

Neue Anwendungen der aktiven Bauthermografie

(Nutzung der Wärmekapazität und von Zeitabläufen)

Übertragung von ZfP-Verfahren ins Bauwesen

- Die Idee hinter der instationären Thermografie
- Vorteile der instationären (selbst angeregten) Thermografie
- Anregung durch natürliche Vorgänge
- Selbst erzeugte Anregung
- Aufnahmetechniken
- Auswertungsmethoden
- Maximale Anwendungstiefe



Die Idee hinter der Selbstanregung

Die „passive“ Bauthermografie ist dadurch definiert, daß man den Zustand des Meßobjekts und die Umweltbedingungen (Temperaturdifferenz, Wetter etc.) so akzeptiert, wie sie vorgefunden werden und dazu ein einzelne Aufnahme pro Objekt macht.

Die selbst angeregte, oder offiziell „aktive“ Thermografie basiert darauf, daß man das Objekt periodisch oder einmalig aufheizt oder abkühlt und dabei die Temperaturänderungen aufzeichnet.

Vorteile der aktiven Thermografie sind:

- Unabhängigkeit von der Witterung und Jahreszeit
- Mehr Informationen über Strukturen unter der Bauteiloberfläche
- Thermografie auch an Orten mit gleichförmiger Temperatur (z.B. Keller)



Funktionsprinzip der Selbstanregung

Eine Messung mittels aktiver Thermografie erfolgt in mehreren Schritten:

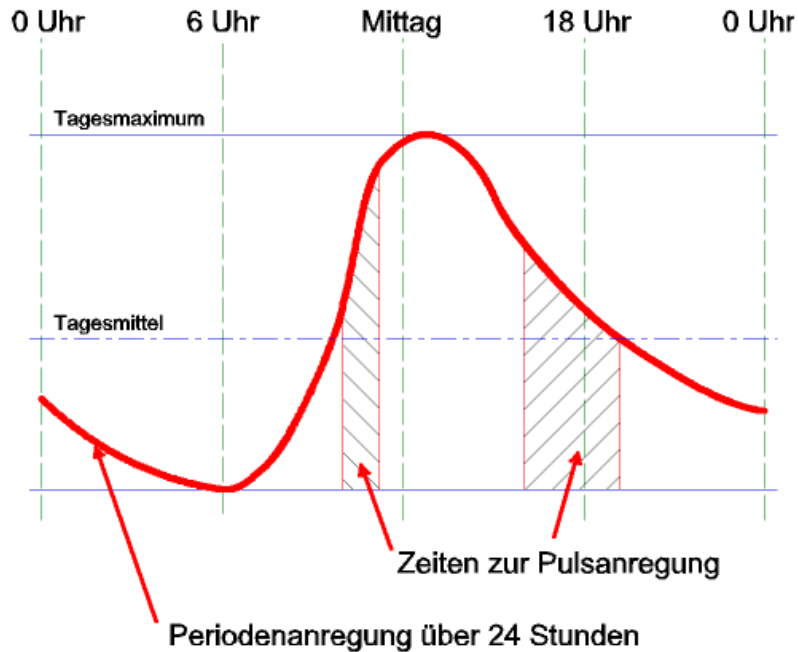
- 1) **Anregung** des Meßobjekts durch aktive Aufheizung oder Abkühlung:
 - Einmalig, durch Apparate oder durch Tagestemperaturanstieg oder –abfall
 - Mehrfach gepulst oder durch einen vollen Tagesablauf über 24 Stunden
- 2) **Aufnahme** des Meßobjekts:
 - Einmalig nach dem Ende der Anregung
 - Als Aufnahmereihe vom Stativ aus über die gesamte Anregungsperiode
- 3) **Auswertung** der Aufnahmereihe:
 - Per *diskreter Fouriertransformation*, wenn eine gepulste Anregung erfolgt ist.
 - Per *Abkühl- oder Aufheizkoeffizienten* bei einmaliger Anregung.

Das Bildresultat der „aktiven“ Thermografie ist kein Thermogramm mehr, sondern eher als intensive Bildverarbeitung zu verstehen, die verborgene Details klarer gegenüber einer herkömmlichen Thermogrammaufnahme heraus arbeiten soll.

3



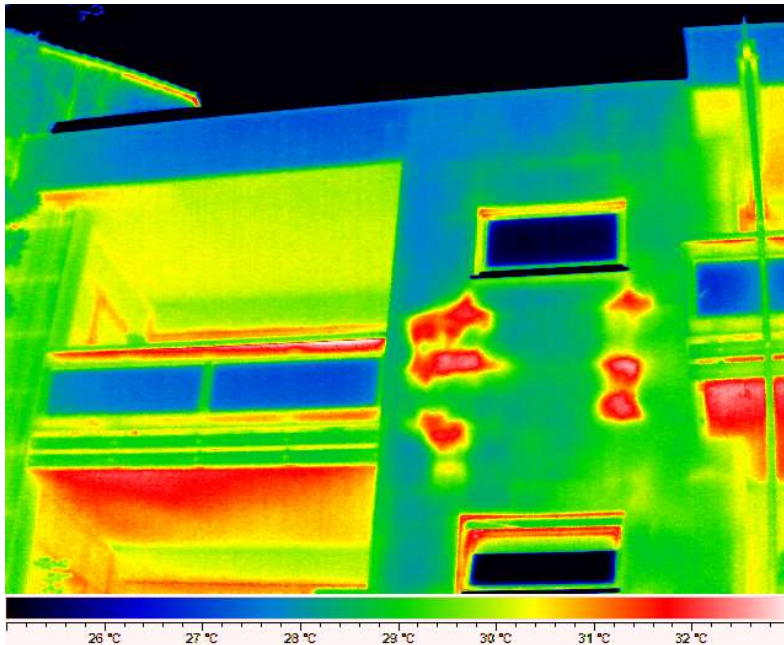
Anregung durch Tagestemperaturgang



*Tagestemperaturgang über 24 Stunden.
Durch den Tageslauf ergibt sich von selbst
eine harmonische Schwingung.*

1. Wenn die Auswertung einer aktiven Thermografie über eine diskrete Fouriertransformation erfolgt, so muß die Aufnahmeperiode über 24 Stunden erfolgen, da sich erst dann eine vollständige Schwingung ergibt.
2. Erfolgt die Auswertung zum Beispiel als Abkühlkoeffizientenbild, so reicht eine Aufnahmeperiode entweder auf dem aufsteigenden oder absteigenden Bereich der Tagestemperaturschwingung.

