



Technische Universität München

Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft

Diplomarbeit

**Untersuchungen an Kunst- und Kulturgut mittels der Infrarot-Thermografie
– Eine zerstörungsfreie Analysemethode –**

Philipp H. WESTEBBE
Matrikelnummer: 2249191

Bearbeitungszeitraum:
27. September 2003 bis 15. Februar 2004
und
1. Juni 2004 bis 10. August 2004

1. Prüfer: Univ.-Prof. Dipl.-Restaurator Erwin EMMERLING
2. Prüfer: Dr. Dipl.-Phys. Andreas KRATZER

INHALTSVERZEICHNIS

Dank	3
1 Einleitung	4
2 Thermografie	4
2.1 Allgemein	4
2.2 Anwendungsgebiete, Erkenntnisse und Dienstleistung	5
2.3 Techniken der Thermografie	6
2.3.1 <i>Passive Thermografie</i>	6
2.3.2 <i>Aktive Thermografie</i>	6
2.4 Vergleiche zwischen den aktiven Thermografieverfahren	8
2.5 Vergleiche zwischen passiven und aktiven Thermografieverfahren	8
3 Historische Entwicklung der Infrarot-Physik	8
4 Physikalische Grundlagen der Infrarot-Thermografie	11
4.1 Definition der Temperatur	11
4.2 Elektromagnetische Strahlungen	12
4.3 Absorption, Reflexion, Transmission	12
4.4 Strahlungsgesetze	14
4.5 Spektren der elektromagnetischen Strahlung	14
4.6 Emissionsgrad	15
4.7 Abhängig der Emission von der Wellenlänge	16
5 Kamerasysteme	17
5.1 Systemkomponenten von Infrarot-Radiometern	18
5.2 Funktionsweise	19
5.3 Systemparameter	20
5.4 Grundarten der Infrarot-Radiometern	20
6 Impuls-Thermografie	21
7 Strahlungsquellen und ihre Spektren	25
8 Thermografische Messungen mit Infrarot-Kameras	27
8.1 Ortsbestimmung	27
8.2 Einfluss der Atmosphäre	27
8.3 Beschaffenheit der Oberfläche	28
8.4 Bestimmung des Emissionsgrades	29
8.5 Kameraabstand	31
8.6 Fehlermöglichkeiten bei Messungen	32
8.7 Auswertungsmethoden von Wärmebildern	32
9 Anwendung	35
9.1 Bauwesen und Denkmalschutz	35
9.2 Feuchtigkeit und Schimmelbefall	36
9.3 Fachwerk	38
9.4 Thermografische Messungen an Gebäuden	39
9.5 Bewertungskriterien / Untersuchungsergebnisse	42
10 Thermografie an Kunstwerken	42
10.1 Untersuchung eines Tafelgemäldes: Maria mit Kind und Johannesknaben	42
10.2 Untersuchung eines Tafelgemäldes: Brustbild einer weiblichen Heiligen	51
10.3 Untersuchung einer Ikone	60
10.4 Untersuchung eines Tafelbildfragments	67
11 Zusammenfassung	76
12 Bibliografie	77
13 Anhang	101

Dank

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft an der Technischen Universität München.

Besonderer Dank gilt Prof. Erwin EMMERLING und seinen Wissenschaftlichen Assistentinnen Dipl.-Restauratorin Christina THIEME, Dipl.-Restauratorin Eva ORTNER und Dipl.-Restauratorin Ursula HALLER für die Anregung zu dieser Arbeit, die intensive Betreuung, die außerordentliche Förderung des Diplomverfahrens, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die freiheitlich-kreative Arbeitsatmosphäre.

Besonders danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim HEINZL, Ordinarius, 1. Vizepräsident der TUM, seinen Wissenschaftlichen Mitarbeitern Dr.-Ing. Franz IRLINGER und Dipl.-Ing. Martin SCHINDLER, Lehrstuhl für Feingerätebau und Mikrotechnik an der Technischen Universität München.

Für tatkräftige Unterstützung und Übernahme des Korreferats danke ich Dr. Dipl.-Phys. Andreas KRATZER, Physik Department TU München.

Weiterer Dank gilt meinem Freund und Physik- und Mathematikstudenten Peter GONSER, sowie Dr. Udo NETZELMANN und Dr. Günter WALLE Universität Saarbrücken, Abteilung Werkstoffcharakterisierung, für die exzellente Betreuung der Arbeit und für die Nutzung der Laboreinrichtung; Dipl.-Phys. Alexander DILLENZ, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, IKP Universität Stuttgart, Abt. ZfP; Dipl.-Phys. Peter MEINLSCHMIDT, Fraunhofer-Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), Holzforschung, Dipl.-Ing. Gernot RIEGERT, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Zerstörungsfreie Prüfung, Universität

Mein herzlicher Dank gilt ganz besonders meinen Eltern für den Rückhalt und die Unterstützung auf dem Weg bis zu dieser Diplomarbeit. Nicht zuletzt bedanke ich mich bei ihnen für ihre Geduld, Zuversicht, Vertrauen und Unterstützung.

Die Anschriften der hier genannten Personen stehen im Anhang dieser Arbeit.

1 Einleitung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, Restauratoren einen Überblick und notwendiges Grundwissen über Entwicklung und Grundlagen der Infrarot-Thermografie zu geben, deren Anwendungsmöglichkeiten als zerstörungsfreie Prüfverfahren zu erläutern und Einsatz zur Analyse von den Schadensphänomenen an Kunst- und Kulturgut zu untersuchen. Es werden die beiden grundsätzlich verschiedenen Arten der passiven und der aktiven Thermografie und ihre verschiedenen Anwendungstechniken erläutert, sowie ein Überblick über Funktionsweise und Grundarten von Infrarotmessgeräten gegeben, das Arbeiten mit Infrarotkameras und das Auswerten von Thermogrammen erklärt werden.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird an Beispielen die Anwendung der Thermografie in Bauwesen, Denkmalschutz und Restaurierung vorgestellt. In eigenen Untersuchungen sowohl mit passiver als auch mit aktiver Thermografie soll ermittelt oder nachvollzogen werden, ob diese Verfahren geeignet sind, Defekte wie Wärmebrücken, Ablösungen, Hohlstellen, versteckte Strukturen, Materialdifferenzen usw. zu erkennen und in welchem Maße Temperaturerhöhungen auf Oberflächen bei aktiven Thermografieverfahren auftreten.

2 Thermografie

2.1 Allgemein

„Das Wort ‚Thermographie‘ leitet sich aus dem griechischen ab und bedeutet warm (thermos) und schreiben (graphein).“¹ „Der Grundgedanke der Infrarotthermographie ist bestechend einfach: ebenso, wie unser Auge ein Bild selbst leuchtender Objekte auf der Netzhaut, erzeugt eine Thermographiekamera ein Bild von Objekten, die bei niedrigerer Temperatur nur im infraroten und daher für das Auge nicht sichtbaren Spektralbereich ‚leuchten‘.“²

Thermographische Techniken gewinnen in der zerstörungsfreien Prüfung als schnelle und berührungslose bildgebende Verfahren, bei denen das Objekt weitgehend ungestört bleibt, zunehmend an Bedeutung. Man arbeitet mit Hilfe von IR-Detektoren, die die von der Oberfläche eines Prüfobjekts emittierte Wärmestrahlung bzw. Oberflächentemperatur erfassen und auf einem Foto oder Monitor in unterschiedlichen Farben sichtbar machen. Die Temperatur selbst ist in diesem Zusammenhang nur noch eine Messgröße und die emittierte Wärmestrahlung des Messobjekts eine Funktion der Oberflächentemperatur aus der sich Rückschlüsse auf interessierende Parameter ziehen lassen. Das erzeugte Wärmebild (Thermogramm) gibt die Temperaturverteilung der untersuchten Objektsoberfläche in visualisierter Form wieder, im Gegensatz zu punktförmig messenden Handpyrometern.

Können, wie bei Kunstwerken üblich, nur geringe Temperaturdifferenzen angewandt werden, so hat das zur Folge, dass auch nur „Defekte“ in geringen Tiefen sichtbar gemacht werden können. Im Vergleich zur Röntgentechnik ist die Detektionstiefe deutlich geringer. Die hohen Anschaffungs- und Unterhaltungskosten und der sicherheitstechnische Aufwand der Röntgentechnik (Strahlenschutz, Abschirmung, wiederholte sicherheitstechnische Unterweisungen etc.) sind wesentlich größer als bei der Thermographie.

Die thermografisch gewonnenen Bilder können unter verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet werden, und es können nicht sichtbare, oberflächennahe Zustände dokumentiert und analysiert werden.

Im Allgemeinen lassen sich die Aufgabenstellungen besser bewältigen, wenn man den dynamischen Prozess der Wärmeleitung betrachtet, also eine Abfolge von Wärmebildern. Die Leistungsfähigkeit verfügbarer Rechentechnik erlaubt es heute die großen Bilddatenmengen, die bei einer thermographischen Prüfung anfallen, schnell und effizient

¹ URL : http://www.wernet-ds.de/thermographie/blower_door.htm

² WU; BUSSE 1994, S. 393.

zu verarbeiten. Bei einigen Verfahren, die besonders in der Industrie Anwendung finden, kann kontinuierlich online geprüft werden.

Vom Arbeitsausschuss NM 827 „Visuelle und thermografische Prüfung“ des Normenausschusses Materialprüfung (NMP) wurde ein Norm-Entwurf ausgearbeitet, er wird seine Festlegung in der DIN 54190 Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung finden. Diese DIN³ ist in drei Teile gegliedert:

- Teil 1: Allgemeine Grundlagen
- Teil 2: Geräte (in Vorbereitung)
- Teil 3: Begriffe (in Vorbereitung)

Die Norm legt die allgemeinen Grundlagen thermografischer Prüfungen fest und verweist auf weitere Normen.⁴

Wie viele neu entstandene Berufe steht auch die Thermografie vor dem Problem, dass noch keine offiziellen staatlichen Ausbildungsrichtlinien bestehen, was besonders in der zerstörungsfreien Prüfung gilt. In den USA gibt es seit den 60er Jahren einen Entwurf für eine Personalzertifizierung (SNT-TC-1A) der durch die amerikanische Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung ASNT (American Society for Nondestructive Testing) verfasst wurde. Erst seit 1992 existiert in Europa eine entsprechende Norm (EN 473). Die Amerikanische Personalzertifizierung ist lediglich eine „Empfehlung“: der Arbeitgeber beurteilt seine Angestellten. Die EN 473 ist eine Norm, deren Einhaltung durch ein akkreditiertes unabhängiges Unternehmen zertifiziert wird.

