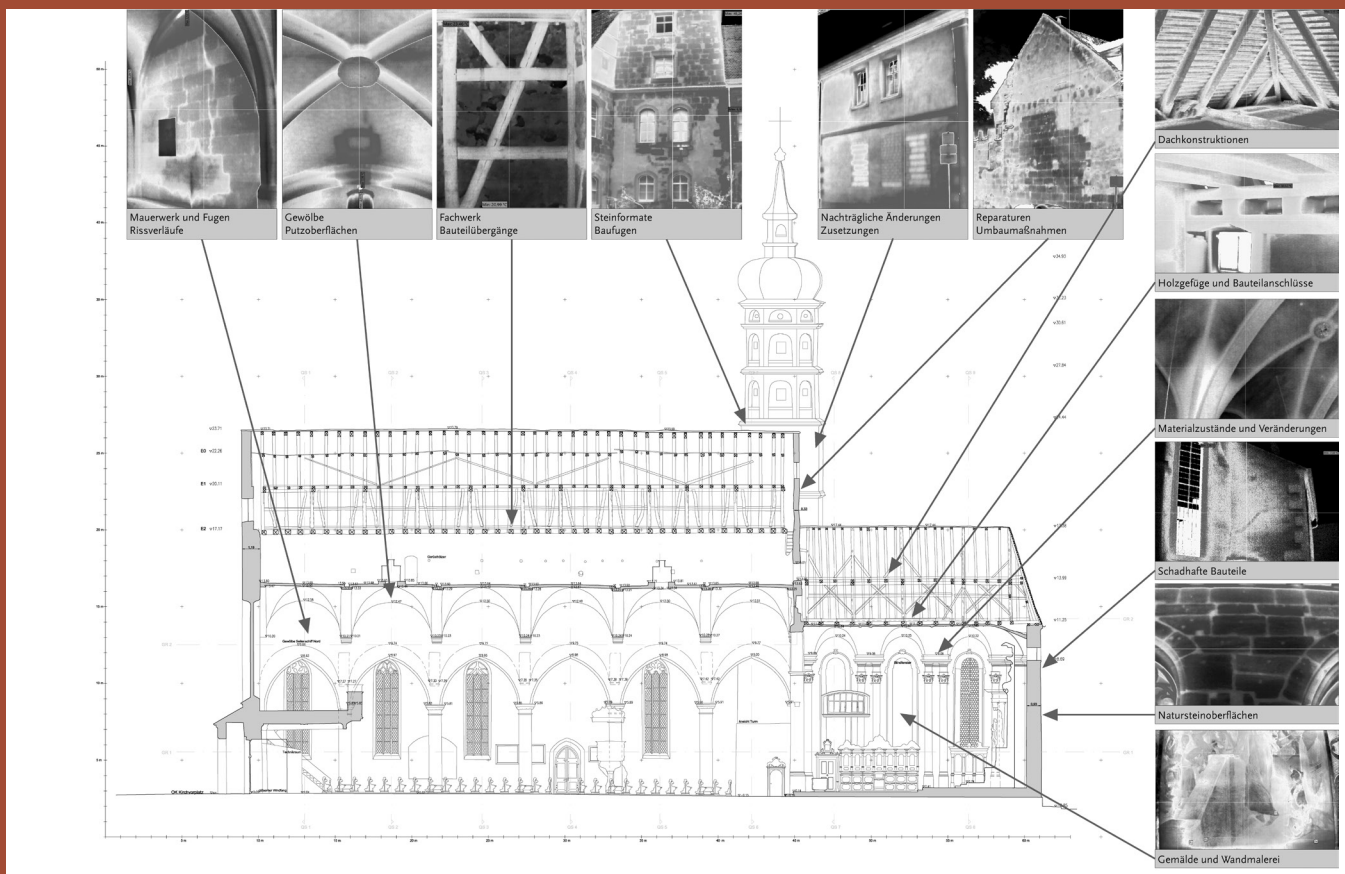


Anna Luib

Infrarot-Thermographie in der Bauforschung

Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen



Infrarot-Thermographie in der Bauforschung **Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen**

Infrared-Thermography in Building Archaeology
Possible Applications and Limits



KIDWT

Bamberger Empfehlungen
für Bauforschung und praktische Baudenkmalpflege

Herausgeber:
Stefan Breitling
Professur für Bauforschung und Baugeschichte
Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien
Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Band 01
Bamberger Empfehlungen für Bauforschung und praktische Baudenkmalpflege

Infrarot-Thermographie in der Bauforschung **Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen**

Infrared-Thermography in Building Archaeology.
Possible Applications and Limitations

Anna Luib

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Informationen sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk ist als freie Onlineversion über das Forschungsinformationssystem (FIS; <https://fis.uni-bamberg.de>) der Universität Bamberg erreichbar. Das Werk – ausgenommen Cover, Zitate und Abbildungen – steht unter der CC-Lizenz CC-BY.



Lizenzvertrag: Creative Commons Namensnennung 4.0
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Redaktion: Anna Luib

Satz und Layout: Anna Luib

Herstellung und Druck: docupoint Magdeburg

Umschlaggestaltung: University of Bamberg Press, Anna Luib

Umschlagbilder: Bauforschungsthermographie. Abbildung © Anna Luib 2018

Sämtliche Abbildungen und Grafiken wurden von der Autorin angefertigt.

© University of Bamberg Press, Bamberg 2021

<http://www.uni-bamberg.de/ubp/>

ISSN: 2750-4581 (Print)

eISSN: 2750-459X (Online)

ISBN: 978-3-86309-829-2 (Print)

eISBN: 978-3-86309-830-8 (Online)

URN: urn:nbn:de:bvb:473-irb-522813

DOI: <https://doi.org/10.20378/irb-52281>

Inhalt

Vorwort des Herausgebers	7
Einführung	9
1. Infrarotthermographie in der Bauforschung	
1.1 Infrarotthermographie als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode	11
1.2 Anwendungsgebiete	12
1.3 Einbindung in den bauforscherischen Untersuchungskanon	14
1.4 Infrarotthermographie in den Restaurierungswissenschaften	16
2. Forschungsstand	
2.1 Forschungsfeld IRT: Darstellung und Referenzierung	18
2.2 Institutionen	22
2.3 Normen und Merkblätter	23
2.4 Platzierung in Forschungsfeld	24
3. Grundlagen der Infrarotthermographie	
3.1 Einordnung der Infrarotthermographie in die Messtechnik und Sensorik	32
3.2 Das elektromagnetische Spektrum	33
3.3 Grundlegende strahlungsphysikalische Zusammenhänge	34
3.4 Aufbau einer Infrarot/Thermographiekamera	38
3.5 Anforderungen an die Technik	40
4. Umgang mit Messung und Messprozess	
4.1 Passive IRT in der Bauforschung	48
4.2 Aktive IRT in der Bauforschung	48
4.3 Qualitative und quantitative Thermographie	51
4.4 Vorbereitung thermographischer Bauforschung	52
4.5 Durchführung thermographischer Bauforschung	56
5. Auswertung und Interpretation von IRT-Ergebnissen in der Bauforschung	
5.1 Nachbereitung der Messung und Auswertung der Thermogramme	60
5.2 Befundansprache und -Interpretation in Thermogrammen	64
5.3 Grenzen der Infrarotthermographie in der Bauforschung	66
6. BEST PRACTICE: Thermographieanwendungen in der Bauforschung	
6.1 Thermographie in Voruntersuchungen und Erstbegehungen	73
6.2 Baufugen und Bauphasen in Thermogrammen	79
6.3 Umbauten und Sanierungen in Thermogrammen	85
6.4 Holztragwerke in Thermogrammen	91
6.5 Gewölbekonstruktionen in Thermogrammen	97
6.6 Schäden und Reparaturen in Thermogrammen	103
6.7 Steinoberflächen in Thermogrammen	109
7. Einbindung der IRT in eine denkmalgerechte Kulturgutdokumentation	
7.1 Erweiterung der Darstellungsmöglichkeiten - Die Kombination einzelner Infrarotaufnahmen	116
7.2 Kombination von thermalen und geometrischen Daten	119
7.3 Mehrwert für eine denkmalgerechte Kulturgutdokumentation	124
8. Ausblick	
8.1 Einsatz der IRT in der Bauforschung als Standard?	129
8.2 Potentiale und weitere Entwicklung	130
9. Glossar	131

Vorwort des Herausgebers

Die Reihe „Bamberger Empfehlungen für Bauforschung und praktische Baudenkmalpflege“ stellt Techniken und Methoden zur Dokumentation, Analyse und Einordnung des historischen Gebäudebestandes und ihre Bedeutung für einen substanzschonenden und nachhaltigen Bauerhalt vor. Wir möchten damit all jenen, die sich mit unserer „gebauten Umwelt“ beschäftigen, Orientierung bieten auf einem sich durch technische Innovationen und durch Veränderung der Rahmenbedingungen beständig wandelnden Feld. Die Einzelbände sind jeweils einem Teilaspekt der Bauforschung gewidmet, der aktuelle Relevanz besitzt. Forschungsstände werden referiert, Verfahren grundlegend erläutert, die Anwendung anhand von Praxisbeispielen dargestellt, Entwicklungen aufgezeigt und Standards diskutiert.

Bauforschung beschreibt die einzelnen Konstruktionen und Phänomene am Bauwerk, datiert sie, rekonstruiert die Bau- und Veränderungsgeschichte und ordnet die unterschiedlichen Phasen in den jeweiligen baukulturellen Kontext ein. Das Fach spielt seit der Einrichtung der Denkmalschutzgesetze in den 1970er Jahren eine tragende Rolle in der praktischen Baudenkmalpflege. Bauforschung ist stets objektorientiert. Sie betrachtet die überlieferte Bausubstanz als reiche und vielschichtige Quelle, die Zugang zu verschiedensten Aspekten des menschlichen Lebens bietet. Die gebaute Umwelt wird als kostbare materielle Ressource verstanden, mit der man sorgsam umgeht, die man fachgerecht pflegt und die immer neue Ansatzpunkte zur Auseinandersetzung bietet. Historische Architektur ist das Produkt beeindruckender Kenntnisse und Leistungen, einer speziellen, für uns heute manchmal exotischen Baukultur, immer individuell und charakterstark. Die genaue Kenntnis eines Bauwerkes sowie ein vertieftes Verständnis für seine Entstehungsgeschichte und für seine gewollte oder ungewollte Transformation ist zugleich die Grundvoraussetzung für sachgerechtes Planen und Bauen im Bestand wie auch für die Erschließung und Erhaltung dieses Kulturgutes.

Die Stadt Bamberg ist als Standort einer Vielzahl von auf die praktische Baudenkmalpflege spezialisierten Firmen und Einrichtungen im deutschsprachigen Raum und darüber hinaus bekannt. Die historische Altstadt ist seit 1993 als UNESCO-Weltkulturerbe eingetragen. Kleine und große Planungsbüros verfügen über Expertise von der Gebäudevermessung über die Entwicklung denkmalpflegerischer Erhaltungskon-

zepte bis hin zur Ausführungsplanung. Handwerksbetriebe unterschiedlicher Gewerke haben sich aufgrund ihrer jahrzehntelangen Auseinandersetzung mit historischen Gebäuden ein enormes baupraktisches Wissen für denkmalgerechte Reparatur- und Erhaltungsmaßnahmen angeeignet. Ausgewiesene Bauforschungsbüros erarbeiten mit ihren fachlich profunden Bestandserfassungen und Untersuchungen die Voraussetzungen für die in Bamberg besonders lebendige Denkmalinventarisierung und die wissenschaftliche Forschung zu Einzelgebäuden, Bauwesen und Stadtgeschichte. Der Master-Studiengang Denkmalpflege an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg gehört zu den ältesten akademischen Ausbildungsgängen in diesem Feld und leistet mit seinen hohen Studierendenzahlen einen nicht unwesentlichen Beitrag zur Ausbildung des Nachwuchses im deutschsprachigen Raum. Das ingenieurwissenschaftliche Fach Bauforschung ist in Bamberg den Geistes- und Kulturwissenschaften zugeordnet und vermittelt Schnittstellenkompetenz in Lehre und Forschung. Das Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT) bildet das breite Spektrum der unterschiedlichen in der Denkmalpflege beteiligten Fachdisziplinen ab und ermöglicht neben inhaltlicher Forschung auch die Weiterentwicklung der Methoden.

Mit dem hier vorliegenden ersten Band der „Bamberger Empfehlungen für Bauforschung und praktische Baudenkmalpflege“ stellt Anna Luib von der Fachgruppe Bauforschung und Bauerhalt im KDWT die Möglichkeiten des Einsatzes der Infrarotthermographie und ihre Potentiale für die historische und technische Gebäudeanalyse vor. Mit der Vielzahl an Anwendungsbeispielen, die in diesem Band angeführt werden, wird deutlich, welchen inhaltlichen Mehrwert thermographische Untersuchungen haben können, aber auch wo ihre Grenzen in der Anwendung liegen. Die vorgestellte Technologie bietet eine Fülle von Einsichten in die Konstruktion und Geschichte eines Gebäudes und Planungssicherheit bei Baumaßnahmen im Bestand. Die vorliegende Publikation trägt hoffentlich dazu bei, dass Infrarotthermographie zukünftig als ein gebräuchliches und notwendiges Standardverfahren in der Untersuchung historischer Gebäude eingesetzt wird.

*Bamberg, November 2021
Stefan Breitling*

Einführung

Obwohl die Infrarotthermographie im Bauwesen mittlerweile weit verbreitet ist, obwohl seit Jahrzehnten Alt- und Neubauten thermographisch untersucht werden, gibt es bislang kaum spezifische Methodenentwicklungen für eine bauforscherische Anwendung der Thermographie im Bereich der Untersuchung historischer Gebäude und Kulturgutobjekte.

Mit dieser Publikation wollen wir diese Lücke schließen und einen Beitrag leisten, die Anwendungsmöglichkeiten einer Infrarotthermographie in der historischen Bauforschung weiterzuentwickeln. Dabei steht vor allem die thermographische Untersuchung struktureller, baukonstruktiver Aspekte im Fokus. Hier soll es nicht primär um die Bilanzierung energetischer Verluste oder baulicher Schadensdiagnostik gehen, sondern vielmehr um eine individuell auf Objekt und Fragestellung hin angepasste Anwendung der Thermographie im Kontext bauforscherischer Untersuchungen. Gleichzeitig wollen wir damit eine Brücke schlagen zur Kulturgut-Thermographie der Nachbardisziplinen wie den Restaurierungswissenschaften, der Kunsttechnologie und der Materialanalytik.

Mit einer umfassenden Darstellung der Vorbereitung und Durchführung thermographischer Bauforschung erläutern wir Schritt für Schritt die spezifisch für bauforscherische Fragestellungen angepassten Abläufe vor und während thermographischer Untersuchungen an historischen Gebäuden, Konstruktionen, einzelnen Bauteilen und Materialien. Darüber hinaus möchten wir dezidiert auf die Nachbereitung thermographischer Datensätze eingehen und sämtliche Schritte einer umfassenden Auswertung und Interpretation für Thermographie-Anwender:innen aus Theorie und Praxis aufschlüsseln.

Dies alles soll immer auch mit Blick auf die methodischen und technischen Grenzen der Thermographie erörtert werden. In Adaption der bauforscherischen Methode einer systematischen Befunderhebung, Befundansprache, Befundbeschreibung und Befundauswertung für thermographische Untersuchungen haben wir eine exemplarische Thermogramm-Sammlung aus unseren Thermographie-Projekten am KDWT zusammengestellt. Ihre Vielseitigkeit soll die Bandbreite thermographischer Anwendungsmöglichkeiten visualisieren, ihre systematischen Beschreibungen sollen den Detailreichtum thermographischer Befunde abbilden und gleichzeitig anwendungsbezogene Erfahrungen vermitteln und Ansätze für vergleichbare Thermographieuntersuchungen bieten. Langfristig hoffen wir, damit Standards für einen flächendeckenden Einsatz thermographischer Methoden in der Bauforschung zu etablieren.

Das Konzept der Bamberger Empfehlungen ist immer als prägnanter Ein- und Überblick über einen Themenkomplex gedacht sowie auch im Detail als Leitfaden und Praxisratgeber. Das Format der Bamberger Empfehlungen entwickelt sich aus unserer Forschungsarbeit am KDWT und ist für ein breites Publikum aufbereitet. Damit richtet sich diese Publikation gleichzeitig an Anwender:innen aus der Praxis in Bauforschung und Baudokumentation, an Architektur- und Ingenieurbüros, die im Bereich von Bauernhalt und Denkmalsanierungen arbeiten als auch an Forschende im Kontext der Denkmalwissenschaften, Denkmaltechnologien, Restaurierungs- und Materialwissenschaften; in der Hoffnung, damit thermographische Dokumentations- und Analysemethoden weiterzuverbreiten und weiterzuentwickeln.

*Bamberg, Juli 2021
Anna Luib*

1. Infrarotthermographie in der Bauforschung

Bauforschung im Sinne einer historischen Bau- und Baugeschichtsforschung umfasst die objektzentrierte Erfassung, Dokumentation, Analyse und Interpretation historischer Gebäude und baulicher Zusammenhänge. Auf dieser Grundlage der überlieferten Bausubstanz als Primärquelle kann einerseits die Entwicklungs- und Veränderungsgeschichte von Bauwerken nachvollzogen werden. Andererseits werden so die Grundlagen für eine fundierte Einschätzung und Bewertung historischer Gebäude sowie individuelle Erhaltungsstrategien erarbeitet.

Die Bauforschung versteht sich dabei als Schnittstellendisziplin zwischen theoretisch fundierten, anwendungsbezogenen und technikorientierten Ansätzen. Mit dieser breiten transdisziplinären Ausrichtung integriert und adaptiert sie geistes-, ingenieur- und materialwissenschaftliche Methoden und Techniken und überträgt deren Anwendung auf bauwerksspezifische Fragestellungen.

Die Infrarotthermographie¹ ist ein Beispiel einer solchen Adaption von Analyseinstrumenten und Messver-

fahren für den Kontext der Bauforschung. Thermographiekameras werden seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich in der Baustoffprüfung und der gebäudeenergetischen Untersuchung eingesetzt. Die Bauforschung hat die zugrundeliegenden Messprinzipien übernommen und sie für die Anwendung an historischer Bausubstanz, Konstruktionen und Bauteilen angepasst. Eine spezifische Bauforschungsthermographie gründet sowohl auf technischer als auch bauhistorischer Expertise. Sie umfasst die methodische Weiterentwicklung der Infrarotthermographie sowie deren individuell auf Objekt und Fragestellung hin angepasste Anwendung. Wie alle für die Bauforschung adaptierten Techniken muss sie dabei immer ein ergebnisoffener, die historische Vielschichtigkeit abbildender Ansatz bleiben, der sich in den Kanon bauforscherischer Untersuchungen einbinden lässt.

Im Folgenden werden die Infrarotthermographie als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode, ihre Anwendungsgebiete und ihre Einbindung in den bauforscherischen Untersuchungskanon dargestellt.

1. Infrarotthermographie in der Bauforschung

- 1.1 IRT als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode
- 1.2 Anwendungsgebiete
- 1.3 Einbindung in den bauforscherischen Untersuchungskanon
- 1.4 IRT in den Restaurierungswissenschaften

1.1 Infrarotthermographie als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode

Die Infrarotthermographie (IRT) gehört zu den zerstörungsfreien Untersuchungs- und Prüfmethode(n) (ZfP).² Infrarotsensoren messen die Wärmestrahlung, die jedes Objekt oberhalb des absoluten Nullpunktes von $-273,15^{\circ}\text{C}$ in Form von elektromagnetischen Wellen aussendet. Die Messungen erfolgen berührungslos, Kontakt zum Messobjekt ist nicht nötig. Vor allem für Messungen an empfindlichen Bauteilen, aber auch für schwer erreichbare oder unzugängliche Befundstellen ist dies von großem Vorteil. Zudem können Messungen - abhängig von der erforderlichen Bildauflösung - auch über größere Distanzen erfolgen. Infrarotthermographische Untersuchungen sind absolut zerstörungsfrei, es entstehen keinerlei Wechselwirkungen zwischen Messobjekt und Messgerät. Auch Oberflächenveränderungen infolge der Messprozesse, wie sie bei anderen Strahlenuntersuchungen auftreten können, sind im infraroten Bereich ausgeschlossen.

Thermographische Untersuchungen sind außerdem unmittelbar bildgebend, die radiometrischen Messdaten werden orts aufgelöst in Form eines Falschfarbenbildes visualisiert und können direkt während der Messung eingesehen, geprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Sequenzaufnahmen können in Echtzeit verfolgt und noch vor Ort ausgewertet werden.

Weitere Vorteile der Thermographie als zerstörungsfreier Untersuchungsmethode sind die hohe Messgeschwindigkeit der Thermographiekameras, ihre kurzen Mess- und Ansprechzeiten und die hohe Bildwiederholfrequenz. Dadurch können vor allem die akkubetriebenen Modelle ähnlich flexibel wie beispielsweise Digitalkameras zur Bauwerksuntersuchung und -dokumentation eingesetzt werden.

Zerstörungsfreie Prüfung:

Zerstörungsfreie Prüfmethode(n) oder Prüfverfahren (ZfP), auch Nondestructive Testing (NDT). Prüfverfahren auf Grundlage physikalischer Messprinzipien (mechanisch, elektrisch, magnetisch, thermisch, optisch, chemisch). Infrarotthermographie gehört zu den thermischen NDT-Verfahren, der Interaktionsraum der Messung ist oberflächenbezogen. Messgrößen sind Temperaturwerte als Maß für infrarote Strahlungsintensität.

1.2 Anwendungsgebiete

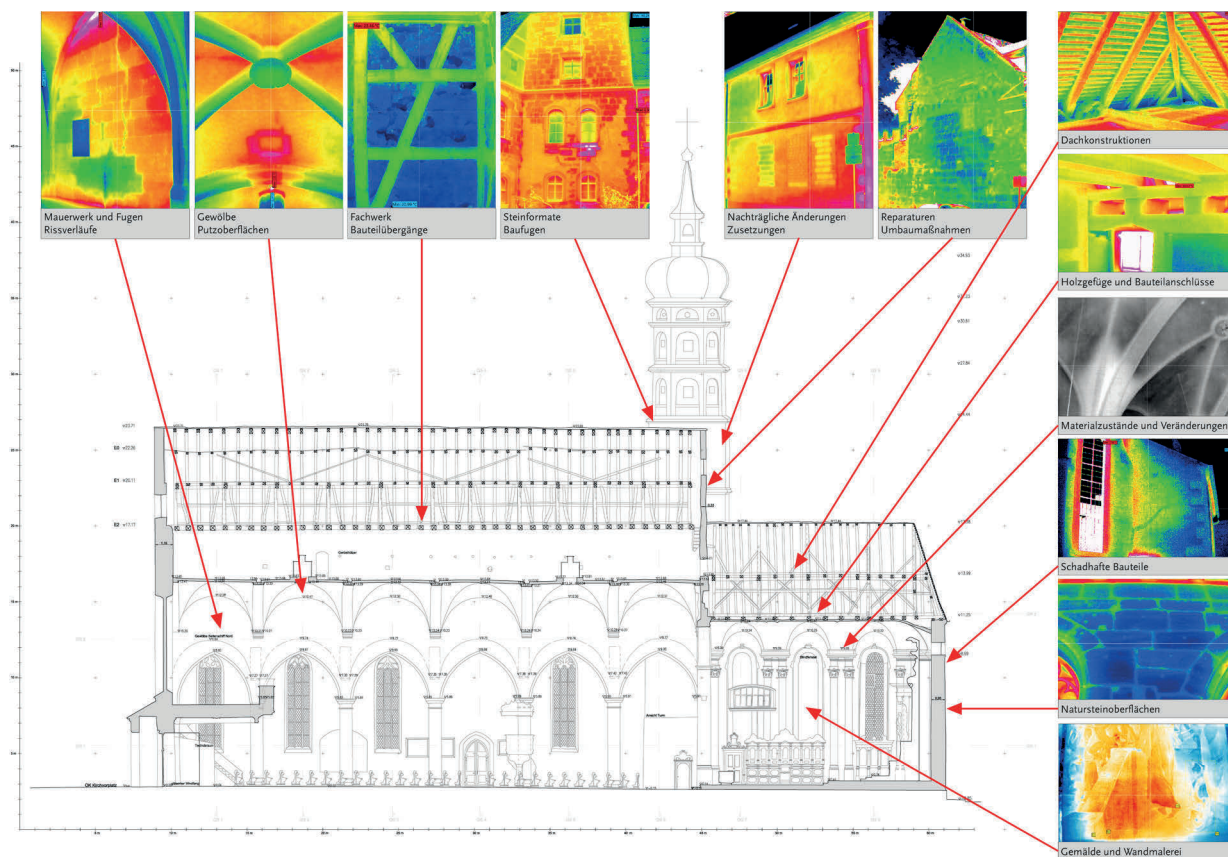
Infrarotthermographie als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode kommt vor allem in der Materialprüfung, der industriellen Fertigung und der Medizin- und Energietechnik zum Einsatz. Im Bauwesen werden Thermographiekameras überwiegend für bauphysikalische Untersuchungen und in der Gebäudeenergieberatung genutzt. Die Auswertung der von Bauteilen ausgehenden infraroten Strahlung ermöglicht die Lokalisierung von Wärmebrücken und eine Einschätzung der Wärmeverluste. Auf der Grundlage thermographischer Untersuchungen werden Gebäudeenergiebilanzen erstellt, energetische Sanierungen vorbereitet und begleitet sowie die Qualitätssicherung von Baumaßnahmen dokumentiert. Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich der Infrarotthermographie umfasst Schadensanalysen und Schadensdokumentationen im Bauwesen. Dazu gehören unter anderem die Untersuchung von Feuchteschäden und Schimmelpilzbefall sowie Leckageortungen.

All diese Untersuchungsansätze basieren auf der Analyse radiometrischer Anomalien im Thermogramm. Sie sind im Bereich der herkömmlichen Bauthermographie primär defizitorientiert; über die Interpretation der thermischen Anomalien werden geometrische, konstruktive und materialbedingte Wärmebrücken evaluiert, Schadensbereiche und Schadensphänomene analysiert.

Die Auswertung radiometrischer Informationen mit Infrarotsensoren kann jedoch auch umfassender angewandt werden. Über die Temperaturverteilung an der Oberfläche von Gebäudeteilen und Konstruktionen lässt sich auf Bauelemente und verwendete Materialien rückschließen. Mithilfe der Infrarotthermographie können verdeckte Strukturen, Konstruktionsbestand-

Vorteile der IRT in der Bauforschung:

- zerstörungsfrei
- berührungslos
- geeignet für empfindliche Objekte
- Messungen mit weitem Abstand zum Objekt sinnvoll möglich (bis zu 100m)
- geeignet für unzugängliche Befundstellen
- unmittelbar bildgebendes Verfahren
- Echtzeitdarstellung der Messungen
- Daten vor Ort auswertbar
- hohe Messgeschwindigkeit
- portable, akkubetriebene Kameramodelle flexibel einsetzbar



1 Anwendungsmöglichkeiten der LWIR-Infrarotthermographie in der historischen Bauforschung.

teile sowie Materialwechsel und Baufugen lokalisiert werden. Dies ist vor allem im Bereich historischer Gebäude von großem Vorteil gegenüber invasiven Untersuchungsmethoden. Historische Gebäude sind in vielen Fällen das Produkt verschiedener Bau-, Umbau- und Sanierungsphasen im Laufe ihrer Nutzungsdauer. Historische Gebäude verfügen infolgedessen über eine große Bandbreite an Gefügekonstruktionen und Baumaterialien und weisen teilweise eine recht heterogene Bausubstanz auf. Vor diesem Hintergrund bieten zerstörungsfreie thermographische Untersuchungen ein großes Potential. Da sich das Wärmeverhalten an Material- und Bauteilübergängen im Vergleich zum Bauteilinneren verändert, können aus den Thermographieaufnahmen Schlussfolgerungen über die Anordnung von einzelnen Bauteilen und ihren Anschlüssen sowie ganzer Konstruktionen abgeleitet werden.

Die häufigste Anwendung hierfür ist die Untersuchung von Wandaufbauten, Außen- und Innenwänden, Fassaden und ihren Anschlüssen. So zeichnen sich verputzte Mauerwerksgefüge aufgrund der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von Mörtel und Stein und der dadurch spezifischen Eigenstrahlung in thermographischen Aufnahmen deutlich ab. Unter geeigneten Umgebungsbedingungen können verschiedene

Steinarten in Wandaufbauten unterschieden werden, Materialwechsel, zugesetzte Öffnungen und nachträglich eingebrachte Materialien und Strukturen oder versetzte Bauteile dargestellt werden. Je unterschiedlicher das thermische Verhalten von Baumaterialien, desto deutlicher lassen sie sich in der Infrarotthermographie abbilden.

Zu den bekanntesten Beispielen gehören wohl die Thermogramme von Fachwerk unter Putz oder Verkleidungen. Bei sorgfältiger Detektion und ausreichender Auflösung können dort aber nicht nur die Holzgefüge lokalisiert werden, sondern auch Rückschlüsse auf Art und Ausführung der Gefachfüllungen gemacht und Konstruktion und Bauteilanschlüsse beschrieben werden. Gleiches gilt für Sonderbauteile in homogenen Strukturen wie beispielsweise eingemauerte Metallverankerungen oder Schlaudern. Auch für horizontale Bauteile wie Decken und Fußbodenaufbauten können mit einer thermographischen Untersuchung bauliche Befunde lokalisiert und dargestellt werden, unter anderem die Lage und Einbindung von Deckenbalken, Verkleidungen und Schüttungen oder Stahlträgern und Ausmauerungen. Ebenso können verputzte Gewölbe auf ihre Konstruktionen und Anschlüsse an aufgehende Bauteile hin untersucht werden, Dach-

werke analysiert oder auch technische Einbauten und ihre Leitungen verortet werden.

Damit wird die Thermographie zu einer vielseitig einsetzbaren Analysetechnik für die zerstörungsfreie Untersuchung verdeckter, visuell nicht erkennbarer Bauwerksstrukturen. Über die vollflächige und kontaktlose radiometrische Visualisierung ganzer Bauteile und Bauteilübergänge lassen sich bauforscherische Befunde abbilden und verorten. Aus den einzelnen Befunden können dann Rückschlüsse auf Bauablauf, Bauabschnitte und stratigraphische Schichtungen gezogen sowie Bauphasenabfolgen rekonstruiert werden. Der Einsatz von Infrarotthermographie erweitert damit den Kanon bauforscherischer Methodik zur Befundung historischer Bauefuge.

Darüber hinaus können mit thermographischen Untersuchungen nicht nur Aussagen zu Art, Dimensionierung und Einbindung von Bauteilen gemacht werden, sondern auch Erkenntnisse über deren Zustand und mögliche Schäden gewonnen werden. Materialveränderungen und Schadensphänomene wie Risse, klaffende Fugen, Hohlstellen, Ablösungen,

erhöhte Bauteilfeuchte oder Ablagerungen lassen sich aufgrund ihrer spezifischen thermischen Signatur bei geeigneten Umgebungsbedingungen ebenfalls thermographisch abbilden. Weiterhin können historische Gebäude wie in der herkömmlichen Bauthermographie auch auf ihr energetisches Verhalten hin untersucht werden. Die thermographische Analyse von Wärmeströmen und deren Anomalien, Luftundichtheiten und Leckageortung erfolgt nach denselben Prinzipien. Hier sei nochmals explizit darauf hingewiesen, dass derartige Thermographieuntersuchungen zur Energiebilanzierung nicht nur defizitär orientiert sein müssen. Statt der bloßen Fokussierung auf energetische Schwachstellen und konstruktive Mängel kann die Infrarotthermographie umfassender und ressourcenorientierter eingesetzt werden - zur Analyse und Darstellung der baulichen Qualitäten historischer Gebäude, zur Einschätzung der Langzeittauglichkeit historischer Baustoffe, zur Beschreibung und Bewertung der Funktionsfähigkeit jahrhundertealter Gefüge und Konstruktionen.

1.3 Einbindung in den bauforscherischen Untersuchungskanon

Thermographie liefert in der Bauforschung Erkenntnisse zu Art, Umfang und Zustand von Bauteilen, Konstruktionen und deren Materialien. Anhand der thermographisch analysierten Befunde können Rückschlüsse zu Bauablauf und Bautechnik gezogen werden. Aus diesen lassen sich dann wiederum Bauphasenabfolgen rekonstruieren. Die Infrarotthermographie kann als Mess- und Dokumentationsinstrument vielseitig zur Klärung bauforscherischer Fragestellungen eingesetzt werden. Dabei sollte sie jedoch immer ausschließlich als Instrument beziehungsweise Messtechnik verstanden werden, die Interpretation der Messergebnisse obliegt dem Fachpersonal und muss mit hinreichender Sachkenntnis und Detailierung erfolgen. Für die Interpretation von bauhistorischen Befunden sollte die Thermographie grundsätzlich mit weiteren Bauforschungsmethoden kombiniert werden. Die alleinige thermographische Untersuchung genügt hier selten, sie sollte immer eingebunden sein in einen Kanon aus bauforschungsspezifischer Befunduntersuchung und Dokumentation und auch in diesem Kontext ausgewertet werden.³ Dazu gehören unter anderem Fotodokumentationen, Vermessungen, Archivrecherchen und weitere zerstörungsfreie und zerstörungsarme Untersuchungstechniken. Nur so können die thermographischen Befunde richtig eingeordnet und hinreichend interpretiert werden.

Zum Einsatz kommt die Thermographie dabei in verschiedenen Phasen der Bauforschung und Kultur-

Einsatz der IRT in der Bauforschung:

Voruntersuchungen:

Objektüberblick verschaffen
Neuralgische Stellen für weitere Untersuchungen lokalisieren

Bestandsaufnahmen:

Umfassende Darstellung des aktuellen Objektzustands
Konstruktions- und Gefügeanalysen
Schwachstellen- und Schadensanalyse
Visualisierung von Qualitäten und Leistungsfähigkeit historischer Gebäude

Detailaufnahmen:

Baufugen und Bauteilanschlüsse
Materialwechsel
Durchdringungen nachträglich veränderte Bauteile
Bauphasenabfolge

Befundaufnahmen:

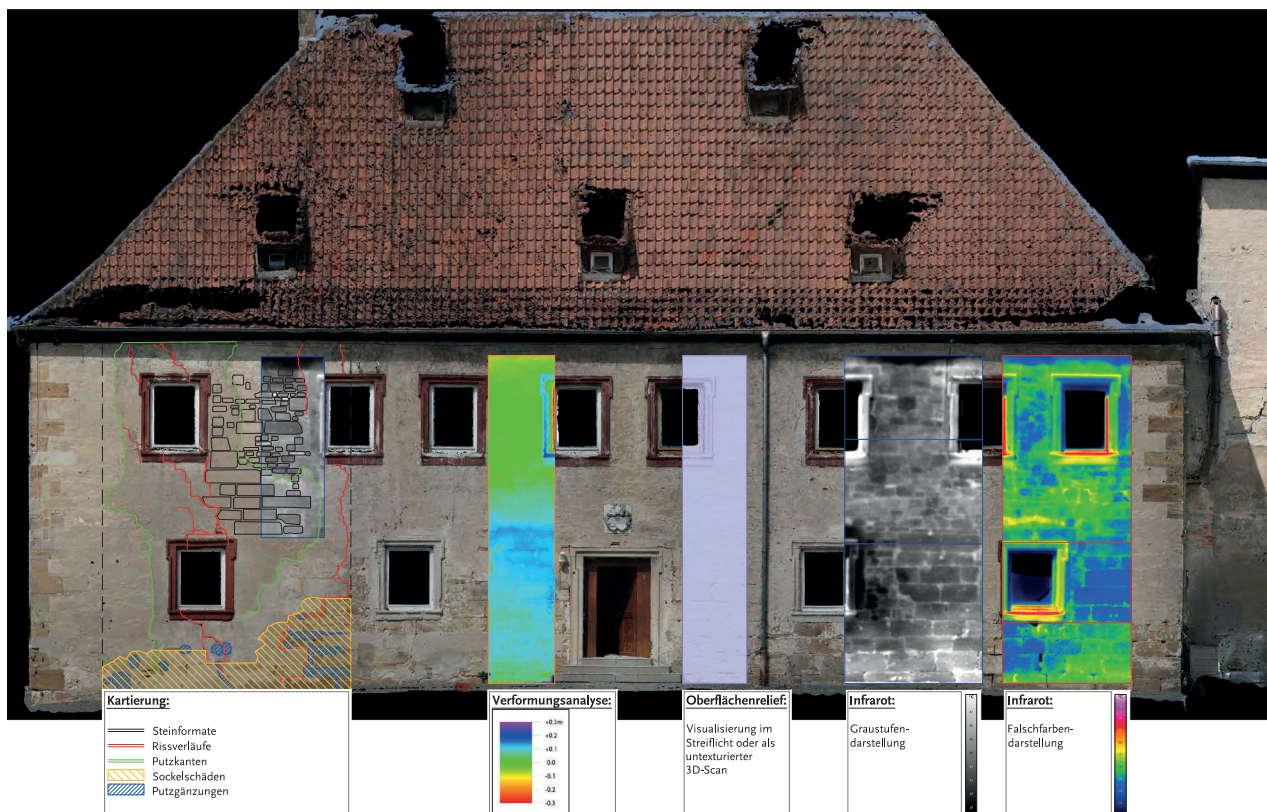
Befundlokalisierung
Verortung geeigneter Befundöffnungen, Bohrungen, Probeentnahmen

Monitoring:

Wiederholte Messungen zur Dokumentation von Veränderungen

Maßnahmenbegleitende Qualitätssicherung:

Visualisierung von Restaurierungs- und Sanierungsmaßnahmen, ggf. Qualitätsprüfung



2 Einbindung der LWIR-Infrarotthermographie in die Dokumentation historischer Bauforschung.

gutsicherung. Bereits bei Erstbegehungen und Voruntersuchungen tragen thermographische Aufnahmen zu einem profunden Überblick über das Objekt bei, indem sie verdeckte Strukturen visualisieren und so erste Hypothesen zu Konstruktion und Materialität be- oder entkräften. Gleichzeitig können die ersten Indizien aus thermographischen Betrachtungen auch Schwerpunkte für die weitere Bauforschung abstecken - Auffälligkeiten im Thermogramm weisen potenzielle Befunde aus und sollten daher eingehender untersucht werden.

Nach den Voruntersuchungen kann die Thermographie weiterhin zur eingehenden Analyse und Dokumentation von Baukonstruktionen, Gefüge und Materialität der historischen Gebäude herangezogen werden. Dabei sind sowohl thermographische Übersichtsaufnahmen zur Befundlokalisierung als auch Detaildokumentationen in variierenden Ausschnitten von Bedeutung für die Einbindung in eine bauforscherische Befundanalyse. Ergänzend dazu können mithilfe thermographischer Aufnahmen vorab geeignete Stellen für etwaige Befundöffnungen, Bohrungen oder sonstige Probenentnahmen eingegrenzt werden.

Außerdem kann die Infrarotthermographie auch zu Monitoringzwecken und Wiederholungsmessungen eingesetzt werden. Vor allem im Bereich der Kulturgut-

sicherung trägt eine regelmäßige Prüfung gefährdeter Objekte dazu bei, präzise Angaben über Materialdegenerationen und Schädigungsprozesse abzubilden. Mit thermographischen Untersuchungen können die Wärmeprozesse an Bauteiloberflächen registriert werden und aus deren Verhalten und Anomalien Schlussfolgerungen bezüglich Schadensmechanismen und Schadensprozessen abgeleitet werden. Darüber hinaus kann die Thermographie auch zur Untersuchung der Umgebungsbedingungen und ihrer Auswirkung auf die jeweiligen Kulturgüter genutzt werden. Wiederholte Messung zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten veranschaulichen die umweltbedingten Auswirkungen als thermische Prozesse. Dazu gehören beispielsweise Erwärmung und Abkühlung an Bauteiloberflächen und die damit verbundenen Temperaturspitzen und thermischen Zwänge, das thermische Verhalten an Bauteilübergängen und Fugen sowie die Art der Feuchteverteilung und Austrocknungsverhalten.

Neben all diesen bestandsorientierten Einsatzmöglichkeiten wird die Infrarotthermographie immer häufiger auch zur Überwachung und Qualitätsprüfung von Sanierungsmaßnahmen an historischen Objekten eingesetzt. Dies kann einerseits während der Sanierungsmaßnahmen baubegleitend geschehen oder nach deren Abschluss zur Prüfung der mittel- und

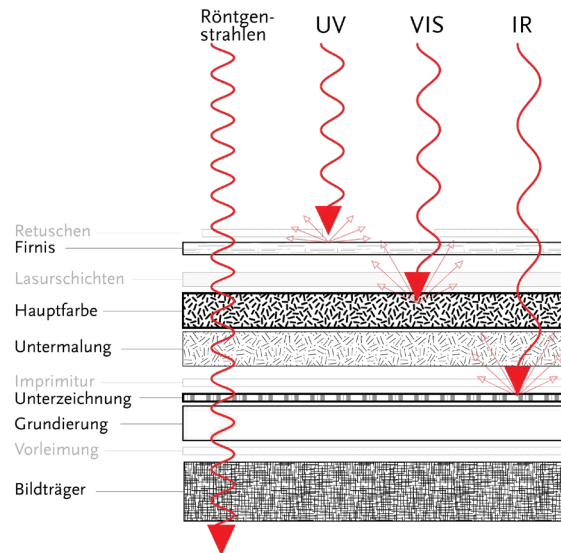
langfristigen Folgen von Sanierungsmaßnahmen auf die historische Substanz. Auch hier sollte die Thermographie immer mit ergänzenden bauforscherischen Untersuchungen kombiniert werden.

1.4 Infratthermographie in den Restaurierungswissenschaften

Einen Schnittstellenbereich in der Anwendung infraroter Untersuchungsverfahren bilden die Restaurierungswissenschaften. Für die restauratorische Untersuchung von Kunst- und Kulturgütern, insbesondere Wand- und Tafelmalerei werden seit langem infrarotbasierte Methoden genutzt.⁴ Vor allem die Infrarotreflektographie⁵ als Teil der zerstörungsfreien Multispektralanalysen ist mittlerweile weit verbreitet. Auch infratthermographische Verfahren werden immer häufiger zur Untersuchung von Malschichtaufbau, Unterzeichnungen und Trägermaterial eingesetzt. Restaurierungswissenschaften und Kunstdiagnostik bilden in diesem Bereich wachsende Forschungsschwerpunkte. Deren Fokus unterscheidet sich zwar deutlich von dem der Bauforschung, doch bestehen wichtige Schnittstellen vor allem im Bereich der Untersuchung von Wandoberflächen. Deshalb werden in diesem Band in Anknüpfung an die Bauforschungsthermographie auch Überschneidungsprojekte mit restaurierungswissenschaftlichen Fragestellungen dargestellt.



3 Einsatz der Infratthermographie für restaurierungswissenschaftliche Untersuchungen.



4 Infratthermographie als Teil strahlungsbasierter Untersuchungen von Wand- und Tafelmalereischichten.

- 1 In diesem Beitrag wird die Schreibweise Thermographie statt Thermografie verwendet, orientiert an der Schreibweise der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP). Zugleich ist diese näher am internationalen Forschungsbegriff Thermography. Es werden außerdem folgende Abkürzungen verwendet: IRT (Infratthermographie, Infrared Thermography), TIR (thermisches Infrat, Thermal Infrared).
- 2 Zerstörungsfreie Prüfmethoden oder Prüfverfahren (ZfP), auch Nondestructive Testing (NDT). Prüfverfahren auf Grundlage physikalischer Messprinzipien (mechanisch, elektrisch, magnetisch, thermisch, optisch, chemisch). Infratthermographie gehört zu den thermischen NDT-Verfahren, der Interaktionsraum der Messung ist oberflächenbezogen. Messgrößen sind Temperaturwerte als Maß für infrarote Strahlungsintensität.
- 3 Immer noch grundlegend zur Bedeutung der Bauforschung ist Petzet, Michael / Mader, Gert (1995): Praktische Denkmalpflege. 2. Aufl., Stuttgart, Berlin., vgl. mittlerweile auch Hoche-Donaubauer, Beatrix (Hrsg.) (2015): Standards der Baudenkmalpflege. ABC. 2. Aufl., Wien.
- 4 Mairinger, Franz (2003): Strahlenuntersuchung an Kunstwerken. 1. Aufl., Leipzig.
- 5 Infrat-Reflektographie Detektionsverfahren für reflektierte Infratstrahlung, in der Regel im elektromagnetischen Wellenlängenbereich von ca. 780 nm - 3 µm. Anwendung häufig im Rahmen von Multispektralanalysen.

2. Zum Forschungsstand der Thermographie in der Bauforschung

Die Infrarotthermographie wird als Teil der optischen Physik einerseits sowie als technische Mess- und Prüfmethode andererseits in verschiedensten Forschungsbereichen thematisiert. Fachübergreifend wird sie als zerstörungsfreies, bildgebendes Verfahren eingesetzt. Während die Messprinzipien auf denselben physikalischen Grundlagen basieren, unterscheiden sich die Anwendungsgebiete und die jeweils spezifisch entwickelte Thermographiemethodik teilweise deutlich. Im Folgenden soll vor allem die Forschung zu Thermographie im Bereich der Bau- und Kulturgutuntersuchungen dargestellt werden. Eine Eingrenzung auf Thermographie in der historischen Bauforschung, Kulturgutsicherung oder Denkmalpflege wäre zu eng gefasst. Bislang gibt es nur wenige umfassende wissenschaftliche Beiträge zu diesem speziellen Anwendungsfeld thermographischer Mess- und Prüfmethoden. Viele der Publikationen zu Thermographie von Kulturgut stammen aus Nachbardisziplinen wie den Restaurierungswissenschaften, der Bauphysik und Gebäudeenergieprüfung, der Kunsttechnologie und

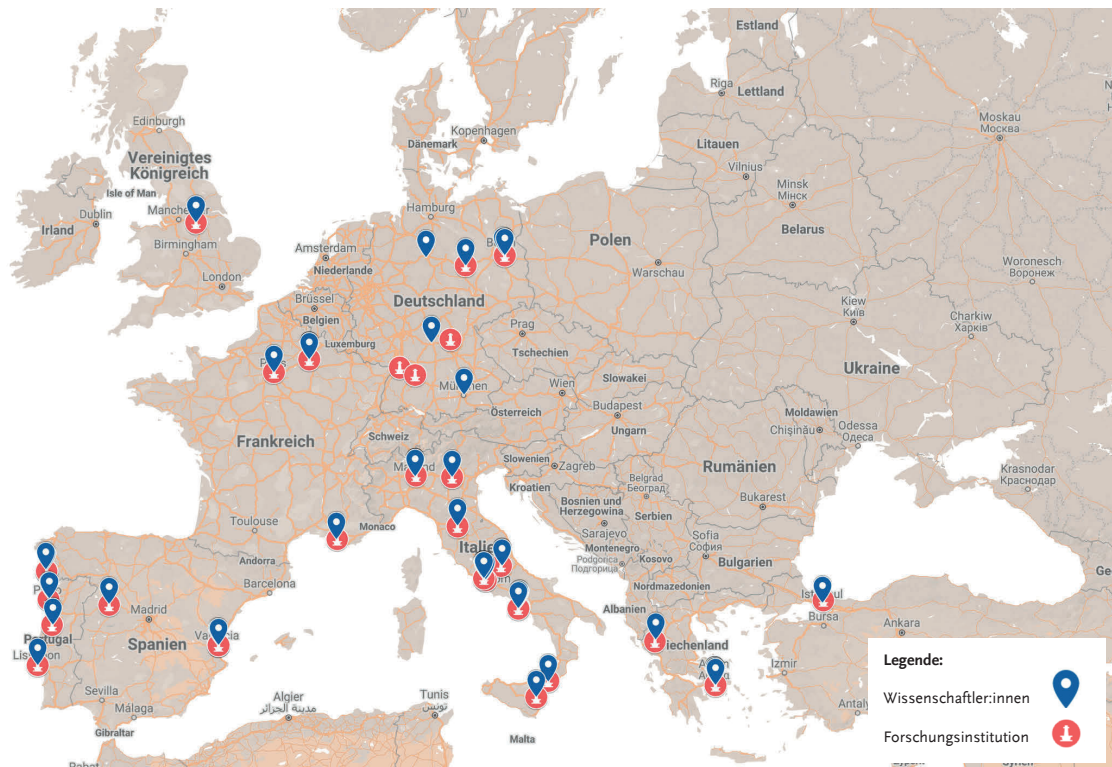
Materialanalytik, dem Gebäudemonitoring und der baulichen Schadensdiagnostik. Diese Publikationen umfassen eine große Bandbreite an Formaten, die im Folgenden vorgestellt werden: Von Forschungsberichten über die Thermographie als individuelle oder kombinierte wissenschaftliche Methode bis hin zu Infobroschüren über die Nutzung von Thermographie-Apps für Smartphones, von wissenschaftlichen Arbeiten zu Einzelaspekten thermographischer Untersuchungen bis hin zu Merkblättern und Handbüchern mit konkreten, aber verallgemeinerbaren Empfehlungen zur Anwendung von Thermographiekameras.

Zur vollständigen Darstellung des Forschungsfeldes werden darüber hinaus auch die einschlägigen Institutionen, Verbände und Vereinigungen, deren regelmäßigen Tagungsreihen und ihre Bedeutung für die Thermographieforschung dargestellt.

Zuletzt soll die Konsolidierung des Forschungsstandes auch an der Entwicklung und Fortschreibung einer thematisch entsprechenden Normung aufgezeigt werden.

2. Forschungsstand

- 2.1. Forschungsfeld IRT: Darstellung und Referenzierung
- 2.2. Institutionen
- 2.3. Normen und Merkblätter
- 2.4. Platzierung in Forschungsfeld



1 Institutionen, Forschungscluster und Wissenschaftler:innen in Europa, die zu Infrarotverfahren in der Kulturgutforschung publizieren.

2.1 Forschungsfeld IRT Darstellung und Referenzierung

Die Infrarotthermographie wird als Teil der optischen Physik einerseits sowie als technische Mess- und Prüfmethode andererseits in verschiedensten Forschungsbereichen thematisiert. Fachübergreifend wird sie als zerstörungsfreies, bildgebendes Verfahren eingesetzt. Während die Messprinzipien auf denselben physikalischen Grundlagen basieren, unterscheiden sich die Anwendungsgebiete und die jeweils spezifisch entwickelte Thermographiemethodik teilweise deutlich. Im Folgenden soll vor allem die Forschung zu Thermographie im Bereich der Bau- und Kulturgutuntersuchungen dargestellt werden. Eine Eingrenzung auf Thermographie in der historischen Bauforschung, Kulturgutsicherung oder Denkmalpflege wäre zu eng gefasst. Bislang gibt es nur wenige umfassende wissenschaftliche Beiträge zu diesem speziellen Anwendungsfeld thermographischer Mess- und Prüfmethode. Viele der Publikationen zu Thermographie von Kulturgut stammen aus Nachbardisziplinen wie den Restaurierungswissenschaften, der Bauphysik und Gebäudeenergieprüfung, der Kunsttechnologie und Materialanalytik, dem Gebäudemonitoring und der baulichen Schadensdiagnostik. Diese Publikationen umfassen eine große Bandbreite an Formaten: Von Forschungsberichten über die Thermographie

als individuelle oder kombinierte wissenschaftliche Methode bis hin zu Infobroschüren über die Nutzung von Thermographie-Apps für Smartphones, von wissenschaftlichen Arbeiten zu Einzelaspekten thermographischer Untersuchungen bis hin zu Merkblättern und Handbüchern mit konkreten, aber verallgemeinerbaren Empfehlungen zur Anwendung von Thermographiekameras.

Aufgrund der rapiden Weiterentwicklung der Infrarotgerätechnik mit dem Meilenstein der ungekühlten Mikrobolometer-Kamerasysteme der 1990er Jahren sowie des zunehmenden Angebots und der günstigeren Kaufpreise der Thermographiekameras seit der Jahrtausendwende haben sich auch Forschungsfeld und Publikationen entschieden verändert. Vor allem die Veröffentlichungen zur Kamertechnik sind schnell überholt, weshalb sich diese Darstellung des Forschungsstandes vor allem auf die Entwicklungen seit der Jahrtausendwende bezieht.

Zu den für die Entwicklung einer Bauforschungsthermographie grundlegenden Darstellungen von Infrarotthermographie als strahlungsbasierter Untersuchungsmethode zählen allen voran die Publikationen von Xavier Maldague.¹ Maldague forscht seit den 1980er Jahren zu Infrarotthermographie in der zerstörungsfreien Untersuchung (NDE, Non Destructive Evaluation) und gehörte zu den ersten Autor:innen,

die sowohl Technik als auch Methodik in Bezug auf konkrete Forschungsfragen umfassend publizierten. Ebenso wegweisend und mit Lehrbuchcharakter war die zusammenfassende Darstellung *La Thermographie infrarouge - principes, technologie, applications* von Gilbert Gaussorgues von 1984². Grundlegend für den deutschsprachigen Forschungsraum sind Schuster und Kolobrodov, die mit *Infrarotthermographie* (1999) die vielseitigen Aspekte dieser Mess- und Prüftechnik methodisch einheitlich und konsistent darlegen.³ Gleiches gilt für Vollmer und Möllmann, die zehn Jahre später den rasanten infrarottechnischen Entwicklungen der Jahrtausendwende und deren Folgen Rechnung tragen, indem sie mit *Infrared Thermal Imaging - Fundamentals, Research and Applications* umfassendes physikalisches und technisches Hintergrundwissen anwendungsbezogen für verschiedene Einsatzgebiete thermographischer Messungen aufschlüsseln.⁴

Im selben Zeitraum legen Waldemar Minkina und Sebastian Dudzik mit *Infrared Thermography. Errors and uncertainties* eine dezidierte Analyse Thermographie-spezifischer Fehleranfälligkeit und mangelnder Bestimmbarkeit vor.⁵ In diesem Zusammenhang ebenfalls erwähnenswert ist das Lehrbuch *der Infrarotthermografie - allgemeine Grundlagen der Thermodynamik, Grundlagen der Strahlungsphysik, Infrarot-Geräte-Technologie* von Zimmermann und Zimmermann. Dieses kompakte Lehrbuch bietet einen anschaulichen Überblick über Thermodynamik, Strahlungsphysik, die Technologie von Thermographiesystemen sowie kamerainterne und -externe Software.⁶

Die genannten Grundlagendarstellungen und Lehrbücher thematisieren detailliert und umfassend die physikalischen und technischen Aspekte von Thermographiesystemen und ihrer Anwendung. Der Fokus liegt dabei immer auf den jeweiligen Mess- und Prüfmethode, ihren Einsatzmöglichkeiten und Grenzen. Die Untersuchungsobjekte stehen hier nicht im Vordergrund, Gebäudethermographie bleibt meist ein marginales Thema und die Thermographie als Bauforschungsansatz spielt gar keine Rolle.

Einen gebäudeorientierten wissenschaftlichen Ansatz bietet die bauphysikalische Forschung. Die Novellierungen der Energieeinsparverordnung (EnEV), das seit 2020 geltende Gebäudeenergiegesetz (GEG) und die wachsenden Ansprüche an Gebäudeenergieeffizienz der letzten Jahrzehnte haben die Forschungslandschaft der Bauphysik und Gebäudeenergie-technik entscheidend geprägt. Dies zeigt sich an einer Vielzahl von sehr kompakten, vorwiegend praxisorientierten Publikationsformaten. Präsent sind hier vor allem die Arbeiten von Nabil Fouad und Torsten Richter. Mit dem Leitfaden *Thermografie im Bauwesen*⁷ (2007)

haben sie eines der im deutschsprachigen Raum meist zitierten, sehr anschaulichen Lehrbücher zu Theorie, Anwendungsgebieten und praktischer Umsetzung der Bauthermographie vorgelegt. Dieser Leitfaden wird kontinuierlich durch anwendungsbezogene Beiträge im *Bauphysikkalender*⁸ und diversen Fachzeitschriften erweitert.

Ähnlich verbreitet in der Praxis ist Herbert Wagners *Thermografie – Sicher einsetzen bei der Energieberatung, Bauüberwachung und Schadensanalyse* (2011)⁹. Wagner bietet neben den bauthermographischen Grundlagen vor allem hilfreiche Hinweise zum Ablauf thermographischer Untersuchungen. Ebenfalls anwendungsfokussiert ist die Einführung in die praktische Infrarot-Thermographie¹⁰ von Dietrich Schneider, eine schulungsartige Foliensammlung, deren Thermographieabbildungen, Diagramme und Stichpunktlisten einen komprimierten Überblick über alle thermographisch relevanten Themenbereich bietet.

Anders als die physikalisch und technisch orientierten Grundlagenwerke beziehen sich diese Formate zwar vollständig auf Bauthermographie und stellen Gebäude als Untersuchungsobjekte in den Mittelpunkt. Auf die Entwicklung einer bauforscherischen Thermographiemethodik sind sie allerdings nur bedingt übertragbar, da der Untersuchungsfokus in der Regel auf bauphysikalischen Phänomenen wie Wärmebrücken, Luftdichtheit, Durchfeuchtungen oder baubegleitenden Qualitätssicherungen liegt.

Zwar handelt es sich bei den Untersuchungsobjekten der genannten Publikationen immer wieder auch um historische Gebäude, die thermographischen Fragestellungen unterscheiden sich jedoch sehr von denen der Bauforschung, die weniger an der energetischen Bilanz als vielmehr der historischen Entwicklung des jeweiligen Objektes interessiert ist. Andererseits wird Thermographie in der Denkmalpflege-Praxis schon seit den 1980er Jahren immer wieder zur Untersuchung historischer Gebäude und konkreter Befunde genutzt. Leider gab es zu diesen Arbeiten bisher kaum Publikationen.¹¹

Die Methode der befundorientierten Fragestellungen zu historischen Materialien und Gefügen findet sich viel eher in den Restaurierungswissenschaften und angrenzenden, mit Kulturgutforschung befassten Fachbereichen wieder. Die hier publizierten Studien zeichnen sich durch spezifisch auf die jeweiligen Messkontexte angepasste Thermographieverfahren aus. Darüber hinaus wird die Thermographie dort häufig in Kombination mit anderen zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden angewandt – Kombinationsmethoden mit Potential auch für bauforscherische Fragestellungen.

Ursprünglich hat sich diese Methodik im Forschungsbereich der restaurierungswissenschaftlichen Sensorik entwickelt, vornehmlich der Infrarot-Reflektographie und der multispektralen Untersuchungen vor allem von Wand- und Tafelmalereien sowie Oberflächen von Kunstobjekten. Hier sei besonders auf das Werk von Franz Mairinger¹² verwiesen, der mit Strahlenuntersuchung an Kunstwerken ein auf langjährigen Erfahrungen basierendes, ebenso umfassendes wie präzises Lehr- und Handbuch vorgelegt hat.

Mittlerweile werden die methodischen Adaptionen von Thermographie als bildgebendes Verfahren in der Untersuchung von Kulturgut vielfach in interdisziplinären Forschungsgruppen weiterentwickelt. Sie entstammen überwiegend projektbezogenen Forschungsstrukturen und sind daher vor allem in Form von Tagungsbeiträgen und Projektberichten publiziert. Parallel zur raschen Weiterentwicklung der Thermokameratechnik verändern sich auch die kulturgutbezogenen Thermographieansätze, entsprechend schnell scheinen einzelne Forschungsberichte bereits überholt. Trotzdem lohnt sich in vielen Fällen die Analyse der jeweiligen Untersuchungsmethodik. Die folgenden Publikationen geben einen zusammenfassenden Überblick über diese sich schnell verändernden Forschungsbereiche mit Fokus auf die dort aktivsten Arbeitsgruppen und Forschungseinrichtungen.

Die Arbeitsgruppe um Antonia Moropoulou, Ekaterini T. Delegou und Maria Karoglou von der Nationalen Technischen Universität Athen (Laboratory of materials science and engineering) forscht zu Anwendungsmöglichkeiten von IRT für die Untersuchung von Wandmalerei und Oberflächengestaltungen¹³, Mosaiken¹⁴, Putz, ebenso zum Monitoring von Alterungserscheinungen an Kulturgut¹⁵ und zur zerstörungsfreien Diagnostik als Werkzeug für den Schutz von Kulturerbe.¹⁶

Die Arbeitsgruppe um Jean-Luc Bodnar, Jean-Charles Candoré und Mouhoubi Kamel der Universität Reims Champagne-Ardenne, Physique et Sciences Pour l'Ingénieur (PSPI) sowie Vincent Detalle vom Centre de recherche et de restauration des Musées de France fokussiert sich auf die Untersuchung und Entwicklung objektspezifischer thermischer Stimulation im Bereich der aktiven Thermographie¹⁷. Diese methodischen Ansätze nutzen sie zur Untersuchung von Fresken¹⁸, Mosaiken¹⁹ und Wandmalereien²⁰, aber auch für die Analyse von Rissen, lokalen Fehlstellen²¹, Mikro-Organismen²² oder Salzschäden²³.

Die Arbeitsgruppe um Dario Ambrosini, Abdelhakim Bendada, Domenica Paoletti und Stefano Sfarra von der Universität dell'Aquila (Department of Industrial and Information Engineering and Economics) und

Clemente Ibarra-Castanedo von der Universität Laval (Department of Electrical Engineering and Computer Engineering) forschten zunächst schwerpunktmäßig zu der Kombination von Puls-Phasen-Thermographie und holographischer Interferometrie zur Untersuchung von Tafelgemälden²⁴. Mittlerweile arbeiten sie zu Kombinationsmöglichkeiten von strahlungsbasierten Untersuchungsverfahren wie beispielsweise Reflektographie und Thermographie²⁵ oder Tomographie und Thermographie²⁶. Weiterhin entwickeln sie methodische Varianten für den Einsatz von Infrarotthermographie zur Schadensdokumentation an Kulturgut²⁷, materialspezifischen Zerfallerscheinungen²⁸ und Thermographie in der präventiven Konservierung²⁹.

In diesem Bereich arbeitet Stefano Sfarra immer wieder zusammen mit Susana Lagüela Lopez von der Universität Salamanca (Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno). Der Fokus dieser Kooperation liegt vor allem auf der Automation thermographischer Untersuchungsansätze.³⁰

Lagüela Lopez befasst sich seit ihrer Doktorarbeit *Geomatic and Thermographic Techniques for the Inspection and Diagnosis of Historic Structures towards their Introduction in Integrated Management Systems*³¹ 2013 in verschiedenen Kontexten mit der automatischen Registrierung von Thermogrammen und Punktwolken³², der thermographischen 3D-Modellierung³³ und der Automatisierung von Thermographiesequenzen³⁴ im Allgemeinen. Darüber hinaus entwickelt sie mit ihrer Forschungsgruppe zur angewandten Geotechnologie auch vielversprechende Ansätze für Luftbildthermographie³⁵ und zur Integration von Thermographie in Geoinformationssysteme³⁶.

Ebenfalls im Bereich der Geodäsie verortet ist die Arbeitsgruppe um Jose Luis Lerma, Miriam Cabrelles und Talal Akasheh von der Polytechnischen Universität València, Department of Cartographic Engineering, Geodesy & Photogrammetry. Sie arbeiten allgemein sehr breit aufgestellt zur Anwendung von multisensorischen Techniken in der Kulturerbeforschung. Thermographie nutzen sie dabei einerseits zur Integration mit Laserscanning- und Photogrammetriedaten³⁷ und andererseits als wichtiges Instrument bei Multispektralanalysen von Kulturgut³⁸.

Eine weitere Arbeitsgruppe in der Thermographieforschung arbeitet im Rahmen des Italian National Research Council. Dazu gehören Paolo Bison, Alessandro Bortolin und Giovanni Ferrarini (Construction Technologies Institute ITC), sowie Gianluca Cadelano (Institute of Atmospheric Sciences and Climate ISAC). Ihre Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich des thermographisch basierten Monitorings von Kulturgutobjekten³⁹. Dies umfasst unter anderem auch Ansätze

zur aktiven Thermographie von Fresken und Wandmalereien⁴⁰ bis hin zur Infrarot-photogrammetrischen Dokumentation von Gebäuden⁴¹ und der Integration thermographischer Daten in geophysikalische Untersuchungen⁴².

Die Arbeitsgruppe um Carosena Meola und Giovanni Carlomagno der Universität Neapel Federico II (Department of Industrial Engineering, Aeronautical Engineering) arbeitet zwar überwiegend in der Materialanalytik und verwendet Thermographie dort zur Prüfung von Beschichtungen, faserverstärkten Kunststoffen oder Kompositmaterialien.⁴³ Einige ihrer methodischen Ansätze testen sie jedoch immer wieder auch an historischen Baumaterialien⁴⁴ und in restaurierungswissenschaftlichen Kontexten⁴⁵. 2012 haben sie mit *Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends*⁴⁶ zudem eine gute Übersicht zum damaligen Stand der Infrarottechnik und einem Ausblick auf deren Weiterentwicklung vorgelegt.

Die Arbeitsgruppe um Fulvio Mercuri, Christina Cicero, Noemi Orazi, Stefano Paolini und Ugo Zammit der Universität Rom Tor Vergata (Department of Industrial Engineering) arbeitet objektbezogen an thermographischen Analysenverfahren für Kulturgut⁴⁷. Sie untersuchen dafür eine große Bandbreite historischer Kulturgüter, von Bronzeskulpturen⁴⁸ über Altartafeln⁴⁹ bis hin zu historischen Büchern. Der Fokus liegt dabei auf der objektbezogenen Anpassung aktiver Thermographieverfahren⁵⁰.

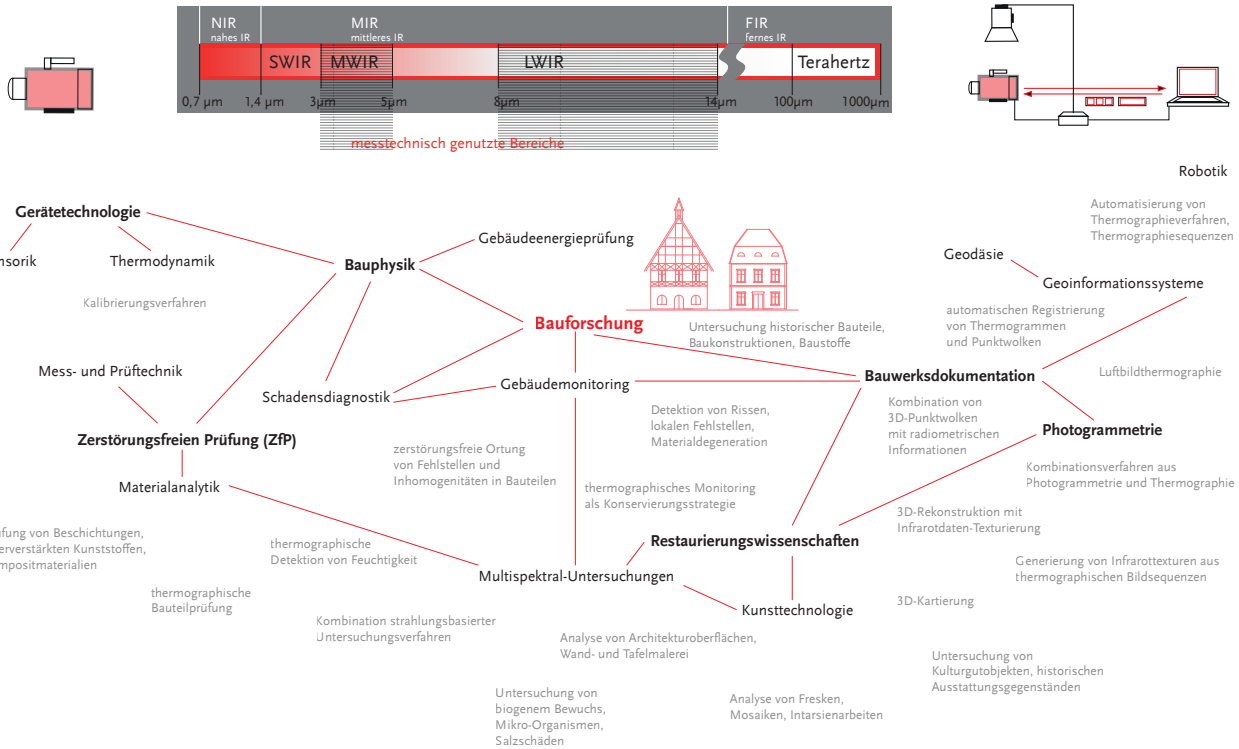
Eine weitere sehr aktive Arbeitsgruppe ist die um Elisabetta Rosina, Luigi Barazzetti, Marco Scaioni und Alessandra Zanelli vom Politecnico di Milano (Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering). Die Ansiedlung dieser Gruppe an einer Architekturfakultät zeigt sich in einem deutlichen Schwerpunkt bei infrarotthermographischen Verfahren zur Untersuchung und Erhaltung historischer Gebäude⁵¹, zur Detektion verdeckter baulicher Strukturen⁵² und in Ansätzen zum thermographischen Monitoring als Konservierungsstrategie für Gebäude⁵³. Ergänzend dazu forscht diese Gruppe auch zum Mapping von Infrarotdaten auf 3D-Gebäudemodelle⁵⁴, um die aufgenommenen thermographischen Monitoringdaten auch geometrisch referenzieren zu können. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der thermographischen Analyse historischer Baustoffe⁵⁵ und der thermographisch gestützten Detektion von Feuchtigkeit⁵⁶. Aus diesen Forschungsansätzen sowohl auf der Ebene ganzer Gebäude als thermische evaluierbare Strukturen als auch auf der Ebene einzelner Baustoffe versuchten Rosina et al. zuletzt außerdem fachübergreifend anwendbare Richtlinien für den Einsatz von Thermographie⁵⁷ zu entwickeln.

Federführend in der thermographischen Bauteilprüfung im deutschsprachigen Raum ist die Forschungsgruppe um Christiane Maierhofer, Rainer Krankenhagen und Matthias Röllig der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Department of Non-destructive Testing). Sie forschen vor allem zu zerstörungsfreien Prüfverfahren in der Materialanalytik, wie beispielsweise die zerstörungsfreie Ortung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen⁵⁸.

Einige ihrer Forschungsprojekte beziehen sich jedoch auch auf Kulturgüter als Untersuchungsobjekte und bieten daher hervorragende methodische und technische Ansätze auch für die Bauforschung. Diese thermographischen Ansätzen umfassen unter anderem die Entwicklung von Prüfverfahren zur Untersuchung von historischem Mauerwerk⁵⁹ oder thermographische Untersuchungen von Fassaden⁶⁰ und Putzoberflächen⁶¹. Parallel forscht diese Gruppe auch zu Strategien für Denkmalmonitoring⁶² und entwickelt Verfahren zur Kombination von thermalen Daten und 3D-Daten⁶³.

Dieser Forschungsbereich der photogrammetrischen und thermographischen Kombinationsverfahren wird im deutschsprachigen Raum maßgeblich von der Forschungsgruppe um Uwe Stilla und Ludwig Hoegner von der Technischen Universität München (Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung) vorangetrieben. Sie arbeiten schwerpunktmäßig zur Integration photogrammetrischer Daten mit weiteren zerstörungsfreier Erkundungs- und Prüfverfahren. Dazu gehören unter anderem die Fusion von terrestrischen Laserscandaten, Punktwolken und Infrarotbildern⁶⁴. Weiterhin arbeiten sie auch an verschiedenen Verfahren zur Generierung von Infrarottexturen aus thermographischen Bildsequenzen⁶⁵ und zur 3D-Rekonstruktion und deren thermaler Texturierung aus Infrarotdaten⁶⁶ sowie der Automatisierung⁶⁷ dieser Abläufe.

Ebenfalls maßgeblich beteiligt an der Forschung zur 3D-Thermographie ist die Arbeitsgruppe um Dorit Borrmann und Andreas Nüchter der Universität Würzburg (Abteilung Informatics VII: Robotics and Telematics). Ihr Forschungsschwerpunkt liegt auf der multi-modalen 3D-Kartierung und der Kombination von 3D-Punktwolken mit Thermo- und Farbinformationen⁶⁸. Dazu gehören auch Verfahren zur Kalibrierung der Sensoren⁶⁹ und Forschungsansätze zur Robotikbasierten Automatisierung dieser Prozesse.⁷⁰



2 Die Fortschreibung und Darstellung der wissenschaftlichen Entwicklung als laufender Prozess: Forschungsbereiche, die Infrarotverfahren entwickeln, anwenden und mit weiteren Sensordaten kombinieren.

2.2 Institutionen

Zur vollständigen Darstellung des Forschungsfeldes gehört auch noch der Hinweis auf einschlägige Institutionen, Verbände und Vereinigungen und deren regelmäßigen Tagungsreihen. Viele der bereits angeführten Publikationen wurden innerhalb der Reihen dieser Gruppen veröffentlicht.