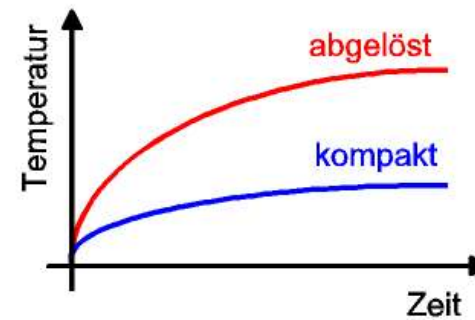
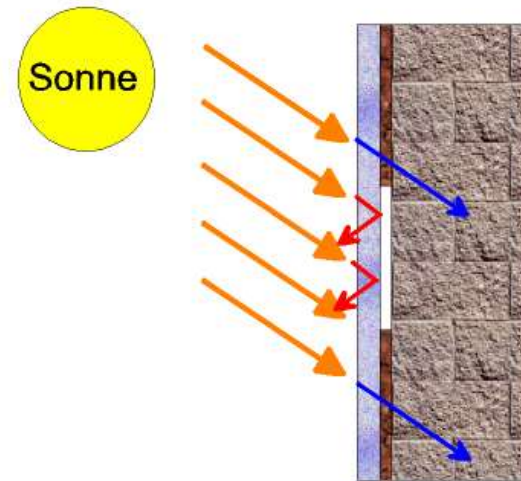
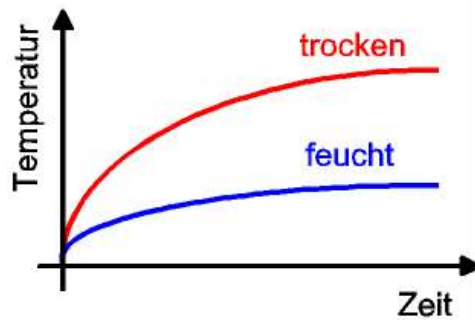
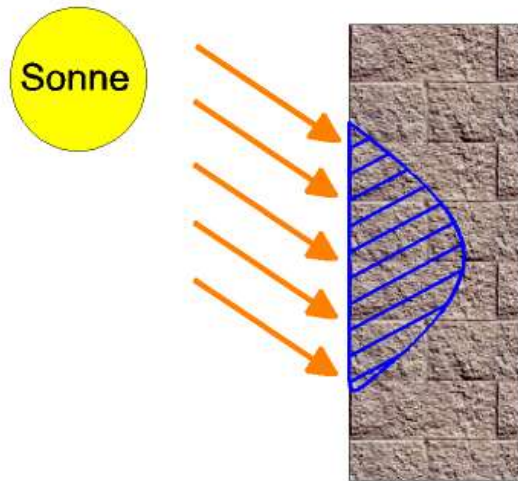
Nutzung von Abendabkühlung zur Beurteilung von Feuchteschäden an WDVS



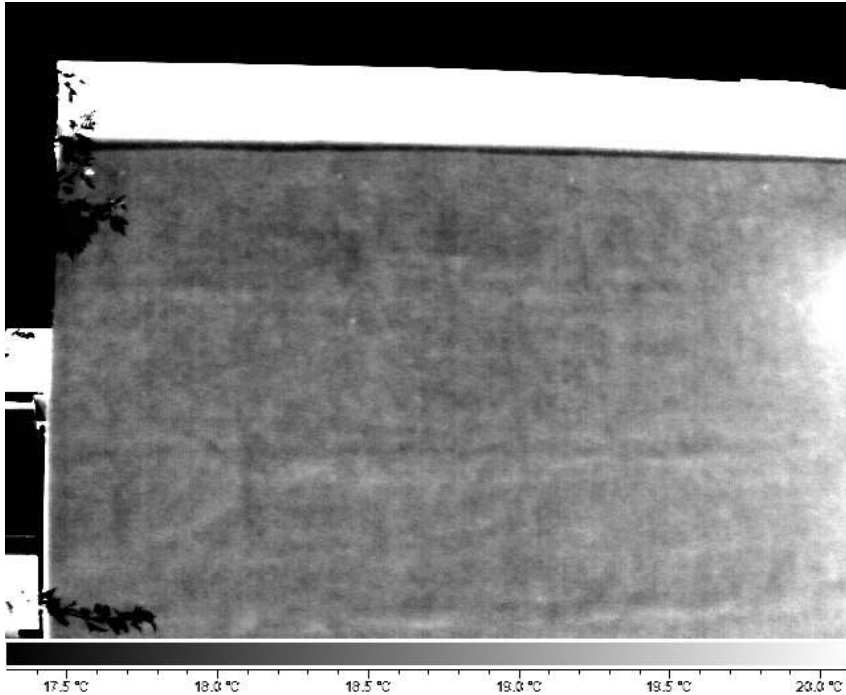
Beschädigte Wärmedämm-Verbundsysteme lassen sich sehr gut untersuchen, wenn die Aufnahmen bei abendlicher Abkühlung nach einem heißen Sommertag gemacht werden. Die hohe Wärmekapazität des stellenweise eingedrungenen Wassers sorgt für eine anhaltend hohe Temperatur, während trockene Zonen schnell auskühlen.



Natürliche Anregung (Besonnung)