Wegen steigender Nachfrage nach qualifiziertem Personal im Bereich der IR-Technik gründete in Deutschland die Firma FLIR Systems die Organisation ITC (Infrared Training Center).⁵

Es finden regelmäßig Fachkonferenzen⁶ über thermische ZfP-Meßverfahren statt, bei denen internationale Forschungsaktivitäten dokumentiert werden. In Europa gibt es alle zwei Jahre QIRT-Tagungen („Quantitative Infrared Thermography“) und in den USA jährlich die Thermosense- und QNDE-Tagungen („Quantitative Nondestructive Evaluation“). Weitere Möglichkeiten zum Erfahrungsaustausch im Bereich von Materialprüfungen gibt es bei den „Welt-NDT“- und den „Photoacoustic and Photodermal Phenomena“-Konferenzen.

2.2 Anwendungsgebiete, Erkenntnisse und Dienstleistung

Die Thermografie wird heute in vielen Bereichen angewandt,⁷ hauptsächlich in Prüf- und Kontrollverfahren der Materialforschung und Entwicklung, zur Materialcharakterisierung, zur Kontrolle von Verarbeitung und Herstellung, zur Produktionsanalyse und zum Nachweis von Ermüdungserscheinungen.

³ DIN 54190 : September 2003.

⁴ DIN 5031, Beiblatt 1 und Teil 1-10 : *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik*.

⁵ SCHÖNBACH 2002, S. 1.

⁶ WU 1996, S. 14.

⁷ A) *Industrie*: Maschinenbau, Automobilbau, Luft- und Raumfahrt, Elektronik, Optik, Prozesstechnik, Kunststofftechnik, Verfahrens- und Versorgungstechnik, Solar- und Klimatechnik. B) *Qualitätssicherung und Kontrolle*: „Hot Spots“. C) *Denkmalpflege*: Bautechnische Untersuchungen, z. B. Fachwerk unter Putz, Wärmeverteilung an Außenwänden und in Ausstellungsräumen. D) *Gebäudetechnik und Bauwerke*: bei Altbauanierung, bei Neubauten zur Kontrolle von Wärmeisolierungen und Kältebrücken, zur Ortung der Leitungsführung von Fußbodenheizungen, zur Lecksuche in Heizungsanlagen, zur Überprüfung von Luftdichtigkeit, Wärmeverteilung und Wärmeverlusten. E) *Archäologie und Geologie*: Darstellung von Bodenformationen, Aufspürung von Bodendenkmälern. F) *Medizin*: Früherkennung von Krebs, Erkennung von Verletzungen, Durchblutungsstörungen, Kontrolle des Heilungsprozesses, Kontrolle bei Operationen. G) *Umweltanalytik*: Katastrophenschutz, Verschmutzung, Vulkan-, Erdbeben- und Gletscherforschung, Vegetation, Bodenqualität, Ernteerträge, Müllsortierung und Verbrennung. H) *Militär*: Aufklärungs- und Raketentechnik.

In der industriellen Fertigung werden die zu prüfenden Materialien im oberflächennahen Bereich z. B. auf Homogenität, Verdichtung, Fehlstellen, Hohlräume, Einschlüsse, Risse, Rissbreite, Risstiefe, Feuchtigkeitsgehalt, Feuchtigkeitsverteilung und Bruch untersucht.

2.3 Techniken der Thermografie

Eine thermografische Prüfung kann je nach Art der zu untersuchenden Objekte auf passive oder aktive Weise durchgeführt werden. Die Auswertung der gewonnenen Daten erfolgt je nach Bedarf qualitativ oder quantitativ.

2.3.1 Passive Thermografie

„Bei der passiven Thermografie wird lediglich der Wärmefluss ausgenutzt, der durch die Eigenwärme des Prüfobjektes entsteht. Darunter fällt sowohl intern erzeugte Wärme [...] als auch die durch natürliche Wärmequellen extern eingebrachte Energie (z. B. Aufheizung durch Sonneneinstrahlung oder Abkühlung durch Wind).“⁸

Es wird also immer nur die Wärmestrahlung untersucht, die ein Objekt ohnehin ständig abgibt.

Weil jedes Objekt mit seiner Umgebung in einem thermischen Gleichgewicht steht, wird bei der passiven Thermografie nur die Eigenstrahlung eines Körpers und „natürliche oder zufällig vorkommende Sekundärstrahlung zur Messung herangezogen.“⁹ Es kommt zu keiner unnatürlichen, zusätzlichen Strahlungsbelastung. Das Verfahren macht sich die Tatsache zu Nutzen, dass jedes zu untersuchende Objekt, ähnlich wie glühendes Metall „leuchtet“, eben nur unterhalb der sichtbaren Frequenzen.

Diese Art der Thermografie kann nur Informationen über die Oberfläche eines Körpers liefern, ist ein seit langem eingesetztes Verfahren und vielen Menschen bekannt aus der Gebäudethermografie, auf die später noch eingegangen wird.

Der natürlich oder technisch durch die Nutzung hervorgerufene Wärmestrom durch ein Bauteil erzeugt auf dessen Oberfläche Temperaturfelder, die thermografisch erfasst werden können (z. B. Kältebrücken).

Anwendungsgebiete der passiven Thermografie sind im Bauwesen (Ortung von Feuchte, Ortung von Kältebrücken, Leckortung usw.), bei der Prüfung von Elektroanlagen, bei der Prüfung von mechanischen Komponenten, in der Prozess- und Anlagendiagnostik, im Umweltbereich (Vegetationsverteilung, Gewässereinleitungen etc.), in der Medizin (Durchblutungsstörungen usw.), sowie im militärischen Bereich (Minenortung, Personenortung) zu finden.

2.3.2 Aktive Thermografie

Alle aktiven Thermografie-Verfahren beruhen im Grunde darauf, dass eine zu untersuchende Probe auf irgendeine Weise thermisch angeregt und ihr Antwortverhalten zu ihrer Charakterisierung ausgewertet und verwendet wird. „Bei der aktiven Thermografie wird gezielt eine Änderung der zu messenden Oberflächentemperatur verursacht. Hierfür wird der stationäre Zustand des Untersuchungskörpers so verändert, dass das resultierende Temperaturverhalten des Bauteils zur Charakterisierung und Prüfung verwendet werden kann.“¹⁰ Die hierzu eingesetzten Wärmequellen (Laser, Lampen, Lichtblitz, Schall, usw.) werden nur zum Zweck der thermografischen Prüfung eingesetzt, um einen kurzzeitigen

⁸ DIN 54190, Teil 1 : September 2003, S. 4.

⁹ BÜSCHER 1999, S. 36.

¹⁰ DIN 54190, Teil 1 : September 2003, S. 5.

Wärmefluss im Prüfobjekt zu erzeugen. Die Einwirkung kann einmalig, periodisch oder kontinuierlich geschehen und kann entweder zu direkten Temperaturänderungen (z. B. durch IR-Strahler), oder zu indirekten Temperaturänderungen (z. B. durch Ultraschallenergie) führen. Die so auf und in einer Probe erzeugte Temperaturschwankung („Thermische Welle, auch Temperaturwelle oder Wärmewelle“ bezeichnet¹¹) wird über die Infrarotabstrahlung der Oberfläche nachgewiesen.

Je nach Art des zu prüfenden Objekts wird eine entsprechende Anregungsquelle ausgewählt, die zeitlich oder deren Intensität moduliert wird. Die Einwirkung geschieht berührungslos, die Temperaturmessung an der Oberfläche kann mittels IR-Sensoren als Einzelpunktmessung, in ganzen Bildern oder Bildsequenzen (Film) erfolgen.

Unterschiedliche Materialien, Haftungsfehler, Materialeinschlüsse und Defekte beeinträchtigen die Wärmeleitung und zeichnen sich zeitlich versetzt durch örtliche Temperaturunterschiede an der Oberfläche sichtbar ab. Das zeitliche Verhalten solcher Signale ist abhängig von den thermischen Eigenschaften eines Bauteils (spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit), der Fehlertiefenlage und der Fehlergröße.¹² Es können auch Aussagen über geometrische Parameter (Schichtdicken) einer Probe gegeben werden, wobei die Tiefe einer Schicht von der Modulationsfrequenz abhängt.

Erfolgt der zeitliche Verlauf der Aufheizung einmalig, so spricht man von Impuls-Thermographie, geschieht er periodisch, so spricht man von Lock-In-Thermographie. Die fortschreitende Entwicklung ermöglicht eine immer weitergehende Spezialisierung dieser Techniken mit parallel einhergehender Spezialisierung ihrer Benennung.

Die Nomenklatur der einzelnen Verfahren und auch der Aufnahmegeräte ist in der Literatur nicht immer eindeutig.

In Abhängigkeit von der Anregungstechnik und der dazu jeweils angepassten Auswertung werden unterschieden:

- Impulsthermografie
- „Cooling-Down“-Thermografie oder Transiente-Thermografie (Abkühlungsthermografie)
- „Lock-In“-Thermografie (Modulationsthermografie)
- Impulsphasenthermografie
- Vibrothermografie (auch Ultraschall-induzierte Thermografie genannt)
- Ultraschall-Burst-Phasen-Thermografie
- Puls-Phasen-Thermografie
- Ultraschall induzierte Thermografie

¹¹ MANGOLD 2000, S. 12.

¹² BAUMANN; NETZELMANN 2003, S. 39.

