

What if we heat up the mural...?

Aktive Thermographie zur zerstörungsfreien Untersuchung von Wandmalerei



Abb. 1: Messaufbau für aktive Thermographie: IR-Detektor (Spektralbereich 2.0 ... 5.7 μm , filterlos) und Anregungsquellen (Halogenstrahler 500W) [Tenschert 2019].

Bearbeitung:	Anna Luib M.A., Dr. Iustyna Vasilchenko
Arbeitsbereiche:	Bauforschung, Restaurierungswissenschaft
Partner:	Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen; Dombauhütte Wien
Laufzeit:	2018–2020
Finanzierung:	KDWT-Eigenmittel

Als Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien forschen wir fachübergreifend an der Adaption naturwissenschaftlich-technischer Untersuchungsmethoden für Fragestellungen der Kulturerbeforschung. Von besonderem Interesse sind dabei die zerstörungsfreien Prüfverfahren (non-destructive testing NDT). NDT-Techniken stellen aufgrund ihres nicht oder nur geringfügig zerstörenden Charakters, ihrer Übertragbarkeit, beliebigen Wiederholbarkeit, Genauigkeit und Empfindlichkeit gegenüber spezifischen Materialeigenschaften einen erheblichen Vorteil gegenüber der zerstörenden analytischen Prüfung dar. Der Einsatz von NDT-Methoden in der Kulturgutforschung erfordert dabei sowohl umfassendes Wissen über Materialeigenschaften und deren Veränderungsmechanismen als auch ein vertieftes Verständnis der physikalischen Messprinzipien und der Anwendbarkeit der NDT-Technik.

Ein Forschungsschwerpunkt am KDWT liegt im Bereich der wärmeinduzierten Infrarot-Thermographie (IRT). Als kontaktloses, bildgebendes Untersuchungsverfahren spielt diese besonders in der historischen Bauforschung und den Restaurierungswissenschaften eine Rolle. In Abgrenzung zur IR-Photographie und Reflektographie bezieht sich die Thermographie überwiegend auf den mittel- und langwelligen infraroten Spektralbereich von 3-5 μm (MWIR) und 8-15 μm (LWIR). Das langwellige Spektrum (LWIR, 8-15 μm) kommt vor allem in der historischen Bauforschung zum Einsatz (siehe dazu: *Thermisches Infrarot in der historischen Bauforschung*, 130–133).

Die Infrarot-Thermographie kann in jeder Phase der Objektinspektion eingesetzt werden: für Voruntersuchungen, zur Beurteilung des Zustands vor der Restaurierung oder auch als Monitoring-Maßnahme während und nach den Restaurierungs- und Konservierungsarbeiten, um deren Niveau und Qualität zu analysieren.

Auch die Infrarot-Thermographie im mittleren Wellenlängenbereich (MWIR, 3-5 μm) wird zur Analyse von Materialeigenschaften und Visualisierung verdeckter Strukturen verwendet. Dieser Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums wird vor allem für die Untersuchung von Malschichten, Wandmalereien und Tafelbildern genutzt (Abb. 3).

Für die Anwendung von Infrarot-Thermographie gibt es zwei Herangehensweisen: die aktive IRT, die die gebräuchlichere ist und bei der die Probe künstlich erwärmt wird sowie die passive IRT, bei der keine externen Stimulationsquellen benötigt werden.

Die aktive Infrarot-Thermographie ist ein Bildgebungsverfahren, dessen Arbeitsprinzip auf der gleichzeitigen Erzeugung optisch induzierter thermischer Wellen auf der Probenoberfläche und der Überwachung aller Bildpunkte durch thermographische und Lock-In-Techniken beruht (Abb. 4).

In unserer Arbeit möchten wir den Einsatz der aktiven MWIR-Thermographie für drei Fallstudien an unterschiedlichen Wand- und Deckenmalereien zeigen. Untersucht wurden das Gemälde „Gahmurets Einzug in die Mohrenstadt Patelamunt“ vor dem Sängersaal im Schloss Neuschwanstein (Abb. 5), die Wandmalereifragmente am Bischofsfor im Dom St. Stephan in Wien (Abb. 2, 7 und 8) sowie verschiedene Ausschnitte der Deckenmalereien in der neuen Residenz in Bamberg (Abb. 6).