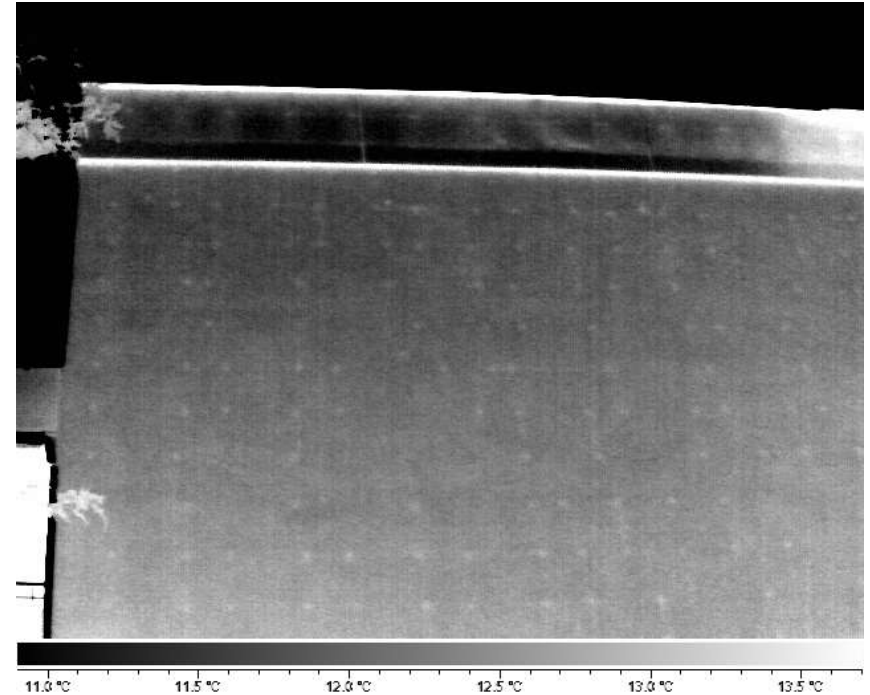


Besonnung und Abendauskühlung



Aufnahme ca. 14.00 Uhr

Die innere Struktur ist nicht sichtbar, dafür die Ungleichmäßigkeiten im Putz



Aufnahme ca. 1h nach Sonnenuntergang

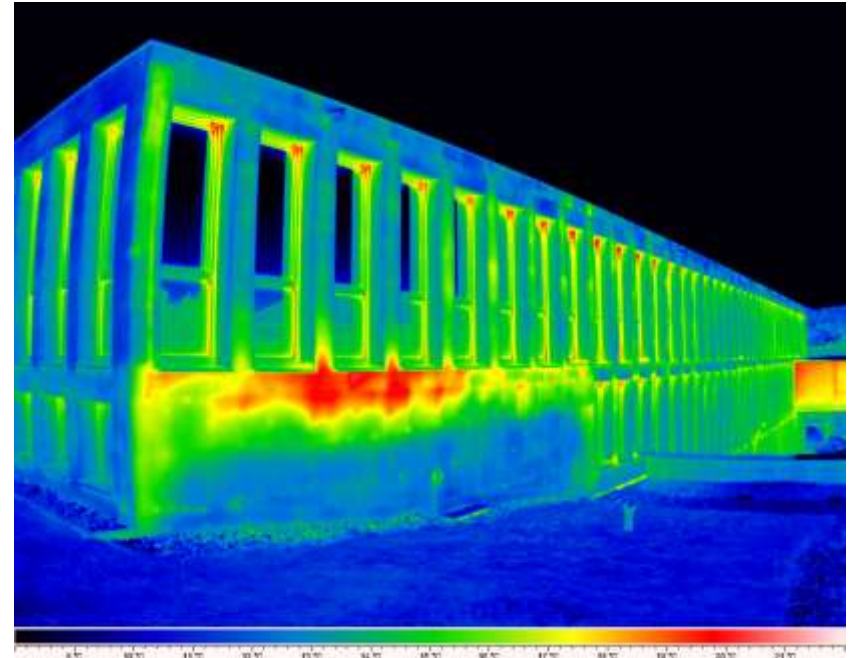
Die innere Struktur mit den Dübeln ist jetzt klar sichtbar, aber keine Putzstrukturen.

Besonnung vs. Abendauskühlung



Aufnahme ca. 14.00 Uhr

Die innere Struktur ist nicht sichtbar, dafür die Putzabplatzungen



Aufnahme ca. 1h nach Sonnenuntergang

Die innere Struktur mit Dübeln und Feuchte ist klar sichtbar, aber keine Putzstrukturen.

Besonnung für oberflächennahe, Abendabkühlung für tiefe Strukturen

8

Besonnung vs. Abendauskühlung (grobe Strukturen)



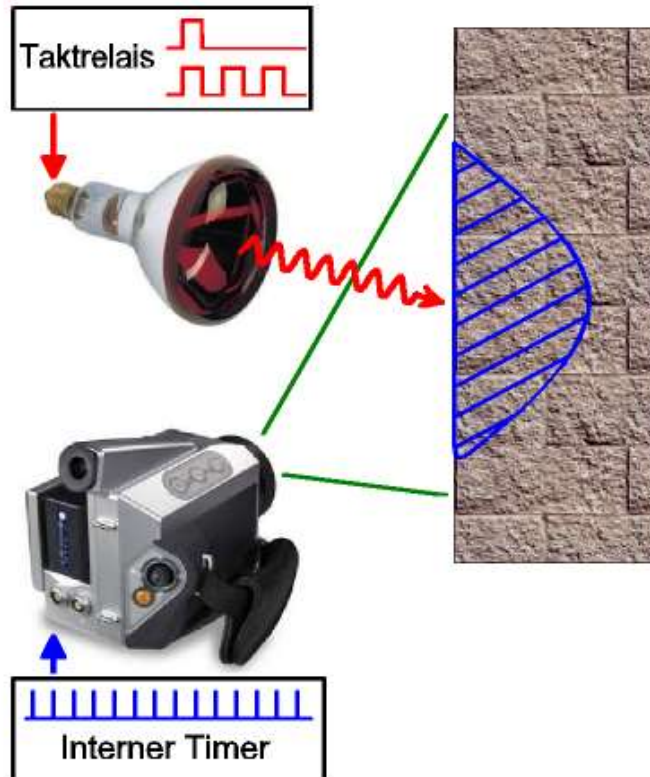
Stahlbetonbau mit deutlichen Defekten
wie zu geringer Deckung, Aufnahme gegen Mittag



Verputzter, aber nicht gedämmter Altbau,
Aufnahme gegen 14h gerade noch im Schatten.

Tiefere, aber sehr grobe Strukturen lassen sich auch durch Besonnung und vormittäglichen Tagesgang nachweisen. Die Nachweistiefe beträgt um die 4 cm.