2.4 Vergleiche zwischen den aktiven Thermografieverfahren

Im Folgenden soll ein Überblick über aktive Thermografieverfahren gegeben werden.¹³

	Lock-in-Techniken	Impulstechniken	Scantechniken
Wärmequellen	- modulierte Laserstrahlung - Infrarotstrahler (sinusförmige Oberflächen- temperaturregelung nötig)	- Blitzlampen - Infrarotstrahler	- Lampen mit punkt- oder zeilenförmiger Fokussierung - cw-Laser
Temperaturmessung	- Infrarotdetektoren - Schalldetektoren (für photoakustischen Effekt) - Thermographiekameras (niederfrequente Anregung)	- Flüssigkristalle (bei quasi kontinuierlicher Aufheizung) - Infrarotkameras	- Infrarotzeilenkameras - IR-Flächenkameras
Kleinste nachweisbare Fehler	- Fehlergröße entspricht halber Tiefenlage (für Phasensignal)	- Fehlergröße entspricht Tiefen- lage	- Fehlergröße entspricht Tiefen- lage
Prüfzeit	- einige Minuten	- einige Sekunden	- kontinuierlich
Ortsauflösung	- einige µm bei Laseranregung - ca. 1/100 Bildschirmdiagonale bei Lock-in-Thermographie	- ca. 1/100 Bildschirmdiagonale - maximal einige 10 µm	- ca. 1/100 Zeilenlänge
Prüfung bewegter Objekte	- nur bei punktförmiger Messung	- bedingt	- bevorzugt für kontinuierliche Prozesse z. B. am laufenden Band
Einfluss des Emissionsgrades	- gering im Phasensignal	- Reduzierung durch Normierung oder Differenzbildverfahren	- Reduzierung durch Beschich- tung
Gerätekosten	100 - 250 TDM	50 - 250 TDM	30 - 50 TDM

2.5 Vergleiche zwischen passiven und aktiven Thermografieverfahren

Sowohl die passive als auch die aktive Thermografie ermöglichen berührungsfreie Untersuchungen von Objekten, in dem sie mit einer IR-Kamera Temperaturfelder erfassen. Die passive Thermografie kann nur Aussagen über Oberflächentemperaturen eines Objektes liefern. Dabei muss ein stationäres dynamisches Gleichgewicht zwischen dem untersuchten Gegenstand und seiner Umgebung vorliegen. Ein reflektierender Strahlungsanteil (z. B. Sonnenlicht) stellt eine Störstrahlung dar, die gegenüber der Eigenstrahlung so klein wie möglich gehalten werden muss.

Bei der aktiven Thermografie geht es dagegen generell um Untersuchungen von Objekten, die durch einen thermischen Impuls oder durch sinusförmige Modulation von außen angeregt wurden. Durch aufgezeichnete Unregelmäßigkeiten und Störungen des Wärmeflusses lassen sich im oberflächennahen Bereich verborgene Fehler entdecken.

3 Historische Entwicklung der Infrarot-Physik¹⁴

- 1800 Entdeckung der Infrarot-Strahlung (Friedrich Wilhelm HERSCHEL)
- 1830 erste technische Anwendungen der IR-Strahlung und Entwicklung eines Thermo­elementes (L. NOBILI)
- 1833 Entwicklung des Thermosäule (MELLONI)
- 1860 Kirchoff'sches Gesetz – „Schwarzer Körper“ (Gustav H. KIRCHOFF)
- 1879 Gesamtstrahlungsgesetz – experimentell (Josef STEFAN)

¹³ MEYENDORF; NETZELMANN; VETTERLEIN; WALLE 1998, S. 1503.

¹⁴ SCHÖNBACH 2002, S. 1. KARSTÄDT; MÖLLMANN; PINNO; VOLLMER 1998, S. 23-24.

- 1880 Entwicklung von IR-empfindlichen Photoplatten (S. LANGLEY)
- 1884 Gesamtstrahlungsgesetz – theoretisch (Ludwig BOLTZMANN)
- 1887 Nachweis: IR – Strahlung ist elektromagnetische Strahlung (Heinrich HERTZ)
- 1893 Wien'sches Verschiebungsgesetz (Wilhelm K. W. WIEN)
- 1896 Wien'sches Strahlungsgesetz (Wilhelm K. W. WIEN)
- 1900 Rayleigh-Jeans'sches Gesetz (John W. S. RAYLEIGH / Sir James JEANS)
- 1900 Planck'sches Strahlungsgesetz (Max PLANK)
- 1913 Beobachtung der Rotationsspektren von Molekülen möglich
- 1938 erste großtechnische Anwendung von IR-Strahlung im Automobilbau der Firma Ford
- 1939 erstes Infrarotnachtsichtgerät
- 1940 erste militärische der IR-Technik zur Fernaufklärung
- 1941 kurzzeitige Verwendung eines Freistrecken-IR-Telefon
- 1950 erste selbst lenkende Raketen mit IR-Suchköpfen
- 1964 erstes ziviles Thermographiesystem mit Einelementsensoren (Firma Agema, früher AGA)

Im Jahre 1800 entdeckte Friedrich Wilhelm (Sir William) HERSCHEL¹⁵ die Temperaturstrahlung außerhalb des für das menschliche Auge sichtbaren Bereiches.¹⁶ Er war auf der Suche nach geeignetem optischem Filtermaterial für Teleskope, um bei Sonnenbeobachtungen die Helligkeit herabzusetzen. Er testete Gläser mit verschiedenen Farben und annähernd gleicher Helligkeitsminderung und stellte fest, dass einige Gläser wenig und andere sehr viel Wärme durchließen.¹⁷ Seit NEWTON war bekannt, dass das Sonnenlicht in Spektralfarben zerlegbar und für die Erwärmung von Objekten verantwortlich ist.¹⁸ HERSCHEL wiederholte das Newton'sche Experiment, achtete aber dabei mehr auf den Wärmeeffekt des Lichtes. Er schwärzte ein empfindliches Quecksilberthermometer und beobachtete einen Anstieg der Temperatur, wenn er das Thermometer vom Violetten in den Roten Bereich des Spektrums bewegte.¹⁹ Er stellte fest, dass auch danach im ‚dunklen Bereich‘²⁰ die Temperatur weiter anstieg.

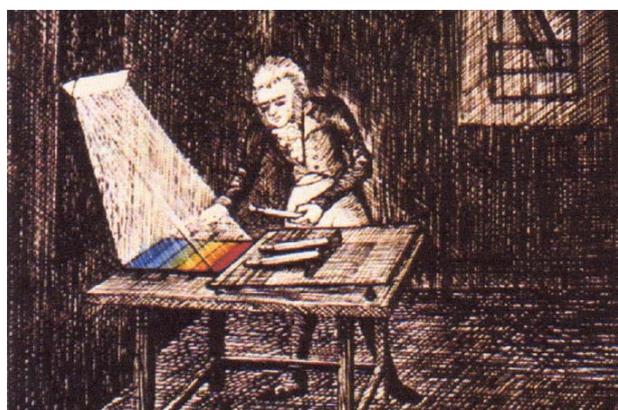


Abb. 1: Experiment von Friedrich Wilhelm HERSCHEL.
(Quelle: SCHÖNBACH : 2002, S. 1, pdf-Datei)

„HERSCHEL ging davon aus, dass er eine neue Art von Spektrum entdeckt hatte, das er ‚thermometrisches Spektrum‘ nannte. Die Strahlung selbst bezeichnete er als ‚dunkle Wärme‘ oder einfach als ‚unsichtbare Strahlen‘.“²¹
Er entdeckte damit, dass sich das Sonnenspektrum über den sichtbaren Bereich hinaus in den langwelligeren Bereich erstreckt.²²

¹⁵ HERSCHEL, Friedrich Wilhelm: „Geboren am 15.11.1758 in Hannover. Im Kindesalter übersiedelte Herschel nach London und arbeitete später als Direktor eines Musikkorps, gleichzeitig studierte er als Autodidakt Mathematik und Astronomie. Am 13.3.1781 entdeckte Herschel den Planeten Uranus, den er zu Ehren seines Königs (Georgium sidus) nannte. Zum Dank wurde Herschel an den königlichen Hof (Georg III.) als Astronom berufen.“... (Quelle: GLÜCKERT 1992, S. 131).

¹⁶ (Hrsg.) TRÄNKLER; OBERMEIER 1998, S. 953.

¹⁷ WEBER 1982, S. 63.

¹⁸ URL : http://www.flirthermography.de/about/ir_history.asp

¹⁹ KARSTÄDT; MÖLLMANN; PINNO 1998, S. 32.

²⁰ WEBER 1982, S. 64.

²¹ WEBER 1982, S. 64.

²² KARSTÄDT; MÖLLMANN; PINNO; VOLLMER 1998, S. 34.

Im Jahre 1840 gelang es Sir John HERSCHEL, dem Sohn von Friedrich Wilhelm HERSCHEL mit einem ‚Wärmebild‘²³ Spektrallinien im Infrarotbereich sichtbar zu machen. Er baute einen Versuch auf, in dem er auf der Vorderseite berußtes Löschpapier in Alkohol tränkte und im unsichtbaren Bereich zum roten Ende des Spektrums hin anordnete. Aufgrund der Tatsache, dass der Alkohol bei stärkerer Wärmeeinwirkung schneller als bei geringerer verdunstet zeichnete sich auf der Rückseite des Löschpapiers ein Wärmebild des Spektrums ab. Feuchte Stellen zeichneten sich dunkler als die trockenen ab. Dieses Wärmebild nannte John HERSCHEL ‚Thermograph‘²⁴.

Bis zum Jahre 1829, dem Jahr, als NOBILI das Thermoelement erfand, waren Thermometer die einzigen Infrarot-Strahlungsdetektoren, deren Empfindlichkeit bei etwa 0,2°C lag.²⁵

„MELLONI machte sich die Erfindung NOBILIS zunutze, indem er einige Thermolemente in Serie schaltete und damit die erste Thermosäule konstruierte. Dieser neue Infrarot-Strahlungsdetektor war mindestens 40mal so empfindlich wie das beste Thermometer aus der Zeit der Entdeckung der Wärmestrahlung. Es war damit möglich, die Wärme von einer in drei Meter Entfernung stehenden Person nachzuweisen.“²⁶

HERSCHEL war sich der begrenzten Durchlässigkeit von thermischer Strahlung bei seinen Experimenten bewusst. 1830 entdeckte der Italiener MELLONI, dass das in großen Kristallen vorkommende Steinsalz (NaCl) für Infrarot-Strahlung besser durchlässig ist als Glas. In der Folge wurde Steinsalz zum wichtigsten optischen Material im infraroten Bereich, bis es in den dreißiger Jahren des 19. Jahrhunderts durch künstliche Kristalle ersetzt wurde.

Im Jahre 1860 definierte Gustav H. KIRCHHOFF, der mit Bunsen an der Spektralanalyse arbeitete, den so genannten „Schwarzen Körper“ als ein Objekt das alle einfallende Strahlungsenergie absorbiert und stellte ein Gesetz auf, nach dem ein guter Strahlungsabsorber auch ein guter Strahler sei.²⁷ Mit der Einführung des Begriffs „Schwarzer Strahler“ wurden die Grundlagen zur Anwendung von Infrarotstrahlung gelegt.²⁸

Die Empfindlichkeit der Strahlungsdetektoren (Thermometer, Thermolemente) wurde 1880 mit der Erfindung des Bolometers durch Langley bedeutend verbessert. Dieses Infrarot-Strahlungsmessgerät soll auf eine Wärmestrahlung in 400 m Entfernung angesprochen haben.