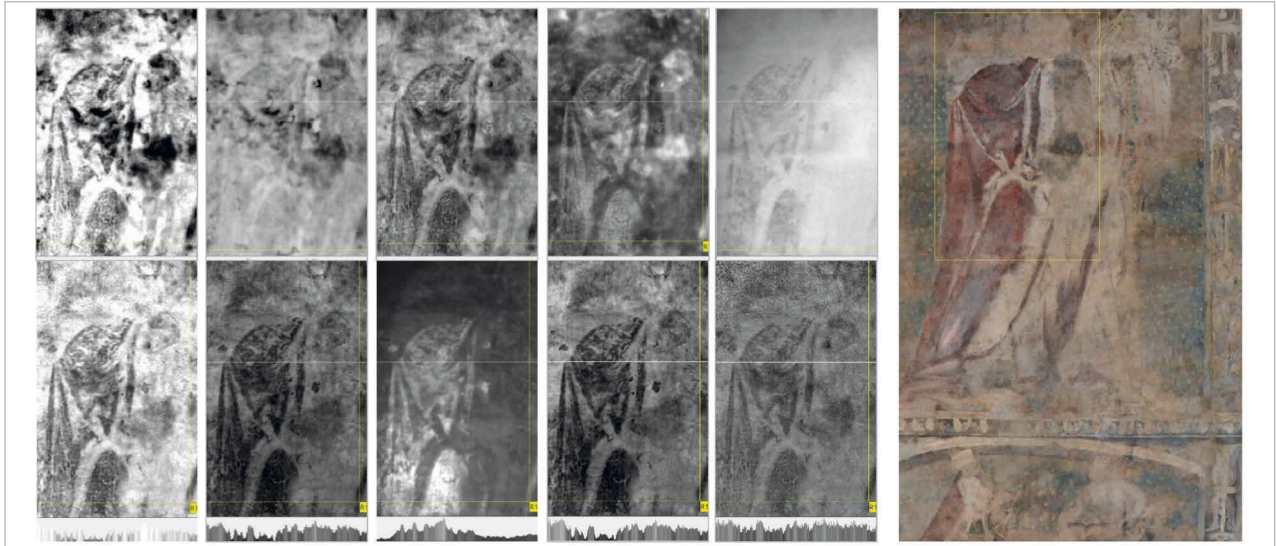


Abb. 2: Infrarot-Thermographieaufnahmen von polychromen Wandmalereifragmenten zur Unterstützung restauratorischer Untersuchungen. Die Auswertung der wärmeinduzierten Lock-In-Thermographie erfolgte in verschiedenen Bild-Sampling-Varianten [Luib / Vasilchenko 2019].

Alle drei Objekte wurden mittels aktiver IRT im Lock-In-Modus untersucht. Das Grundprinzip der Lock-In-Thermografie (LIT) besteht darin, periodisch modulierte Wärme in ein Objekt einzubringen und die phasenbezogene periodische Modulation der Oberflächentemperatur sequentiell zu überwachen.

Folglich wird die Oberflächentemperatur über eine Infrarotkamera gemessen und die Informationen jedes Bildpunktes des Bildes werden so verarbeitet, als ob sie in einen Lock-In-Verstärker eingespeist würden. In unserer Versuchsanordnung wurde die Wärme in Form von periodischen thermischen Wellen durch zwei symmetrisch aufgestellte Halogenlampen (je 500W) erzeugt und an die

Objektoberfläche abgegeben. Das Infrarot-Thermographiesystem wurde kohärent mit der Wärmequelle gekoppelt, so dass eine sinusförmige Temperaturmodulation entstand. Diese Modulation ergab sich aus einem nichtlinearen elektrischen Signal, das durch das Lock-In-System erzeugt wurde und auch eine Frequenzvariation erlaubt. Wenn sich die thermische Welle innerhalb des Materials oder der Struktur ausbreitet und reflektiert wird, bedeutet dies, dass sie in inhomogene Bereiche gelangt, in denen sich die Wärmeausbreitungsparameter ändern. Die reflektierte Welle interferiert mit der Oberflächenwelle, wodurch ein oszillierendes Interferenzmuster entsteht, das als Amplitude oder Phase gemessen werden kann, was einem Ampli-