Selbsterzeugte Anregung



Anregungsschema mit einem getakteten Infrarotstrahler

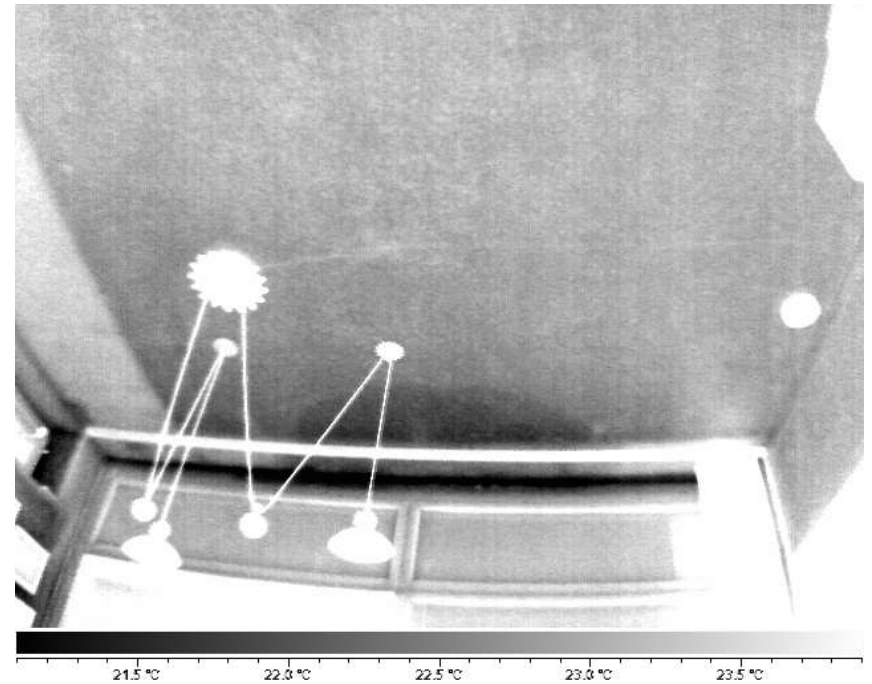
Wenn man im Inneren von Gebäuden misst oder das Wetter sehr gleichförmig ist, dann kann man den natürlichen Tages-temperaturgang nicht nutzen. Hier ist es sinnvoll, selber anzuregen mit:

- Infrarotstrahlern (Nachteil: Reflektionen)
- Heizkissen
- Heißluftgebläsen
- Der vorhandenen Heizung

Dabei kann die Anregung einmalig oder in regelmäßigen Intervallen erfolgen.

Bewährt hat sich ein einziges Anregungsintervall über 10 bis etwa 30 Minuten.

Einzelthermogramm nach Aufheizprozess

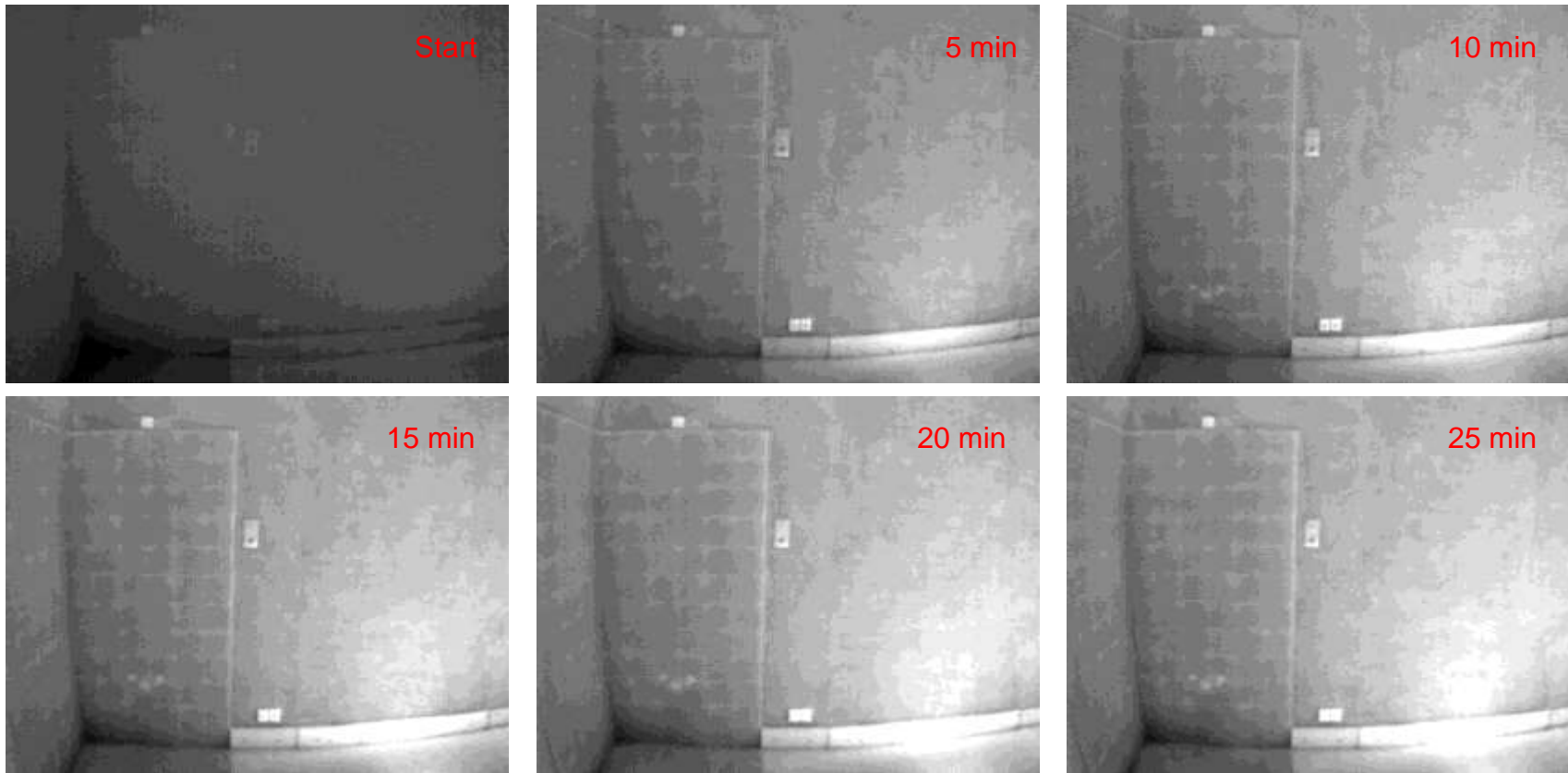


In der Regel reicht der natürliche Tagesgang nicht, z.B. in massiven Bauwerken, in innen liegenden Räumen oder in Kellern. Dann muß aktiv angeregt werden. In diesem Beispiel wurde der Raum lediglich ca 10 Minuten mit Heißluft durch einen 3kW -Heizlüfter gefüllt und anschließend ein einzelnes Thermogramm aufgenommen. Die Zone mit hoher Wärmekapazität können dem Temperaturanstieg nicht folgen und bleibt kühl.

11



Anregungsdauer bei Innenthermografien



Anregung mit 3kW-Bauheizlüfter, Einzelaufnahmen per Timersteuerung

Nach spätestens 10 Minuten ist der maximale Abbildungscontrast erreicht.

