

# Neue Bildbearbeitungsmethoden für die instationäre Bauthermografie

Georg DITTIÉ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dittié Thermografie, Königswinter

**Kurzfassung:** In jüngerer Zeit bewegt sich die Bauthermografie weg von den gewohnten passiven Verfahren, die bekanntermaßen von der Heizperiode abhängen. Nutzt man nun Unterschiede in der Wärmekapazität anstatt in der Wärmeleitung aus, so stehen vor allem auch im Sommer instationäre Verfahren zur Verfügung. Das müssen noch nicht mal aktive Methoden sein, der natürliche Tagestemperaturgang reicht als Anregung oft aus. Allerdings hat sich herausgestellt, daß die durchschnittliche Firmware üblicher IR-Kameras damit überfordert ist. Oftmals übersteigen die Störeinflüsse benachbarter Bauteile oder auch der nur bedingt kontrollierbaren Umwelt das eigentliche Nutzsignal. Das eigentliche Nutzsignal kann aber aus dem Rohthermogramm heraus gearbeitet werden, indem bewährte Bildverarbeitungsverfahren aus anderen Fachbereichen wie der Astronomie, Medizin oder Fernerkundung in die Thermografie eingeführt werden. Im Vortrag wird anhand einiger Praxisbeispiele vorgestellt, wie moderne Bildbearbeitung zu einer verlässlichen Bauwerksanalyse durch instationäre Verfahren führt. Das ist auch schon deshalb interessant, weil die Bauthermografie sich nachfragebedingt von der Energieberatung weg- und auf die Untersuchung von Feuchte- und Wärmedämmungsschäden zu bewegt.

## Einführung

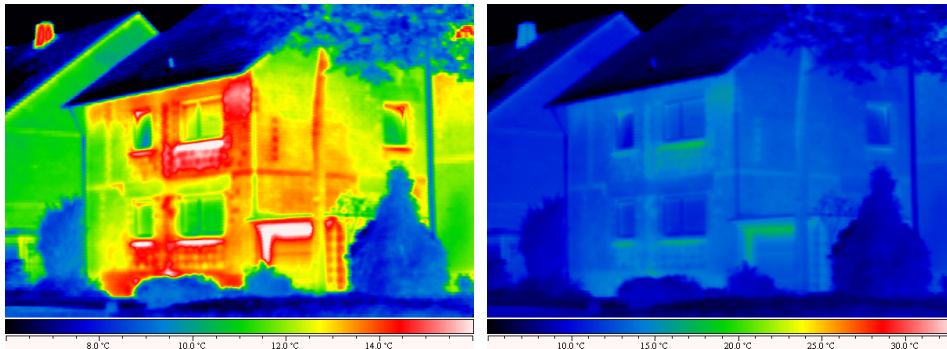
Die mittlerweile sehr fortgeschrittene Bildqualität von Thermografiekameras macht es möglich, unter Umständen und mit Verfahren zu arbeiten, die noch vor etwa 10 Jahren undenkbar gewesen wären. Speziell in der Bauwerksdiagnostik haben sich in jüngerer Zeit Arbeitsweisen in der Thermografie entwickelt, die instationäre Aufheiz- bzw. Abkühlprozesse nutzen oder gar auf aktive Anregung beruhen. Bei diesen Arbeitsweisen hat man es mit neuen Störquellen zu tun, wie nur geringe Anregemöglichkeit oder auch das sehr unterschiedliche thermische Verhalten benachbarter Bauteile, die sich gegeneinander im Resultat stören können. Durch den immer größer werdenden Signal-Rausch-Abstand können aber moderne Bildbearbeitungsverfahren angewandt werden, die diese Störungen beseitigen, ohne das Resultat zu verfälschen. Dadurch wird das Einsatzspektrum von Thermografie zur ZfP an Bauwerken erweitert sowie die früher übliche Saisonabhängigkeit aufgehoben.