Zu den im deutschsprachigen Raum wichtigen Verbänden gehören der Bundesverband für Angewandte Thermografie e.V. (VATH) und seine Pendanten, die Österreichische Gesellschaft für Thermografie (ÖGfTh) und der Thermografie und Blower-Door Verband Schweiz (theCH). Die Verbandsmitglieder stammen aus der Bauwirtschaft, der Industrie, dem Handwerk, dem Servicesektor, aus universitären Fachgruppen und aus Firmen, die Infrarotgeräte produzieren. Ihre häufig jahrzehntelange Praxiserfahrung im Bereich der Bau-, Industrie oder Elektrothermographie bildet eine wichtige Wissensgrundlage in Form von Merkblättern, Handreichungen und regelmäßigen Fachtagungen. Außerdem bieten sie Beratungen und Weiterbildungen zum aktuellen Stand der Technik an.

Ebenso relevant im anwendungsbezogenen Forschungsbereich sind die Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) und ihre internationalen Pendanten. Als zerstörungsfreie Prüfmethode

gehört die Thermographie auch zu ihren Themenbereichen. Die DGZfP ist an der Erstellung von Normen und Richtlinien beteiligt, veranstaltet Fachtagungen, Seminare, Weiterbildungen und zertifiziert Prüfpersonal. Außerdem gibt sie in Kooperation mit anderen einschlägigen Institutionen Fachliteratur heraus. Wichtig für die infrarotthermographische Forschung sind die Thermographiekolloquien der DGZfP.

In diesem Zusammenhang soll auch noch auf die Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA) hingewiesen werden. Die WTA hat neben dem VATH und der DGZfP eines der wichtigsten Merkblätter zur Bauthermographie im Bestand entwickelt.⁷¹ Damit wurde der aktuelle Stand der Technik speziell für die Bestandsthermographie erfasst, bewertet und anwendungsbezogen eingeordnet.

Weitere international bedeutende Fachtagungen und Austauschforen sind die Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT), der International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications (AITA), sowie die Konferenzen und Messen des Wirtschaftsverbandes Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).

Wichtig für den Bereich der technischen Kulturgutforschung sind die Arbeiten der International Society

for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) und ihrer Tochterorganisation International Committee of Architectural Photogrammetry (CIPA), die – mittlerweile als CIPA Heritage Documentation – eines der internationalen Scientific Committees von ICOMOS (International Council of Monuments and Sites der UNESCO) darstellt. Der Schwerpunkt von CIPA liegt im Transfer und der Nutzbarmachung mess- und dokumentationstechnischer Wissenschaften für den Einsatz in der Kulturguterfassung. In diesem Zusammenhang fördert CIPA auch die kulturgutbezogene Thermografie-forschung und bietet eine Plattform für fachlichen Austausch, Publikationen und die Entwicklung von Anwendungsprinzipien und -praktiken.

2.3 Normen und Merkblätter

Nicht zuletzt zeigt sich die Konsolidierung eines Forschungsstandes auch an der Entwicklung einer thematisch entsprechenden Normung. Aus diesem Grund wird hier in Ergänzung zum Forschungsstand auch noch der aktuelle Stand der Normung aufgelistet.⁷²

DIN EN 16714-1:2016-11

Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen; Deutsche Fassung EN 16714-1:2016⁷³

DIN EN 16714-2:2016-11

Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 2: Geräte; Deutsche Fassung EN 16714-2:2016⁷⁴

DIN EN 16714-3:2016-11

Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 3: Begriffe; Deutsche Fassung EN 16714-3:2016⁷⁵

DIN EN ISO 9712:2012-12

Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung⁷⁶

DIN 54184:2017-10

Zerstörungsfreie Prüfung - Impulsthermografie mit optischer Anregung

DIN 54185:2018-10

Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Lock-in-Thermografie mit optischer Anregung⁷⁷

DIN EN 13187:1999-05

Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen – Infrarot-Verfahren (ISO 6781:1983, modifiziert); Deutsche Fassung EN 13187:1998

DIN EN ISO 6781-1

Verhalten von Gebäuden - Feststellung von wärme-, luft- und feuchtebezogenen Unregelmäßigkeiten in Gebäuden durch Infrarotverfahren - Teil 1: Allgemeine Verfahren (ISO/DIS 6781-1:2020); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 6781-1:2020⁷⁸

DIN EN ISO 6781-3

Verhalten von Gebäuden - Feststellung von wärme-, luft- und feuchtebezogenen Unregelmäßigkeiten in Gebäuden durch Infrarotverfahren - Teil 3: Qualifikation der Ausrüstungsbetreiber, Datenanalytiker und Berichtsautoren (ISO 6781-3:2015); Deutsche Fassung EN ISO 6781-3:2015

DIN EN 16682:2017-05

Erhaltung des kulturellen Erbes - Verfahren zur Bestimmung des Feuchte- bzw. Wassergehalts in Materialien des unbeweglichen kulturellen Erbes; Deutsche Fassung EN 16682:2017

VATh Bundesverband für Angewandte Thermografie e.V.: **VATh-Richtlinie: Bauthermografie**. Zur Planung, Durchführung und Dokumentation infrarotthermografischer Messungen an Bauwerken oder Bauteilen von Gebäuden.⁷⁹

DGZfP

Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung: Merkblatt TH-1 1999-03: Charakterisierung von Thermografiesystemen.

DGZfP

Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung: Merkblatt B5: Merkblatt über thermografische Untersuchungen an Bauteilen und Bauwerken, alte Ausgabe Oktober 1993.

DGZfP

Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung: B 05 2013-04 Merkblatt über das aktive Thermographieverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen

VDI Verein Deutscher Ingenieure

VDI 2878 Blatt 1 2020-08 Anwendung der Thermografie zur Diagnose in der Instandhaltung - Allgemeine Anforderungen sowie Hinweise für Entscheidungsträger und Verantwortliche

WTA Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.: **WTA Bauthermografie im Bestand**, E-6-18: Ausgabe 01.2018/D (Januar 2018).

2.4 Platzierung im Forschungsfeld

Aus dieser Analyse des Forschungsstandes wird deutlich, dass die Infrarotthermographie ein bemerkenswert interdisziplinäres Feld ist. Die spezifische Anwendung und Bewertung thermographischer Verfahren erfordert Kenntnisse sowohl in Strahlungsphysik, Sensorik und Thermodynamik als auch Wissen zu Infrarotgerätetechnik und Systemparametern, thermographischen Messmethoden und zu deren klimatischen Randbedingungen und potentiellen Störeinflüssen.

Neben Messtechnik und Messmethodik gehören auch Auswertungs- und Interpretationskompetenzen zu den zentralen Anforderungen. Und mit immer komplexer werdenden Mess- und Prüfverfahren, mit der zunehmenden Fusion verschiedener Daten und Messwerte zu einem Objekt ist nach der eigentlichen Auswertung auch die Datenweiterverarbeitung von wachsender Bedeutung. Wie die Analyse des Forschungsfeldes deutlich zeigt, gehört die Integration der thermographischen Ergebnisse in einen übergeordneten Untersuchungskontext mittlerweile neben Infrarottechnik und -Methodik zu den zentralen Anforderungen an die Thermographie.

Technik und Objektwissen

Die Forschungsfeldanalyse zeigt aber auch, dass durch den Fokus auf maximal entwickelte Technik und Methodik leider allzu oft die profunde Kenntnis des Untersuchungsobjektes vernachlässigt wird. Dabei ist Objektwissen absolut zentral, wenn es darum geht, ein Objekt zu untersuchen und die spezifischen Untersuchungsergebnisse auch individuell interpretieren zu können. Besonders gilt dies für den Bereich der historischen Kulturgüter mit ihren individuellen Lebensgeschichten und Materialalterungsprozessen. Hier ist einerseits konstruktives, restauratorisches und materialtechnisches Hintergrundwissen notwendig und andererseits auch ein vertieftes Objektgruppenwissen, also das Wissen um typische Konstruktionen, Restaurierungen und Materialparameter und ihr typisches Messverhalten. Nur mit dem Hintergrundwissen des für historische Objekte Typischen (und dessen Varianten) können messtechnische Abweichungen eingeordnet und bewertet werden.

Völlig zurecht sind die Forschungsschwerpunkte der Infrarotthermographie an technischen Universitäten und polytechnischen Hochschulen, an ingenieur- und materialwissenschaftlichen, elektrotechnischen und informatischen, energietechnologischen und geodätischen Fakultäten verortet. Doch ebenso bedarf es ergänzender kulturwissenschaftlicher, kunst- und

bauhistorischer Ansätze und ebenso unerlässlich sind das Fach- und Objektwissen dieser Disziplinen für die umfassende Anwendung der Infrarotthermographie in der Kulturgutforschung.

Befundorientierung

Eben diese Ansätze und dieses Fachwissen bieten die Bamberger Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien. Der Ansatz einer bauforschungsspezifischen Infrarotthermographie beinhaltet sowohl den Objektbezug als auch dessen Kontextbezug. Die Untersuchungsparameter werden je nach Objekt, Objektgruppe und Kontext angepasst. Thermographie in der Bauforschung ist keine bloße Messung radiometrischer Werte an historischen Gebäuden, sondern immer integriert in eine umfängliche bauforscherische Untersuchung, in der die bildgebende Thermographie an zentralen bauhistorischen Fragestellungen ausgerichtet wird. Daraus werden dann grundlegende Klassifizierungsmöglichkeiten für bauforscherische Thermographieverfahren und Ergebniskategorien entwickelt. Die Befundorientierung bleibt dabei eine zentrale Prämisse. Die thermographischen Ergebnisse werden stets mit anderweitig ermittelten bauforscherischen Befunden überlagert und abgeglichen.

Daraus leitet sich die Berechtigung einer geistes- und kulturwissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Thermographie als Technik und Methode her: Der Fokus thermographischer Untersuchungen in der Bauforschung bezieht sich nicht nur auf die Frage, wie die Risse oder Ablösungen in historischen Materialien aussehen oder wie sie verteilt sind, wo der Feuchtehorizont im Bauteil verläuft, oder wo die Wärmebrücken liegen, sondern auch, warum sie gerade an diesen Stellen auftauchen und wie sie mit der Gesamtkonstruktion und der historischen Entwicklung des Gebäudes in Zusammenhang stehen.

Bauforschungsthermographie dokumentiert nicht nur die Veränderungen historischer Materialien und Konstruktionen, sondern kann einen Beitrag zur Klärung ihrer Ursachen sowie zur Einordnung der Einzelbefunde leisten. Darüber hinaus ist Bauforschungsthermographie nicht primär defizitorientiert oder präventiv-konservierend, sondern vor allem auf die Bau- und Veränderungsgeschichte der Objekte fokussiert. Deren überlieferte Bausubstanz wird als historische Primärquelle untersucht. Thermographie wird als bildgebendes Verfahren eingesetzt, vor dem Hintergrund eines umfassenden fachlichen Verständnisses für die materialspezifischen, konstruktiven und räumlichen Zusammenhänge am Bauwerk, seine Entstehungsbedingungen und seine Veränderungs- und Entwicklungsgeschichte.

- 1 Maldague, Xavier P.V. (1993): *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography*, Berlin u.a.
- Maldague, Xavier P.V. (Hrsg.) (1994): *Infrared methodology and technology*, New York.
- Maldague, Xavier P.V. (2001): *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, New York.
- Maldague, Xavier P.V. / Moore, Patrick O. (Hrsg.) (2001): *Infrared and thermal testing. Nondestructive testing handbook*. 3. Aufl., Columbus, Ohio.
- 2 Gaussorgues, Gilbert (1984): *La Thermographie infrarouge. Principes, technologie, applications*. 2. Aufl., Paris.
- 3 Schuster, Norbert / Kolobrodov, Valentin G. (erste Auflage 1999, zweite Auflage 2004): *Infrarotthermographie*. Weinheim.
- 4 Vollmer, Michael / Möllmann, Klaus-Peter (erste Auflage 2010, zweite 2018): *Infrared thermal imaging. Fundamentals, research and applications*, Weinheim.
- 5 Minkina, Waldemar / Dudzik, Sebastian (2009): *Infrared thermography. Errors and uncertainties*, Chichester, West Sussex, U.K, Hoboken, NJ.
- 6 Zimmermann, Thomas / Zimmermann, Martina (2012): *Lehrbuch der Infrarotthermografie. Allgemeine Grundlagen der Thermodynamik, Grundlagen der Strahlungsphysik, Infrarot-Geräte-Technologie (für normative Stufe 1 und 2)*, Stuttgart.
- 7 Fouad, Nabil A. / Richter, Torsten (2012): *Leitfaden Thermografie im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung*. 4. Aufl., Stuttgart.
- 8 Fouad, Nabil A. (Hrsg.) (2012): *Bauphysik Kalender 2012. Schwerpunkt: Gebäudediagnostik*, Berlin.
- Fouad, Nabil A. (Hrsg.) (2017): *Bauphysik Kalender 2017. Gebäudehülle und Fassaden*, Berlin.
- 9 Wagner, Herbert (2011): *Thermografie. Sicher einsetzen bei der Energieberatung, Bauüberwachung und Schadensanalyse; mit 46 Tabellen*, Köln.
- 10 Schneider, Dietrich (2012): *Einführung in die praktische Infrarot-Thermografie*, Aachen.
- 11 Zwei der wenigen Autoren, die bisher zu thermographischen Untersuchungen in der Denkmalpflege-Praxis publizierten sind Johannes Cramer und Martin Mudri. Vgl. Cramer, Johannes: *Untersuchung von Fachwerkbauten auf thermografischer Basis*, in: *Bauen mit Holz ; 1980, 2*. Vgl. Mudri, Martin / Schuster, Paul (2016): *Röntgenblick in die Vergangenheit. Aktuelle Bauforschung und Infrarotthermografie in Schloss Eggenberg*, in: *ÖZKD Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege*, Vol. 70, S. 90–103.
- 12 Mairinger, Franz (2003): *Strahlenuntersuchung an Kunstwerken*. 1. Aufl., Leipzig.
- 13 Kordatos, Evangelos / Exarchos, D. A. / Stavrakos, C. / Moropoulou, Antonia / Matikas, Theodore E. (2013): *Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments*, in: *Construction and Building Materials*, Vol. 48, S. 1261–1265.
- 14 Moropoulou, Antonia / Karoglou, Maria / Labropoulos, Kyriakos C. / Delegou, Ekaterini T. / Katsiotis, Nikolaos / Karagiannis-Bakolas, Asterios (2012): *Application of non-destructive techniques to assess the state of Hagia Sophia's mosaics*. in: *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration*.
- 15 Moropoulou, Antonia / Avdelidis, Nicolas P. / Kouli, Maria / Delegou, Ekaterini T. / Tsiourva, Theodora (2001): *Infrared thermographic assessment of materials and techniques for the protection of cultural heritage*. in: *Multispectral and Hyperspectral Image Acquisition and Processing*, S. 313–318.
- 16 Moropoulou, Antonia / Labropoulos, Kyriakos C. / Delegou, Ekaterini T. / Karoglou, Maria / Bakolas, Asterios (2013): *Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage*, in: *Construction and Building Materials*, Vol. 48, S. 1222–1239.
- 17 Bodnar, Jean Luc / Metayer, J. J. / Mouhoubi, Kamel / Detalle, Vincent (2012): *Non destructive testing of works of art by stimulated infrared thermography and terahertz analysis*. in: *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT)*.
Mouhoubi, Kamel / Dieng, K. / Fomena, C. / Feddini, H. / Salami, A. / Vallet, J. M. / Bodnar, Jean Luc (2020): *Contribution to the improvement of the detection of defects located in heritage by stimulated infrared thermography associated with a spatial reassignment of the color dynamics of thermograms*. in: *Proceedings of the 2020 QIRT*.
- 18 Candoré, Jean Charles / Bodnar, Jean Luc / Detalle, Vincent / Gossel, Philippe (2010): *Assistance to the restoration of historical frescoes by stimulated infrared thermography*. in: *10th QIRT*.
Mouhoubi, Kamel / Bodnar, Jean Luc / Detalle, Vincent / Vallet, Jean-Marc (2016): *Stimulated infrared thermography applied to the local thermal characterization of fresco*. in: *13th QIRT*.

- 19 Mouhoubi, Kamel / Detalle, Vincent / Vallet, Jean-Marc / Bodnar, Jean Luc (2019): Improvement of the Non-Destructive Testing of Heritage Mural Paintings Using Stimulated Infrared Thermography and Frequency Image Processing, in: *Journal of Imaging*, Vol. 5, Nr. 9, S. 72.
- 20 Bodnar, Jean Luc / Nicolas, Jean Luis / Mouhoubi, Kamel / Detalle, Vincent (2012): Thermal diffusivity measurement of mural painting by simulated infra-red thermography. in: 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.
- Mouhoubi, Kamel / Bodnar, Jean Luc / Vallet, Jean-Marc / Detalle, Vincent (2019): Stimulated infrared thermography application to the conservation of heritage wall paintings: interest of a material and software combined approach. in: *Optics for arts, architecture, and archaeology VII*. 24-26 June 2019, Munich, Germany. hrsg. von Liang, H. / Groves, R. M. / Targowski, P.
- 21 Bodnar, Jean Luc / Vrabie, V. / Perrin, E. / Mouhoubi, Kamel / Detalle, Vincent (2012): Defect detection in mural painting by random infrared thermography associated with singular value decomposition and higher orders statistics. in: 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.
- Mouhoubi, Kamel / Dieng, K. / Fomena, C. / Feddini, H. / Salami, A. / Vallet, J. M. / Bodnar, Jean Luc (2020): Contribution to the improvement of the detection of defects located in heritage by stimulated infrared thermography associated with a spatial reassignment of the color dynamics of thermograms. in: *Proceedings of the 2020 QIRT*.
- 22 Eyssautier-Chuine, Stéphanie / Mouhoubi, Kamel / Refuville, Fany / Bodnar, Jean Luc (2018): Early detection of microorganisms development on stone monuments thanks to the stimulated infrared thermography and SVD. in: 14th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.
- Eyssautier-Chuine, Stéphanie / Mouhoubi, Kamel / Refuville, Fany / Bodnar, Jean Luc (2020): Thermographic imaging for early detection of biocolonization on buildings, in: *Building Research and Information*, Vol. 48, Nr. 8, S. 856–865.
- 23 Thomachot-Schneider, Céline / Vázquez, Patricia / Gommeaux, Maxime / Lelarge, Norman / Conreux, Alexandra / Drothière, Xavier / Mouhoubi, Kamel / Bodnar, Jean Luc (2019): Thermal response of building stones contaminated with salts, in: *Construction and Building Materials*, Vol. 226, S. 331–344.
- 24 Sfarra, Stefano / Ibarra-Castanedo, Clemente / Ambrosini, Dario / Paoletti, Domenica / Bendada, Abdelhakim / Maldague, Xavier P.V. (2008): Subsurface defect characterization in artworks by quantitative pulsed phase thermography and holographic interferometry, in: *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol. 5, Nr. 2, S. 131–149.
- Sfarra, Stefano / Ibarra-Castanedo, Clemente / Ambrosini, Dario / Paoletti, Domenica / Bendada, Abdelhakim / Maldague, Xavier P.V. (2010): Diagnostics of panel paintings using holographic interferometry and pulsed thermography, in: *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol. 7, Nr. 1, S. 85–114.
- 25 Ambrosini, Dario / Daffara, Claudia / Di Biase, Roberta / Paoletti, Domenica / Pezzati, Luca / Bellucci, Roberto / Bettini, Francesca (2010): Integrated reflectography and thermography for wooden paintings diagnostics, in: *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 11, Nr. 2, S. 196–204.
- Sfarra, Stefano / Ibarra-Castanedo, Clemente / Ambrosini, Dario / Paoletti, Domenica / Bendada, Abdelhakim / Maldague, Xavier P.V. (2011): Integrated approach between pulsed thermography, near-infrared reflectography and sandwich holography for wooden panel paintings advanced monitoring, in: *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 47, Nr. 4, S. 284–293.
- 26 Madruga, Francisco J. / Sfarra, Stefano / Real, Eusebio / Gargiulo, Gianfranco / Conde, Olga M. / López-Higuera, José M. (2020): Complementary Use of Active Infrared Thermography and Optical Coherent Tomography in Non-destructive Testing Inspection of Ancient Marquetries, in: *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 39, Nr. 2.
- 27 Sfarra, Stefano / Ibarra-Castanedo, Clemente / Ambrosini, Dario / Paoletti, Domenica / Bendada, Abdelhakim / Maldague, Xavier P.V. (2011): The use of optical and infrared techniques for the restoration of the frescoes damaged by earthquake: a case study—the fresco of Giacomo Farelli in the Church of Santa Maria della Croce di Roio (L'Aquila, Italy), S. 627–641.
- Sfarra, Stefano / Ibarra-Castanedo, Clemente / Ambrosini, Dario / Paoletti, Domenica / Bendada, Abdelhakim / Maldague, Xavier P.V. (2014): Discovering the Defects in Paintings Using Non-destructive Testing (NDT) Techniques and Passing Through Measurements of Deformation, in: *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 33, Nr. 3, S. 358–383.
- 28 Ambrosini, Dario; Paoletti, Alfonso; Paoletti, Domenica; Sfarra, Stefano (2007): NDT methods in artwork corrosion monitoring, in: *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology*, Vol. 6618, S. 661817. International Society for Optics and Photonics.
- 29 Ambrosini, Dario / Paoletti, Domenica / Sfarra, Stefano / Bisegna, Fabio (2013): Preventive thermographic diagnosis

- of historical buildings for consolidation, in: *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 14, Nr. 2, S. 116–121.
- Sferra, Stefano / Laureti, Stefano / Gargiulo, Gianfranco / Malek-mohammadi, Hamed / Sangiovanni, Mario Andrea / La Russa, Mauro / Burrascano, Pietro / Ricci, Marco (2020): Low Thermal Conductivity Materials and Very Low Heat Power: A Demanding Challenge in the Detection of Flaws in Multi-Layer Wooden Cultural Heritage Objects Solved by Pulse-Compression Thermography Technique, in: *Applied Sciences*, Vol. 10, Nr. 12, S. 4233.
- 30 Garrido, Iván / Lagüela, Susana / Sferra, Stefano / Arias Sánchez, Pedro (2020): Development of Thermal Principles for the Automation of the Thermographic Monitoring of Cultural Heritage, in: *Sensors Switzerland*, Vol. 20, Nr. 12.
- Garrido, Iván / Lagüela, Susana / Sferra, Stefano / Zhang, Hai / Maldague, Xavier P.V. (2019): Automatic Detection and Delimitation of Internal Moisture in Mosaics from Thermographic Sequences. Experimental Tests, in: *MDPI Proceedings*, Vol. 27, Nr. 1, S. 7.
- 31 Lagüela, Susana (2013): *Geomatic and Thermographic Techniques for the Inspection and Diagnosis of Historic Structures towards their Introduction in Integrated Management Systems*. Dissertation, Universidad de Vigo.
- 32 Lagüela, Susana / Armesto, J. / Arias Sánchez, Pedro / Zakhor, A. (2012): Automatic Procedure for the Registration of Thermographic Images with Point Clouds, in: *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B5, S. 211–216.
- 33 Lagüela, Susana / Díaz-Vilariño, L. / Armesto, J. / Arias Sánchez, Pedro (2012): Thermographic 3D models as the foundation for Building Information Models. in: *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.
- Lagüela, Susana / Martínez, J. / Armesto, J. / Arias Sánchez, Pedro (2011): Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies, in: *Energy and Buildings: An international Journal of Research applied to Energy Efficiency in the Built Environment*, Vol. 43, Nr. 6, S. 1216–1221.
- 34 Garrido, Iván / Lagüela, Susana / Arias Sánchez, Pedro (2018): Autonomous thermography: towards the automatic detection and classification of building pathologies. in: *14th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.
- Garrido, Iván / Lagüela, Susana / Sferra, Stefano / Madruga, Francisco J. / Arias Sánchez, Pedro (2019): Automatic detection of moistures in different construction materials from thermographic images, in: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 138, Nr. 2, S. 1649–1668.
- 35 López, L. / Lagüela, Susana / Picon, I. / González-Aguilera, Diego (2015): Automatic Analysis and Classification of the Roof Surfaces for the Installation of Solar Panels using a Multi-Data Source and Multi-Sensor Aerial Platform, in: *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W4, S. 171–178.
- 36 Lagüela, Susana / Díaz-Vilariño, L. / Roca, D. / Armesto, J. (2014): Aerial oblique thermographic imagery for the generation of building 3D models to complement Geographic Information Systems. in: *12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.
- 37 Lerma, José Luis / Cabrelles, Miriam / Galcerá, S. / Navarro, S. / Akasheh, Talal / Haddad, N. (2009): Integration of 3D laser scanning, photogrammetry and thermography to record architectural monuments. in: *CIPA 2009 XXII International Symposium; Kyoto, Japan*. hrsg. vom Comité International de la Photogrammétrie Architecturale.
- 38 Lerma, José Luis / Akasheh, Talal / Haddad, N. / Cabrelles, Miriam (2011): Multispectral sensors in combination with recording tools for cultural heritage documentation, in: *Change over Time*, Vol. 1, Nr. 2, S. 236–250.
- Lerma, José Luis / Cabrelles, Miriam / Akasheh, Talal / Haddad, N. (2012): Documentation of weathered architectural heritage with visible, near infrared, thermal and laser scanning data, in: *International Journal of Heritage in the Digital Era*, Vol. 1, Nr. 2, S. 250–275.
- 39 Bison, Paolo / Bortolin, Alessandro / Cadelano, Gianluca / Ferrarini, Giovanni / Peron, Fabio / Romagnoni, Piercarlo / Stevan, Antonio (2019): Indoor monitoring of Scrovegni Chapel Crypt, in: *E3S Web of Conferences*, Vol. 111, Nr. 1, S. 2075.
- Grinzato, Ermanno / Cadelano, Gianluca / Bison, Paolo / Peron, Fabio / Maldague, Xavier P.V. (2010): High resolution and automatic survey of buildings by IR thermography. in: *10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.
- 40 Bison, Paolo / Bortolin, Alessandro / Cadelano, Gianluca / Ferrarini, Giovanni / Finesso, L. / Mouhoubi, Kamel / Bodnar, Jean Luc (2016): Thermographic survey of frescoes with different thermal stimuli: a PLS-based analysis. in: *13th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.

- 41 Bison, Paolo / Bortolin, Alessandro / Cadelano, Gianluca / Ferrarini, Giovanni / Furlan, K. / Grinzato, Ermanno (2012): Geometrical correction and photogrammetric approach in thermographic inspection of buildings. in: 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.
- 42 Bortolin, Alessandro / Cadelano, Gianluca / Ferrarini, Giovanni / Bison, Paolo (2014): IR Thermography and Geophysical Survey applied to the Retrofit of an Ancient Church. in: 9th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Ankara, 2014, June 2-4. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works.
- 43 Meola, Carosena / Boccardi, Simone / Carlomagno, Giovanni (2016): An Excursus on Infrared Thermography Imaging, in: *Journal of Imaging*, Vol. 2, Nr. 4, S. 36.
- 44 Meola, Carosena (2013): Infrared thermography in the architectural field. 2013(22)., in: *Scientific World Journal*, Vol. 2013, Nr. 22, S. 323948.
- 45 Meola, Carosena / Carlomagno, Giovanni M. (2001): Infrared thermography in the restoration of cultural properties. in: *SPIE International Society for Optics and Electronics*, S. 203–216.
- 46 Meola, Carosena (2012): *Infrared Thermography. Recent Advances and Future Trends*. Oak Park, Ill.: Bentham Science Publishers.
- 47 Paoloni, Stefano / Mercuri, Fulvio / Orazi, Noemi / Caruso, Giovanni / Zammit, Ugo (2020): Photothermal approach for cultural heritage research, in: *Journal of Applied Physics*, Vol. 128, Nr. 18, S. 180904.
- Mercuri, Fulvio / Orazi, Noemi / Zammit, Ugo / Paoloni, Stefano / Marinelli, Massimo / Valentini, Pier Paolo (2011): Thermographic Analysis of Cultural Heritage: Recent Applications and Perspectives. in: *MATCONS Matter and Materials in/for Cultural Heritage 2011*. hrsg. von Rosina, E., S. 84–89.
- 48 Orazi, Noemi / Mercuri, Fulvio / Zammit, Ugo / Paoloni, Stefano / Marinelli, Massimo / Giuffredi, Augusto / Salerno, Carlo Stefano (2016): Thermographic analysis of bronze sculptures, in: *Studies in Conservation*, Vol. 61, Nr. 4, S. 236–244.
- Orazi, Noemi / Mercuri, Fulvio / Zammit, Ugo / Cicero, Cristina / Colacicchi Alessandri, O. / Brinkmann, V. / Caruso, Giovanni / Ferretti, M. / Paoloni, Stefano (2019): The Boxer at Rest and the Hellenistic Prince: A comparative thermographic study, in: *Journal of Archaeological Science: Reports*, Vol. 24, S. 115–121.
- 49 Mercuri, Fulvio / Ceccarelli, Sofia / Orazi, Noemi / Cicero, Cristina / Paoloni, Stefano / Felici, A. C. / Matera, F. / Nuzzo, M. / Zammit, Ugo (2021): Combined Use Of Infrared Imaging Techniques For The Study Of Underlying Features In The Santa Maria In Cosmedin Altarpiece, in: *Archaeometry XXX*, Research Laboratory for Archaeology and the History of Art, University of Oxford.
- 50 Mercuri, Fulvio / Paoloni, Stefano / Zammit, Ugo / Orazi, Noemi / Marinelli, Massimo / Scudieri, Folco (2012): Applications of active IRT to the cultural heritage study. in: 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.
- Mercuri, Fulvio / Zammit, Ugo / Orazi, Noemi / Paoloni, Stefano / Marinelli, Massimo / Scudieri, Folco (2011): Active infrared thermography applied to the investigation of art and historic artefacts, in: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 104, Nr. 2, S. 475–485.
- 51 Rosina, Elisabetta / Grinzato, Ermanno (2001): Infrared and thermal testing for conservation of historic buildings, in: *Materials Evaluation*, Vol. 59, Nr. 8, S. 942–954.
- Rosina, Elisabetta / Robinson, Elwin (2002): Applying Infrared Thermography to Historic Wood-Framed Buildings in North America, in: *APT Bulletin*, Vol. 33, Nr. 4, S. 37–44.
- 52 Rosina, Elisabetta / Della Torre, Stefano / Gasparoli, P. / Lazzaroni, L. / Di Bella, L. / Castiglioni, A. / Radaelli, M. / Sotgia, C. (2009): Localizing historical clues using IRT and petrographic analyses at Villa Mirabello, Monza, in: *Archaeometry*, Vol. 51, Nr. 5, S. 715–732..
- Rosina, Elisabetta / Grinzato, Ermanno / Robinson, Elwin (2002): Mapping hidden wall structures by quantitative IR thermography. in: *SPIE International Society for Optics and Electronics*, S. 253–264.
- 53 Fregonese, Luigi / Rosina, Elisabetta / Adami, Andrea / Bottacchi, Marta Caterina / Romoli, Elena / Lattanzi, Daniela (2018): Monitoring as strategy for planned conservation: the case of Sant'Andrea in Mantova (Mantua), in: *Applied Geomatics*, Vol. 10, Nr. 4, S. 441–451.
- 54 Alba, Mario Ivan / Barazzetti, Luigi / Scaioni, Marco / Rosina, Elisabetta / Previtali, Mattia (2011): Mapping Infrared Data on Terrestrial Laser Scanning 3D Models of Buildings, in: *Remote Sensing*, Vol. 3, Nr. 12, S. 1847–1870.
- Scaioni, Marco / Rosina, Elisabetta / Barazzetti, Luigi / Previtali, Mattia / Redaelli, Veronica (2012): High-resolution texturing of building facades with thermal images. in: *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIV*. hrsg. von Burleigh, D. / Stockton, G. R., 83540I.
- Scaioni, Marco / Rosina, Elisabetta / L'Erario, A. / Díaz-Vilariño, L. (2017): Integration of Infrared Thermography and Photo-

- grammetric Surveying of Built Landscape, in: ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-5/W1, S. 153–160.
- 55 Gargano, Marco / Rosina, Elisabetta / Monticelli, Carol / Zanelli, Alessandra / Ludwig, Nicola (2017): Characterization of aged textile for archeological shelters through thermal, optical and mechanical tests, in: *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 26, S. 36–43.
- Rosina, Elisabetta (Hrsg.) (2011): *MATCONS Matter and Materials in/for Cultural Heritage 2011*.
- 56 Ludwig, Nicola / Rosina, Elisabetta / Sansonetti, Antonio (2018): Evaluation and monitoring of water diffusion into stone porous materials by means of innovative IR thermography techniques, in: *Measurement Science and Technology*, Vol. 118, S. 348–353.
- Rosina, Elisabetta (2018): When and how reducing moisture content for the conservation of historic building. A problem solving view or monitoring approach? in: *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 31, S82-S88.
- 57 Kavuru, Manogna / Rosina, Elisabetta (2020): Developing Guidelines for the Use of Passive Thermography on Cultural Heritage in Tropical Climates, in: *Applied Sciences*, Vol. 10, Nr. 23, S. 8411.
- 58 Arndt, Ralf / Hillemeier, Bernd / Maierhofer, Christiane / Rieck, Carsten / Röllig, Mathias / Scheel, Horst / Walther, Andrei (2004): Zerstörungsfreie Ortung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen mit der Impuls-Thermografie, in: *Bautechnik*, Vol. 81, Nr. 10, S. 786–793.
- Maierhofer, Christiane / Röllig, Mathias / Steinfurth, Henrik / Augustin, Sven / Mecke, Rüdiger / Schiller, Michael / Kernchen, Alexa / Kalisch, Uwe / Meinhardt, Jeannine / Hennen, Christiane / Groll, Ernst Thomas / Arnold, Torsten: Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren. ERBE. Abschlussbericht, Stuttgart.
- Schlichting, Joachim / Kervalishvili, Guram N. / Maierhofer, Christiane / Kreutzbruck, Marc (2011): Defect Sizing by Local Excitation Thermography, in: *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol. 8, Nr. 1, 51-63.
- Maierhofer, Christiane / Schlichting, Joachim / Ziegler, Mathias / Dey, A. / Kreutzbruck, Marc (2011): Efficient data evaluation for thermographic crack detection, in: *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol. 8, Nr. 1, S. 119–123.
- 59 Köpp, Christian / Maierhofer, Christiane / Wendrich, Astrid (2005): Entwicklung zerstörungsfreier und zerstörungssarmer Prüfverfahren zur Untersuchung historischen Mauerwerks, in: *Mauerwerk*, Vol. 9, Nr. 3, S. 102–107.
- Maierhofer, Christiane / Röllig, Mathias (2009): Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures. in: *NDTCE'09 - Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, France. hrsg. von NDTCE Non-Destructive Testing in Civil Engineering.
- 60 Maierhofer, Christiane / Krankenhagen, Rainer (2014): Pulse phase thermography for characterising large historical building façades after solar heating and shadow cast—a case study, in: *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol. 11, Nr. 1, S. 10–28.
- Maierhofer, Christiane / Röllig, Mathias / Steinfurth, Henrik / Augustin, Sven / Mecke, Rüdiger / Schiller, Michael / Kernchen, Alexa / Kalisch, Uwe / Meinhardt, Jeannine / Hennen, Christiane / Groll, Ernst Thomas / Thomas, Ernst / Arnold, Torsten (2016): Characterisation of Historic Façades using Active Thermography with Solar Heating and Optical Methods. in: *19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016*.
- 61 Krankenhagen, Rainer / Groll, Ernst Thomas / Kalisch, Uwe / Maierhofer, Christiane / Mecke, Rüdiger / Meinhardt, Jeannine / Myrach, Philipp / Schiller, Michael / Seidl, Thomas (2013): Untersuchung der Putzritzungen am Magdeburger Dom. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung. DGZfP e.V. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 2013.
- 62 Krüger, Markus / Maierhofer, Christiane / Leissner, Johanna / Bellendorf, Paul / Meinhardt, Jeannine / Antretter, Florian (2012): Methoden der Dauerüberwachung von Gebäuden des kulturellen Erbes im Rahmen der Denkmalkonservierung. in: *Bauphysik Kalender 2012. Schwerpunkt: Gebäude-diagnostik*. hrsg. von Fouad, N. A., Berlin, S. 559–602.
- Maierhofer, Christiane / Krankenhagen, Rainer / Röllig, Mathias / Mecke, Rüdiger / Schiller, Michael / Seidl, Thomas / Kalisch, Uwe / Hennen, Christiane / Meinhardt, Jeannine (2010): Monitoring – Zuverlässige Quantifizierung und Bewertung von Schädigungsprozessen an Bauteiloberflächen und -grenzflächen mit Hilfe optischer und thermografischer zerstörungsfreier Prüfverfahren, Stuttgart. Fraunhofer IRB Verlag, Forschungsinitiative ZukunftBau, F 2757.
- 63 Maierhofer, Christiane / Krankenhagen, Rainer / Röllig, Mathias / Mecke, Rüdiger / Schiller, Michael / Kalisch, Uwe / Meinhardt, Jeannine / Hennen, Christiane (2010): Kombination der aktiven Thermografie mit laserbasierten Verfahren zur Erfassung von 3D-Geometrien in der Denkmalpflege. Fachtagung Bauwerksdiagnose. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. DGZfP e.V. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung.
- Maierhofer, Christiane / Krankenhagen, Rainer / Myrach, Philipp / Röllig, Mathias / Mecke, Rüdiger / Schiller, Michael /

- Seidl, Thomas / Kalisch, Uwe / Hennen, Christiane / Meinhardt, Jeannine / Kersten, Henning / Groll, Ernst Thomas (2014): Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen. Abschlussbericht, Stuttgart. Fraunhofer IRB Verlag, Forschungsinitiative ZukunftBau, F 2873.
- 64 Hoegner, Ludwig / Abmayr, T. / Tosic, D. / Turzer, S. / Stilla, Uwe (2018): Fusion of TLS and RGB point clouds with TIR images for indoor mobile mapping. in: 14th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, S. 341–349.
- Zhu, Jingwei / Xu, Yusheng / Ye, Zhen / Hoegner, Ludwig / Stilla, Uwe (2021): Fusion of urban 3D point clouds with thermal attributes using MLS data and TIR image sequences, in: *Infrared Physics & Technology*, Vol. 113, S. 103622.
- 65 Hoegner, Ludwig / Iwaszczuk, Dorota / Stilla, Uwe (2012): Quality Assessment of Mapping Building Textures from Infrared Image Sequences, in: *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B3, S. 391–396.
- Hoegner, Ludwig / Kumke, H. / Meng, L. / Stilla, Uwe (2007): Strategies for Texturing Building Models with Low Resolution Infrared Image Sequences. The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology.
- 66 Hoegner, Ludwig / Stilla, Uwe (2016): Automatic 3D reconstruction and texture extraction for 3D building models from thermal infrared image sequences. in: 13th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, S. 322–331.
- Weinmann, Martin / Leitloff, Jens / Hoegner, Ludwig / Jutzi, Boris / Stilla, Uwe / Hinz, Stefan (2014): Thermal 3D mapping for object detection in dynamic scenes, in: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-1, S. 53–60.
- 67 Kolecki, J. / Iwaszczuk, Dorota / Stilla, Uwe (2010): Calibration of an IR-Camera System for Automatic Texturing of 3D Building Models by direct Geo-Referenced Images. Proceedings of Eurocow 2010.
- 68 Borrmann, Dorit (2017): Multi-modal 3D mapping. Combining 3D point clouds with thermal and color information. Dissertation. Universität Würzburg, Faculty of Mathematics/Computer Science.
- Borrmann, Dorit / Elseberg, Jan / Nüchter, Andreas (2013): Thermal 3D Mapping of Building Façades. in: *Intelligent Autonomous Systems 12*. hrsg. von Lee, S. / Cho, H. / Yoon, K.-J. / Lee, J., Berlin, Heidelberg, S. 173–182.
- Demisse, Girum G. / Borrmann, Dorit / Nüchter, Andreas (2015): Interpreting Thermal 3D Models of Indoor Environments for Energy Efficiency, in: *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 77, Nr. 1, S. 55–72.
- 69 Borrmann, Dorit / Afzal, Hassan / Elseberg, Jan / Nüchter, Andreas (2012): Mutual Calibration for 3D Thermal Mapping, in: *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 45, Nr. 22, S. 605–610.
- 70 Borrmann, Dorit / Nüchter, Andreas / Đakulović, Marija / Maurović, Ivan / Petrović, Ivan / Osmanović, Dinko / Velagić, Jasmin (2014): A mobile robot based system for fully automated thermal 3D mapping, in: *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 28, Nr. 4, S. 425–440.
- Borrmann, Dorit / Heß, R. / Houshiar, H. R. / Eck, D. / Schilling, Klaus / Nüchter, Andreas (2015): Robotic Mapping of Cultural Heritage Sites, in: *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W4, S. 9–16.
- 71 Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA) (Januar 2018): Bauthermografie im Bestand. Infrared thermography for buildings. WTA-Merkblatt E-6-18: Ausgabe 01.2018/D.
- 72 Alle aufgelisteten Normen und Merkblätter wurden über den Beuth Verlag eingesehen: <https://www.beuth.de/de/regelwerke/normen-bei-beuth> (zuletzt aufgerufen am 08.02.2021)
- 73 Früher: DIN 54190-1 Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen
- 74 Früher: DIN 54190-2 Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 2: Geräte
- 75 Früher: DIN 54190-3 Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 3: Begriffe
- 76 Die ISO 9712 ersetzt seit 2012 die DIN EN 473:2008-09 Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung – Allgemeine Grundlagen
- 77 Norm-Entwurf, Stand Februar 2021
- 78 Norm-Entwurf, Stand Februar 2021
- 79 VATH (Juni 2016): VATH-Richtlinie: Bauthermografie. Zur Planung, Durchführung und Dokumentation infrarotthermografischer Messungen an Bauwerken oder Bauteilen von Gebäuden. Elektronisch veröffentlicht unter der URL: http://www.vath.de/images/M_images/VATH-Richtlinie_Bauthermografie_Stand_21.06.2016.pdf, 12.01.2017.

3. Grundlagen der Infrarotthermographie

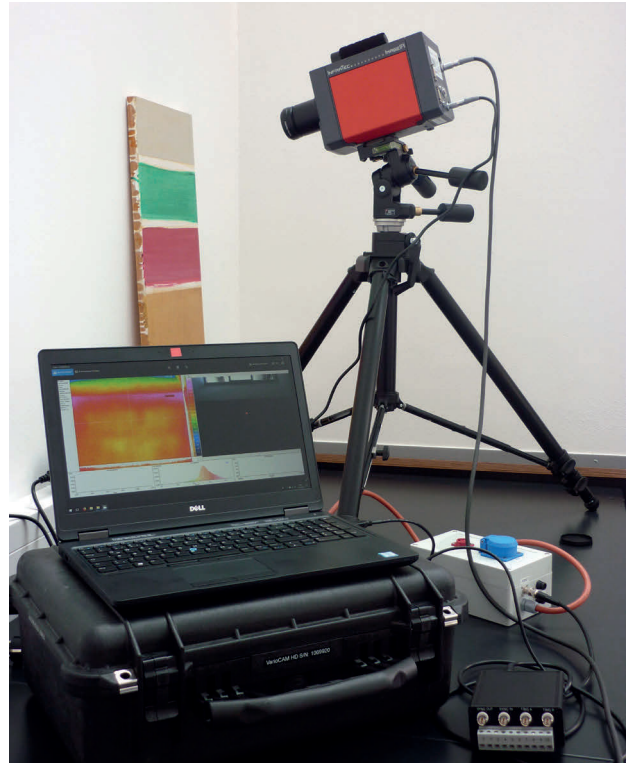
Thermographiekameras dokumentieren berührungslos die Oberflächentemperaturen von Objekten, indem sie Intensität und Verteilung der objektspezifischen elektromagnetischen Strahlung im Infrarotbereich darstellen. Die kamerainternen Infrarotsensoren messen orts aufgelöst den infraroten Teil der Wärmestrahlung, den jedes Objekt oberhalb des absoluten Nullpunktes von $-273,15^{\circ}\text{C}$ aussendet. Die Intensität der Infrarotstrahlung an jedem Messpunkt kann als Messgröße für die Oberflächentemperatur an diesem Punkt ausgelesen und einer Farbkodierung zugeordnet werden. Die Summe aller Messpunkte ergibt ein sogenanntes Thermogramm, eine Abbildung radiometrischer Werte in Falschfarbendarstellung. Infrarotthermographische Abbildungen sind demnach Moment-

aufnahmen der Oberflächentemperaturverhältnisse von Untersuchungsobjekten.

Im Folgenden wird eine Einordnung der Thermographiesysteme in den Bereich der Messtechnik und Sensorik vorgenommen. Zur Einführung in die physikalischen und gerätetechnischen Grundlagen der Thermographie werden die wichtigsten strahlungsphysikalischen Zusammenhänge überblicksartig erläutert sowie der Aufbau einer Thermographiekamera und die Funktionen der einzelnen Komponenten schematisch dargestellt. Zuletzt werden die spezifischen Anforderungen der Bauforschungsthermographie an die Gerätetechnik und Software diskutiert und zusammenfassend in einer Auflistung der gängigen Kameraparameter abgebildet.

3. Grundlagen der Infrarotthermographie

- 3.1 Einordnung der Infrarotthermographie in die Messtechnik und Sensorik
- 3.2 Das elektromagnetische Spektrum
- 3.3 Grundlegende strahlungsphysikalische Zusammenhänge
- 3.4 Aufbau einer Thermographiekamera
- 3.5 Anforderungen an die Technik



1 Infrarot-Thermographiekamera (LWIR) und Kamerasystem (MWIR) mit Software und Triggermodul für aktive Thermographie.

3.1 Einordnung der Infrarotthermographie in die Messtechnik und Sensorik

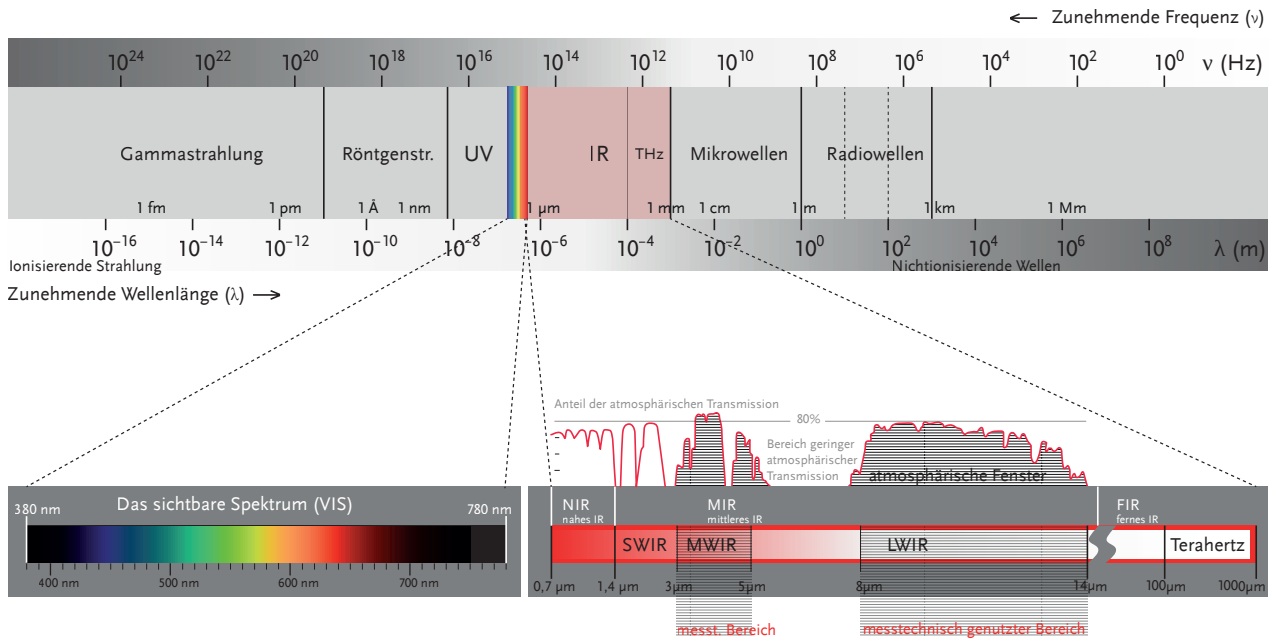
Die Infrarotdetektoren der Thermographiekameras gehören zu den berührungslos messenden Sensoren, zugehörige Messgröße ist die elektromagnetische Strahlung. Der Infrarotdetektor ist damit der Sensor, der auf Strahlung anspricht, die Thermographiekamera als System aus Optik, Filter, Detektor, Verstärker, Prozessor und Display ist das Messinstrument.

Die Bauforschung macht sich eine Vielzahl von sensorbasierten Messprinzipien zunutze. In der Bauwerksvermessung kommen vor allem Laser zur Erfassung von Distanzen und Winkeln zur Anwendung. Sie bilden die zentralen Bestandteile vieler Vermessungsinstrumente wie Tachymeter oder Laserscanner. Neben den Sensoren für geometrische Größen werden zusehends auch Analysemethoden auf Grundlage von physikalischen Messprinzipien zur Befunduntersuchung aus dem Bauwesen adaptiert und in der Kulturgutforschung eingesetzt. Dazu gehören unter anderem verschiedene Möglichkeiten der Ultraschalldiagnostik (u.a. Ultraschalllaufzeit-Verfahren, Ultraschallecho-Verfahren), Schallemissionsanalysen oder Radarverfahren. Gleiches gilt für die in den Restaurierungswissenschaften genutzte strahlenbasierte Analytik auf der Basis von ultravioletter Strahlung (UV-

Fluoreszenz, UV-Photographie), infraroter Strahlung (IR-Fluoreszenz, IR-Reflektographie, IR-Thermographie) sowie Röntgen- und Gammastrahlenbasierten Ansätzen oder computertomographischen Verfahren.¹ Die Infrarotthermographie hat sich dabei als besonders hilfreich für Fragestellungen der Bauforschung erwiesen. Viele material- oder konstruktionsbedingte Baubefunde lassen sich im infraroten Wellenlängenspektrum abbilden. In einigen Fällen kann die Darstellung der objektspezifischen elektromagnetischen Strahlung zusätzliche, im visuellen Bereich nicht sichtbare Informationen liefern.

Temperatureinheiten

Celsius [°C]	Kelvin [°K]	Fahrenheit [°F]
-273,15°C	0 K (absoluter Nullpunkt)	-459,67°F
0°C	+273,15°K	+32°F
+ 100°C	+373,15°K	+212°F



2 Das elektromagnetische Spektrum mit Fokus auf den infraroten Wellenlängenbereich und den für Thermographie genutzten Abschnitten MWIR und LWIR.

3.2 Das elektromagnetische Spektrum

Die für Kulturgutforschung am häufigsten genutzten Arten der Strahlenuntersuchung liegen im UV-, VIS- und IR-Bereich des elektromagnetischen Spektrums:

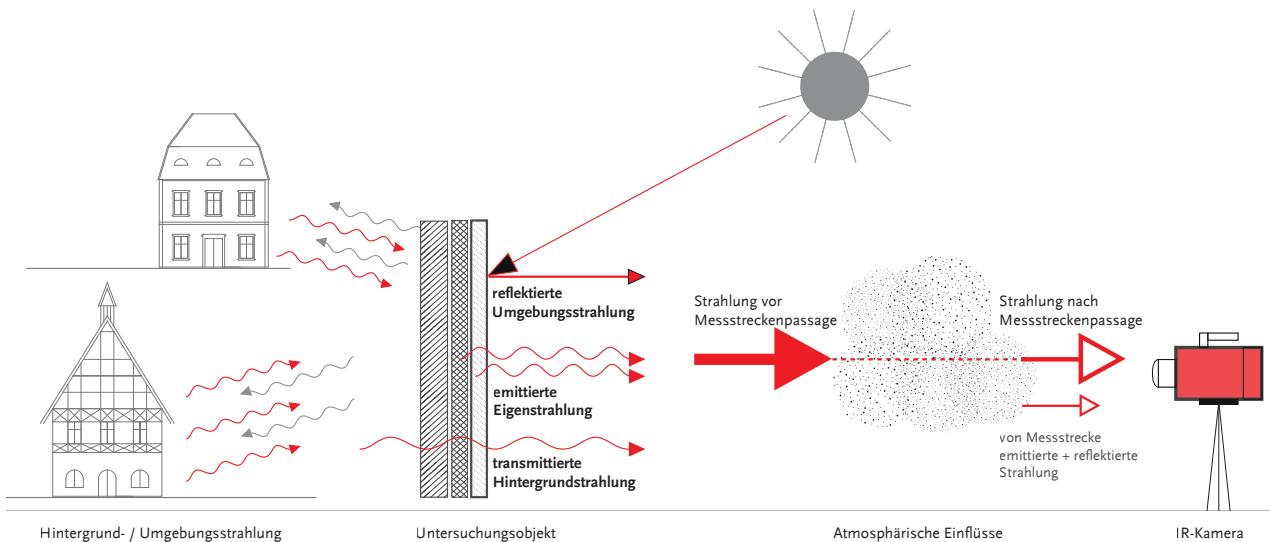
- UV: Ultraviolette Strahlung, Wellenlänge 0,1-0,38 μm, für das menschliche Auge nicht sichtbar
- VIS: Sichtbare Strahlung, Wellenlänge 0,38-0,78 μm, für das menschliche Auge sichtbar
- IR: Infrarote Strahlung, Wellenlänge 0,78-1000 μm, für das menschliche Auge nicht sichtbar

Das elektromagnetische Spektrum bildet die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen ab. Geordnet nach zunehmender Wellenlänge bzw. abnehmender Frequenz umfasst es unter anderem Gammastrahlung, Röntgenstrahlung, ultraviolette Strahlung (UV), den für Menschen sichtbaren Teil des Spektrums (VIS), infrarote Strahlung (IR), Terrahertzstrahlung, Mikrowellen und Radiowellen. Der als Infrarot bezeichnete Anteil des Spektrums reicht von 780 nm bis 1 mm und liegt zwischen den Spektralbereichen des kurzwelligeren sichtbaren Lichtes (380 – 780 nm) und der längerwelligen Terrahertzstrahlung. Für die Eingrenzung des infraroten Spektralbereichs gibt es unterschied-

liche Festlegungen, beispielsweise die Einteilung in drei Bänder, also spektrale Teilbereiche, IR-A, IR-B und IR-C nach DIN 5031² und die Einteilung in nahes, mittleres und fernes Infrarot, NIR, MIR und FIR nach ISO 20473³. Da die meisten Kamerahersteller jedoch die angloamerikanische Einteilung nutzen, wird hier auch auf diese zugegriffen. Infrarotstrahlung wird gemeinhin auch Wärmestrahlung genannt, da sie für Menschen zwar nicht sichtbar ist, aber über die Wärmesensoren der Haut wahrgenommen werden kann.

Einteilung der Infrarotstrahlung

- nahes Infrarot (near infrared, NIR)
700 bis 1400 nm
- kurzwelliges Infrarot (short wavelength, SWIR)
1,4 bis 3,0 μm
- mittleres Infrarot (mid wavelength, MWIR)
3 bis 8 μm
> auch Zwischen-IR (intermediate-IR, IIR)
- langwelliges Infrarot (long-wavelength, LWIR)
8 bis 15 μm
> gehört mit MWIR zusammen zum Bereich des thermischen Infrarot (engl. Thermal IR, TIR)
- fernes Infrarot (far infrared, FIR)
15 bis 1000 μm (1 mm)



3 Einfluss der Umgebungsstrahlung und der atmosphärischen Transmission auf das Untersuchungsobjekt und die Messung.

Der Begriff *Wärmestrahlung* ist im Zusammenhang mit thermographischen Untersuchungen zu wenig präzise, stattdessen sollte immer der entsprechende Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums mit angegeben werden.

Eine weitere häufige genutzte Eingrenzung des infraroten Spektralbereichs ist die des thermischen IR in Abgrenzung zum kurzwelligen IR. Für den Abschnitt des thermischen Infrarots TIR innerhalb des infraroten Spektralbereichs gibt es keine einheitliche Definition, die Angaben schwanken zwischen $3-15 \mu\text{m}^4$, $3-20 \mu\text{m}$ oder $3-1000 \mu\text{m}^5$. Die für Gebäudeuntersuchungen genutzten Thermographieverfahren finden alle im Bereich des thermischen Infrarot statt. Die speziellen IR-Detektoren in Thermographiekameras sind auf die Wellenlängenbereiche der MWIR- oder LWIR-Anteile hin optimiert und können die Intensität und Verteilung elektromagnetischer Strahlung in diesen spektralen Banden⁶ dokumentieren. In den Restaurierungswissenschaften und der Kunstdiagnostik kommt noch das Verfahren der IR-Reflektographie zum Einsatz, bei dem vor allem reflektierte Strahlung im NIR- und SWIR-Anteil des elektromagnetischen Wellenlängenbereichs detektiert wird.

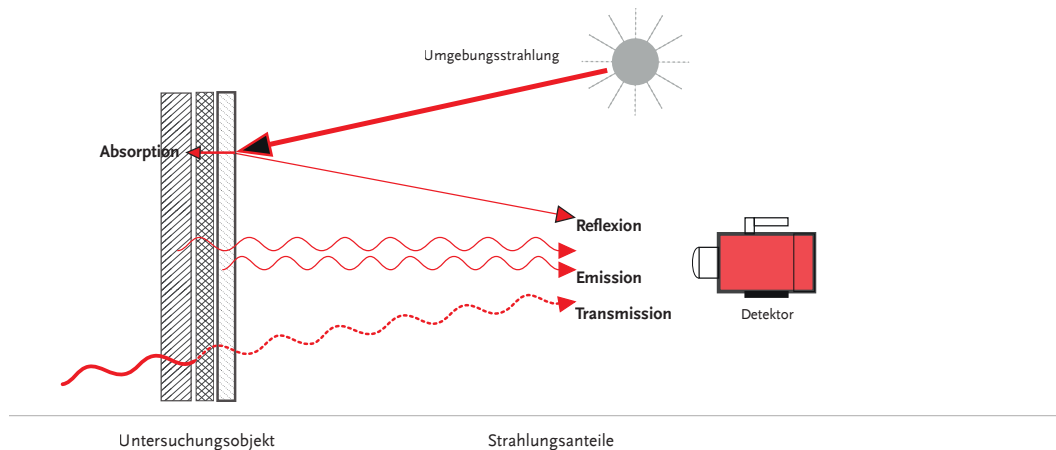
3.3 Grundlegende strahlungsphysikalische Zusammenhänge

Objekte mit einer Temperatur über der des absoluten Nullpunktes von $-273,15^\circ\text{C}$ emittieren elektromagnetische Strahlung. Die Intensität und Verteilung dieser Strahlung über das elektromagnetische Spektrum sind abhängig von der Objekttemperatur. Je höher die jewei-

lige Objekttemperatur, desto weiter verschiebt sich das Maximum der vom Objekt emittierten Strahlung in Richtung der kürzeren Wellenlängen, also auch Richtung sichtbare Strahlung.⁷ Aus diesem Grund können Menschen beispielsweise die Strahlung von erhitztem Metall ab einer gewissen Temperatur als Glühen sehen und auch eine Farbveränderung mit zunehmender Temperatur feststellen – lange erst nachdem wir die vom Metall ausgehende Wärmestrahlung auf der Haut wahrgenommen haben.

Das Strahlungsmaximum der Sonne (beziehungsweise die Wärmeabstrahlung der Sonnenoberfläche als ein Teil des elektromagnetischen Spektrums von Solarstrahlung) mit ihrer Oberflächentemperatur von ca. 5500°C liegt bei $0,5 \mu\text{m}$, also mitten im Spektralbereich der sichtbaren Strahlung (VIS). Die Oberflächentemperaturen historischer Gebäude und Kulturgutobjekte liegen in der Regel zwischen -20°C und 50°C , Dächer im Sommer auch deutlich höher. Für diese Temperaturen liegt das Ausstrahlungsmaximum der meisten Baumaterialien im längerwelligen Bereich bei $8 \mu\text{m}$ bis $12 \mu\text{m}$.⁸

Neben der Eigenstrahlung der Objekte (Emission) werden thermographische Messungen auch von der Umgebungsstrahlung beeinflusst. Hierbei wird zwischen den Anteilen der Reflexion, Transmission und Absorption elektromagnetischer Strahlung unterschieden. Alle diese Strahlungsanteile sind abhängig vom Wellenlängenbereich der einfallenden Strahlung und dem Winkel zur Flächennormalen, von der Materialzusammensetzung der Untersuchungsobjekte, ihrer Oberflächenbeschaffenheit und ihrer Temperatur.⁹



4 Einstrahlungs- und Ausstrahlungsanteile aus Reflexion, Emission und Transmission.

Der **Emissionsgrad** (auch Emissionskoeffizient) beschreibt den Anteil der von einem Objekt ausgesandten (emittierten) Infrarotstrahlung.

Der **Reflexionsgrad** (auch Reflexionskoeffizient) beschreibt die Fähigkeit eines Objektes, Infrarotstrahlung aus der Umgebung zu reflektieren.

Der **Transmissionsgrad** (auch Transmissionskoeffizient) beschreibt die Durchlässigkeit eines Objektes für Infrarotstrahlung aus der Umgebung. Er ist zusätzlich abhängig von den Schichtstärken der Baumaterialien.¹⁰

Der **Absorptionsgrad** (auch Absorptionskoeffizient) beschreibt, welcher Anteil der auftreffenden Strahlung vom Objekt absorbiert wird.

Zwischen Absorption und Emission eines realen Körpers besteht ein Zusammenhang: Im thermischen Gleichgewicht entspricht der Anteil der absorbierten IR-Strahlung dem Anteil der vom selben Körper emittierten IR-Strahlung.¹¹ Demnach ist ein Körper, der viel absorbiert immer auch ein guter Strahler. Die Größen der Absorptions- beziehungsweise Emissionsgrade,

Reflexionsgrade und Transmissionsgrade werden jeweils in Werten zwischen 0 und 1 angegeben, ihre Summe ist 1.

Für thermographische Untersuchungen sind sowohl die Einstrahlungsanteile auf das Untersuchungsobjekt als auch seine Ausstrahlungsanteile zu beachten: Die auf ein Objekt auftreffende Strahlung wird in objektbeziehungswise materialspezifischen Anteilen reflektiert, absorbiert und transmittiert.

Für ein Objekt im thermischen Gleichgewicht gilt: Die vom Objekt absorbierte, reflektierte und transmittierte elektromagnetische Strahlung ist in der Summe gleich der auf dieses Objekt auftreffenden Strahlung. Ein Objekt befindet sich im thermischen Gleichgewicht, wenn es genauso viel thermische Energie aufnimmt wie es abgibt. Die wiederum von einem Objekt ausgehende Strahlung setzt sich aus materialspezifischen Anteilen von emittierter Eigenstrahlung, reflektierter Umgebungsstrahlung und transmittierter Hintergrundstrahlung zusammen (Abb. 4). Die jeweiligen Strahlungsanteile unterscheiden sich je nach Material und Oberflächenbeschaffenheit.

Einstrahlungsbilanz:

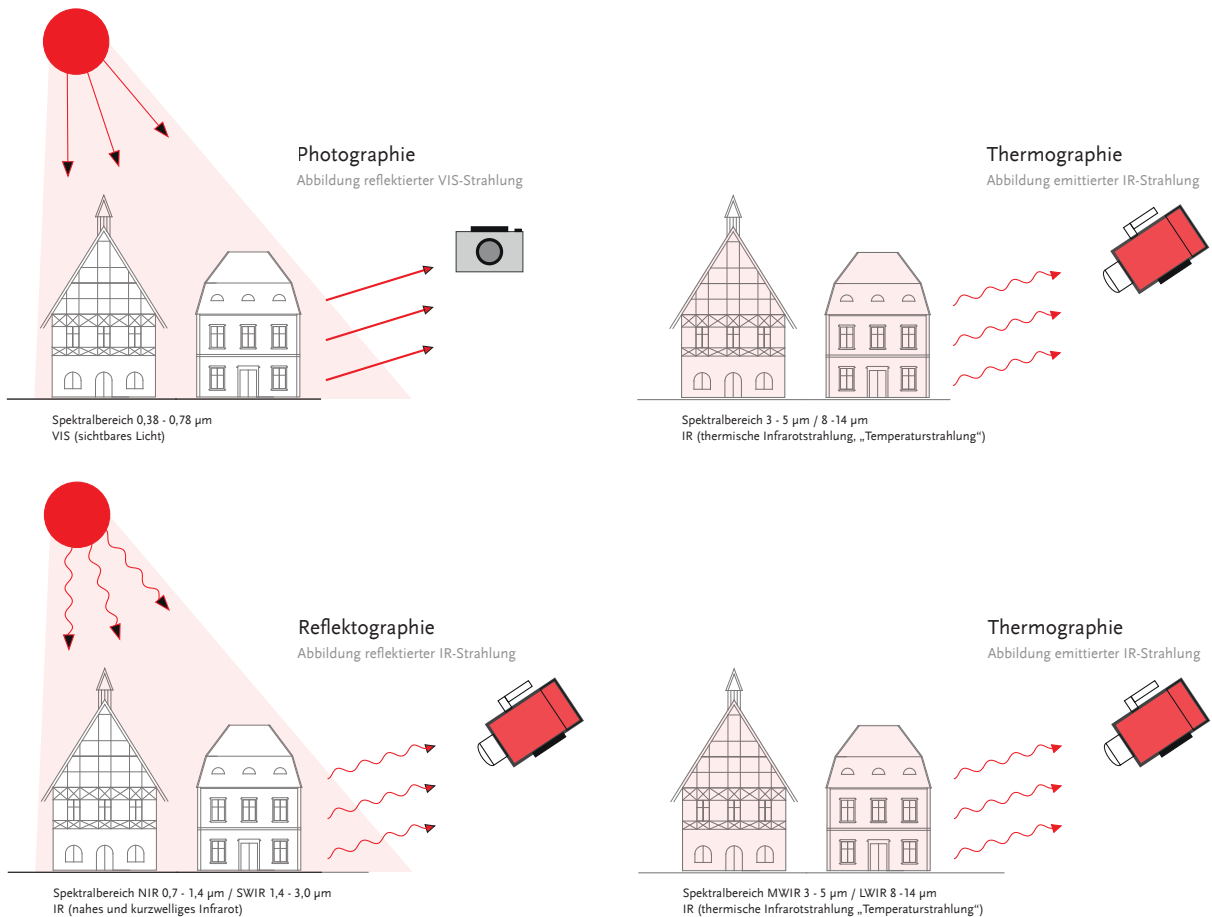
$$S_{\text{ein}} = A+R+T$$

(S_{ein} = einfallende Strahlung,
 A = absorbierte Strahlung,
 R = reflektierte Strahlung,
 T = transmittierte Strahlung)

Ausstrahlungsbilanz:

$$S_{\text{aus}} = E+R+T$$

(S_{aus} = ausgehende Strahlung,
 E = emittierte Strahlung,
 R = reflektierte Strahlung,
 T = transmittierte Strahlung)



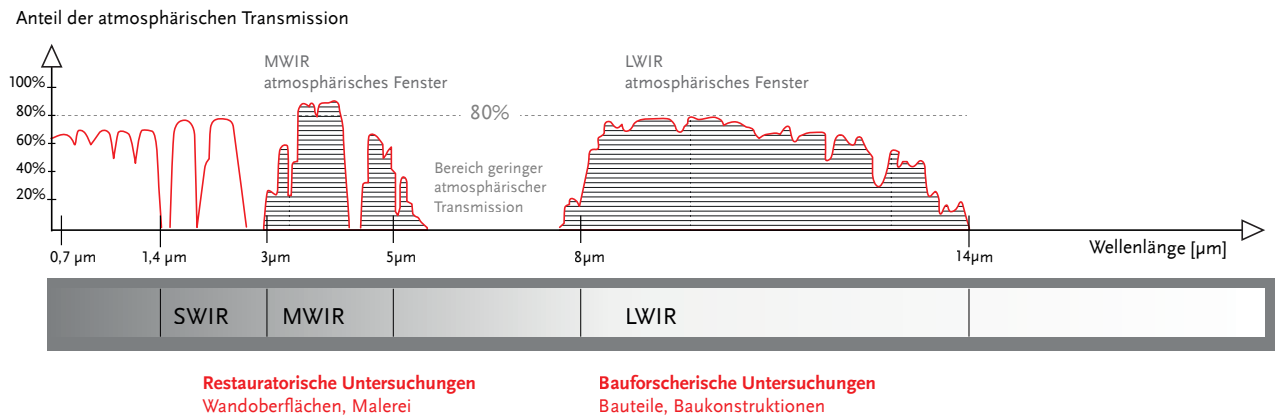
5 Vergleich der relevanten Strahlungsanteile für Photographie, Thermographie und Reflektographie.

Um radiometrisch korrekte Messergebnisse zu ermitteln, müssen die jeweiligen Strahlungsanteile bekannt sein. Für die meisten Baumaterialien gelten jedoch einige näherungsweise Vereinfachungen, vor allem für die historischen Materialien, die weniger weiterverarbeitet und optimiert wurden als viele der modernen Verbundbaustoffe.

Historische Baumaterialien sind in der Regel undurchlässig für IR-Strahlung, zur Vereinfachung kann der Transmissionsgrad vernachlässigt werden.¹² Die meisten dieser Baumaterialien weisen hohe Absorptions- und Emissionsgrade und ein entsprechend geringes Reflexionsvermögen auf. Sie sind also gute thermische Strahler. Viele der historisch verbauten Materialien weisen ein vergleichbares Emissionsverhalten auf und zeigen bei ihren Emissionsgraden Werte um 0,9.¹³ Dies gilt nicht für Metallbauteile und Glas sowie nur eingeschränkt für besonders glatt polierte Steinoberflächen.¹⁴ Die einzelnen Werte können den von Kameraherstellern oder Materialprüfanstalten herausgegebenen Emissionswerttabellen ent-

nommen werden. Sollen mit der thermographischen Untersuchung korrekte Temperaturwerte ermittelt werden, müssen die individuellen Emissionskoeffizienten zur Korrektur der Messwerte genutzt werden. Geht es aber, wie in der Bauforschungsthermographie üblicherweise um die relative Darstellung der Temperaturverteilung und rein qualitative Untersuchungen, kann eine Korrektur der ohnehin ähnlichen Emissionsgrade vernachlässigt werden.

Aufgrund ihres geringen Reflexionsvermögens ist der Einfluss reflektierter Umgebungsstrahlung anderer Bauteile oder Gebäude¹⁵ auf das thermische Verhalten historischer Baustoffe vergleichsweise gering. Die Korrektur der Umgebungsstrahlung kann daher für rein qualitative Untersuchungen vernachlässigt werden. Eine Ausnahme bilden Bauteile mit sehr glatten Oberflächen. Sie reflektieren Umgebungsstrahlung stärker als raue Oberflächen und können zu unerwünschten Spiegelungseffekten im Thermogramm führen (Vgl. Kapitel 5.3). Auch der Einfallswinkel der Strahlung auf das Objekt und der Aufnahmewinkel der Thermogra-



6 Atmosphärische Fenster als Wellenlängenintervalle mit überwiegend konstanten, hohen Transmissionsgraden.

phiekamera beeinflussen das Reflexionsverhalten. In einem flachen Winkel wird die Strahlung stärker an der Objektoberfläche reflektiert, zum rechten Winkel hin nimmt die Reflexion ab.