1879 gelangte Josef STEFAN durch experimentelle Messungen zu dem Schluss, „daß der Gesamtbetrag der von einem schwarzen Körper abgestrahlten Energie der vierten Potenz seiner absoluten Temperatur proportional sei [...]“.²⁹ Zum gleichen Ergebnis kam auch Ludwig BOLTZMANN aufgrund theoretischer Überlegungen. Seitdem ist diese Formel als das Gesetz von Stefan-Boltzmann bekannt.

Der Physiker Clerk MAXWELL definierte Licht als eine bestimmte Form elektromagnetischer Wellen. Diese Aussage wurde 1887 von Heinrich HERTZ³⁰ bestätigt, als es ihm gelang langwellige Infrarotstrahlung auf elektrischem Wege zu erzeugen³¹ und zu beweisen, dass sie sich mit gleicher Geschwindigkeit wie Lichtwellen fortsetzt.

„Im Verlaufe des letzten Jahrzehnts des neunzehnten Jahrhunderts war klar, dass mit der inzwischen von MAXWELL formal vollendeten ‚elektrodynamischen Theorie‘ das Verhalten jeder zum elektromagnetischen Spektrum gehörenden Strahlung beschrieben werden konnte. [...] Doch erst am Ende des neunzehnten Jahrhunderts erkannte man,

²³ WEBER 1982, S. 65.

²⁴ WEBER 1982, S. 65.

²⁵ WEBER 1982, S. 65.

²⁶ WEBER 1982, S. 65.

²⁷ GERLACH 1999, S. 87-88.

²⁸ GLÜCKERT 1992, S. 31-32.

²⁹ WU; BUSSE 1994, S. 393-394.

³⁰ BÜSCHER 1999, S. 10-11.

³¹ GERLACH 1999, S. 87-88.

daß es unmöglich ist, ein Strahlungsgesetz allein aus der elektromagnetischen Theorie herzuleiten.“³²

Max PLANCK konnte im Jahre 1900 durch die Einführung eines Proportionalitätsfaktors (Planck'sches Wirkungsquantum) eine Gleichungsform finden, die die Energieverteilung eines „Schwarzen Strahlers“ hinreichend beschreibt. Er ging von der Vorstellung ab, dass Energie kontinuierlich abgestrahlt wird. Seine Quantentheorie geht von nicht kontinuierlicher, sondern in Quantensprüngen erfolgender Energieabgabe eines „Schwarzen Körpers“ aus. Im Jahre 1918 wurde Max PLANCK für seine Forschung der Nobelpreis verliehen.

1921 wird das Planck'sche Strahlungsgesetz durch Messungen von RUBENS und MICHEL bestätigt. Die ersten großtechnischen Anwendungen der Thermografie erfolgten ab 1938 zur Lacktrocknung im Automobilbau der Firma Ford.³³ Als erstes verwendbares Wärmebildsystem kann der 1929 von CZERNY beschriebene Evaporagraf angesehen werden, der das Strahlungsmuster eines Objektes auf einer mit Naphthalin beschichteten Membran abbildete.³⁴ „Es waren allerdings je nach Objekttemperatur in der Regel einige Stunden ‚Belichtungszeit‘ notwendig.“³⁵

Während des 2. Weltkrieges wurde versucht mit Hilfe von elektronenoptischen Bildwandlern die Infrarotbild-Technologie militärisch zu nutzen. Zum ersten Mal konnte man „im Dunkeln sehen“. Der Sehbereich war allerdings auf eine Wellenlänge bis ca. 1,3 µm und damit auf Wärmestrahlung heißer Objekte, mit Temperaturen größer als 300°C beschränkt. Andere Objekte konnten nur durch Anstrahlung mit Infrarot-Suchscheinwerfern sichtbar gemacht werden. Somit bestand aber die Gefahr seine eigene Position zu verraten. Man bemühte sich verstärkt das Evaporagraf-Prinzip weiter zu entwickeln, um passive Infrarotbildgeräte (ohne Suchstrahl) zu erhalten, was erst gegen Ende des zweiten Weltkrieges gelang.

Ab der Mitte des 20. Jahrhunderts wurde an IR-Suchköpfen ausgestatteten selbst lenkenden Raketen experimentiert.³⁶

Mit zeitlichem und technologischem Abstand erfolgte in den sechziger Jahren die erste Anwendung von Thermographiegeräten im zivilen Bereich. 1964 brachte die Firma Agema (früher AGA) das erste System mit Einelementsensor auf den Markt. Seitdem hat die Entwicklung von Wärmebildkameras große Fortschritte gemacht.

4 Physikalische Grundlagen der Infrarot-Thermografie

4.1 Definition der Temperatur

„Die bei uns übliche Celsiusskala ist rein empirisch entstanden. Man hat den Temperaturbereich zwischen schmelzendem Eis und siedendem Wasser bei einem Druck von 1,01325bar (1atm = 1,01325bar) in 100 gleiche Teile geteilt (Quecksilberthermometer) und daraus das °C als ‚Schrittweite‘ gewonnen. [...] Die absolute Temperaturskala beginnt beim absoluten Nullpunkt. Die Celsiusskala ist um 273,15K versetzt.“³⁷

Die Einheit der absoluten Temperatur ist das Kelvin (Formelzeichen T, Einheit [K]). Somit gilt als reine Zahlenwertgleichung:

$$T = \delta + 273,15 \quad [\text{K}]$$

³² GERLACH 1999, S. 87-88.

³³ KARSTÄDT; MÖLLMANN; PINNO; VOLLMER 1998, S. 36.

³⁴ WEBER 1982, S. 65-66.

³⁵ WEBER 1982, S. 66.

³⁶ URL : http://www.infratec.de/thermographie/index_de.html

³⁷ URL : <http://www.thermografie-schweiger.de/theorie.htm>

Differenzen von Temperaturen, auch auf der Celsiuskala, sind bevorzugt in K anzugeben. Beispiel: ein Körper wird von der Temperatur $\delta_1 = 15,8^\circ\text{C}$ auf $\delta_2 = 25,8^\circ\text{C}$ erwärmt, so ist die Temperaturänderung $\Delta\delta = 10,0\text{K}$. In diesem Fall ist es unüblich, für die Temperaturdifferenz $\Delta\delta = 10,0^\circ\text{C}$ zu schreiben.

In der Internationalen Praktischen Temperaturskala aus dem Jahre 1968 (IPTS-68) wurden weitere Temperaturfixpunkte wie Tripelpunkte, Siedepunkte und Erstarrungspunkte verschiedener reiner Materialien festgelegt.

4.2 Elektromagnetische Strahlungen

Jeder Körper strahlt kontinuierlich Energie in Form elektromagnetischer Strahlung ab. Dabei liefern alle Wellenlängen (von Radio bis γ -Strahlung) einen Beitrag. Die Größe der Beiträge hängt von der Temperatur des Körpers ab.

Aus atomarer Sicht entwickelt sich die Strahlung nicht linear sondern in Quantensprüngen. Strahlung entsteht beim Übergang eines Elektrons von einer Bahn höherer Energie zu einer Bahn niedriger Energie.

Die Temperaturstrahlung entwickelt sich nicht linear sondern in Quantensprüngen, da sie beim sprunghaften Übergang eines Elektrons von einer Bahn höherer Energie zu einer niedriger Bahn Energie entsteht. So erzeugt die Materie eine der Temperatur zugeordnete Wärmestrahlung. Je höher die Temperatur eines Körpers ist, umso intensiver wird die Wärmestrahlung.

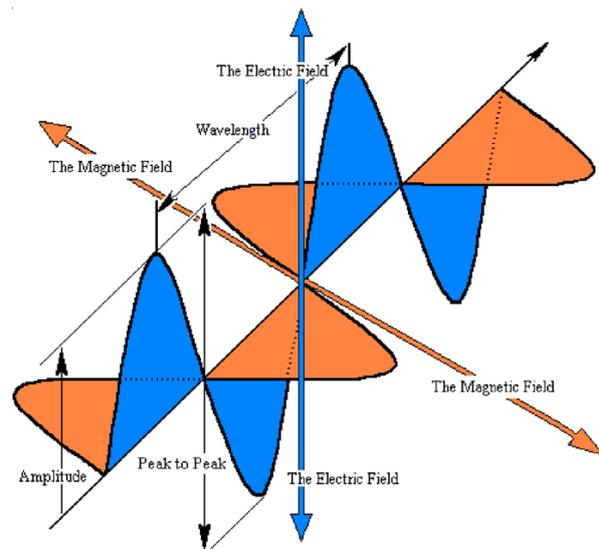


Abb. 2: Elektromagnetische Strahlungen.
(Quelle: URL : <http://home.wanadoo.nl/paulschils/03.00.html>)

4.3 Absorption, Reflexion, Transmission

Trifft Strahlung (Φ) auf einen Körper trifft Absorption, Reflexion und Transmission auf.³⁸

Absorption: Ein Teil der Strahlung wird im Körper absorbiert und in Wärme oder elektrische/chemische Energie umgewandelt.

Reflexion: Ein Teil der Strahlung wird an der Oberfläche des Körpers reflektiert.

Transmission: Ein Teil der Strahlung durchdringt den Körper und breitet sich weiter aus.

Diese drei Effekte treten in der Praxis nicht alternativ zueinander, sondern (mehr oder weniger ausgeprägt) gleichzeitig auf. Die Eigenschaften eines Körpers werden durch die jeweiligen Koeffizienten beschrieben:

³⁸ SCHÖNBACH 2002, S. 1.