## Was bisher geschah

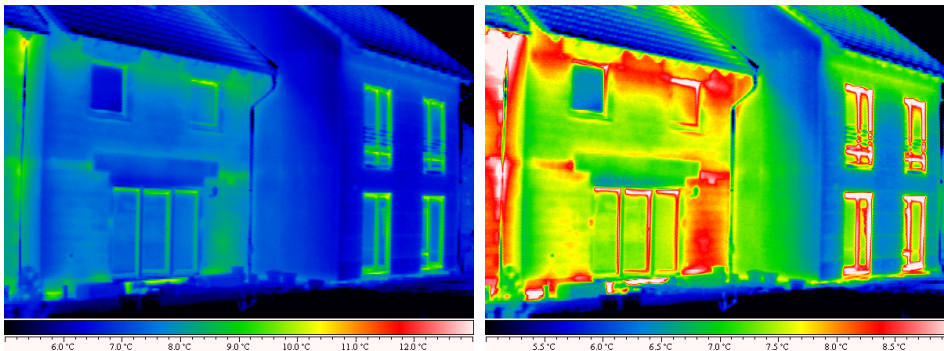
Die einfachste Form der Bildverarbeitung in der Thermografie ist die sachdienliche Skalierung und Einfärbung. Wie jeder eigentlich wissen sollte, sind Thermogramme von sich aus Intensitätsbilder ohne jede Farbinformation. Zur besseren Interpretierbarkeit



werden diese Intensitäten dann Farbwerten zugeordnet und diese ausgegeben. Was dem Laien attraktiv erscheint, kann mitunter zu Irritationen oder gar zum Missbrauch führen. Ganz speziell in der Billigsektor-Thermografie hat eine zu enge Skalierung und damit suggestive Einfärbung um sich gegriffen.

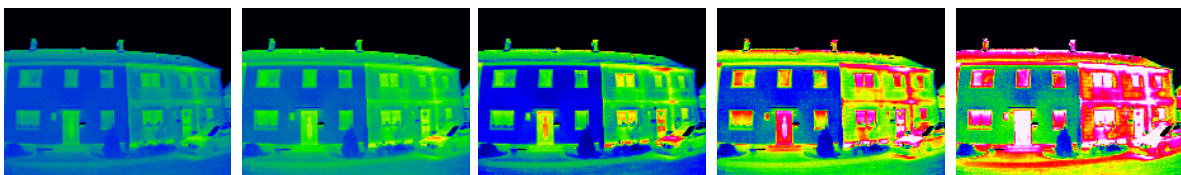


**Abb. 1:** Aus jeder „Energieschleuder“ kann man mit *geeigneter Skalierung* ein Niedrigenergiehaus machen.

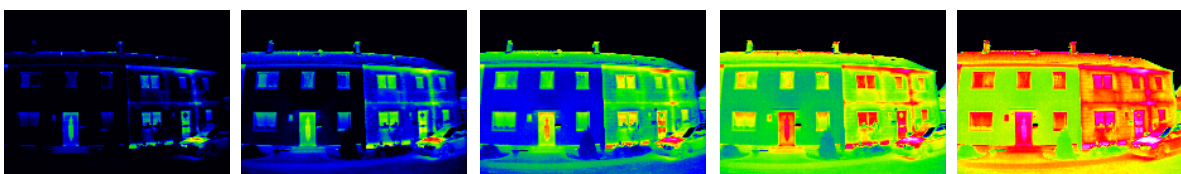


**Abb. 2:** Genauso, wie man aus Niedrigenergiehäusern mühelos „Energie-Katastrophen“ machen kann.

Beim Einfärben und Skalieren von Thermogrammen muß einem immer bewusst sein, dass Farbe, Level und Span willkürlich sind und den eigentlichen Inhalt des Thermogramms nicht betreffen. Es ist immer anzustreben, daß man diesen Möglichkeiten regelkonform und sparsam umgeht. [1]



