der Software des Thermografiedienstleisters.

Streuung

Ein weiterer Effekt ist die Streuung von langwelligem IR-Licht an feinsten Tröpfchen und Staub in der Luft, ein Effekt, der sich wie die Absorption auch nur über längere Distanzen auswirkt. Die Streuung bewirkt, dass ein Teil der Energie eines Lichtstrahls vom direkten Weg abgelenkt wird, aber eben mit einer bestimmten Verteilung dennoch den Sensor der Thermografiekamera erreicht. Dadurch kann die Streuung durch moderne Bildverarbeitung aus den Thermogrammen herausgerechnet werden.

3 Messverfahren

Die infrarote Thermografie gilt auch als eine der zerstörungsfrei operierenden Methoden um Feuchtigkeit zu orten. Des Weiteren eignet sie sich zur Feststellung und Analyse von Wärmebrücken an Fassaden und Flachdächern sowie zur Kontrolle von Wärmeverlusten und zur vorbeugenden Instandsetzung im industriellen Bereichen. Moderne Geräte verfügen über 12 Bit Hochgeschwindigkeits-Farbsysteme mit Echtzeit-Temperaturmessung und -darstellung und sind mit eingebauten Datenaufzeichnungssystemen versehen. Dadurch lassen sich die Thermobilder über PC analysieren und dokumentieren.

3.1 Vom Motiv bis zu den Daten

Die Aufnahme

Zunächst ist eine Thermografiekamera nichts anderes als eine elektronische Kamera wie jede andere auch. Sie gehorcht denselben Gesetzen, die auch im sichtbaren Licht gelten. Zu einer Aufnahme gehört:

- Das Objekt muss auf geradem Wege sichtbar sein. Was man nicht mit den Augen sieht, kann auch nicht thermografisch dargestellt werden.
- Die Kamera muss scharf gestellt werden.
- Je nachdem wie groß das Objekt ist, muss gezoomt werden.
- Je nach Temperatur des Objekts muss die Spreizung und die Mitteltemperatur der Kamera eingestellt werden. Hier ist allerdings ein Unterschied zur normalen Fotografie: Da das ganze Signal aufgezeichnet wird, kann das Bild ohne jeden Informationsverlust später nach Belieben umskaliert werden.

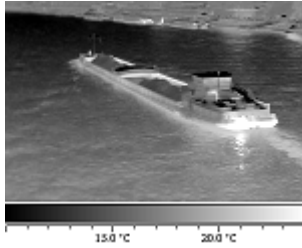
Mit dem Druck auf den Auslöseknopf wird das elektronische Signal des Sensors auf einer Speicherkarte als Datei abgespeichert. dabei gibt es sogar verschiedene Varianten, je nach Messaufgabe:

- Die Abspeicherung des aktuellen Bildes im Display (der Normalfall)
- Die Abspeicherung der letzten bis zu 19 Bildern im FIFO-Speicher der Kamera als Kurzzeitsequenz
- Die Abspeicherung von beliebig vielen Bildern als Zeitrafferfilm durch eine Timersteuerung

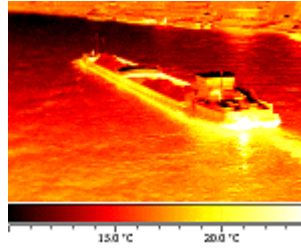
So eine Speicherkarte ist sowohl sehr klein als auch sehr robust und zudem faktisch unbegrenzt verwendbar. Dazu ist sie auch enorm zuverlässig. Als elektronischer "Film" ist sie für die Thermografie ideal geeignet: Jedes Fotolabor, jede Entwicklung, jeder Aufwand wird überflüssig und das Ergebnis ist in voller Qualität sofort verfügbar.

Thermogramme als Bilder

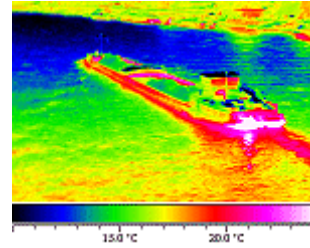
Thermogramme werden erst durch eine angepasste Darstellung zu Bildern. Im Computer wird der aufgezeichneten Signalstärke des Thermosensors zuerst eine Temperatur zugeordnet und dann diese Temperatur mit einem Grau- oder Farbwert ausgestattet. Damit der Betrachter weiß, welche Temperatur welcher Farbe entspricht, wird jedem Bild eine entsprechende Skala zugefügt. So lassen sich schon durch einfaches Hinschauen Temperaturen ablesen. Erst bei diesem schritt muss man sich auf eine Mittentemperatur und die passende Spreizung der Skala festlegen, damit ein kontrastreicher Eindruck entsteht.