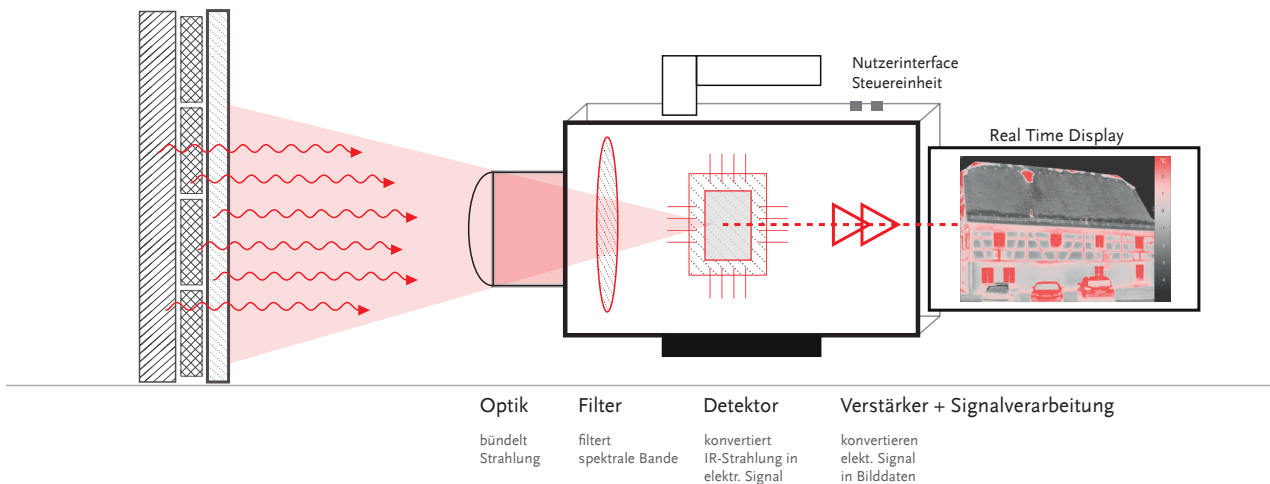
Eine weitere Einflussgröße vor allem für thermographische Untersuchungen im Außenbereich sind die atmosphärischen Transmissionsverluste. Die von den Untersuchungsobjekten ausgehende Gesamtstrahlung aus Eigenstrahlung, reflektierter und transmittierter Strahlung wird in ihrer Ausbreitung durch die Atmosphäre abgeschwächt, indem sie an Schwebstoffen gestreut oder durch Kohlenstoffdioxid CO_2 oder Wasserdampf H_2O absorbiert wird (Abb. 3). Dabei werden unterschiedliche Wellenlängen unterschiedlich stark absorbiert. Das Transmissionsverhalten der Übertragungsstrecke in der Atmosphäre ist abhängig von den elektromagnetischen Wellenlängen. Wellenlängenintervalle mit hohen Transmissionsgraden wechseln sich mit solchen geringer Transmission ab.¹⁶ Grundsätzlich ist der Transmissionsgrad auch abhängig von der Messdistanz. Je weiter Untersuchungsobjekt und Sensor voneinander entfernt sind, desto höher die Dämpfungseffekte durch atmosphärische Absorption und Streuung. Für die sehr kurzen Messentfernungen im Gebäudebereich (< 50m) können diese jedoch vernachlässigt werden, sofern nicht durch Nebel, Regen, Dunst oder Verunreinigungen in der Luft zusätzliche Streuungen die Thermographieaufnahmen beeinträchtigen.¹⁷ Wellenlängenintervalle mit überwiegend konstanten, hohen Transmissionsgraden werden als atmosphärische Fenster bezeichnet (Abb. 6). Sie markieren spektrale Bänder, in denen von Untersuchungsobjekten ausgesandten elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre nur wenig gestreut oder absorbiert werden und eignen sich daher gut für Messungen mit Infrarotsensoren. Die für Materialien im Kulturgutbe-

reich relevanten atmosphärischen Fenster liegen bei 3 µm bis 5 µm und 8 µm bis 14 µm. Entsprechend sind die Detektoren der meisten Thermographiekameras entweder auf den MWIR oder den LWIR-Bereich des elektromagnetischen Spektrums ausgelegt.

Im Zusammenhang mit dem Absorptions- und Emissionsverhalten ebenfalls wichtig für die thermographische Untersuchung historischer Gebäude, Konstruktionen und Materialien ist die Einschätzung der verschiedenen Wärmetransportvorgänge innerhalb eines Bauteils und über Bauteilgrenzen hinweg. Es werden drei Arten von Wärmeübertragung als Transport von Energie über thermodynamische Systemgrenzen hinweg unterschieden:

- **Konduktion:** Wärmeleitung infolge eines Temperaturunterschiedes, innerhalb eines Bauteils oder zwischen benachbarten Bauteilen durch mechanische Berührung der Bauteile.
- **Konvektion:** Wärmeströmung in umgebende Fluide (Flüssigkeiten oder Gase), durch strömungsgebundenen Transport thermischer Energie
- **Radiation:** Wärmestrahlung in Form elektromagnetischer Wellen (kein Medium nötig, funktioniert auch im Vakuum).

Grundsätzlich ist Wärmeübertragung temperatur- und zeitabhängig, also instationär. Diese Wärmeübertragungsprozesse laufen in Baumaterialien aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit vergleichsweise langsam ab. Die meisten Baustoffe verhalten sich thermisch träge, weisen eine hohe spezifische Wärmekapazität¹⁸ auf. Zur Vereinfachung wird bei thermographischen Untersuchungen daher von näherungsweise stationären Verhältnissen ausgegangen. Die Bauthermographie dokumentiert also Momentaufnahmen quasistationärer Zustände.¹⁹



7 Schematischer Aufbau und grundlegende Funktionen einer Thermographiekamera mit Optik, Filter, Detektor und Verstärker.

3.4 Aufbau einer Thermographiekamera

Thermographiekameras gehören zur Gruppe der berührungslos messenden und bildgebenden, strahlungsbasierten Temperatursensoren. Wie bei anderen Pyrometern (Strahlungsthermometern) auch ist kein Kontakt zum Messobjekt notwendig, die Temperaturwerte werden anhand der vom Messobjekt emittierten Strahlung erfasst. Während einfache Pyrometer nur punktuell messen, entsprechen die Infrarotdetektoren von Thermographiekameras ortsauflösenden Pyrometern, die für jeden Infrarotpixel des Sensors einen individuellen Temperaturwert messen können. Als bildgebendes Messverfahren erzeugen sie aus den Messwerten des Untersuchungsobjektes, also aus vielen einzelnen Strahlungswerten, ein thermographisches Abbild.

Dieses sogenannte Thermogramm visualisiert die Temperaturwerte orts aufgelöst und über eine frei wählbare Farbpalette kodiert. Die bekannteste Farbkodierung für Thermogramme ist die Falschfarbendarstellung. Dabei werden den einzelnen Intensitätsstufen der Infrarotstrahlung verschiedene Farbwerte zugeordnet. So können die sehr feinen Abstufungen der Temperaturwerte im Thermogramm für das menschliche Auge deutlich unterscheidbarer dargestellt werden.

Die Oberflächentemperaturen historischer Gebäude und Kulturgutobjekte liegen in der Regel zwischen -20°C und 50°C , Dächer im Sommer auch deutlich höher. Für diese Temperaturen liegt das Ausstrahlungsmaximum der meisten Baumaterialien im längerwelligen Bereich bei $8\ \mu\text{m}$ bis $12\ \mu\text{m}$.²⁰ Dieser deckt sich mit einem der beiden atmosphärischen Fenster für Baumaterialien bei $3\ \mu\text{m}$ bis $5\ \mu\text{m}$ und $8\ \mu\text{m}$ bis $14\ \mu\text{m}$.²¹ Daher eignen sich besonders die für den LWIR-

Bereich ausgelegten IR-Kameras für Bauforschungsthermographie.

Zur Einordnung der Kameratechnik und zur Abgrenzung von anderen Infrarotgeräten wie Strahlungsthermometern oder Nachtsichtkameras soll der Begriff Thermographiekamera genauer definiert werden. Infrarot-Thermographie-Kamerasystem müsste die vollständige Bezeichnung für die Geräte lauten, die gemeinhin Infrarot-, Wärmebild- oder Thermokamera genannt werden.²² *Infrarot* um den entsprechenden Bereich des elektromagnetischen Spektrums vom VIS- oder UV-Bereich abzugrenzen. *Thermographie*, weil sie emittierte (nicht reflektierte) Strahlung im MWIR- oder LWIR-Bereich dokumentieren. *Kamerasystem*, weil es sich bei den verwendeten Kameramodellen mittlerweile meist um vollumfängliche Kamerasysteme handelt, also thermographische Messinstrumente mit integrierter Software zur präzisen Ansteuerung, direkten Auswertung und Visualisierung der Messung. Sie vereinigen die Funktionen der Bildgebung, der Ermittlung der Strahlungsdichte und Strahlungsverteilung bestimmter Wellenlängen und der Messung von Temperaturwerten für jeden Bildpixel. Im Vergleich dazu sind Infrarot-Sichtgeräte (Nachtsichtgeräte) oder Photographische Kameras mit modifizierten Filtern reine Bildgeber ohne radiometrische Messfunktionen. Diese thermographischen Kamerasysteme sind unabhängig von externen Steuereinheiten wie Laptops bedienbar, die Verarbeitung und Darstellung der Messwerte erfolgt systemintern. Die meisten Kameras bieten bereits über ihre internen Menüpunkte die grundlegenden Bearbeitungsoptionen für Thermogramme an. Diese erleichtern eine spezifische Nachbearbeitung mit entsprechender Thermographiesoftware deutlich.



8 Komponenten eines Kamerasystems für aktive Thermographie und deren Anwendung für restaurierungswissenschaftliche Fragestellungen.

Die gängigen Kamerasysteme können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden:

Bildaufnahmeprinzip:

- Scanner-Kameras mit einer zeilenförmig abtastenden Detektorleiste
- Focal-Plane-Array Kameras (FPA) mit einer Detektormatrix

Detektortyp:

- Thermische Detektoren
 - pyroelektrische Detektoren
 - Bolometer
- Quantendetektoren (auch Photonen- oder Halbleiterempfänger genannt)

Spektralbereich:

- SWIR (1,4 bis 3,0 μm)
- MWIR (3 bis 8 μm)
- LWIR (8 bis 15 μm)

Geräteaufbau:

- Kompaktkameras mit integrierter Steuereinheit, Live-View-Anzeige, Auswertungsfunktionen
- Mehrkomponentensysteme aus separater Kamera, Steuereinheit, Auswertungssoftware

Die früher üblichen Scanner-Kameras werden zusehends von den Focal Plane Array Systemen abgelöst. Diese verfügen über einen ebenen Flächensensor, ein Detektorarray als Matrix aus vielen rasterförmig angeordneten einzelnen Infrarotsensoren, der Strahlungsintensitäten für jeden Bildpunkt misst. Im Vergleich zu den Scanner-Kameras ist kein zeilenweises

Abscannen der Messszene mehr notwendig, die dafür notwendigen optomechanischen Bauteile entfallen bei FPA-Kameras. Die vielen Einzelsensoren der FPA-Systeme arbeiten simultan, der Messprozess wird so enorm beschleunigt und ermöglicht wesentlich schnellere Bildfolgen. Während bei einer Scanner-Kamera alle Bildpunkte vom selben Detektorelement nacheinander abgerastert werden, können durch die vielen simultan arbeitenden Einzelsensoren der FPA-Matrix Ungleichförmigkeiten entstehen. Diese müssen durch kamerainterne Inhomogenitätskorrekturen (Non Uniformity Corrections, NUC) und eine thermische Stabilisierung des Detektors kompensiert werden. Die FPA-Thermographiesysteme werden mit verschiedenen Detektorarten angeboten und können so für vielfältige Untersuchungskontexte genutzt werden.²⁴

IR-Kamerasystem-Komponenten

- Optik (bündelt die Strahlung)
- Filter (filtert spektrale Bande)
- Detektor/Sensor (erfasst und konvertiert Strahlungsintensität in elektrische Signale)
- Verstärker und Signalverarbeitung (konvertieren elektrische Signale in Messwerte und Bilddaten)²³
- Live-View-Display (Zuweisung von Falschfarben, flächenhafte Darstellung radiometrischer Werte als Farbpixel in Thermogrammen)
- Steuereinheit/Eingabetasten
- Interface/Anschlüsse (Datenübertragung)
- Speichervorrichtung/SD-Slot (Datenspeicherung)
- Akku/Netzteilanschluss

Detektorelemente beziehungsweise Sensoren in Thermographiekameras konvertieren die aufgenommene Infrarotstrahlung in elektrische Signale. Die Detektortypen werden entsprechend ihrer Funktionsprinzipien unterteilt in thermische Detektoren und Quantendetektoren.²⁵

Im Bereich der thermischen Detektoren gibt es *pyroelektrische Detektoren*, wie sie hauptsächlich in Strahlungsthermometern verbaut werden und *Bolometer*, die heute gängigen Detektoren der meisten Thermographiekameras. Die unterschiedlichen Detektortypen arbeiten nach unterschiedlichen physikalischen Prinzipien.²⁶ Das Funktionsprinzip der thermischen Detektoren beruht auf einer Temperaturänderung des Detektorelements. Diese entsteht, sobald der Detektor Infrarotstrahlung absorbiert. Die Temperaturänderung des Detektorelements wird in ein elektrisches Signal umgewandelt und als Maß für die absorbierte Strahlung ausgewertet. Bei pyroelektrischen Detektoren entsteht die Signalwandlung über eine Ladungsänderung, bei Bolometern über eine Widerstandsänderung.²⁷

Das Funktionsprinzip der Quantendetektoren beruht auf dem photoelektrischen Effekt. Durch die auftreffende Infrarotstrahlung werden Elektronen der Halbleiter-Detektorelemente auf höhere Energieniveaus gehoben. Ihr Zurückfallen erzeugt ein elektrisches Signal, das wiederum als Maß für die absorbierte Strahlung ausgewertet werden kann. Quantendetektoren haben gegenüber Bolometern den Vorteil, dass sie im Nanosekunden bis Mikrosekunden-Bereich arbeiten und damit um einige Größenordnungen schneller sind als thermische Detektoren. Auch ihre spezifische Detektivität (Empfindlichkeit) ist wesentlich höher und sie sind generell rauschärmer. Allerdings erzielen sie diese hervorragende thermische, geometrische und zeitliche Auflösung nur bei sehr tiefen Betriebstemperaturen um -200°C (70K). Sie müssen während des gesamten Messprozesses gekühlt werden, andernfalls könnte die Eigenstrahlung von Kamera und Sensor die Untersuchung beeinflussen.

Die früheren Kameramodelle mit Quantendetektoren wurden vorwiegend mit flüssigem Stickstoff gekühlt, heute kommen hauptsächlich elektromechanische Kühlmechanismen mit Stirling-Kühlern oder Peltier-Elementen zum Einsatz.²⁸

In der Bauthermographie haben sich die ungekühlten Focal Plane Array Kameras mit Mikrobolometer-Detektoren bewährt.²⁹ Aufgrund ihrer kompakten Bauweise, ihrer Unabhängigkeit von Kühlsystemen und Netzbetrieb sind sie robuster, leichter und einfacher in der Handhabung und können daher äußerst flexibel und vielseitig auch im Baustellenbereich eingesetzt werden.

3.5 Anforderungen an die Technik

Hardware

Für den bestmöglichen Einsatz thermographischer Messtechnik an historischen Objekten sollten die verwendeten FPA-Kameramodelle auf die Belange der Bauforschung hin optimiert sein. Das beinhaltet vor allem eine hohe geometrische und niedrige thermische Auflösung. Eine gute geometrische Auflösung erfordert ein ausreichend großes Detektorformat und einen möglichst kleinen Bildfeldwinkel (Instantaneous Field Of View, IFOV)³⁰, um auch kleine Baudetails abbilden und die Thermogramme mit hinreichender Auflösung darstellen zu können. Empfohlen wird eine möglichst hohe Anzahl an Detektorzellen (Pixel), mindestens aber 640×480 IR-Pixel sowie möglichst geringe Detektorzellengrößen (Pitch) von unter $25 \mu\text{m}$. Wenn möglich sollten Kamerasysteme mit Micro-Scanning-Enhancement zur Verbesserung der Auflösung auf 1280×960 IR-Pixel bevorzugt werden.³¹ Micro-Scanning oder Dynamisches Resolution Enhancement (DRE) verbessert die Bildqualität des Thermogramms, indem die Pixelanzahl vervierfacht, die räumliche Abtastrate verdoppelt und das Pixelraster halbiert wird. Die technischen Kameraparameter sollten außerdem angepasst sein an das spezifische Wärmeverhalten historischer Baustoffe. Diese reagieren aufgrund ihrer hohen Wärmekapazitäten thermisch eher träge. Darüber hinaus weisen Bauteile mit ihren relativ niedrigen Eigentemperaturen zwischen -20°C und 50°C nur eine verhältnismäßig geringe Gesamtstrahlungsenergie auf. Bauthermographiekameras erfordern also keine besonders schnellen Bildraten³², dafür aber eine gute thermische Auflösung, um auch niedrige Objekttemperaturen und geringfügige Wärmeströme abbilden zu können.

Wichtige Parameter der IR- Kameragüte

- **Geometrische Auflösung:**
Detektorformat (je größer, desto besser) und IFOV (je kleiner, desto besser)
- **Thermische Auflösung:**
NETD (je kleiner, desto besser).
- **Zeitliche Auflösung:**
Bildfrequenz/Bildwiederholrate in Hz (je größer, desto besser – für Bauforschung im allg. nicht entscheidend)

IFOV: Instantaneous Field Of View

Bildfeldwinkel, kleinstmöglicher Raumwinkel, den ein einzelner IR-Pixel noch erfassen kann.

$\text{IFOV} = \text{Pixelgröße} / \text{Objektivbrennweite}$. IFOV *

Objektstand = Messfleckgröße (kleinstmöglich detektierbare Objektgröße).

IFOV = 1,5 mrad bedeuten, dass bei einer Objektentfernung von einem Meter der jedem IR-Pixel zugeordnete Einzelmessfleck einen Durchmesser von 1,5 mm darstellt, bei zwei Metern ergibt sich eine Messfleckgröße von 3 mm usw.

NETD: Noise Equivalent Temperature Difference

Rauschäquivalente Temperaturdifferenz, Maß für die kleinstmögliche Temperaturdifferenz, die das Messsystem noch darstellen kann. Je kleiner die thermische Auflösung, desto besser die Empfindlichkeit der Kamera und entsprechend besser die Detailwiedergabe. Wird für Objekttemperaturen von 30°C angegeben.

Die als Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) angegebene thermische Empfindlichkeit ist ein Maß für die kleinstmögliche Temperaturdifferenz, die das Messsystem noch darstellen kann.³³ Je kleiner die thermische Auflösung, desto besser die Empfindlichkeit der Kamera. Da die Temperaturdifferenz in historischen Gefügen oft nur wenige Kelvin beträgt und die Wärmeströme teilweise sehr kleinräumig sind, wird eine thermische Auflösung von unter 0,1 Kelvin empfohlen.³⁴ Andernfalls können kleinste Temperaturunterschiede nicht mehr ausreichend detektiert werden. Während Thermographiekameras Temperaturspannen von wenigen Millikelvin auflösen können, bleibt ihre absolute Temperatur-Messgenauigkeit im Bereich von 1-2 Kelvin.

Die in der Bauthermographie verwendeten LWIR-Infrarotkameras sind für den langwelligen Spektralbereich von 7,5µm bis 14µm (je nach Hersteller auch 7µm bis 15µm) ausgelegt und eignen sich ebenso für die Untersuchung historischer Gebäude und deren charakteristischer Bausubstanz. Der Messbereich, auf den die Kameras kalibriert sind, sollte mindestens -20°C bis +100°C umfassen. Für die absolute Messgenauigkeit des Kamerasystems werden in der Bauthermographie Werte von maximal zwei Kelvin oder weniger empfohlen.³⁵ Da absolute Temperaturwerte in der Bauforschung eine weniger große Rolle spielen, ist die absolute Messgenauigkeit dort nicht so entscheidend. Die Priorität der Kamerawahl sollte auf der thermischen und geometrischen Auflösung liegen.

Darüber hinaus sollten die Thermographiekameras robust gegenüber Staub, baustellenbedingten Verschmutzungen oder hoher Luftfeuchte sein, um problemlos auch in Dächern und Kellern historischer Gebäude eingesetzt werden zu können. Unabdingbar für den Einsatz in der Bauforschung sind akkubetriebene Systeme, die unabhängig von Stromanschlüssen auch in sehr beengten oder ausgesetzten Messumgebungen wie auf Gerüsten problemlos genutzt werden

können. Aus demselben Grund sind Kamerasysteme mit geräteinternen Bedienfunktionen zu bevorzugen. Die externe Ansteuerung über ein Laptop oder vergleichbare Steuermodule ist in vielen Messumgebungen eher hinderlich. Wünschenswert sind außerdem Fernauslöser oder kabellose Verbindungsmöglichkeiten, um über WLAN oder entsprechende Smartphone-Apps Messungen auslösen zu können.

Wie bei Photographiekameras auch sind kamerainterne Displays mit Echtzeitdarstellungen von entscheidendem Vorteil. Messungen können live am Bildschirm verfolgt und bei Bedarf direkt angepasst und verbessert werden. Bereits abgespeicherte Thermogramme können erneut vor Ort überprüft und um zusätzliche Aufnahmen ergänzt werden. Vor allem für Voruntersuchungen ist eine Live-Übertragung auf ein Kameradisplay unerlässlich. So kann das historische Bauwerk während der Erstbegehung simultan zur optischen Einschätzung auch im infraroten Spektrum betrachtet werden, ohne zuerst Einzelaufnahmen anfertigen zu müssen.

Aufgrund der teilweise beengten räumlichen Verhältnisse in historischen Gebäuden bieten sich außerdem Wechselobjektive mit verschiedenen Bildfeldern an. Besonders bei Innenraumthermographien sind Weitwinkelobjektive vorteilhaft. Viele Kamerahersteller bieten mittlerweile in die Thermographiesysteme integrierte Digitalkameras an, die simultan zum Thermogramm eine konventionelle Photographie der Messsituation aufnehmen. Auch bei dieser Kamera sollte auf eine ausreichende Bildauflösung geachtet werden. Die ebenfalls oft angebotenen GPS-Funktionen sind dagegen für die Bauforschung verzichtbar. Sie sind kaum präzise genug für eine vermessungstechnisch relevante Stationierung oder Ausrichtung der Einzelaufnahmen. Vorteilhaft dagegen sind kamerainterne, laserbasierte Distanzmesser, die bei thermisch sehr homogenen Messumgebungen die Fokussierung unterstützen können.

Es sollte sowohl eine automatische als auch eine manuelle Fokussierung möglich sein. Auch die Bildspeicherung sollte manuell und automatisch erfolgen können. Hilfreich ist vor allem die individuelle Konfiguration von Startzeit und Intervallen bei zeitgesteuerten automatischen Speicherungen.

Als Speichermedien haben sich SD-Karten bewährt, zusätzliche Übertragungsmöglichkeiten über USB-Schnittstellen sind ebenfalls hilfreich. Ähnlich wie bei Photographie-Kameras bieten auch im Thermographiebereich die meisten Hersteller firmeneigene thermographische Bildformate an, die sämtliche Metadaten sowie die radiometrischen Werte beinhalten. Diese Bildformate sind jedoch oft nur mit der firmeneigenen Software auswertbar. Daher sollte die Thermographiekamera zumindest noch verlustfreie Standardgrafikformate wie TIFF oder PNG schreiben können.

Weiterhin wichtig bei der Wahl der thermographischen Datenverarbeitung beziehungsweise der Thermographieergebnisse ist deren Kombinationsfähigkeit sowohl mit anderen zerstörungsfreien Prüfmethode als auch mit weiteren Visualisierungsverfahren. Hierfür sollten Kamera und Software kompatible Datenaustauschformate unterstützen.

Die wachsende Bedeutung von BIM (Building Information Modeling)³⁶ im Bereich historischer Gebäude betrifft auch die Thermographie als ergänzende Untersuchungs- und Visualisierungsmethode. Über eine dreidimensionale Modellierung thermaler Daten und deren geometrischer Referenzierung können thermale Befunde präziser verortet und direkt am Bauwerksmodell abgebildet werden. In einem Heritage-BIM-System könnten sie dann mit den Zusatzinformationen weiterer Layer wie beispielsweise Material- und Schadenskartierungen oder Bauphasenabfolgen überlagert werden (siehe Kapitel 7).

Achtung:

FPA-Kamerasysteme gehören zu den Gütern, die üblicherweise für zivile Zwecke verwendet werden, gleichzeitig aber auch im militärischen Bereich Verwendung finden können. Sie unterliegen bestimmten Ausführbeschränkungen entsprechend der Verordnungen zur Ausfuhr von Gütern u. Technologien mit doppeltem Verwendungszweck (Dual Use Systems). Diese kommen dann zur Anwendung, wenn ein Thermographiesystem für Forschungsprojekte ins Ausland transportiert werden soll. Nähere Auskünfte erteilt das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA).

Software

Viele der aktuellen vollumfänglichen Kamerasysteme bieten vielseitige Bearbeitungsmöglichkeiten der Messergebnisse direkt am internen Display an. So können dort meist die Temperaturskalierung nachjustiert, Isothermen eingestellt, Messbereiche festgelegt, Temperaturwerte ausgelesen, Überlagerungen und vieles mehr angelegt werden.

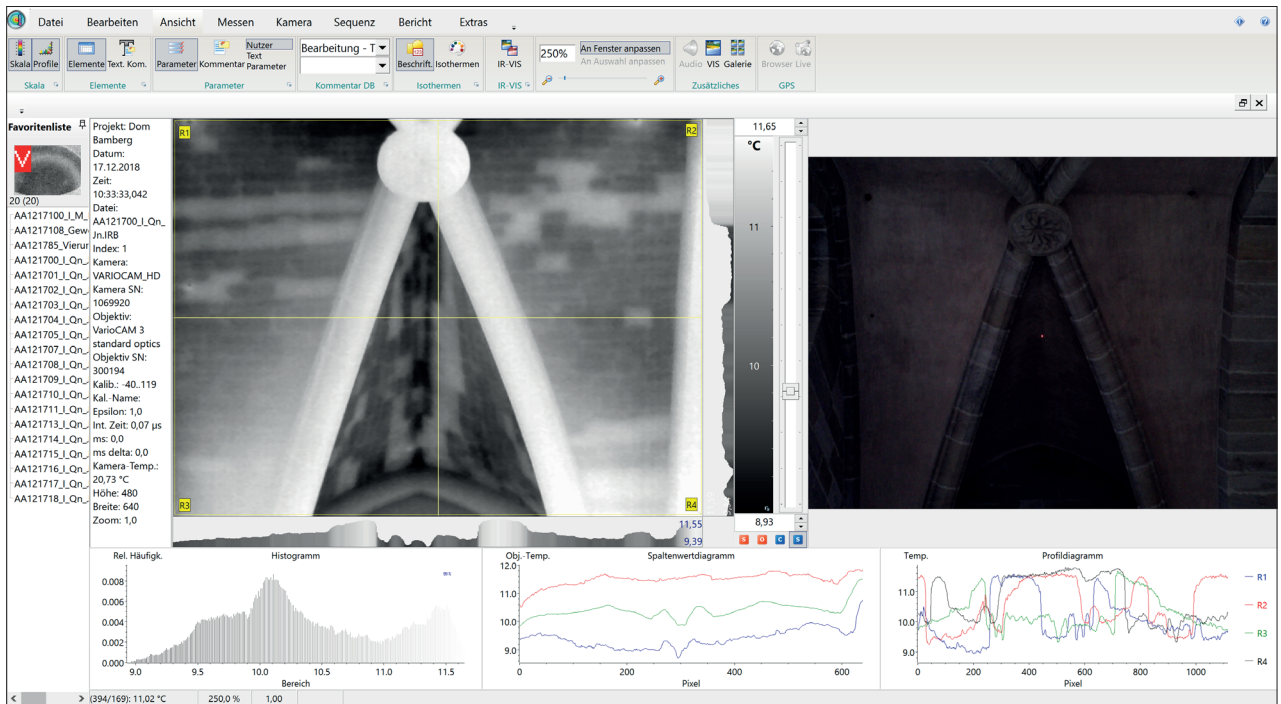
Dennoch sollte die endgültige Auswertung immer mit geeigneter Software an einem großen Bildschirm stattfinden. Dort können die Thermogramme präziser und vielseitiger nachbearbeitet werden. Viele der Kamerahersteller bieten auf ihre Kamerasysteme hin optimierte Software und Aufsätze an. Leider sind die meisten davon nicht gut mit den proprietären Datenformaten anderer Kameras kombinierbar. Da häufig Kamerasystem und Software aufeinander abgestimmt und in einem Paket angeboten werden, nutzen viele Thermographieanwender:innen auch diese Kombinationen aus Hard- und Software.

Es lohnt sich bei der Softwareauswahl dennoch, auf Anschlussfähigkeit und Modularität zu achten, denn die Anwendung von Thermographie in der Bauforschung erfordert zusehends kombinierte Untersuchungsverfahren, Datenüberlagerungen und die Einbindung thermographischer Daten in BIM-Systeme. Zuverlässige Programmschnittstellen und Austauschformate sind hier unabdingbar.

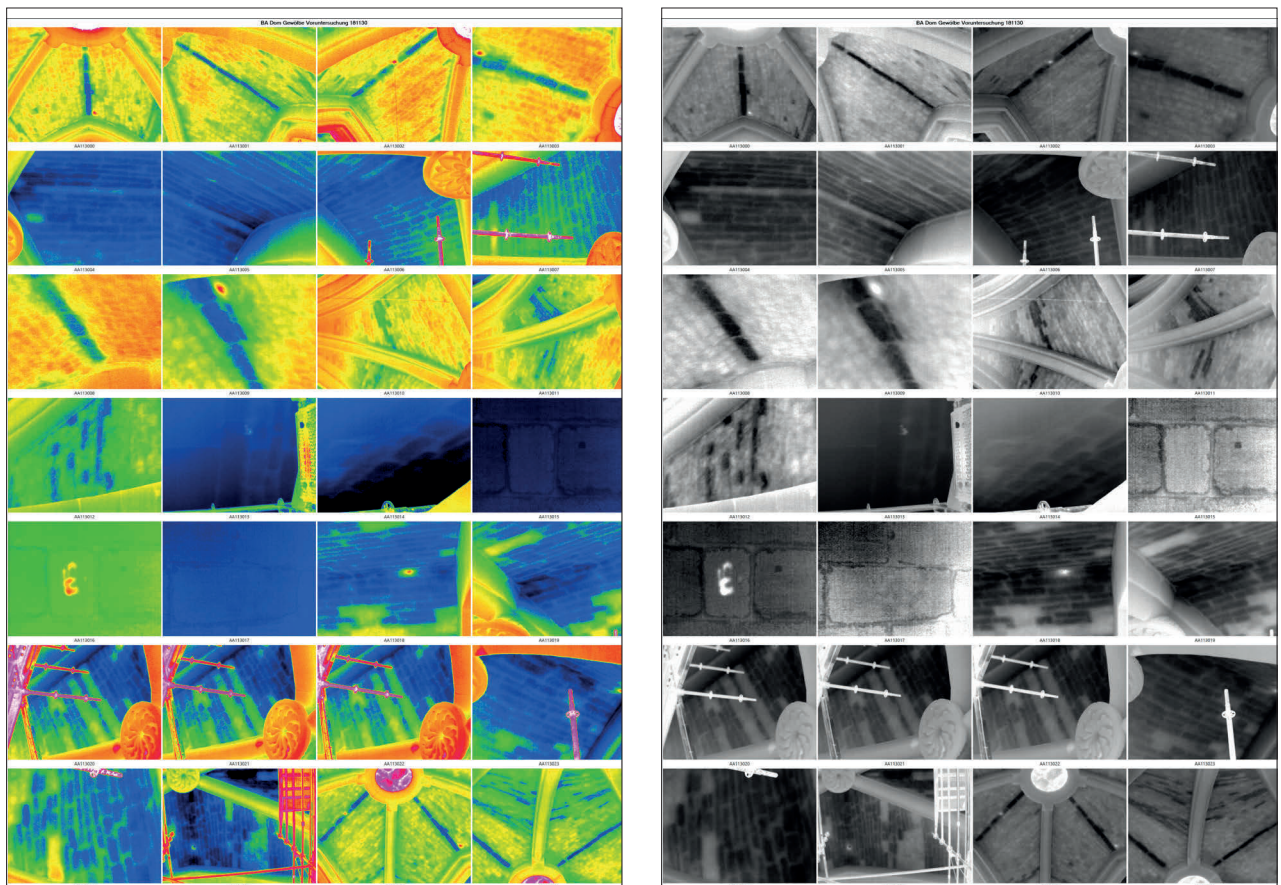
Software, die zur Nachbearbeitung von thermographischen Untersuchungen in der Bauforschung genutzt wird, sollte auf jeden Fall über folgende Funktionen verfügen:

Anforderungen an IR-Software

- Darstellung der Temperaturskala
- Level und Span, Feinjustierung
- verschiedene Farbpaletten, inklusive Graustufen
- Gegenüberstellung VIS-Bild
- Überlagerungsmöglichkeiten von Thermogramm und VIS-Bild
- Darstellung Kameraparameter
- Kommentarfunktion
- Eingabe von Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte)
- Korrektur von Emissionsgraden
- Darstellung von Isothermen
- Sequenzauswertungen
- Histogrammauswertung
- Messwerkzeuge zur Darstellung von Temperaturprofilen und Betonung einzelner Messbereiche
- Verschieden Speicher- und Exportformate
- Ausgabe von Bilddaten und Messgrößen



9 Beispiel einer IR-Software zur Auswertung und Nachbearbeitung thermographischer Untersuchungsergebnisse.

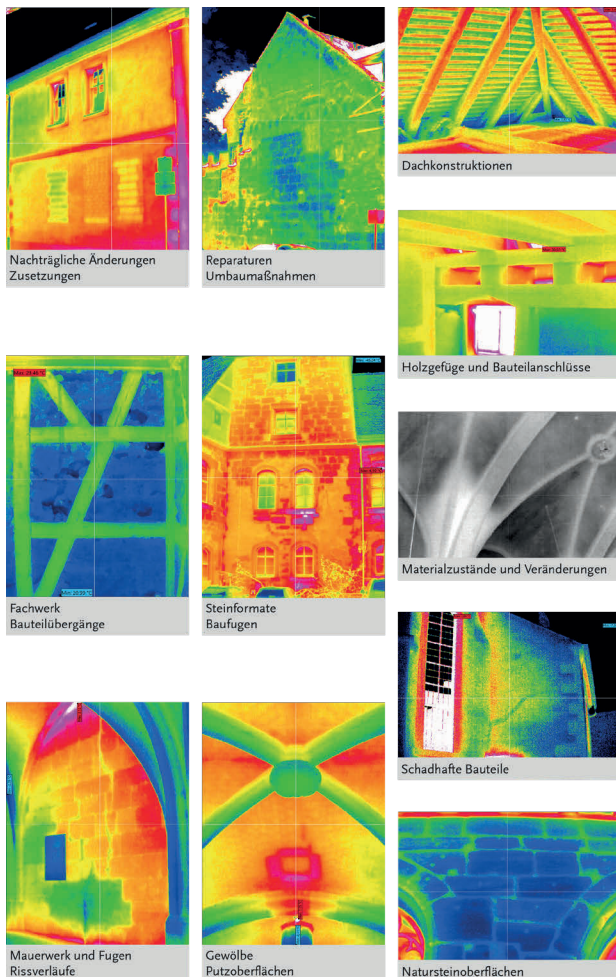


10 Galerieansicht einer thermographischen Untersuchungsserie in Falschfarben- und Graustufenarstellung.

Geräteausstattung	Anforderungen³⁷
Spektralbereich	LWIR langwellig (7-15µm)
Detektortyp	Ungekühltes Mikrobolometer-FPA, Pitch < 25µm ³⁸
Detektorformat	> 640x480 IR-Pixel (je größer, desto besser)
Geometrische Auflösung IFOV	< 5 mrad (Millirad) (je kleiner, desto besser)
Thermische Auflösung NETD (bei 30°C)	< 60 mK (Millikelvin), < 30 mK für sehr kleine Temperaturdifferenzen (je kleiner, desto besser)
Messgenauigkeit (absolut)	<2K (+- 2%), Empfehlung 1K (+- 1%)
Zeitliche Auflösung: IR-Bildfrequenz	> 30 Hz im Vollbild (je größer, desto besser – für Bauforschung im allg. nicht entscheidend)
Temperaturmessbereich	-20°C - + 100°C (-40 – 1200°C)
Einsatzbereich	-10°C - + 40°C
Objektive	Normalobjektiv: Bildfeld ca. 20 – 25° Weitwinkelobjektiv: Bildfeld ca. 40 – 45°
Objektivanschluss	Auto-Objektiverkennung bei Wechsel
Integrierte Farb-Videokamera	> 8 Megapixel, lichtstark
Laserpointer	Zur Orientierung u. Markierung von Messpunkten, im Videobild sichtbar und speicherbar
Laserentfernungsmesser	Exakte Distanzbestimmung und Fokuseinstellung
Fokussierung	Motorisch, automatisch oder manuell, wenn möglich mit permanenter Autofokussierung
Zoom	Digital, stufenlos
Emissionsgradkorrektur	Emissionsgrad, Korrektur Reflexionsanteil, wenn möglich hinterlegte Materialtabelle
Bilddarstellung	Verschiedene Farbpaletten, anwendungsspezifisch adaptierbar
Akkukapazität	2-8 Stunden (mit Wechselakku)
Schnittstellen zur Bildübertragung	USB, GigE-Vision
Schnittstellen zur Kamerasteuerung	WLAN, optional GigE-Vision, optionales Zubehör: RS232, Trigger
Speicherformate	Verlustfreie Standard-Grafikformate (JPG, PNG), kompatibles Thermographiebildformat IRB mit allen Messdaten und Aufnahmeparametern
Speichermedium	Austauschbare SD-Karte
Bildspeicherung	Konfigurierbar, manuell, zeitgesteuert, Startzeit über Timer einstellbar, Intervall einstellbar, Speichermöglichkeit
Ergänzende Ausrüstung (optional)	Temperaturfühler Luftgeschwindigkeitsmesser Materialfeuchtemessgerät Luftfeuchtemessgerät Klimamessgerät mit Datenlogger Blower-Door GPS-Modul
Stativ	Gewinde für Stativkopf

Anforderungen an IRT-Kamerasysteme für die Bauforschung

Die aufgelisteten Anforderungen sind als Empfehlung für Thermographiekameras in der Bauforschung zu verstehen. Natürlich können einzelne Werte abweichen, der wichtigste Faktor für qualitativ hochwertige Thermographie ist und bleibt das Hintergrundwissen der Nutzer:innen zu Technik, Methodik und Anwendungsvarianten. Trotzdem soll an dieser Stelle explizit auch abgeraten werden von sogenannten „Einstiengeräten“ oder gar Handyaufsätzen und Apps, die vermeintlich preiswerte Alternativen für alle bieten, die Thermographie *ausprobieren* möchten. Die Präzision dieser Geräte und Erweiterungen ist viel zu gering für Fragestellungen der Bauforschung. Obwohl die resultierenden Thermogramme auf den ersten Blick qualitativ vergleichbar wirken, sind die radiometrischen Ergebnisse kaum belastbar geschweige denn in einen fundierten Bauforschungsprozess integrierbar.³⁹



11 Typische Thermographie-Einsatzgebiete in der Bauforschung.

- 1 Zu den restaurierungswissenschaftlichen Strahlenuntersuchungen siehe MAIRINGER (2003).
- 2 DIN 5031 Teil 7, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche, Januar 1984. (aktuell zurückgezogen).
- 3 ISO 20473:2007 Optics and photonics - Spectral bands. International Organization for Standardization (ISO).
- 4 MAIRINGER (2003) S. 90.
- 5 Kuenzer, Claudia / Dech, Stefan (Hrsg.) (2013): Thermal Infrared Remote Sensing. Sensors, Methods, Applications, Dordrecht. S. 5.
- 6 Spektralband oder spektrales Band: Teilbereich des elektromagnetischen Spektrums, Beschreibung durch Angabe des zugehörigen Wellenlängenintervalls. Unterscheidung nach Lage im elektromagnetischen Spektrum, Bandbreite oder Nutzung.
- 7 Die emittierte Strahlung steigt mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur. Eine Verdoppelung der Temperatur führt zu 16-mal mehr Strahlungsemission.
- 8 FOUAD (2012) S. 301.
- 9 Eine umfassende Beschreibung der die Emissionswerte beeinflussenden Parameter bieten VOLLMER / MÖLLMANN (2018) S. 34f.
- 10 ZIMMERMANN / ZIMMERMANN (2012) S. 48.
- 11 Vgl. WTA e.V. (2018) S. 9.
- 12 Vgl. WTA e.V. (2018) S. 8.
- 13 FOUAD (2012) S. 304.
- 14 Zum Verhalten von Glas in Thermogrammen vgl. FOUAD (2017) S. 286.
- 15 Zum Einfluss der Umgebungs- und Hintergrundstrahlung siehe auch Holst, Gerald C. (2000): Common sense approach to thermal imaging, Bellingham. S. 63, WAGNER (2011) S. 17 und FOUAD (2017) S. 287.
- 16 Zum Transmissionsverhalten der Atmosphäre siehe auch HOLST (2000): S. 74f und VOLLMER / MÖLLMANN (2018) S. 51f.

- 17 Vgl. WTA e.V. (2018) S. 9.
- 18 Spezifische Wärmekapazität Stoffkonstante, gibt die erforderliche Energie an, die einen Stoff mit der Masse 1 Kilogramm um die Temperatur 1 Kelvin erhöht. Maß für die Fähigkeit eines Materials, thermische Energie aufzunehmen. Je höher die spezifische Wärmekapazität eines Baustoffes, desto langsamer erwärmt er sich.
- 19 Quasistationärer Zustand: Annähernd stationäre Messbedingungen, bei dem die veränderlichen Einflussgrößen wie Umgebungstemperatur, Luftfeuchte, Strahlungsintensität usw. zur Vereinfachung als konstant angenommen werden.
- 20 FOUAD (2012) S. 301.
- 21 KUENZER / DECH (2013) S.5.
- 22 Zur Systematisierung von Infrarotgeräten siehe auch Bernhard, Frank (2014): Handbuch der Technischen Temperaturmessung, Berlin, Heidelberg S. 1416-1430.
- 23 Eine dezidierte Einschätzung der Signalverarbeitungsalgorithmen bieten MINKINA / DUDZIK (2012) S. 41f.
- 24 Achtung: FPA-Kamerasysteme gehören zu den Gütern, die üblicherweise für zivile Zwecke verwendet werden, gleichzeitig aber auch im militärischen Bereich Verwendung finden können. Sie unterliegen bestimmten Ausführbeschränkungen entsprechend der Verordnungen zur Ausfuhr von Gütern u. Technologien mit doppeltem Verwendungszweck (Dual Use Systems). Diese kommen dann zur Anwendung, wenn ein Thermographiesystem für Forschungsprojekte ins Ausland transportiert werden soll. Nähere Auskünfte erteilt das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA).
- 25 Zu verschiedenen Detektormaterialien siehe auch Fraunhofer Allianz Vision (Hrsg.) (2005): Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie. Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung, Erlangen. S. 16f.
- 26 Eine vertiefende Darstellung der Sensorkenngrößen und -Funktionen bietet Budzier, Helmut / Gerlach, Gerald (2010): Thermische Infrarotsensoren. Grundlagen für Anwender, Weinheim.
- 27 Vgl. FOUAD (2012) S. 321 und FOUAD (2017) S. 296.
- 28 Eine vertiefende Darstellung der technischen Komponenten von gekühlten Photonen-Detektorarrays und ungekühlten thermischen Detektorarrays bietet: BERNHARD (2014) S.1410-1416.
- 29 Die in diesem Band dargestellten Thermogramme sind, wenn nicht anders gekennzeichnet, mit einer FPA-Kamera mit Mikrobolometer aufgenommen worden.
- 30 IFOV, Instantaneous Field Of View: Kleinstmöglicher Raumwinkel, den ein einzelner Bildpunkt noch erfassen kann. IFOV = 1,5 mrad bedeuten, dass bei einer Objektentfernung von einem Meter der jedem IR-Pixel zugeordnete Einzelmessfleck einen Durchmesser von 1,5 mm darstellt, bei zwei Metern ergibt sich eine Messfleckgröße von 3 mm usw. Vgl. hierzu auch BERNHARD (2014) S. 1435f.
- 31 Nach dem Stand der Technik 2020.
- 32 Bildrate (auch Bildfrequenz, Framerate): Anzahl der Einzelbilder, die pro Zeiteinheit aufgenommen werden.
- 33 Dezidierte Einschätzungen zu NEDT- und IFOV-Werte und ihrer Aussagekraft bieten MINKINA / DUDZIK (2012) S. 32f und VOLLMER / MÖLLMANN (2018) S. 209f.
- 34 Einen Vergleich verschiedener thermischer Auflösungen bietet: FOUAD (2017) S. 297 f.
- 35 Vgl. BERNHARD (2014) S. 1430 f.
- 36 Heritage BIM: Heritage-BIM: Virtuelle Gebäudeinformationssysteme aus digitalen Gebäudemodellen und verknüpften Metadaten, wie Texte, Bilder, numerische Daten, Informationen zu Baumaterialien, Konstruktionen, Monitoring- und Simulationsdaten etc. Kollaboratives Projektsystem zur simultanen Sammlung, Bearbeitung und Distribution dieser Daten durch alle beteiligten Fachleute.
- 37 Weitere Empfehlungen zu Kameraparametern: Vgl. WAGNER (2011) S. 23, vgl. VATH e.V. (2016) S. 8, vgl. VOLLMER / MÖLLMANN (2018) S. 210, vgl. WTA e.V. (2018) S. 12.
- 38 Detektor-Pitch: Größe der einzelnen Detektorzellen, Stand der Technik 25, 17 oder 12 µm. Je kleiner, desto schärfer und kontrastreicher das Thermogramm.
- 39 Vgl. auch ZIMMERMANN / ZIMMERMANN (2012) S. 103.

4. Umgang mit Messung und Messprozess

Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden in der Bauforschung können in aktive und passive Verfahren unterschieden werden. Bei aktiven Verfahren wird ein extern erzeugtes Signal an beziehungsweise durch das Untersuchungsobjekt gesendet. Aus dem Absorptions-, Transmissions- und Reflexionsverhalten des zu untersuchenden Bauteils können Schlussfolgerungen zu Materialeigenschaften und Zusammensetzung abgeleitet werden. Bei passiven Verfahren geht das Signal vom Untersuchungsobjekt selbst aus, wie zum Beispiel die natürliche Wärmestrahlung in Form von elektromagnetischen Wellen im Infrarotbereich, die sich die Infrarotthermographie zunutze macht. Dies trifft auch auf andere zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden zu: Ihre Signale bestehen aus elektromagnetischen Wellen, wobei je nach verwendeter Wellenlänge unter-

schieden wird zwischen Röntgen-, Ultraschall-, Thermographieverfahren.

Im Folgenden werden die Einsatzbereiche der aktiven und passiven Thermographie in der Bauforschung beschrieben sowie verschiedene Anregungsverfahren und deren Einschränkungen diskutiert. Weiterhin wird ein Vergleich von qualitativer und quantitativer Infrarotthermographie vorgestellt und deren Vor- und Nachteile für die Bauforschung analysiert. Vor allem bietet dieses Kapitel aber eine umfassende Darstellung der Vorbereitung und Durchführung thermographischer Bauforschung. Schritt für Schritt werden die spezifisch für bauforscherische Fragestellungen angepassten Abläufe vor und während thermographischer Untersuchungen an historischen Objekten und Kulturgütern erläutert.

4. Umgang mit Messung und Messprozess

- 4.1 Passive IRT in der Bauforschung
- 4.2 Aktive IRT in der Bauforschung
- 4.3 Qualitative und Quantitative IRT
- 4.4 Vorbereitung thermographischer Bauforschung
- 4.5 Durchführung thermographischer Bauforschung

4.1 Passive IRT in der Bauforschung

In der passiven Infrarotthermographie wird die von Objekten emittierte elektromagnetische Strahlung mit einer Infrarotkamera detektiert. Dadurch wird primär die oberflächliche Temperaturverteilung des Untersuchungsobjektes erfasst. Oberflächennahe Strukturen können je nach Material lokale thermische Barrieren ausbilden. Diese thermischen Inhomogenitäten bilden sich als veränderte Temperaturverteilungen an der Oberfläche ab.

Die passive Infrarotthermographie ist die überwiegend angewandte Methode sowohl in der Bauthermographie als auch in der Bauforschungsthermographie.¹ Sie ist mit überschaubarem Vorbereitungsaufwand flexibel und vielseitig einsetzbar (siehe Kapitel 1). Die Erfahrungen der thermographischen Untersuchungen im Denkmal- und Kulturgutbereich haben gezeigt, dass bei genauer Kenntnis der Untersuchungsobjekte passive Thermographiemethoden individuell für die Bauforschung angepasst und die Ergebnisse verbessert werden können. Dafür können allem die tages- und jahreszeitlich variierenden Umgebungsbedingungen sinnvoll genutzt werden (siehe Kapitel 4.3 und 4.4). Hilfreich ist hierbei die oberflächliche Erwärmung von Bauteilen durch Sonneneinstrahlung. Durch solare Anregung werden besonders die oberflächennahen Bauteilschichten erwärmt. Aufgrund der materialspezifischen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der unterschiedlichen Bauteile sowie deren Oberflächenbeschaffenheit (u.a. Emissions- und Absorptionskoeffizient) erwärmen diese sich unterschiedlich schnell und kühlen ebenso unterschiedlich wieder ab. Diese Unterschiede im thermischen Verhalten liefern Hinweise auf bauforscherische Befunde wie verdeckte Strukturen, Materialwechsel, Bauabschnittsgrenzen etc. Solare Erwärmung kann also material- oder konstruktionsbedingte thermische Unterschiede stärker kontrastieren.

Wegen der nicht steuerbaren Anteile solarer Strahlung und ihrer möglichen Überlagerung mit anderen thermischen Effekten an historischen Gebäuden wird für die Bauthermographie empfohlen, Mehrfachmessungen zur Absicherung potentieller Befunde anzulegen. Diese orientieren sich an der Veränderung solarer Strahlung im Tagesverlauf.

Bei schwer interpretierbaren oder unklaren Messergebnissen wird weiterhin empfohlen, die Messung, sofern möglich, bei veränderten Umgebungsbedingungen (veränderte Witterungsbedingungen und Außentemperaturen) zu wiederholen und die Ergebnisse abzugleichen. Da aufgrund der nur quasistationären Bedingungen in situ und der meist unbekanntem Materialparameter das thermische Verhalten der Baustoffe nicht hinreichend vorhersagbar ist, kann der Vergleich der Zusatzmessungen die Interpretationen der Thermogramme erhärten oder relativieren.

Zur Ausbildung einer konsistenten Systematik wird die Thermographie mit solarer Anregung im Kontext der passiven Thermographie eingeordnet werden, denn im Gegensatz zur aktiven Thermographie mit steuerbarer Anregung wie infraroten Strahlungsquellen handelt es sich bei solarer Einstrahlung um eine nicht steuerbare Anregungsmethode.

4.2 Aktive IRT in der Bauforschung

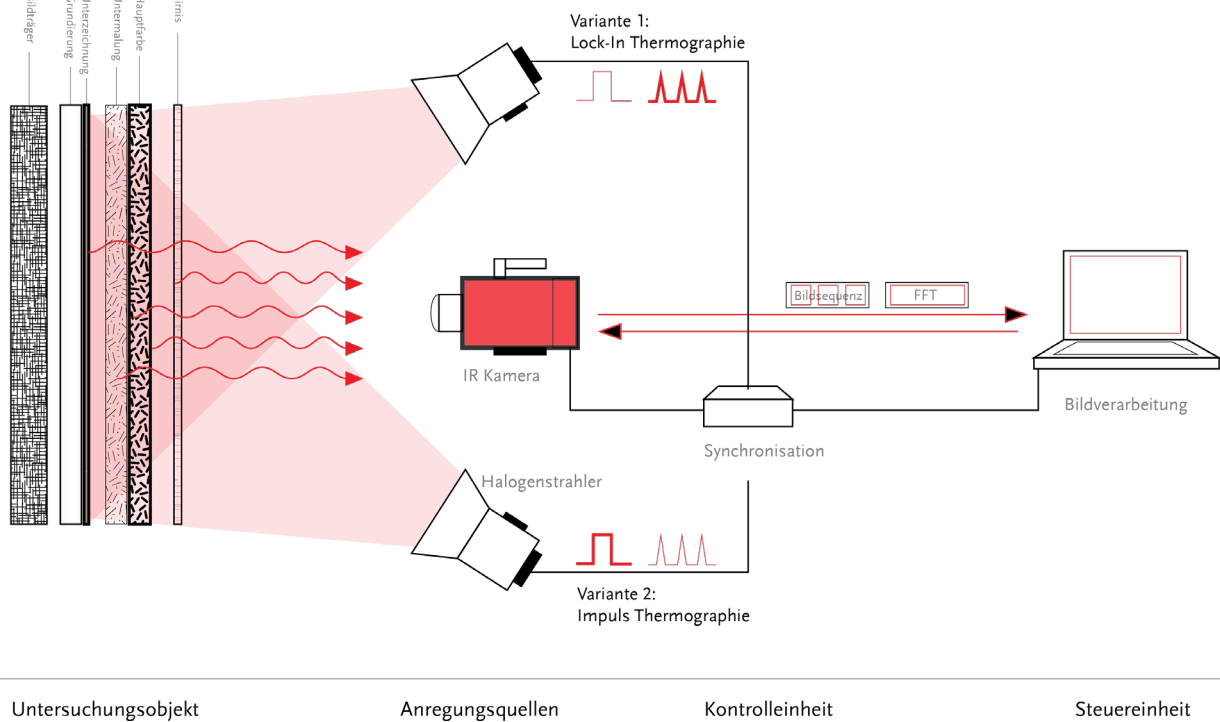
Für bauhistorische Untersuchungen muss die Temperatur der Untersuchungsobjekte in Abhängigkeit der Umgebungstemperaturen betrachtet werden. Es gilt das Grundprinzip des Wärmeaustausches, wonach zwei Objekte unterschiedlicher Temperatur in engem Kontakt ihre Temperatur durch Wärmeabgabe beziehungsweise -aufnahme angleichen. Zwischen den Bauteilen unterschiedlicher Temperatur stellt sich entsprechend ihrer spezifischen Wärmespeicherkapazitäten ein thermisches Gleichgewicht ein. Diese prinzipiell stationären Zustände werden jedoch ober-

Anregung durch Sonneneinstrahlung

- VOR der Einstrahlung (quasistationärer Zustand aufgrund Nachtauskühlung)
- WÄHREND der Einstrahlung (unterschiedliche Anregung der Baumaterialien bedingt durch unterschiedliches Absorptionsvermögen und Wärmeleitfähigkeit)
- NACH der Einstrahlung (unterschiedliche Auskühlung der Baumaterialien bedingt durch unterschiedliche Wärmekapazität)

Vorteile der aktiven Thermographie:

- Zusätzliche Informationen über verdeckte und thermisch homogene Konstruktionen
- Darstellung von Baudetails, die mit passiver Thermographie allein nicht darstellbar sind
- Messungen unabhängig von Jahreszeit, Tageszeit und Witterung
- Untersuchungen auch in Bereichen mit gleichförmiger Temperatur oder an thermisch sehr trägen Materialien
- Gezielte Anregung und Untersuchung einzelner Bauteile oder Konstruktionen



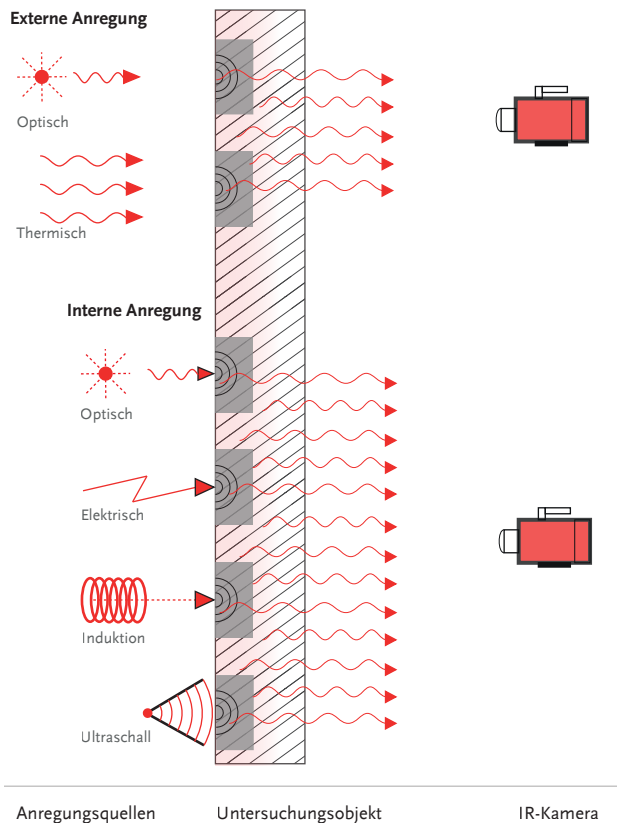
1 Untersuchungsanordnung für aktive Thermographie am Beispiel einer Gemäldeuntersuchung.

flächennah stark beeinflusst von den ortsspezifischen Umgebungsbedingungen. Die Raumtemperierung im Innenraum sowie die Witterungsverhältnisse, Sonneneinstrahlung, Feuchteintrag und Windverhältnisse im Außenbereich verändern den thermischen Ausgleich kontinuierlich. Die Bedingungen der Bauforschungsthermographie vor Ort am Objekt können also nur als quasistationär² angenommen werden, mit Schwankungen im Tages- und Jahreszeitenverlauf. Damit verändert sich mit wechselnden Umgebungstemperaturen auch das Wärmestrahlungsverhalten der Untersuchungsobjekte. Die in der Bauforschung relevanten Materialien und Bauteile reagieren jedoch thermisch eher träge, sie müssen vergleichsweise viel thermische Energie aufnehmen, bis sich signifikante Veränderungen in ihrem Strahlungsverhalten zeigen.

Dieser Umstand wird in der aktiven Thermographie genutzt: Das zu untersuchende Bauteil wird von einer externen Energiequelle angeregt.³ Aus den resultierenden Veränderungen des Bauteilstrahlungsverhaltens kann auf Materialeigenschaften und verborgene Konstruktionsweisen rückgeschlossen werden. Die Anregung kann mit verschiedenen Energiequellen erfolgen. In der aktiven Bauthermographie am gebräuchlichsten ist die optische Anregung durch Strahlungsquellen, die sichtbares Licht und/oder Infrarotstrahlung abgeben, wie Blitzlampen oder Halogenstrahler. Unter

Laborbedingungen beziehungsweise in der Materialthermographie ist auch eine thermische Anregung durch heiße Luft oder heißes Wasser möglich. In der Bauforschungsthermographie eignen sich vor allem Heizlüfter, Infrarot-Heizstrahler oder gängige Halogen-Baustrahler zur thermischen Anregung. Weitere Anregungsmöglichkeiten sind Ultraschallanregung, Mikrowellenanregung und eine induktive Anregung für Metalle und Kohlefaserverbundstoffe. Je nach Dauer und Wiederholung der Anregung wird zwischen Lock-In-Thermographie (periodische Anregung) und Impuls- beziehungsweise Puls-Phasen-Thermographie unterschieden (einmalige beziehungsweise mehrfach wiederholte Pulsanregung).

Aktive Thermographie wird im Kulturgutbereich vor allem zur Untersuchung von Malerei und Wandoberflächen genutzt (siehe auch Kapitel 6). In der Bauforschung kann die aktive Thermographie vor allem bei der Untersuchung von Baudetails zusätzliche Informationen erbringen. Die externe Anregung von Bauteilen erwärmt die oberflächennahen Schichten entsprechend dem materialspezifischen Absorptionsvermögen. Sind verschiedene Materialien innerhalb eines Bauteils verbaut, können sich diese durch einen lokal veränderten Wärmefluss an der Bauteiloberfläche abzeichnen. So zeigen sich bei historischen Bauwerken zum Beispiel verbaute Metallanker, Natursteinvarietäten oder bau-



2 Anregungsmöglichkeiten in der aktiven Thermographie.

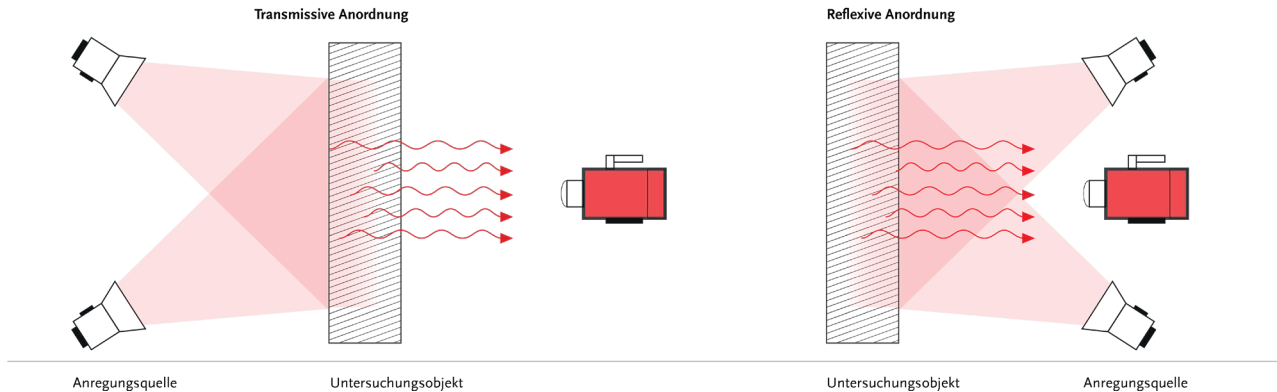
prozessbedingte Materialwechsel. Ebenso können nachträgliche Veränderungen wie Zusetzungen oder Anbauten aufgrund der abweichenden Wärmeleitfähigkeit ihrer von den Originalen abweichenden Materialien lokalisiert werden. Auch Schäden wie Fehlstellen, Risse oder durch Materialdegeneration verursachte Inhomogenitäten verändern den Wärmefluss im Bauteilinneren und können sich als thermische Anomalie auf der Bauteiloberfläche abzeichnen. Der Vorteil aktiver Thermographie besteht im Vergleich zur passiven darin, dass solche potentiellen Befundbereiche gezielt angeregt und thermisch kontrastreicher dargestellt werden können. Oft sind die Temperaturdifferenzen aufgrund der Temperaturangleichung an den Kontaktflächen der Bauteile und Baustoffe im quasistationären Zustand zu gering, um thermographisch dargestellt werden zu können. Eine externe Anregung vergrößert die Temperaturdifferenzen, da sich unterschiedliche Materialien unterschiedlich schnell erwärmen. Das unterschiedliche thermische Verhalten kann sowohl in der Aufwärmphase, also direkt während der Anregung, als auch über den Abkühlprozess hinweg beobachtet werden. Für die Bauforschungsthermographie wird empfohlen, beide Prozesse zu dokumentieren und die Resultate anschließend zu vergleichen.

Reflexive und transmissive Anregung

Auch bei der Anordnung der externen Anregung kann variiert werden: Bei einer reflexiven Anordnung befinden sich Thermographiesystem und Anregungsquelle auf derselben Seite des Bauteils. Die Tiefenwirkung der Anregung hängt dabei entscheidend von Absorptionsvermögen und Wärmekapazität der Bauelemente ab. Diese Anregungsart ist vor allem geeignet für oberflächennahe Untersuchungen oder großflächige, dünnwandige Bauteile. Erfolgt die Anregung von einer und die Thermographiaufnahme von der anderen Seite des Bauteils, spricht man von einer transmissiven Anordnung (Abb. 3). Sie wird vor allem zur Untersuchung von Wänden oder Decken genutzt, vorausgesetzt beide Seiten des Bauteils sind frei zugänglich. Der Vorteil der transmissiven Anordnung besteht darin, dass ein Wärmefluss durch das gesamte Bauteil hindurch erzeugt wird. Dies kann gleichzeitig auch von Nachteil sein, wenn sich die thermischen Anomalien einzelner Bauteilkomponenten überlagern und an der Oberfläche nicht mehr einzeln identifizierbar sind, was vor allem bei mehrlagigen Bauteilen vorkommt.

Prinzipiell kann die Anregung mit verschiedenen Strahlungsquellen durchgeführt werden. Für eine reflexive Anordnung in der Bauforschungsthermographie eignen sich besonders Infrarotstrahlungsquellen, wie Baustrahler oder Wärmelampen. Für eine transmissive Anordnung sind diese oft zu energiearm. Aufgrund der meist großen Bauteildimensionen wird zu viel der Anregungsenergie auf angrenzende Bauteile übertragen, als dass ein kontinuierlicher Wärmetransport durch das gesamte Bauteil hindurch stattfinden würde.

Erfahrungsgemäß lassen sich bauteilinterne Wärmeflüsse am besten durch übersteigertes Aufheizen der Innenräume historischer Gebäude erzeugen. Abhängig von den zu untersuchenden Bauteilen, ihren Dimensionen und den verbauten Materialien reichen die Empfehlungen von wenigen Stunden⁴ bis zu mehreren Tagen⁵ Aufheizzeit vor den thermographischen Untersuchungen. Der Vorteil der raumbezogenen thermischen Anregung besteht in der gleichmäßigen Verteilung der Wärme entlang der Wandoberfläche, da keine lokalen Temperaturspitzen erzeugt werden. Vor allem in den Wintermonaten bei ohnehin großen Temperaturdifferenzen hat sich diese Methode bewährt. Auch wenn sie oft nicht explizit als aktivthermographische Methode beschrieben wird, soll sie hier der konsistenten Systematik wegen im Kontext der aktiven Thermographie eingeordnet werden, denn im Gegensatz zur solaren Anregung handelt es sich hier um eine steuerbare Anregungsmethode.



3 Reflexive und transmissive Anordnung der Anregungsquellen in der aktiven Thermographie .

4.3 Qualitative und quantitative IRT

Die meisten Untersuchungen in der Bauforschungsthermographie entfallen in den Bereich der qualitativen Thermographie. Aus deren bildhafter Darstellung der relativen Temperaturverteilungen am Untersuchungsobjekt können Rückschlüsse auf historische Gefüge, Konstruktionen und Materialien gezogen werden. Quantitativ bestimmte absolute Temperaturwerte sind dafür nicht zwingend notwendig. Diese werden vor allem zur Bestimmung der technischen und bauphysikalischen Parameter wie Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert)⁶ oder Dämmvermögen und Wärmebrückenanteile genutzt. Unter Laborbedingungen, in der Bauteil- und Materialprüfung beispielsweise funk-

tioniert die exakte Ermittlung dieser Werte problemlos. In situ bei Messungen direkt am Gebäude sind die Umgebungsbedingungen dagegen wesentlich schlechter kontrollierbar und auch das thermische Verhalten der Untersuchungsobjekte kann nur als quasistationär beschrieben werden.

Im Gegensatz dazu erlaubt die geringere Abhängigkeit qualitativer thermographischer Untersuchungen von den jeweiligen Umgebungsbedingungen in der Bauforschung ein wesentlich höheres Maß an Flexibilität in verschiedenen Untersuchungssituationen. Bauforschungsthermographie kann entsprechend vielseitig in situ eingesetzt werden und auf spezifische bauhistorische Fragestellungen angepasst werden.

Qualitative Untersuchungen:

- Darstellung der relativen Temperaturverteilungen
- Visualisierung der Strahlungsintensität und Strahlungsverteilung
- In der Bauthermographie: Lokalisierung und Charakterisierung von Wärmebrücken, Bauschäden, etc.
- In der Bauforschungsthermographie: Voruntersuchung, Bestandsaufnahme, Schwachstellen- und Schadensanalyse, Konstruktions- und Gefügeanalyse, Befundlokalisierung, Verortung geeigneter Befundöffnungen, Bohrungen, Probeentnahmestellen
- Flexible Messbedingungen, kaum Einschränkungen hinsichtlich Umgebungsparametern
- Messungen wenig abhängig von Jahreszeit, Tageszeit und Witterung

Quantitative Untersuchungen:

- Darstellung der absoluten Temperaturmesswerte
- In der Bauthermographie: Bestimmung von Wärmedurchgangskoeffizienten bzw. Wärmedurchgangswiderständen
- Strikte Messbedingungen, starke Einschränkungen hinsichtlich Umgebungsparametern (konstante Luftfeuchte, Windstille, keine Sonneneinstrahlung etc.)
- Messungen stark abhängig von Jahreszeit, Tageszeit und Witterung
- Detaillierte Dokumentation der Umgebungsbedingungen notwendig
- Eindeutige Bestimmung von Emissionsgraden notwendig
- Bestimmung von Bezugsgrößen notwendig, immer Außen- und Innenthermographie des Gebäudes
- Höherer Nachbereitungsaufwand: Korrekturen von Emission, Reflexion, Absorption, Transmission

4.4 Vorbereitung thermographischer Bauforschung

Für die Anwendung der Thermographie in der Bauforschung wird die Bezeichnung „Thermographische Untersuchung“ statt „thermographische Messung“ genutzt, da hier nicht nur radiometrische Werte als messtechnische Ergebnisse im Vordergrund stehen, sondern vielmehr vollumfängliche Untersuchungen im infraroten Wellenlängenspektrum durchgeführt werden, deren Ergebnis die bauforscherische Interpretation der Thermogramme sein muss.

Zur Vorbereitung thermographischer Untersuchungen an Bauforschungsobjekten müssen zunächst die konkreten Fragestellungen der Bauforschung geklärt werden.

Anschließend erfolgt eine konkret auf die Fragestellung bezogene Vorbereitung der thermographischen Untersuchung. Dazu sollten unbedingt Vorinformationen eingeholt werden. Planunterlagen wie Lagepläne, Grundrisse, Schnitte und Ansichten zeigen die Zugangsmöglichkeiten und erleichtern die Planung der Aufnahmepositionen und Kamerastandorte. Fotodokumentationen können Informationen über die unmittelbare Umgebung, Bewuchs, Bäume und Sträucher sowie für die Kamerastandorte hinderliche Objekte wie Möbel und Ausstattungsgegenstände im Innenbereich zeigen. Bei Thermographieuntersuchungen an Wänden sollten, wenn möglich, am Tag vorher die Möbel weggerückt werden, um mögliche Befundstellen freizulegen und eine möglichst natürliche Wärmeverteilung in den Wänden zu gewährleisten. Vor allem große Einrichtungsgegenstände verändern die

Wärmeströmungs- und Wärmeleitungsverhältnisse im Innenraum und können so das infrarote Strahlungsverhalten der Bausubstanz beeinflussen.

Zur Vorbereitung der Kamera sollten geeignete Objektive ausgewählt und die zugehörigen Kalibrierungen⁷ der Kamera eingestellt werden. Vor allem in den räumlich beengten Messsituationen in Innenräumen sind Weitwinkelobjektive vorteilhaft. Sofern die Thermographiekamera nicht über eine integrierte Digitalkamera verfügt ist außerdem die zusätzliche photographische Dokumentation der Messsituationen und Aufnahmeperspektiven mit vorzubereiten.

Zu einer vollständigen thermographischen Untersuchung gehört immer die Betrachtung von Innen- und Außenseiten beziehungsweise Vorder- und Rückseite der zu untersuchenden Bauteile. Vor allem die Unterschiede zwischen Außen- und Innenraumthermographie sollten bereits in der Vorbereitung einkalkuliert werden.

Umgebungseinflüsse

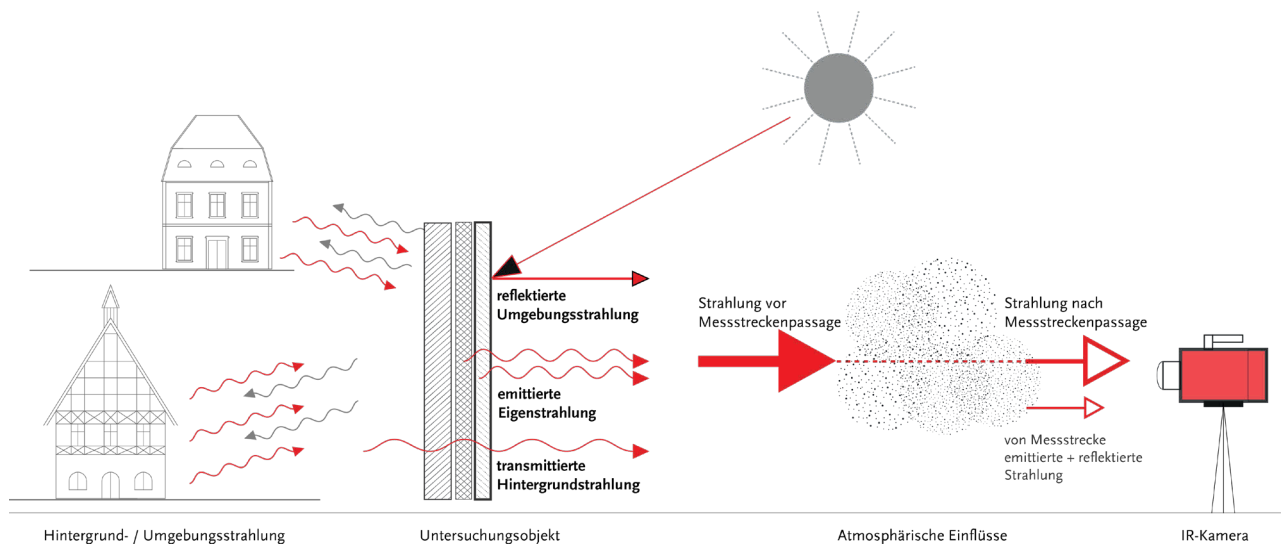
Die Thermographie ist eine stark witterungsabhängige Untersuchungstechnik. Die Faktoren Temperatur, Sonneneinstrahlung, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeiten⁸ können großen Einfluss auf die Messergebnisse nehmen und sollten daher schon im Vorfeld und vor allem während der Untersuchungen genau beobachtet und dokumentiert werden. Störeinflüsse wie starker Wind⁹, Regen, Schnee oder dichter Nebel können die Thermographieergebnisse stark verfälschen oder überlagern und sollten daher nach Möglichkeit vermieden werden. Fragestellungen der Bauforschung können jedoch prinzipiell unter verschiedenen moderaten Witterungsbedingungen mit unterschiedlichen Thermographieprinzipien untersucht werden. Die Wahl der Umgebungsbedingungen ist auch deshalb immer exakt zu dokumentieren.