**Abb. 3:** Exakt dieselbe Thermogrammaufnahme, nur von sehr weit bis eng kontrastiert.

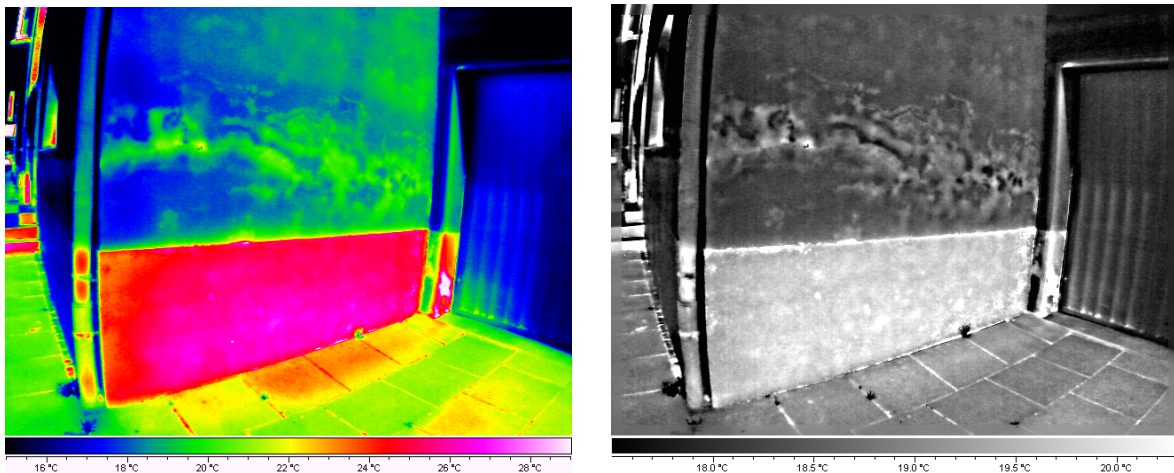


**Abb. 4:** Exakt dieselbe Thermogrammaufnahme, nur mit jeweils anderen Levels.

In den Abbildungen 3 und 4 wird demonstriert, wie exakt das selbe Thermogramm seinen Darstellungscharakter verändert, wenn man den Kontrast durch die Wahl des Spans von

ganz weit (also kontrastarm) bis ganz eng (kontrastreich) einstellt und wenn man die Darstellungshelligkeit durch Einstellen des Levels von zu dunkel bis zu hell verändert.

Dabei ist es empfehlenswert, einfach ganz auf Farbe zu verzichten und zur schlichten Schwarz-Weiß-Darstellung zurück zu kehren, die dem eigentlichen Inhalt eines Thermogramms am nächsten kommt. Der Verzicht auf Farbe hat den Vorteil, dass der menschliche Sehsinn einfach Helligkeitsunterschiede erheblich mehr toleriert als Farbtonunterschiede. Damit entfällt eine möglichst exakte Einstellung des Levels, auch kleine Helligkeitsverläufe in Form eines ungleichmäßigen Hintergrundes werden nicht als störend wahrgenommen.



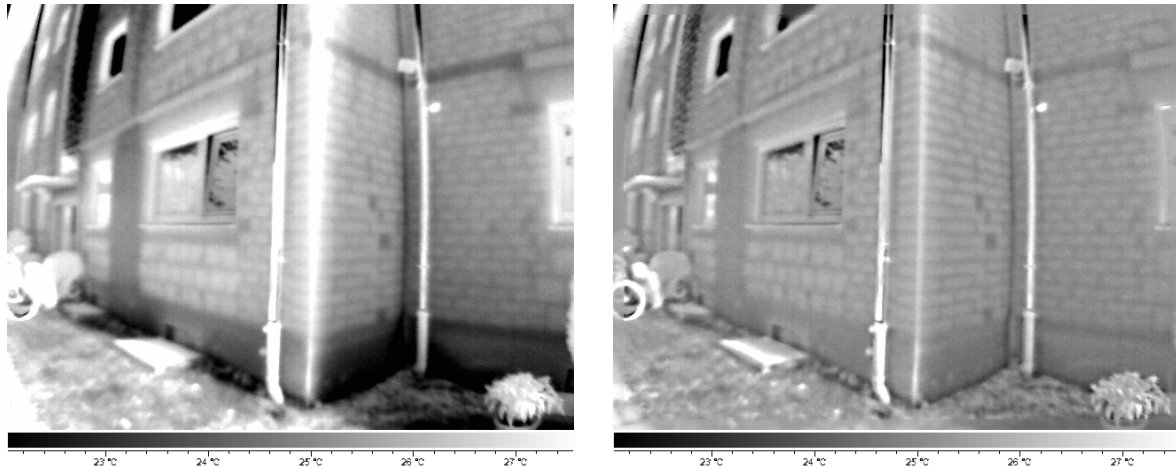
**Abb. 5:** Zweimal das selbe Thermogramm einer von unten her durchfeuchteten Wand mit Putzablösungen. Die gewöhnliche Einfärbung führt hier dazu, dass die Strukturen im unteren, etwas dunkleren Gebäudesockel verloren gehen.