Auswertungsmethoden

Eine Messung mittels aktiver Thermografie erfolgt in mehreren Schritten:

1) **Anregung** ...

2) **Aufnahme** ...

3) **Auswertung** der Aufnahmereihe:

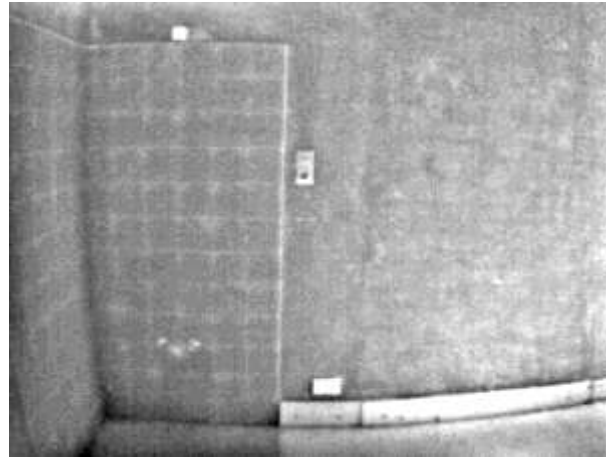
- Einfach als Einzelaufnahme mit oder ohne weiterer Bildbearbeitung
- Per *diskreter Fouriertransformation*, wenn eine gepulste Anregung erfolgt ist.
- Per *Abkühl- oder Aufheizkoeffizienten* bei einmaliger Anregung.



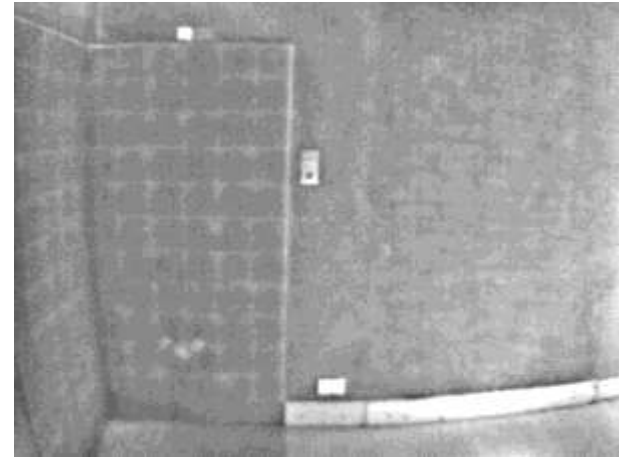
Auswertung: Einzelaufnahme vs. $e^{-(a \cdot t)}$



Einzelbild nach 10 min



Einzelbild nach 10 min,
mit Flatfield und Kontrastierung



Abkühlkoeffizient a aus $e^{-(a \cdot t)}$,
Aufnahmedauer 15 Minuten

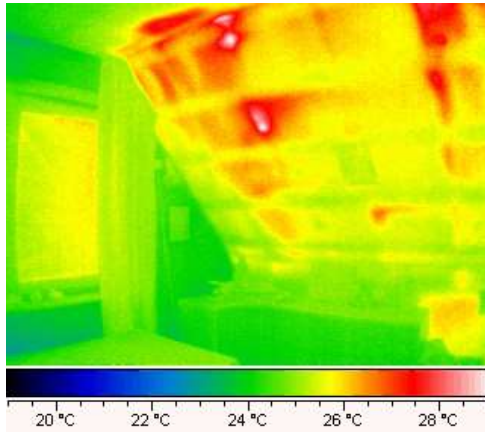
Schon eine nicht weiter bearbeitete Einzelaufnahme zeigt alle erreichbaren Strukturen.

Die Strukturen werden durch einen Untergrundabzug und durch Kontrastieren besser sichtbar, wobei aber auch das Rauschen im Bild ansteigt.

Eine aufwendige Auswertung per Aufheizkoeffizienten zeigt nicht mehr, lediglich weniger Rauschanteile. Der Aufwand an Zeit und Software lohnt nur bei hohen Ansprüchen an die Bildqualität.

Standard ist die Einzelaufnahme, nur bei schwachen Kontrasten ist $e^{-(a \cdot t)}$ notwendig.

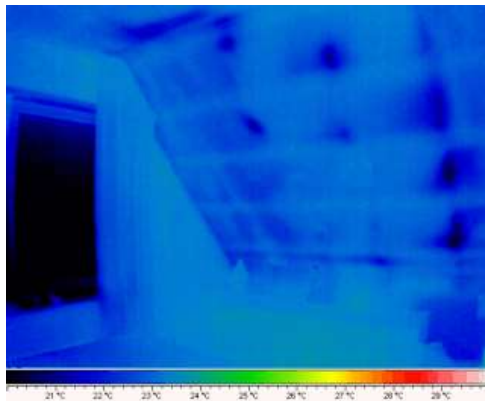
Auswertung: Periodische vs. Einmalanregung



DFT
(Amplitude)