Reflexionsgrad (ρ): $\rho = \Phi_{\text{ref}} / \Phi_{\text{ges}}$
 Absorptionsgrad (α): $\alpha = \Phi_{\text{abs}} / \Phi_{\text{ges}}$
 Transmissionsgrad (τ): $\tau = \Phi_{\text{trans}} / \Phi_{\text{ges}}$

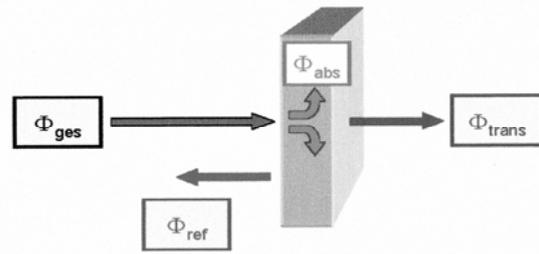


Abb. 3: Transmission, Reflexion, Absorption.
 (Quelle: SCHÖNBACH 2002, S. 2, pdf-Datei)

Da keine Energie verloren geht (Energieerhaltungssatz) muss die Summe der drei Koeffizienten immer 1 ergeben:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad \vee \quad \rho + \varepsilon + \tau = 1$$

Der Reflexionsgrad ist der Anteil von absorbierten zum gesamten am Körper ankommenden Strahlung. Das Reflexionsgesetz der Optik geht im visuellen Bereich von zwei idealisierten Fällen aus, der „gerichteten Reflexion“ (Oberflächenspiegel) und der „diffusen Reflexion“ (Streuung), die zum Beispiel bei hochweißen Anstrichen an rauen Oberflächen auftritt. Bei den meisten anderen Fällen handelt es sich um Mischformen der Reflexion. Abnehmende Oberflächenrauigkeit führt von der „diffusen“ zunehmend zur „spiegelnden“ Reflexion. Daher können kleine, örtliche Abweichungen der Oberflächenrauigkeit bei gleichem Material zu hohen Schwankungen des gerichteten Lichtanteils führen. Das Reflexionsverhalten verschiedener Materialien kann sich im visuellen Bereich (VIS) deutlich vom IR-Bereich unterscheiden.

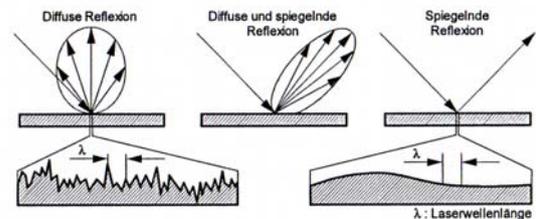


Abb. 4: Reflexion.
 (Quelle: OSTENDARP 1996, S. 29)

Der Absorptionsgrad ist der Anteil von absorbierter zum gesamten am Körper ankommender Strahlung. Bei der Absorption wird Strahlungsenergie in innere Energie verwandelt.

Andererseits ergibt sich, dass ein Schwarzer Körper die einfallende Strahlung absorbiert und ein Gleichgewicht anstrebt, indem er die gleiche Strahlungsmenge in Form von Schwarzkörper-Strahlung emittiert.

Andererseits ergibt sich daraus auch, dass ein Schwarzer Körper, der alle einfallende Strahlung absorbiert, nach dem Energieerhaltungsgesetz laufend die gleiche Strahlungsmenge emittiert. Diese nennt man die „Schwarzkörper-Strahlung“.

Der Transmissionsgrad ist der Anteil von durch den Körper hindurchgehender zum gesamten am Körper ankommender Strahlung. In der IR-Thermografie kann der Transmissionsgrad von Bedeutung sein, wenn Transmissionswärmeverluste durch Materialien optischer Linsen oder bei Messungen über größere Entfernungen in feuchter Luft erforderlich sind. Transmissionswärmeverluste können zur Verfälschung von Messergebnissen führen.

4.4 Strahlungsgesetze

Die Strahlungsgesetze bilden die Grundlage der Thermografie und deren Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Kamerasystemen. Eine ausführliche Erläuterung der in diesen Gesetzen aufgezeichneten Zusammenhänge würde den Rahmen dieser Arbeit, die thermografische Verfahren erläutern und ihre Anwendungsmöglichkeiten in Bauwesen, Denkmalpflege und Restaurierung untersuchen soll, überschreiten. Daher werden die wichtigsten Strahlungsgesetze nur kurz aufgezeigt:

- Das Planck'sche Strahlungsgesetz
- Das Wien'sche Verschiebungsgesetz
- Das Gesetz von Stefan-Boltzmann
- Das Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz

4.5 Spektren der elektromagnetischen Strahlung

Die Unterteilung des gesamten Wellenspektrums in Wellenlängenbereiche, sog. Spektralbänder, wird in der Literatur mehr oder weniger willkürlich vorgenommen. Das für die Thermografie relevante Infrarot umfasst Teile des nahen und mittleren Wellenbereichs, die Kurzwellenband [Short Wave (SW) : 2-5 μm] genannt werden, und Teile der ferneren Bereiche, die mit Langwellenband [Long Wave (LW) : 8-12 μm] bezeichnet werden.³⁹ Die Definition dieser Bereiche ergibt sich aus der Tatsache, dass hier die Atmosphäre eine hohe Transmission für infrarote Strahlung aufweist.

Bei der Messung von Wellenlängen werden verschiedene Maßeinheiten verwendet.⁴⁰ Gebräuchlich sind Angaben in Mikrometer (μm), Mikron (μ), Nanometer (nm) und Ångström (Å), wobei zwischen ihnen die folgenden Beziehungen gelten: $10000 \text{ Å} = 1000 \text{ nm} = 1 \mu = 1 \mu\text{m}$. Bei der Infrarot-Strahlung handelt es sich um elektromagnetische Strahlung im Spektralbereich von $0,8 \mu\text{m}$ bis 1 mm . Infrarotstrahlung ist energieärmer als sichtbares Licht. Er schließt sich an den vom menschlichen Auge als sichtbar wahrgenommenen visuellen Bereich (VIS) in Richtung größerer Wellenlängen direkt an.⁴¹ Im Allgemeinen wird die Infrarotstrahlung (IR) in vier Bereiche unterteilt:

nahes Infrarot ⁴²	(NIR)	0,78 μm bis 1,4 μm
davon fotografisches Infrarot ⁴³	(PIR)	0,70 μm bis 1,3 μm
mittleres Infrarot ⁴⁴	(MIR)	1,40 μm bis 3,0 μm
fernes Infrarot ⁴⁵	(FIR)	3.00 μm bis 1,0 mm

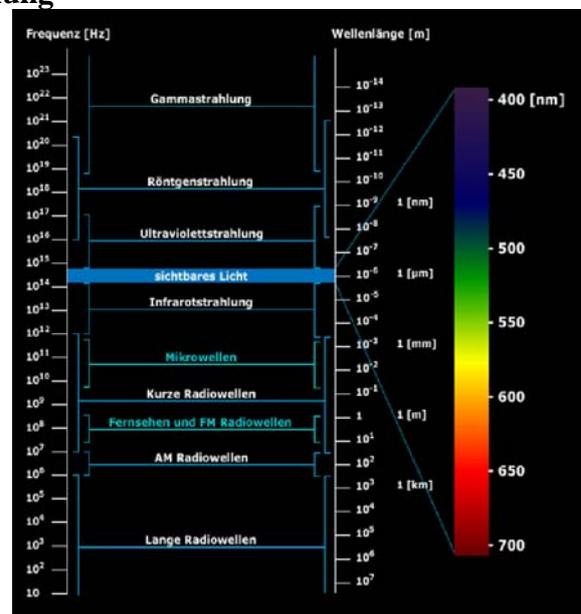


Abb. 5 Elektromagnetisches Spektrum.
 (Quelle: URL : http://www.greier-greiner.at/hc/licht_theo.htm)

³⁹ SCHÖNBACH 2002, S. 1.

⁴⁰ WEBER 1982, S. 77.

⁴¹ URL : http://surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/IR/imag_ir_intro.htm

⁴² DIN 5031, Teil 7 : Januar 1984, S. 1.

⁴³ GEBHARDT 1981, S. 8.

⁴⁴ DIN 5031, Teil 7 : Januar 1984, S. 1.

⁴⁵ DIN 5031, Teil 7 : Januar 1984, S. 1.

4.6 Emissionsgrad

Um berührungslos genaue Temperaturen mittels Strahlungsmessgeräten bestimmen zu können, ist die Kenntnis des Strahlungsanteils, der von einem Körper wieder abgestrahlt (emittiert) wird, erforderlich.

Während bei der Bauthermografie meist eine Auswertung von Unterschieden der Oberflächentemperaturen genügt um Ausführungsmängel sichtbar zu machen, ist zum Ermitteln von exakten Oberflächentemperaturen die Kenntnis des genauen Emissionsgrades der zu untersuchenden Oberfläche erforderlich, was gleichzeitig das Hauptproblem solcher Messungen darstellt.

Der Emissionsgrad ist definiert als die Strahlungsintensität eines Objektes bei einer bestimmten Temperatur und Wellenlänge im Verhältnis zur Intensität eines Schwarzen Strahlers gleicher Temperatur und Wellenlänge. Er beschreibt also die Abweichung der abgestrahlten Leistung eines realen Objektes von der eines Schwarzen Strahlers als Funktion von Temperatur und Wellenlänge.

Da ein Schwarzer Strahler bekanntlich die gesamte auf ihn treffende elektromagnetische Strahlung in allen Wellenlängenbereichen vollständig absorbiert und seine Ausstrahlung sich exakt mit dem Planck'schen Strahlungsgesetz beschreiben lässt, wird ihm ein Emissionsgrad $\varepsilon = 1$ zugeordnet. Die Tatsache, dass alle anderen realen Objekte weniger Strahlung abgeben, definiert deren Emissionsgrad als kleiner 1.

Ist dieser unabhängig von der Wellenlänge immer konstant, so spricht man von einem „Grauen Strahler“. Zu diesen zählen dunkle Nichtmetalle und dunkle Farben. Ist der Emissionsgrad abhängig von der Wellenlänge, wie bei Metallen, Kunststoffen oder Glas, so handelt es sich um „Selektive Strahler“. Die Emissionsgrade von Schwarzem und Grauen Strahler sind über die Wellenlänge konstant, ihr Kurvenverlauf ist ähnlich. Sie unterscheiden sich nur dadurch, dass der Schwarze Strahler das Maximum von $\varepsilon = 1$ aufweist, während das des Grauen Strahlers immer kleiner sein muss. Dagegen verläuft der Emissionsgrad der Selektiven Strahler selbst schon kurvenhaft.⁴⁶

Tabellen listen die Emissionsgrade verschiedener Materialien auf. Man spricht von einem

Emission

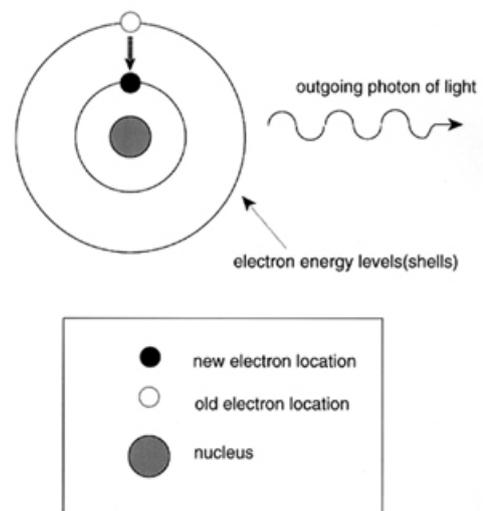
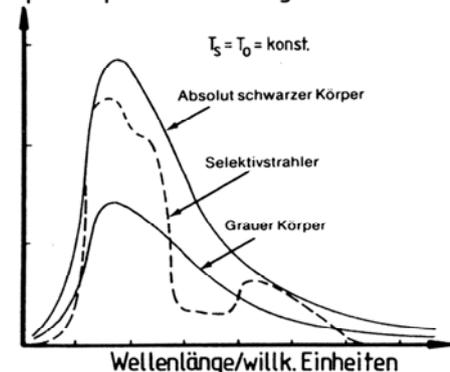