### **Bildebnungsverfahren**

Die hohe Bildqualität moderner Sensoren macht es möglich, dass man den Span tatsächlich sehr eng wählt, um auch kleinste Temperaturunterschiede heraus zu arbeiten. Das ist speziell in der instationären Thermografie notwendig, wenn man natürliche Temperaturwechsel als Anregungsquelle ausnutzen muß. Durch den Verzicht auf eine ohnehin nur künstliche Einfärbung wird vermieden, mit der Darstellung zu übertreiben.

Dafür taucht das Problem auf, dass im fertigen Thermogramm der gewählte, enge Span nicht auf alle Bildteile passt, manche sind zu warm und erscheinen überbelichtet, andere allgemein zu kühl und deshalb unterbelichtet. Die Aufgabe ist es, das allgemeine Niveau aller Bildteile aufeinander anzupassen.

Gelingt das mit einem geeigneten Algorithmus, so können trotz unterschiedlichen allgemeinen Temperaturniveaus sehr feine und detaillierte Strukturen von Bauwerken sichtbar gemacht werden, die mit herkömmlicher Thermografie nur lokal nachweisbar wären.



**Abb. 6:** Dieses ungedämmte Haus sollte im Sommer auf Wärmebrücken hin untersucht werden. Das Thermogramm entstand beim Temperaturmaximum am frühen Nachmittag, wo die Sonne das Originalbild deutlich stört. Durch teilweises Abziehen des Hintergrundes werden aber alle feinen Details störungsarm visualisiert.

Dazu stehen aus der allgemeinen Bildverarbeitung lang bewährte Verfahren zur Verfügung, unter anderem auch das „unsharp masking“. Das Prinzip funktioniert so, dass aus dem Originalthermogramm ein Hintergrund mit den großen Strukturen extrahiert wird, indem das Original mehr oder weniger stark tiefpassgefiltert wird.

Die mathematischen Verfahren dazu können aus der Literatur [2,3] entnommen werden. Die beiden verbreitetsten Verfahren ist einmal der Fourier-Tiefpassfilter und dann der Masked-Median-Filter.

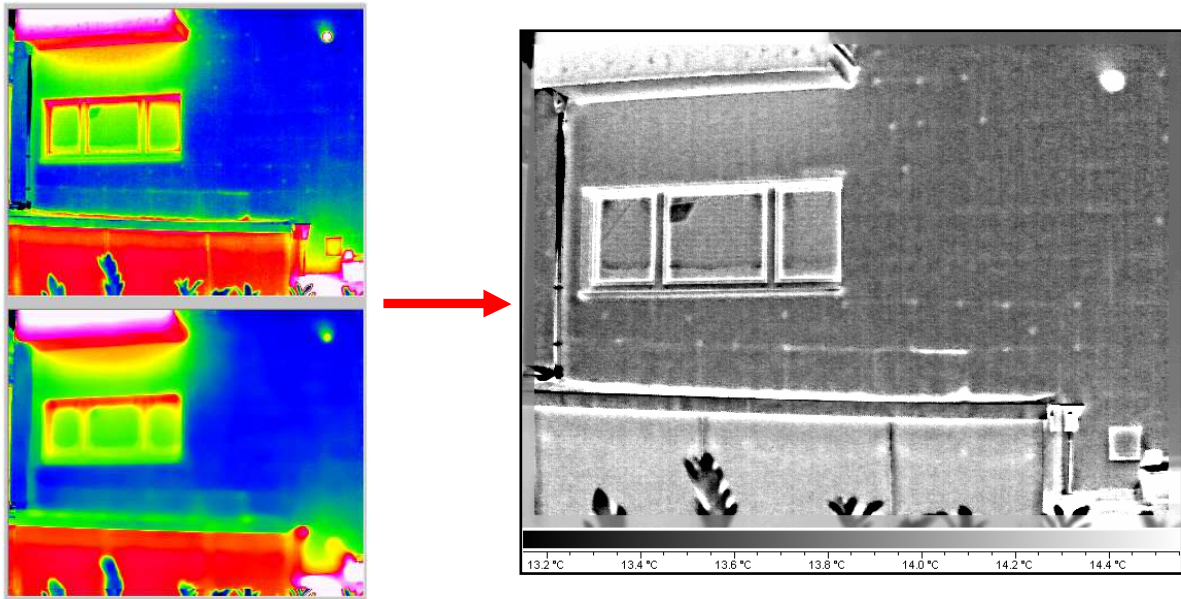
Beim Fourierfilter wird einfach eine 2D-Hintransformation vorgenommen und nur die tiefen Ortsfrequenzen (also die ganz großen Strukturen) durchgelassen. Die 2D-Rücktransformation erzeugt dann das tiefpassgefilterte Hintergrundbild. Der Nachteil ist, dass auch Kanten verschmiert werden.