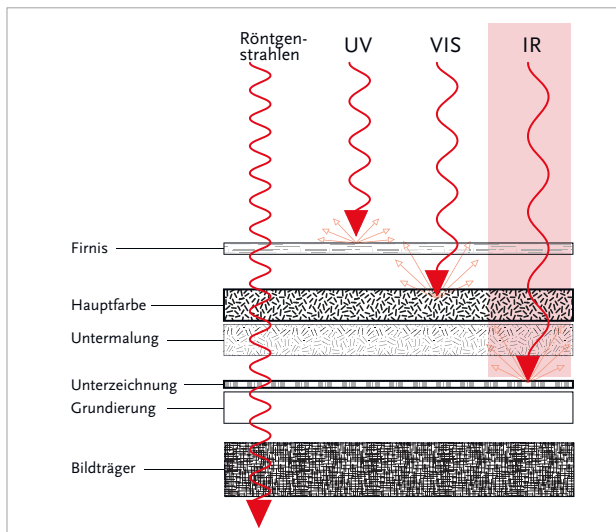


Abb. 3: Die verschiedenen Möglichkeiten von Strahlenuntersuchung an mehrlagigen Malschichtaufbauten, unterschieden nach Wellenlängen [Luib 2019].

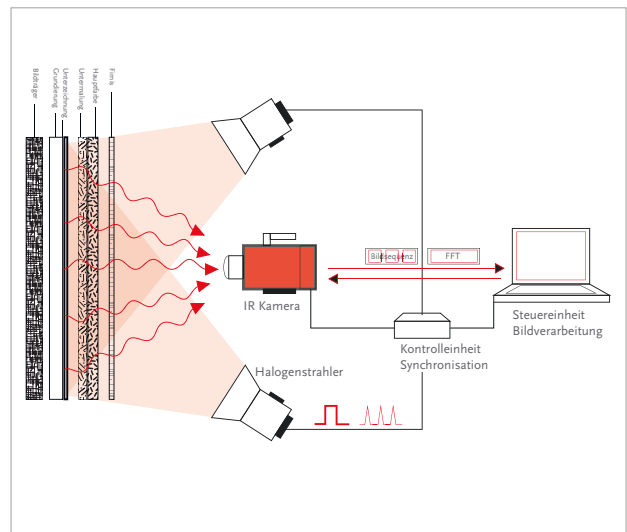


Abb. 4: Prinzip der aktiven Thermographie mit Lock-In-Anregung durch parallel zur IR-Kamera angeordnete Halogenstrahler [Luib 2019].

tuden- bzw. Phasenbild entspricht. Die emittierte Infrarotstrahlung wird von einer Infrarotkamera erfasst und die Temperatur der Oberfläche wird auf der Grundlage des Stefan-Boltzmann-Gesetzes berechnet, das in Gleichung (1) dargestellt ist:

$$(1) \quad q/A = \varepsilon \sigma T^4, \text{ wo}$$

q - die Rate der Energieemission (W),

A - die Fläche der emittierenden Oberfläche (m²),

T - die absolute Temperatur (K),

$\sigma = 5,676 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ - die Stefan-Boltzmann-Konstante und ε - der Emissionsgrad der emittierenden Oberfläche für eine feste Wellenlänge und absolute Temperatur T; Der Emissionsgrad ist die Einheit für einen perfekten Schwarzkörper.



Abb. 5: „Gahmurets Einzug“ vor dem Sängersaal, Schloss Neuschwanstein; IR-Visualisierung der ursprünglichen, flächigen Malerei mit floralen Rapport-Ornamenten [Luib / Rahrig 2018].

Während jeder thermographischen Messung wurde eine Folge von 500-2000 Wärmebildern erzeugt. Die Analyse der erhaltenen Sequenz basiert auf der Diskreten Fourier-Transformation (DFT), die die Auswertung des Ausgangs als Kombination von Phase und Amplitude erlaubt. Ein Algorithmus, der die Fourier-Transformation jedes Pixels in der Thermogrammsequenz anwendet, kann auf folgende Weise geschrieben werden:

$$(2) \quad F_n = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} = Re_n + Im_n$$

n - das Frequenzinkrement,

Re - der eigentliche Teil der Fourier-Transformation.