*Original Schwarzweiß-Bild
eines Thermogramms*



*Glühfarben sorgen für
leichtere Interpretierbarkeit*

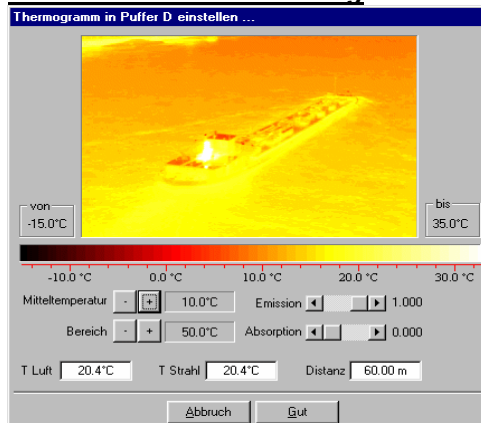


*Starke Einfärbung sorgt
für
hohe Kontraste*

Dennoch bleibt von Bildpunkt zu Bildpunkt die originale Information erhalten, so dass man nur auf einen Punkt im Bild zielen muss, um aus dem Original-Thermogramm eine ganz genaue Temperatur zu ermitteln.

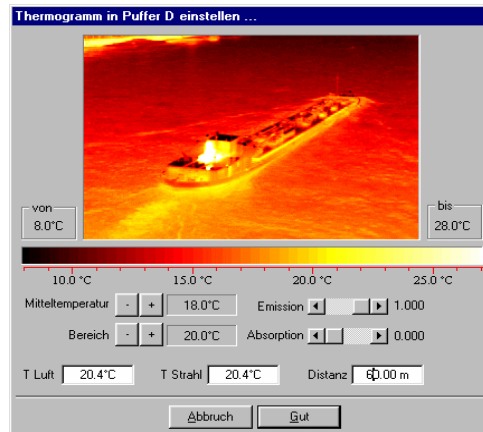
3.2 Bildverarbeitung und Bildrekonstruktion

Messbereich und Skalierung



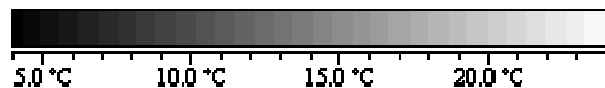
Zuweilen stellt es sich erst nachträglich heraus, dass die Wahl von unterer und oberer Temperatur bei der Aufnahme vor Ort nicht optimal war. Das Thermogramm kann zu hell, zu dunkel, zu kontrastarm oder übersteuert sein. Das ist kein Problem, weil die Kamera von das gesamte Sensorsignal abspeichert, so dass sich alle Thermogramme verlustlos nachbearbeiten und einander angleichen lassen.

Zur optimalen Auswahl von Mittertemperatur, Skalenspreizung und den Emissionsparametern kann interaktiv in die Darstellung des Thermogramms eingegriffen werden:

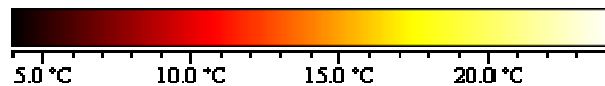


- Mitteltemperatur
- Skalenspreizung
- Emissionskoeffizient
- Absorption der Atmosphäre

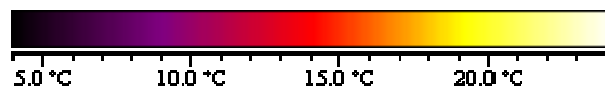
Farben und Paletten



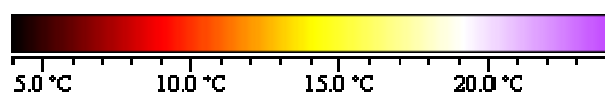
Die Grauskala ist die einfachste Palette. Hier wird der Temperatur einfach nur ein Helligkeitswert zugeordnet, ganz ähnlich, wie es die Kamera tatsächlich sieht. Diese Palette ist optimal für eine besonders neutrale Auswertung.