Beim Masked-Median-Filter wird um jedes Bildpixel eine Maske gelegt (i.A. ein Umkreis) und der Pixelwert gegen den Medianwert in diesem Umkreis ausgetauscht. Das Resultat ist wieder ein Hintergrund der nur große Strukturen enthält, wobei aber scharfe Kanten auch scharf bleiben.

Diesen Hintergrund zieht man nun vom Original ab und stellt den Level des Resultats so ein, dass er wieder auf dem mittleren Level des Originals liegt.

Dabei muß man den Hintergrund mit 100% Wirkung abziehen, geringere Werte gehen auch. Wenn man den Hintergrund vollständig abzieht, so bleiben alleine alle feinen Details sichtbar, während die großen völlig eingeebnet werden. Bei kleinerer Wirkung bleibt der Rest des Originals als abgedämpfter Eindruck bestehen.

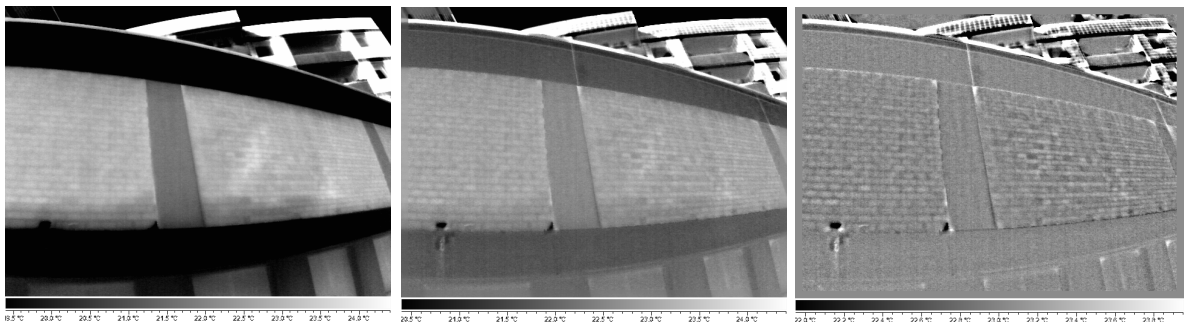
Der kleine Nachteil des Verfahrens ist, dass in einem eingeebneten Thermogramm keine verlässlichen Temperaturen mehr gemessen werden können. Das Verfahren eignet sich also eher zur Visualisierung und Interpretation des Bildinhaltes.



**Abb. 7:** Durch Subtraktion eines unscharfen Hintergrunds werden feine Bilddetails erst nachweisbar. Die Aufnahme entstand als Einzelbild ca. 30 Minuten nach Sonnenuntergang.