24 h Tagesgang



$e^{-a \cdot t}$



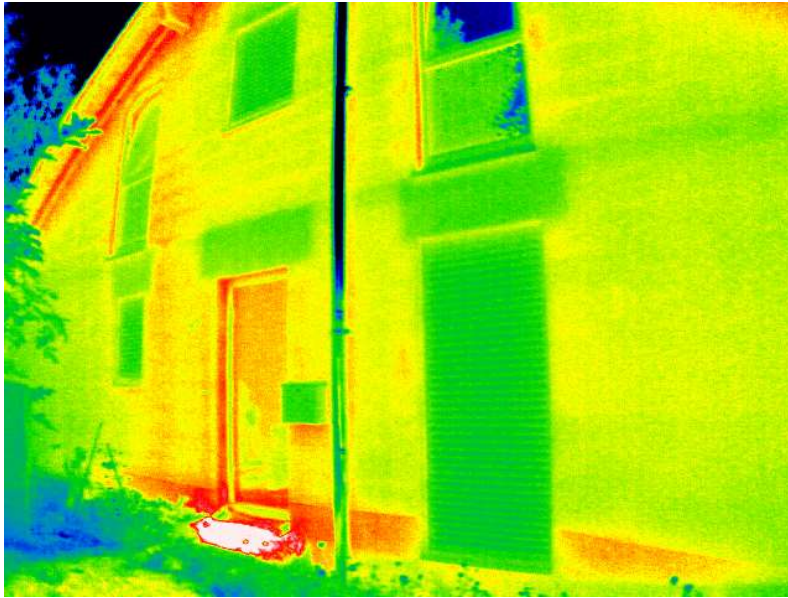
1 h Auskühlung



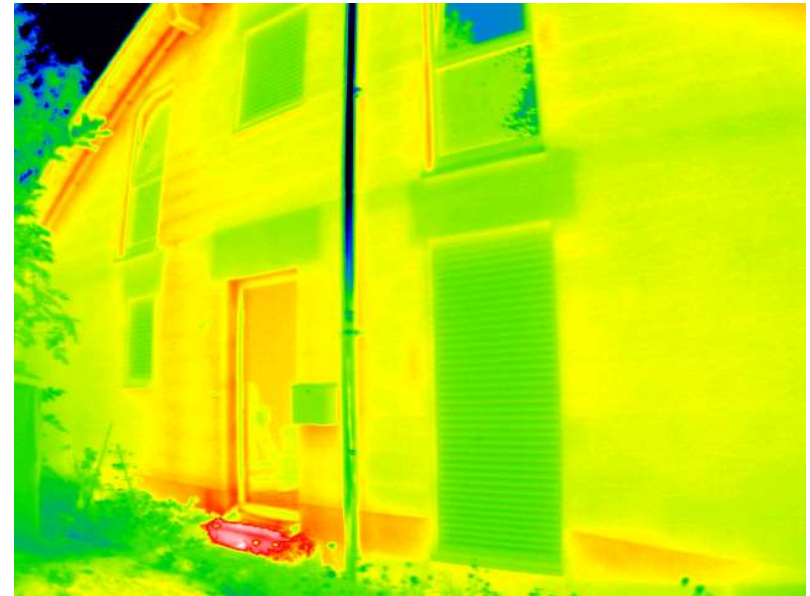
Einzel- oder Puls/Phasen-Anregung reicht in der Regel aus.

Hilfreich: Rauschreduktion

Beispiel: Rauschreduktion durch Ausmitteln



Einzelbild mit 60 mK NETD und 5K Span



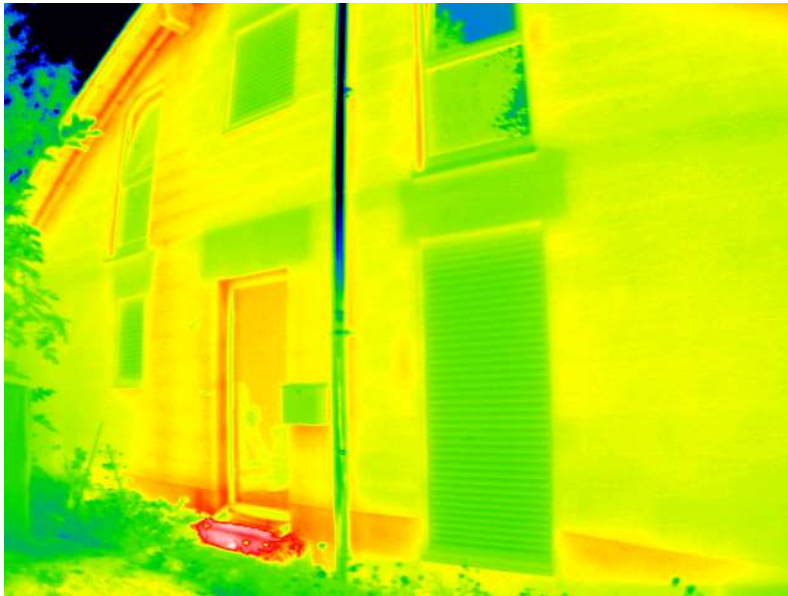
Mittel mit effektiv 15 mK NETD und 5K Span

Die Mittelwertbildung reduziert das Rauschen im Thermogramm mit $\text{NETD}_{\text{mittel}} = \sqrt{\text{Bildanzahl}}$

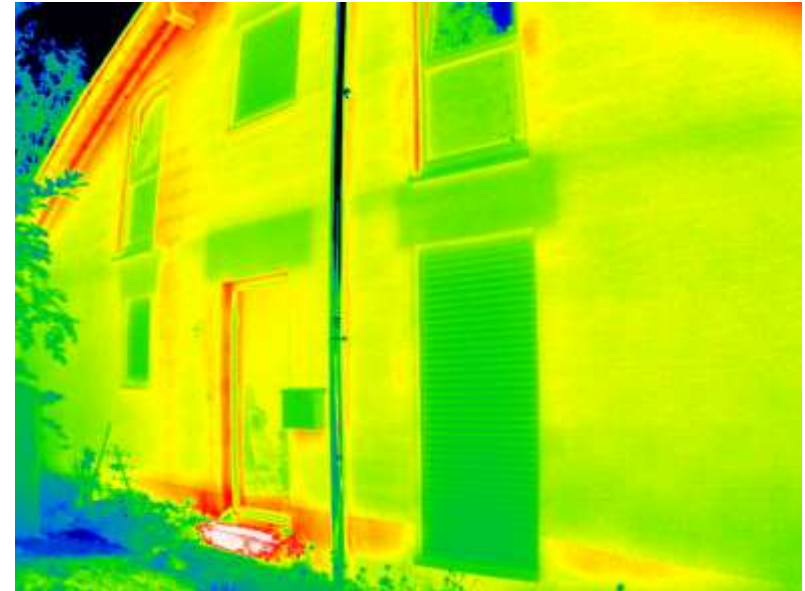
Nur bedingt empfehlenswert, Reihenaufnahmen brauchen zuviel Zeit, ehe sich die Temperatur ändert.