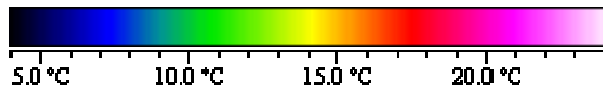
Gerade bei einem Temperaturbild liegt es nahe, die Farbenreihe von glühenden Körpern zu verwenden: Kalte sind dunkel und rötlich, heiße gelb oder gar weiß und hell. Der Kontrastumfang ist gemäßigt, aber schon höher als bei der neutralen Grauskala.



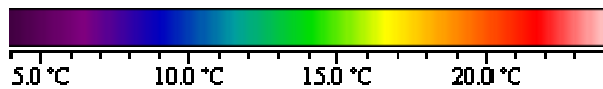
Der Kontrastumfang eines Thermogramms kann noch ein wenig gesteigert werden, wenn noch die Farbe Violett zwischen Rot und dem schwarzen (= kühlen) Ende eingefügt wird.



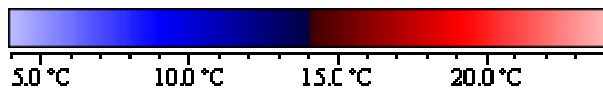
Alternativ kann der Kontrast in einem Thermogramm auch dadurch gesteigert werden, indem man die Farbskala von immer heißer werdenden Sternen aus der Astronomie entnimmt.



Man kann die Kontraste in einem Thermogramm auf die Spitze treiben, indem man so viele Farben wie möglich in eine Palette packt. Dabei benutzt man die psychologische Empfindung des Menschen für "kalte" und "warme" Farben, die den entsprechenden Temperaturen zugeordnet werden. Weiter wiederholt sich keine Farbe, um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden. Zu beachten ist nur, dass hierbei schon kleine Messfehler sichtbar werden.



Der Kartografie entnommen ist eine alternative Art, ein Thermogramm einzufärben, um auch kleinste Temperaturunterschiede zu betonen. Auch hier werden die psychologisch "kühleren" Farben den kleineren und die "wärmeren" Farben den höheren Temperaturen zugeordnet.



Es gibt Beispiele, wo die herkömmliche Einfärbung nicht geeignet ist, zum Beispiel wenn eine Wärmebilanz aus einem Thermogramm abgeleitet wird. Hier ist eine symmetrische Einfärbung sinnvoll, wobei der Sprungpunkt auf Null gesetzt wird.

3.3 Dokumentation und Archivierung

Grafik

Aus einem Thermogramm wird zunächst eine Grafik. Das Bild kann dabei mit verschiedenen Merkmalen ausgestattet sein:

- beliebige Größe von 1:1 bis riesengroß. Dabei wird echte Interpolation benutzt, so dass keine hässlichen Klötzchen entstehen.
- Ausstattung mit einer Temperaturskala (auf Wunsch auch ohne)
- Abspeicherung in allen gängigen Grafikformaten: GIF, JPEG, TIF, PCX, BMP

Papier

Der Normalfall ist der Ausdruck des Thermogramms auf Papier. Der Ausdruck enthält dabei übersichtlich formatiert alles, was zur Dokumentation dazugehört. Wenn zum Thermogramm ein normales Foto gehört, wird es gleich mit ausgedruckt.

Wenn die Thermografie zu einem Programm zur Gebäudeuntersuchung gehört, dann ist der Ausdruck noch informativer:

- Wetter- und Umweltinformationen
- Auftraggeber und Adresse
- Eine Beschreibung des Messobjekts
- Eine genaue Kommentierung, frei formuliert oder in Form von kleinen Nummern, die in das Thermogramm eingeblendet werden. In einem beigehefteten Katalog kann dann sehr genau nachgeschlagen werden, um was für einen Befund es sich am Ort der Kommentarnummer handelt. Aber natürlich sind auch Ausdrücke ohne Beschriftung im Großformat bis DIN A3 in hochwertigem Farbdruck möglich.