Im - der Imaginärteil der Fourier-Transformation.

Die Amplitude (A_n) und Phase (Φ_n) werden wie folgt berechnet:

$$(3) \quad A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2}$$

$$\Phi_n = \arctan \frac{Im_n}{Re_n}$$

Der für die Untersuchung verwendete Versuchsaufbau umfasst eine Anregungsquelle, ein Detektionsgerät sowie elektronische und rechnergestützte Instrumente zur Überwachung (Abb. 1, 4). Die homogene Wärmeabgabe wurde durch

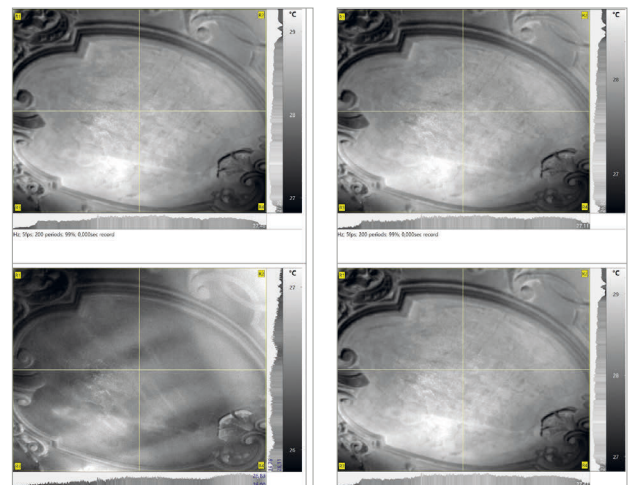


Abb. 6: Ergebnisse der aktiven Thermographie mit wärmeinduzierter Lock-In-Anregung an Deckenmaleirefragmente in der fürstbischöflichen Residenz Bamberg [Luib / Vasilchenko 2019].

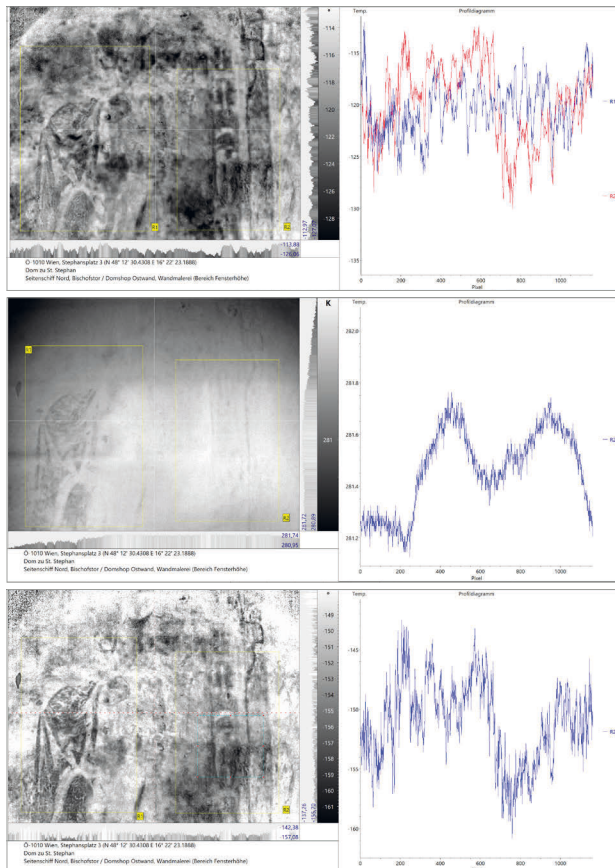


Abb. 7: Sampling der verschiedenen Lock-In-Aufnahmesequenzen. Die Auswertung erfolgt über eine diskrete Fourier-Transformation und verschiedene Sampling-Modulationen [Luib / Vasilchenko 2019].

zwei Halogenlampen (2 x 500W) erreicht. Das Detektionssystem besteht aus einer mittelwelligen Infrarotkamera (MWIR) ImageIR 8380S (Infra-tec GmbH), die synchron mit den Halogenlampen gekoppelt ist (640 x 512 Pixel, 2.0 ... 5.7 µm Spektralbereich, Stirling-Kühler, f/3.0 oder f/2.0 Apertur, -40 ... 70 °C Betriebstemperatur, 0.6 ... 20.000 µs Integrationszeit, ± 1 °C oder ± 1 % Messgenauigkeit). Die Messdaten können in Echtzeit visualisiert und über einen Computer aufgezeichnet werden.