**Abb. 8:** Links: Rohes Thermogramm eines WDVS bei abendlicher Abkühlung. Die im Beton von Balkonen und Brüstungen gespeicherte Tageswärme überstrahlt viele Teile des Bildes. Mitte: Wenn man einen Hintergrund mittels eines Fourier-Tiefpassfilters berechnet und mit 80% abzieht, werden viele Details sichtbar, aber es verbleiben Überschwinger und Artefakte. Rechts: Erst die Verwendung eines Kanten erhaltenden Medianfilters, ebenfalls mit 80% Wirkung macht die feinen, hier gesuchten Details überall störungsarm sichtbar.

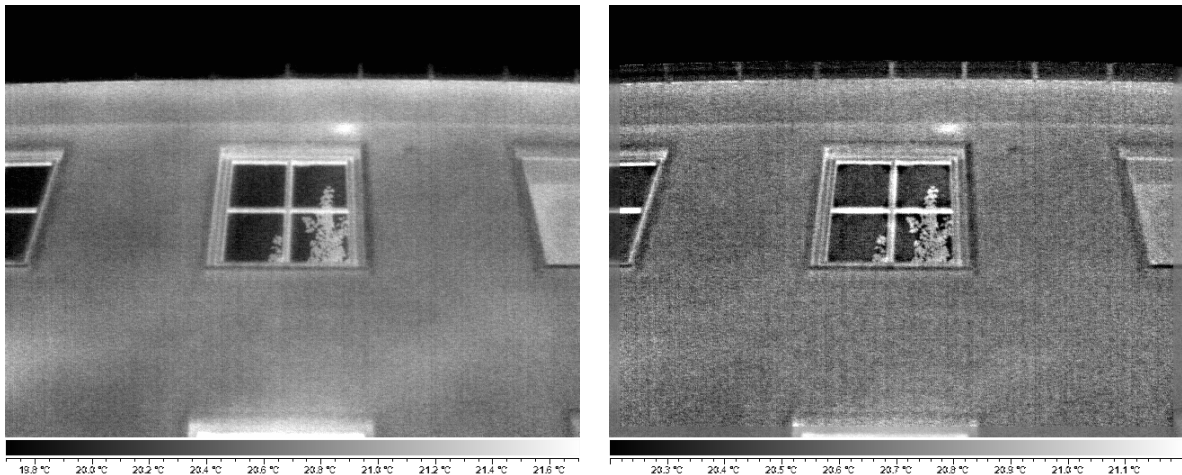


**Abb. 9:** Links: Rohes Thermogramm einer zweischalig ausgemauerten Beton-Skelettkonstruktion bei steigender Tagestemperatur. Die massiven Betonteile bleiben dabei kalt und daher zu dunkel. Mitte: Wenn der errechnete Untergrund mit 70% Wirkung abgezogen wird, so werden die feinen Fugen gut sichtbar, bei gleichzeitiger Darstellung der großflächigen Durchfeuchtungszone. Rechts: Wenn der Hintergrund mit 100% voll abgezogen wird, so werden alle großflächigen Strukturen im Thermogramm beseitigt. Alleine die sehr kleinen Details sind sichtbar.

## Verfahren zur Rauschreduktion

In den meisten Fällen reicht ein hochwertiges Einzelthermogramm aus. Bei ungekühlten Mikrobolometerkameras (der Standard in der Gebäudethermografie) sollte vorher mittels des Shutters ein Abgleich vorgenommen werden um einen inhomogenen Hintergrund durch die Kamera und das sensortypische Auslegitter zu entfernen.

Es gibt aber auch Fälle, wo man mit sehr geringen Temperaturunterschieden bei Anregung und Abbildung auskommen muß. Hier ist es wünschenswert, ein Verfahren an der hand zu haben, dass das ohnehin geringe Sensorrauschen noch weiter reduziert, damit man auch allerfeinste Unterschiede per Bildverarbeitung heraus arbeiten kann.



**Abb. 10:** Hochwertiges Einzelthermogramm einer Wärmedämmung während der abendlichen Abkühlung. Durch ungeeignetes Wetter sind die Abkühlungsanregung und damit der Kontrast gering. Bei der wetterbedingten Kontrastarmut bleibt auch die Bildebnung erfolglos. Sie verstärkt im Wesentlichen nur das Sensorrauschen.