CD-ROM und Video

Wenn die Datenmengen größer werden oder ganz besonders sicher dokumentiert werden sollen, so kann die komplette Auswertung auf Speichermedien gesichert werden. Damit ist sicher, dass die Information für viele Jahre auf allen üblichen Computersystemen verfügbar ist.

4 Kamerasysteme

4.1 Das Funktionsprinzip einer Scannerkamera

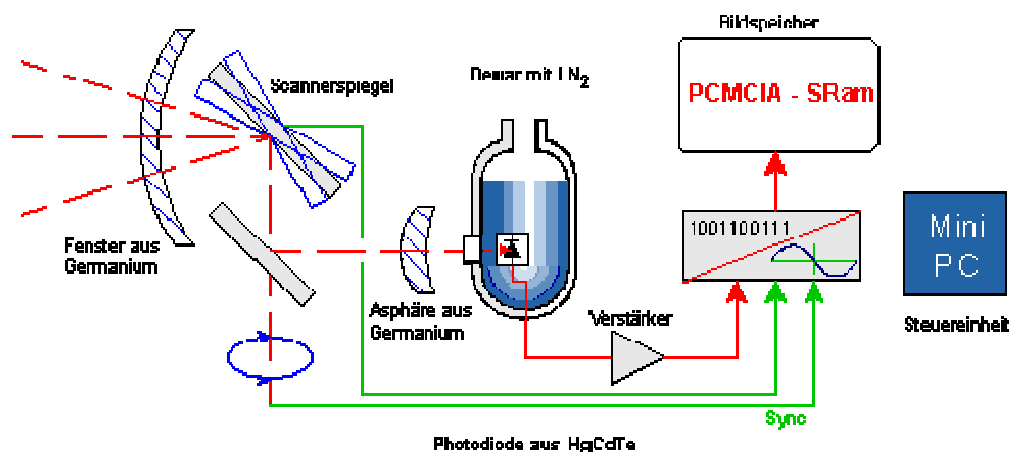
Physikalisches Funktionsprinzip

Thermografiekameras "sehen" Wärmestrahlung. Das ist nichts anderes als gewöhnliches Licht, nur dass es viel längere Wellenlängen aufweist als das Licht, was wir sehen können oder was gewöhnlicher IR-Film aufzeichnen kann. Wie das langwellige IR-Licht entsteht und wie es sich verhält, kann man bei **2.1. die Physik des Infrarotlichts** nachlesen.

Grundlagen

Um einen Blick in die infrarote Welt zu tun, brauchen wir spezielle Kameras. Diese Kameras basieren auf besonderen Sensoren, die für infrarotes Licht empfindlich sind, vergleichbar mit Videokameras, nur eben für wesentlich größere Wellenlängen. Diese Technik ist aufwendig, denn der Sensor strahlt ja auch wie alle anderen warmen Gegenstände auch. Wir müssen ihn also weit unter die Umgebungstemperatur abkühlen, um zu vermeiden, dass wir uns selber blenden. Sehr gut dazu eignet sich flüssiger Stickstoff.

Bilderzeugung durch mechanisches Abscannen



Diese Skizze zeigt das Funktionsprinzip einer Infrarot-Scanner-Kamera. Das Herzstück ist eine Photodiode in einem Behälter mit Fenster, die auf 77° Kelvin herabgekühlt wird. Eine Einzellinse fokussiert das eintreffende Licht auf den 50 mal 50 Mikrometer großen Sensor.

Das Bild wird durch zwei Scannerspiegel vor dem Objektiv erzeugt. Der horizontale Scannerspiegel vibriert mit 270 Hertz um seine senkrechte Achse, während der vertikale Scannerspiegel sich in 0.8 Sekunden auf und ab bewegt, so dass in 0.8 Sekunden jeweils ein Bild mit 300 mal 200 Pixel entsteht.

Um eine gleichförmige Belichtung für jedes Pixel zu erreichen, ist die Spiegelbewegung eine Dreiecksfunktion.

Damit das Innere vor Staub und Feuchtigkeit geschützt wird, ist ein Eintrittsfenster vor die ganze Optik eingebaut. Das Signal des Sensors wird mit der Bewegung der Scannerspiegel synchronisiert und dann mit 16 Bit Auflösung digitalisiert und abgespeichert. Das garantiert eine hohe Mobilität der Kamera. Sie ist nicht größer als eine professionelle Videokamera.