Vergleich Rauschreduktion / hochwertige Kamera

Beispiel: Rauschreduktion durch Einsatz einer hochwertigen IR-Kamera



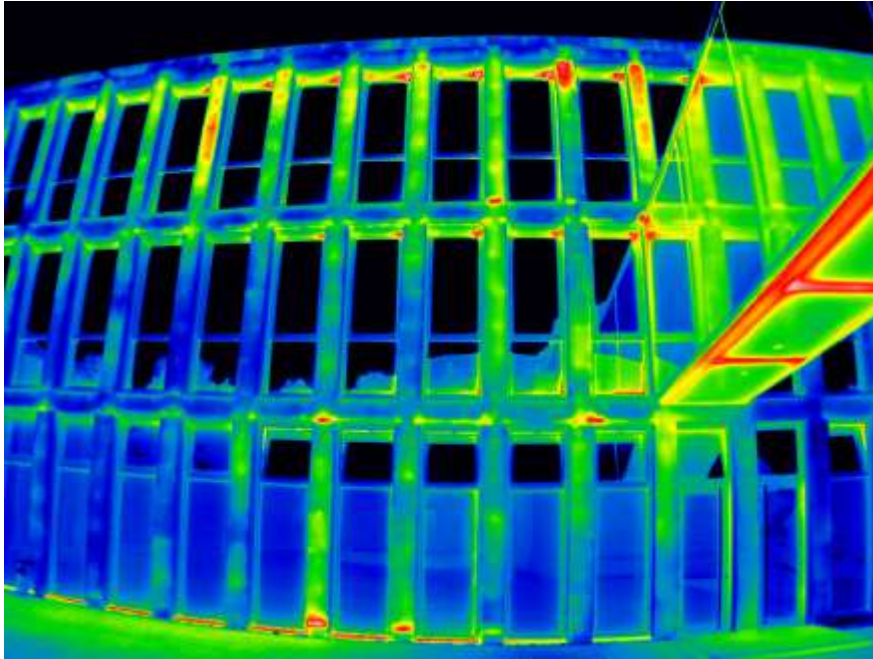
Mittel mit effektiv 15 mK NETD und 5K Span



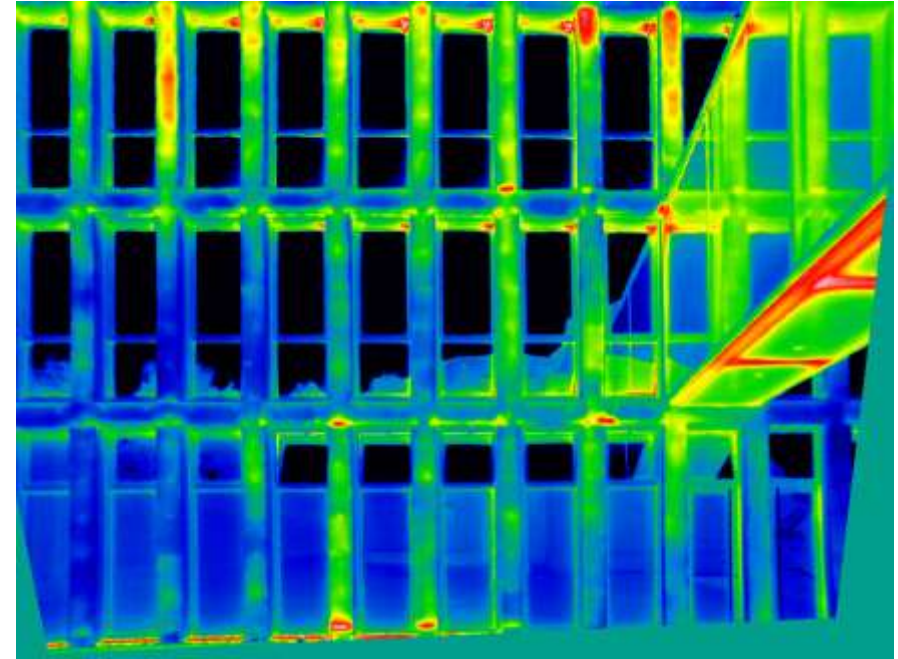
Einzelbild mit 20 mK NETD und 5K Span

Das erspart die kostspielige Anschaffung einer wirklich hochwertigen Kamera, ist aber kein Allheilmittel:
In der aktiven Thermografie sind oft schnelle Einzelaufnahmen und Aufnahmeserien gefragt.

Hilfreich: Entzerren



Rohthermogramm mit stark tonnenförmiger Verzeichnung und weitwinkliger Zentralperspektive

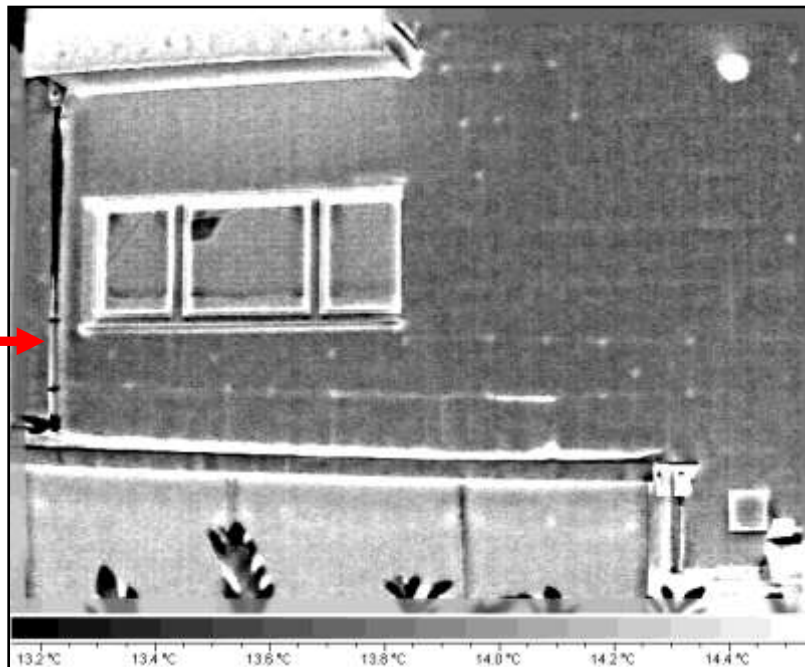
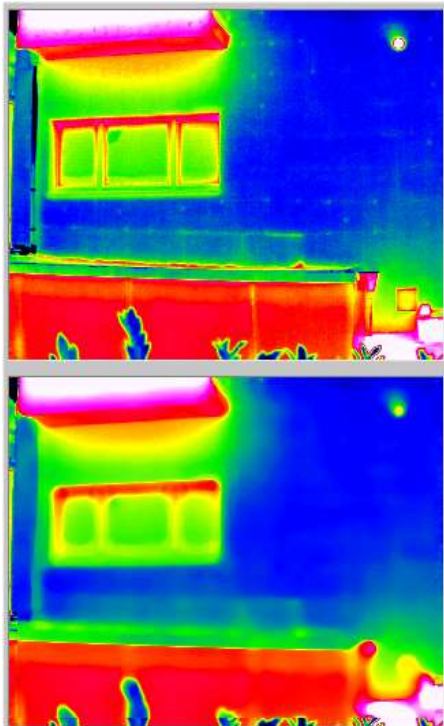


Entzerrung der Verzeichnung und Umprojektion Zentralperspektive in orthogonale Projektion

Das geometrische Entzerren in eine Ansicht wie in einer technischen Zeichnung hilft Maße und Positionen sowie Flächenanteile quantitativ zu bestimmen, sowohl in der passiven als auch der aktiven Thermografie.