Umgebungseinfluss Temperatur

Grundsätzlich gilt: Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenbereich, desto größer die Wärmeströme und desto deutlicher lassen sich radiometrische Phänomene in Thermogrammen darstellen. Vor allem die konventionelle Bauthermographie schreibt Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen von mindestens 15 Kelvin über einen ausreichenden Zeitraum vor.¹⁰ Um möglichst große Temperaturdifferenzen zu erreichen, können die Untersuchungsobjekte im Vorfeld zusätzlich beheizt werden. Zur Lokalisierung von Wärmebrücken und zur Leckageortung hat sich dieses Verfahren vielfach bewährt.¹¹ Auch in der Bauforschung wirken sich möglichst große Temperaturdifferenzen positiv auf die

Fragen zur thermographischen Vorbereitung

- WAS soll thermographisch untersucht werden?
- WELCHE Art der Untersuchung findet statt? Voruntersuchung, Übersicht-/Detailuntersuchung? Ist das Objekt völlig unbekannt oder gibt es bereits Befunde, die weiter abgeklärt werden sollen?
- WELCHE konkreten Konstruktionen und Materialien werden untersucht? In welchem baulichen Kontext?
- WELCHE Thermographiemethode soll angewandt werden? Aktive oder passive Thermographie?
- WIE kann die Thermographietechnik individuell darauf angewandt werden?
- WO sind die Grenzen der thermographischen Darstellung? Thermische Auflösung, geometrische Auflösung, zeitliche Auflösung der Kamera?
- INWIEFERN müssen zusätzliche Messungen aus anderen Winkeln, bei anderen Umgebungsbedingungen durchgeführt werden, um Befunde sicher abklären zu können?



4 Umgebungseinflüsse bei thermographischen Messungen: Umgebungstemperatur, Solarstrahlung und reflektierte Umgebungsstrahlung.

Qualität der Thermogramme aus, radiometrische Phänomene werden kontrastreicher und prägnanter abgebildet. Kleinere Details oder thermisch träge Strukturen zeigen sich überhaupt erst ab einer bestimmten Temperaturdifferenz. Insofern kann die Empfehlung der konventionellen Bauthermographie, Aufnahmen vor allem in den Wintermonaten, oder maximal von Oktober bis April zu machen, grundsätzlich auch für Bauforschungsthermographie angewandt werden.

Umgebungseinfluss Solarstrahlung

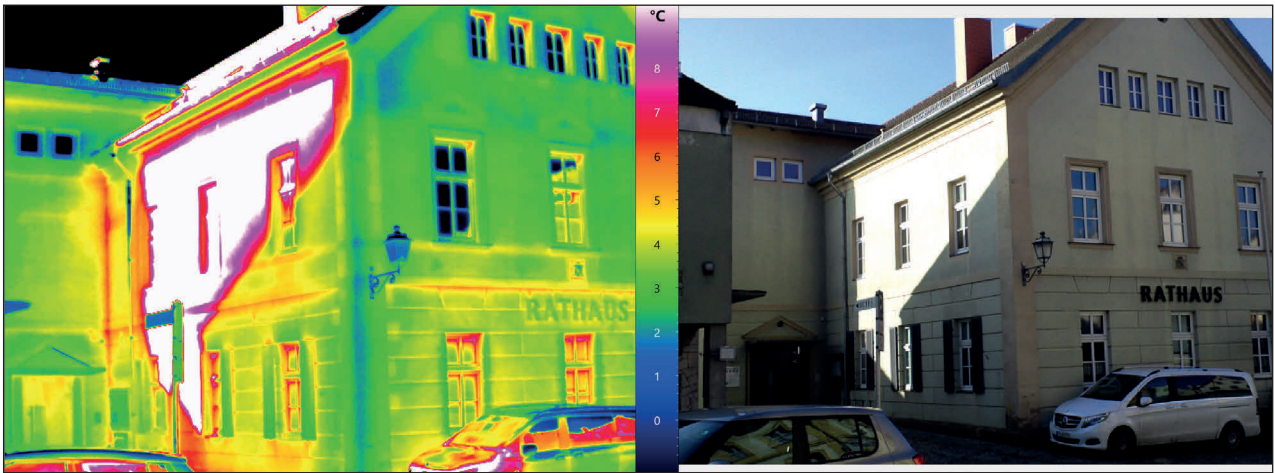
Da eine thermographische Bauforschung aber nicht primär an Temperaturverlusten und thermischen Mängeln, sondern ganz grundsätzlich an allen thermischen Anomalien und deren Aussagekraft interessiert ist, können auch unter abweichenden Umgebungseinflüssen taugliche Thermogramme erstellt werden. Anders als bei der bauphysikalischen Evaluierung ist Thermographie für die Bauforschung vor allem eine Methode, verdeckte bauliche Strukturen und Befunde zu detektieren und zu verorten. Aus diesen Befunden können dann wiederum bauhistorische Zusammenhänge rekonstruiert und Bauabläufe nachvollzogen werden. Zur thermographischen Darstellung baulicher Strukturen ist die Art der Temperaturverhältnisse wenig relevant, solange der thermische Kontrast hinreichend groß bleibt. Während Wärmebrücken im Sommer weniger deutlich darstellbar sind, zeigt sich ein Fachwerk unter Putz bei ausreichend sommerlich aufgewärmter Fassade ebenso wie im Winter bei großen Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen. Im Winterthermogramm werden die radiometrischen Kontraste durch einen für jede Bauteilzusammensetzung unterschiedlichen Wärmefluss von innen nach

außen erzeugt, bei Sommeruntersuchungen erwärmen sich die oberflächennahen Baustoffe entsprechend ihrer spezifischen Wärmespeicherkapazität durch die thermische Anregung der Sonneneinstrahlung.¹² Für beide Verfahren sollten wenn möglich sowohl Außen- als auch Innenseite des Gebäudeteils beziehungsweise Vorder- und Rückseite des Untersuchungsobjektes thermographiert werden. Nur so können die Wärmeströme und das Ausmaß oberflächennaher Erwärmung umfassend abgeschätzt werden.

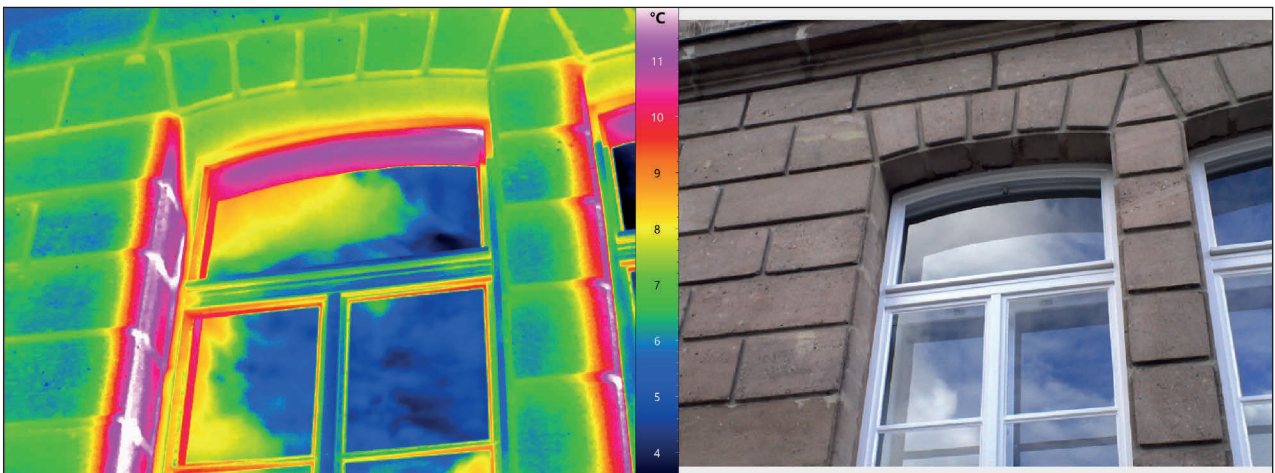
Bei der Planung thermographischer Bauforschung kommt also eine größere Bandbreite an tauglichen Witterungs- und Solarstrahlungsverhältnissen infrage. Die Bauforschungsthermographie ist dadurch flexibel durchführbar. Hinzu kommt, dass sich die Kamertechnik in den letzten Jahren hin zu immer besseren thermischen Auflösungen der Systeme entwickelt hat. Damit lassen sich auch bei geringeren Temperaturdifferenzen von 10 Kelvin oder weniger durchaus aussagekräftige Thermogramme aufnehmen.

Solare Anregung

Trotz ihrer flexiblen Anwendungszeiträume ist die thermographische Bauforschung mit solarer Bauteilerwärmung sorgfältig vorzubereiten. Sie kann nur an unverschatteten Fassaden und Bauteilen uneingeschränkt durchgeführt werden. Die Schatteneffekte von Umgebungsbebauung oder Vegetation würden die Thermogramme zu stark überlagern (Abb. 5-7). Auch wenn sie in der ergänzenden photographischen Darstellung der Messausschnitte abgebildet würden, wäre dies nur der Schattenwurf zum Zeitpunkt der Aufnahme. Die wandernden Verschattungen in der Zeit vor der Aufnahme haben aber ebenso großen Einfluss



5 Teilverschattungen durch die Umgebungsbebauung werden als überproportionale Temperaturdifferenzen im Thermogramm abgebildet. Die Auswertungen sind dann wie in diesem Beispiel in den solar erwärmten Bereichen stark übersteuert oder in den verschatteten Anteilen untersteuert. Beide Fälle sind schwer lesebar und führen leicht zu Fehlinterpretation.



6 Je nach Sonnenstand und Gebäudeausrichtung verändern sich die Verschattungen im Tagesverlauf. Dies zeigt sich einerseits an verlaufartigen Schlieren, die als lokale Erwärmungen die wandernde Sonneneinstrahlung auf Fassadenflächen beschreiben und andererseits an asymmetrisch erwärmten Bauteilen wie in diesem Beispiel. Diese Hotspots müssen eindeutig unterschieden werden von baustoff- oder konstruktionsbedingten thermischen Signaturen.



7 Schatteneffekte durch Vegetation. Obwohl die zugehörige Photographie zum Zeitpunkt der Aufnahme keinen Schattenwurf und daher keine direkte Sonneneinstrahlung mehr zeigt, sind die Verschattungen der Äste auf der Fassade rechts in den Minuten vor der Aufnahme noch deutlich als kältere „thermische Schatten“ sichtbar. Die zeitliche Verzögerung bis zu vollständigen Auskühlung der lokal solar angeregten Bereiche ist unbedingt zu beachten. Ggf. muss die Thermographie von Bauteilen mit unklaren Solarstrahlungseinflüssen zu einem späteren Zeitpunkt bzw. vor Sonnenaufgang oder nach Sonnenuntergang wiederholt werden.

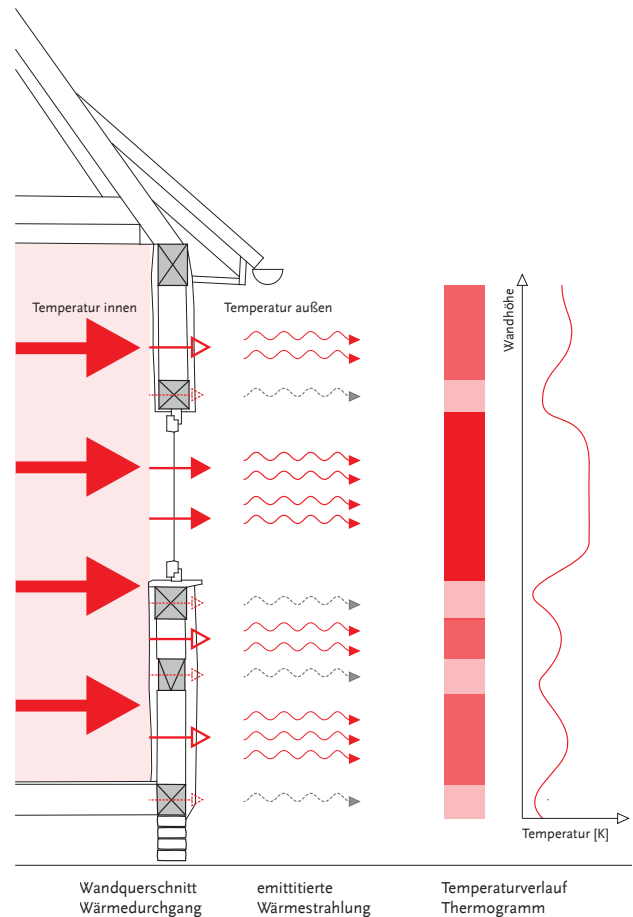
auf die Oberflächentemperatur, wurden diese Bereiche doch nur wesentlich kürzer solar erwärmt. Solche wandernden Verschattungen können unter Umständen schlierenartige Temperaturverläufe im Thermogramm abbilden, die später kaum mehr rekonstruiert werden und zu Fehlinterpretationen führen können (Abb.5). Auch ist bei solarer Thermographie eine ausführliche Dokumentation der Sonnenstände und ihrer Auswirkungen auf die jeweiligen Fassaden anzulegen. Für thermographische Bauforschung mit solarer Erwärmung wird außerdem empfohlen, im Tagesverlauf Vergleichsmessungen anzulegen. Im Optimalfall werden sowohl vor, während als auch nach der solaren Erwärmung des Untersuchungsobjektes Thermographien von identischen Aufnahmepositionen aus gemacht. Über deren Vergleich können bauhistorische Befunde dann bestätigt und von solarstrahlungsbedingten Effekten unterschieden werden. Dieses Vorgehen bezieht sich auch auf die Empfehlungen der konventionellen Bauthermographie, wonach der Messzeitpunkt so gewählt werden soll, dass Sonneneinstrahlung auf das Untersuchungsobjekt in den Stunden vor der Untersuchung keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben können.¹³ Für die Bauforschungsthermographie kann diese Empfehlung ausgeweitet werden, so dass mögliche vorhergehende Sonneneinstrahlung und ihre lokalen Erwärmungseffekte dezidiert genutzt werden können, solange ihre Einflüsse die Thermographieergebnisse kalkulierbar bleiben und diese nicht zu stark überlagern oder verfälschen (siehe Kapitel 6).

Untersuchungen im Dunkeln

Da die Thermographie als Infrarotmesstechnik gänzlich unabhängig von Tageslicht ist, können thermographische Untersuchungen natürlich auch nachts stattfinden – sollten die entscheidenden Parameter Temperaturdifferenz und Umgebungsstrahlungsanteile dann vorteilhafter für die individuelle Fragestellung der Untersuchung sein. Für nächtliche Untersuchungen gilt ebenso wie für unbeleuchtete Dachstühle oder Keller: Thermogramme können problemlos im Dunkeln aufgenommen werden. Die vergleichenden VIS-Photographien sollten aber zwingend bei ausreichender Ausleuchtung der Untersuchungssituation aufgenommen werden.

Ergänzende Messverfahren

Entsprechend der spezifischen Fragestellungen können neben Wiederholungsmessungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten noch ergänzende Messverfahren hinzugezogen werden. Die Messung von Außen- und Innentemperatur, Luft- und Bauteilfeuchte, Windgeschwindigkeiten etc. liefert wichtige Zusatzdaten, die



8 Wärmehinübergang durch eine Fachwerkwand aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen.

die thermographischen Ergebnisse nochmals konkreter beschreiben und zur Absicherung von Befunden beitragen können. Der Einsatz und die Durchführung ergänzender Messverfahren muss ebenfalls im Voraus geplant werden.

Thermographische Bauforschung findet fast ausschließlich in situ am Untersuchungsobjekt statt. Im Gegensatz zu Labormessungen herrschen dort in aller Regel keine stationären Bedingungen, sondern allenfalls quasistationäre Verhältnisse vor. Die Umgebungsparameter der Untersuchungen sind damit kaum vollständig reproduzierbar. Für einen Vergleich der Messergebnisse und eine annähernde Reproduzierbarkeit der Messung ist es daher umso wichtiger, alle relevanten Parameter zu analysieren und exakt zu dokumentieren.¹⁴ Wie bei allen Bauforschungsuntersuchungen ist auch hier besonders auf die Einhaltung der Arbeitssicherheitsvorgaben zu achten. Thermographische Untersuchungen in historischen Dachstühlen, Kellern, Gewölben etc. müssen unter diesem Gesichtspunkt sorgfältig geplant werden.

4.5 Durchführung thermographischer Bauforschung

Vor Beginn der eigentlichen Durchführung sollte geprüft werden, ob alle im Voraus festgelegten Rahmenbedingungen auch eingehalten werden können. Entsprechen die Witterungsbedingungen den Vorhersagen oder treten spontane Störfaktoren wie starker Wind, Regen, Schnee oder dichter Nebel auf? Sind die Solarstrahlungseffekte eindeutig beschreibbar? Können die geplanten Aufnahmestandorte genutzt werden? Bilden sie die gewünschte Szene ab?

Temperaturskala

Je nach Umgebungsbedingungen muss sich das Kamerasystem zunächst akklimatisieren und die optimale Betriebstemperatur einstellen. Ist der Temperatureausgleich zwischen Messsystem und Umgebung abgeschlossen, sollte mit einigen Testaufnahmen geprüft werden, ob die Kamera stabil läuft. Währenddessen können bereits grob die spezifischen Einstellungen des Kamerasystems abgeschätzt werden. Temperaturmessbereich, -spanne und -niveau hängen unmittelbar von den Umgebungstemperaturen ab. Zwischen Innen- und Außenaufnahmen müssen sie auf jeden Fall neu eingestellt werden.¹⁵ Wird mit solarer Erwärmung thermographiert, können sich die Temperaturverhältnisse zwischen direkt und indirekt erwärmter Gebäudeseiten deutlich unterscheiden. Auch hier sind Temperaturspanne und Temperaturniveau (Level und Span)¹⁶ vor jeder Einzelmessung zu prüfen, der Schwerpunkt der Temperaturskala sollte einen optimalen Darstellungskontrast ermöglichen.

Dateiformate

Die eingestellten Parameter sollten konsistent dokumentiert werden. Manche Kamerasysteme schreiben diese Informationen in die Metadaten ihrer Dateiformate. Entsprechend sollte vor jeder Thermographiekampagne das geeignete Speicherformat mit den zu dokumentierenden Messparametern eingestellt werden. Bei komplexen Messsituationen ist es unter Umständen vorteilhaft, Messsequenzen aufzunehmen, um aus den Mehrfachaufnahmen die qualitativ besten auswählen zu können. Die Überlagerung von Sequenzaufnahmen kann darüber hinaus zusätzliche Informationen bringen oder einzelne Details schärfer darstellen (siehe Kapitel 5, Auswertungsvarianten).

Aufnahmeposition

Zur Durchführung jeder thermographischen Einzelaufnahme muss jeweils eine geeignete Aufnahmeposition für den gewünschten Bildausschnitt ermittelt

werden. Dabei sollte der Abstand zum Messobjekt so gering wie möglich sein, jedoch gleichzeitig das gesamte Objekt oder den zu untersuchenden Ausschnitt abbilden. Es sind die Messfleckgröße¹⁷ als kleinstes noch detektierbares Detail und das IFOV als Bildfeldwinkel¹⁸ und deren Abhängigkeit von Objekt-abstand und Objektivbrennweite zu beachten. Der Einfluss atmosphärischer Transmission und Streuung entlang der Messstrecke kann für Fragestellungen der Bauforschung in der Regel vernachlässigt werden. Erst bei Aufnahmedistanzen von über 100 Metern wirken sich atmosphärische Einflüsse maßgeblich auf thermographische Messungen aus.¹⁹

Aufgrund der geringen Detektorauflösung sind Thermogramme aus dieser Distanz in den seltensten Fällen detailreich genug, um überhaupt bauhistorische Befunde darstellen zu können. Aus diesem Grund sollten Luftaufnahmen und Drohnenbefliegungen mit Infrarotkameras für bauforscherische Untersuchungen ebenfalls kritisch betrachtet werden.²⁰

Wenn möglich sollte die Kamera immer mit einem Stativ verwendet werden. Dank ihrer kompakten Bauweisen lassen sich viele Kameramodelle auch auf Hochstativen einsetzen. So können auch an oberen Fassadenbereichen, unter Gewölben oder in hohen Dachräumen noch Detailaufnahmen gemacht werden.

Umgebungsstrahlung und Emissionsgrad

Nachdem eine geeignete Aufnahmeposition festgelegt wurde, werden üblicherweise der Einfluss der Umgebungsstrahlung sowie das Ausmaß von Oberflächenreflexionen an Bauteiloberflächen für diese Aufnahmeposition eingeschätzt. Je nach Aufnahmewinkel verändern sich diese stark: Je spitzer der Aufnahmewinkel, desto höher der Einfluss der reflektierten Umgebungsstrahlung.²¹

Da in der Bauwerksdokumentation grundsätzlich möglichst orthogonale Aufnahmewinkel bevorzugt werden, sind die winkelabhängigen Reflexionserscheinungen für bauforschungsthermographische Aufnahmen nicht relevant. Außerdem gilt: Aufgrund des hohen Emissionsgrades ihrer Baustoffe ist der Einfluss reflektierter Umgebungsstrahlung bei historischen Gebäuden relativ klein. Für rein qualitative Untersuchungen kann der Anteil der Umgebungsstrahlung daher vernachlässigt werden. In der Bauforschungsthermographie genügt es, bei Außenaufnahmen die Umgebungstemperatur und bei Innenaufnahmen die Zimmertemperatur einzustellen.

In der konventionellen Bauthermographie würden an dieser Stelle des Thermographieprozesses die individuellen Emissionskoeffizienten der Baumaterialien zur Korrektur der Messwerte eingestellt werden. Geht

es aber, wie in der Bauforschungsthermographie üblich, um die relative Darstellung der Strahlungsverteilung und eine qualitative Untersuchung der Temperaturverhältnisse, kann die Korrektur der erfahrungsgemäß ähnlichen Emissionsgrade von Baustoffen vernachlässigt werden.

Fokussierung

Die Fokussierung der Kamera kann automatisch oder manuell durchgeführt werden. Aufgrund der geringen Bildauflösung einerseits und des überwiegend verlaufsartigen Charakters radiometrischer Phänomene ist es schwierig, eine manuelle Fokussierung rein optisch zu prüfen – Thermogramme wirken im Vergleich zur Photographie immer leicht verpixelt und unscharf. Es wird empfohlen, die manuelle Fokussierung anhand kleinformatiger Bauteile mit klaren Kanten einzustellen. Fensterbauteile oder Metallprofile eignen sich gut hierfür, sofern sie in einer Ebene mit den zu untersuchenden Bauteilen oder Konstruktionen liegen. Wird auf sie scharf gestellt, befindet sich die gesamte zu untersuchende Ebene im Schärfentiefebereich.

Für Messsituationen ohne ausreichend scharfe thermische Kanten wird eine automatische Fokussierung empfohlen. Viele Kamerasysteme werden mittlerweile mit Laserdistanzmesser (LRF Laser Range Finder) geliefert. Über den LRF kann ein einmaliger oder permanenter, distanzorientierter Autofokus eingestellt werden. Gleichzeitig wird die Distanz vom Messsystem zur Messoberfläche dokumentiert und in den Metadaten abgespeichert. Vor allem bei thermisch sehr homogenen Messobjekten wie planaren Wandabschnitten, Verkleidungen oder monolithischen Bauteilen hat sich diese automatische Fokussierung bewährt. Besteht diese Option nicht, gibt es den Behelf, über eine lokale Erwärmung eine temporäre thermische Kante anzulegen. Die einfachste Variante besteht darin, ein paar Sekunden lang die Handfläche auf die zu untersuchende Oberfläche zu legen. Sofern die Oberflächentemperatur deutlich unter 30°C liegt, sollte sich die lokale Erwärmung als klar umrissener Handabdruck abzeichnen. Nun kann manuell auf diesen fokussiert werden.

Non-Uniformity-Correction

Nachdem Aufnahmeposition, Bildausschnitt, Messdistanz, Fokussierung und Temperaturspanne festgelegt wurden, wird als letzter Schritt vor der eigentlichen Messung noch eine Non-Uniformity-Correction (NUC, seltener Non-Uniformity-Compensation)²² empfohlen. Mit einer solchen kamerainternen Ungleichmäßigkeitskorrektur vollzieht der Detektor eine Eigenkali-

brierung und Stabilisierung, um die Bildqualität zu verbessern. Diese Abfolge von Einstellungen sollte an jeder neuen Aufnahmeposition durchgeführt werden. Bei den meisten Kameras kann der Speicherprozess in Echtzeit verfolgt und die abgespeicherte Aufnahme direkt im Anschluss abgerufen werden. Bei komplexen Untersuchungssituationen empfiehlt sich eine Kontrolle der Ergebnisse direkt vor Ort, um gegebenenfalls die Aufnahmeparameter anpassen und Wiederholungsmessungen machen zu können.

Untersuchungskontext

Zu einer umfassenden bauforscherischen Thermographieuntersuchung gehört auch die Dokumentation der unmittelbar angrenzenden Bauteile und der weiteren Befundumgebungen. Diese bilden häufig eine konstruktive und/oder bauliche Einheit und sollten auch als solche untersucht werden.

Bauthermographie beinhaltet daher immer sowohl thermographische Übersichtsaufnahmen aus größerer Distanz als auch hinreichend gut aufgelöste Detailaufnahmen, am besten aus verschiedenen Betrachtungswinkeln und zu verschiedenen Tageszeiten aufgenommen.

Darüber hinaus wird immer eine ergänzende photographische Dokumentation der Untersuchungsobjekte und Messsituationen angelegt. Nur so können die in-situ Messungen bei quasistationären Zuständen hinreichend beschreiben und gegebenenfalls reproduziert werden.

Aufnahme eines Thermogramms

- Geeignete Aufnahmepositionen finden (Messabstand so gering wie möglich, Einfluss der Atmosphäre, Messfleckgröße)
- Bildausschnitt wählen (abhängig von Standpunkt, Abstand und Objektiv. Es ist zu beachten, dass sowohl Übersichts- als auch Detailaufnahmen gemacht werden müssen.)
- Einfluss der reflektierten Umgebungsstrahlung beachten
- Einfluss der Oberflächen-Reflexionen auf glatten Messoberflächen beachten
- Ggf. Solarstrahlung beachten
- Speicherformat angeben
- Ggf. halbautomatisierte Messverfahren auf Stativ einstellen
- Temperaturabgleich
- Level und Span einstellen
- Fokussierung (Abstand zwischen Infrarotkamera und Messobjekt dokumentieren)
- NUC Non-Uniformity-Correction
- Aufnahme auslösen

- 1 Wenn im Bereich der Gebäudeuntersuchung von Thermographie gesprochen wird, ist meist die passive Thermographie gemeint, aktive Thermographie wird immer auch als aktiv gekennzeichnet.
- 2 Quasistationärer Zustand: Annähernd stationäre Messbedingungen, bei dem die veränderlichen Einflussgrößen wie Umgebungstemperatur, Luftfeuchte, Strahlungsintensität usw. zur Vereinfachung als konstant angenommen werden.
- 3 Zu den verschiedenen Möglichkeiten thermischer Anregung siehe auch Fraunhofer Allianz Vision (Hrsg.) (2005): Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie. Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung, Erlangen. S. 12-14.
- 4 WAGNER (2011) S. 24
- 5 VATH e.V. (2016) S. 12
- 6 Die Möglichkeiten der thermographischen U-Wert-Bestimmung durch Messungen mit einer Wärmestromplatte bzw. die Bestimmung durch Abschätzung aus den Oberflächentemperaturen beschreibt WAGNER (2011) S. 27f. Die WTA schätzt die Ermittlung bauphysikalischer Messwerte dagegen eher kritisch ein: „Die Ableitung des U-Wertes aus Thermografieaufnahmen ist nur begrenzt sinnvoll. Durch den Einfluss des Emissionsgrades, des Wärmeübergangswiderstands sowie dem Wärmespeichervermögen kommt es zu Störungen.“ WTA e.V. (2018) S. 16.
- 7 Zum Thema Prüfung und Kalibrierung von Thermographiegeräten sei besonders auf BERNHARD (2014) S. 1440 f hingewiesen.
- 8 Detaillierte Angaben zu Windgeschwindigkeiten siehe auch: FOUAD (2010) S. 292.
- 9 Vgl. VATH e.V. (2016) S. 13: „Da Wind (ab ca. 2 m/s) großen Einfluss auf die Wärmeübergangswiderstände der einzelnen Bauteile hat, sind Messungen unter Windeinflüssen i.d.R. nicht zielführend.“
- 10 Vgl. WAGNER (2011) S. 24., vgl. VATH e.V. (2016) S. 11.
- 11 Empfehlungen zur Winterthermographie siehe auch FOUAD (2010) S. 290f.
- 12 Auch die WTA weist auf die Nutzung von Sonneneinstrahlung für thermographische Untersuchungen hin. Siehe auch WTA e.V. (2018) S. 16.
- 13 Vgl. VATH e.V. (2016) S. 11.
- 14 Vgl. WTA e.V. (2018) S. 11.
- 15 Vgl. WAGNER (2011) S. 25.
- 16 Level und Span: Niveau und Spreizung, Einstellungsmöglichkeiten der Temperaturskala im Thermogramm.
- 17 Messfleckgröße = IFOV * Objektabstand.
- 18 IFOV, Instantaneous Field Of View: Kleinstmöglicher Raumwinkel, den ein einzelner Bildpunkt noch erfassen kann. IFOV = Pixelgröße / Objektivbrennweite.
- 19 Vgl. FOUAD (2012) S. 312.
- 20 Vgl. VATH e.V. (2016) S. 13.
- 21 WAGNER (2011) S. 17.
- 22 Vgl. VOLLMER / MÖLLMANN (2018) S. 180 f.

5. Auswertung und Interpretation von IRT-Ergebnissen in der Bauforschung

Die Nachbereitung thermographischer Datensätze ist bei Weitem der wichtigste Aspekt jeder Thermographiekampagne. Sie umfasst einerseits eine standardisierte Auswertung der Thermogramme und andererseits eine individuelle Interpretation der darin enthaltenen radiometrischen Informationen. In der Bauforschung beinhaltet dieser Prozess der Auswertung und Interpretation oft eine iterative Herangehensweise: Die thermographischen Untersuchungsergebnisse historischer Objekte zeigen Hinweise auf neue, unbekannte Befunde, die allein aus den Thermogrammen heraus nicht vollständig interpretiert werden können. Sie werden mit weiteren Methoden der Bauforschung untersucht, die Ergebnisse werden miteinander verknüpft und sichern die Befundlage weiter ab. Sie werfen häufig aber auch neue Fragestellungen auf. Zur zerstö-

rungsfreien Abklärung dieser Details wird wiederum Thermographie genutzt usw.

Im Folgenden werden die konkreten Schritte einer umfassenden Auswertung und Interpretation von Thermogrammen dargestellt. Die Bedeutung von Temperaturskalierungen, Farbpaletten und verschiedenen Auswertungsvarianten wird aufgeschlüsselt und im Hinblick auf potentielle Fehlinterpretationen analysiert. Vor allem aber wird die bauforscherische Methode der systematischen Befunderhebung, Befundansprache, Befundbeschreibung und Befundauswertung für thermographische Untersuchungen adaptiert. Zu einer umfassenden Darstellung von Datenauswertung und – Interpretation gehört immer auch die klare Benennung der methodischen und technischen Grenzen. Aus diese soll im letzten Abschnitt eingegangen werden.

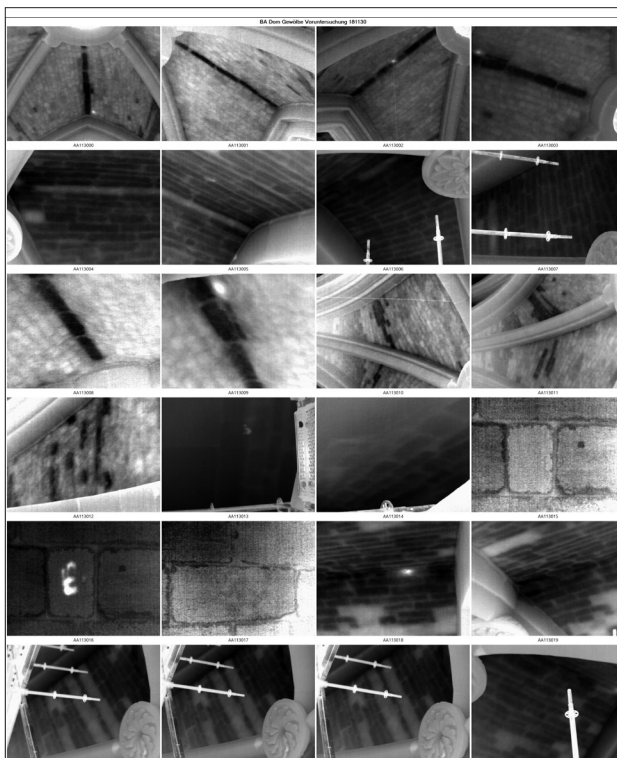
5. Auswertung und Interpretation von IRT-Ergebnissen in der Bauforschung

- 5.1. Nachbereitung der Messung und Auswertung der Thermogramme
- 5.2. Befundansprache und -Interpretation in Thermogrammen
- 5.3. Grenzen der Infrarotthermographie in der Bauforschung

5.1 Nachbereitung der Messung und Auswertung der Thermogramme

Viele der gängigen, für die Bauthermographie genutzten Kamerasysteme bieten bereits sehr umfangreiche Parameter zur Anzeigeneinstellung der Thermogramme und können die Aufnahmen auch direkt in gängigen Bildformaten abspeichern. Trotzdem sollte immer eine nachträgliche Auswertung der thermographischen Untersuchungen am Computer stattfinden. Kleine oder unauffällige Befunde können nur dort richtig eingeschätzt und so nachbearbeitet werden, dass sie möglichst kontrastreich erscheinen. Außerdem kann es hilfreich sein, einzelne Aufnahmen mehrfach in verschiedenen Farbversionen oder mit verschiedenen Kontrasteinstellungen auszuwerten, um diese anschließend vergleichen zu können. Und auch die Verwaltung und Einbindung zusätzlich erhobener Untersuchungsergebnisse ist am Arbeitsplatz deutlich besser möglich.

Grundsätzlich umfasst die Nachbereitung thermographischer Untersuchungen in der Bauforschung drei Aspekte: Die Auswertung der originalen Thermogramme, das Verfassen eines Untersuchungsberichtes oder Messprotokolls und die Einbindung der thermographischen Befunde in den Kontext der weiteren Bauforschungsergebnisse am Untersuchungsobjekt.



1 Galerieansicht als erster Überblick über eine Aufnahmeserie..

Auswertung der Thermogramme

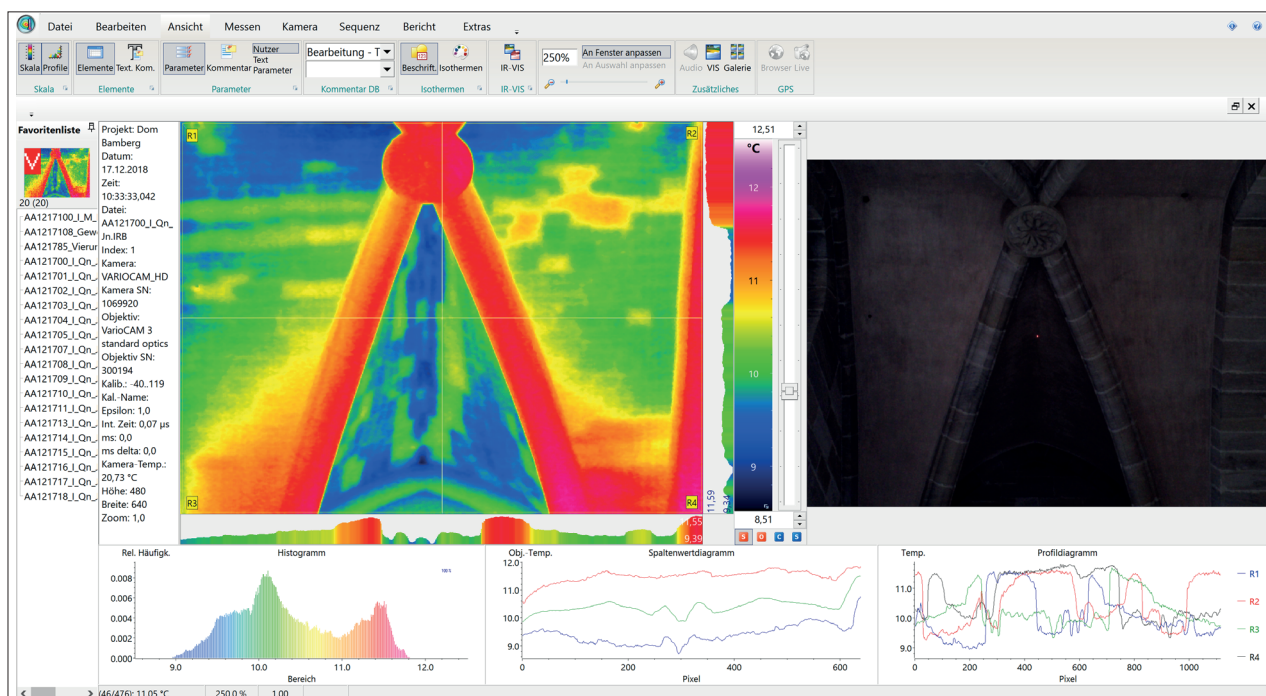
Vor der eigentlichen Untersuchung sind zunächst die Originaldaten zu kontrollieren. Da es sich bei komplexen Untersuchungsobjekten häufig um recht umfangreiche Datensätze handelt, ist unbedingt auf eine konsistente Dateinamenvergabe und -Strukturierung zu achten. Zur Übersicht wird außerdem empfohlen, zunächst eine Galerieansicht aller Aufnahmen anzulegen (Abb. 1). Vergleichbar einem photographischen Kontaktabzug dient diese Galerieansicht zur ersten Zuordnung und Qualitätsbeurteilung der Aufnahmen. Bei sehr umfangreichen Untersuchungen hat es sich bewährt, für die verschiedenen Fragestellungen einzelne Galerieansichten mit den dafür relevanten Thermogrammen anzulegen.

Zu Beginn der Einzelbildauswertung muss die Arbeitsumgebung der Thermographiesoftware eingerichtet werden. Neben dem Thermogramm, der Falschfarbendarstellung der gemessenen radiometrischen Werte, muss immer die entsprechende Temperaturskala abgebildet sein. Thermogramme ohne Skalierungszuordnung sind schlecht lesbar und führen häufig zu Fehlinterpretationen. Ebenso wichtig ist die Abbildung der Photographie (VIS-Bild)¹ der aufgenommenen Szene.

Wie eingangs erwähnt, sind Thermographiesysteme mit eingebauter Digitalkamera zu bevorzugen. Für die Bauforschung sind diese parallel aufgenommenen thermographischen und photographischen Abbildungen äußerst hilfreich, zum Beispiel dann, wenn Detailaufnahmen gemacht wurden, die anhand des Thermogramms alleine nicht mehr eindeutig am Bauwerk verortet werden können. Die VIS-Abbildung erleichtert in vielen Fällen die Zuordnung der Aufnahmepositionen. Vor allem aber können über den Abgleich zwischen thermographischer und photographischer Abbildung Einzelbefunde besser referenziert und interpretiert werden (siehe Kapitel 6).

Neben den für Bauforschungsthermographie zwingend notwendigen Elementen Thermogramm, Temperaturskala und VIS-Abbildung bietet viele Softwarelösungen noch zusätzliche Analyseinstrumente wie Messwerttabellen, Histogramme, Profildiagramme, Spaltenwert- oder Zeitdiagramme etc. Diese können für spezifische Fragestellungen zusätzliche Informationen abbilden, für die meisten bauforscherischen Thermographieuntersuchungen spielen sie jedoch keine Rolle. (Abb. 2)

Hilfreicher für die Bauforschungsthermographie sind die Parameterlisten, die in vielen Softwarelösungen zusätzlich neben dem Thermogramm eingeblendet werden können. Sie enthalten sowohl die Kame-



2 Arbeitsumgebung für die Einzelbildauswertung mit Thermogramm, VIS-Bild, Temperaturskala, Parameterliste und verschiedenen Diagrammoptionen.

rametadaten, wie Aufnahmedatum, Sensorgröße, Brennweite, Kalibrierbereich etc. als auch zusätzlich Messgrößen wie Luftfeuchte, Umgebungstemperatur, Kamertemperatur und ähnliches. Diese Werte sind vor allem für die Einschätzung der Messbedingungen und eine mögliche Reproduzierbarkeit der Messungen wichtig.

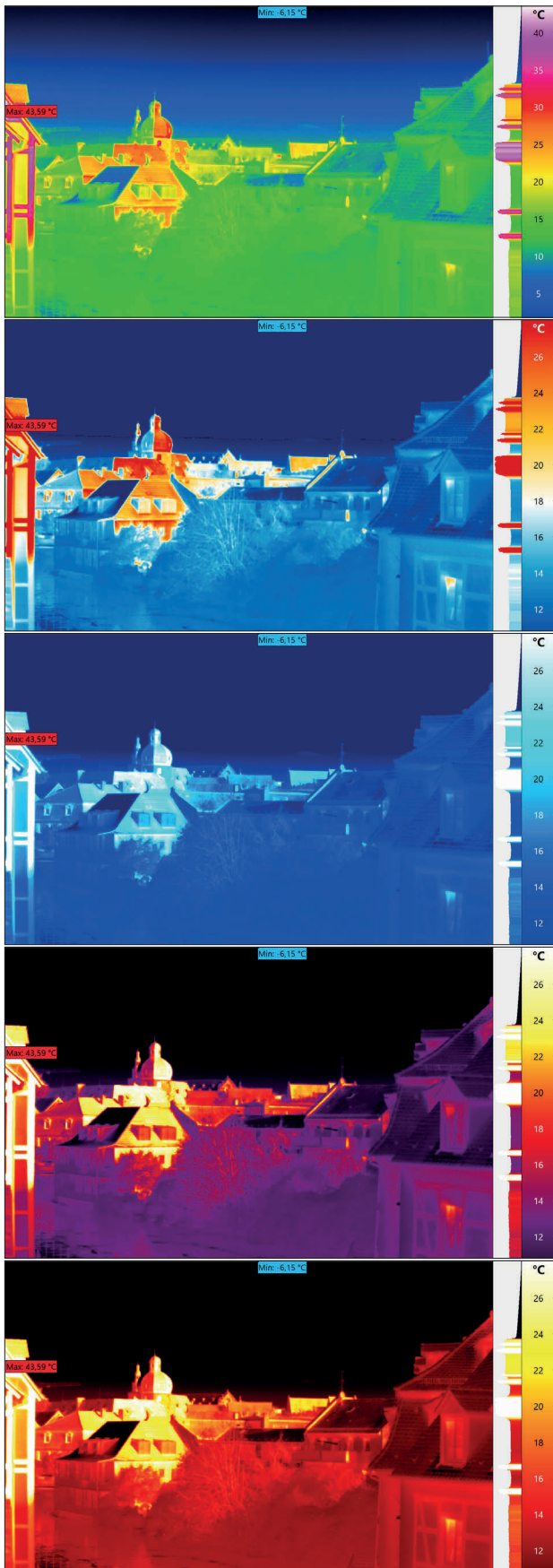
Je nach Art der Weiterverarbeitung der ausgewerteten Thermogramme, als reine Abbildungen für Berichte mit schriftlichen Interpretationen oder als Grundlage zur Befunddiskussion mit anderen Bauforschungsmethoden, bietet sich auch eine zusätzliche Kommentarfunktion direkt in der thermographischen Auswertung an. Hier können beispielsweise Angaben zum Untersuchungsobjekt und erste Interpretationen direkt in den Abbildungen vermerkt werden.

Farbskala und Farbpaletten

Für die Wahl der Farbskala sollten einige Vorüberlegungen angestellt werden. Die meisten Thermographiesysteme und Softwarelösungen bieten mittlerweile eine Vielzahl von Farbpaletten an. Entsprechend ihrer variierenden Kontrastumfänge können sich die Darstellungsergebnisse eines Thermogramms enorm unterscheiden. (Abb. 4). Dadurch werden die Thermogramminterpretationen manipulierbar, bestimmte als kalt oder warm wahrgenommene Farbenzuordnungen können übersteigerte oder zu stark reduzierte thermische Sachverhalte suggerieren und die Einschätzung

der Betrachter:innen beeinflussen. Hinzu kommt, dass Farben häufig auch emotional bewertet werden, rote Bereiche werden als negativer wahrgenommen als grüne, Skalierungen im rötlichen Bereich können als Warnsignale missverstanden werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass durch die freie Definition der Temperaturober- und Untergrenzen die Thermogramme bei sehr kleinen Skalierungen oft übermäßig „dramatisch“ wirken können (Abb. 4). Um diesen subjektiven Farbwahrnehmungen entgegenzuwirken, sollten Thermogramm immer mit einer eindeutigen Temperaturwert- und Skalierungszuordnung beschreiben werden. Zusätzlich kann auf Temperaturminimum und -maximum oder die Werte der Temperaturspanne hingewiesen werden. Außerdem sollte die Wahl der jeweiligen Farbpalette dargelegt werden. Zur Darstellung spezifischer Details wird empfohlen, zuerst Übersichtsaufnahmen mit (moderaten) Standardtemperaturspannen zu machen und dann das Untersuchungsdetail in der bestmöglichen Temperaturspanne abzubilden.² Bei Fokussierungen auf bestimmte Messregionen kann es zur Über- oder Untersteuerung mancher Bildbereiche kommen, diese werden dann vergleichbar einer Über- oder Unterbelichtung als weiße oder schwarze Bereiche außerhalb der Temperaturskala abgebildet. Trotz des lokalen Informationsverlustes sollten sie in der Auswertung ebenfalls beschrieben und ihr Zustandekommen erklärt werden.



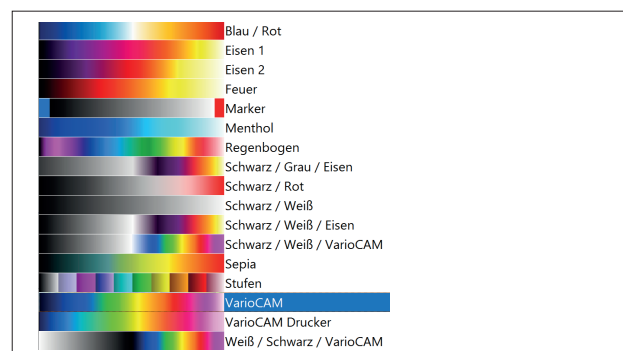
4 Beispiele für Farbpaletten und deren subjektiver Temperatureindruck bei gleichbleibender Temperaturskalierung.

Für die Bauforschungsthermographie hat sich die Verwendung möglichst umfangreicher Farbpaletten bewährt. Diese haben den Vorteil, dass jede Farbe nur für einen sehr kleinen Temperaturbereich steht und sich keine der Farben wiederholt. So können einerseits Mehrdeutigkeiten vermieden werden und andererseits schon kleinste Temperaturdifferenzen dargestellt werden. Da das menschliche Sehvermögen wesentlich besser Farbschattierungen als Helligkeitsstufen eines Farbtones unterscheiden kann, machen die Falschfarbenthermogramme vor allem kleine Details gut erkenn- und vor allem unterscheidbar.

Graustufenauswertung

Unabhängig von der Art der angestrebten Weiterverarbeitung wird für alle Bauforschungsthermogramme zusätzlich zur Falschfarbendarstellung dringend die Auswertung in Graustufen empfohlen. Es ist darauf zu achten, dass die verwendete Auswertungssoftware auf jeden Fall über eine Graustufenpalette verfügt. In dieser wird jedem Temperaturwert ein Helligkeitwert zugeordnet. Anders als durch die Falschfarbendarstellungen können hier zwar nicht alle Details besonders gut unterscheidbar dargestellt werden. Doch können die damit erzeugten Graustufendarstellungen vor allem radiometrische Kontraste deutlich feinstufiger und ohne Ablenkung der Farbwirkungen abbilden. Dies hat sich als äußerst hilfreich für die Bauforschungsthermographie erwiesen, wo das Hauptaugenmerk auf der Darstellung verdeckter Strukturen, material- und konstruktionsbedingter thermischer Kanten liegt.

Ein weiterer Vorteil der Graustufenthermogramme besteht darin, dass sie neutraler wirken und so die bereits erwähnten farbbezogenen Fehlinterpretationen vermieden oder zumindest verringert werden können. Im Optimalfall kann die zweifache Auswertung durch Vergleich der Falschfarben- und Graustufendarstellung noch zusätzliche Erkenntnisse bringen.



3 Beispiele für Farbpaletten.

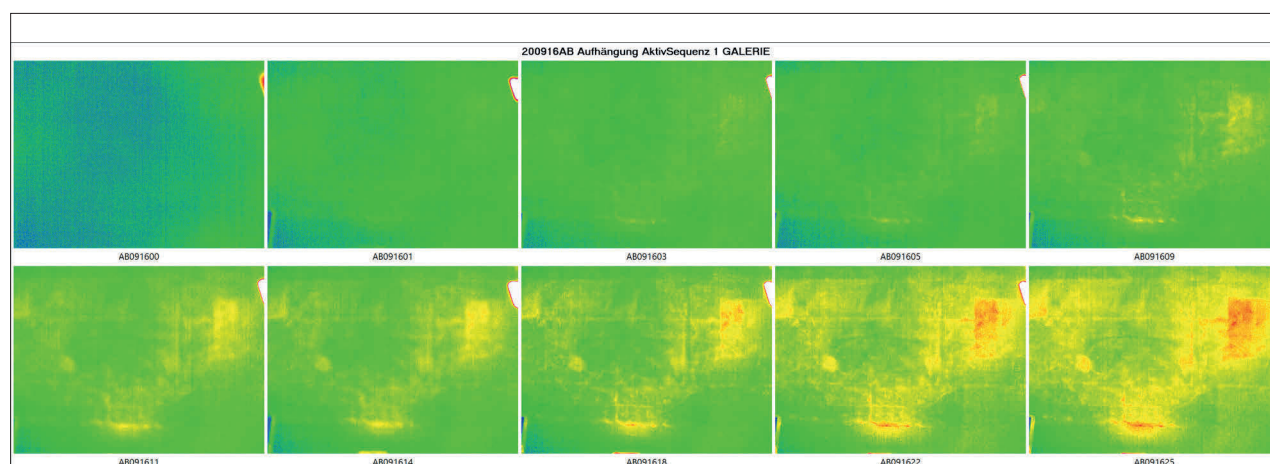


5 Graustufenauswertung: Neutrale Darstellungsvariante ohne suggestive Farbgebung.

Exkurs Auswertungsvarianten

In komplexen baulichen Befundsituationen oder bei unklaren thermischen Befunden kann eine Überlagerung von Mehrfach- oder Sequenzaufnahmen zusätzliche Informationen generieren oder einzelne Details schärfer darstellen. Hierfür werden bei unbedingt gleichbleibenden Kameraeinstellungen mehrere Einzelaufnahmen unmittelbar hintereinander gemacht. Alternativ bieten viele Kamerasysteme auch die Möglichkeit, automatisierte Sequenzaufnahmen mit gleichbleibenden zeitlichen Abständen abzuspeichern. Erfahrungsgemäß genügen in der Bauforschungsthermographie mit ihren thermisch trägen Baustoffen zwei bis zehn Einzelaufnahmen, eine wesentlich größere Anzahl von Einzelaufnahmen bringt keine entscheidende Verbesserung. Bei aktiven thermographischen Verfahren können dagegen je nach Anregungsart und thermischer Reaktionsfähigkeit mehrere hundert Einzelaufnahmen in Sequenzen dokumentiert werden. Diese Einzelaufnahmen werden dann mithilfe von Sequenzüberlagerungen über Mittelwert, Maximum,

Minimum oder Standardabweichung akkumuliert. Die resultierenden Differenzbilder oder Überlagerungen bieten bei geeigneten Messbedingungen kontrastreichere Darstellungen als die Einzelbilder. Eine weitere Auswertungsvariante besteht darin, die Einzelaufnahmen zu Bildfolgen zusammenzufassen, entweder als kurzes GIF oder als Videosequenz. Dieses Abspielen der Einzelaufnahmen in kurzen Zeitabständen ermöglicht eine Visualisierung kleinster thermographischer Unterschiede zwischen den einzelnen Thermogrammen. Bei aktiver Anregung werden so die Aufwärm- und Abkühlprozesse in ihren lokalen Verläufen dargestellt. Aber auch wenn keine dynamischen Veränderungsprozesse am Untersuchungsobjekt stattfinden, so kontrastieren die Bildfolgen dennoch die minimalen Unterschiede zwischen den Einzelaufnahmen und können so einen differenzierteren Eindruck einer komplexen oder unklaren Befundsituation vermitteln. (Ein ähnlicher Effekt entsteht auch beim schnellen Durchklicken von Einzelaufnahmen einer Serie.)



6 Auswertungsvariante: Aktive Thermographie mit optischer Anregung einer Wandoberfläche. Sequenzaufnahmen der Wandmalerei mit thermischen Signaturen der restaurierten Stellen, die sich im Verlauf der Anregung immer deutlicher abzeichnen.

Darstellung der Hintergrundinformationen

- Dokumentation der Umgebungsbedingungen
- Darstellung der Aufnahmesituation
- Beschreibung des durchgeführten Untersuchungsablaufs
- Allgemeine Angaben:
 - Fragestellung / Untersuchungsziel
 - Objektdatei: Adresse, Standortkoordinaten, Denkmalnummer (falls vorhanden)
 - Objektbeschreibung
 - Beschreibung der Baukonstruktion
 - Grundrisse zur Verortung d. Aufnahmepositionen
 - Innen- und Außentemperatur (auch die 12 vorhergehenden Stunden), Luftfeuchte, Windverhältnisse, Sonneneinstrahlung, Verschattungen
 - Raumklima: Raumtemperatur, Art der Heizung und Lüftung
 - Zeitpunkt der Messung
 - Angaben über das verwendete Thermographiesystem (techn. Parameter, Kameraeinstellungen)
 - Verweis auf beteiligte Thermograph:innen

Darstellung der Thermogramme

- Angepasste Temperaturspanne (ggf. Level und Span nachjustieren, übersteuerte Bereich korrigieren)
- Geeignete Farbpalette (am besten Falschfarben- u. Graustufendarstellung)
- Temperaturskala mit verbindlichen Einheiten (generell eine einheitliche Temperaturskala für vergleichbare Messbereiche bevorzugen, bei großen Unterschieden der Umgebungsbedingungen (z.B. verschattete Nord- u. sonnenbeschienene Südfassade) diese natürlich neu anpassen)
- VIS-Photo (mit vergleichbarem Ausschnitt der Messsituation)
- Kamera- und Messparameter als Metadaten
- Ggf. Kennzeichnung von thermischen Auffälligkeiten
- weitergehende Analysemöglichkeiten (abh. von Fragestellung):
 - Temperaturprofile
 - Isothermen
 - Flächenanteile von Strahlungswerten
 - mittlere Oberflächen-Temperaturen
 - Temperaturdifferenzen zwischen Wärmebildern
 - Verknüpfung mit weiteren Messgrößen (Materialart, Materialkenngrößen, Materialzustand, etc.)

Messbericht/Untersuchungsprotokoll

Ergänzend zu den Thermogrammauswertungen sollte immer ein Untersuchungsbericht oder zumindest ein Messprotokoll angefertigt werden.³ Nur so können die thermographischen Befunde im Kontext der spezifischen Umgebungsbedingungen interpretiert und gegebenenfalls reproduziert werden. Neben allgemeinen technischen und methodischen Hinweisen zur Thermographie sollte auch dargelegt werden, dass Thermogramme aufgrund instationärer Temperaturverhältnisse und variierender Umgebungsbedingungen als Momentaufnahme interpretiert werden. Ein Untersuchungsbericht beinhaltet weiterhin die folgenden Aspekte:

5.2 Befundansprache und -Interpretation in Thermogrammen

Der Begriff Befund umfasst in der Bauforschung das Feststellen und Abgrenzen eines objekt-, konstruktions- oder materialspezifischen Phänomens, einer Gegebenheit, einer Veränderung oder Anomalie in einem baulichen Kontext, auf deren Grundlage Erkenntnisse zur Entstehung, Entwicklung und Veränderung des Bauwerks abgeleitet werden können.

Die Befunderhebung folgt einer fach- und situationsspezifischen Methodik und erfolgt unter Nutzung bewährter Untersuchungstechniken und Hilfsmittel. Die Ergebnisse der Befunduntersuchung werden bildlich und schriftlich dokumentiert. Entscheidend hierfür ist eine systematische und nachvollziehbare Befundansprache auf der Grundlage einer verbindlichen Terminologie und übergeordneten Befundkategorien. Befund und Interpretation sind dabei klar zu trennen. Eine umfassende Befunddokumentation und Befundansprache besteht aus der hinreichenden Befundbeschreibung, seiner Einordnung in eine Befundsystematik und Abgrenzung zu den anderen Befunden darin. In diesem Kontext kann dann schließlich auch die Befundauswertung, die Interpretation und die Beurteilung der Befundbedeutung stattfinden.

Die klare Trennung von Befundansprache und Befundinterpretation ist auch für thermographische Untersuchungen in der Bauforschung wichtig. Vor allem, da Thermographie keine unmittelbare Methode zur Befundabbildung, sondern zunächst nur eine Technik zur Visualisierung von Strahlungsverteilung und ortsaufgelösten radiometrischen Werten ist. Ebenso ist ein Thermogramm allein noch keine Befunddokumentation, sondern ein auszuwertendes und zu interpretierendes Zwischenprodukt. Thermogramme sind niemals selbsterklärend! Die Thermogramme komplexer Befundsituationen sind oft eine mehrdimensionale

Überlagerung thermischer Phänomene unterschiedlicher Ursachen. Diese Vielschichtigkeit an Informationen muss sauber analysiert und differenziert werden, die einzelnen thermischen Phänomene müssen Befunden und bauhistorischen Phasen zugeordnet werden.

Die Aussagekraft thermographischer Untersuchungen reicht von einer bloßen Oberflächenvisualisierung bis hin zur komplexen Ausdifferenzierung konstruktiver Zusammenhänge am Bauwerk. Zur eigentlichen Auswertung der Thermogramme gehören unter anderem die Wahl eines geeigneten Bildausschnittes und einer Farbpalette, die Temperaturspanne und Temperaturskala sowie das zugehörige VIS-Bild (s. Kapitel 5.1). Danach folgt die systematische Befundansprache der thermographierten Inhalte. Zur Interpretation gehören die Einordnung und vor allem die fundierte Bewertung der Befundbedeutung für den bauforscherischen Gesamtzusammenhang. Die Interpretation thermographischer Ergebnisse erfordert sowohl Hintergrundwissen zum untersuchten Objekt, als auch Hintergrundwissen zur Technik der Thermographie und zu den jeweiligen Umgebungsbedingungen. Weiterhin hilfreich für eine möglichst umfassende Interpretation sind übergeordnete Befundkategorien und Befundsystematisierungen sowie die Vergleichswerte und Erfahrungen aus Sammlungen typischer, bauforschungsspezifischer Thermographiebefunde. Ähnlich wie in einer Schlüsselbefundsammlung können Einzelbefunde über Querbezüge verglichen und gebäudeunabhängig in Befundkategorien abgeglichen werden.

Wie bei allen anderen Techniken der Bauwerksanalyse gilt: Keine ‚Fernerkundung‘ des Untersuchungs-

objektes ausschließlich durch die Linse des Kamerasystems. Die Prämisse der Bauforschung bleibt die dezidierte Detailuntersuchung vor Ort. Sämtliche Befunde aus technischen Analysen müssen darin eingeordnet werden. Eine profunde Bauforschungsthermographie erfordert die Verknüpfung technischer und inhaltlicher Expertise.

Thermographische Bauforschungsbefunde:

- Befunderhebung mit fachspezifischer Methodik und angepassten Untersuchungstechniken und -mitteln
- Hinreichende Befundbeschreibung und Einordnung in Befundsystematik
- Klare Trennung von Befundansprache und Befundinterpretation
- Einordnung der IRT-Daten in den Untersuchungskontext und die weiteren Bauforschungsbefunde
- Integration der IRT-Daten in Bildpläne, BIM-Systemen, etc., Überlagerung mit weiteren Bauforschungsergebnissen
- Klare Bewertung der Aussagefähigkeit und Einschränkungen thermographischer Visualisierungen
- Engführung historischer und technischer Bauforschung, Verknüpfung inhaltlicher und technischer Expertise

Befundanalyse

Befund:

Feststellen und Abgrenzen eines objekt-, konstruktions- oder materialspezifischen Phänomens, einer Gegebenheit, einer Veränderung oder Anomalie in einem baulichen Kontext

Befundansprache:

Systematische und nachvollziehbare Benennung der Befunde auf Grundlage einer verbindlichen Terminologie und übergeordneten Befundkategorien

Befundbeschreibung:

Detaillierte Beschreibung einzelner Befundaspekte und deren Zusammenhänge, Darstellung des Befundkontextes

Befundinterpretation

Befundauswertung:

Einordnung in Befundsystematik, Verknüpfung und Abgrenzung der verschiedenen Befunde

Einordnung in baulichen Kontext, Materialbeschaffenheit, Bearbeitung und übergeordnetes Gefüge

Einordnung in zeitlichen Kontext, Aufstellung einer relative Chronologie und Bauphasenabfolge

Befundbeurteilung:

Einschätzung der Befundbedeutung, Klassifizierung von Schlüsselbefunden

Befunde als Grundlage für die Rekonstruktion der Entstehung, Entwicklung und Veränderung des Bauwerks

5.3 Grenzen der Infrarotthermographie für die Bauforschung

Die Leistungsfähigkeit der Untersuchungsmethode Thermographie ist im Bauforschungskontext natürlich begrenzt. Zu einer belastbaren Interpretation thermographischer Daten gehört daher immer auch der Hinweis auf diese Grenzen und damit verbundene Einschränkungen.

Grundsätzlich muss die Thermographie als Analysetechnik für die infrarote Strahlungsverteilung an Objektoberflächen betrachtet werden. Durch bauteilinterne Wärmeströme können in begrenztem Umfang auch oberflächennahe Strukturen detektiert werden. Eine Begrenzung der noch detektierbaren Tiefe hängt vom Material, der Oberflächenbeschaffenheit und den Temperaturdifferenzen im Bauteil ab. Im Bereich historischer Gebäude und Kulturgüter beschränkt sich die Tiefe noch darstellbarer Strukturen auf wenige Zentimeter. Aber auch bei geringeren Überdeckungen sind den Möglichkeiten der Thermographie häufig Grenzen gesetzt. Beispielsweise durch zu geringe thermische Differenzen der verschiedenen Bauteile, zu ähnliche Wärmeleitwerte der Baustoffe oder eine zu homogene Wärmeverteilung durch das Bauteil hindurch. Diese Faktoren minimieren die individuellen thermischen Signaturen soweit, dass sie mit einer Thermographiekamera thermisch oder geometrisch nicht mehr aufgelöst werden können. Gleiches gilt für stehende Luftschichten in Bauteilen, sei es hinter vorgehängten Fassadenteilen, Dämmschichten oder einfach in konstruktiven Hohlräumen und Vorsprüngen. Diese Luftschichten puffern bauteilinterne Wärmeströme und verhindern deren direkten Durchgang bis zur Fasadenoberfläche. Im Thermogramm zeigen sich diese Konstruktionen oberflächlich als sehr gleichförmige, monotone Temperaturverteilungen.

Ebenfalls problematisch sind reflektierende Oberflächen wie beispielsweise Glasscheiben, Metallbauteile oder auch sehr glatt polierte Natursteinbauteile. Hier wird das Eigenstrahlungsverhalten stark überlagert von Reflexionen der Umgebungsstrahlung, so dass keine zuverlässigen Temperaturwerte mehr ermittelt werden können.

Darüber hinaus ist die Thermographie in hohem Maße abhängig von den Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchte und Luftbewegung. Schwanken diese besonders stark, verändern sich die Untersuchungsbedingungen zu schnell, um aus den Thermogrammen noch verlässlich die eindeutigen Ursachen für einzelne thermische Signaturen ableiten zu können. Die thermischen Phänomene überlagern sich in diesen Fällen zu sehr.

Limitierende Faktoren der Bauforschungs-IRT:

- Strukturen/Bauteile in zu großer Tiefe, zu viel Überdeckung
- Zu wenig differierendes thermisches Verhalten der verschiedenen Materialien, homogene Wärmeverteilung über Bauteile hinweg
- Thermische Pufferung durch stehende Luftschichten, vorgehängte Fassadenteile, Dämmungen
- Stark reflektierende Oberflächen
- Stark instationäre Randbedingungen, rasch wechselnde Umgebungsbedingungen

Zu den genannten limitierenden Faktoren und dem Hintergrund der nur quasistationären Zustände bei Messungen in situ kommt noch hinzu, dass Messbedingungen kaum je exakt reproduziert werden können, vor allem nicht an den häufig heterogenen historischen Materialien und Gefügen. Folglich bleibt jede Thermographie eine Einzeluntersuchung, jedes Thermogramm die Darstellung eines momentanen Zustandes mit nur begrenzten Möglichkeiten für umfassende Vergleichsmessungen. Dementsprechend sind präzise und belastbare Schlussfolgerungen zu vielen Aspekten der konventionellen Bauthermographie nur eingeschränkt oder unter Zuhilfenahme ergänzender Untersuchungstechniken möglich.

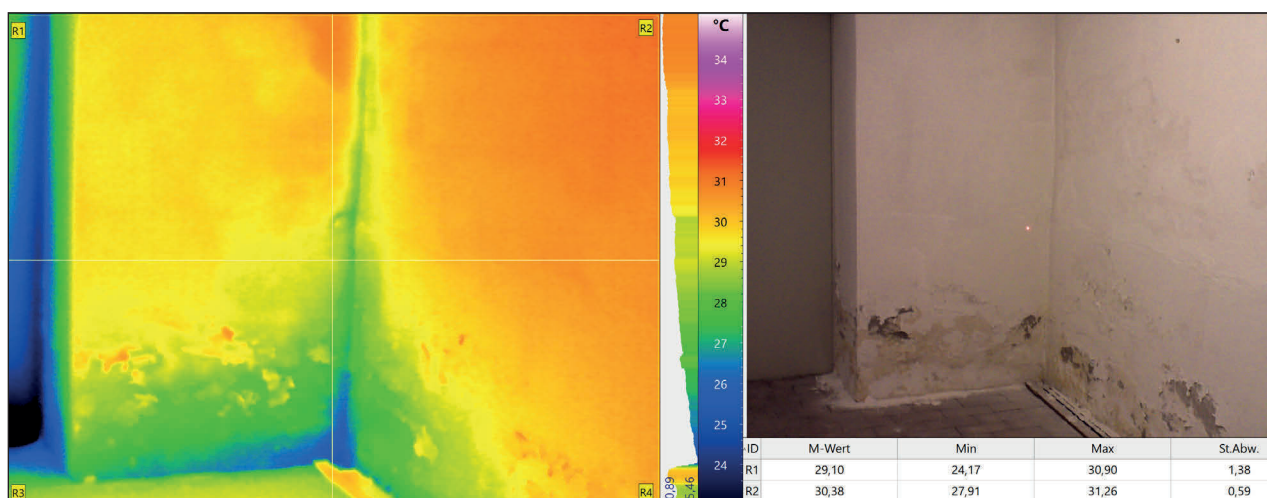
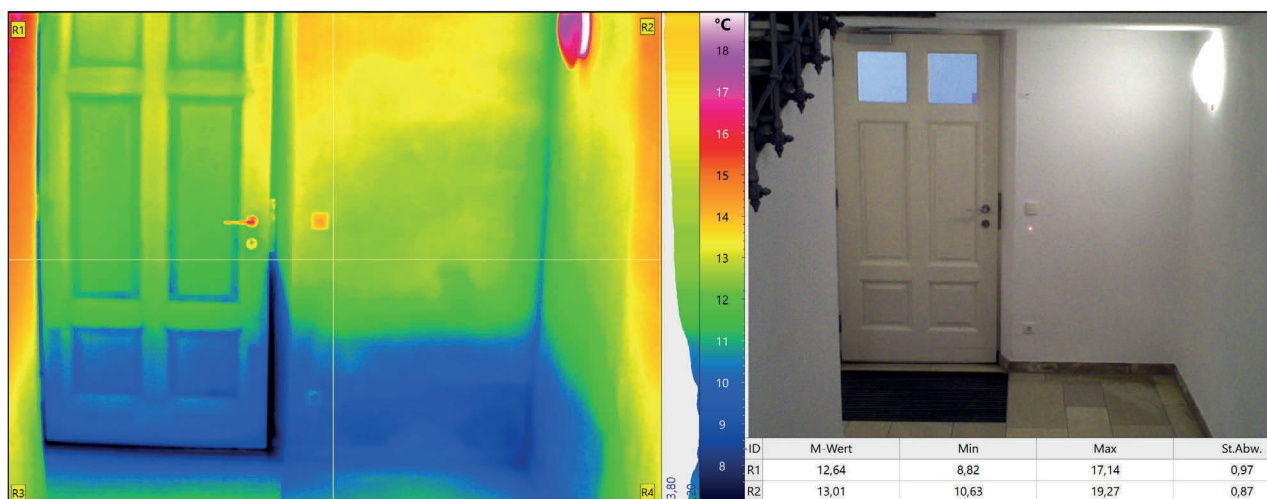
Nur eingeschränkte Aussagen zu:

- Exakte Bestimmung von Absoluttemperaturen
- Quantitative Bestimmung bauphysikalischer Parameter wie Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Transmissionswärmeverluste, Dämmwerte o.ä.
- Quantifizierung von Energiebedarf / Energieverbrauch
- Beurteilung von Bauteilen mit geringem Emissionsgrad
- Beurteilung von hinterlüfteten oder gedämmten Bauteilen
- Beurteilung von Bauteilqualitäten, Tauglichkeiten von Konstruktionen
- Rekonstruktionen individueller Schadensursachen wie Risse, Materialverlust, Konstruktionsversagen, Durchfeuchtung, Salzschäden, biogener Bewuchs

Feuchtigkeit in Thermogrammen

Feuchte Baustoffe weisen veränderte Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten auf. Grundsätzlich gilt: Feuchtigkeit in Baustoffen vermindert deren Dämmwirkung, da der Anteil der luftgefüllten Hohlräume im Baustoff durch Wassereintritt reduziert wird. Je weniger Hohlräume im Baustoff, desto geringer die Dämmwirkung und desto höher die Wärmeleitfähigkeit. Gleichzeitig gilt: Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser führt dazu, dass Baustoffe mit erhöhtem Feuchteanteil thermisch träger reagieren, sich bei solarer Anregung also langsamer erwärmen und auch langsamer wieder auskühlen. Weiterhin ist zu beachten, dass Bauteiloberflächen, an denen Feuchte verdunstet, kälter erscheinen, da die benötigte Energie für den Verdunstungsprozess der Umgebung entzogen wird.⁴ Diese drei feuchtebedingten thermischen Phänomene überlagern sich an Bauteiloberflächen. Außerdem sind sie stark von den jeweiligen Umgebungsbedingun-

gen abhängig. Je nach Temperaturdifferenz zwischen Bauteilinnen- und Außenseite, Luftbewegungen und Sonneneinstrahlung verändert sich ihr thermisches Verhalten im Tagesverlauf. Auch erzeugen unterschiedliche Anteile der Durchfeuchtung variierende thermische Signaturen. Die feuchtebedingten Veränderungen lokaler Wärmeströme lassen sich zwar gut thermographieren.⁵ Ihre korrekte Interpretation ist dagegen sehr komplex, da sich die verschiedenen feuchtebedingten Phänomene häufig überlagern und sich deren Ursachen allein aus thermographischen Befunden nicht eindeutig rekonstruieren lassen. Dies gilt vor allem dann, wenn die Eintrittsstellen von Wasser in das Bauteil und die thermische Signatur der Feuchtigkeitsverteilung nicht deckungsgleich sind. Weiterhin ist zu beachten, dass mit thermographischen Visualisierungen zwar Durchfeuchtungshorizonte abgebildet werden können, nicht aber der Feuchtegehalt gemessen werden kann. Absolute Werte für Durchfeuchtungen



7 Visualisierung von Feuchtigkeit in Thermogrammen. Darstellung der Innenseiten der durchfeuchteten Sockelzonen.

können nur mit direkten Feuchtigkeitsmessverfahren ermittelt werden.⁶

Die meisten historischen Baumaterialien wie Naturstein, Backstein, Holz oder Lehm eignen sich gut für thermographische Untersuchungen. Zwei entscheidende Ausnahmen bilden Glas und Metalle. Aufgrund ihrer meist sehr glatten Oberflächenbeschaffenheit unterscheidet sich ihr Reflexions- und Emissionsverhalten deutlich von dem anderer Baustoffe mit poröseren Oberflächen. Auch zeigen sie ein stark abweichendes thermisches Verhalten bedingt durch große Unterschiede in der spezifischen Wärmekapazität und der jeweiligen Wärmeleitfähigkeit.