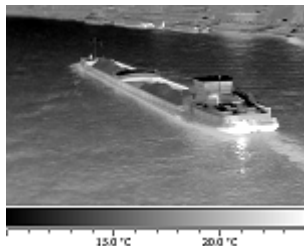
Eine Alternative: Die Focal-Plane-Array-Kamera

Das Scannerprinzip ist bei der Bildqualität in Sachen Temporauflösung, Rauschen und Genauigkeit kaum zu übertreffen, dennoch hat sie den Nachteil, dass sie nur alle 0,8 Sekunden ein Bild liefert und schnell bewegte Objekte verzerrt erscheinen. Wenn schnelle Aufnahmegeschwindigkeit gefragt ist, dann ist eine Thermografiekamera mit einem Flächensensor gefragt. Solche Kameras funktionieren genauso wie die elektronischen Fotoapparate, nur dass hier spezielle Sensoren und Sondermaterialien verwendet werden. Wenn eine Bildqualität gefordert ist, die annähernd an die von Scannerkameras heranreicht, dann sind solche Kameras und ihr Einsatz recht kostspielig.

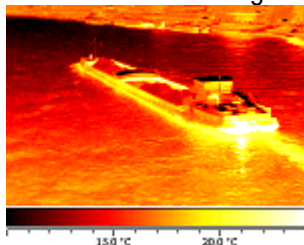
4.2 Die Aufnahme von Thermogrammen

Grundlagen

Der große Vorteil dieser Technik ist die Kombination aus einem richtigen Bild und einer Temperaturinformation für jeden Bildpunkt. Das nennt man Thermografie. Wir sind in der Lage, in einem Blick zu überschauen, wie warm ein Objekt ist. Um Informationen in drei Dimensionen (eine ist die Bildbreite, die zweite die Bildhöhe und die dritte die lokale Temperatur) darstellen zu können, brauchen wir eine Technik, die man Falschfarbenverfahren nennt.

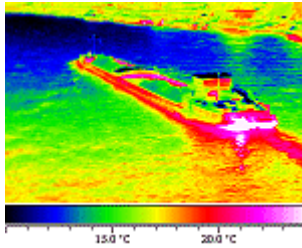


Das grau belassene Bild zeigt, was die Kamera „sieht“. Man sieht ein Schiff, beladen mit feuchter Steinkohle, auf dem Rhein. Die Kohle und das Flusswasser sind kalt, so dass die Kamera nur wenig Infrarotlicht empfängt. Der Rumpf des Schiffs ist schon wärmer, so dass er schon im mittleren Bereich "leuchtet". Der Auspuff für den Dieselmotor ist heiß: Eine Menge an Licht erreicht die Kamera. Es ist schwierig, einen Unterschied zu normalen, im visuellen Licht aufgenommenen Fotonegativen zu bemerken.



Dieses Bild ist wie ein glühendes Stück Eisen eingefärbt. Schwarz bedeutet kalt, rot schon wärmer, von gelb nach weiß immer heißer werdend. Das Glühen von Metall ist übrigens der gleiche Effekt, den man in der Thermografie benutzt, nur bei einem wesentlich höheren Temperaturniveau.

Die Lesbarkeit des Bildes wird durch das Einfärben mit den Glühfarben deutlich verbessert.



Das dritte Bild zeigt, wie es aussieht wenn man "kalte" und "warme" Farben der Temperaturinformation aus dem Rohbild zuordnen. Das Ergebnis ist eine "Pop Art" Färbung, die dafür gesorgt hat, dass wir es für ein typisches Thermografiebild halten. Nichts desto trotz kann man mit dieser Falschfarbentechnik damit sehr kleine Temperaturunterschiede sichtbar machen.

4.3 Temperaturskala der Scannerkamera

Grundlagen

Der Einsatzbereich hängt von der Öffnung der asphärischen (mehrere Krümmungsradien) Objektlinse ab. Sie kann in den Stufen 1.0, 2.0, 4.0 und 8.0 abgeblendet werden, um das messbare Temperaturspektrum zu vergrößern. Jeder der vier Blendenstufen ist getrennt kalibriert. Die Kalibrierung beginnt bei -40 °C (237 Kelvin), aber die Kamera ist empfindlich genug, um Wärmestrahlung von wesentlich kälteren Körpern aufzunehmen. Das Limit liegt bei ungefähr -120 °C (153 Kelvin) bis hin zu Höchsttemperaturen von 1200 °C.