Zur Auswertungsunterstützung ganz angenehm, aber nicht unbedingt notwendig.

Oft notwendig: Hintergrundabzug (Flatfield)



Durch Subtraktion eines unscharfen Hintergrunds werden feine Bilddetails erst nachweisbar.

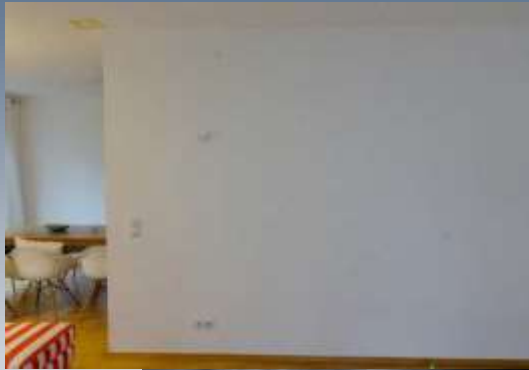
Als Hintergrund dient dabei der örtliche Median des Rohthermogramms

Die Aufnahme entstand als Einzelbild ca. 30 Minuten nach Sonnenuntergang.

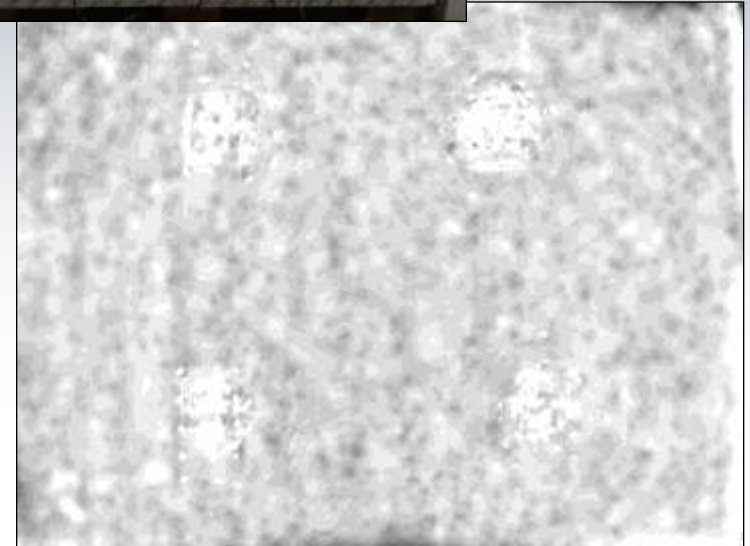
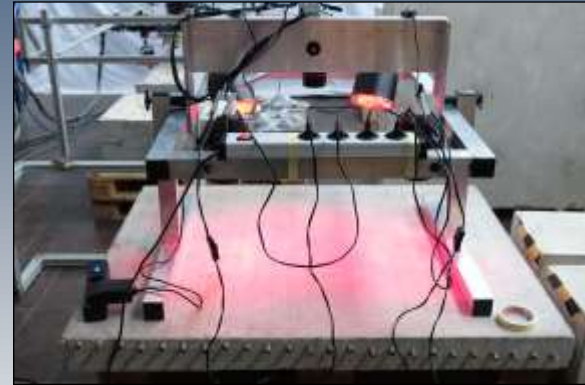
In der aktiven Thermografie geht die eigentliche Nutzinformation dann im allgemeinen Thermogramm unter, wenn das Objekt an verschiedenen Orten unterschiedliche Oberflächentemperaturen hat.

Zur Visualisierung feiner Details ist Hintergrundabzug oftmals unverzichtbar.

Die Nachweisgrenze liegt bei 2,5 cm Tiefe



Nachweis eines abgeschnittenen und überputzten, versotteten Kamins.



Messungen mit Puls-Phasen-Thermografie am Probekörper 238 in der Baustoffhalle der BAM

Anweisungen sollten sich am Anwendungsobjekt orientieren

Fazit des praktischen Anwendungschecks:

- Für die allermeisten Standardfälle in der thermografischen Bauwerksprüfung ergeben sich einfache Anwendungsmethoden.
- In künftigen Merkblättern und in der Ausbildung sollten sich aktive Verfahren primär am Anwendungsobjekt orientieren, nicht umgekehrt.
- Bevorzugte Anregungsquelle innen ist das Warmluftgebläse. Erst bei sehr großen Räumen und Abständen muss mit Strahlern gearbeitet werden.
- Bevorzugte Anregungsquelle für sehr oberflächennahe Strukturen im Außenbereich ist die Besonnung oder IR-Bestrahlung, für tiefer liegende Strukturen die abendliche Abkühlung der Umgebung.
- Bis auf wenige Ausnahmen reicht eine Einzelaufnahme ohne oder mit wenig Nachbearbeitung zur Auswertung aus.
- Bei sehr geringem Signal/Rauschabstand ist eine Auswertung von Aufnahmeserien empfehlenswert.



Eine Anwendungstabelle

Anwendung	Anregung	Aufnahme	Auswertung
Feuchte, Fugen, Dübel in Wärmedämmung	Abendliche Abkühlung	Einzelaufnahme	Bearbeitung Einzelbild (Rauschen, Bildebnung)
Schichtablösungen außen	Besonnung, Temperaturanstieg	Einzelaufnahme	Bearbeitung Einzelbild (Level/Span, Bildebnung)
Feuchte Bausubstanz außen	Tagestemperturgang vormittags und abends	Einzelaufnahme	Bearbeitung Einzelbild (Level/Span, Bildebnung)
Ablösung innen von Putz und Fliesen	Warmluftgebläse	Einzelaufnahme	Bearbeitung Einzelbild (Level/Span)
Feuchtigkeit innen	Warmluftgebläse	Einzelaufnahme	Bearbeitung Einzelbild (Level/Span)
Ablösung innen von Farbe und Beschichtung	Warmluftgebläse, IR-Lampen	Einzelaufnahme	Bearbeitung Einzelbild (Level/Span)
Bauwerksstruktur außen	Besonnung, Tagestemperturgang	Reihenaufnahme	Mittelwertbildung
Bauwerkstruktur innen	Warmluftgebläse, IR-Lampen	Reihenaufnahme	Aufheizkoeffizient



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

*Bitte vergessen Sie den alten Quark,
Bauthermografie ginge nur im Winter ...*

*Die Methoden der ZfP machen's möglich,
dann zu messen, wenn es erforderlich ist.*