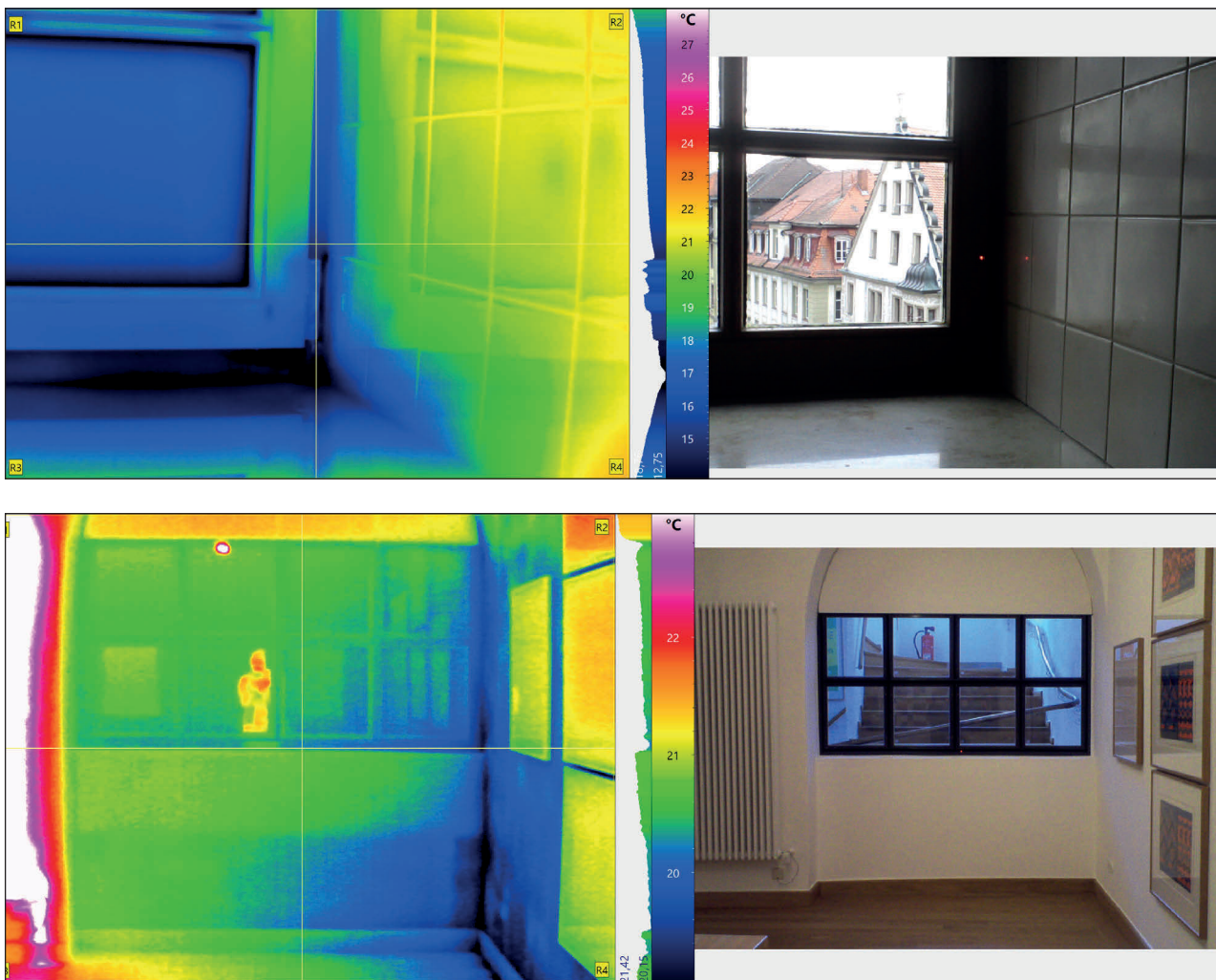
Fensterbauteile in Thermogrammen

Fenster als besonders häufige und in der Regel gleichmäßig über die Fassadenfläche verteilte Bauteile erweisen sich immer wieder als problematisch für thermographische Aufnahmen. Glasscheiben reflektieren

je nach Aufnahmewinkel erhebliche Anteile der Umgebungstrahlung. Sie bilden damit nicht den tatsächlichen lokalen Wärmestrom ab, sondern vielmehr die Temperaturwerte einer vielschichtigen Überlagerung verschiedener Globalstrahlungsanteile. In Thermogrammen wirken sie daher häufig übersteuert oder spreizen unnötig die Temperaturskala, wenn diese an den vollen Temperaturumfang der Aufnahmen angepasst wird (Abb. 8). Zur präzisen thermographischen Erfassung müssen die Glasanteile daher separat mit entsprechenden Emissionsgraden untersucht werden.⁷

Metallbauteile in Thermogrammen

Unter den Baustoffen bilden Metalle eine weitere Ausnahme. Ihr Strahlungsverhalten ist stark abhängig von Betrachtungswinkel beziehungsweise Messwinkel und Wellenlänge der Strahlung. Die Oberflächenbeschaffenheit der Metalle, glatt oder rau, oxidiert oder verschmutzt, beeinflusst ihr Strahlungsverhalten eben-

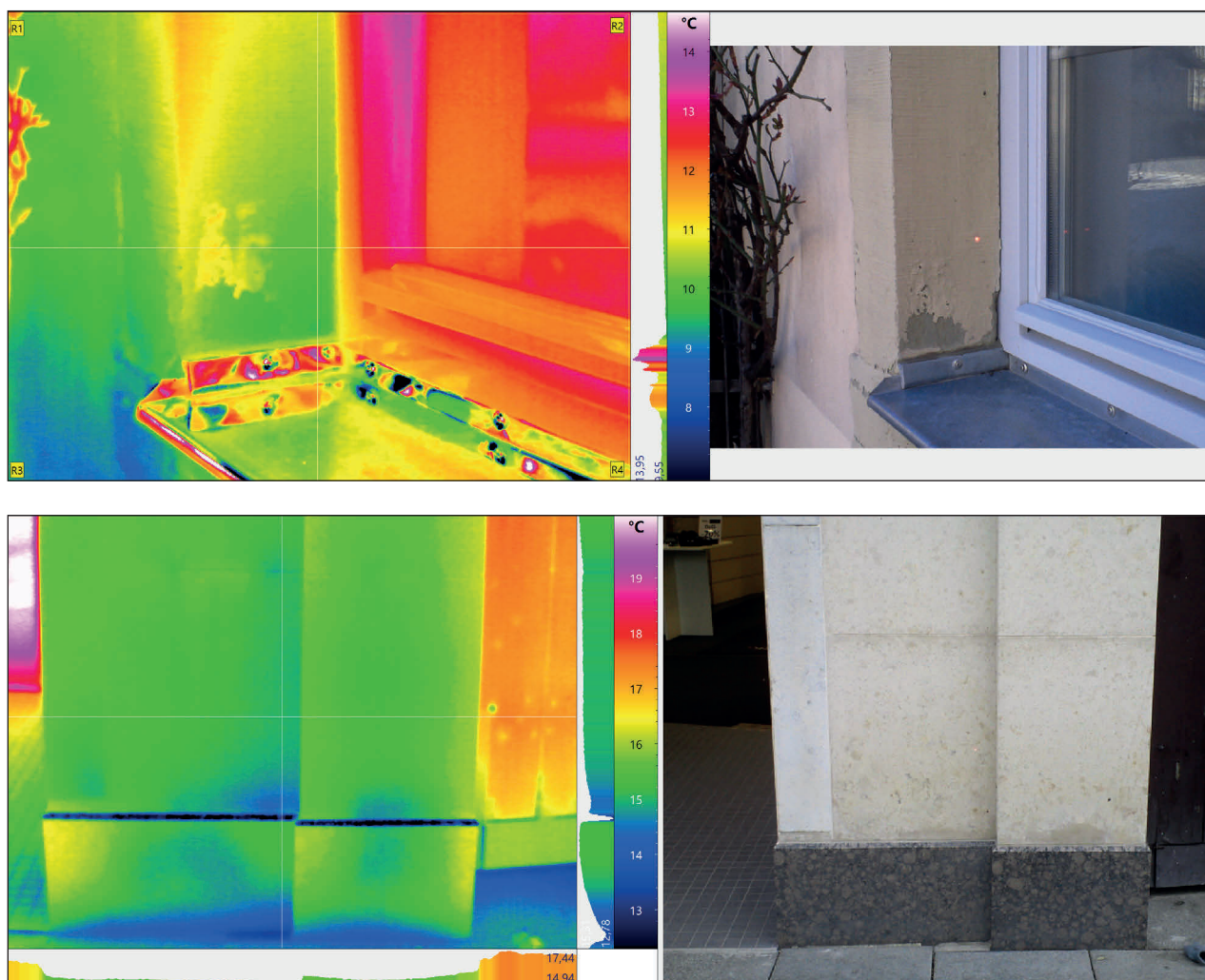


8 Reflexionsphänomene in Thermogrammen. Oben: Spiegelung des Fensterflügels in den Fliesen der Laibung und der polierten Steinplatte des Fenstersimses. Unten: Spiegelung der Autorin in einer innenliegenden Festverglasung.

falls maßgeblich. Metallthermographie ist daher ein separater Bereich thermographischer Untersuchungsmethoden. Entscheidend sind hier präzise ermittelte spezifische Emissionsgrade oder - wenn möglich - geeignete Oberflächenbeschichtungen aus Anstrichen oder Klebebändern mit hohem Emissionsgrad.

Da der Anteil der Metalloberflächen in der Bau-forschungsthermographie verschwindend gering ist, bringen individuelle Messungen dieser Oberflächen meist keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Die radiometrische Untersuchung von Bauteilen mit sichtbaren Metalloberflächen wie Metallbeschläge, -leisten oder Schrauben und Nägel kann daher meist vernachlässigt werden.⁸ Bei Übersichtsaufnahmen wie Fassadenansichten wird sich nicht vermeiden lassen, dass Metallbauteile mit im Thermogramm dargestellt werden. Sie wirken häufig übersteuert und erscheinen als lokale Hotspots (Abb. 9). Diese Temperaturwerte sind jedoch die Folge der radiometrischen Eigenheiten

von Metalloberflächen und dürfen nicht als reale Temperaturwerte interpretiert werden. Diese Ausnahme gilt nur für Metallbauteile mit sichtbaren Oberflächen. Verdeckte, überputzte oder versenkte Metallbauteile wie Anker, Schlaudern, Verbindungsmittel können bei geeigneten Bedingungen aufgrund ihrer zur Umgebung unterschiedlichen Wärmekapazität thermographisch geortet werden.



9 Reflexionsphänomene in Thermogrammen. Oben: Spiegelung der Randaufkantung der Verblechung, im Thermogramm wirkt diese aufgedoppelt. Unten: Multiple Spiegelungen in einer polierten Natursteinverkleidung.

- 1 VIS-Bild steht für visuelle Abbildung und meint die mit einer digitalen Photographiekamera aufgenommene Darstellung des Untersuchungsobjektes im sichtbaren (visuellen) Bereich des elektromagnetischen Spektrums in Abgrenzung zum infraroten Wellenlängenbereich.
- 2 FOUAD (2010) S. 284 f.
- 3 Vgl. WTA e.V. (2018) S. 19.
- 4 Zur Thermographie von feuchten Materialien und Bauteilen siehe auch WAGNER (2011) S. 105 f.
- 5 Einen detaillierten Einblick in die Infrarotthermographie von Feuchte bieten Barreira, Eva / Almeida, Ricardo M.S.F. (2019): *Infrared Thermography for Building Moisture Inspection*, Cham. Beschreibungen von Feuchte-Phänomenen in Thermogrammen bietet FOUAD (2010) S.310 f.
- 6 Vgl. WTA e.V. (2018) S.17.
- 7 FOUAD (2010) S. 301. und FOUAD (2017) S. 286 und ebd. S. 322 f.
- 8 Dies gilt natürlich nicht für eine vollständige bauforscherische Untersuchung. Für historische Metalle sind jedoch statt der Thermographie andere Untersuchungsmethoden ergiebiger. Vgl. hierzu Bellendorf, Paul (2007). *Metallene Grabplatten aus Franken und Thüringen aus dem 15. bis 18. Jahrhundert - eine interdisziplinäre Studie zum Denkmalbestand und seiner Gefährdung durch Umwelteinflüsse*. Dissertation, Universität Bamberg.

6. Thermogramm-Sammlung: Thermographieanwendungen in der Bauforschung

Die fachgerechte Anwendung von Infrarotthermographie in der Bauforschung erfordert sowohl technisches als auch objektspezifisches Hintergrundwissen. Vor allem aber sind anwendungsbezogene Erfahrungen in verschiedensten Untersuchungskontexten maßgebend für die Erstellung qualitativ hochwertiger Thermogramme. Je umfassender die Erfahrungen zum Reaktionsverhalten historischer Bausubstanz bei verschiedenen Umgebungsbedingungen, desto spezifischer kann die jeweilig Untersuchung auf den individuellen Untersuchungskontext angepasst und desto

besser kann das thermographische Potential gezielt ausgenutzt werden.

Zu diesem Zweck wurde die folgende Thermogramm-Sammlung zusammengestellt. Ihre Vielseitigkeit soll die Bandbreite thermographischer Anwendungsmöglichkeiten visualisieren. Ihre systematischen Beschreibungen sollen den Detailreichtum thermographischer Befunde abbilden und gleichzeitig anwendungsbezogene Erfahrungen vermitteln und Ansätze für vergleichbare Thermographieuntersuchungen bieten.

6. Thermographieanwendungen in der Bauforschung

- 6.1. Thermographie in Voruntersuchungen und Erstbegehungen
- 6.2. Baufugen und Bauphasen in Thermogrammen
- 6.3. Umbauten und Sanierungen in Thermogrammen
- 6.4. Holztragwerke in Thermogrammen
- 6.5. Gewölbekonstruktionen in Thermogrammen
- 6.6. Schäden und Reparaturen in Thermogrammen
- 6.7. Steinoberflächen in Thermogrammen

Zum Aufbau dieses Kapitels:

Die Thermographieanwendungen in der Bauforschung sind in sieben Unterkapitel gegliedert. Für eine bessere Übersicht und Vergleichbarkeit sind sie in einer gleichbleibenden Systematik dargestellt. Auf einer ersten Seite werden die verschiedenen Einsatzbereiche der jeweils dargestellten Thermographieanwendung aufgelistet, zusammenfassend beschrieben und die Beispielthermogramme dazu abgebildet.

Auf den folgenden Doppelseiten werden die Thermogramme von jeweils drei Fallbeispielen als Falschfarbendarstellung links und Graustufendarstellung rechts gegenübergestellt. In den Bildunterschriften wird für jedes Thermogrammpaar eine schrittweise Befundanalyse umrissen: Auf der linken Seite sind Befundansprache und Befundbeschreibung vermerkt, auf der rechten Hälfte der Doppelseite werden die wichtigsten Aspekte der Befundinterpretation zusammengefasst.

Befundanalyse

Befund:

Feststellen und Abgrenzen eines objekt-, konstruktions- oder materialspezifischen Phänomens, einer Gegebenheit, einer Veränderung oder Anomalie in einem baulichen Kontext

Befundansprache:

Systematische und nachvollziehbare Benennung der Befunde auf Grundlage einer verbindlichen Terminologie und übergeordneten Befundkategorien

Befundbeschreibung:

Detaillierte Beschreibung einzelner Befundaspekte und deren Zusammenhänge, Darstellung des Befundkontextes

Befundinterpretation

Befundauswertung:

Einordnung in Befundsystematik, Verknüpfung und Abgrenzung der verschiedenen Befunde

Einordnung in baulichen Kontext, Materialbeschaffenheit, Bearbeitung und übergeordnetes Gefüge

Einordnung in zeitlichen Kontext, Aufstellung einer relative Chronologie und Bauphasenabfolge

Befundbeurteilung:

Einschätzung der Befundbedeutung, Klassifizierung von Schlüsselbefunden

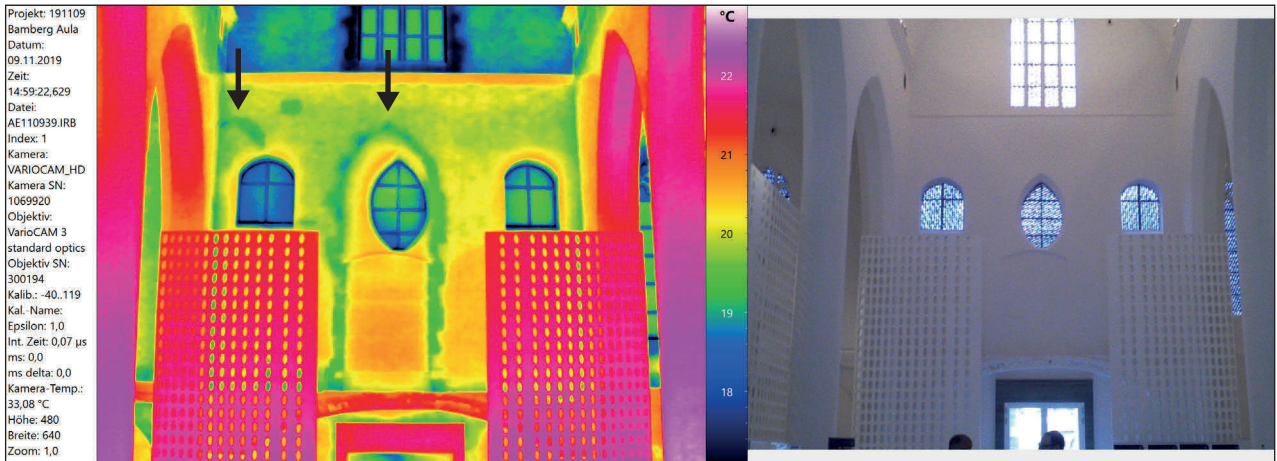
Befunde als Grundlage für die Rekonstruktion der Entstehung, Entwicklung und Veränderung des Bauwerks

Thermographie in Voruntersuchungen und Erstbegehungen

Objektüberblick
 Lokalisierung von Befundstellen für weitere Analysen
 Informationen zu Konstruktionen und Gefügen
 Indikatoren für Baufugen und Bauteilanschlüsse
 Lokalisierung von Materialwechsel
 Lokalisierung von Schwachstellen und Schäden
 Hinweise zu aktuellem Objektzustand

Als zerstörungsfreie und unmittelbar bildgebende Technik ist die Thermographie prädestiniert für Voruntersuchungen in der Bauforschung. IR-Kameras können einen schnellen und trotzdem umfassenden Überblick über das Untersuchungsobjekt verschaffen, wichtige Befundstellen, Materialübergänge, Gefügebestandteile, Veränderungen usw. lokalisieren und damit Stellen für weitere Befundanalysen festlegen. Gleiches gilt für Schadstellen und Materialveränderungen. Aus diesen Informationen ergeben sich dann erste Indizien für konstruktive Zusammenhänge, Bauabläufe und stratigraphische Schichten, die dann mit ergänzenden Detailanalysen abgeklärt werden können.

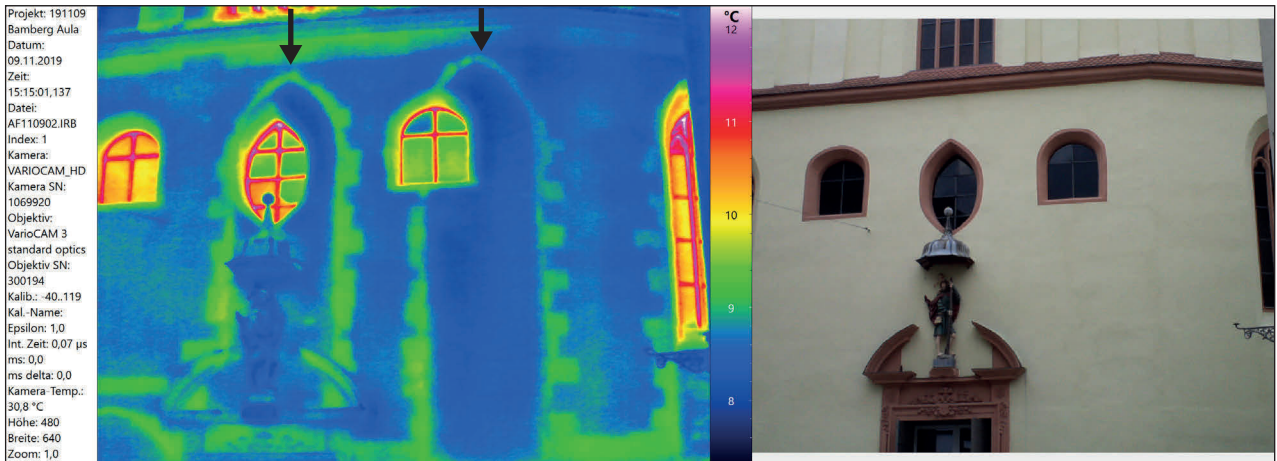




1 Innenseite einer Kirchenfassade.

Befundansprache: Das Thermogramm zeigt zwei spitzbogenförmige thermische Signaturen gleicher Größe.

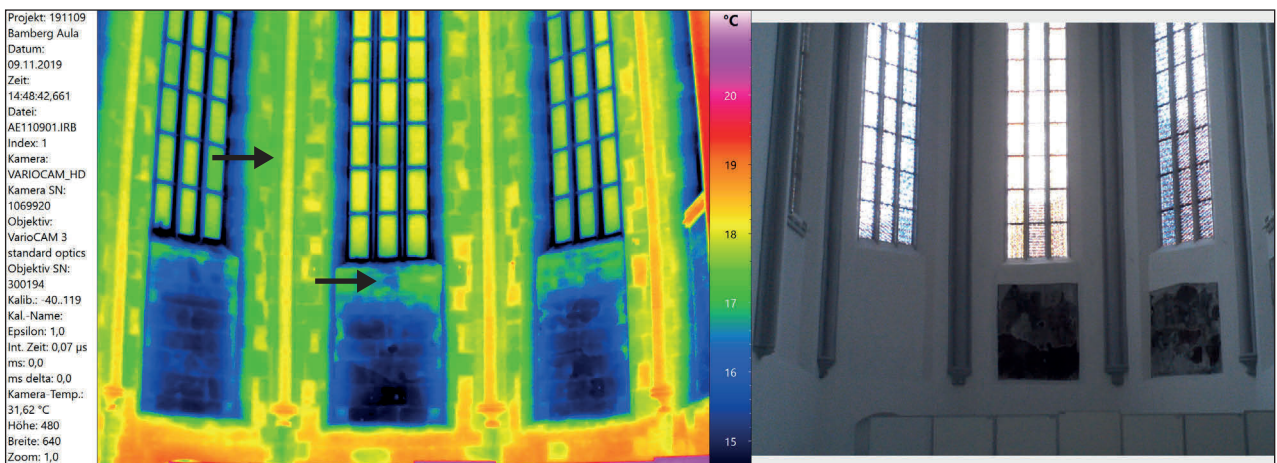
Befundbeschreibung: Die unregelmäßigen Steinformate der Bogenlaibungen zeichnen sich deutlich gegenüber dem umliegenden Mauerwerk ab. Sie reichen vom Türsturz bis über die Oberkante der heutigen kleinen Fenster und sind im Vergleich zu diesen leicht nach links versetzt.



2 Außenseite einer Kirchenfassade.

Befundansprache: Das Thermogramm zeigt die zwei spitzbogenförmigen thermischen Signaturen gleicher Größe und den Ansatz einer dritten rechts davon.

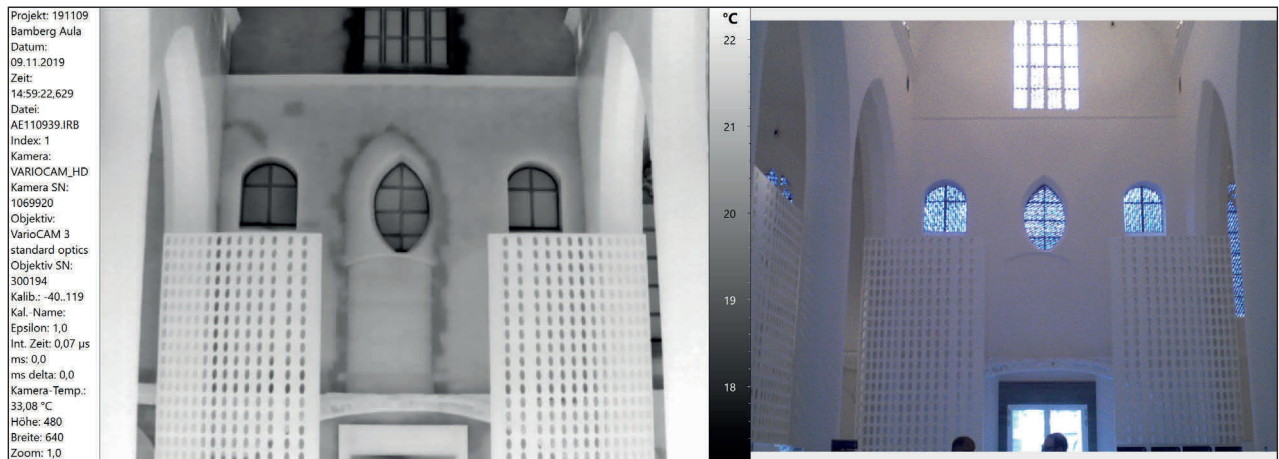
Befundbeschreibung: Alle drei Spitzbögen zeigen variierenden Steinformate in ihren Laibungen, die in das Mauerwerk einzahnen. Auf der rechten Seite wirken die Steinlagen regelmäßig alternierend, auf der linken Seite ist der Aufbau weniger systematisch.



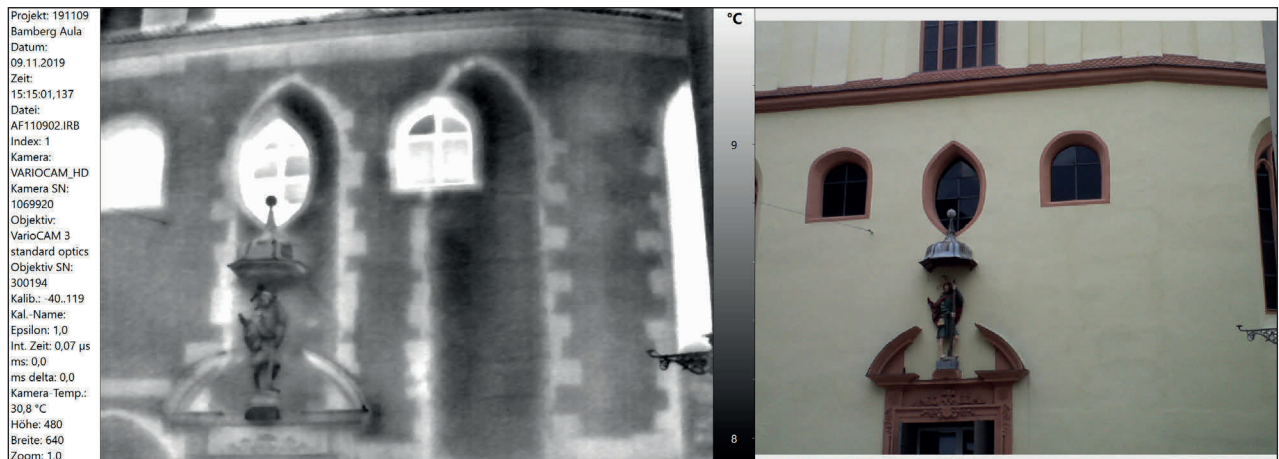
3 Innenansicht des Chorabschlusses.

Befundansprache: Steinformate und Mauerwerksgefüge unter Putz sind im Thermogramm deutlich erkennbar.

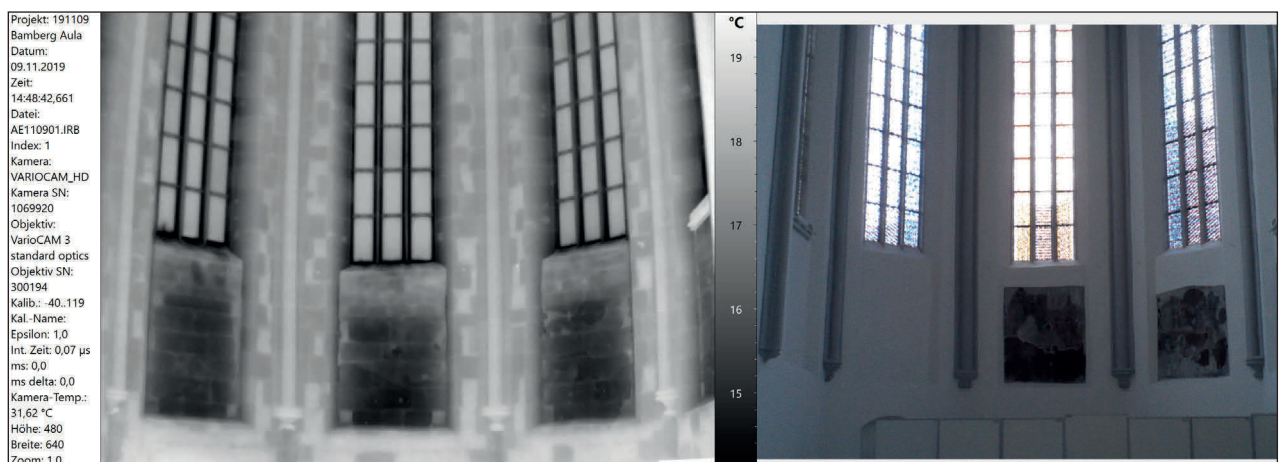
Befundbeschreibung: Deutlich unterschiedliches thermisches Verhalten der verschiedenen Mauerwerksbestandteile.



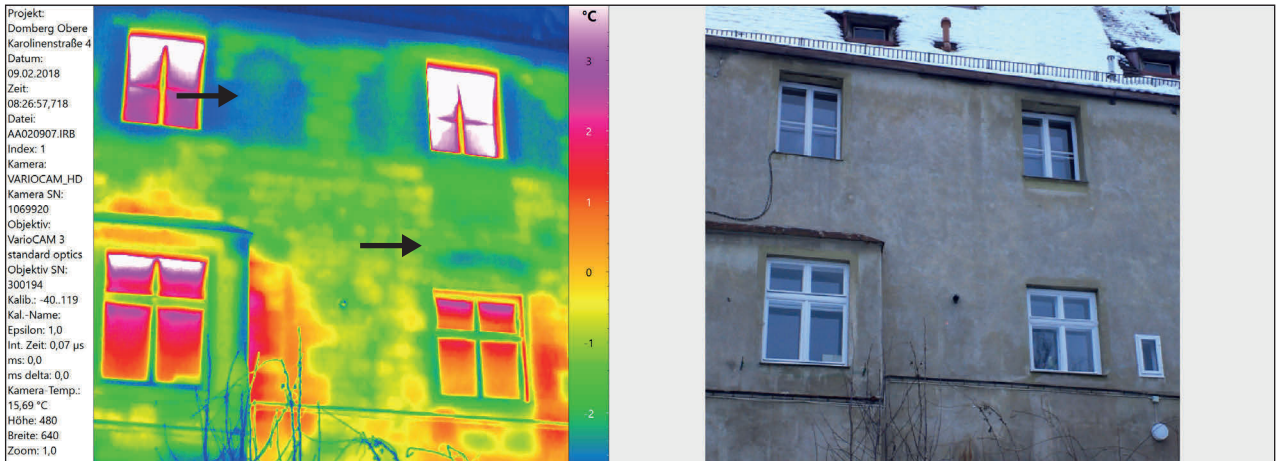
- 4 Befundinterpretation:** Die Bogenöffnungen scheinen nachträglich zugesetzt, die drei neueren kleinen Fenster können zeitgleich mit der Aufmauerung oder nachträglich eingebaut worden sein. Die Gewände des vierbahnigen Fensters am oberen Bildrand zeigt eine vergleichbare thermische Signatur wie die Spitzbögen. Seine Axialität entspricht allerdings der der neuen Fenster. Eine Bauphasenzuordnung ist hier nur mit weiteren Befunden möglich.



- 5 Befundinterpretation:** Die thermischen Befunde lassen auf eine massive Umgestaltung dieses Fassadenteils schließen. Die Mittelachse der heutigen Fensteranordnung weicht stark von der der drei zugesetzten Spitzbogenöffnungen ab. Dies ist auch ein Hinweis auf eine Umgestaltung der Raumkonfiguration oder eine Neuausrichtung der Hauptachse des Kirchenraumes. Die drei Spitzbogenöffnungen und ihre regelmäßige Anordnung könnten entweder die frühere Westportalseite markieren (dann müsste der frühere Eingang noch darunterliegen) oder sie waren Teil der Kirchenlängsseite. Zur Klärung sind weitere Befunduntersuchungen nötig.



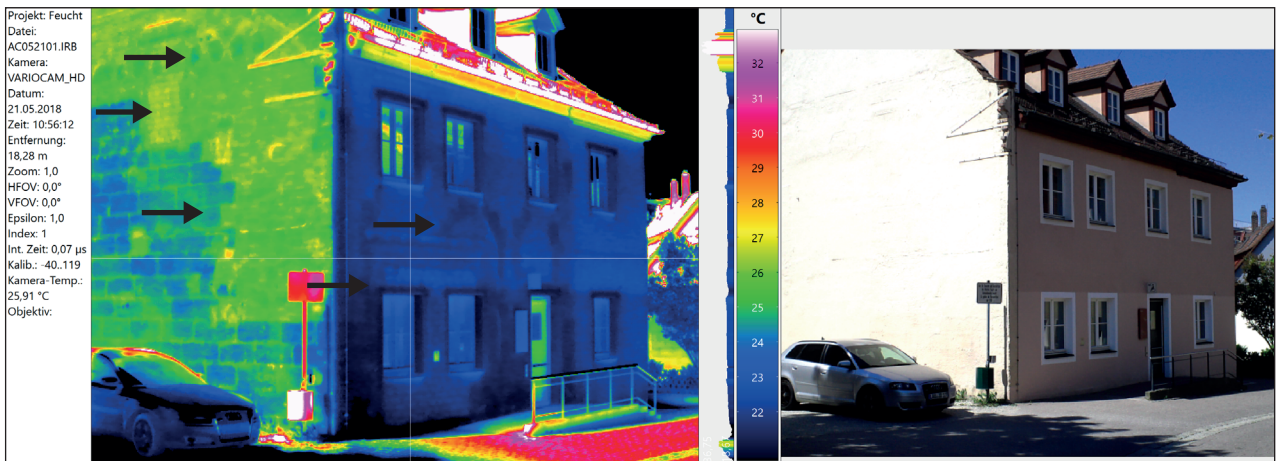
- 6 Befundinterpretation:** Die thermischen Varianten der verbauten Steine lassen auf unterschiedliche Steinmaterialien mit unterschiedlichem thermischem Verhalten rückschließen. Bei näherer Betrachtung zeigen sich auch Spuren früherer Restaurierungen an Putz und Farbfassungen. Hier sollten die thermographischen Befunde mit restauratorischen Kartierungen abgeglichen werden.



7 Westfassade einer ehemaligen Domkurie.

Befundansprache: Zugesezte Rundbögen im Bereich der oberen Fensterreihe, ein gemauerter, segmentbogenförmiger Entlastungsbogen über dem unteren rechten Fenster. Brüstungsbereich des oberen rechten Fensters weniger thermisch aktiv als Umgebung.

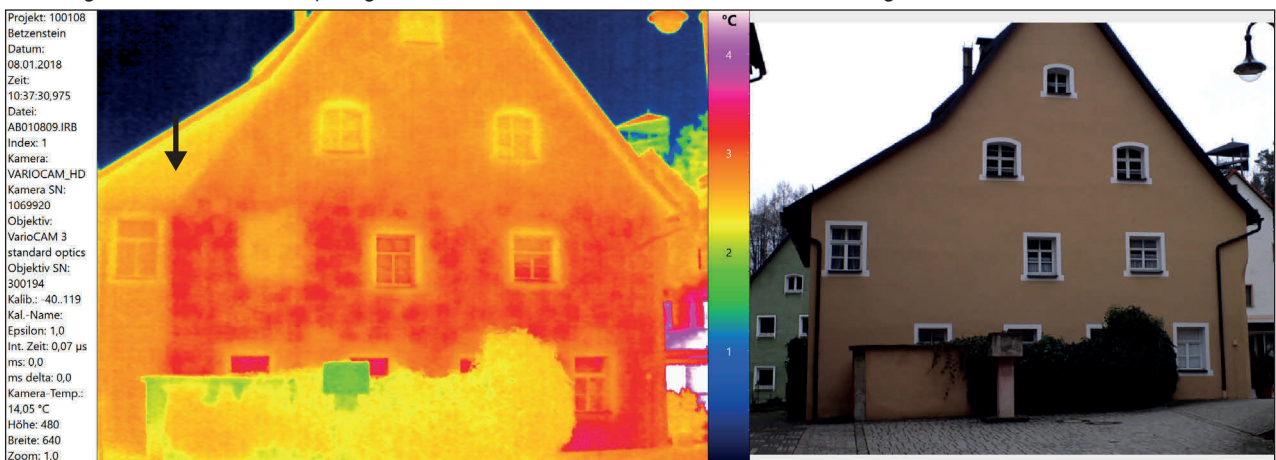
Befundbeschreibung: Kleinteiliges, heterogenes Mauerwerk mit wechselnden Steinformaten und Läufer-schicht aus größeren Formaten auf Brüstungshöhe der oberen Fenster. Zusetzungen der Rundbögen weniger thermisch aktiv, ohne erkennbare Steinformate.



8 Rückseitiger Gebäudeteil mit mehrfach überformter Giebelwand.

Befundansprache: Heterogenes Mauerwerksgefüge mit unterschiedlichen Steinformaten und Steinarten. Giebelseitig zugemauerte Wandöffnung. Traufseitig zwei Rundbögen und evtl. Ansatz eines dritten. Ebenerdig links große zugemauerte Wandöffnung.

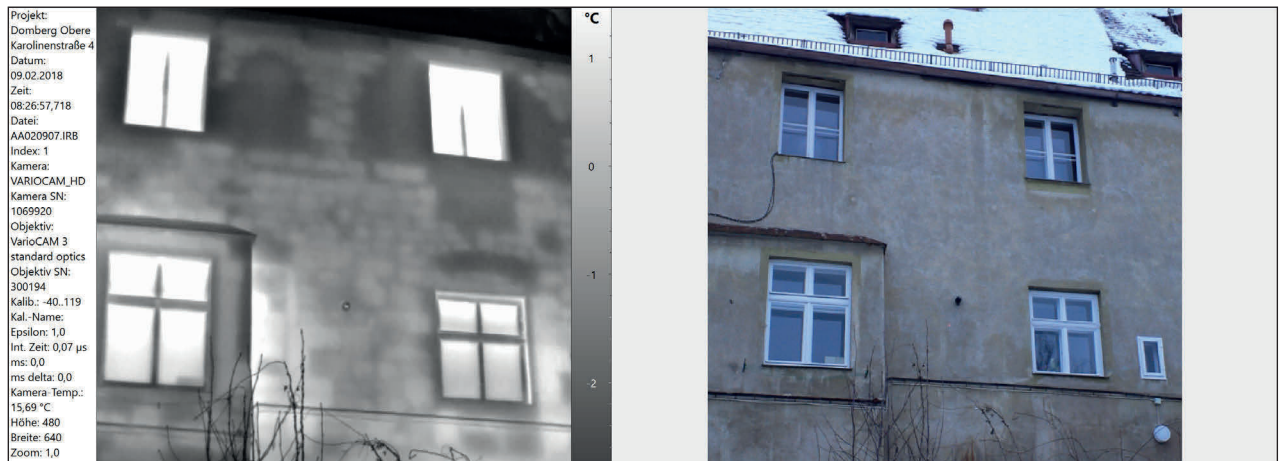
Befundbeschreibung: Giebelseitiges Mauerwerksgefüge im Sockelbereich und aufgehend aus großformatigen Natursteinen. Zur rechten Giebelseite und zum Dach hin Gefüge heterogener, Fugen sind nicht mehr eindeutig identifizierbar. Auf Traufhöhe in regelmäßigen Abständen balkenkopffartige Strukturen. Im Traufbereich zusätzliche Notsicherungen der Giebelwand.



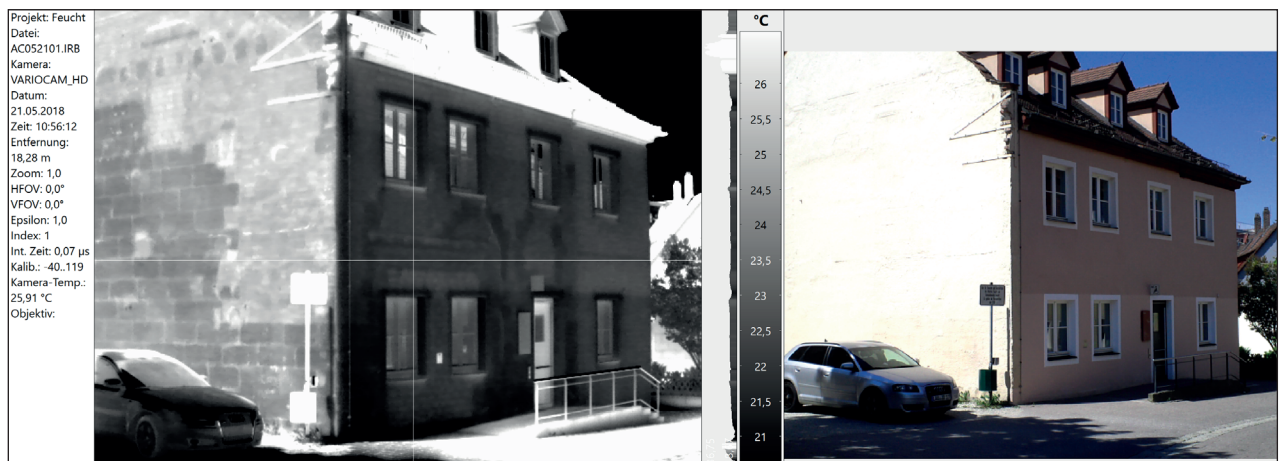
9 Giebelseite eines ehemaligen Wohnstallhauses.

Befundansprache: Regelmäßiges Mauerwerk mit deutlich abweichender thermischer Signatur der Traufseite unter Schleppdach.

Befundbeschreibung: Symmetrisches Giebelmauerwerk mit Übergang zu Schleppdach und einem zugesezten Fenster im OG1.



10 Befundinterpretation: Rundbögen nachträglich zugesetzt, hochrechteckige Fensteröffnungen wohl aus derselben oder späteren Bauphase, Fensterrahmen jünger. Läuferischicht aus großformatigen Steinen vermutlich als Brüstung der gruppierten Rundbogenöffnungen. Anordnung und Proportionen erinnern an romanische Bi-/Triforienfenster. Entlastungsbogen ist kein Rundbogen, sondern spez. für hochrechteckige Fensteröffnung konstruierte Entlastung des Fenstersturzes. Heterogenes Mauerwerksgefüge als Hinweis auf Überlagerung kleinteiliger Sanierungs- und Umbauphasen. Weitere Untersuchungen und Kartierung raumseitig notwendig.



11 Befundinterpretation: Nachträgliche Zusetzungen von Giebelfenster und traufseitiger bodentiefer Öffnung (ehem. Stall, Garage?) mit Backsteinformaten in regelmäßigem Verband, evtl. gemeinsame Umbauphase. Baufuge zwischen dritter und vierter Fensterachse, möglicherweise Gebäudeerweiterung. Rundbogenförmige Strukturen nur mit weiteren Befunden einzuordnen. Balkenkopffartige Strukturen ebenfalls nicht vollständig erklärbar. Als einbindende Deckenbalken Lage eigentlich zu hoch und zu dicht. Möglicherweise Spuren von Konsolsteinen und/oder Hinweis auf abgegangenen giebelseitigen Anbau.



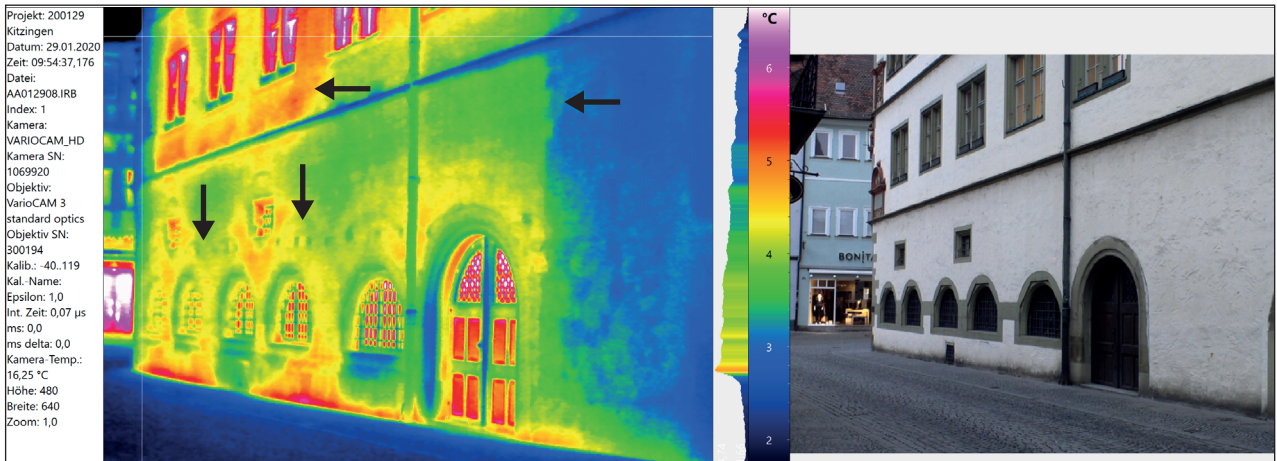
12 Befundinterpretation: Schleppdach und Anbau wohl nachträglich hinzugekommen. Mauerwerk zu unterschiedlich für eine Bauphase. Fensterformat im Anbau weicht in Dimension und Höhe ebenfalls von bestehenden ab, Indiz für unterschiedliche Bauphasen.

Baufugen und Bauphasen in Thermogrammen

Baufugen und Bauteilanschlüsse
 Materialwechsel
 Durchdringungen nachträglich veränderte Bauteile
 Relative und absolute Einordnung in Bauphasenabfolge

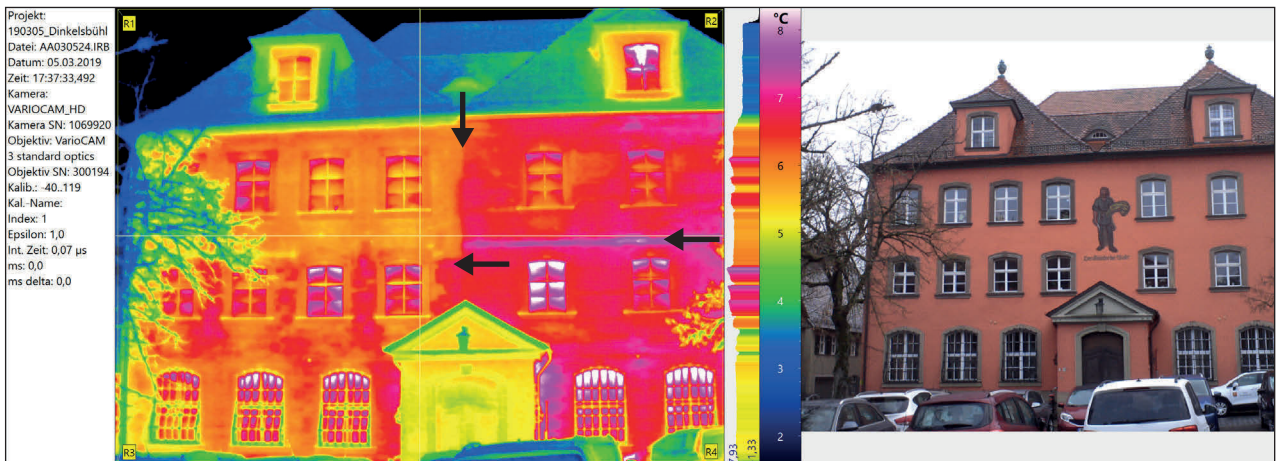
Das übergeordnete Ergebnis jeder Bauforschung ist immer eine Aufschlüsselung stratigraphischer Schichten und Überlagerungen und die Aufstellung einer chronologischen Bauphasenabfolge. Auch hierzu kann die Thermographie beitragen, indem sie zerstörungsfrei Baufugen und Bauteilanschlüsse lokalisiert und deren Anschlussrichtung zu bestimmen hilft. Dies kann durch die Visualisierung von Materialwechslern, Verzahnungen und Durchdringungen nachträglich veränderter Bauteile und ihrer baulichen Umgebung geschehen. Oder eben durch die Visualisierung einheitlicher Bauweisen und konsistenter Materialverwendung und die Bestätigung einer einzigen Bauphase, bzw. dem Ausschluss weiterer potentieller Bauphasen.





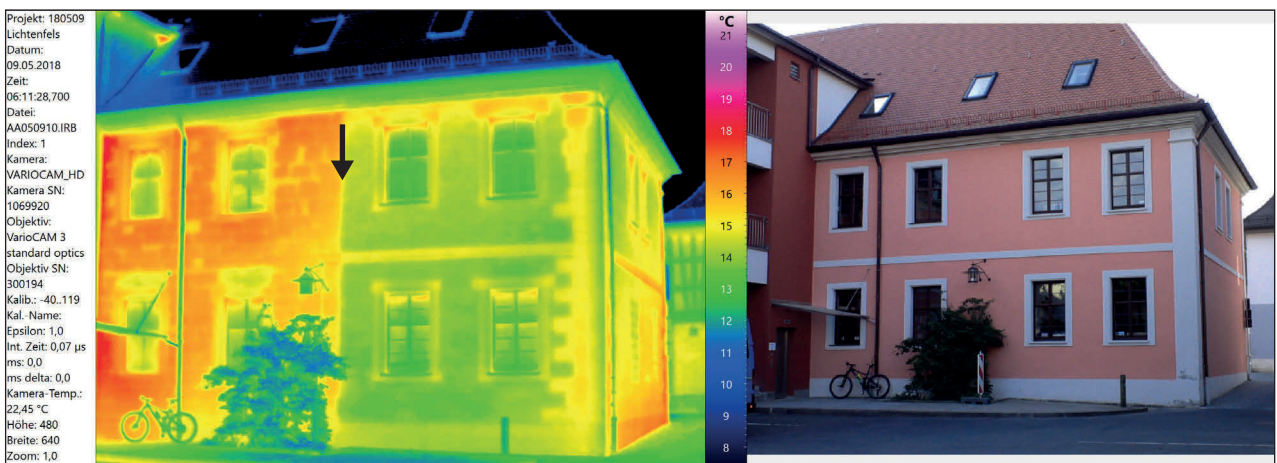
13 Nordostfassade

Befundansprache: Massive vertikale thermische Kante über die gesamte Fassadenhöhe rechts der Eingangstür. Thermische Signaturen einzelner Entlastungsbögen über den Rundbogenfenstern. Lokale Erwärmung von Sockelzone und Brüstungsbereiche im OG1.
Befundbeschreibung: Mauerwerksgefüge nur diffus erkennbar, vertikale thermische Kante scheint entlang der Setzfugen zu verlaufen. Entlastungsbögen zeichnen sich mit Steinformaten ab, Wärmezonen in Sockel- und Brüstungsbereich eher verlaufsartig.



14 Nordfassade einer zweiteiligen Gebäudegruppe

Befundansprache: Vertikale thermische Kante mittig über Eingangsportale über gesamte Fassadenhöhe. Horizontales thermisches Band zwischen OG1 und OG2 am rechten Gebäudeteil. Diffus erkennbares großformatiges Mauerwerk am linken Gebäudeteil.
Befundbeschreibung: Verlauf der vertikalen Kante im oberen Bereich gerade, im unteren Bereich versprungartig auf linken Fassadenteil. Horizontales Band thermisch klar abgegrenzt, homogener Verlauf.



15 Gebäuderückseite mit Anbau

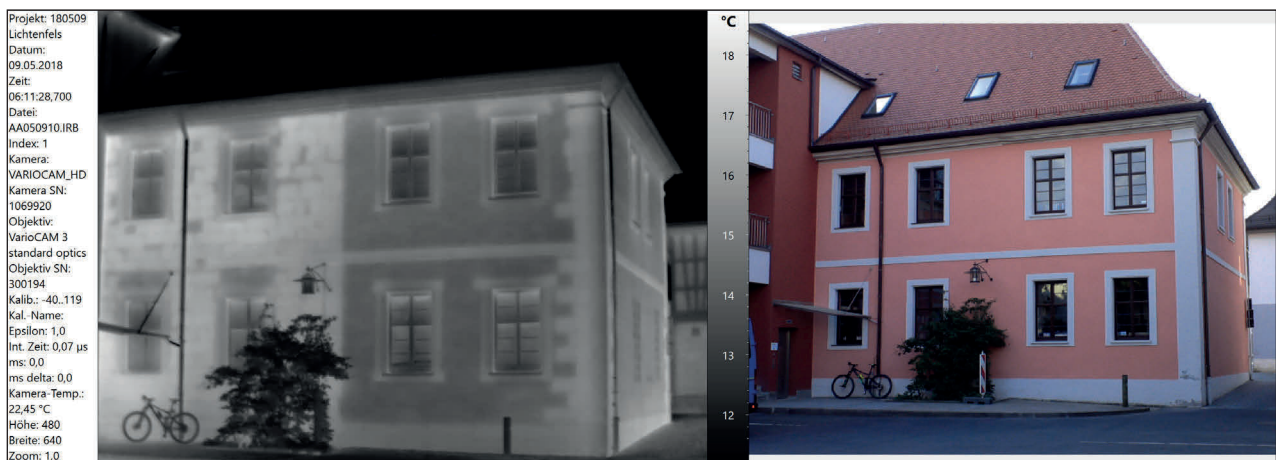
Befundansprache: Deutliche thermische Kante zwischen Fensterachsen zwei und drei. Linker Gebäudeteil mit Mauerwerksgefüge.
Befundbeschreibung: Thermische Trennung der Gebäudeteile, rechte Außenecke mit Eckverzahnungen, nach oben auslaufend.



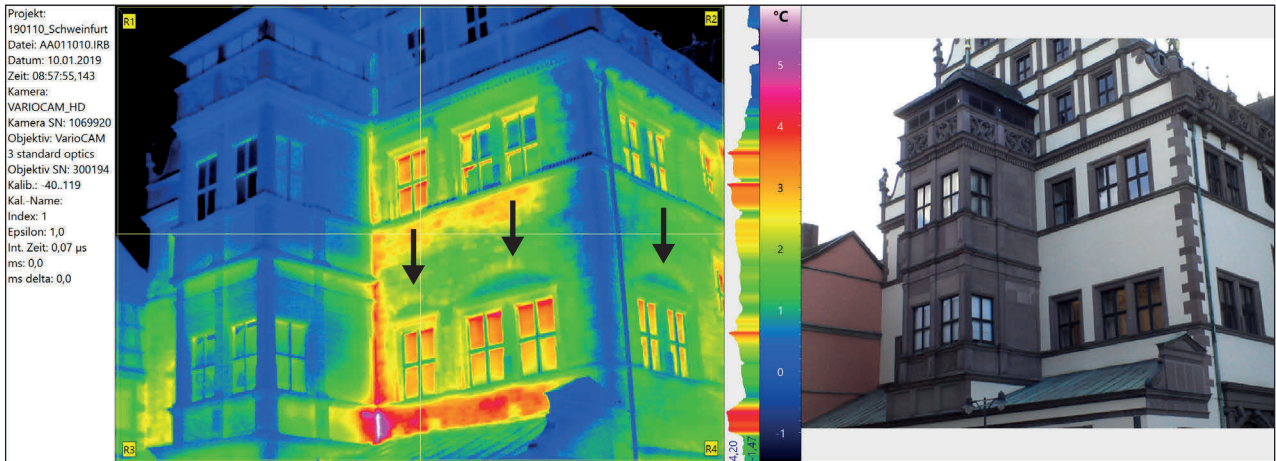
16 Befundinterpretation: Vertikale thermische Kante Indiz für Baufuge bzw. Bauabschnitt. Vertikalriss als Ursache wäre nur über die Rissbreite als thermische Anomalie abgebildet, nicht als Kante mit anschließender flächiger Temperaturdifferenz. Unterschiedliche Raumtemperaturen als Ursache würden eher verlaufsartig abgebildet werden. Klare thermische Kante ist das Ergebnis materialbezogener thermischer Abweichungen, daher Vermutung auf Baufuge. Wärmezonen im Brüstungsbereich durch Heizkörper verursacht



17 Befundinterpretation: Linker und rechter Gebäudeteil gehören zu verschiedenen Bauabschnitten, evtl. mit unterschiedlichen Materialien ausgeführt. Dafür sprechen auch die separaten Dachkonstruktionen. Vertikale thermische Kante entspricht der Baufuge, Versprung im unteren Bereich ist eine lokale Ausbesserung, vermutlich gleiche Bauphase wie rechter Gebäudeteil, da direkter Anschluss und vergleichbare thermische Signatur. Daraus Vermutung, dass linker Gebäudeteil älter ist. Weitere Befunde zur vollständigen Abklärung nötig.



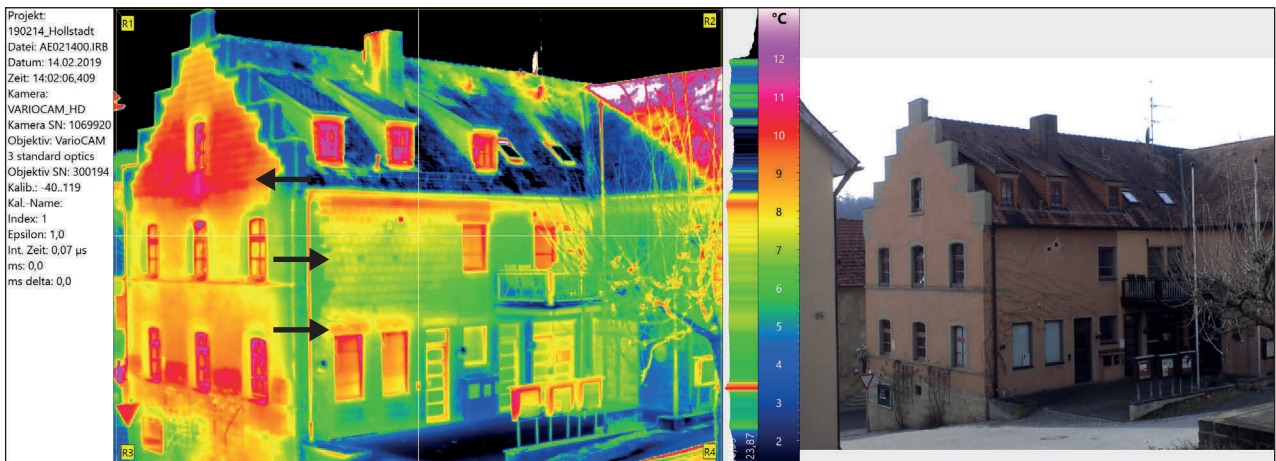
18 Befundinterpretation: Thermische Trennung als Beleg für verschiedene Bauphasen der Gebäudeteile. Deutlich unterschiedliche Materialien mit klarer thermischer Kante, keine Verzahnung der Bauabschnitte. Dazu passend: Sichtbarer Versprung im Traufgesims. Indiz für möglichen nachträglichen Umbau/Erweiterung des Gebäudes um zwei Fensterachsen.



19 Seitenflügel mit Standerker vor Giebfassade

Befundansprache: Thermische Signatur von eher unregelmäßiger Mauerwerksstruktur mit regelmäßigen Segmentbögen aus gleichbleibenden Steinformaten über Einzel- und Gruppenfenstern.

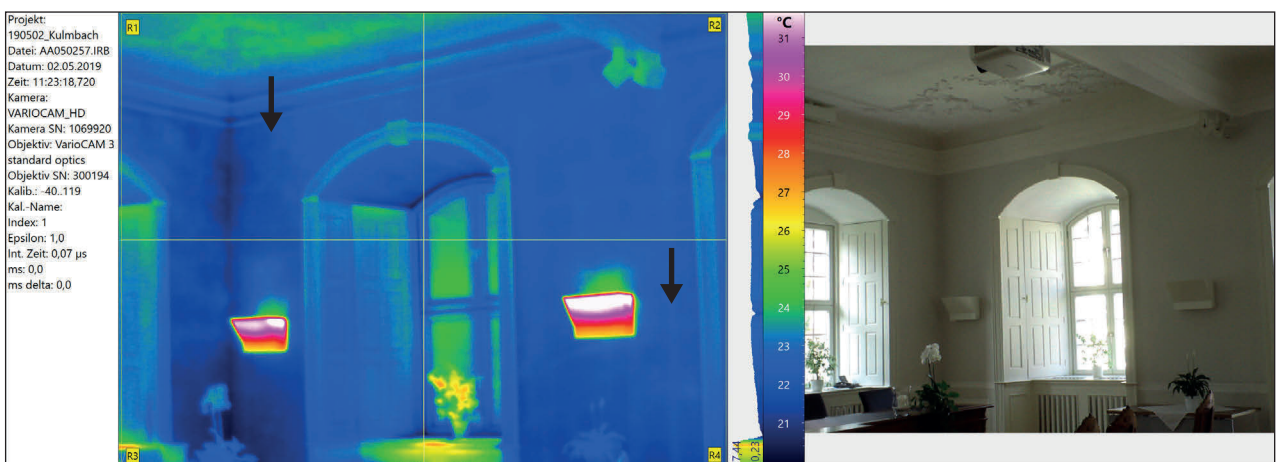
Befundbeschreibung: Unregelmäßige Mauerwerksstruktur über alle Gebäudeteile gleich, Innenecken als konstruktive thermische Hotspots, Außenecken entsprechend Kaltstellen. Segmentbögen über allen Fenstern vergleichbar angeordnet.



20 Seitenflügel mit Staffeligebl

Befundansprache: Multiple thermische Signaturen verschiedener Mauerwerksformate, Fensterstürze und Verzahnungen.

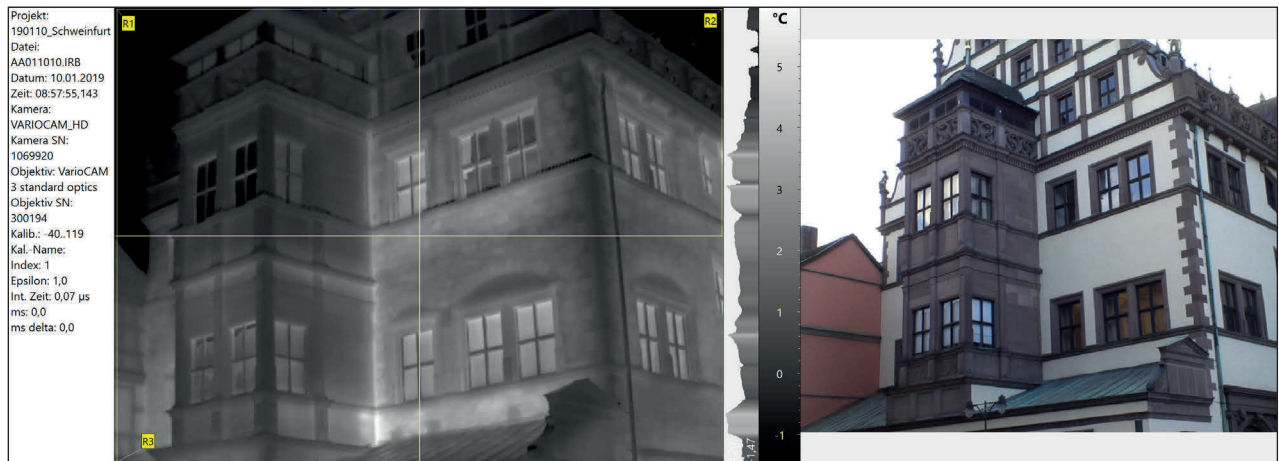
Befundbeschreibung: Giebdreieck und Traufseite mit normierten Formaten aufgemauert, unregelmäßige Verzahnung in Außenwandecke und Staffeligebl. Hochrechteckige Fensterformate der Rückseite weichen von segmentbogenförmigen der Giebelseite ab, zeigen monolithische Stürze.



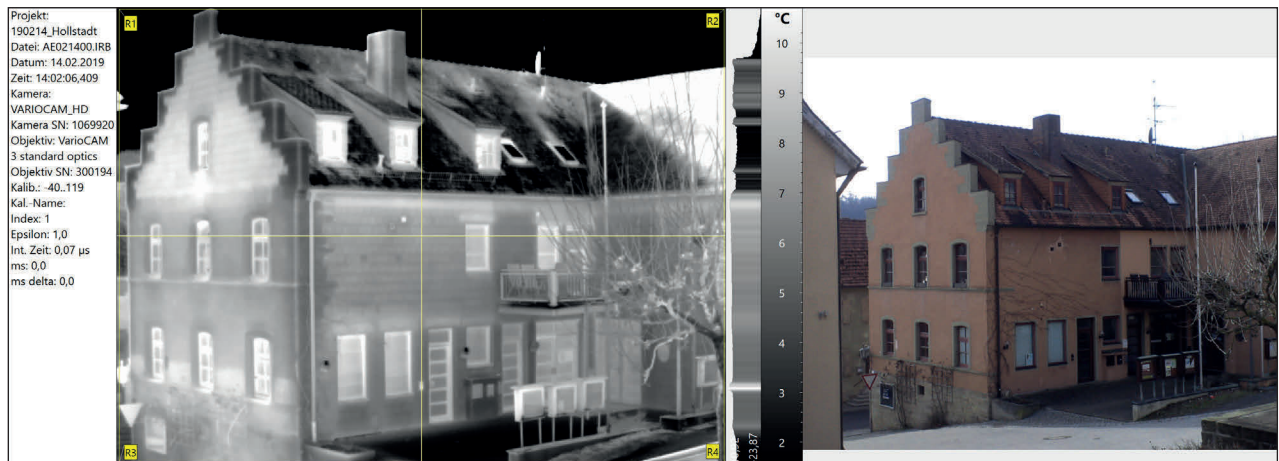
21 Innenwandecke

Befundansprache: Heterogenes Mauerwerksgefüge unter Putz, Fugenlinien wirken wenig systematisch

Befundbeschreibung: Verschiedene Steinformate in unregelmäßiger Anordnung, Fensterlaibung zeigt große Wandtiefe.



22 Befundinterpretation: Mauerwerk mit durchgehenden, wenngleich wenig präzisen Lagen, und darin eingebundene Entlastungsbögen aus stehenden Backsteinformaten über Fensteröffnungen gehören derselben Bauphase an. Keine Störungen oder lokale Anomalien aus nachträglichen Veränderungen ersichtlch.



23 Befundinterpretation: Massiver Umbau von rückwärtigem Gebäudeteil und Giebelndreieck. Steinformate vermutlich Hochlochziegel, neue Fensterstürze evtl. Betonfertigteile. Entsprechend jüngere Umbaumaßnahme. Weitere Befunde zur Trennung und Zuordnung verschiedener Bauphasen unerlässlich.



24 Befundinterpretation: Vermutlich grobes Bruchsteinmauerwerk oder grob behauene Quader. Wandstärke als Indiz für mögliche zweischalige Konstruktion. Zur vollständigen Klärung Abgleich mit Außenthermogramm nötig.

Umbauten und Sanierungen in Thermogrammen

Darstellung des aktuellen Objektzustandes als Konglomerat verschiedener Bau-, Umbau- und Sanierungsphasen

Hinweise auf (ehemalige) Schwachstellen und Schäden

Informationen zu Konstruktionen und Gefügen

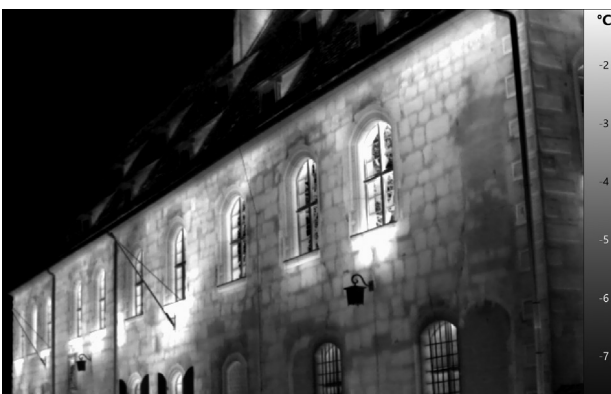
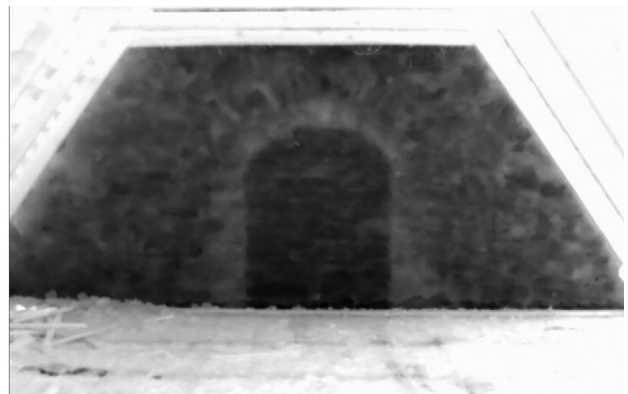
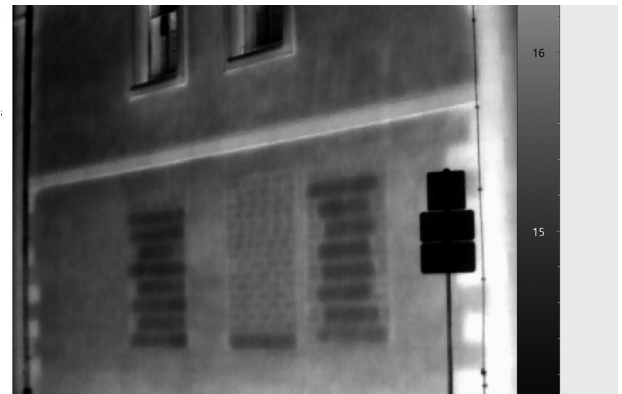
Visualisierung zugesetzter Öffnungen

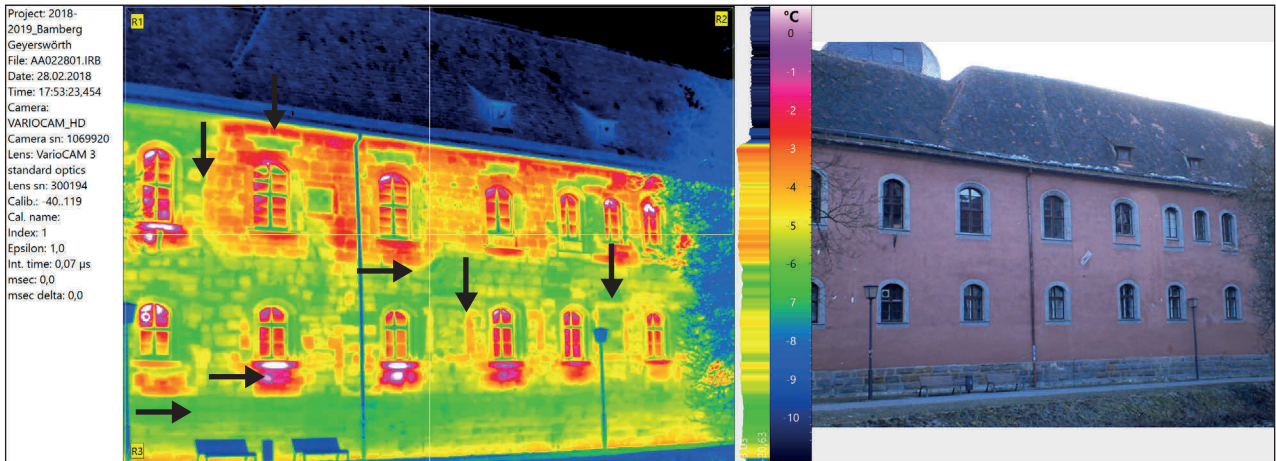
Hinweise auf abgegangene Bauteile

Einordnung von Baufugen und Bauteilanschlüssen

Einordnung von Materialwechselln

Thermographische Darstellungen eignen sich hervorragend, um die Details von Umbauten und Sanierungen zu visualisieren. Besonders gut funktioniert dies für zugesetzte Öffnungen und neu eingebrachte Baustoffe. Da diese meist abweichende Materialeigenschaften aufweisen, weicht auch ihr thermisches Verhalten von dem der historischen Bausubstanz ab und lässt sich gut thermographieren. Gleiches gilt für den Einbau neuer Bauteile und Konstruktionen. Umgekehrt können manchmal auch die Spuren abgegangener Bauteile lokalisiert werden, wenn die Abbruchstellen überputzt und dem Bestand angeglichen werden. Teilweise kann aus der Art der Sanierung und ihrem heutigen Zustand auch auf die Schadensursache geschlossen werden.