Umgebungsbereich -40 °C bis +100 °C

Typische Anwendungen für Thermografie in diesem Umgebungsbereich sind:

- Überprüfung von Wärmedämmungen
- Energieeinsparung und Umweltschutz
- Elektrotechnik und Elektronik

4.4 Auswertungsmöglichkeiten

Bildkapazität

Die Anzahl der Bilder, die in einem Arbeitsgang aufgenommen werden können, ist nur durch die Speicherkapazität der Speicherkarte begrenzt. Das während der Arbeit die Karten einfach ausgewechselt werden können, ist die Speicherkapazität faktisch unbegrenzt.

Zeitreihen

Die Scannerkamera hat zwei volle Aufnahmemodi, die Reihenaufnahmen zulassen und einen Videoausgang:

- Schnelle Zeitreihen:

Manche Kameras besitzen einen Speicher, der zu jeder Zeit die letzten 9 Bilder festhält. Je nach Zeilenauflösung entsteht dabei alle 0,2 Sekunden (50 Bildzeilen), 0,4 Sekunden (100 Bildzeilen) oder 0,8 Sekunden (200 Bildzeilen) ein Bild. Auf diese Weise können kurze Sequenzen schneller Vorgänge mit voller Bildqualität aufgenommen werden.

- Langsame Zeitreihen:

Manche Kameras besitzen einen frei programmierbaren Aufnahmetimer, der einen Mindestabstand der Aufnahmen von 10 Sekunden zulässt und nach oben keine Grenze kennt. Die Anzahl der Aufnahmen einer Serie

sind nur durch die Speicherkapazität begrenzt und kann etliche Hunderte Thermogramme in voller Bildqualität betragen.

- Lange Überwachungen per Video:

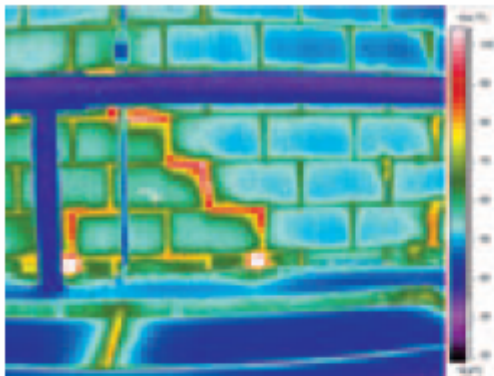
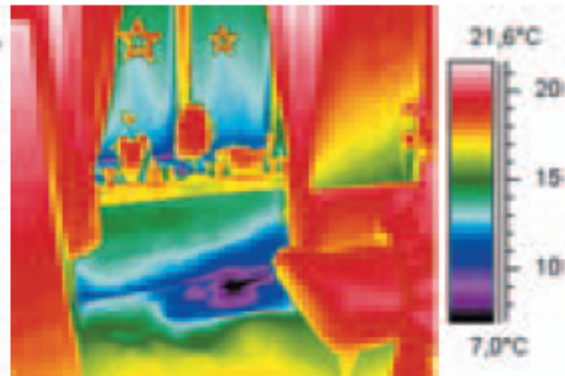
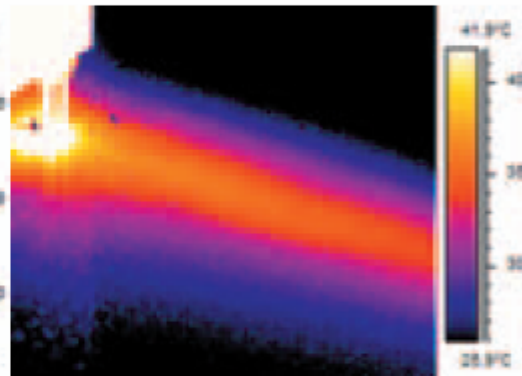
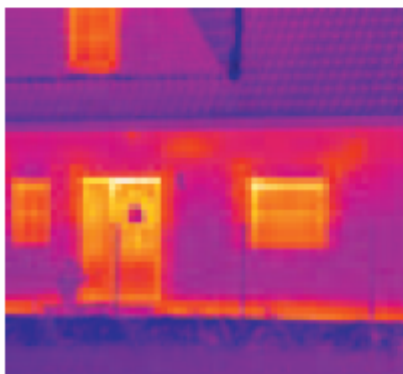
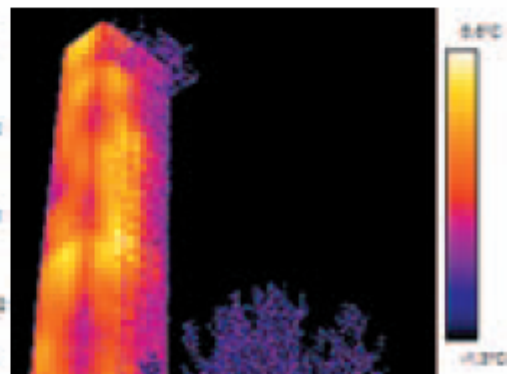
Zusätzlich zur Aufzeichnung der Thermogramme in voller Bildqualität bietet die Kamera auch einen Videoausgang, dessen Signal über ein Zusatzgerät auf jedem handelsüblichen Videorecorder aufgezeichnet werden kann. Dabei kann aber nur eine reduzierte Qualität erreicht werden, weil lediglich eine Temperaturskala eingeblendet wird und keine Kalibrierdaten mit aufgezeichnet werden.