Die Anwendung der Lock-In-Thermographie war in allen drei Fallstudien eingebunden in einen restauratorischen Untersuchungskontext. Im Fall von „Gahmurets Einzug“ in Neuschwanstein konnte damit die durch die Untersuchung mikroskopischer Farbschichtproben vermutete vollflächige Unterma- lung des Gemäldes belegt werden. Am Wiener Bischofstor tragen die radiometrischen Daten zur interdisziplinären Analyse der Wandmalereifragmente und ihrer Schichtenabfolge bei. Darüber hinaus spielen sie auch in der Diskussion um abgegangene oder übermalte Fassungen eine Rolle. Die Aufnahmen in der Bamberger Residenz

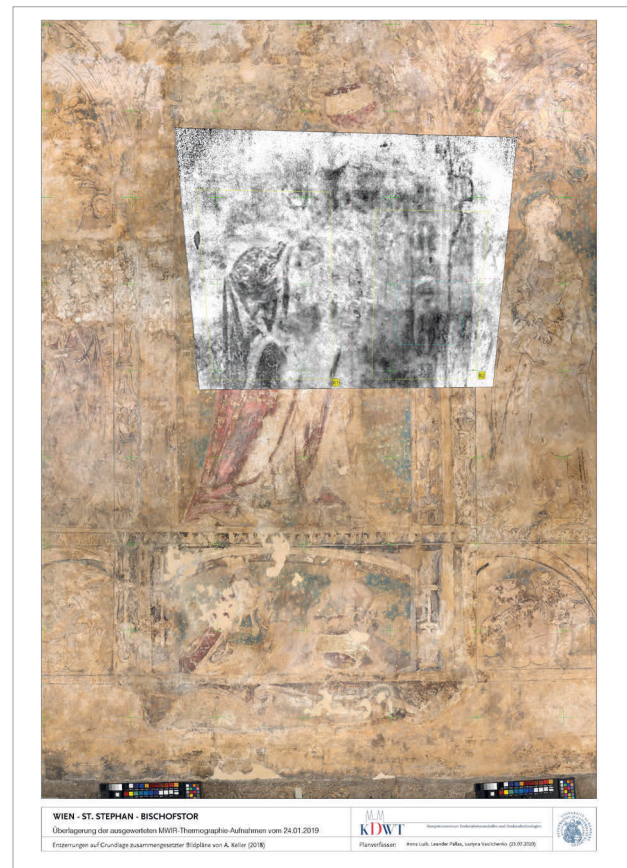


Abb. 8: Entzerrung der über verschiedene Modulationen ausgewerteten Aufnahmesamplings; Überlagerung von visuellen photographischen Aufnahmen und IR-Visualisierungen [Luib / Vasilchenko 2019].

konnten zwar neben den Befundöffnungen keine eindeutig erkennbaren Unterma- lungen darstellen, zumindest aber den Putzträger der darüber liegenden Decke lokalisieren.

Diese Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten der aktiven Thermographie verdeutlicht einmal mehr den Vorteil interdisziplinären Arbeitens am KDWT und den Mehrwert aus der fachübergrei- fenden Kooperationen von Restaurierungs-, Mate- rial- und Naturwissenschaftlern im Kontext einer fundierten Kulturgutforschung.

(Anna Luib, Iustyna Vasilchenko)

LUIB, Anna: *Infrarot-Thermographie in der Bau- forschung und Bauwerksdokumentation - Aktuelle Projekte und Untersuchungsergebnisse*, Werkstattge- spräch des IADK, Otto-Friedrich-Universität Bam- berg 01.02.2019.

LUIB, Anna: *Ergebnisse der aktiven Thermographie am Bischofstor*, Arbeitsgespräch zur Frage der Au- torenschaft des Wandbildes, Dombau St. Stephan, Online-Meeting 15.05.2020.