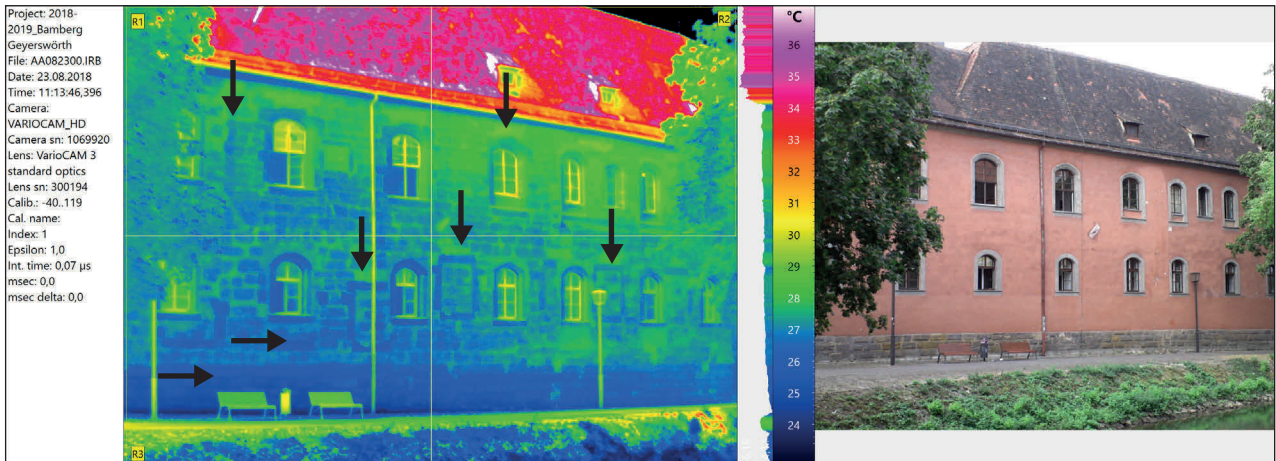




25 Nordwestfassade eines ehemaligen Stadtschlusses (Aufnahme im Winter).

Befundansprache: Heterogenes Mauerwerksgefüge mit versch. Zusetzungen, Baufugen und Spuren früherer Restaurierungen.

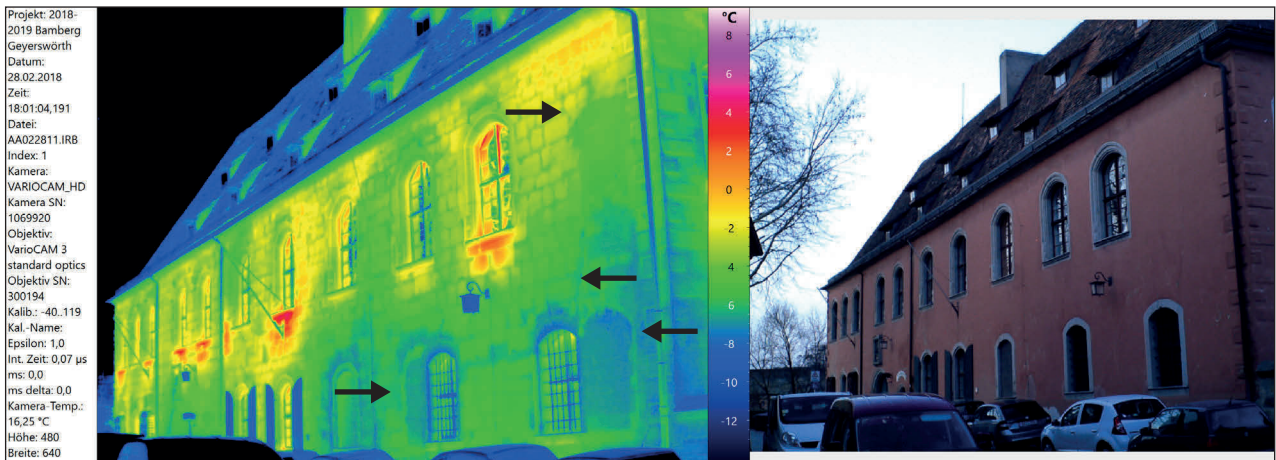
Befundbeschreibung: Thermisch homogene Sockelzone, Oberkante deutlich höher als in der Photographie bzw. Trennlinie verputzter-unverputzter Bereich. Aufgehendes Mauerwerk thermisch heterogener mit lokalen thermischen Störungen z.B. im Brüstungsbereich (Heizkörper) oder in Teilen des OG2. Unterhalb des Dachverschnittes auch thermische Kante im Wandverlauf erkennbar.



26 Nordwestfassade eines ehemaligen Stadtschlusses (Aufnahme im Sommer).

Befundansprache: Gleiche Aufnahmeposition wie oben. Solare Erwärmung der Fassade zeigt bauhistorische Befunde deutlicher als im Thermogramm mit winterlicher Temperaturdifferenz (s. oben) und mit weniger thermischen Überlagerungen durch Heizkörper oder übermäßig stark geheizte Räume.

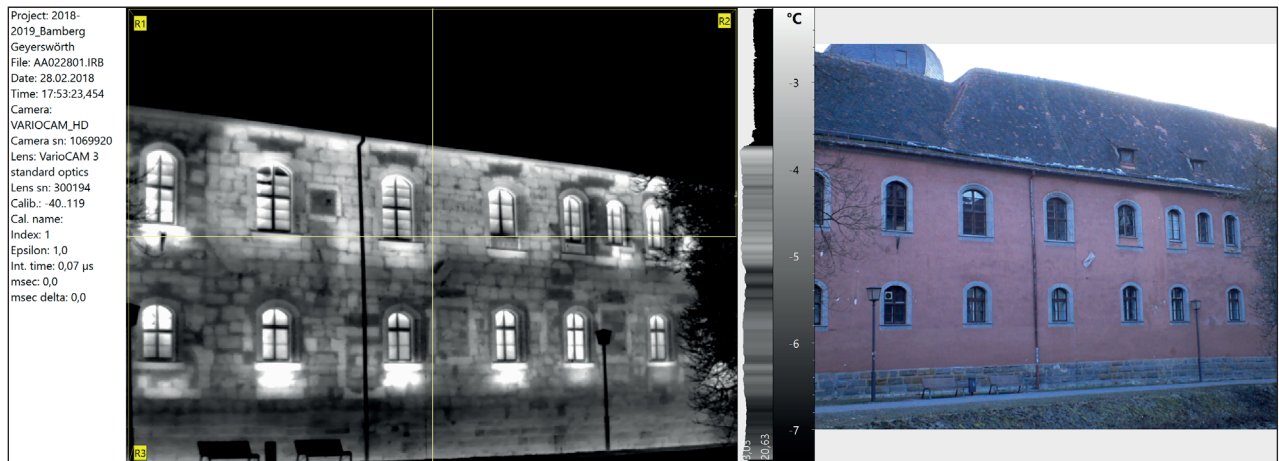
Befundbeschreibung: Zugesezte Öffnungen und deren Gewände/Einfassungen deutlicher lokalisierbar. Ebenso Entlastungsbögen über Fenstern und Putzschäden bzw. Sanierungen im Brüstungsbereich EG.



27 Südostfassade eines ehemaligen Stadtschlusses (Aufnahme im Winter).

Befundansprache: Zwei zugesezte Fensteröffnungen im EG, eine in Position / Proportion abweichende zugesezte Öffnung im OG.

Befundbeschreibung: EG-Zusetzungen identisch mit den Fenstern dort, OG-Zusetzung als Sonderbauform mit Segmentbögen.



28 Befundinterpretation: Thermogramm zeigt multiple Überlagerung verschiedener Umbau- und Sanierungsphasen. Thermische Kante unterhalb des Dachverschnitts markiert eine Baufuge mit nicht vollständig verzahntem Mauerwerk und versetzten Steinlagen. Zugewetzten Öffnungen geben Hinweise auf frühere Fassadengestaltung mit abweichenden Fenstereinteilungen in EG und OG. Außerdem zahlreiche Rissverläufe im und unter Putz erkennbar, tlw. auch entlang der Mauerwerksfugen. Hinweise auf Materialdegeneration und lokale Setzungen bedingt durch Standort direkt am Fluss.



29 Befundinterpretation: Siehe oben. Anmerkung: Im Winterthermogramm erscheinen die Steinformate heller/wärmer, die Fugen dunkler. Im Sommerthermogramm umgekehrt. Ursache sind die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten der Materialien. Oberflächliche Risse im Putz treten bei solarer Erwärmung deutlicher hervor, Risse entlang der Mauerwerksfugen erscheinen prägnanter, je höher die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen ist.



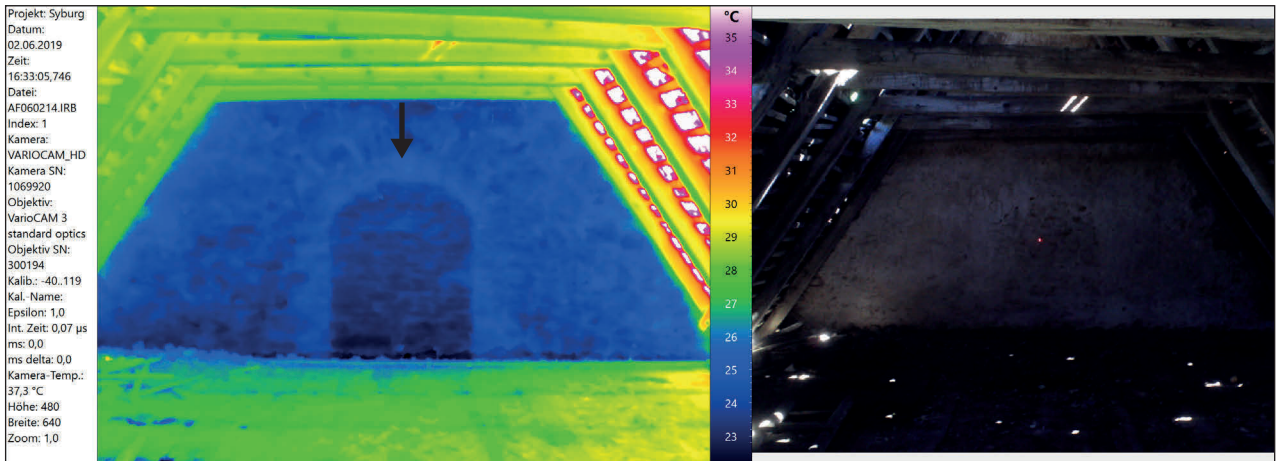
30 Befundinterpretation: Umgestaltung der südlichen Gebäudeecke. Fenster werden aus ursprünglichen Achsen heraus versetzt, Anschlüsse als Störungen im sonst homogenen Mauerwerksgefüge sichtbar. Teilweise Risse zwischen OG und umgestalteten EG-Bereichen. Umgestaltung der Fassade auch Hinweis auf Umformung der dahinterliegenden Raumkonfigurationen.



31 Schmalseite eines Verwaltungsgebäudes.

Befundansprache: Drei durch unterschiedliche thermische Signaturen ersichtliche, nachträglich zugesetzte Wandöffnungen.

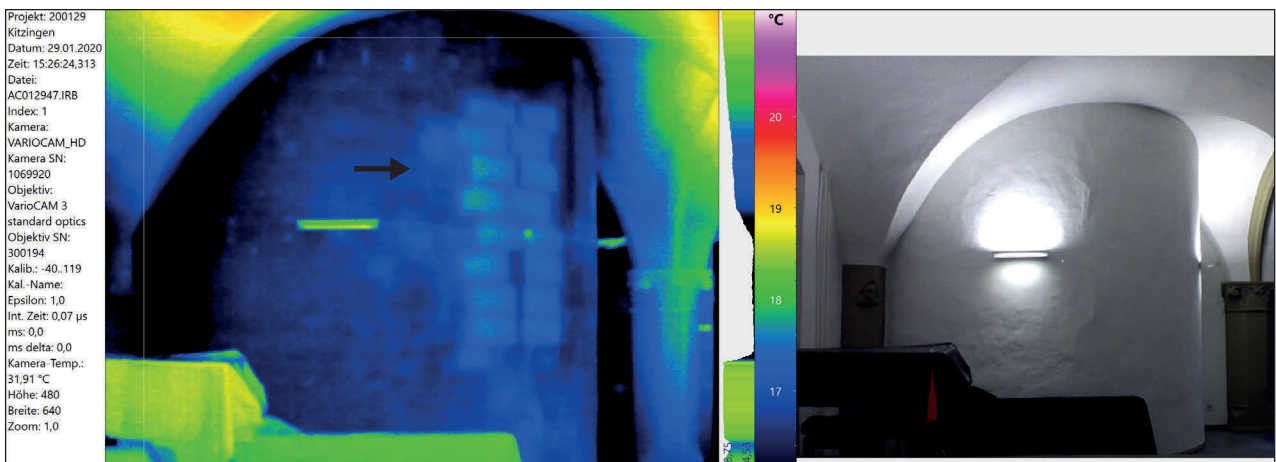
Befundbeschreibung: Öffnungen links und mittig entsprechen den Fensterachsen im OG. Gewände ohne klare thermographische Signatur. Öffnungen links und rechts sind überwiegend mit größeren Ziegelformaten zugesetzt, nur zu Gewänden hin mit kleinformatigen Teilen angestückt. Mittlere Öffnung abgesehen von unterster Lage durchgehend mit kleinen Ziegelformaten zugesetzt.



32 Giebelinnenseite eines Scheunendaches.

Befundansprache: Zugesetzte rundbogenförmige thermische Signatur mittig in Giebeldreieck.

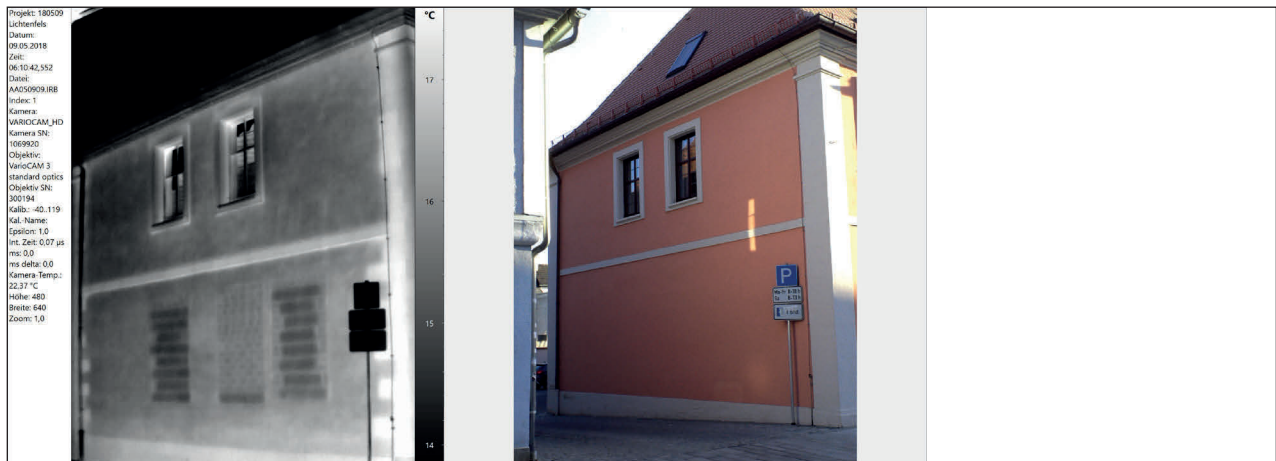
Befundbeschreibung: Laibung und Bogen aus einheitlichem, vom Giebelmauerwerk abweichenden Material. Zusetzung mit eher unregelmäßigen Lagen und stark unterschiedlicher Putzdeckung. Lage der Dachbalken zeichnet sich unter Bodenbelag ab.



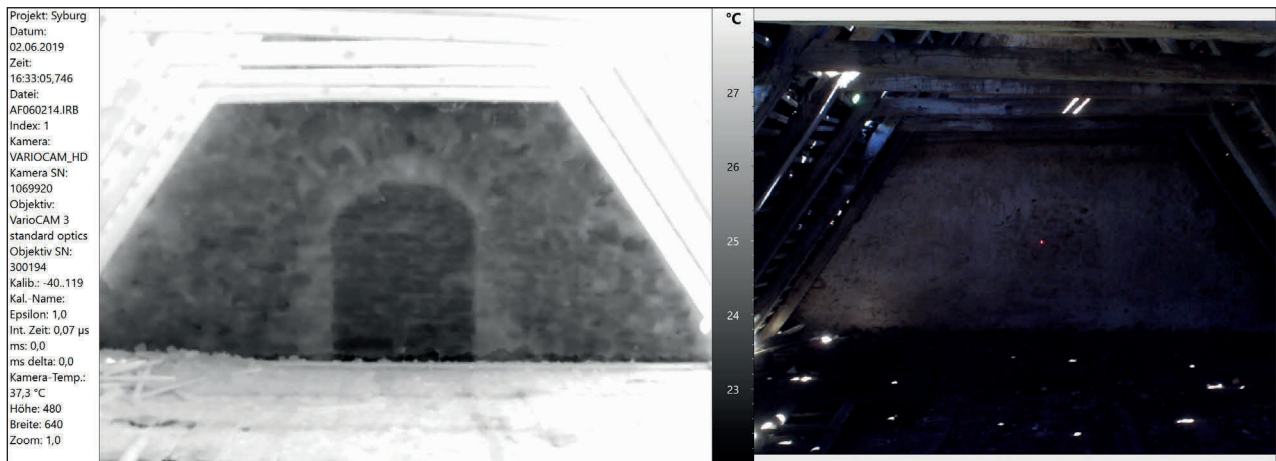
33 Treppenturm in einer Gebäudeecke, Turmwandung bündig mit Außenwänden.

Befundansprache: Thermische Signatur einer unregelmäßigen Aufmauerung mit verhältnismäßig hohen Steinformaten.

Befundbeschreibung: Unterkante Aufmauerung über Fußbodenniveau. Zusetzung ohne Verzahnung oder Einbindung in Bestand.



34 Befundinterpretation: Steinformate der Zusetzungen lassen auf eine jüngere Maßnahme schließen, höchstwahrscheinlich innerhalb einer Umbau- oder Sanierungsphase. Vermutlich im Zusammenhang mit einer Umnutzung der dahinterliegenden Räume. Endgültige Klärung nur mit einer vollständigen Untersuchung des gesamten Gebäudes.



35 Befundinterpretation: Rundbogenförmige Öffnung im Giebelndreieck als Luke für Materialtransport von Lager- und Trockengütern ins Dachgeschoss. Öffnungseinfassung mit Backstein, anschließendes Mauerwerk und Zusetzung wohl Bruchstein. Möglicherweise im Bogenscheitel noch Spuren von Hebewerkzeug/Seilwinde/Kran für den Materialaufzug. Weitere Detailuntersuchungen nötig.



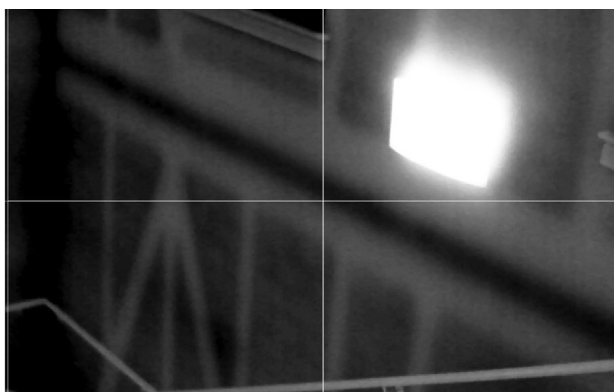
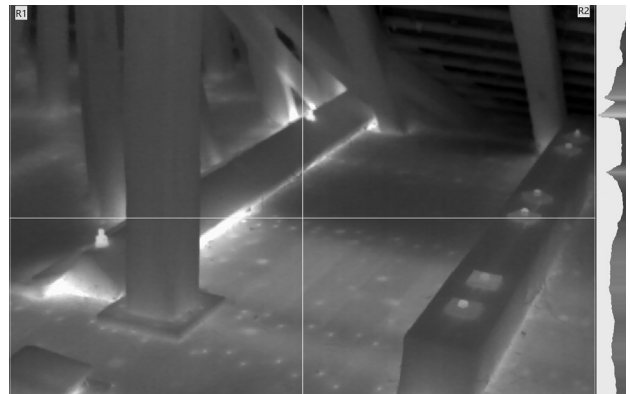
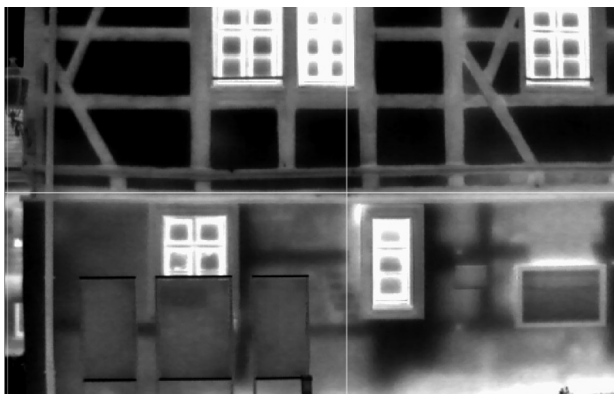
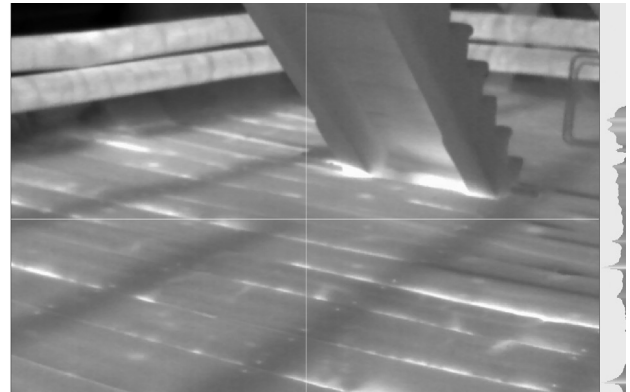
36 Befundinterpretation: Unterkante der Zusetzung entspricht Treppenverlauf im Turminnenen. Indiz für separaten Turmausgang für diesen EG-Raum.

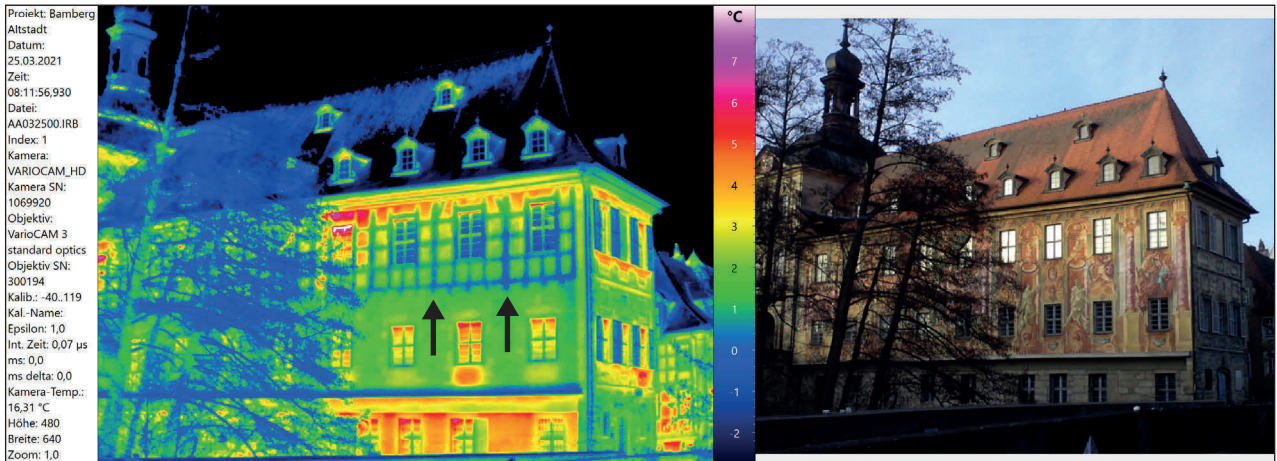
Holztragwerke in Thermogrammen

Lokalisierung von Holzbauteilen
 Analyse von Holzgefügen
 Hinweise auf Materialzustand und Schäden
 Indikatoren für Bauphasen und Baulter

Während die thermographische Untersuchung von historischen Holzbauteilen oder Holzoberflächen allein meist wenig aussagekräftig ist, eignet sich deren Untersuchung in situ im Kontext anschließender Bauteile und Materialien durchaus. Dazu gehören natürlich die Lokalisierung von Fachwerk unter Putz, aber auch das Potential qualitativer Aussagen über den Zustand der Holzgefüge und ihrer Verbundbaustoffe wie Gefachfüllungen oder Überdeckungen.

Da Holztragwerke über konstruktive und stilistische Merkmale regional und zeitlich recht gut eingeordnet werden können, trägt ihre Visualisierung immer auch zur Ermittlung von relativen Bauphasen und absoluten Baultersdatierungen bei.

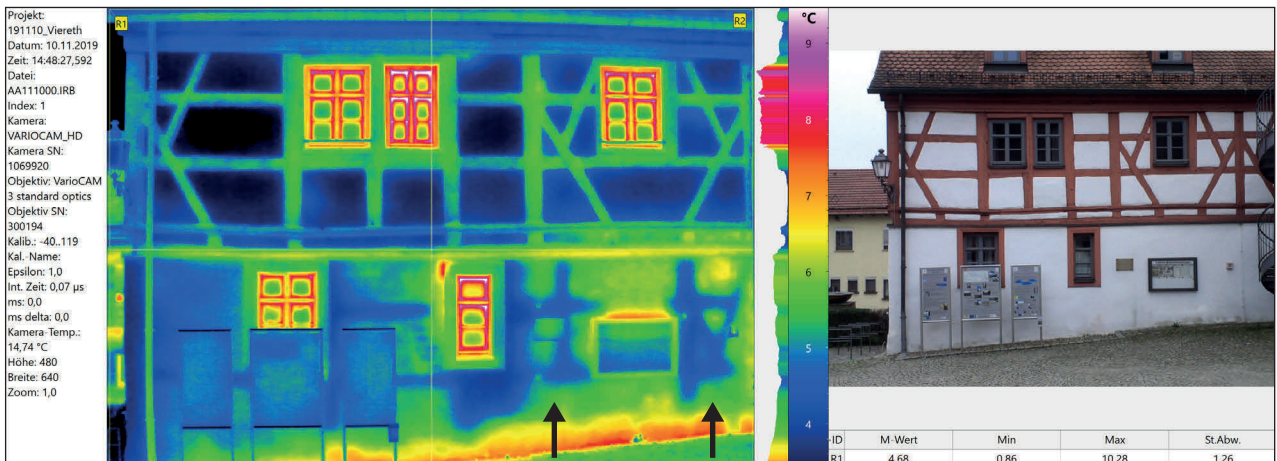




37 Altes Bamberger Rathaus

Befundansprache: Thermische Signatur einer sehr regelmäßigen Fachwerkkonstruktion im OG2.

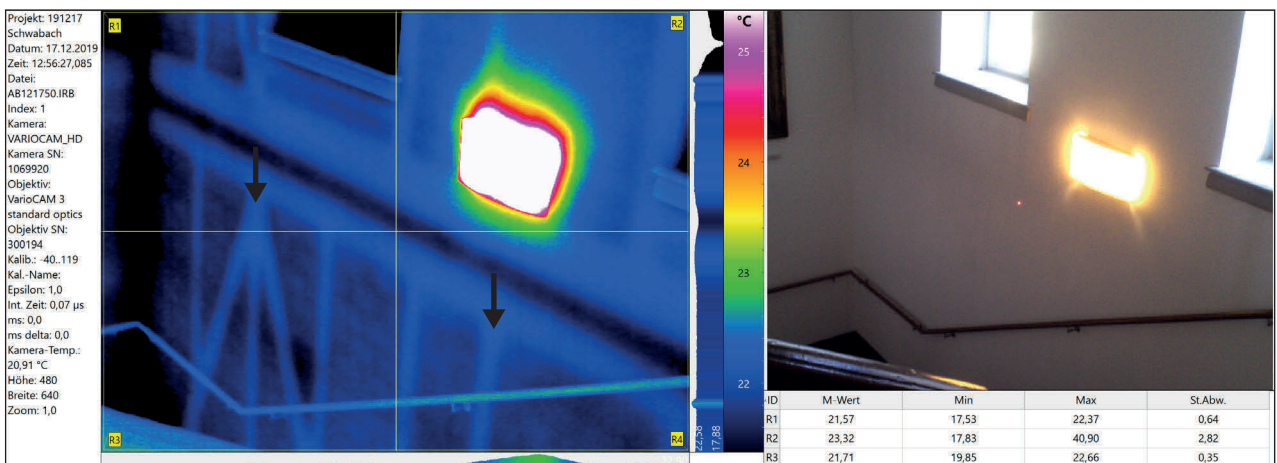
Befundbeschreibung: Deutlicher thermischer Abdruck der Holzständer, Schwellen, Queraussteifungen und Fensterposten.



38 Traufseite eines Fachwerkgebäudes

Befundansprache: Thermische Signatur einer Fachwerkkonstruktion auch im EG.

Befundbeschreibung: Deutliche thermische Abdrücke von Ständern, K-Streben und Queraussteifungen im EG. Ausfachung teilweise unregelmäßig und mit Steinformaten.



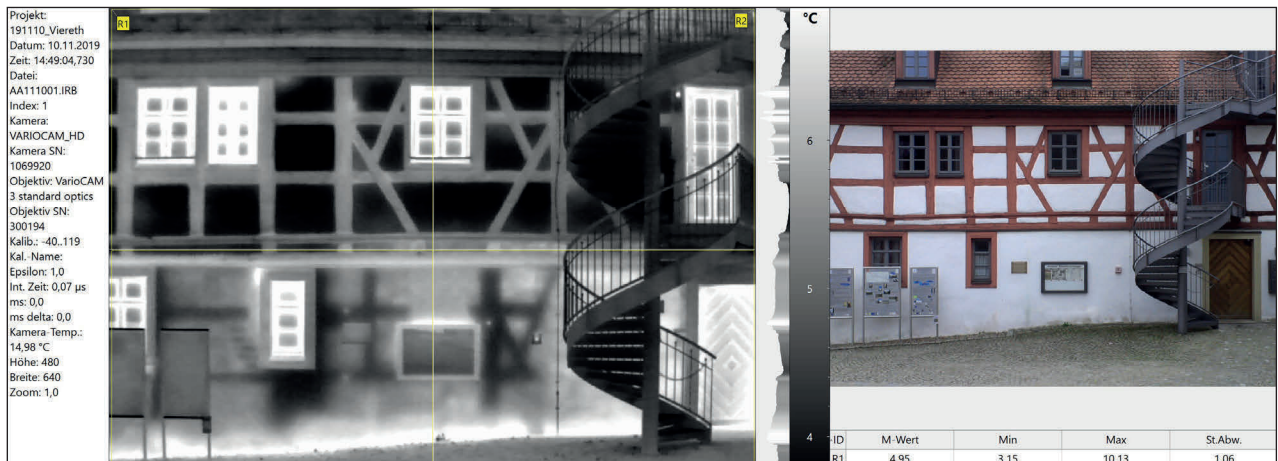
39 Innenwand Treppenaufgang

Befundansprache: Thermische Signatur einer Fachwerkkonstruktion im EG und OG, Trennung durch zwei massive Schwellen.

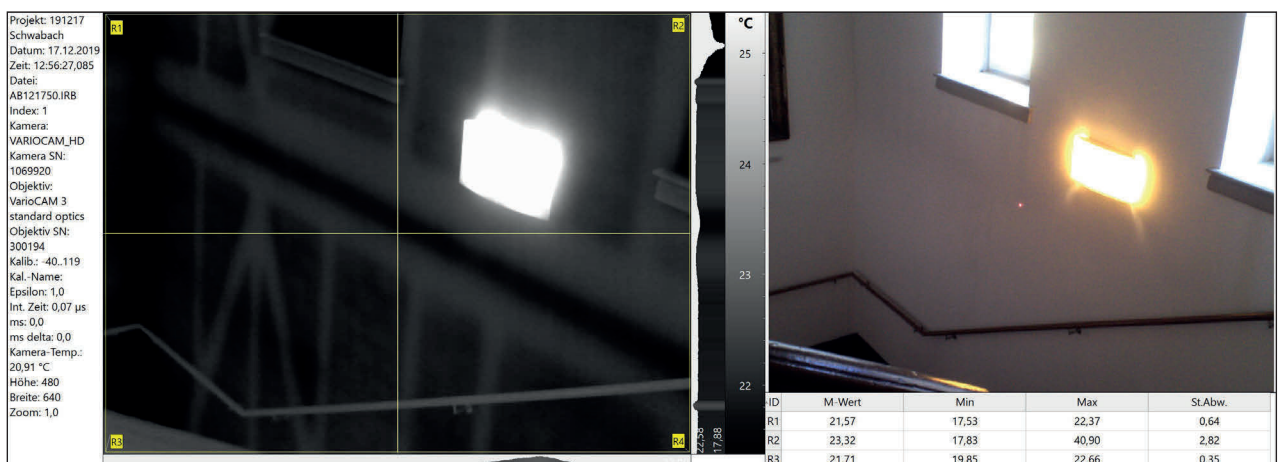
Befundbeschreibung: Klare Abzeichnung von Ständern, Schwellen und Diagonalstreben. Gefachfüllung regelmäßig ausgemauert.



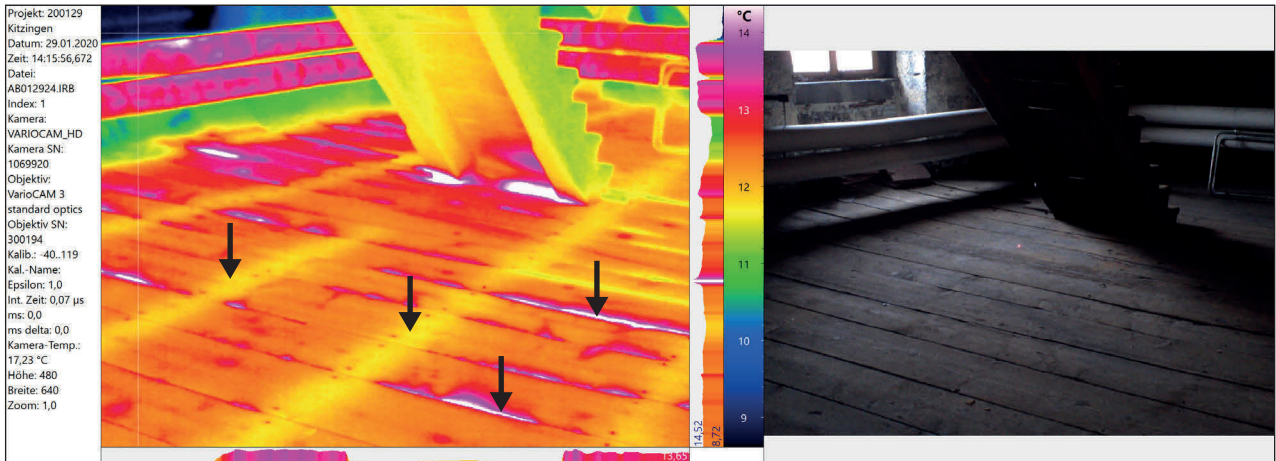
40 Befundinterpretation: Fachwerk-OG2 auf steinsichtigem EG und gemauertem und verputztem OG1. Farbfassung und steinsichtige Giebelseite sollen darüber hinwegtäuschen.



41 Befundinterpretation: Spuren auf Fachwerk-Holzoberflächen im OG deuten darauf hin, dass auch das OG zeitweise verputzt war. Ursachen für Fachwerkfreilegung nur im OG, nicht im EG nicht eindeutig ersichtlich. Weitere Abklärung notwendig. Gefachfüllung im EG scheint stellenweise mit abweichenden Steinformaten ausgetauscht, vermutlich schadensbedingt.



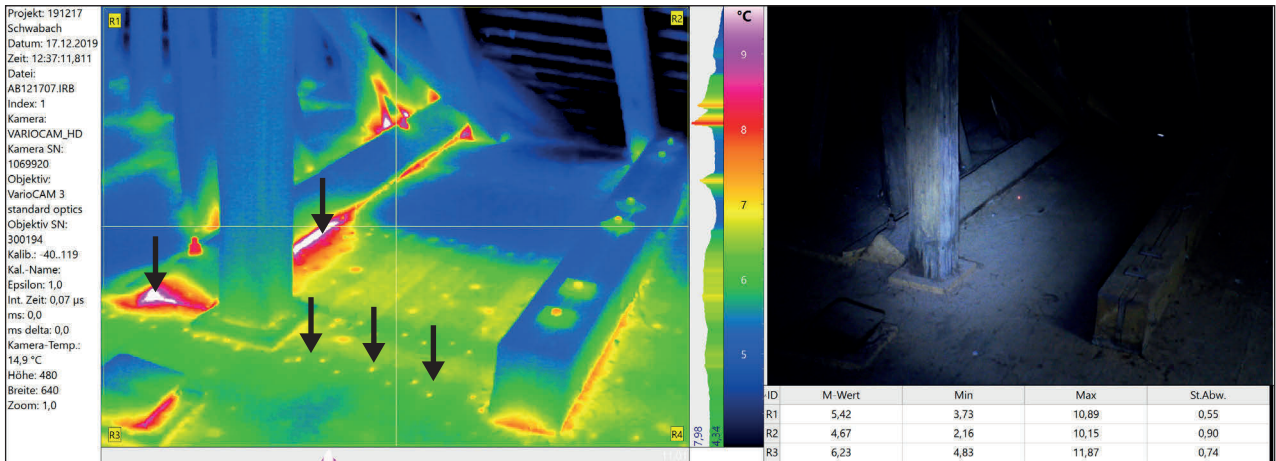
42 Befundinterpretation: Vergleichbare Konstruktionen, Holzdimensionen und Gefachfüllungen in EG und OG, gleiche Bauphase ohne lokale thermische Störungen durch nachträgliche Eingriffe.



43 Dachgeschoss, unterste Ebene

Befundansprache: Thermische Signatur der parallel zur Giebelseite verlaufenden Deckenbalken.

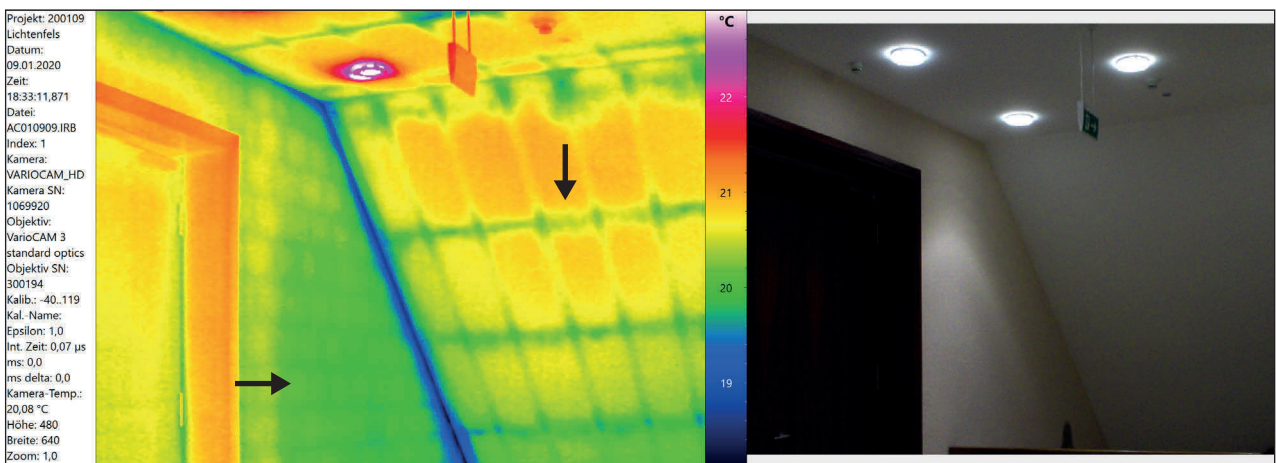
Befundbeschreibung: Regelmäßige Anordnung und vergleichbare Dimensionierung der Deckenbalken. Aufnagelung der Bodendiele mit Metallnägeln thermisch nachvollziehbar. Teilweise Hotspots in den Dielenfugen.



44 Dachtragwerk

Befundansprache: Thermische Hotspots am Übergang verschiedener Holzbauteile zum Bretterbelag.

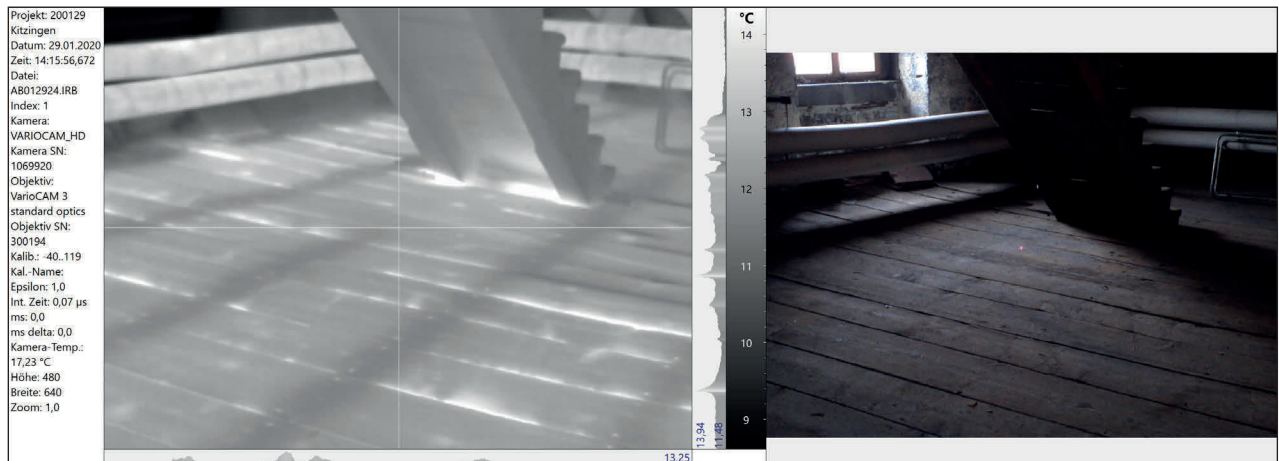
Befundbeschreibung: Unregelmäßige Verteilung der Hotspots, keine durchgehenden Warmstellen entlang Bauteilübergängen. Außerdem Reihen punktförmiger Hotspots auf Bretterbelag sichtbar.



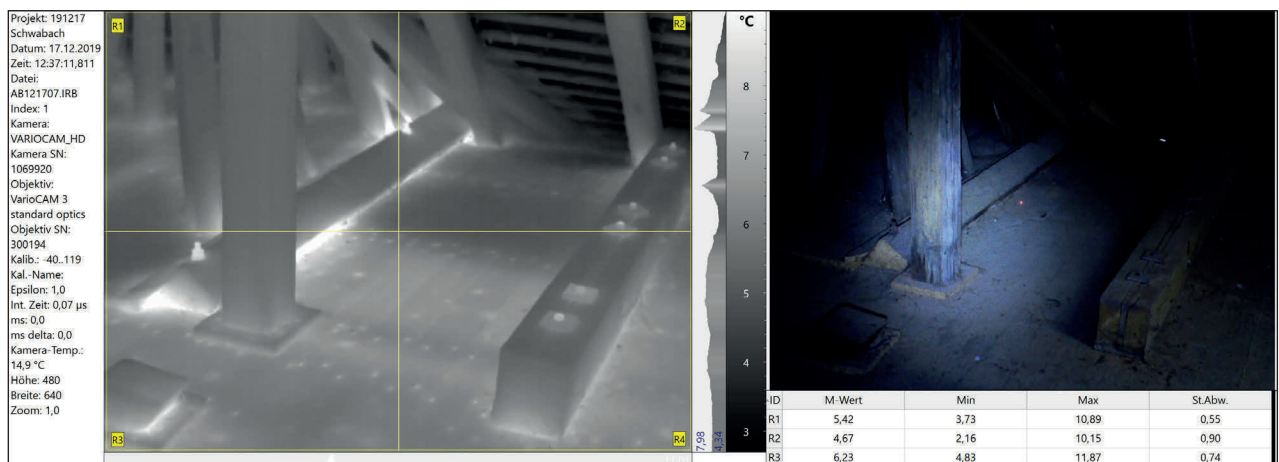
45 Ausgebautes Dachgeschoss

Befundansprache: Thermische Signatur regelmäßiger Steinformate in Zwischenwand. Thermisches Raster in Deckenschräge.

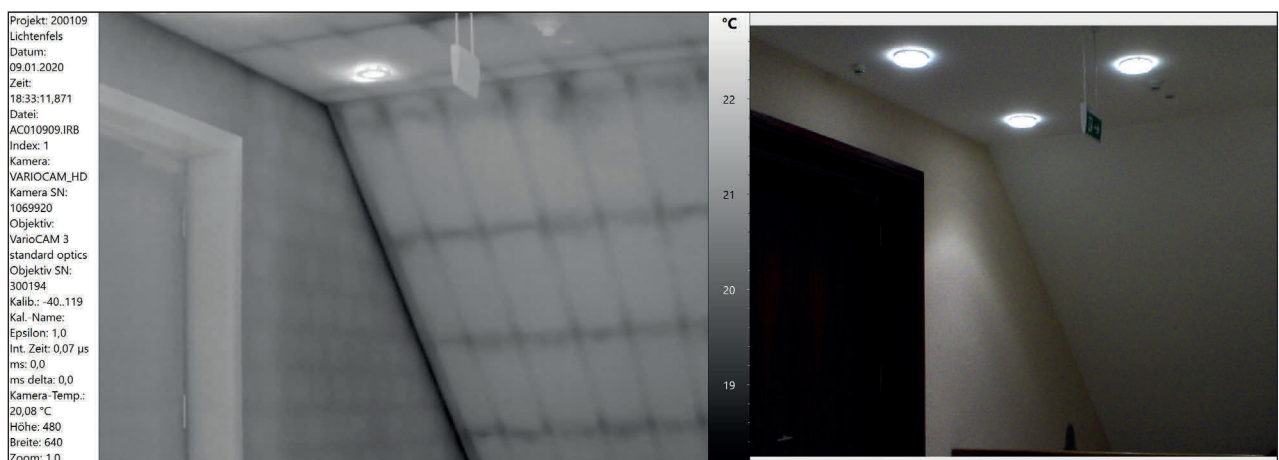
Befundbeschreibung: Wand mit Hochlochformaten, fortlaufende, gleichförmige thermische Segmente über Decke u. Dachschräge.



46 Befundinterpretation: Durch direkte Auflage und kraftschlüssige Verbindung der Dielen auf den Deckenbalken entsteht eine thermische Einheit, die träger reagiert als die freiliegenden Teile der Dielen. Hotspots in den Dielenfugen lokalisieren kleine Ritzen, durch die von unten Warmluft dringen kann.



47 Befundinterpretation: Unregelmäßige Hotspots als Indiz für aufsteigenden Warmluft durch kleine Ritzen und Fugen oder deren Anstauung in Winkeln und Ecken. (Photographie zu dunkel für detailliertere Befunde. Besser ausgeleuchtete Dokumentation notwendig.) Reihen punktförmiger Hotspots entstehen durch Nägel oder Schrauben zur Befestigung der Bodenbretter auf Deckenbalken.

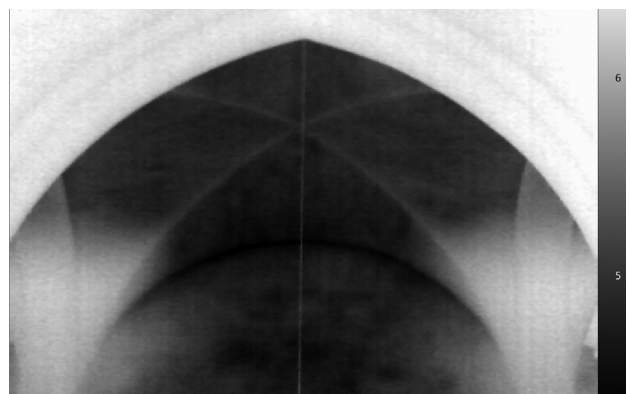
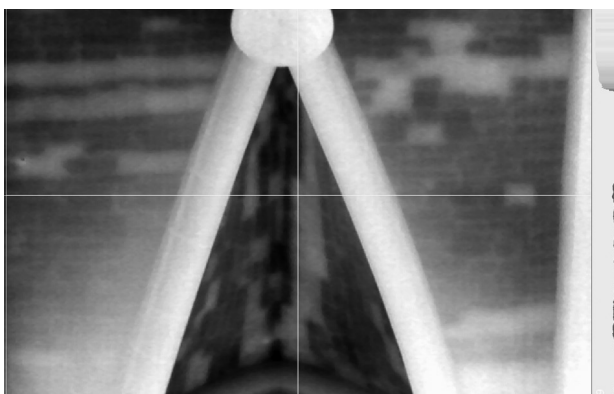
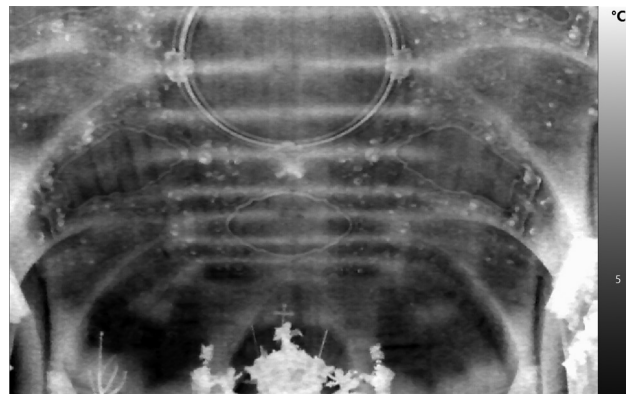
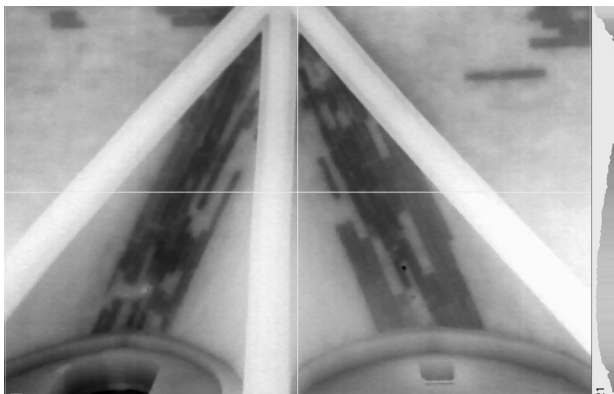
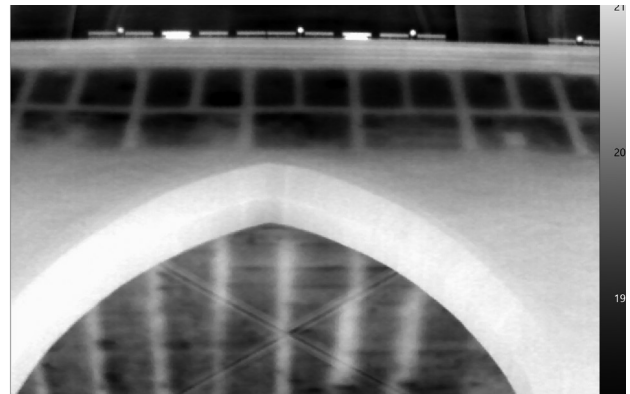
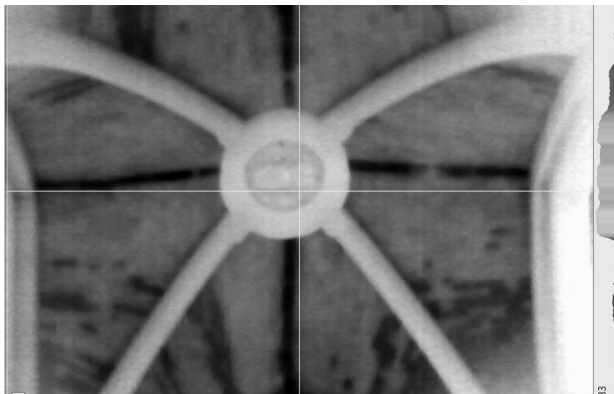


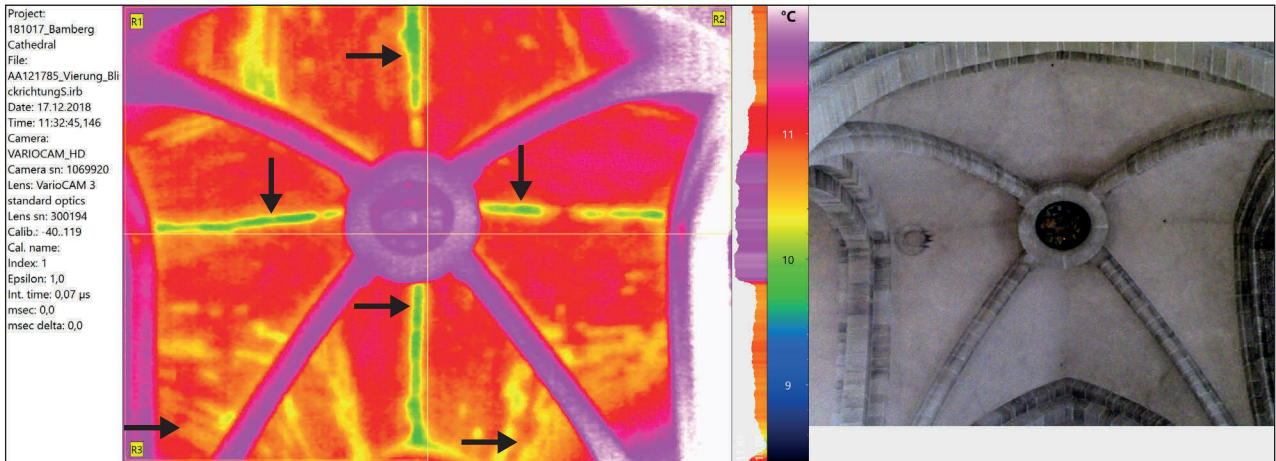
48 Befundinterpretation: Jüngerer Ausbau des Dachgeschosses mit neu eingezogener Zwischenwand und vollflächiger Dachdämmung mit Konterlattung als Beplankungsträger über Dachschräge und Decke hinweg. Typischerweise zusammengehörige Umbauphase aus Platzmangel, um Dachraum nutzbar zu machen.

Gewölbekonstruktionen in Thermogrammen

Details zur Art der Gewölbekonstruktion
Hinweise zu verbauten Materialien
Lokalisierung von Sonderbauteilen
Hinweise auf Risse, Verformungen und Schäden
Schlussfolgerungen zum Bauablauf

Gewölbe als flächige Bauteile mit meist verhältnismäßig geringem Querschnitt bieten meist sehr gute Bedingungen für thermographische Analysen. Vor allem dann, wenn ein größtmöglicher Temperaturunterschied zwischen Gewölbeextrados und -intrados besteht, also bevorzugt im Winter bei beheiztem Kirchenraum und ausgekühltem Dachstuhl oder im Sommer nach starker solarer Erwärmung des Daches und möglichst kühlem Kirchenraum. Zu den typischen thermographischen Befunden zählen bei Holzgewölben Anordnung und Dimensionierung der Tragstruktur sowie die Lage der Putzträger. Bei Steingewölben zeigen sich vor allem die Mauerwerksgefüge und evtl. Hinweise auf unterschiedliche Steinmaterialien.

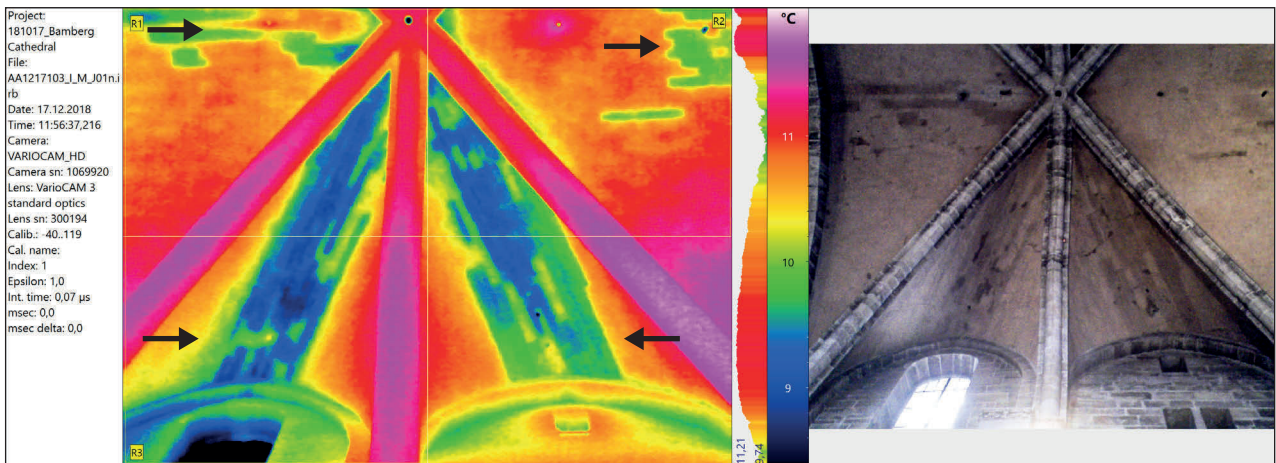




49 Kreuzrippengewölbe über Vierung

Befundansprache: Deutliche thermische Signatur in den Gratlinien der Spitztonnen und zu den Gewölbezwickeln hin.

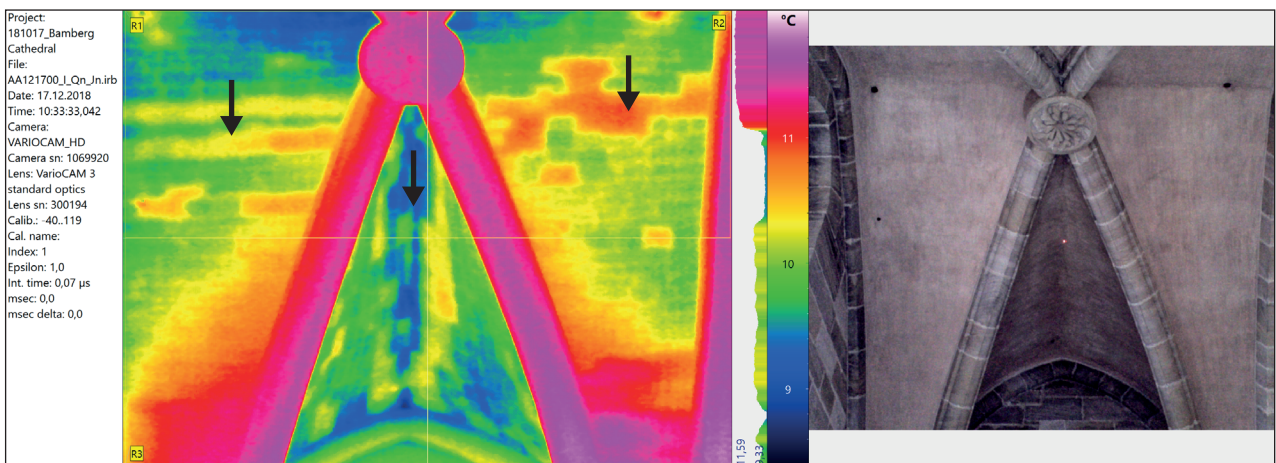
Befundbeschreibung: Schlusssteinartig sind die Gratlinien der Wölbflächen mit größeren Steinformaten gleichmäßig ausgemauert. Ab den Drittelpunkten der Gewölbezwickel zeigen sich symmetrisch zu den Gewölberippen ebenfalls thermisch aktive Steinformate, ihre Anordnung ist unregelmäßiger und unterscheidet sich in den einzelnen Zwickeln.



50 Sechsteiliges Kreuzrippengewölbe

Befundansprache: Thermische Signaturen abweichender Materialien in den Gewölbekappen.

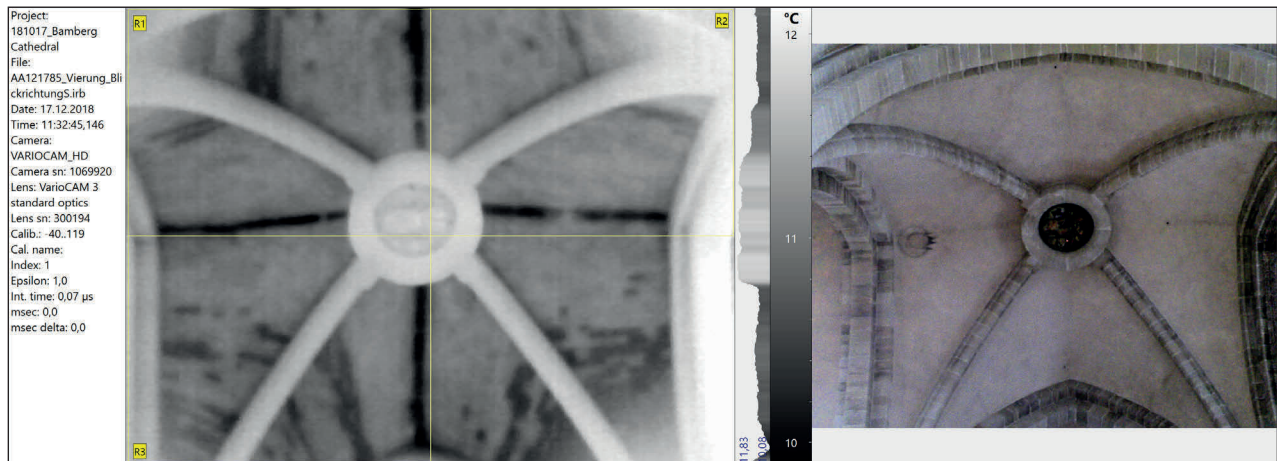
Befundbeschreibung: Die zweigeteilten, schräg an der Hochschiffwand auftreffenden Gewölbekappen sind in ihren Scheitelbereichen großzügig mit anderen Steinmaterialien aufgemauert. Vergleichbare thermische Signaturen vereinzelt auch in den längs gerichteten Kappen, aber ohne erkennbare Struktur.



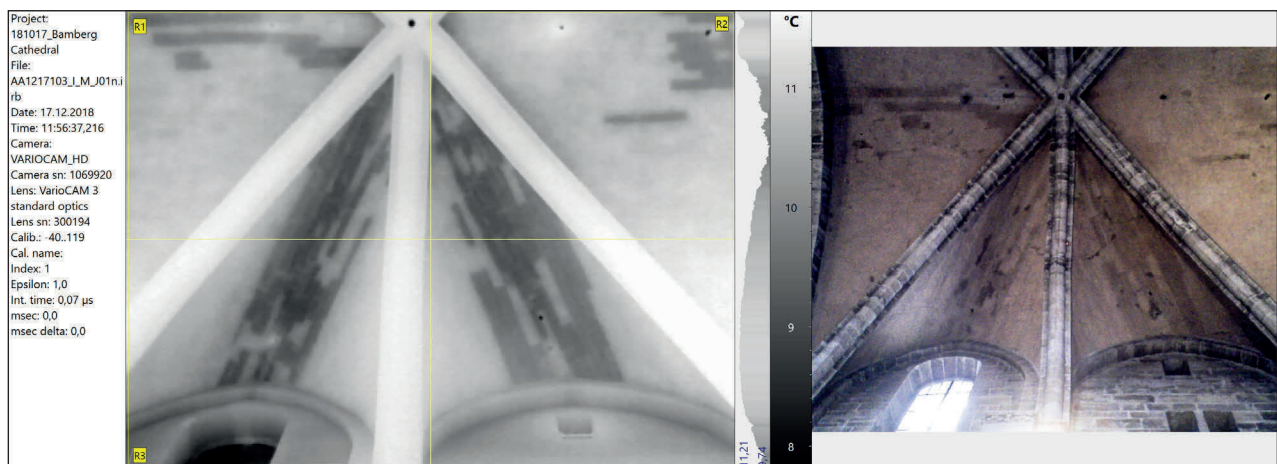
51 Kreuzrippengewölbe über rechteckigem Grundriss

Befundansprache: Thermische Signaturen abweichender Steinarten und -formate in den Gewölbekappen.

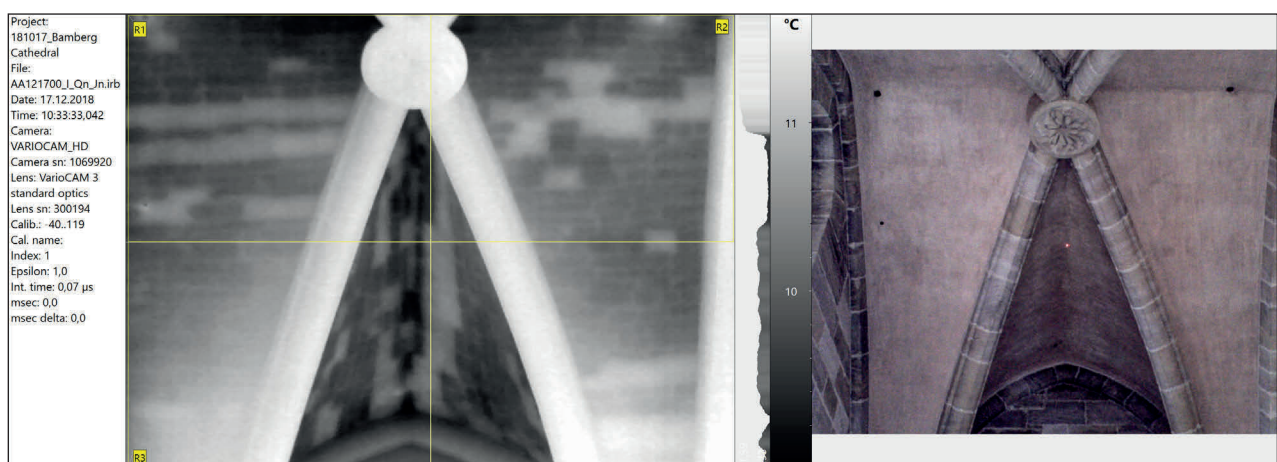
Befundbeschreibung: Unregelmäßige Verteilung d. abweichenden Steinarten im Vergleich zu sonst homogenem Mauerwerksgefüge.



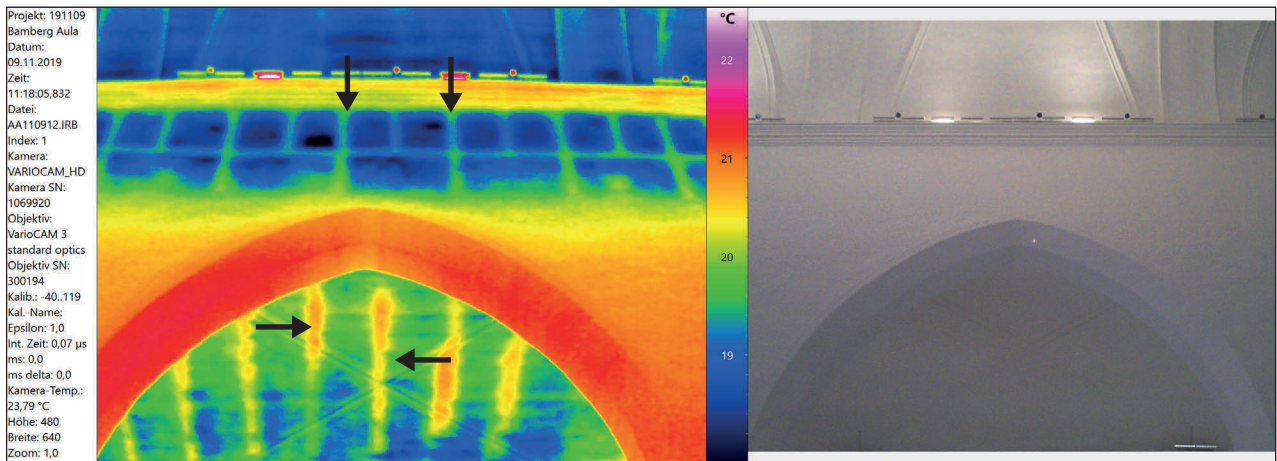
52 Befundinterpretation: Thermische Signaturen deuten auf variierende Steinmaterialien hin. Ihre Anordnung an statisch relevanten Stellen verdeutlicht ihre Funktion für das Tragsystem und ermöglicht Rückschlüsse zum Aufmauerungsprozess. Hinweis auf gezielt gewählte Steinarten und Steinformate, die aufgrund ihrer Materialeigenschaften zur Verbesserung an statisch beanspruchten Stellen eingesetzt werden.



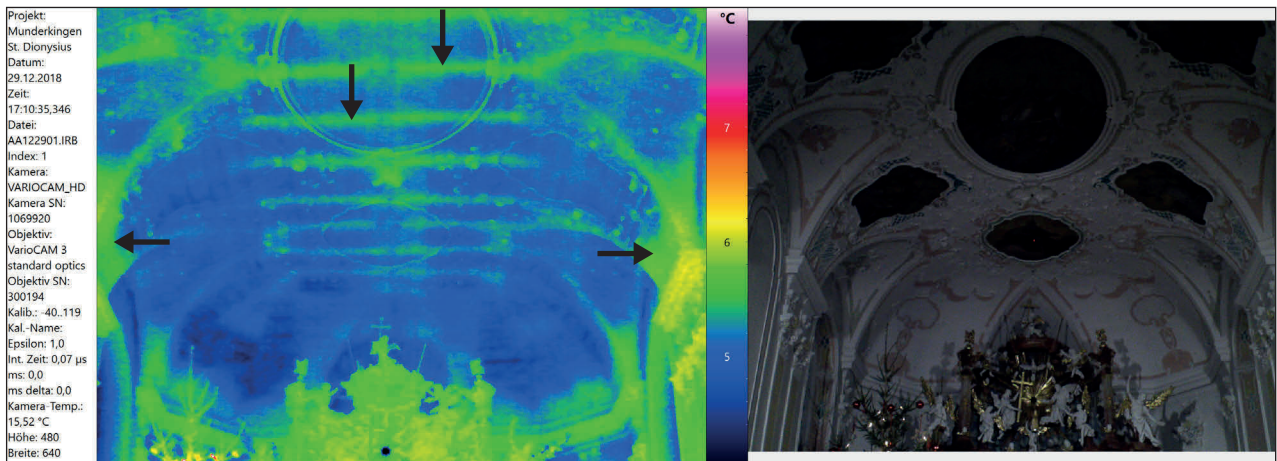
53 Befundinterpretation: Anordnung der abweichenden Steinarten zeigt keine klare Regelmäßigkeit, Ausmaß und Verteilung in kleinen Kappen sehr unterschiedlich. Möglicherweise ein Indiz für Ausbesserungen der Gewölbekappen. Zur Klärung sind weitere Befunde und Hintergrundwissen zum Bauablauf nötig.