Abb. 6: Emission
 (Quelle: URL : <http://www.physics.purdue.edu/astr2631/inlabs/spectra.html>)

Spektr. spez. Ausstrahlung/willk. Einheiten



Emissionsfaktor

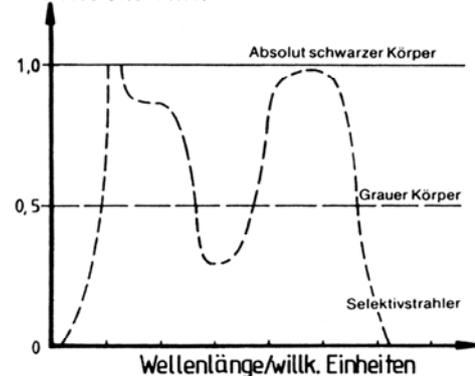


Abb. 7: Schwarzer, grauer und selektiver Strahler.
 (Quelle: WEBER 1982, S. 82)

⁴⁶ BROCKEIS 2001, S. 52-55.

Gesamtemissionsgrad, wenn über alle Wellenlängen gemittelt wurde und von einem spektralen Emissionsgrad in Abhängigkeit von einer bestimmten Wellenlänge. Die Tabellenwerte sind nur als Anhaltspunkte zu verstehen und können stark variieren je nach Zustand der Oberfläche. Nur bei wenigen Materialien, wie polierten Metallen, lässt sich der Emissionsgrad berechnen.

Weil Zustandsänderungen der Oberfläche einen großen Einfluss auf die Emission haben, müssen sie bei den Angaben zum Emissionsgrad berücksichtigt werden. Er ist, obwohl materialabhängig, keine reine Materialkonstante sondern zusätzlich abhängig von Wellenlänge, Temperatur, Beobachtungswinkel und Raumwinkel⁴⁷ sowie der Beschaffenheit der Oberfläche. Es ist typisch für die Emissionskoeffizienten, dass sie mit zunehmender Temperatur kleiner werden.⁴⁸

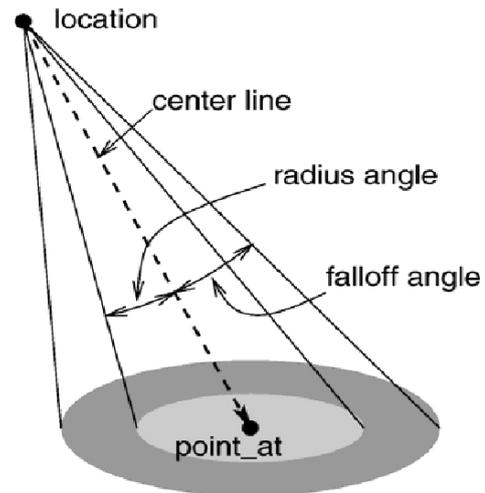


Abb. 8: Beobachtungswinkel.
(Quelle: URL : <http://www.povray.org/documentation/view/154/>)

4.7 Abhängig der Emission von der Wellenlänge

Wenn IR-Strahlung auch den gleichen physikalischen Gesetzen unterliegt wie sichtbares Licht, so können sich Reflexion, Emission und Transmission des gleichen Objektes in verschiedenen Wellenlängenbereichen doch erheblich unterscheiden.⁴⁹

Die meisten Objekte weisen eine mehr oder weniger starke Änderung des Emissionsgrades in Abhängigkeit von der Wellenlänge auf. Dunkle Nichtmetalle haben bereits im sichtbaren Spektrum hohe Emissionsgrade von 0,8-0,95. (Als Faustregel für klassische Baumaterialien gilt $\epsilon = 0,90 \pm 0,05$.) Diese nehmen auch mit zunehmender Wellenlänge nicht mehr ab. Helle Nichtmetalle (helles Holz, weißes Papier, Gips) haben im Spektralbereich $< 4 \mu\text{m}$ niedrige Emissionsgrade zwischen 0,2-0,5, die mit Wellenlängen $> 4 \mu\text{m}$ auf 0,8-0,9 ansteigen. Das heißt, dass sich in größeren Wellenlängenbereichen das Emissionsverhalten dunkler und heller Nichtmetalle angleicht, und zwar unabhängig von ihrer Oberflächenbeschaffenheit, und bei Wellenlängen über $10 \mu\text{m}$ dem von schwarzer Farbe entsprechen ($\epsilon = 0,95-1,0$).⁵⁰ Zum Beispiel strahlt ein weißer Heizkörper mit einer Temperatur von $40-70^\circ\text{C}$ genauso gut wie ein schwarzer, was auf der Tatsache beruht, dass seine Temperaturstrahlung hauptsächlich im langwelligen Bereich $> 8 \mu\text{m}$ liegt.

⁴⁷ „Um die Winkelabhängigkeit der Emission zu berücksichtigen sollten Körper unter den Emissionswinkeln 0° und 45° gemessen werden, da bei einer Vergrößerung des Emissionswinkels sich die Strahlungsintensität der Reflexion aufgrund des Lambert'schen Cosinusetzes verkleinert. Der Emissionskoeffizient wird größer. [...] Die Änderung der Strahlungsintensität wird im Lambert'schen Kosinusetz beschrieben: $[L_{\alpha_c} = L_n \cos(\alpha_c)]$ Die Strahlungsintensität L_n in Richtung der Flächennormalen und die Strahlungsintensität L_{α_c} in Beobachtungsrichtung sind über den so genannten Emissionswinkel α_c zugeordnet. Bei infrarothermografischen Messungen kann die Winkelabhängigkeit dann vernachlässigt werden, solange die Abweichung des Winkels im Bereich ($0^\circ < \alpha_c < 45^\circ$) liegt. Bis zu dem Grenzwert $\alpha_c = 45^\circ$ gilt das Lambert'sche Gesetz als hinreichend erfüllt.“ (Quelle: THAMM : 1. Auflage, Bd. 5, Zwickau 1999, S. 58).

⁴⁸ THAMM 1999, S. 57.

⁴⁹ URL : http://www.itema.de/ir_grundlagen.html

⁵⁰ BROCKEIS 2001, S. 54.

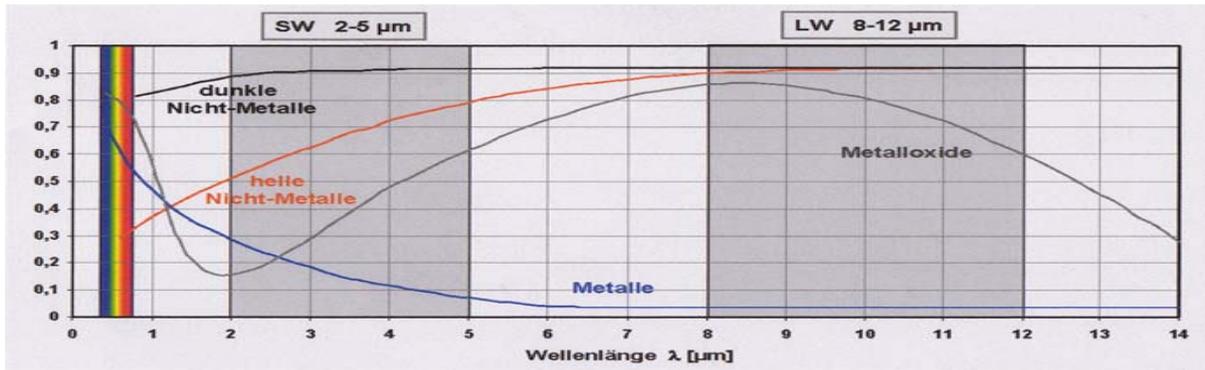


Abb. 9: Abhängigkeit des Emissionsgrades von der Wellenlänge.
 (Quelle: SCHÖNBACH 2002, S.4, pdf-Datei)

5 Kamerasysteme

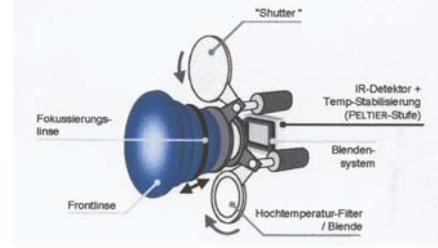
Anforderungen an ein photothermisches Messgerät:⁵¹

gefordertes Merkmal	Begründung der Forderung, Zielsetzungen von Seiten der Anwender	Potential photothermischer Messtechnik
berührungslos	- Integration in eine Produktionslinie - hohe laterale Auflösung; komplexe Geometrien - Zugänglichkeit zu besonders kritischen Stellen	- optische Messung mit photothermischer Detektion aus gewissem Abstand
zerstörungsfrei, Proben erhaltend	- erhöhte Prüfhäufigkeit - Revision beanspruchter oder schadhafter Teile - Proben sind nach Prüfung noch für andere Messungen (z. B. Geometrie) verfügbar	- photothermische Prüfung, resultiert aus dem berührungslosen Charakter sowie den geringen erzeugten Temperaturerhöhungen
rückwirkungsfrei	- unverfälschte Messung der thermischen Eigenschaften der Randzone	- photothermische Prüfung (Temperaturerhöhung des Bauteils um wenige K) s. o.
schnell	- erhöhte Prüfhäufigkeit bis hin zur 100 % Prüfung	- Frequenzscans in wenigen Sekunden - unmittelbare objektive Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse: Gut/Schlecht-Klassifizierung
vorbereitungsarm	- minimale Probenpräparation: ggf. nur Zunderschicht entfernen; Kostenreduktion	- photothermische Prüfung ermöglicht Tiefenauf­lösung durch Frequenzvariation.
automatisch	- Eliminierung subjektiver Beurteilung durch den Bediener; bessere Wiederholbarkeit	- Rechnersteuerung - objektive Auswertekriterien
Tiefenauf­lösung	- Bestimmung des Verlaufs der thermischen Parameter in der Tiefe	- Durchstimmung der Modulationsfrequenz des Anregungslasers: Modelle und Algorithmen zur Rekonstruktion des Verlaufs der thermischen Parameter
robust	- Einsatz in rauer industrieller Umgebung	- Tests mit transportablem Pyrotyp aus kompakten, mechanisch und thermisch stabilen Komponenten
verbesserte Prozesssteuerung	- erhöhte Qualitätsforderungen - geringe Losgröße - häufige Chargen- und Bedienerwechsel	- erhöhte Prüfhäufigkeit; verbesserte Wiederholbarkeit
mindestens gleich bleibende Messunsicherheit	- Messunsicherheit zerstörender Prüfmetho­den ohnehin vergleichsweise Groß	- bessere Wiederholbarkeit, daher voraussichtlich gleich bleibende Messunsicherheit - Statistik

⁵¹ SCHMITZ; GEERKENS; SEIDEL; GOCH 1998, S. 182.