Zu diesem Zweck setzt man die Kamera auf ein Stativ und nimmt eine ganze Aufnahmeserie vom Objekt aus. Bei der Auswertung überlagert man diese Bildserie einander auf und bildet für jedes Pixel den Mittelwert der Pixel in den Einzelbildern.

Die Idee hinter der Rauschreduktion ist, daß jedes Pixel vom Aufnahmeobjekt bei jeder Aufnahme in gleicher Weise belichtet wird. Das Rauschen aber ist von Bild zu Bild zufällig und mittelt sich auf Dauer weg.

Wenn man nun eine ganze Reihe von Thermogrammen aufnimmt, die einander überlagert und dann den Mittelwert für jedes Pixel einsetzt. Alle Objektdetails bleiben exakt so erhalten, das Rauschen hebt sich zunehmend weg.

Die Rauschreduktion berechnet sich zu  $S/N_{\text{mittel}} = S/N_{\text{einzel}} * \text{sqrt}(\text{Thermogrammanzahl})$

**Hinweis 1:** Entfernt wird natürlich nur zufälliges Rauschen. Die Ausleseartefakte von Mikrobolometern werden nicht entfernt. Man muß jede Einzelaufnahme vorher mit dem Shutter abgleichen.

**Hinweis 2:** Empfehlenswert sind bei modernen Kameras Serien von etwa 20 – 30 Thermogrammen. Bei wesentlich mehr Aufnahmen stößt man an die Digitalisierungsgrenze des A/D-Wandlers in der Kamera.

Erreichbar sind Thermogramme mit nur *einem einzigen* Grad Span. Noch weniger lässt die Hardware der IR-Kamera nicht mehr zu, weil irgendwann auch die digitale Auflösungsgrenze des AD-Wandlers erreicht ist.



**Abb. 11:** Das Resultat ist der Mittelwert aus 20 Einzelthermogrammen, wobei jedes einzelne vorher mit dem Shutter der IR-Kamera abgeglichen und vor dem Überlagern mit der Bildebgebung behandelt wurde. Der Span des Thermogramms liegt nur noch bei *einem einzigen* Grad.



**Abb. 12:** Das Verfahren hat seine Grenzen in der digitalen Auflösung des AD-Wandlers des Sensors. Hier wurden 20 Einzelaufnahmen zuerst einander überlagert und gemittelt und dann erst das Gesamtergebnat eingeebnet. Die begrenzte digitale Auflösung des AD-Wandlers zeigt sich hier in Form von unschönen „Zwiebelringmustern“.

Mittels der Rauschreduktion lassen sich also auch Situationen nutzen, z.B. bei langfristig anberaumten Ortsterminen, die für die stationäre Thermografie oder bei erschwerter Objektvorbereitung eigentlich nicht so geeignet sind.

Ein ganz besonderer Vorteil der Rauschreduktion durch Überlagerung ist der, dass alle Temperaturen genauso erhalten bleiben, dass sogar die Meßgenauigkeit nochmals zunimmt.

## Ausblick

Schon jetzt kristallisieren sich Regeln für die Bildbearbeitung heraus:

- Bei der Bildebnung sind 70 – 80% Wirkung optimal, wenn auch große Strukturen sichtbar bleiben sollen.
- Wenn das Objekt große, scharf begrenzte Strukturen hat (wie bei Bauwerken), sollte der Medianfilter eingesetzt werden.
- In eingeebneten Thermogrammen können *keine Temperaturen* mehr gemessen werden.
- Bei der Rauschreduktion durch Überlagern sind Serien mit 20 – 30 Thermogrammen sinnvoll und förderlich.
- Bei der Aufnahme von Bildserien zur Rauschreduktion ist jedes Thermogramm vor Aufnahme per Shutter abzugleichen.
- Die Rauschreduktion *erhöht sogar die Meßgenauigkeit*. Sie kann bis an die konstruktiven Grenzen der IR-Kamera heran geführt werden.

## Literaturhinweise:

- [1] Richtlinien zur Bauthermografie des VATH. E.V.
- [2] Bernd Jähne, „Digitale Bildverarbeitung“, Springer 2005
- [3] Anil K. Jain, „Fundamentals of image processing“, Prentice Hall 1988