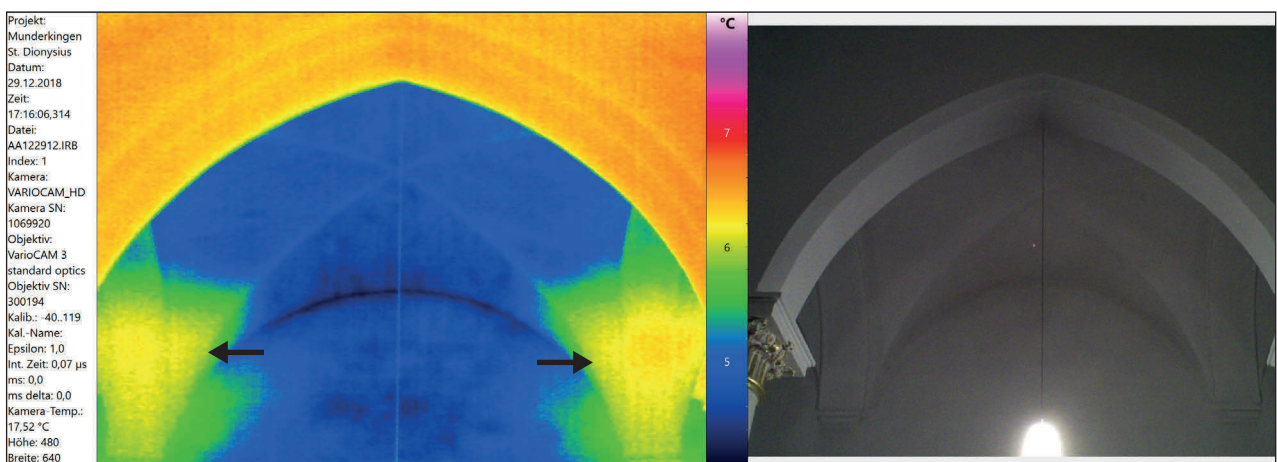
54 Befundinterpretation: Unregelmäßige Verteilung könnte sowohl ein Indiz für die Abschnitte des Bauablaufs mit variierend verfügbaren Baumaterialien sein als auch ein Hinweis auf Reparatur- oder Austauschstellen mit Füllformaten. Zur Klärung sind weitere Befunde und Hintergrundwissen zum Bauablauf nötig.



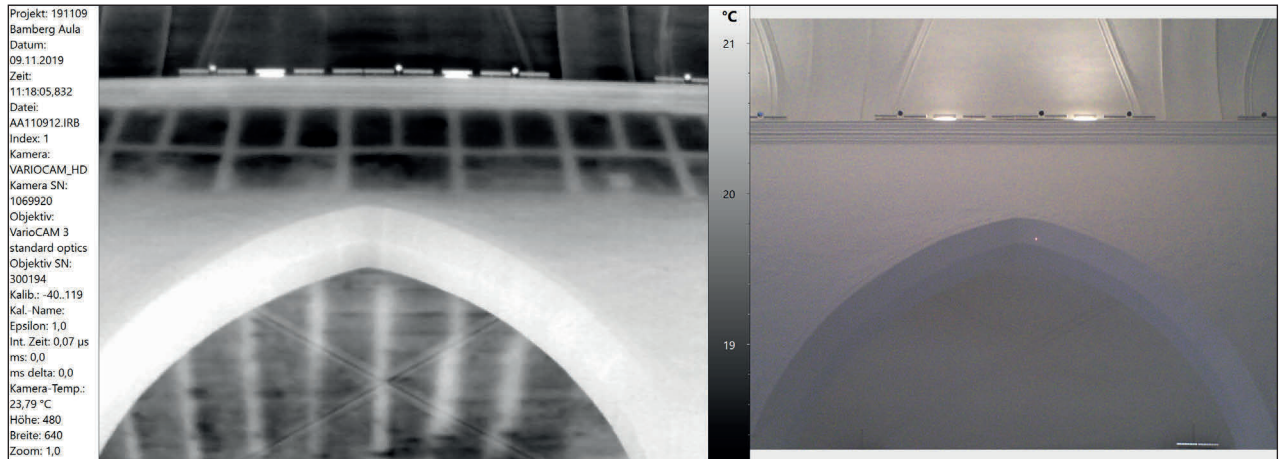
55 Flachdecke über Seitenschiff, tlw. verdeckt von davorliegendem Scheidbogen mit aufgehendem Tonnengewölbe im Mittelschiff.
Befundansprache: Thermische Signatur eines aufgehenden Fachwerkgefüges über Scheidbögen; Deckenstruktur im Nebenschiff.
Befundbeschreibung: Scheidwand mit regelmäßig angeordneten und dimensionierten Holzständern auf einer durchlaufenden Schwelle und mit durchgehenden Queraussteifungen. Flachdecke im Nebenschiff zeigt die thermische Signatur von symmetrisch und mit gleichbleibenden Abständen über jedes Deckenfeld verteilte Querhölzer. Ausrichtung korrespondiert mit Fachwerkständern.



56 Barockes Gewölbe mit Deckenspiegel und Stichkappen, Holzspantenkonstruktion mit Putzträger, Bockshaut und Stuckierung.
Befundansprache: Regelmäßige thermische Signaturen im Deckenspiegel und zu Zwickeln hin. Zwickel ebenfalls thermisch auffällig.
Befundbeschreibung: Anordnung und Dimensionierung der skelettartigen Gewölbeträgerstruktur zeichnen sich unter Putz ab. Im Detail sind auch die quer zum Holzgerüst verlaufenden Latten der Putzträger erkennbar.



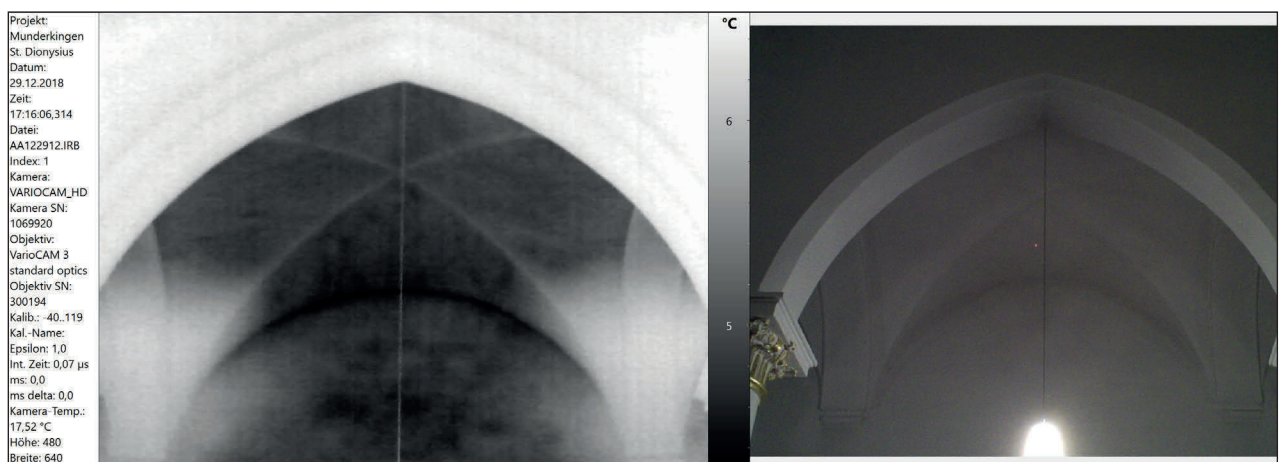
57 Kreuzgratgewölbe in einem Seitenschiff, teilweise verdeckt von davorliegendem Scheidbogen
Befundansprache: Thermische Anomalien der Gewölbstruktur auf Höhe der Gewölbezwickel.
Befundbeschreibung: Symmetrische Hotspots in Gewölbezwickeln zur Außenwand hin, ungefähr bis zum Wölbungs-Drittelspunkt.



58 Befundinterpretation: Oberer Abschluss der Scheidwand als ausgemauertes Fachwerk ausgeführt. Vermutlich im Zuge der nachträglichen Mittelschiff-Einwölbung eingebracht, Fachwerk als Traggerüst für Holztonnengewölbe (im Dachraum einsehbar) und zur Erhöhung des Kirchenraumes. Flachdecke im Seitenschiff ebenfalls Holzkonstruktion aus Deckenbalken, quer zum Seitenschiff verlaufend, mit darunter genagelten Holzlatten als Putzträger, parallel zum Seitenschiff verlaufend.



59 Befundinterpretation: Gewölbekonstruktion aus Deckenbalken und daran aufgehängten Holzspanten, bogenförmige Holzbauteile, die die Stichkappen ausbilden und die Putzlattung tragen. Die Holzbauteile des Spantengewölbes kühlen wesentlich langsamer aus als Putz und Stuck und zeichnen sich deshalb als thermische Signaturen auch an der Gewölbeunterseite ab.

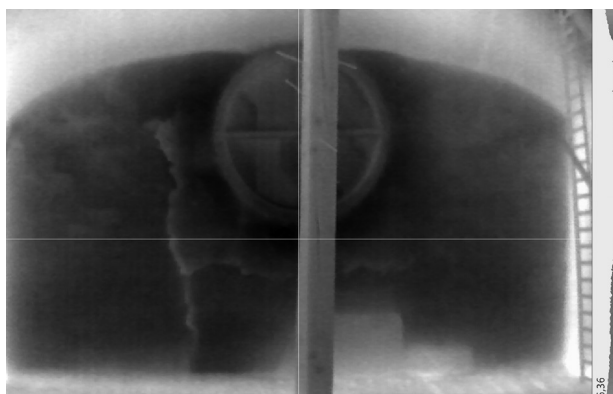
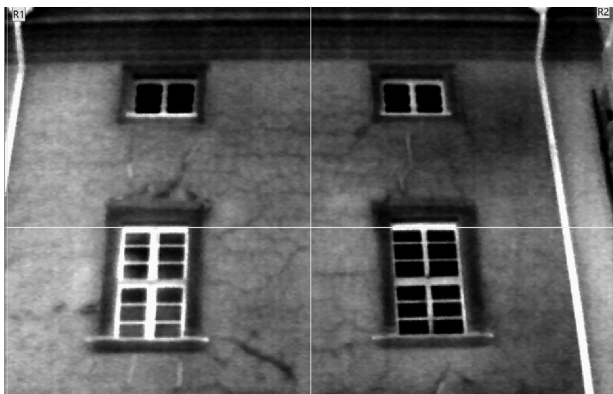


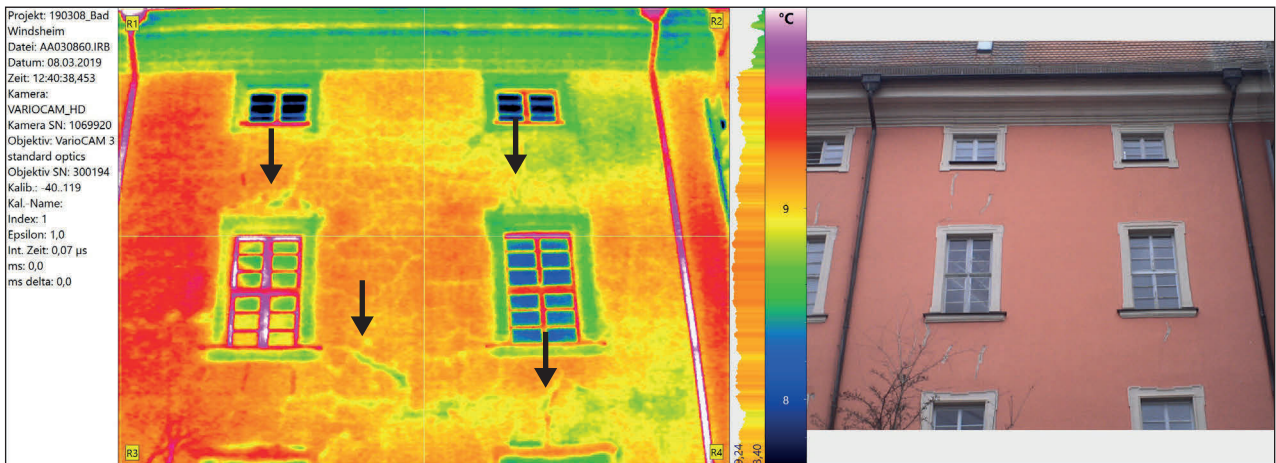
60 Befundinterpretation: Aufgrund der lockeren Verfüllung der Gewölbezwickel mit Bauschutt bis ungefähr zum Drittelpunkt reagieren diese thermisch träge. Die erhöhte Masse an dieser Stelle trägt nicht nur zur Gewölbestabilität bei, sondern auch zu einer thermischen Pufferung. So kühlen die Zwickel wesentlich langsamer aus als die dünne Gewölbeschale oder die Außenwand.

Schäden und Reparaturen in Thermogrammen

Zusätzliche Informationen zu Schäden und Schadensverläufen
 Rekonstruktion von Schadensursachen
 Lokalisierung von Schwachstellen und potentiellen Schadstellen
 Aussagen zu Art und Umfang von Reparaturmaßnahmen
 Einschätzung der Tauglichkeit von Sanierungen
 Visualisierung von Qualitäten und Leistungsfähigkeit historischer Gebäude

Während klassische Bauthermographie typischerweise schadenszentriert vorgeht, ist dies in der Bauforschungsthermographie nur ein Aspekt unter vielen. Die thermographische Schadensanalyse ermöglicht zunächst eine Visualisierung der bestehenden sowie zusätzliche Informationen zu verdeckten Schäden und Schadensmechanismen, zu konstruktiven und materiellen Schwachstellen. Im baulichen Kontext können damit häufig auch die Schadensursachen rekonstruiert werden. Entgegen dem schadenszentrierten Ansatz eignen sich Thermogramme auch sehr gut zur Visualisierung der Leistungsfähigkeit historischer Gebäude, indem sie explizit auch schadensfreie, äußerst taugliche historische Konstruktionen zeigen.

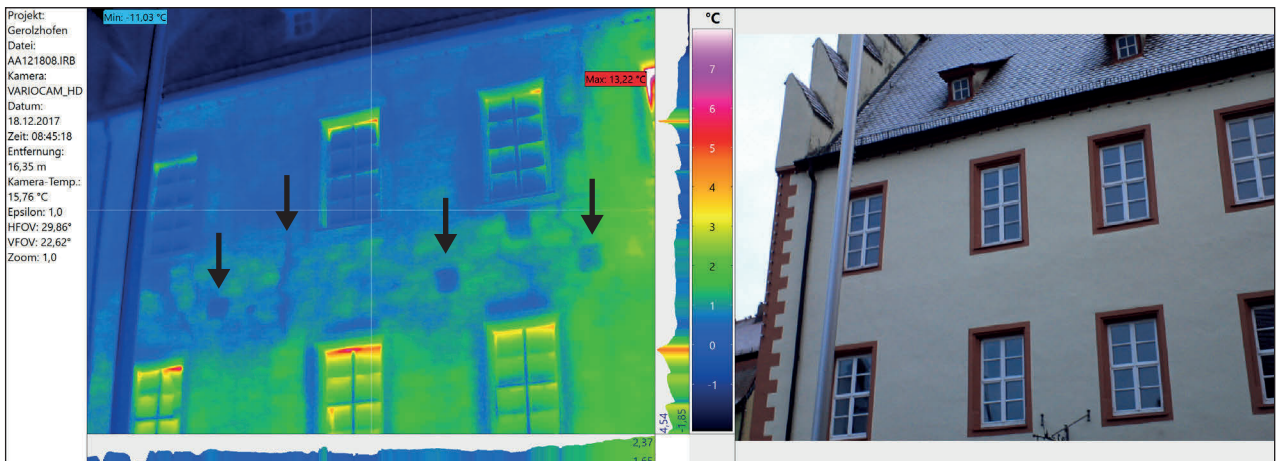




61 Westfassade

Befundansprache: Thermische Signatur von multiplen Rissverläufen im und unter Putz, teilweise mit lokalem Materialverlust.

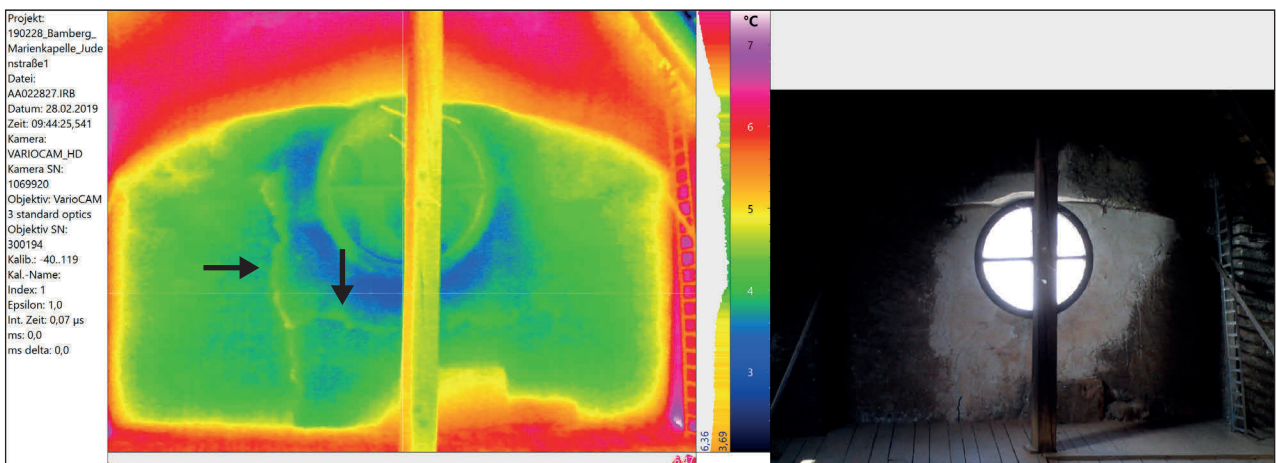
Befundbeschreibung: Netzartige Rissverläufe in alle Richtungen, unterschiedliche Rissbreiten, die größten auch visuell gut erkennbar. Besonders viele Risse im Brüstungsbereich der Fenster.



62 Traufseitige Fassade

Befundansprache: Thermische Signaturen vereinzelter Rissverläufe. Außerdem lose verteilte quadratische thermische Strukturen im Brüstungsbereich zwischen den Fensterreihen.

Befundbeschreibung: Rissverläufe vertikal oder schrägvertikal, teilweise von Fensterbrüstung bis fast zum darunterliegenden Fenstersturz, vereinzelt auch von oberer Fensterreihe zur Traufe, Verlauf meist entlang der Mauerwerksfugen.



63 Giebelmauerwerk eines Dachstuhls

Befundansprache: Deutliche thermische Signatur eines Vertikalrisses mit mittig anschließendem Horizontalriss.

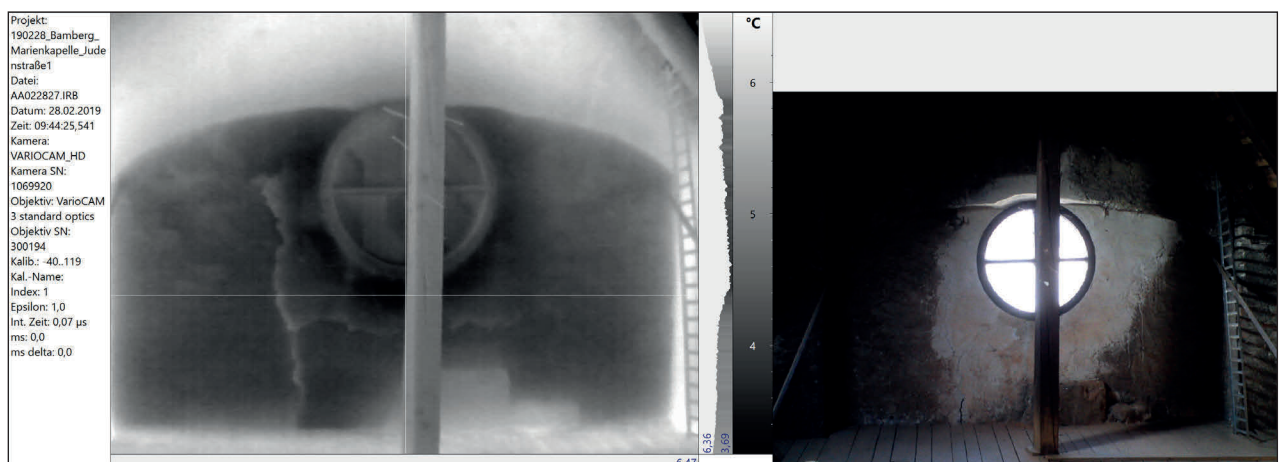
Befundbeschreibung: Rissverläufe direkt neben bzw. unter Bullaugenfenster mit nachträglicher Putzfläche.



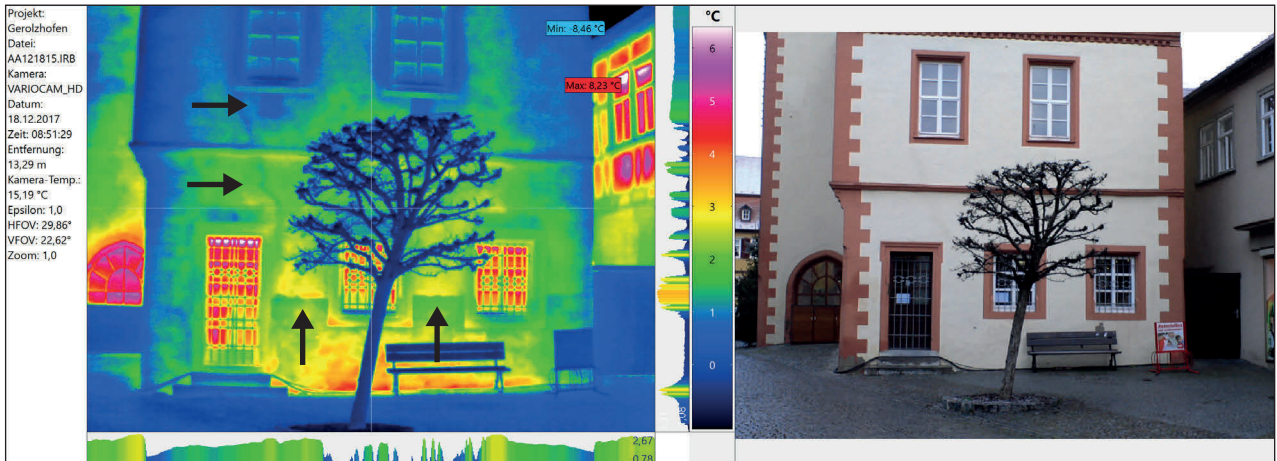
64 Befundinterpretation: Thermische Abbildung der Risse aufgrund lokal gestörter Wärmeverläufe, je größer die Risse, desto deutlicher ihre thermische Signatur. Multiple Rissverläufe und Rissbreiten sind Hinweis für großflächige Gründungsprobleme und Setzungserscheinungen.



65 Befundinterpretation: Rissursachen sind keine bloßen Witterungsschäden oder Materialdegenerationen. Vertikale Rissverläufe entlang der Mauerwerksfugen als Hinweis auf einwirkende Zug- oder Scherkräfte. Möglicherweise im Zusammenhang mit Giebelverankerung. Quadratische thermische Signaturen wirken wie einbindende Balkenköpfe, Anzahl dafür aber zu gering, Verteilung zu unregelmäßig. Ohne weitere Befunde nicht eindeutig zu klären, Untersuchungen im Innenraum nötig.



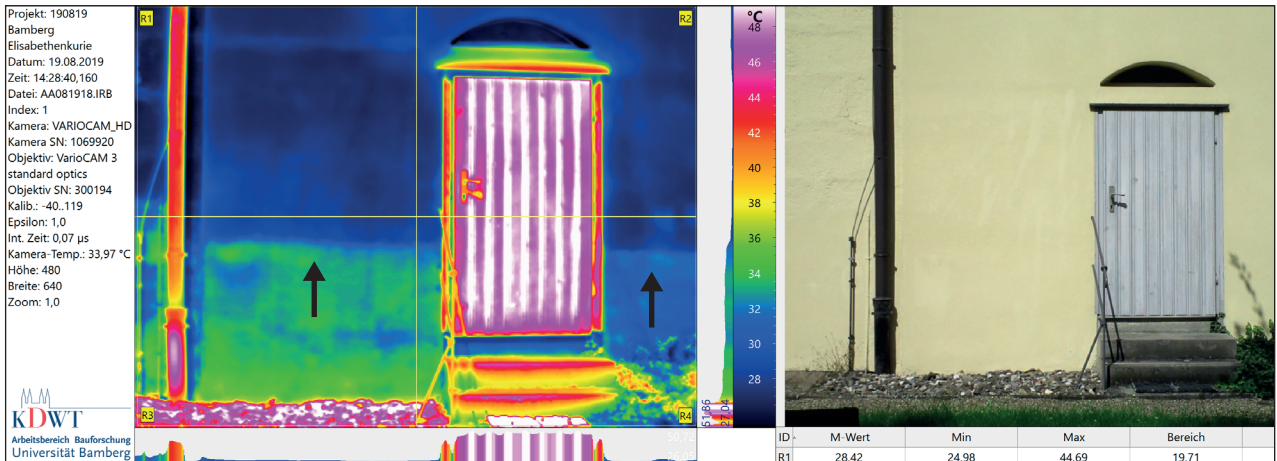
66 Befundinterpretation: Allein mit thermographischen Daten nicht interpretierbar! Weitere Informationen zu Dachtragwerk, Giebelmauerwerk, Giebelaußenseite und früheren Schadensprozessen und Sanierungen sollten eingeholt werden.



67 Giebelseite eines Anbaues

Befundansprache: Thermische Signatur einer durchlaufenden horizontalen Kante im EG, Diagonalriss unter linkem Fenster und quadratischen Strukturen im Brüstungsbereich der Fenster im OG.

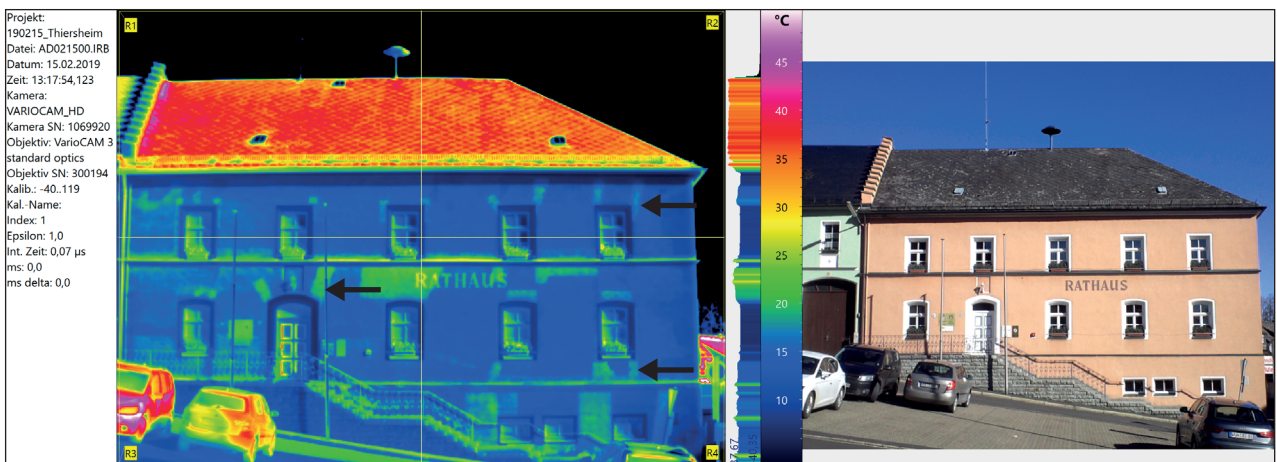
Befundbeschreibung: Horizontale Kante im EG sehr klarer thermischer Absatz, läuft über gesamte Fassadenbreite. Sockelzone ist mittig thermische aktiver als Umgebung. Rissverlauf entlang Mauerwerksfugen, über Geschosstrennung hinweg.



68 Gartenfassade, Südausrichtung

Befundansprache: Horizontal durchlaufende thermische Kante.

Befundbeschreibung: Sehr klarer thermischer Absatz im Sockelbereich, durchlaufend über gesamte Fassadenbreite. Visuell nicht erkennbar, Fassadenoberfläche sehr homogen.



69 Südwestfassade

Befundansprache: Rechteckige, klar abgegrenzte thermische Signaturen ausgehend von den Ecken der Fenster.

Befundbeschreibung: Wiederkehrende thermisch aktive Bereiche mit sehr klaren Kanten, über die Putzfaschen der Fenster hinaus.



70 Befundinterpretation: Horizontale Kante im EG ist das Resultat einer Sockelsanierung, thermische Kante wird durch neu aufgetragenen Sockelputz erzeugt. Ursache der Sanierung vermutlich feuchte Sockelzone, teilweise noch als thermisch aktiver Bereich mittig erkennlich. Rissverlauf weist auf statische Ursachen hin, keine material- oder witterungsbedingten Prozesse. Weitere Befunde zur Abklärung nötig.



71 Befundinterpretation: Ebenfalls eine Sockelsanierung mit thermisch aktivem Sanierputz. Vermutlich zusammen mit Drainageschicht und Kiesbett am Sockelfuß angelegt.



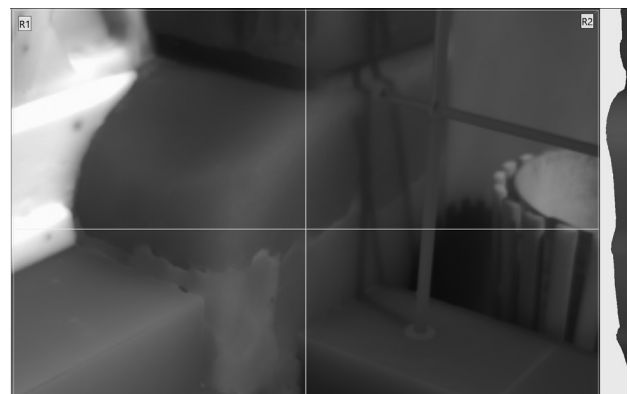
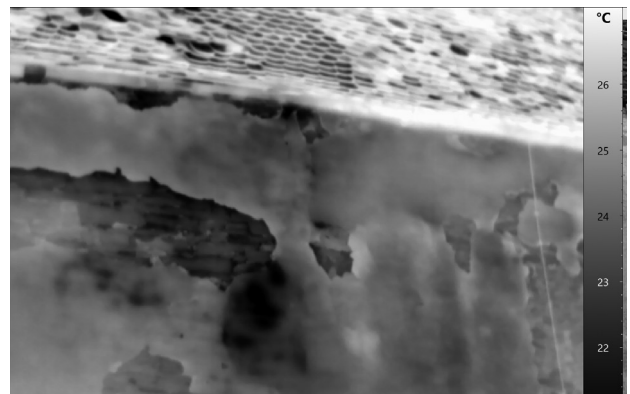
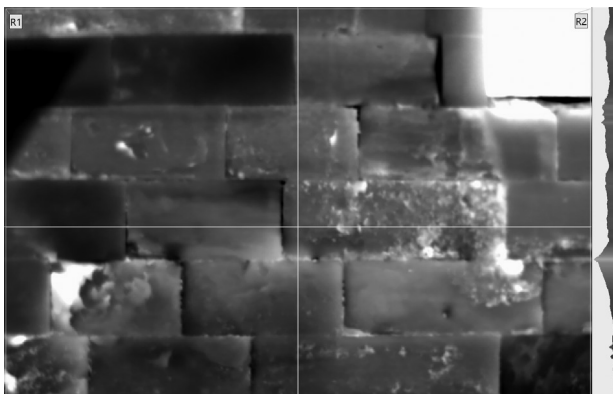
72 Befundinterpretation: Lokale, flickstellenartige Sanierungen mit thermisch aktivem Sanierungsputz in variierenden Größen. Visuell nicht erkennbar. Ursache wahrscheinlich lokal begrenzte Rissverläufe ausgehend von Fensterrahmungen.

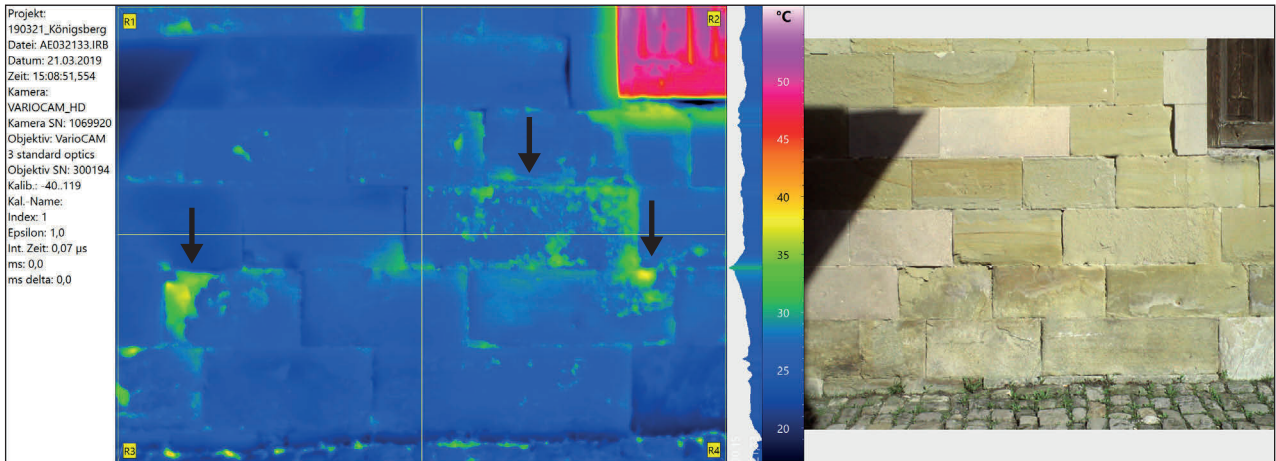
Steinoberflächen in Thermogrammen

Thermographische Dokumentation von Schadensphänomenen in verschiedenen Stadien, Restaurierungen und Sanierungen an Natursteinoberflächen und deren witterungsabhängiges thermisches Verhalten.

Thermographie als Technik zur zerstörungsfreien Befunderhebung, als Kartierungsgrundlage oder -ergänzung sowie als Visualisierungsverfahren abweichender Oberflächenparameter.

Im Bereich der Natursteinoberflächen und generell für die Analyse steinsichtiger Bauteile kann Thermographie einen wichtigen Mehrwert leisten. Auch wenn die Strukturen hier nicht verdeckt, sondern meist direkt einsehbar sind, bietet die thermographische Darstellung zusätzliche Informationen zu strahlungsabhängigen Objekteigenschaften wie Oberflächenbeschaffenheit, Haftung, Feuchtegehalt etc. Poröse, absandende, abschalende, verkrustete oder durchfeuchtete Oberflächen reagieren thermisch anders als schadfreie Bauteile, Restaurierungsmörtel und Steinerfüllmassen haben andere thermische Eigenschaften als die Originalsubstanz und können so als thermische Anomalien im Thermogramm visualisiert werden

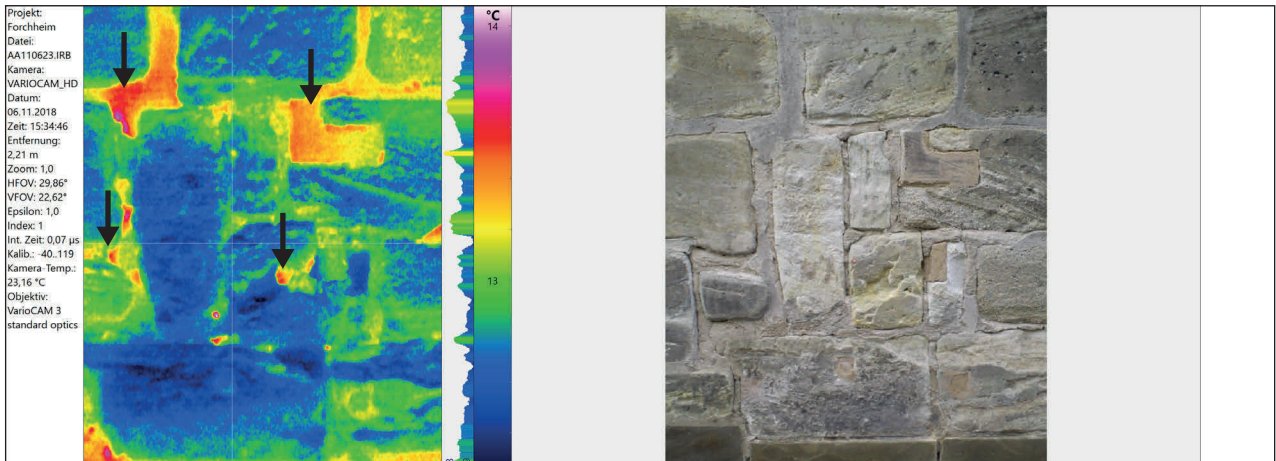




73 Sandsteinmauerwerk

Befundansprache: Verstreute thermische Signaturen lokaler Hotspots an thermisch homogener Sandsteinoberfläche.

Befundbeschreibung: Regelmäßiges Quadermauerwerk mit unterschiedlichen Graden der Oberflächenverwitterung, stellenweise Materialverlust, teilweise ausgetauschte Steine.



74 Natursteinmauerwerk

Befundansprache: Lokale thermische Anomalien in Fugenverläufen

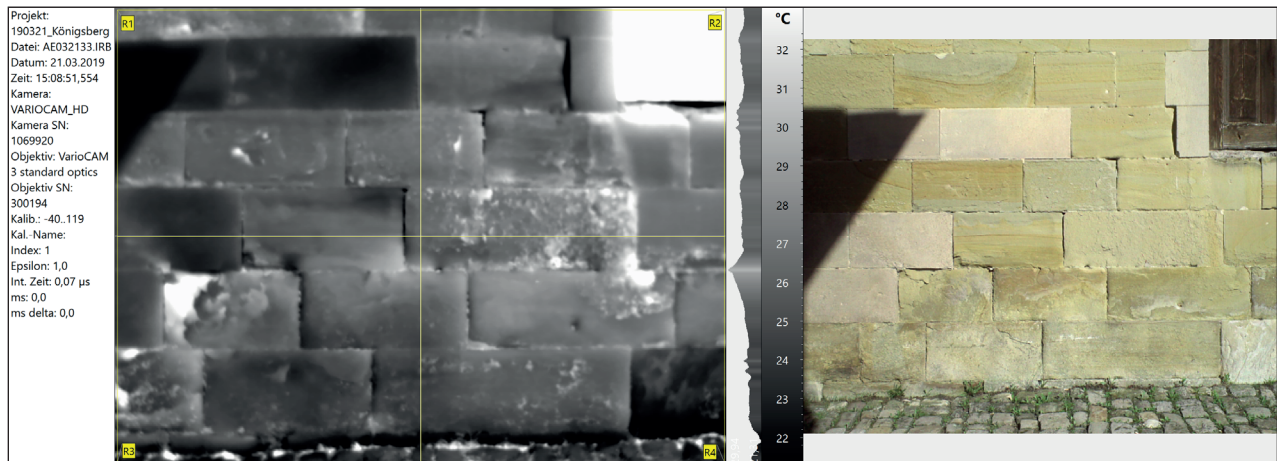
Befundbeschreibung: Heterogene Mauerwerksstruktur mit verschiedenen Steinformaten, Steinarten und variierenden Fugenbreiten. Darüber lokale Ausbesserungen, Fugenergänzungen und Oberflächenbearbeitungen einzelner Natursteine. Thermische Anomalien entlang der Fugenverläufe verstreut, individuelle Formen und Größen.



75 Natursteinmauerwerk

Befundansprache: Thermische Signatur eines großformatigen Materialwechsellbereichs, Backsteinformate statt Natursteinquader.

Befundbeschreibung: Hochrechteckige Austauschstelle von Fachwerkschwelle oben bis weit ins Mauerwerk nach unten.



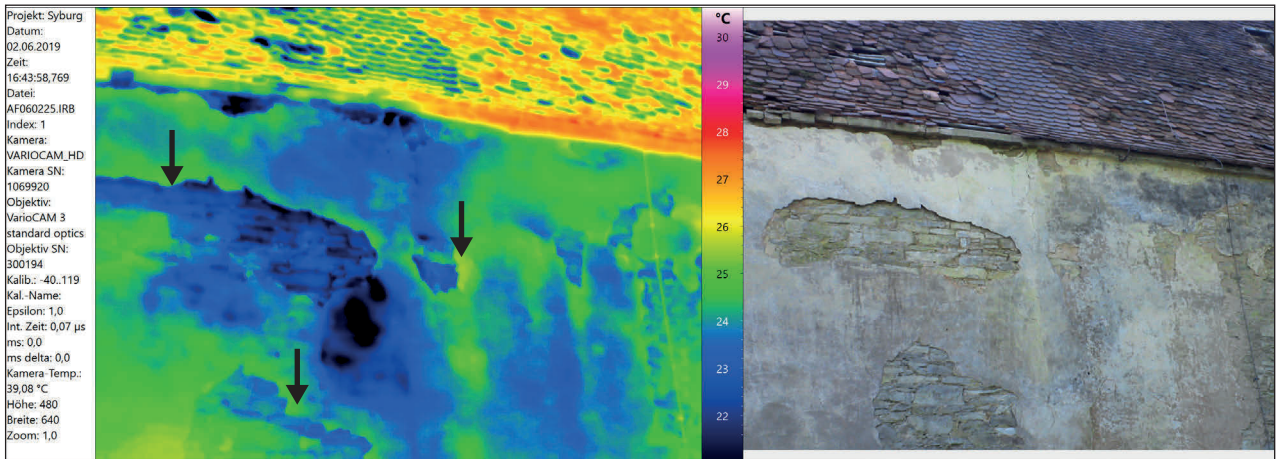
76 Befundinterpretation: Thermisch aktive Stellen markieren stehende Luftschichten an Sandsteinoberfläche, hervorgerufen durch lokale Schalenbildung und Ablätterungen. Thermische Anomalien hier als Indikatoren für Schädigungsprozesse an Natursteinoberflächen. Lokalisierung im Thermogramm als Ergänzung zu restauratorischer Kartierung.



77 Befundinterpretation: Thermisch aktive Stellen als Hinweise auf puffernde Luftschichten und/oder verändertes Absorptionsverhalten. Hotspots markieren Fugensanierungen mit abweichenden Materialeigenschaften und/oder gelockerte bzw. lose Anteile von Mörtel und Natursteinoberflächen. Thermische Anomalien hier als Indikatoren für sanierte und/oder lockere Bestandteile. Lokalisierung im Thermogramm als Ergänzung zu restauratorischer Kartierung.



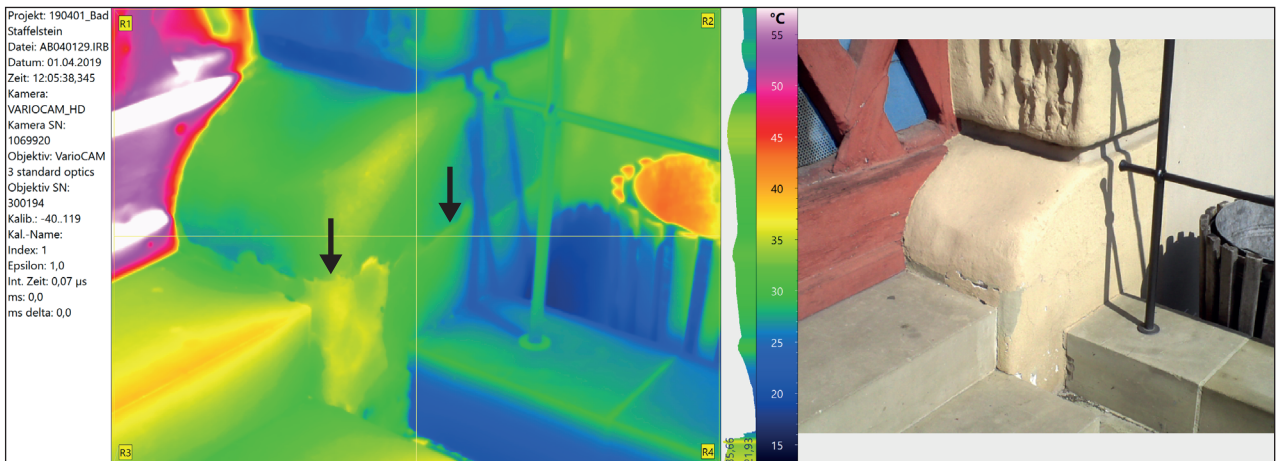
78 Befundinterpretation: Thermische Variation im Mauerwerk infolge von lokalem Materialersatz, Quadermauerwerk aus Naturstein ersetzt durch kleinteiliges Backsteinmauerwerk mit abweichenden thermischen Eigenschaften. Oberflächengestaltung, Putzfärbung und -haptik und Fugenstrich sollen Natursteinformate nachahmen.



79 Traufseite eines ehemaligen Wirtschaftsgebäudes

Befundansprache: Diffuse, verlaufsartige thermische Signaturen über die fragmentierte Putzoberfläche verteilt.

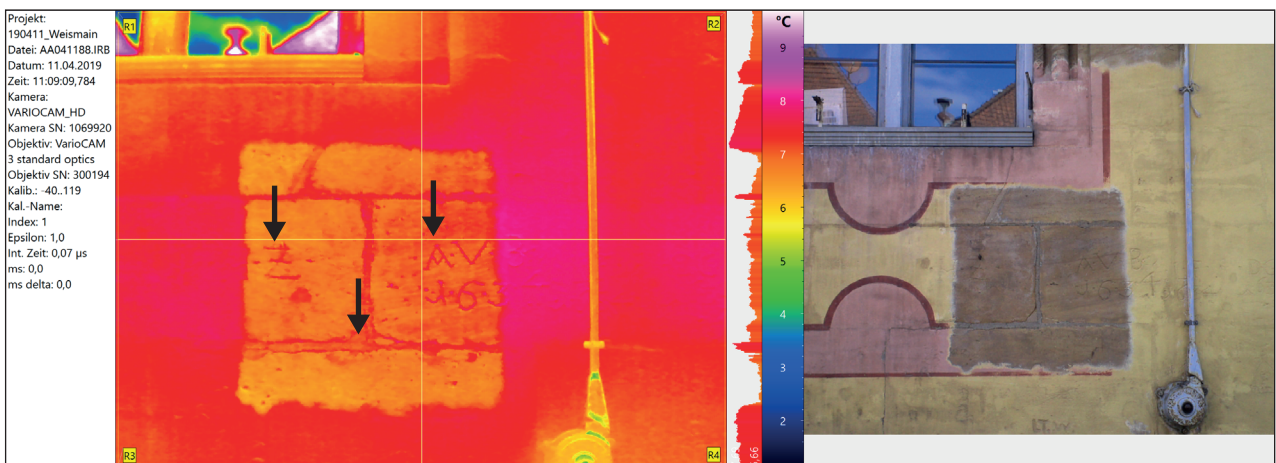
Befundbeschreibung: Stark angegriffene, vielfach ausgebrochene Putzschicht mit multiplen Schadensphänomenen. Thermische Verläufe entlang der Ausbruchskanten, teilweise auch über Putzflächen hinweg.



80 Türschwelle mit Sockeleinfassung

Befundansprache: Thermische Kante an farbig gefasstem Sockelstein.

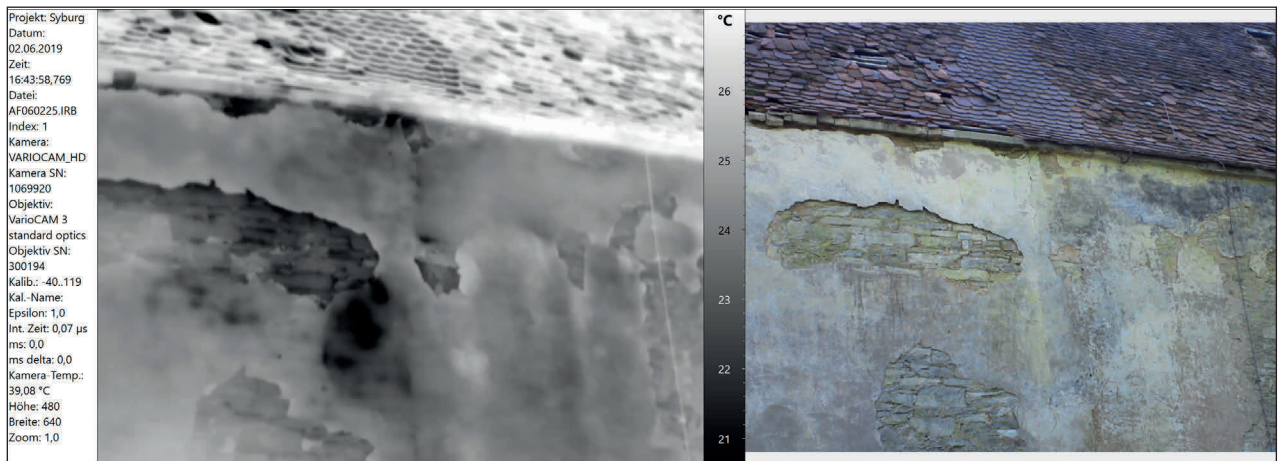
Befundbeschreibung: Verlauf der thermischen Signatur entspricht horizontalem Rissverlauf über gesamtes Sockelelement hinweg. Teilweise auch oberflächliche Farbabplatzungen.



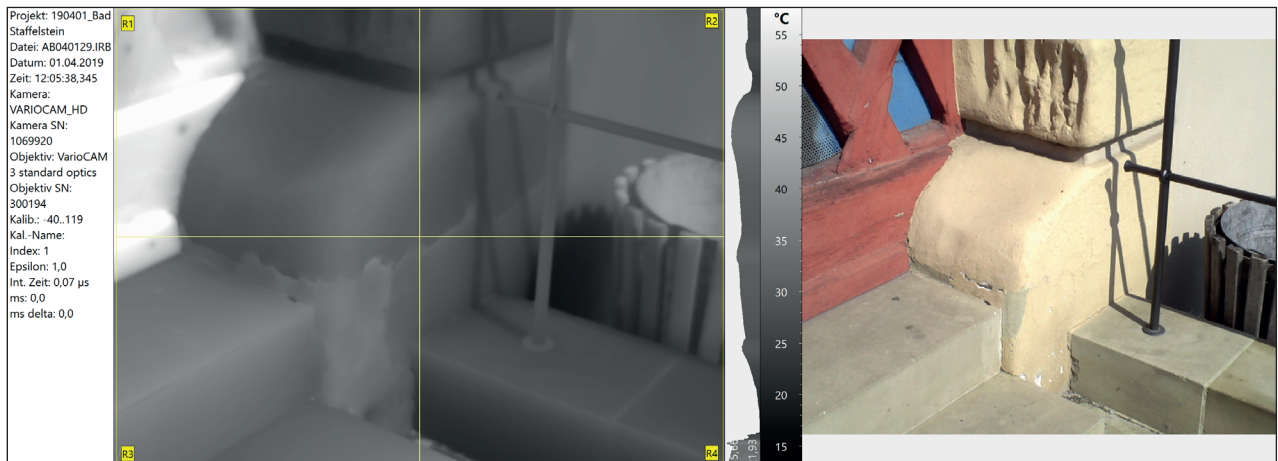
81 Farbig gefasste Natursteinfassade

Befundansprache: Thermische Signatur der freiliegenden Steinoberfläche mit Beschriftung hebt sich deutlich von Umgebung ab.

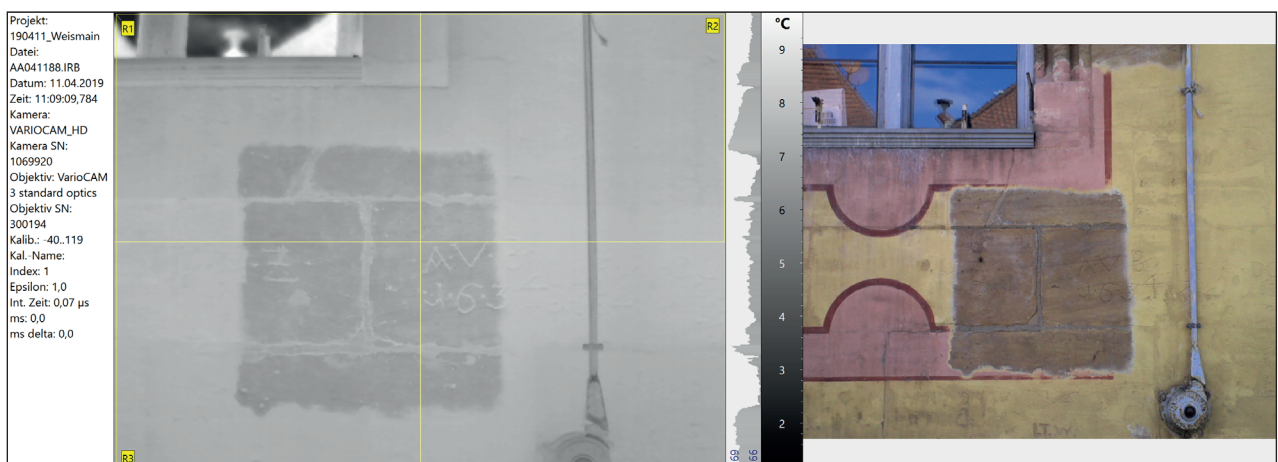
Befundbeschreibung: Klare Lesbarkeit v. Oberflächenrelief, eingeritzten Beschriftungen, kleineren Ausbruchstellen und Fugenverlauf.



82 Befundinterpretation: Thermische Verläufe als möglicher Indikator für Festigkeit und Haftung der Putzoberfläche. Bei teilweise abgelösten Putzpartien dringt Luft zwischen Putz und Träger, wirkt als thermischer Puffer und erzeugt lokale thermische Anomalien im Vergleich zu fest haftenden Putzschichten mit direktem Wärmeübergang von Mauerwerk zu Putz. Besonders deutlich an Kanten von Ausbruchstellen. Thermogramm als Hinweis auf Putzablösungen, in Kombination mit restauratorischer Untersuchung auch als Kartierungsgrundlage.



83 Befundinterpretation: Rissverlauf erzeugt klare thermische Kante, verursacht durch aufsteigenden Feuchtigkeit im Sockelbereich. Möglicherweise partieller Steinersatz im unteren Bereich. Thermogramm hier als ergänzende Darstellung für eindeutige Rissdetektion.



84 Befundinterpretation: Farbfassung homogenisiert die Natursteinoberfläche thermisch. Thermogramm hier als Visualisierungsmöglichkeit für freiliegenden Natursteinflächen und deren Oberflächenrelief ohne überlagernde visuelle Informationen.

7. Einbindung der Infrarotthermographie in eine denkmalgerechte Gebäude- und Kulturgutdokumentation

Thermographie sollte niemals als allein stehende Methode in der Bauforschung genutzt, sondern immer eingebunden werden in einen Kanon bauforscherischer Untersuchungen und deren Auswertung. Entsprechend sollten auch die Ergebnisse thermographischer Bauforschung, Thermogramme und ihre Interpretationen, integriert werden in eine übergeordnete Darstellung bauforscherischer Erkenntnisse. Nur so kann die Thermographie langfristig einen Mehrwert für eine denkmalgerechte Kulturgutdokumentation bilden.

Das folgende Kapitel beschreibt die Zusammenführung und Weiterentwicklung digitaler Dokumen-

tations- und Visualisierungsmethoden für radiometrische und geometrische Daten. Dies beinhaltet einerseits die Evaluierung der Kombinationsmöglichkeiten einzelner Infrarotaufnahmen untereinander und andererseits die Ansätze zur geometrischen Referenzierung thermographischer Daten für 2D- und 3D-Darstellungen. Dabei werden die Anschlussfähigkeit dieser Darstellungen, ihre Aussagekraft und das Verhältnis von Aufwand zu Mehrwert abgeschätzt. Besonders vor dem Hintergrund der schnellen technologischen Weiterentwicklungen in der Kulturgutdokumentation soll damit eine Grundlage für nachhaltige Qualitätsstandards bereitet werden.

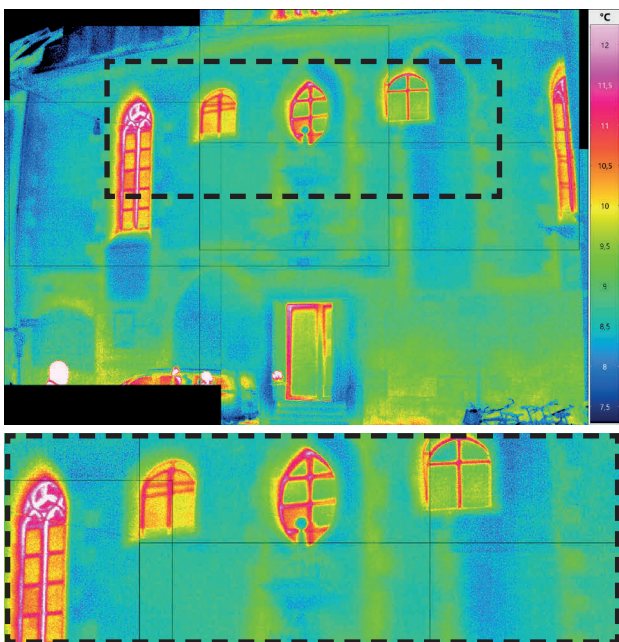
7. Einbindung der Infrarotthermographie in eine denkmalgerechte Gebäude- und Kulturgutdokumentation

- 7.1 Erweiterung der Darstellungsmöglichkeiten - Die Kombination einzelner Infrarotaufnahmen
- 7.2 Kombination von thermalen und geometrischen Daten
- 7.3 Metrische 2D Infrarotthermographie
- 7.4 Metrische 3D Infrarotthermographie

7.1 Erweiterte Darstellungsmöglichkeiten: Die Kombination einzelner IR-Aufnahmen

Die Visualisierungsmöglichkeiten radiometrischer Phänomene durch Infrarotkameras werden maßgeblich durch die thermische und geometrische Auflösung des Kameramodelles bestimmt. Die verhältnismäßig kleinen IR-Detektorformate von weit unter einem Megapixel - die gebräuchlichsten liegen aktuell bei 640x480 beziehungsweise 1028x960 Pixel - bieten nur eine beschränkte Auflösung der Thermogramme. Um bauliche Befunde hinreichend präzise darstellen zu können, erfordern bauhistorische IR-Untersuchungen in der Regel eine Vielzahl an detailreicheren Nahaufnahmen. Übersichtsaufnahmen von ganzen Gebäudeseiten oder großen Bauteilen genügen in ihrer geringen Detailschärfe selten zur Klärung der bauhistorischen Fragestellungen.

Erschwerend hinzu kommt, dass vor allem für Innenraumaufnahmen, aber auch vor Fassaden in engen Straßen die Standardbrennweiten der IR-Objektive meist keine vollständige Objektabbildung erlauben. Die Einzelaufnahmen können in baulich beengten Messsituationen oft nicht den erforderlichen Bildwinkel erfassen. Alternativ zu einem Weitwinkelobjektiv können auch hier Serien von Einzelbildern angefertigt und diese anschließend zu einer übergeordneten Gesamtdarstellung montiert bzw. zusammengefügt werden. Dieser Prozess wird auch Stitching genannt.

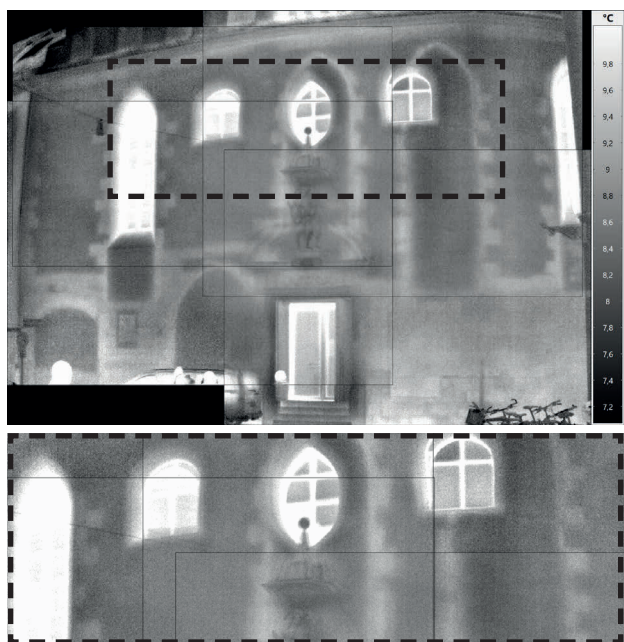


METHODE: Thermogramm Einzelbilder-Stitching (Image Stitching / Photo Stitching)

Das aus der Photographie bekannte Stitching – das Erstellen einer großformatigen, hochauflösten Abbildung aus vielen überlappenden Einzelbildern – kann auch auf Thermogramme übertragen werden. Hierfür gibt es diverse Softwareansätze. Die gängigsten sind zumeist die von den IR-Kameraherstellern angebotenen Softwareerweiterungen zur Ergänzung ihrer haus-eigenen IR-Softwarepakete. Darüber hinaus existieren auch individuell entwickelte Softwarelösungen von Drittanbietern.

Diese Programme verarbeiten i.d.R. die thermographischen Rohdaten, also radiometrische Informationen inklusive ihrer Falschfarbendarstellung, der simultan aufgenommenen photographischen VIS-Abbildungen, sofern die Infrarotkamera über eine koaxial verbaute RGB-Kamera verfügt, sowie sämtlicher Metadaten. Sie bleiben auch nach dem Stitching erhalten (Abb. 1).

Spiegeln diese Zusatzinformationen keine Rolle bzw. kommt es nur auf die Falschfarbendarstellung der thermographischen Aufnahme und weniger auf die Temperaturwerte an, können auch die in konventionelle Bildformate umgewandelten Pixelbilder der Thermogramme mit herkömmlicher Photosoftware mit integrierten Stitchingfunktionen bearbeitet werden. Sowohl Falschfarbendarstellungen als auch Graustufen-thermogramme können in den gängigen Bildbearbeitungsprogrammen zu Panoramadarstellungen zusammengefügt werden (Abb. 2).



- 1 Stitching thermographischer Rohdaten durch IR-Software: Eine automatische Verarbeitung funktioniert nur bedingt. Die Einzelaufnahmen mussten teilweise manuell an ihre richtige Stelle positioniert werden. Die Überlagerungskanten zeigen deutliche Versätze im Bereich der Fenster, Unschärfen und durch den Temperaturangleich der Einzelaufnahmen gehen Detailinformationen verloren.

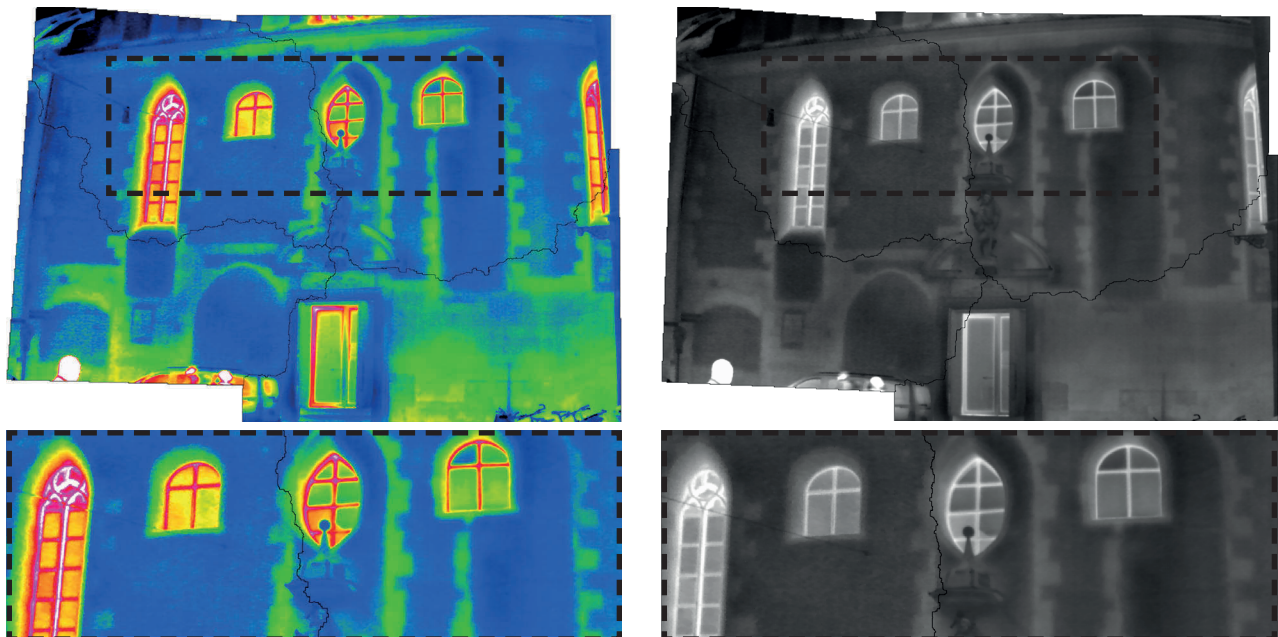
Ein Vergleich der Stitching-Varianten für radiometrische Daten und Bilddaten zeigt, dass die Bildbearbeitungssoftware die Einzelaufnahmen für die meisten Messsituationen passgenauer überlagern und zusammenfügen kann und die Überlappungsbereiche präziser zusammenrechnet als die IR-Softwarelösungen.

Getestet wurden vollautomatische und halb automatisierte Verfahren sowohl für thermographische Rohdaten als auch für bereits weiterverarbeitete IR-Bilddaten.¹ Während in den IR-Softwarelösungen meist noch jede Aufnahme einzeln, häufig auch durch nachträgliches, individuelles Korrigieren entzerrt und die Überlappungsbereiche manuell positioniert werden müssen, sind diese Prozesse in den Bildbearbeitungsprogrammen auch für Falschfarbendarstellungen ausgereifter und liefern bessere Panorama-Ergebnisse. Die Überlagerung der überlappenden Bildbereiche und ihre geometrische Angleichung lassen sich hier vielfach automatisieren und zeigen in den meisten Fällen bessere Ergebnisse als die IR-Software (Abb. 3). Gleiches gilt für die Überblendung der Einzelbilder. Die Übergänge in den Panoramadarstellungen zeigen hier gut angepasste Verläufe ohne Kanten oder Versprünge und ohne die Bildinformationen zu sehr zu verfälschen. Ein Nachteil herkömmlicher Bildbearbeitungssoftware besteht darin, dass die Temperaturspanne der in Bilddatenformate umgewandelten Thermogramme nach dem Stitching nicht mehr angepasst werden kann wie in den IR-Softwareversionen. Doch lässt sich das mit einer sorgfältigen Vorauswertung der Rohdaten in einer gleichbleibenden Temperaturdarstellung kom-

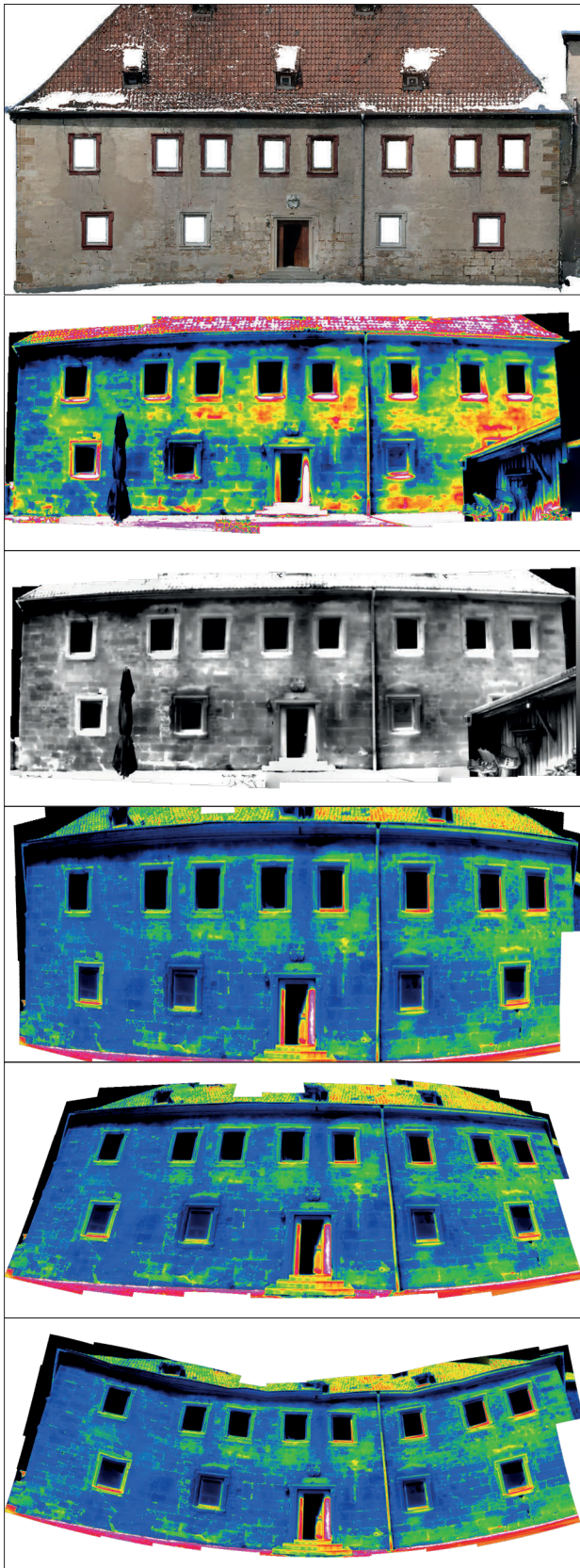
pensieren. Umgekehrt gilt, dass die IR-Software zwar umfangreichere Bearbeitungsmöglichkeiten auch für die Panoramadarstellungen nach dem Stitching bietet. Es gilt aber auch zu beachten, dass die proprietären Datenformate der IR-Kamerahersteller oft auch nur mit firmeneigener Software bearbeitet werden können bzw. zuerst umständlich in gängige Bilddatenformate umgewandelt werden müssen.

Kritik:

Insgesamt bleibt das Stitching von Thermogrammen bisher eine unzureichende Methode zur Kombination von Einzelaufnahmen. Trotz optisch passgenau wirkender Positionierung und Überblendungen der Einzelaufnahmen weisen die Stitchingprodukte aus Thermographie-Serien jedoch weiterhin objektiv- und standpunktbedingte Verzeichnungen auf (Abb. 3). Teilweise werden diese während des Stitchings zwar optisch angeglichen, jedoch variiert die Qualität der Entzerrungen stark. Geht es vor allem um das schnelle Zusammenfügen einer Serie aus Einzelaufnahmen, um eine höher aufgelöste und großformatige Abbildung der Messsituation zu erzeugen, genügt dieses Verfahren durchaus. Sollen die thermographischen Daten jedoch geometrisch präzise und verzeichnungsfrei dargestellt werden, wird im Bereich der Bauforschung die Kombination mit metrischen Messdaten empfohlen. Dies kann entweder zweidimensional über die Entzerrung von Thermogrammen auf Plangrundlagen oder dreidimensional über das Mapping von Thermaldaten auf Punktwolken erreicht werden.



- 2 Stitching thermographisch ausgewerteter IR-Aufnahmen durch gängige Bildbearbeitungsprogramme. Fügen und Überblenden funktioniert besser als in der IR-Software. Die Überblendungsbereiche sind durch schwarze Linien markiert. Allerdings sind hier keine nachträglichen radiometrischen Korrekturen mehr möglich. Die Farbskalierung muss also bereits vor dem Stitching angepasst werden.



3 Panorama-Stitching einer kompletten Fassadenseite, oben zum Vergleich eine Orthoprojektion aus SfM-Daten. Die verschiedenen Varianten zeigen die Fehlinterpretationen des vollständig automatisierten Stitchings. Sie veranschaulichen die grundsätzlichen Probleme der Panoramaerstellung, wie sie auch in der Photographie zu stark vorwölbenden Darstellungen führen.

Wie auch bei RGB-Bilddaten funktioniert die Panoramaerstellung mit Thermogrammen nur dann gut, wenn der Kamerastandort konstant bleibt und die Veränderung nur durch Drehung und Neigung erfolgt. Das Stitching von Aufnahmen mit sich lateral bewegender Kamera ist nur bei Objekten erfolgreich, die mehr oder weniger eine Ebene ausbilden. Sobald ein Objekt auch dreidimensional gegliedert ist, muss laterale Bewegung unterbleiben, was dann ganz zwangsläufig zu diesen sich in der Mitte stark vorwölbenden Darstellungen wie in Abb. 3 führt.