5.1 Systemkomponenten von Infrarot-Radiometern

Mit Radiometern bezeichnet man allgemein alle Strahlungsmessgeräte. Die Geräte, die im Infrarotbereich arbeiten werden als Infrarot-Radiometer bezeichnet. Eine Infrarotkamera setzt sich vereinfacht aus folgenden Elementen zusammen:



Objektiv⁵², Shutter⁵³, Spektrale Filter⁵⁴, Detektor⁵⁵, Software⁵⁶

Abb. 10: Interner Geräteaufbau.
(Quelle: SCHÖNBACH 2002, S. 4, pdf-Datei)

⁵² **Objektiv:** Zu den Objektiven von IR-Kameras zählt man nach SCHMITZ et. al. (1998, S. 182) alle Komponenten die zur Übertragung der Objektstrahlung zum Detektor beitragen. Dazu gehören die Optik, der Shutter, Blenden, Filter und das Detektoreintrittsfenster. Die Optik besteht aus mehreren Linsen und ist von hoher Bedeutung für Infrarotkameras. Nach KARSTÄDT ET AL. (1998, S. 134) werden für Systeme im atmosphärischen Fenster von 3-5 μm werden Linsen aus Silizium und im Bereich von 8-14 μm solche aus Germanium eingesetzt. Für die meisten Kamerasysteme stehen mehrere Objektive zur Verfügung. Abhängig von der Entfernung zum Messobjekt und der erforderlichen geometrischen Auflösung des Messflecks werden Weitwinkel-, Normal- oder Teleobjektive eingesetzt. Je größer der Öffnungswinkel des Objektivs ist, bzw. je weiter das Messobjekt entfernt ist, desto größer wird der Messfleck. Nach KOEPERNIK (1997, S. 15) muss die Optik vier Hauptaufgaben erfüllen: *A) Scharfe Abbildung einer Wärmebildszene auf ein Detektorarray mit der Möglichkeit einer Nachfokussierung. B) Entfernungsunabhängige und streulichfreie Energieübertragung, weil Streulichtverluste zu fehlerhaften Detektorsignalen führen können. C) Eine große Schärfentiefe (große Blendenzahlen der Optik) ist. D) Unterstützung einer maximalen Energieübertragung. Diese Forderung steht im Gegensatz zur vorherigen, weil ungekühlte Systeme nur bei einer Optik mit kleiner Blendenzahl ein Maximum an Energie übertragen können.*

⁵³ **Shutter:** Nach SCHMITZ ET. AL. (1998, S. 182) dient dieser (Modulator) zur zeitlichen Unterteilung der einfallenden Strahlung. Zur Modulation gibt es verschiedene Ausführungen: Flügelrad, Spiralscheibe und Schwingenspiegel. Für IR-Wärmebildkameras, die mit wechsellichtempfindlichen Detektoren ausgestattet sind, ist der Shutter ein wesentlicher Bestandteil des Systems. Er hat zwei Hauptaufgaben: *A) Strahlungsmodulation:* Bei pyroelektrischen Detektoren, die gleichlichtunempfindlich sind, wird durch eine zeitliche Modulation der auftreffenden Strahlung eine reproduzierbare Betrachtung einer statischen Wärmeszene überhaupt erst ermöglicht. *B) Konstante Referenzstrahlung:* Durch die unterschiedlichen Detektorsignale bei Shutter-auf und Shutter-zu Stellung, dient die Eigentemperatur des normalerweise schwarz eingefärbten Shutters ($\epsilon = 1$) als Bezugsstrahlung bei quantitativ messenden Systemen.

⁵⁴ **Spektrale Filter:** Nach SCHMITZ ET. AL. (1998, S. 182) folgt Infrarotstrahlung den gleichen physikalischen Gesetzen wie Licht, jedoch können sich Reflexionen, Emissionen und Transmissionswerte bei dem gleichen Messobjekt in verschiedenen Wellenlängenbereichen stark unterscheiden. Reflexionen sind kaum von der Farbe abhängig, aber stark von der Materialbeschaffenheit der Oberfläche (glatt oder rau). Geeignete Filter werden zur selektiven Transmission, selektiven Absorption oder zur Begrenzung des Wellenlängenbereichs genutzt. Es sind verschiedene Filterarten verfügbar (z. B. Glas-, Hochtemperatur-, Kohlendioxidfilter). Hochtemperaturfilter ermöglichen im Kurzwellenbereich eine Messung durch Flammen hindurch und Kohlendioxidfilter erlauben die Bestimmung von Flammentemperaturen (Emission der CO₂-Anteile). Glasfilter erfassen ihre Infrarot-Strahlung in enger spektraler Bandbreite in der keine Transmissionen und Reflexionen auftreten. Daher werden solche Filter für thermografische Messungen eingesetzt.

⁵⁵ **Detektoren:** Nach SCHMITZ et. al. (1998, S. 182) besteht ihre Aufgabe in der Umwandlung einfallender Infrarotstrahlung in ein elektrisches Signal. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Detektoren: Thermische Detektoren und Quantendetektoren. *A) Thermische Detektoren:* Diese absorbieren die einfallende Strahlung und ändern daraufhin ihre Temperatur. Die daraus folgende Änderung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften (Widerstand, Thermospannung, Polarisation) wird als Messsignal weitergeleitet. Zu den thermischen Detektoren gehören die Bolometer, die auf Änderung des Materialwiderstandes, bzw. der Thermospannung reagieren und die Pyroelektrischen Sensoren, die Änderungen der elektrischen Polarisation aufzeichnen. *B) Quantendetektoren:* Diese arbeiten auf der Grundlage des Plank'schen Strahlungsgesetzes, sie sind Halbleiterdetektoren, die Lichtquanten (IR-Photonen) absorbieren und damit ihre Elektronen auf höhere Energieniveaus heben. Dadurch werden im Detektormaterial Elektron-Lochpaare erzeugt, die eine Photospannung, einen Photostrom oder eine Widerstandsänderung hervorrufen, die als Signal weitergeleitet werden. Das Signal-Rausch-Verhältnis des photothermischen Signals erhöht sich, wenn ein Detektor mit einer größeren aktiven Fläche verwendet wird, da dann mehr Wärmestrahlung von der Probe empfangen werden kann. Zugleich verschlechtert sich aber die laterale Auflösung. Daraus ergibt sich für jeden Detektor ein Optimum zwischen der lateralen Auflösung und dem Signal-Rausch-Verhältnis. Die günstigsten Eigenschaften beim Einsatz eines Quantendetektors werden erst bei tiefen Temperaturen erreicht. Bei LWB-Detektoren, die im fernen Infrarot-Bereich arbeiten und deren Energielücke (Bandabstand) sehr gering ist, kann die thermische Energie der Umgebungstemperatur ausreichen um das Leitungsband mit angeregten Elektronen zu füllen. In diesem Temperaturbereich sind die Halbleitereigenschaften nicht mehr gegeben und eine Messung wird damit unmöglich gemacht. Ein schneller Bildaufbau mit großer Bildpunktzahl erfordert nach VDI/VDE 3511 (1995, S. 27), dass Detektor und Verstärker eines [passiven] Thermografiegeräts auf größtmögliche Signalbandbreite (typ. 0,1 ... 4 MHz) ausgelegt sind. Eine Beschneidung der Bandbreite zur Reduzierung des Detektor- und Verstärker rauschens ist nicht möglich. Deshalb müssen Quantendetektoren gekühlt [was gleichzeitig die Ansprechzeit verkürzt] und Vorverstärker rauscharm angepasst werden. Die Detektoren müssen während des Betriebs auf eine definierte Arbeitstemperatur festgelegt werden, da fast alle ihre Parameter, besonders das Rauschen, temperaturabhängig sind. Die Arbeitstemperatur muss umso tiefer sein, je langwelliger der Detektor ist (-70°C bis -100°C bei SWB-Detektoren und -170°C bis -200°C bei LWB-Detektoren). Nach MEINLSCHMIDT (2001, S. 1552), GLÜCKERT (1992, S. 34-35), BREUCKMANN (1993, S. 34), MEYENDORF ET. AL. (1998, S. 1500-1502) und MAIER ET. AL. (1999, S. 92) haben sich drei Kühlverfahren in der Praxis bewährt. *A) Kühlung durch direkten Kontakt (Einsatz im SW- und LW-Bereich):* Der in ein wärmeisoliertes Dewargefäß eingebaute Detektor wird durch Kontakt mit flüssigem Stickstoff (LN₂) auf -196°C gekühlt. *B) Thermoelektrische Kühlung (Einsatz im SW-Bereich):* Hierbei wird der so genannte Peltier-Effekt genutzt, wobei durch die Verbindungsstelle zweier verschiedener Materialien (verschiedener Metalle oder Halbleiter) Gleichstrom fließt, der eine Seite des Elementes erwärmt und die andere abkühlt. Die Kühltemperatur lässt sich variieren (es werden $\Delta T = 80-100$ K erreicht) durch Parallel- oder Reihenanordnung mehrerer Peltier-Elemente. Damit kann ein kurzwelliger CdHgTe Detektor (im englischen Sprachraum als MCT-Sprite-Detektor bezeichnet) bei Zimmertemperatur auf den notwendigen -80°C gehalten werden. *C) Kühlung durch Kältemaschinen (Einsatz im SW- und LW-Bereich):* Bei dem so genannten Stirling-Kühler handelt es sich um eine Kältemaschine die mit Hilfe eines thermodynamischen Kreisprozesses ein Arbeitsgas (z. B. Helium) immer weiter abkühlt, bis die mit dem verwendeten Arbeitsgas erreichbare Endtemperatur erreicht wird, die für LWB-Detektoren im Bereich zwischen -160°C bis -200°C liegt. Bei der Weiterentwicklung der kleinen Kältemaschinen sind deutliche Fortschritte erzielt worden, sowohl was Kälteleistung als auch Lebensdauer betrifft. Mit zunehmender Nachfrage sinken auch die Herstellungskosten. Die Zusammenstellung der Komponenten erfolgt kundenspezifisch je nach Array-Größe (Datenfeldgröße) und Einsatzzweck. Die durchschnittliche Lebensdauer beträgt 6000 Stunden und der Ersatz ist daher mit erheblichen Kosten verbunden. Eine preisgünstigere

5.2 Funktionsweise

Eine scannende Kameraeinheit misst die IR-Strahlung eines Messobjektes über eine Optik in horizontaler und vertikaler Richtung. Ein Germaniumfenster eliminiert aufgrund seines Transmissionsverhaltens weit gehend die Einflüsse von sichtbarem Licht, Wasserdampf, Gasen usw. Die IR-Strahlung gelangt über horizontal und vertikal abtastende Spiegel, über eine Fokussierlinse und einen optischen Shutter und eine weitere Linse auf den infrarotempfindlichen Detektor. Die elektronisch gesteuerte Fokussierlinse ermöglicht eine „Autofokus-Funktion“. Der Shutter lässt bei geöffnetem Zustand die Strahlung durch, während bei geschlossenem Zustand die Shutter- bzw. Kameratemperatur als Referenz gemessen wird, um entsprechend kompensieren zu können.