Temperaturmessung vor Ort

Die Ausstattung der Kamera mit einem 10cm Bildschirm lässt eine sofortige Temperaturmessung vor Ort zu, so dass direkt am Objekt über thermografische Befunde diskutiert werden kann. Dazu können bis zu 10 Temperaturmessstellen im Bildfeld definiert werden. Jede Messstelle mittelt dabei die Temperatur über ihre einstellbare Fläche und korrigiert sie mit einem variablen Emissionskoeffizienten. Das lässt eine sehr hohe Messgenauigkeit und Vergleichsmessungen direkt an Ort und Stelle zu, ohne dass dazu eine Laborauswertung aufgenommener Thermogramme durchgeführt werden muss.

Emission und Absorption

Eine Hochleistungskamera lässt selbstverständlich eine Korrektur der Emission und der Absorption per Software zu. Die Korrektur des Emissionskoeffizienten ist dabei unproblematisch, da die meisten mineralischen, nicht leitenden Materialien einen Koeffizienten zwischen 0,98 und 0,92 aufweisen. Dadurch ist der Messfehler durch einen Irrtum in diesem Bereich mit etwa 0,1 °C und weniger extrem klein. Die Absorption der Luft ist erst auf sehr große Abstände hin von Belang. Im Bereich von einigen 10 bis 100 Metern kann sie vernachlässigt und auf 0 eingestellt werden. Sind Fernerkundungsmessungen notwendig, so ist eine Referenzmessung zur Bestimmung der atmosphärischen Absorption notwendig.

Anwendungsbeispiele:**INFRAROTTHERMOGRAFIE FÜR DEN BAUBEREICH - ANWENDUNGSBEISPIELE***Defekter Kamin**Eine offene Anschlussfuge unter einer Fußleiste führt zu kalten Füßen im Wohnzimmer.**Schwachstellen an einer Hausfassade**Verlauf der Heizungsleitung im Fußboden**Fassade eines Wohngebäudes**Zustand eines Schornsteins*

3. Literaturverzeichnis:

Fachliteratur:

- Thermografie im Bauwesen. von Helmut Weber, u. a.
Expert Vlg., Renningen (1982), ISBN: 3885087677
- IR-Thermografie im Bauwesen von Alexandra Raicu
Irb-Verlag (1999), ISBN: 3816748457
- Infrarot - Thermographie. von Herbert Fritsch
IRB Verlag, Stuttgart (Juni 1997) , ISBN: 3816700446

Internet:

- <http://www.infratec.de>
- <http://www.thermografie-schweiger.de>
- <http://www.thermografie.de>
- <http://www.thermografie.com>
- www.radio101.de/thermografie
- etc.