7.2 Die Kombination von thermalen und geometrischen Daten

7.2.1 Metrische 2D-Infrarotthermographie METHODE: Thermogramm-Entzerrung auf Plänen

Zur Kompensation der objektivbedingten Verzeichnungen und perspektivischen Verzerrungen bedingt durch schräge Aufnahmepositionen und ungünstige Aufnahmewinkel können Thermogramme ähnlich wie Photographien entzerrt und geometrisch korrigiert werden. Der Begriff der Entzerrung beschreibt in der Photogrammetrie die geometrische Transformation eines nach den Gesetzen der zentralprojektiven Darstellung entstandenen Bildes - heute zumeist digital - auf eine im Objektraum definierte Ebene.² Aus einzelnen entzerrten Bildern können dann Bildpläne zusammengesetzt werden. In der Bauforschung empfiehlt sich besonders die Kombination mit photogrammetrischen Bildplänen oder CAD-basierten Vermessungsplänen. Auf deren Orthoabbildungen bzw. detaillierten Linienzeichnungen können Thermogramme geometrisch korrekt und maßstabsgetreu entzerrt werden. Die metrische Plangrundlage bildet die definierte Ebene, auf die das Thermogramm transformiert wird. Die thermographischen Daten werden so als separate Ebene in den Plangrundlagen referenziert und ergänzen deren Informationsgehalt. Es gelten

Voraussetzung für die Referenzierung von IR- und RGB-Bilddaten:

- Zur Referenzierung von parallel dokumentierten Daten müssen die inneren (intrinsischen) und die äußeren (extrinsischen) Parameter bekannt sein.
- Intrinsische Parameter:
 - Kamerakonstante
 - Koordinaten des Bildhauptpunktes
 - Objektivverzeichnung
- Extrinsische Parameter:
 - Kamerarotation
 - Kameratranslation

die Prinzipien der projektiven Transformation, wonach über eine zentralprojektive Abbildung die Objektebene auf einer Bildebene darstellbar ist. Entsprechend bleibt zu beachten, dass nur überwiegend planare Gebäudepartien oder Konstruktionen auf diese Weise entzerrt werden können. Die Entzerrung der Thermogramme folgt dem Prinzip der homologen Punkte³ und kann einerseits über natürliche Passpunkte wie markante Ecken, Bauteilkanten oder punktförmige Strukturen an den Bauteiloberflächen durchgeführt werden (Abb. 6). Andererseits können auch zusätzliche Passpunkte in Form von Klebmarken verwendet werden.

Da thermographische Aufnahmen - bedingt durch die ihre beschränkte Auflösung und den überwiegend verlaufsartigen Charakter radiometrischer Phänomene - weniger klare Kanten und Objekte zeigen, sollten, wenn möglich, zusätzliche Passpunkte benutzt werden. Eine Entzerrung über natürliche Passpunkte ist meist nicht präzise genug, da diese in den Thermogrammen nicht immer eindeutig zu bestimmen sind und so die Fehleranfälligkeit der Entzerrung erhöhen.

Messmarken

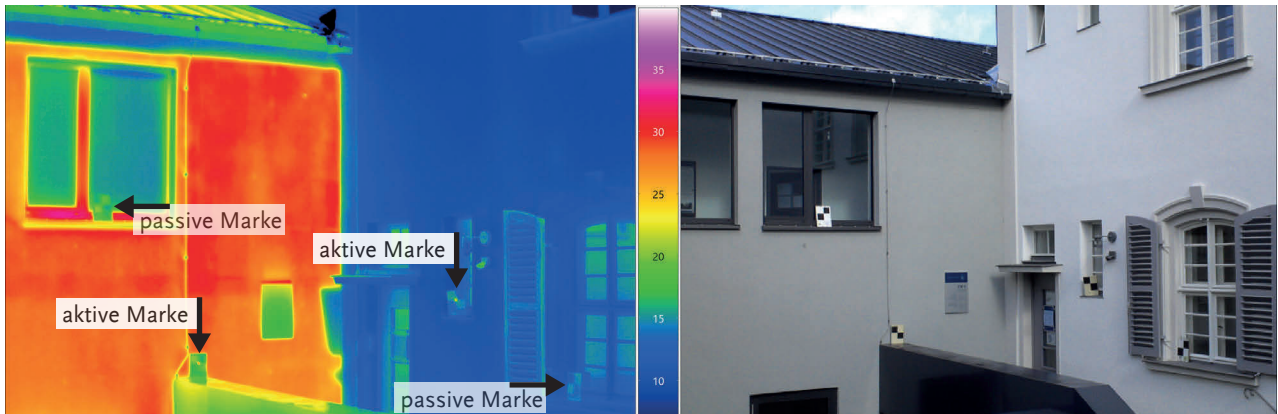
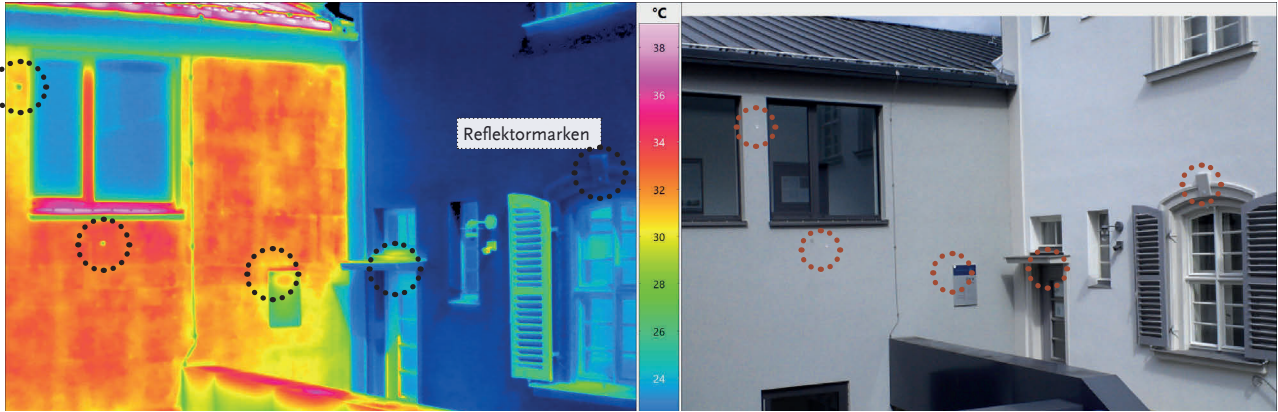
Als korrespondierende Punkte (homologe Punkte) müssen die zusätzlichen Passpunkte sowohl für die Sensoren der Photo- als auch der Thermokamera detektierbar sein. Klassische Vermessungspunkte wie Tachymetrie-Kreuze oder Schachbrettmarken werden im Thermogramm bei Distanzen von mehr als zehn Metern nicht mehr ausreichend aufgelöst dargestellt (Abb. 4 oben). Der thermische Unterschied zwischen schwarzen und weißen Feldern wäre bei größeren Messdistanzen nur nach vorheriger Anregung groß genug, um im Thermogramm hinreichend präzise aufgelöst zu werden. Der Effekt der unterschiedlichen Absorptionsgrade von schwarz und weiß nimmt jedoch sofort nach dem Ende der Bestrahlung wieder ab. Schachbrettmarken können also nur unter eingeschränkten und gut kontrollierbaren Umgebungsbedingungen als thermographisch nutzbare Passpunkte verwendet werden. Etwas besser geeignet sind sogenannte retroreflektierende Zielmarken, beispielsweise aus Reflektorfolie oder anderen stark reflektierenden Materialien. Der hohe Reflexionsanteil dieser Marken macht sie bei geeigneten Umgebungsbedingungen auch im Thermogramm von den umgebenden Baumaterialien unterscheidbar – von einigen Ausnahmen abgesehen: Glas und sehr glatte Metalloberflächen erzeugen vergleichbare Reflexionseffekte, die zu Verwechslungen führen können. Weiterhin ist zu beachten, dass das Reflexionsverhalten der Reflektormarken stark winkelabhängig ist und sich bei zu großen/kleinen Winkeln wesentlich verändert. Die Marken kön-

Anforderungen an Passpunkte für kombinierte geometrische / radiometrische Vermessungen in der Bauforschung:

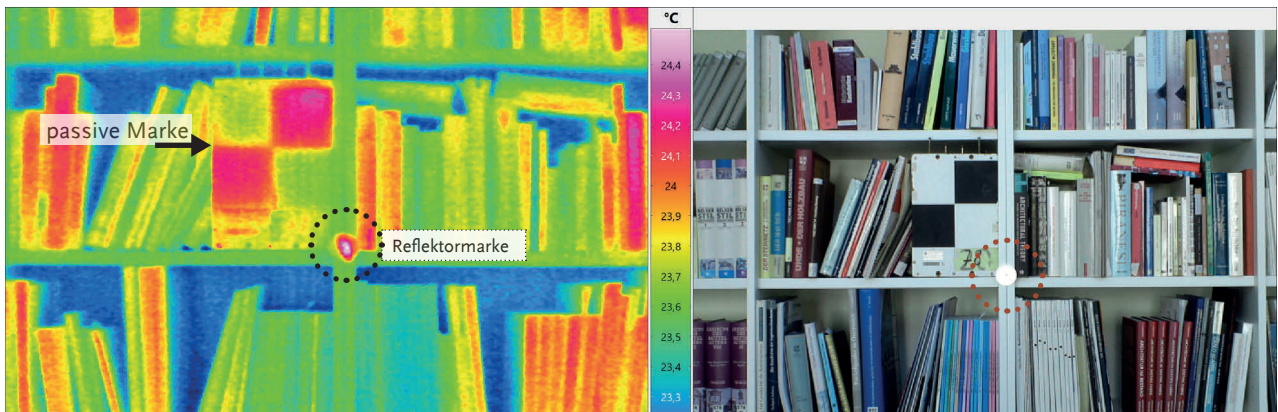
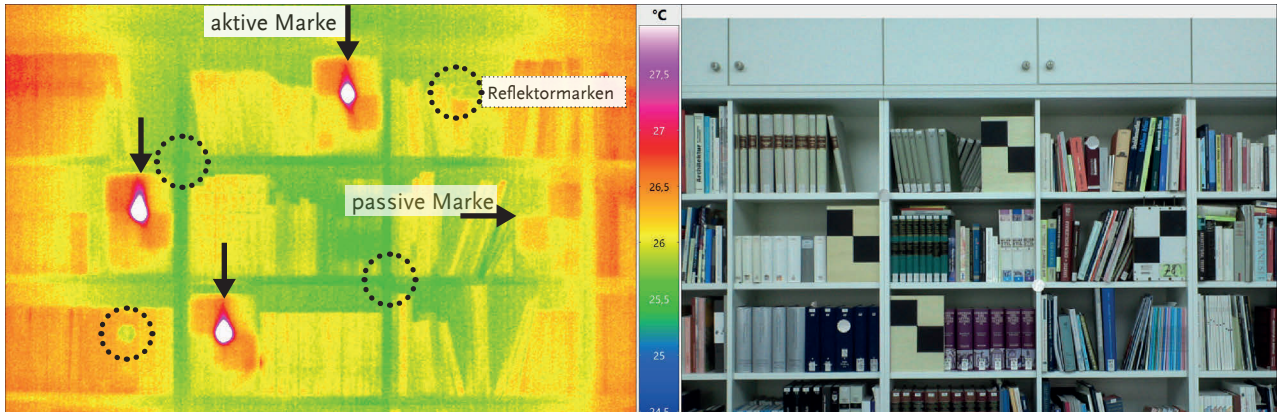
- Messmarken müssen ausreichend groß sein, um auch bei weiten Entfernungen noch im geometrischen Auflösungsvermögen v.a. der Infrarotkamera zu liegen
- Messmarken sollten einen größtmöglichen Kontrast zum Hintergrund bilden, entweder durch eindeutiges Reflexionsverhalten oder besser noch eigenes Strahlungsvermögen
- Messmarken sollten möglichst scharf abgegrenzt sein, durch klare geometrische Formen und Farbkontraste
- Messmarken müssen sowohl für den Innen- als auch für den Außenbereich nutzbar sein
- Messmarken müssen eine zeitliche Stabilität über den Messprozess hinweg aufweisen (keine Veränderungen durch Verrutschen, feuchtebedingtes Quellen/Trocknen, rapide Temperaturveränderungen z.B. durch Einstrahlung etc.)



4 Überblick über gängige Messmarken in der Bauforschung: Oben v.l.n.r. tachymetrische Messpunkte, 3D-Scanning-Reflektormarken, 3D-Scanning-Schachbrettmarken und SfM-Kreismarken. Unten: Thermisch aktive Messtafeln mit rückseitigen Schaltkreisen, deren Widerstände bzw. Glühlampen lokale Hotspots erzeugen und so sowohl von 3D-Scannern als auch Infrarotkameras erkannt werden können.



5 Messmarkentest: Vergleich der verschiedenen Marken im Innen- und Außenbereich. In den Fassaden-Thermogrammen (Abb. oben) sind die Reflektormarken nur teilweise sichtbar, je nach IR-Aufnahmeposition, Sonneneinstrahlung und Reflektion. In den Innenraum-Thermogrammen (Abb. unten) sind die thermisch aktiven Messstafeln als lokale Hotspots erkennbar, die Reflektormarken dagegen fast gar nicht. Nur bei Messabständen unter fünf Metern (Abb. ganz unten) und zusätzlicher Belichtung der Szene werden sie im Thermogramm zuverlässig sichtbar. Die passiven Schachbrettmarken werden bei Abständen unter zehn Metern im Thermogramm noch ausreichend aufgelöst dargestellt, bei größeren Abständen wird eine präzise Lokalisierung zunehmend schwieriger.



nen daher mit der Thermographiekamera nicht immer zuverlässig erkannt werden. Auch unterscheidet sich das Reflexionsverhalten der Marken im Innen- und Außenbereich von Gebäuden durch die verschiedenen Strahlungsanteile zu stark, als dass konsistente Thermographieaufnahmen damit möglich wären. Reflektormarken sind demnach als Passpunkte nicht immer ausreichend stabil und daher meist ungeeignet für bauforscherische Vermessungen.

Die thermographisch zuverlässigsten Passpunkte sind die, die selbst strahlen statt nur reflektierte oder absorbierte Strahlung abzugeben. Dazu gehören alle Arten von Wärmequellen. Bewährt haben sich vor allem kleine Halogen-Glühlämpchen und Widerstände in Schaltkreisen, die sich durch den Stromfluss erwärmen. Für die Bauforschung am KDWT Bamberg wurden damit spezielle Messtafeln entwickelt (Abb. 4 unten). Sie basieren auf Standardschachbrettmarken, die sowohl für tachymetrische Vermessungen als auch 3D-Scanning genutzt werden können. Zusätzlich zu

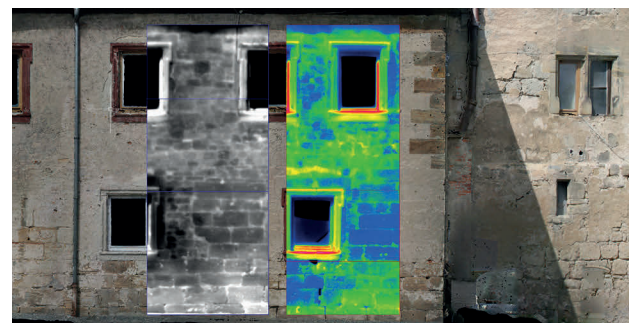
den Standardmarken verfügen die thermographischen Passpunkte über je einen kleinen Schaltkreis mit einem mittig im Schachbrett angeordneten Widerstand. Zur Aktivierung wird nach der Platzierung der Thermographietafeln am zu vermessenden Objekt der 9 Volt Block auf der Tafelrückseite angeschlossen. Je nach Umgebungstemperatur erwärmt sich der Widerstand nach kurzer Zeit auf ungefähr 25 -35 °C. Damit bilden die Widerstände in den Tafeln die notwendigen thermischen Kontraste, um sie auch als Passpunkte für Thermographiekameras auflösbar abzubilden.

Einbildentzerrung und Mehrbildentzerrung

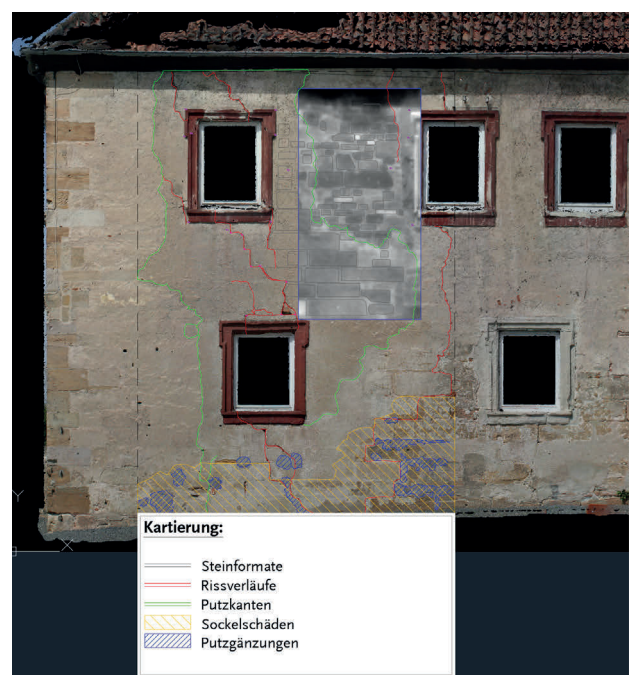
Die genannten Voraussetzungen gelten sowohl für Einbildentzerrungen als auch für Bildpläne aus mehreren Einzelentzerrungen. Analog zum Stitching genügen die Auflösungen der kleinen IR-Detektorformate selten zur vollständigen Darstellung radiometrischer Phänomene innerhalb einer Thermographie. Gerade bei größeren Bauteilen wie Fassaden und Wandabwick-



6 Metrische 2D-Entzerrung von ausgewerteten Thermogrammen auf Bildplänen über natürliche Passpunkte wie markante Ecken, Bauteilkanten oder punktförmige Strukturen an der Fassade.



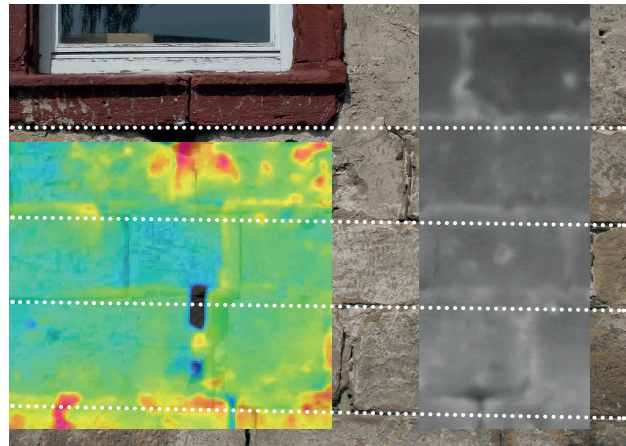
7 Mehrbildentzerrung verschiedener Thermogrammdarstellungen und Kombination mit weiteren bauforscherischen Methoden wie Schadenskartierung und lokaler Befunderhebung.



lungen wird daher empfohlen, mehrere überlappende Detailaufnahmen auf derselben photogrammetrischen Abbildungsgrundlage zu entzerren (Abb. 6). Dieses Verfahren wird auch als Mapping und Mosaicing bezeichnet und ermöglicht die Auswahl der jeweils besten Detailaufnahme für die zu untersuchenden Bereiche. So kann je nach Fragestellung ein hinreichender Detaillierungsgrad der Thermographien abgebildet werden, in dem auch kleine oder wenig auffällige radiometrische Phänomene noch mit ausreichender Auflösung geometrisch referenziert werden können.

Graphische 2D-Entzerrung in IRT-Software

Die Thermogramm-Entzerrung von erfolgt meist in konventioneller Photogrammetrie- oder CAD-Software, da hier die Verarbeitung geometrisch bestimmter Passpunkte möglich ist (Abb. 7). Dies bedeutet aber auch, dass nur thermographische Bilddaten, jedoch keine thermalen Metadaten verarbeitet werden können. In den proprietären IRT-Softwareprodukten, die Thermaldaten prozessieren, sind in der Regel keine ausreichenden Möglichkeiten der geometrischen Referenzierung vorgesehen. Einige Hersteller bieten zwar Varianten grafischer Entzerrung auf der Grundlage von parallel aufgenommenen photographischen Daten der koaxial in die IR-Kameras eingebauten kleinen RGB-Kameras an. Diese Entzerrungen liefern jedoch keine exakte Korrektur der objektivbedingten Verzerrungen und die perspektivischen Verzerrungen der Aufnahmeposi-



8 Graphische Entzerrung von IR- auf VIS-Bild in IRT-Software. Die Ergebnisse zeigen zunehmende Versätze in den Fugenverläufen, da mit dieser Methode nur graphisch näherungsweise und nicht geometrisch korrekt entzerrt werden kann.

tion können nur graphisch näherungsweise und nicht geometrisch korrekt entzerrt werden (Abb. 8). Das Produkt von vermessungsbasierten Planzeichnungen oder Bildplänen und darauf entzerrten Thermogrammen bleibt immer eine zweidimensionale Darstellung, deren metrische Maßhaltigkeit nur auf eine definierte Ebene beschränkt ist. Diese Kombination von photographischen und thermalen Sensordaten wird vorwiegend für flächige Gebäudeteile wie Fassaden und Wandoberflächen verwendet. Zur Darstellung komplexerer Geometrien und deren thermographischer Informationen können diese auch dreidimensional abgebildet werden:

KOMBINATIONSMÖGLICHKEITEN

1. Kombination einzelner IR-Aufnahmen

Thermogramm Einzelbilder-Stitching
(Image Stitching / Photo Stitching)

2. Kombination von IRT + metrischen Daten

A) Metrische 2D Infrarotthermographie

(Thermogramm-Entzerrung)

- Einbildentzerrung und Mehrbildentzerrung auf Bild- und Vermessungsplänen
- Graphische 2D Entzerrung in IR-Software

B) Metrische 3D Infrarotthermographie

(Modellierung thermographischer Daten)

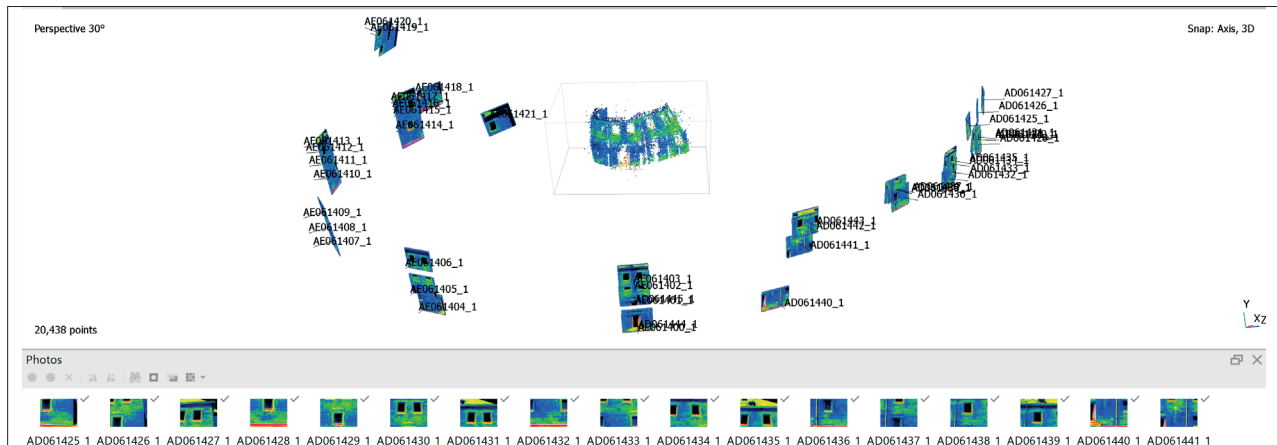
- IR-Photogrammetrie für ein IRT-3D-Modell
- Bi-Kamerasysteme IRT/VIS
- Kombination von 3D-Scanning und Thermographie
 - Kombinationssysteme aus IR-Kamera / 3D-Scanner
 - Ko-Referenzierung von IR-Kamera / 3D-Scanner
 - Thermogramm-Mapping auf 3D-Punktwolken / 3D-Modelle

7.2.2 Metrische 3D Infrarotthermographie

Prinzipiell kann die dreidimensionale Modellierung thermographischer Daten auf zwei Arten erfolgen: Einerseits können analog zum Structure from Motion (SfM) aus photographischen Einzelaufnahmen auch aus vielen einzelnen thermographischen Abbildungen 3D-Modelle berechnet werden. Andererseits können thermale Daten auf ein raumbezogenes 3D-Modell aus geometrisch definierten Vermessungsdaten referenziert werden. Vergleichbar einem metrischen Grundgerüst werden die Wärmebildwerte dann auf eine 3D-Punktwolke referenziert.⁴

METHODE: IR-Photogrammetrie zur Erzeugung eines thermalen 3D-Modelles

Das Structure from Motion Verfahren der Rekonstruktion dreidimensionaler Objektgeometrien in Form vieler Einzelpunkte aus überlappenden Einzelbildern lässt sich prinzipiell auch auf thermale Abbildungen übertragen. Dafür können sowohl die Thermogramme aus terrestrischen als auch UAV-basierten Aufnahmen verwendet werden.⁵ Die allein aus Thermogrammen erzeugten Punktwolken und 3D-Modelle genügen



- 9 Verarbeitung von thermographischen Bildserien zu Structure-from-Motion (SfM) Photogrammetrie-Modellen. Aus den Bildverbänden wird die Objektgeometrie rekonstruiert, die dann wiederum mit den thermographischen Informationen texturiert werden kann. Allerdings bleiben Punktdichte und Genauigkeit auch bei Erhöhung der Bildanzahl weit unter der von photogrammetrischen SfM-Modellen.

jedoch kaum den Anforderungen der Bauforschung. Aufgrund der geringen Auflösung der Infrarot-Aufnahmen sind auch die daraus erzeugten Punktwolken verhältnismäßig gering aufgelöst. Punktdichte und Genauigkeit bleiben auch bei extremer Erhöhung der Bildanzahl weit unter der von photogrammetrischen SfM-Modellen (Abb. 9). Dies ist einerseits bedingt durch die geringe geometrische Auflösung und die kleinen Sensorformate der Infrarotdetektoren, andererseits auch durch die Bauart der Linsensysteme. Die Infrarotkameras sind primär hinsichtlich ihrer radiometrischen und weniger in Bezug auf die geometrische Auflösung optimiert. Im Vergleich mit photographischen Kameras bleibt ihre geometrische Genauigkeit geringer.⁶

Bi-Kamerasysteme

Aufgrund dieser überwiegenden Nachteile werden IR-Photogrammetrieverfahren häufig über eine Integration von Infrarot- und RGB-Sensordaten durchgeführt.⁷ Dafür müssen zunächst die beiden Sensorarten zueinander ausgerichtet werden, d.h. ihre relative Lage zueinander muss definiert werden.⁸ Wenn die relative Positionierung von IR- und RGB-Kamera über den Messprozess hinweg konstant bleibt, genügt die anfängliche Bestimmung der äußeren Orientierung der RGB-Kamera als Bezugsgrundlage aller zu beschreibenden Bildpaare. Hierfür werden die beiden Kameratypen meist auf einer gemeinsamen Stativkonstruktion fixiert, auch als Bi-Kamerasysteme bezeichnet.⁹ Nach der Datenakquise wird das photogrammetrische Modell entsprechend der SfM-Methodik aus dem Bildverband eine RGB-Kamera prozessiert. Da sich die Position der IR-Kamera in gleichbleibendem relativem Bezug zur RGB-Kamera bewegt hat, können die IR-Aufnahmen über die geometrische Orientierung der

RGB-Aufnahmen referenziert werden. Ein Nachteil der Bi-Kamerasysteme aus zueinander kalibrierten IR- und RGB-Kameras besteht darin, dass die kamerainternen Parameter während der Datenaufnahme konstant bleiben müssen. Dies führt vor allem bei großen Temperaturumfängen im Außenbereich z.B. an Gebäudefassaden zur Voreinstellung weiter Temperaturspannen, die dann nur noch besonders kalte oder warme Bauteile erkennbar darstellen. Befunde mit kleineren Temperaturdifferenzen werden in diesem Fall zu stark homogenisiert. Die für SfM-Daten notwendige Fixierung kamerainterner Parameter wie Temperaturspanne und Fokus verhindert die notwendige starke Kontrastierung und spezifische Fokussierung für kleinteilige Befunde oder solche mit geringen Temperaturabweichungen und führt so zu Informationsverlust.

Kritik

Bedingt durch die spezifische Infrarot-Sensorik müssen bei der Datenaufnahme zusätzliche Beeinträchtigungen durch instationäre Umgebungsbedingungen mitkalkuliert werden. Schon kleinste Temperaturveränderungen von $<1^{\circ}\text{C}$ wirken sich negativ auf die Überblendung der Einzelaufnahmen aus. Außerdem können je nach Aufnahmeperspektive die Abstrahlwinkel und das Reflexionsverhalten der Oberflächen variieren, was sich ebenfalls in veränderten Falschfarbendarstellungen im Thermogramm zeigt. Dasselbe Bauteil kann bei ungünstigen Bedingungen aus unterschiedlichen Perspektiven in verschiedenen Farbskalierungen abgebildet werden. Die Kombination dieser Einflussfaktoren macht die Infrarot-Photogrammetrie in situ, anders als unter Laborbedingungen, nur schwer kontrollierbar und daher recht fehleranfällig. Insgesamt überwiegen bei den (teil)automatisierten photogrammetrischen IR-Verfahren aktuell noch die

Bedenken, dass durch die genannte Homogenisierung der Thermogramme zu viele IR-Detailinformationen verloren gehen und die prozessbedingte Genauigkeit der Bi-Kamera SfM-Produkte nicht ausreichend ist für die detailorientierten Bauwerksdokumentationen in der Bauforschung. Vergleichbar der Empfehlung für die Fusion von infraroten und metrischen Daten im 2D-Bereich wird auch in der dreidimensionalen Modellierung von Infrarotdaten die Kombination mit einem geometrischen „Grundgerüst“ bevorzugt.

METHODE: Kombination von 3D-Scanning und IRT

Die Co-Referenzierung der zweidimensionalen Infrarotdaten auf ein geometrisch orientiertes, dreidimensionales Gebäudemodell ermöglicht einerseits deren korrekte räumliche Orientierung und andererseits die dreidimensionale Darstellung thermaler Daten aus vielen Einzelaufnahmen. Diese Kombination von radiometrischen und geometrischen Informationen ist für die Bauforschung von entscheidendem Mehrwert. Befunde können räumlich verortet, kartiert und in direkt am Modell in multiplen Zusammenhängen dargestellt werden. In Kombination mit weiteren zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden können die thermographisch texturierten Punktwolken auch als Modellbildungsgrundlage für H-BIM Systeme genutzt werden (Abb. 11).

Kombinationssysteme aus IR-Kamera und 3D-Scan

Für die Datenaufnahme gibt es zwei Varianten. Die kombinierten Systeme bestehen – vergleichbar den photogrammetrischen Bi-Kameras – aus einem terrestrischen Laserscanner, der mit einer Thermographiekamera erweitert ist.¹⁰ Damit werden Scan und Thermographie simultan aufgenommen. Zur Referenzierung der parallel dokumentierten Daten müssen sowohl die inneren als auch die äußeren Parameter der beiden Sensoren bekannt sein. Zu den intrinsischen Parametern gehören die Kamerakonstante, die Koordinaten des Bildhauptpunktes und die Objektivverzerrung. Die extrinsischen Parameter der Kamerarotation und Kameratranslation beschreiben die geometrischen Bezüge (Position und Lage) von Laserscanner und IR-Kamera zueinander und müssen über eine Kalibrierung der beiden optischen Systeme bestimmt werden.¹¹ Danach darf die fixierte Position der beiden Sensoren zueinander über den gesamten Messprozess hinweg nicht mehr verändert werden.

Ko-Referenzierung

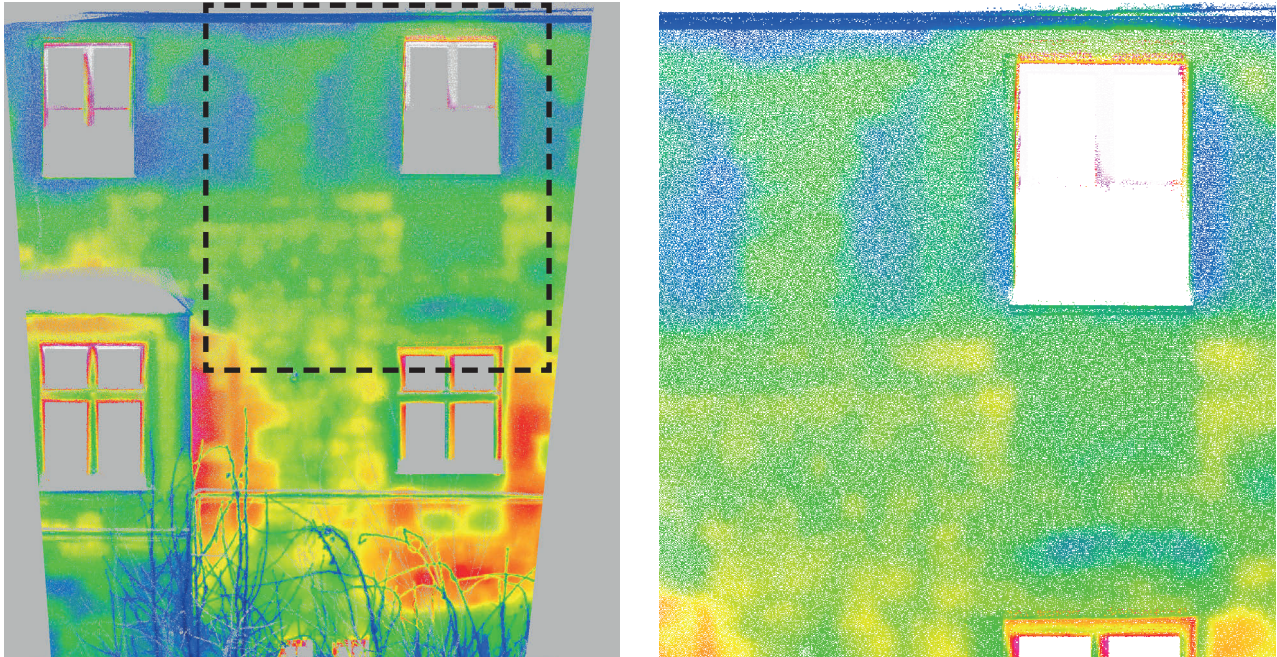
Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass mit der Registrierung der Scanpositionen automatisch auch die Thermogramme koreferenziert werden. Sie kön-

nen danach als zusätzlicher Kanal oder anstelle des RGB-Kanals in die Punktwolke integriert und auf die Einzelpunkte projiziert werden. Die Punktwolke wird dann entsprechend der gewählten Falschfarbendarstellung texturiert bzw. eingefärbt. Das entstehende hybride Vermessungsprodukt¹² bietet eine recht stabile und zuverlässig Variante der TLS (terrestrisches Laserscanning)- und IR-Datenfusion.¹³ Darüber hinaus kann die Auflösung der Punktwolke individuell an die Messsituation angepasst und die mäßig aufgelöste Abbildung der Thermogramme durch die Einstellung der Punktgrößen etwas kompensiert werden. Durch die vorherige Kalibrierung der Systemkomponenten und die automatische Referenzierung der IR-Daten zu den Scanpositionen entfällt das manuelle oder halb-automatisierte Suchen von Passpunkten für eine Registrierung, was wiederum die Fehleranfälligkeit des Arbeitsprozesses verringert.

Kritik

Nachteilig bei dieser Art der Datenaufnahme ist allerdings die räumlich bedingte Einschränkung der Thermokamera. Da sie fest auf dem Scanner fixiert ist, kann kein vollständiges Panorama aus Einzelthermogrammen aufgenommen werden, sondern nur ein horizontal definierter Rundumblick als Abwicklung von Einzelthermogrammen in festgelegten Winkeln. Ein weiterer Nachteil ist die definierte relative Orientierung der beiden Sensoren zueinander. Dies schließt sowohl eine individuelle Fokussierung als auch mögliche Temperaturbereichsanpassungen während des Messprozesses aus. So lässt sich in der Nachbearbeitung zwar die Auflösung der Scanwolke beliebig verändern, die der IR-Aufnahmen jedoch nicht mehr. Auch bleibt die Auswahl möglicher Infrarotkamarasysteme beschränkt auf die herstellenseitig einbaubaren Infrarottechniken. Simultansysteme gibt es mittlerweile auch als mobile Varianten, die vorgegebene Wegstrecken abfahren oder per Fernsteuerung bewegt werden können.¹⁴ Dies gilt natürlich ebenso für IR-bestückte Drohnen. Doch deren IR-Sensoren spielen im Bereich der Bauforschung bislang nur eine untergeordnete Rolle, da sie bauartbedingt zu kleine Sensorformate und damit zu wenig Auflösung bieten.

Eine weitere interessante, aber bislang wenig genutzte Variante ist die eines Nodalpunktadapters.¹⁵ Hier erfolgt die Aufnahme von Scandaten und Thermographiedaten nacheinander. Die relative Orientierung der beiden Sensoren zueinander wird über einen Nodalpunktadapter¹⁶ ausgerichtet, eine Hilfskonstruktion, auf der die Thermographie-Kamera nach dem Scanning in gleichbleibender Lage zum Scanner fixiert wird – auch wenn der Standpunkt zwischen zwei Scans



10 Orthoprojektion eines Punkwolkenausschnittes, der mit thermographischen Falschfarbeninformationen texturiert wurde. Fehlende Geometrieinformationen in Fensterbrüstungen etc. werden nicht texturiert. Umgekehrt werden Bereiche mit geringerer thermischer Informationsdichte nicht interpoliert. Die Darstellung scheint deshalb nach oben hin mehr zu streuen.

gewechselt wird. Der Vorteil besteht in der Aufnahme vollständiger Thermographiepanoramen ohne bauartbedingte mechanische Einschränkungen. Alternativ zu den kombinierten Simultansystemen besteht natürlich auch die Möglichkeit der separaten Datenakquise. Im getrennten Workflow werden Laserscanning und Thermographie unabhängig voneinander durchgeführt und referenziert. Die Datenfusion findet erst danach über ein Mapping der Falschfarbendarstellung auf die Punktwolke statt.

METHODE: Thermogramm-Mapping auf 3D-Punktwolken / 3D-Modelle

Das nachträgliche Mapping von Infrarotdaten auf bestehende Punktwolken oder 3D-Modelle ist die bislang häufigste Variante der Fusion geometrischer und thermographischer Informationen. Dabei werden die Thermogramme wie bei der Entzerrung auch über homologe Punkte (Punktpaare) mit der Punktwolke koreferenziert und die Einzelpunkte jeweils mit dem entsprechenden Farbwert der Falschfarbendarstellung texturiert.¹⁹ Jedem einzelnen Thermogramm wird die spezifische räumliche Orientierung zugerechnet (auch Mapping genannt) und die Gesamtheit der Thermogramme werden als Textur des vermaschten Modells aus einer Punktwolke abgespeichert (auch Mosaicing genannt). Statt einer laserscan-basierten Punktwolke kann ebenso ein photogrammetrisch erzeugtes 3D-Modell als metrisches „Grundgerüst“ genutzt werden.

Der Vorteil des zweistufigen Verfahrens besteht darin, dass 3D-Datenaufnahme (egal ob Laserscanning oder Photogrammetrie) und Thermographie separat stattfinden können. Da die unterschiedlichen Sensoren für jeweils unterschiedliche Rahmenbedingungen ausgelegt sind, kann so die Datenaufnahme entsprechend der besten Umgebungsbedingungen für die jeweiligen Sensoren durchgeführt werden. Besonders für die Thermographie ermöglicht dies verbesserte und unabhängig vom Scanner anpassbare Aufnahmeparameter wie Messdistanz, Temperaturskalierung, Fokussierung, aber auch Tageszeit, Belichtungsverhältnisse, Witterung. Vor allem im Fall der Messdistanz ist es wichtig, einen an die bauforscherischen Fragestellungen angepassten Detaillierungsgrad und die dafür geeignete Auflösung der thermographierten Befunde darstellen zu können. Unter Umständen muss mit der Thermokamera viel näher am Objekt gearbeitet werden als mit dem Scanner oder der Photogrammetrie-Ausrüstung. Allein dafür eignen sich separate Messprozesse besser als die der Simultansysteme.

Diese Freiheit der unterschiedlichen Perspektiven und der unbekanntenen äußeren Orientierung der Thermokamera muss dann allerdings wieder über eine Referenzierung anhand homologer Punkte ausgeglichen werden. Je nach Software geschieht dies manuell oder halbautomatisch. Die Einschränkungen und Probleme sind vergleichbar denen der Ein- oder Mehrbildentzerrung und der Entzerrung über gemeinsame Punktpaare.

7.3 Mehrwert für eine denkmalgerechte Kulturgutdokumentation

Damit die Thermographie als Methode langfristig einen Mehrwert für denkmalgerechte Kulturgutdokumentationen bilden kann, müssen Thermogramme und ihre Interpretationen standardmäßig eingebunden werden in den Kanon bauforscherischer Arbeit. Die hier vorgestellte Fusion von thermalen und geometrischen Daten kann einen solchen Mehrwert bilden. Sie erweitert die Darstellungsmöglichkeiten bauforscherischer Befunde und ermöglicht eine präzisere Lokalisierung und Referenzierung derselben. Gleichzeitig können über entzerrte und referenzierte 2D-Bildpläne und 3D-Modelle bauforscherische Erkenntnisse abstrahiert und verdichtet dargestellt werden. Im Bereich des Monitorings können geometrische Modelle mit verschiedenen IR-Ergebnissen aus wiederholten Aufnahmeserien bei variierenden Umgebungsbedingungen texturiert werden. So lassen sich beispielsweise thermische Anomalien und ihr radiometrisches Verhalten im Tages- oder Jahreszeitenverlauf darstellen und miteinander vergleichen. Weiterhin können geometrisch referenzierte IR-Daten die Grundlage für Differenztexturen bilden. Mit diesen lassen sich auffällige Strukturen wie Material- und Bauteilübergängen oder Schäden deutlicher herausarbeiten. Nicht zuletzt kann die 3D-Infrarotthermographie auch zur Anreicherung bestehender 3D-Modelle für Gebäudeinspektion, -Planung und -Management beitragen. Thermographische Informationen als eine Komponente vielschichtiger BIM-Systeme können die bestehenden Informationen über das dargestellte Objekt ergänzen und Befunde vernetzen.

All diese Anwendungsszenarien müssen jedoch spezifisch auf die Belange einer objektzentrierten Bauforschung hin angepasst werden. Die Entscheidung für oder gegen den Mehraufwand einer geometrisch referenzierten Thermaldatenvisualisierung sollte für jedes Untersuchungsobjekt und jede bauforscherische Fragestellung eindeutig geklärt werden. Vor allem sollte sie nicht von der bloßen technischen Machbarkeit oder Verfügbarkeit von Gerätetechnik und Software abhängen, sondern allein durch einen eindeutigen bauforscherischen Mehrwert begründet werden. Dazu gehört auch eine realistische Einschätzung des zu erwartenden Mehrwertes. Welche zusätzlichen Erkenntnisse können von einer Datenüberlagerung erwartet werden und mit welchem Zeit- und Speicheraufwand ist diese verbunden? Was leistet das einzelne Thermogramm und was die thermographische Texturierung einer geometrischen 2D- oder 3D-Darstellung? In diesem Zusammenhang sei nochmals explizit auf

die bereits dargelegten technischen Grenzen der IR-Thermographie und ihrer Auswertungen hingewiesen. Eine thermographische Untersuchung wird nicht per se besser oder präziser, nur, weil sie dreidimensional dargestellt wird. Die vermeintlich höhere Genauigkeit von 3D-Thermographie bezieht sich in vielen Fällen nur auf eine höhere geometrische Genauigkeit und leider nicht auf eine radiometrische. Der eigentliche Wert einer Thermographie liegt dagegen nach wie vor in einer umfassenden, fachlich fundierten Interpretation. Anders als bei den Forschungsansätzen zur Automatisierung der Abläufe von Datenfusion, Integration verschiedener Sensoren, Mapping und Mosaikbildung der IR-Aufnahmen wird der Schwerpunkt der IR-Methodik in der Bauforschung daher vor allem auf der individuellen Aussagekraft der Einzelthermogramme bleiben. Priorität haben die optimalen Aufnahmebedingungen für die IR-Kamera, der beste Bildausschnitt, die beste Aufnahmedistanz und die individuell angepasste Temperaturskalierung für jede Thermographie.

- 1 Getestet wurden die Stitchingprozesse für radiometrische Daten in IRBIS® 3 mosaic der Firma InfraTec und LabIR® THERMOSTITCH des New technologies – Research Centre der University of West Bohemia. Für das pixelbasierte Stitching wurden Adobe Photoshop CC 2017 und Microsoft Image Composite Editor (ICE) genutzt.
- 2 Vgl. hierzu Luhmann, Thomas (2018): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen - Methoden -Beispiele. 4. Aufl., Berlin, Offenbach. S. 384f.
- 3 Homologe Punkte sind korrespondierende Punkte bzw. Punktpaare, die zur gegenseitigen Orientierung und möglichen Entzerrung von zwei Aufnahmen derselben Ebene mittels einer bildspezifischen, geometrischen Transformation genutzt werden.
- 4 Eine vertiefte Darstellung bietet Lagüela Lopez, Susana (2013): *Geomatic and Thermographic Techniques for the Inspection and Diagnosis of Historic Structures towards their Introduction in Integrated Management Systems*. Dissertation. University of Vigo.
López-Fernández, Luis / Lagüela, Susana / Rodríguez-González, Pablo / Martín-Jiménez, José / González-Aguilera, Diego (2018): Close-Range Photogrammetry and Infrared Imaging for Non-Invasive Honeybee Hive Population Assessment, in: ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol. 7, Nr. 9, S. 350.
- 5 Vgl. hierzu Yastikli, Naci / Guler, Esra (2013): Performance evaluation of thermographic cameras for photogrammetric documentation of historical buildings, in: *Boletim de Ciências Geodésicas*, Vol. 19, Nr. 4, S. 711–728.
- 6 Eine fundierte Einschätzung hierfür bieten Luhmann, Thomas / Ohm, Julia / Piechel, Johannes / Roelfs, Thorsten (2011): Geometrische Kalibrierung von Thermografiekameras, in: *PFG Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Nr. 1. S. 5-15.
- 7 Vgl. Demisse, Girum G. / Borrmann, Dorit / Nüchter, Andreas (2015): Interpreting Thermal 3D Models of Indoor Environments for Energy Efficiency, in: *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 77, Nr. 1, S. 55–72.
- 8 Zur Kalibrierung von Thermographiekamerasystemen siehe auch Luhmann, Thomas / Piechel, Johannes / Roelfs, Thorsten (2013): Geometric Calibration of Thermographic Cameras. in: *Thermal Infrared Remote Sensing. Sensors, Methods, Applications*. hrsg. von Kuenzer, C. / Dech, S., Dordrecht, S. 27–42.
Hoegner, Ludwig / Tuttas, S. / Xu, Y. / Eder, K. / Stilla, Uwe (2016): Evaluation of Methods for Co-Registration and Fusion of Rpas-Based 3D Point Clouds and Thermal Infrared Images, in: *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B3, S. 241–246.
- 9 Vgl. Alba, Mario Ivan / Barazzetti, Luigi / Scaioni, Marco / Rosina, Elisabetta / Previtali, Mattia (2011): Mapping Infrared Data on Terrestrial Laser Scanning 3D Models of Buildings, in: *Remote Sensing*, Vol. 3, Nr. 12, S. 1847–1870.
Gleichauf, Johanna / Pfitzner, Christian / May, Stefan (26.07.2017 - 28.07.2017): Sensor Fusion of a 2D Laser Scanner and a Thermal Camera. in: *Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, S. 398–405.
Scaioni, Marco / Rosina, Elisabetta / Barazzetti, Luigi / Previtali, Mattia / Redaelli, Veronica (2012): High-resolution texturing of building facades with thermal images. in: *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIV*. hrsg. von Burleigh, D. / Stockton, G. R., 835401.
- 10 Eine Thermographiekamera kann – anders als eine photographische Kamera – nicht direkt in die Scanner-Optik eingebaut werden, da sie in verschiedenen Wellenlängenbereichen arbeiten und die spezifischen Linsensysteme daher unterschiedliche Materialien erfordern.
- 11 Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Kalibrierungsschritte bieten DEMISSE / BORRMANN / NÜCHTER (2015) S. 58f.
- 12 Giese, Jürgen (2018): Im Dschungel der Aufmaßprodukte. Ergebnisformen der Bauvermessung gezielt auswählen, ausschreiben und nutzen. in: *Bauforschung in der Denkmalpflege. Qualitätsstandards und Wissensdistribution*. hrsg. von Breitling, S. / Giese, J., Bamberg.
- 13 Terrestrisches Laserscanning (TLS) oder terrestrisches LiDAR (Light Detection And Ranging), laserbasiertes Verfahren mit automatisierten Winkel- und Streckenmessungen zur Erzeugung geometrischer Informationen über die Messobjekte. Ausgabe der Messwerte in koordinatenbasierten Punktwolken.
- 14 Beispielsweise das mobile System ThermalMapper (<http://www.faculty.jacobs-university.de/anuechter/thermalmapper.html>). Zum Einsatz mobiler TLS und IR-Systeme im Bereich historischer Gebäude, den Aspekten der Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern und Thermographiekameras siehe auch Borrmann, Dorit (2017): Multi-modal 3D mapping. Combining 3D point clouds with thermal and color information. Dissertation, Schriftenreihe Würzburger Forschungsberichte in Robotik und Telematik, Band 14. Universität Würzburg.

- 15 Den kombinierten Einsatz von Nodalpunktadaptern für RGB- und Thermographiekameras beschreiben Grümpel, Philipp / Karl, Georg (2017): Identifikation und Lokalisation energetischer Verluste in Industrieanlagen durch die Kombination thermografischer und geometrischer Informationen, Stuttgart.
- 16 Nodalpunktadapter bezeichnet Kamerahalterungen, Stativköpfe, etc., auf denen die Kamera so montiert werden kann, dass sie um eine Achse frei drehbar bleibt. Für die Erstellung von Bildverbänden aus Einzelaufnahmen muss diese Achse mit dem Drehpunkt, also dem Zentrum der Eintrittspupille des Objektivs (nicht dem Nodalpunkt!) übereinstimmen. Nur dann behalten die montierten Kameras beim Schwenken konstante Nodalpunkte bei. So können Parallaxenverschiebungen in den Aufnahmeserien vermieden werden.
- 17 Die einzelnen Schritte der Integration von IR- und 3D-Daten beschreiben Lerma, José Luis / Cabrelles, Miriam / Galcerá, S. / Navarro, S. / Akasheh, Talal / Haddad, N. (2009): Integration of 3D laser scanning, photogrammetry and thermography to record architectural monuments. in: CIPA 2009 XXII International Symposium; Kyoto, Japan. hrsg. von Comité International de la Photogrammétrie Architecturale. Die Automatisierung der Datenintegration und Texturierung schlüsselt Ludwig Hoegner in seiner Dissertation sehr anschaulich auf: Hoegner, Ludwig (2014): Automatische Texturierung von Fassaden aus terrestrischen Infrarot-Bildsequenzen, München.

8. Ausblick

8.1 Einsatz der IRT als Standard in der Bauforschung?

Dank ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und der flexiblen und unkomplizierten Handhabung der Kamertechnik hat die Infrarotthermographie durchaus das Potential zur Standardmethode in der Bauforschung. Besonders bei Erstbegehungen und Voruntersuchungen historischer Objekte hat sich die zerstörungsfreie Infrarotthermographie bewährt. Die zusätzlichen Informationen zu verdeckten Strukturen, Materialzuständen und potentiellen Schadstellen direkt am Kameradisplay oder aus den Thermogrammen liefern gleich zu Beginn bauforscherischer Untersuchungen wertvolle Hinweise auf zentrale Befundstellen. Sie ermöglichen damit die Verdichtung und gegenseitige Verknüpfung bauforscherischer Erkenntnisse und die Einordnung von Schlüsselbefunden.

Bei Detailuntersuchungen an Bauwerken kann die Thermographie dazu beitragen, konstruktive Zusammenhänge zu klären und Konstruktions- und Materialwechsel sowie Baufugen und deren Anschlussrichtungen zu ermitteln. Neben der Dokumentation des Bestandes kann die Thermographie auch zur Einschätzung des Zustandes der jeweiligen Objekte genutzt werden. Aus den radiometrischen Daten und dem Strahlungsverhalten der Materialien lassen sich Rückschlüsse zu Materialveränderungen, Anomalien und Schadstellen ziehen. Ebenso können damit aber auch Qualitäten und die Leistungsfähigkeit historischer Konstruktionen visualisiert werden.

Diese Vielseitigkeit der Einsatzmöglichkeiten macht die Thermographie zu einer überaus hilfreichen Untersuchungstechnik für die Bauforschung. Demgegenüber müssen jedoch auch die technischen, methodischen und finanziellen Einschränkungen und Grenzen beachtet werden. Dies ist einerseits die hohe Abhängigkeit der thermographischen Ergebnisse von den individuellen Umgebungsbedingungen am Untersuchungsobjekt. Bei zu geringen Temperaturdifferenzen oder Wärmeflüssen, zu großen Materialstärken oder schlicht ungünstigen Witterungsbedingungen kann auch die bestaufgelöste Kamera nicht mehr viel

ausrichten. Bei stark überformten baulichen Strukturen, vielschichtigen Wandaufbauten und heterogenen Baustoffkonglomeraten kommt es häufig zu thermischen Überlagerungen, die dann im Thermogramm nicht mehr eindeutig ihren individuellen Ursachen zugeordnet werden können. Thermographie ist in der Bauforschung mit ihrem überwiegenden Anteil an in situ Untersuchungen eine sehr kontext- und objektabhängige Technik. In einigen Befundsituationen sind rein thermographisch schlicht keine belastbaren Aussagen möglich. Hinzu kommt, dass die Untersuchungsbedingungen in situ nur quasistationär und nie vollständig reproduzierbar sind. Thermogramme können entsprechend nur als Momentaufnahmen bewertet werden. Infrarotthermographie als bauforscherischer Standard kann nur dann funktionieren, wenn all diese Einflussfaktoren und Unwägbarkeiten beachtet, dokumentiert und in den Auswertungen transparent kommuniziert werden.

Vor allem aber bleibt zu beachten, dass thermographische Expertise nicht nur in der individuell an Untersuchungssituationen angepassten Handhabung der Kamertechnik besteht, sondern auch in der korrekten Interpretation der Thermogramme. Dies erfordert sowohl technisches als auch kontext- und objektbezogenes Hintergrundwissen. Soll die Infrarotthermographie zur Standardmethode in der Bauforschung werden, müssen all diese Aspekte mit in die Ausbildung der Bauforscher:innen einfließen.

Ein nicht zuletzt entscheidender Faktor für die flächendeckende Implementierung der Thermographie in der Bauforschung ist die Finanzierung von Kamertechnik und Software und deren Verhältnis von Kosten-Nutzen-Aufwand. Im Verlauf der letzten Jahrzehnte sind die Kamerapreise bei kontinuierlichen technischen Verbesserungen deutlich erschwinglicher geworden. Es ist zu hoffen, dass sich diese Entwicklung fortsetzt. Nur dann ist es auch realistisch, dass Bauforscher:innen ihre technische Ausrüstung um Thermographiesysteme und individuelle Software dazu ergänzen und die Thermographie tatsächlich zu einer Standardmethode der Bauforschungspraxis werden kann.

8.2 Potentiale und weitere Entwicklung

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Infrarotthermographie machen sie zu einer sehr anschlussfähigen Untersuchungs- und Dokumentationsmethode in der Bauforschung. Ihre professionelle Anwendung und korrekte Interpretation vorausgesetzt, bieten thermographische Visualisierungen vielseitige Potentiale für den Bauforschungsprozess.

So können Thermogramme einen Beitrag zur Weiterentwicklung und Zusammenführung digitaler Darstellungs- und Dokumentationsmethoden leisten, indem sie visuell nicht sichtbare Strukturen darstellen und verorten. Diese zerstörungsfrei und ortsaufgelöst erhobenen Informationen können als zusätzliche Layer in dreidimensionale Dokumentationen implementiert werden. Ihre Überlagerung mit geometrischen Daten dokumentiert, lokalisiert und präzisiert damit bauforscherische Informationen.

Gleiches gilt für Heritage-BIM-Systeme: Thermographische Daten können dort einerseits als separate Visualisierungslayer überlagert werden. Ihre bauforscherisch relevanten Interpretationen können andererseits die Informations- und Befundsammlungen dieser digitalen Gebäudeinformationssysteme weiter verdichten, Zusammenhänge klären und Ursachen rekonstruieren helfen. Darüber hinaus bieten thermographische Daten als fester Bestandteil von H-BIM-Systemen vielfältige Möglichkeiten der Aufbereitung und Präsentation bauhistorischer Inhalte und tragen damit auch zur Vermittlung baukultureller Werte nicht nur an Fachpublikum bei.

Neben der sachzeugnisbezogenen Verknüpfung bauhistorischer und bautechnischer Forschungsdaten kann die Infrarotthermographie aber auch für die Denkmalpflegepraxis ein weites Potential ausschöpfen. Thermographische Visualisierungen bilden eine Basis für die Verortung konkreter restauratorischer und denkmalpflegerischer Maßnahmen, indem sie verdeckte Befund- und Schadstellen zeigen. Daraus können dann wiederum lokal begrenzte, individuell angepasste restauratorische Interventionen und Sanierungskonzepte entwickelt und durchgeführt werden. Vor allem aber liegt ein großes Potential der Thermographie auch in einer nicht ausschließlich schadens-, sondern maßgeblich ressourcenorientierten Nutzung und Interpretation radiometrischer Daten. Thermogramme können neben Anomalien, Befunden und Schäden immer auch die Tauglichkeit und Leistungsfähigkeit der historischen Bausubstanz im Rahmen einer zeitgemäßen Nutzung darstellen und dahingehend ausgewertet werden. Thermographie bleibt damit nicht die bloße Visualisierung bestehender bauhistorischer

Phänomene, sondern kann zu einem auf potentielle Weiternutzungen der historischen Bausubstanz anwendbaren Maßstab für ihre Leistungsfähigkeit und Angemessenheit werden.

Das weitere Potential der Infrarotthermographie für die Bauforschung liegt dementsprechend sowohl in der Profilierung der technischen Bauwerksanalyse als auch in der anwendungsbezogenen Weiterentwicklung und Nutzbarmachung der thermographischen Erkenntnisse.

9. Glossar

Atmosphärische Fenster

Wellenlängenintervalle mit überwiegend konstanten, hohen Transmissionsgraden. Hier werden die von Untersuchungsobjekten emittierten elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre nur wenig gestreut oder absorbiert. Thermographisch relevante atmosphärische Fenster liegen bei 3 - 5 µm und 8 - 14 µm.

Auflösung

Geometrische Auflösung:

Maß für die kleinstmögliche Messfläche, die das Messsystem noch auflösen kann. Je kleiner die geometrische Auflösung, desto besser das Messsystem. Abhängig von:

Detektorauflösung, bestimmt durch Anzahl der Detektorzellen (**Pixel**) und Größe der einzelnen Detektorzellen (**Pitch**), (IR-Pixelanzahl z.B. 640 x 480 Pixel = 307.200 Bildpunkte, also 0,3 Megapixel)

Bildfeldwinkel (Instantaneous Field Of View, IFOV, Angabe in mrad), dem kleinstmöglichen Raumwinkel, den ein einzelner IR-Pixel noch erfassen kann. $IFOV = \text{Pixelgröße} / \text{Objektivbrennweite}$. $IFOV * \text{Objektstand} = \text{Messfleckgröße}$ (kleinstmöglich detektierbare Objektgröße).

Thermische Auflösung/Empfindlichkeit (**Noise Equivalent Temperature Difference, NETD**):

Maß für die kleinstmögliche Temperaturdifferenz, die das Messsystem noch darstellen kann. Je kleiner die thermische Auflösung, desto besser die Empfindlichkeit der Kamera und entsprechend besser die Detailwiedergabe. Wird für Objekttemperaturen von 30°C angegeben.

Zeitliche Auflösung:

Bildwiederholrate (Framerate), Bildfrequenz in Herz (Hz). Anzahl der Einzelbilder, die ein Thermographiesystem pro Zeitspanne erfassen und ausgeben kann.

Detektivität

Empfindlichkeit der Thermographiesysteme

Detektor (auch Sensor)

Messgrößenaufnehmer, erfasst und konvertiert Strahlungsintensität in elektrische Signale. Unterscheidung der IR-Detektoren in thermische Detektoren (z.B. pyroelektrische Detektoren oder Bolometer) und Quantendetektoren (auch Photonen- oder Halbleiterempfänger genannt). Bei thermischen Detektoren wird die strahlungsabhängige Temperaturänderung des Detektorelements in ein elektrisches Signal umgewandelt und als Maß für die absorbierte Strahlung ausgewertet. Bei pyroelektrischen Detektoren entsteht die Signalwandlung über eine Ladungsänderung, bei Bolometern über eine Widerstandsänderung. Bei Quantendetektoren wird durch angeregte Elektronen mittels photoelektrischem Effekt ein elektrisches Signal erzeugt, das als Maß für die absorbierte Strahlung ausgewertet wird.

Detektor-Pitch

Größe der einzelnen Detektorzellen, Stand der Technik 25, 17 oder 12 µm. Je kleiner, desto schärfer und kontrastreicher das Thermogramm.

Focal Plane Array (FPA)

Kamera mit Detektormatrix. Diese verfügt über einen ebenen Flächensensor, ein Detektorarray als Matrix aus vielen rasterförmig angeordneten einzelnen Infrarotsensoren, der Strahlungsintensitäten für jeden Bildpunkt misst.

Heritage-BIM

Virtuelle Gebäudeinformationssysteme aus digitalen Gebäudemodellen und verknüpften Metadaten, wie Texte, Bilder, numerische Daten, Informationen zu Baumaterialien, Konstruktionen, Monitoring- und Simulationsdaten etc. Kollaboratives Projektssystem zur simultanen Sammlung, Bearbeitung und Distribution dieser Daten durch alle beteiligten Fachleute.

Infrarot(strahlung)

Elektromagnetische Strahlung einer definierten Wellenlänge. Unterteilung in:

Nahes Infrarot (near infrared, **NIR**) 700 bis 1400 nm, kurzwelliges Infrarot (short wavelength, **SWIR**) 1,4 bis

3,0 μm , mittleres Infrarot (mid wavelength, **MWIR**)
3,0 bis 8 μm , langwelliges Infrarot (long-wavelength, **LWIR**)
8 bis 15 μm , fernes Infrarot (far infrared, **FIR**)
15 μm bis 1000 μm (1 mm).

Infrarot-Thermographie, Infrared Thermography (IRT)
Bildgebendes Verfahren zur Anzeige der Oberflächen-
temperatur von Objekten. Dabei wird die Intensität der
Infrarotstrahlung, die von einem Punkt ausgeht, als
Maß für dessen Temperatur ausgewertet. Häufig syn-
onym: Thermisches Infrarot, Thermal Infrared (TIR).

Infrarot-Thermogramm

Bildhafte Darstellung Strahlungsintensität und Strah-
lungsverteilung, in der Regel Visualisierung der radio-
metrischen Messwerte als Falschfarben- oder Graustu-
fendarstellung.

Infrarot-Messanordnungen

Reflexive Anordnung: Thermographiesystem und
Anregungsquelle befinden sich auf derselben Seite
des Messobjektes.

Transmissive Anordnung: Thermographiesystem und
Anregungsquelle befinden sich auf unterschiedli-
chen Seiten, im Idealfall vor und hinter dem Mess-
objekt.

Infrarot-Messprinzipien

Infrarot-Reflektographie: Detektionsverfahren für
reflektierte Infrarotstrahlung, in der Regel im elek-
tromagnetischen Wellenlängenbereich von ca. 780
nm - 3 μm . Anwendung häufig im Rahmen von
Multispektralanalysen.

Infrarot-Thermographie: Detektionsverfahren für vor-
wiegend emittierte Infrarotstrahlung aufgrund von
Eigentemperatur der Untersuchungsobjekte. In der
Regel im elektromagnetischen Wellenlängenbereich
zwischen 3 μm und 14 μm .

Infrarot-Messverfahren

Aktive Infrarotthermographie: Gezielte Anregung mit
steuerbarer externer Anregungsquelle. Unterschei-
dung zwischen Lock-In-Thermographie (periodische
Anregung) und Impuls- beziehungsweise Puls-Pha-
sen-Thermographie (einmalige beziehungsweise
mehrfach wiederholte Pulsanregung).

Passive Infrarotthermographie: Thermographische
Untersuchung ohne externe Anregungsquelle.

Level und Span

(Niveau und Spreizung) Einstellungsmöglichkeiten der
Temperaturskala im Thermogramm.

Messgerät

Gerät zur quantitativen Erfassung geometrischer, phy-
sikalischer etc. Messwerte. Unterscheidung nach Wir-
kungsprinzip, z.B. mechanische, elektrische, optische
Messgeräte. Auch (Mess)Instrument, Mittel oder Gerät
zur Ausführung bestimmter wissenschaftlicher oder
technischer Arbeiten.

Messgröße

Physikalische Größe, deren Wert mit spezifischem
Messverfahren ermittelt werden kann.

Messwert

Mit spezifischem Messverfahren ermittelter spezieller
Wert einer Messgröße. Angabe mit Zahlenwerten und
Einheit.

Micro-Scanning-Enhancement

(Auch Dynamisches Resolution Enhancement, DRE)
Verbessert die Bildqualität des Thermogramms, indem
die Pixelanzahl vervierfacht, die räumliche Abtastrate
verdoppelt und das Pixelraster halbiert wird.

Non Uniformity Correction (NUC)

(Auch Non-Uniformity-Compensation) Kamerainterne
Inhomogenitätskorrekturen, Eigenkalibrierung und
Stabilisierung des Detektors, um die Bildqualität zu
verbessern.

Optik

Lehre vom Licht. In der Regel wird damit der sichtbare
Teil des elektromagnetischen Spektrums im Bereich
380 nm bis 780 nm bezeichnet. Im weiteren Sinne
werden auch die infraroten und ultravioletten Wellen-
längen dazugezählt.

Qualitative IR-Untersuchungen

Darstellung und Bewertung der relativen Temperatur-
verteilungen, Visualisierung der infraroten Strahlungs-
intensität und -verteilung. Flexible Messbedingungen,
wenig Einschränkungen hinsichtlich Umgebungspara-
metern. Messungen wenig abhängig von Jahreszeit,
Tageszeit und Witterung.

Quantitative IR-Untersuchungen

Darstellung und Bewertung der absoluten Temperatur-
messwerte, Visualisierung der infraroten Strahlungs-
werte und deren Verteilung. Strikte Messbedingungen,
starke Einschränkungen hinsichtlich Umgebungs-
parametern (konstante Luftfeuchte, Windstille, keine
Sonneneinstrahlung etc.). Messungen stark abhängig
von Jahreszeit, Tageszeit und Witterung. Detaillierte

Dokumentation der Umgebungsbedingungen und Bestimmung der Emissionsgrade notwendig.

Quasistationärer Zustand

Annähernd stationäre Messbedingungen; die veränderlichen Einflussgrößen wie Umgebungstemperatur, Luftfeuchte, Strahlungsintensität usw. werden zur Vereinfachung als konstant angenommen.

Spektralband, spektrales Band

Teilbereiche des elektromagnetischen Spektrums, Beschreibung durch Angabe des zugehörigen Wellenlängenintervalls. Unterscheidung nach Lage im elektromagnetischen Spektrum, Bandbreite oder Nutzung.

Spezifische Wärmekapazität

Stoffkonstante, gibt die erforderliche Energie an, die einen Stoff mit der Masse 1 Kilogramm um die Temperatur 1 Kelvin erhöht. Maß für die Fähigkeit eines Materials, thermische Energie aufzunehmen. Je höher die spezifische Wärmekapazität eines Baustoffes, desto mehr Energie wird für seine Erwärmung benötigt.

Strahlungsanteile

Emissionsgrad (Emissionskoeffizient) beschreibt den Anteil der von einem Objekt abgegebenen (emittierten) Infrarotstrahlung.

Reflexionsgrad (Reflexionskoeffizient) beschreibt die Fähigkeit eines Objektes, Infrarotstrahlung aus der Umgebung zu reflektieren.

Transmissionsgrad (Transmissionskoeffizient) beschreibt die Durchlässigkeit eines Objektes für Infrarotstrahlung aus der Umgebung.

Absorptionsgrad (auch Absorptionskoeffizient) beschreibt, welcher Anteil der auftreffenden Strahlung vom Objekt absorbiert wird.

Temperatur-Messbereich

Gibt die kameraspezifische Temperaturober- und Untergrenze an, innerhalb derer die Messwerte mit einer sensorabhängigen Temperaturmessgenauigkeit ermittelt werden kann.

Temperatur-Messgenauigkeit

Gibt die kameraspezifische maximale Abweichung der gemessenen Temperatur des Untersuchungsobjektes von seiner realen Temperatur an.

Terrestrisches Laserscanning (TLS)

(Auch terrestrisches LiDAR (Light Detection And Ranging)) Laserbasiertes Verfahren mit automatisierten Winkel- und Streckenmessungen zur Erzeugung geometrischer Informationen über die Messobjekte.

Ausgabe der Messwerte in koordinatenbasierten Punktwolken.

Visuelles Bild (VIS-Bild)

Photographie, in Abgrenzung zum Thermogramm: Bildhafte Darstellungen der Strahlung im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (VIS).

Wärmebrücke

Ein örtlich begrenzter Bereich in der wärmeübertragenden Hülle eines Gebäudes, der bei gleichen Umgebungsbedingungen einen höheren Wärmestrom aufweist als die umgebenden Bauteile. An Wärmebrücken kommt es zu erhöhten transmissionsbedingten Wärmeverlusten, sie sind energetische Schwachstellen der Gebäudehülle.

Wärmeübertragung

Transport von Energie über thermodynamische Systemgrenzen hinweg. Unterscheidung in:

Konduktion: Wärmeleitung infolge eines Temperaturunterschiedes, innerhalb eines Bauteils oder zwischen benachbarten Bauteilen durch mechanische Berührung der Bauteile.

Konvektion: Wärmeströmung in umgebende Fluide (Flüssigkeiten oder Gase), durch strömungsgebundenen Transport thermischer Energie

Radiation: Wärmestrahlung in Form elektromagnetischer Wellen (kein Medium nötig, findet auch im Vakuum statt).

Wärmestrom

Messgröße zur Beschreibung der Wärmeübertragung (Wärmemenge pro Zeiteinheit)

Zerstörungsfreie Prüfmethoden / Prüfverfahren (ZfP)

(Auch Nondestructive Testing, NDT) Prüfverfahren auf Grundlage physikalischer Messprinzipien (mechanisch, elektrisch, magnetisch, thermisch, optisch, chemisch). Infrarotthermographie gehört zu den thermischen NDT-Verfahren, der Interaktionsraum der Messung ist oberflächenbezogen. Messgrößen sind Temperaturwerte als Maß für infrarote Strahlungsintensität.



Infrarot-Thermographie lässt sich für eine Vielzahl bauforscherischer Fragestellungen einsetzen: Vor allem im Bereich der zerstörungsfreien Voruntersuchungen, bei Fassadendokumentationen, Konstruktions- und Gefügeanalysen, Baufugen und -anschlüssen oder auch im Fall nachträglich veränderter Bauteile kann Thermographie zur Klärung beitragen. Darüber hinaus eignet sich das Verfahren zur Schadensanalyse und -dokumentation. Risse und Hohlstellen, Materialdegenerationen, Oberflächenveränderungen und Feuchte können unter entsprechenden Umgebungsbedingungen in Thermogrammen dargestellt werden. Vor allem in der Kombination mit anderen, sich ergänzenden, möglichst zerstörungsfreien Analysemethoden können so bauforscherische und denkmalpflegerische aber auch archäologische oder restaurierungswissenschaftliche Fragestellungen umfassend untersucht und geklärt werden.

Ziel dieser Handreichung ist es, die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Infrarot-Thermographie im Bereich der Bauforschung anschaulich und praxisnah darzustellen und gleichzeitig in einen entsprechenden wissenschaftlichen Kontext zu setzen. Damit soll der Methodenkanon zur zerstörungsfreien Erfassung, Analyse und Erschließung komplexer Objekte der Bau- und Kunstdenkmalpflege erweitert und in seiner praktischen Anwendung veranschaulicht werden.

Infrared thermography can be used for a variety of building archaeological research issues and can help to answer many questions in this field, particularly in the area of non-destructive preliminary examinations, façade documentation and structural analysis. It can also aid in the investigation of construction joints and reveal the history of building alterations. The procedure is also suitable for damage analysis and documentation. Under appropriate ambient conditions, cracks and voids, material degeneration, surface changes and moisture can be revealed by thermograms. Especially when used in combination with other non-destructive analysis methods, issues from building archaeological research and heritage conservation, as well as archaeological or restoration questions, can be examined and comprehensively clarified. The aim of this manual is to present both the potentials and limitations of infrared thermography in the field of building archaeology, and to place them in a corresponding scientific context. The intention is to expand the range of available methods for the non-destructive recording, analysis and indexing of complex objects in the preservation of buildings and monuments and illustrate the practical application of infrared thermography.

ISBN 978-3-86309-830-8



9 783863 098308

www.uni-bamberg.de/ubp/