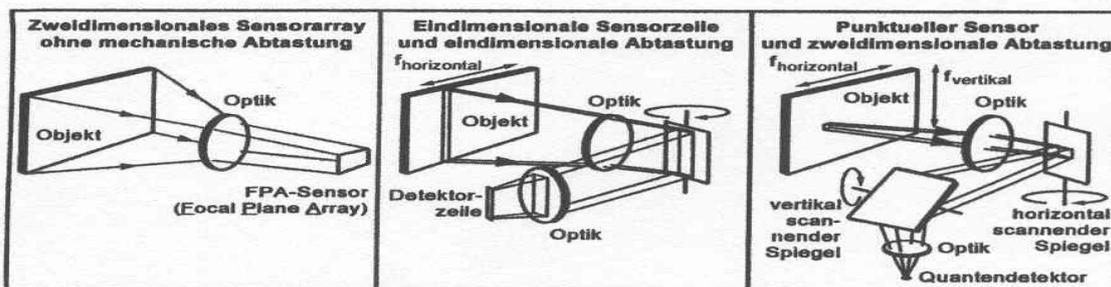


Abb. 11: IR-Kamera – Konzepte.
 (Quelle: OSTENDARP 1996, S. 24)

Handelt es sich um einen Quantendetektor mit entsprechender Bandbreite (Empfindlichkeitsbereich), so wird dieser mit einem entsprechenden Element gekühlt.

Vom Detektor wird die Strahlung in ein elektronisches Signal umgewandelt, dass über einen Verstärker aufbereitet und danach digitalisiert und weiterverarbeitet wird. Für die gesamte Aufarbeitung ist ein schneller Prozessor notwendig, der am Ende ein Video-Vollbild auf einem hoch auflösenden Monitor darstellen kann.

Eine nicht scannende Kameraeinheit kann ohne abtastende Spiegel arbeiten, weil ihr Detektor in Form einer Matrix funktioniert. Die Systeme sollten fähig sein, Gleichtaktstörungen zu unterdrücken, Verstärkungseinstellungen zuzulassen und Änderungen von Umgebungstemperatur, Einflüsse von Reflexionen und den Emissionsfaktor zu korrigieren.

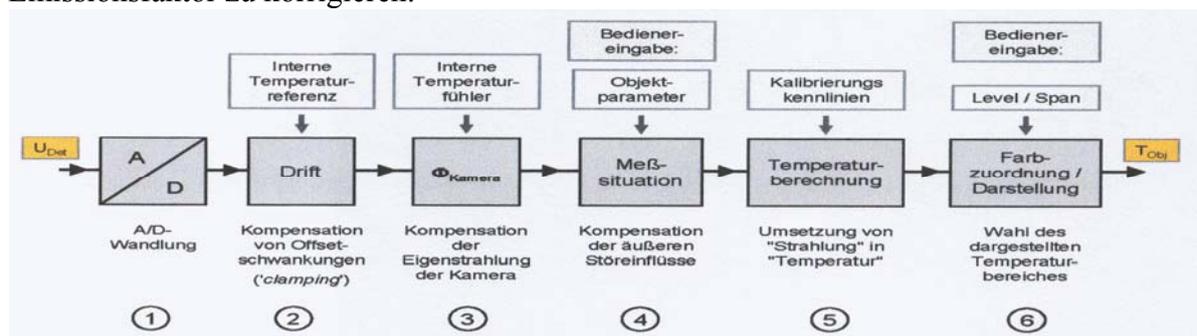


Abb. 12: IR-Signalverarbeitung – Übersicht.
 (Quelle: SCHÖNBACH 2002, S. 1, pdf-Datei)

Alternative sind ungekühlte Kameras, die bei vergleichbaren Sensorgrößen und Pixelzahlen aber nur Temperaturempfindlichkeiten von 0,05-0,1 K erreichen. Es bleibt also in jedem Fall vor einem Kamerakauf das PreisLeistungsverhältnis in Abhängigkeit vom benötigten Zweck abzuwägen. Wartungsfreundlicher sind Bolometerkameras. Bei ihnen entfällt die Anwendung eines Kühlmediums (flüssiger Stickstoff) bzw. mechanischen Kühlsystems (Stirling Motor), weil bei diesen Detektoren eine Kühlung nicht erforderlich ist.

⁵⁶ **Software:** Nach SCHMITZ et. al. (1998, S. 182) sind alle Kamerasysteme an eine Datenverarbeitung gekoppelt. Um besonders bei Impuls- und Lock-In-Thermografie Bilder in Echtzeit zu erfassen, sowie zur Bilddatenanalyse und zur Präsentation des Ergebnisses wird eine Software zur Steuerung des komplexen Systems benötigt, die Bildfolgen bearbeiten kann. Sie muss fähig sein instationäre Wärmeleitungsprozesse zeitlich zu analysieren und Infrarotbilddaten dem jeweiligen Prüfproblem angepasst aufzubereiten. Vom FhG-IZFP wurde hierfür nach WALLE ET AL. (1999, S. 316) die spezielle Software „Visotherm“ entwickelt.

5.3 Systemparameter

Die Systemparameter charakterisieren die Leistungsfähigkeit des gesamten IR-Systems. Da die Kamera der wichtigste Bestandteil des Systems ist, geht es hauptsächlich um die Beurteilung der opto-elektronischen Eigenschaften von Scannern. Selbst eine gute Bildverarbeitungssoftware kann unvollständige oder fehlerhafte Messwerte nicht korrigieren. Es ist bei der engen Abhängigkeit von Hardware und Software schwierig die Unterschiede in den oft unklaren Herstellerangaben zu erkennen. Die wichtigsten Qualitätskriterien sind:

- Geometrische Auflösung
- Thermische Auflösung
- Genauigkeit, Stabilität, Reproduzierbarkeit

5.4 Grundarten der Infrarot-Radiometern

Es ist zweckmäßig die Thermografiegeräte nach ihrer Art der Bilderzeugung und den Anwendungsgebieten zu unterteilen. Abhängig von ihrer Anwendungsart werden sehr unterschiedliche Anforderungen an ihre technische Ausstattung gestellt. Man unterteilt Infrarotradiometer in:

- Punktmessende Systeme⁵⁷ (Pyrometer oder Strahlungsthermometer)
- Zeilenkameras⁵⁸ (IR-Linescanner)
- Bildgebende Systeme⁵⁹ (Infrarot-Kamera)

⁵⁷ **Punktmessende Systeme:** Eine Einteilung von Pyrometern erfolgt nach ihrer spektralen Empfindlichkeit und nach den typischen Anwendungsgebieten. Für Laboranwendungen benutzte Pyrometer bestehen meist aus einer Messsonde, die über ein Kabel an ein Auswertungsgerät angeschlossen ist. Dieses beinhaltet einen Verstärker mit verschiedenen Einstellfunktionen und einer Temperaturanzeige. Um Messentfernung und Messfleck optimal aufeinander abzustimmen kann die Sonde mit unterschiedlichen Objektiven ausgestattet werden. Durch verschiedene Filter kann die Bandbreite des Spektrums in weiten Grenzen verändert werden. Die punktmessenden Systeme sind unterteilt in: Gesamtstrahlungs-pyrometer, Bandstrahlungs-pyrometer und Spektralpyrometer. Verhältnis.

⁵⁸ **Zeilenkamera:** Bei diesen Thermografiegeräten erzeugt ein Strahlungsempfänger, der linear über dem Messobjekt hin und her geführt wird, ein Wärmebild. Dieses schon seit langem bekannte Verfahren hat durch die Benutzung von PCs und schnellen Abtastverfahren sehr an Bedeutung gewonnen. Es ist besonders für den Einsatz in der Industrie geeignet, da hierbei eine lineare Abfolge von Punkten größerer Objekte mit hoher geometrischer Auflösung gezielt untersucht werden kann. Eine eindimensionale Zeilenkamera, auch Linescanner genannt, ist im Strahlengang mit einer eindimensionalen Ablenkvorrichtung (z. B. Drehspiegel) ausgestattet, so dass Strahlung jeweils längs einer Linie empfangen und dargestellt werden kann. Ein Bild kommt zustande, wenn sich das Prüfobjekt unter einem ortsfesten Linescanner senkrecht zur gescannten Linie fortbewegt. Ein Linescanner kann auch selbst linear fortbewegt werden, z. B. über einen Parkettboden. Sie sind für Überwachungsfunktionen in Kombination mit bildlicher Darstellung einsetzbar. Fast alle in der Industrie zur Überwachung eingesetzten bildgebenden Infrarotsysteme bestehen aus Linescannern mit Peltier gekühlten Detektoren.

⁵⁹ **Infrarotkamera:** Es gibt zwei Arten von Infrarotkameras, Scannerkameras und Moderne IR-Array Kameras. Die ersten Scannerkameras arbeiteten mit einem einzelnen Pixelelement (Detektor), welches nacheinander die gesamte Oberfläche einer Probe abtastete, was natürlicherweise lange dauerte. Eine Verbesserung der Schnelligkeit war durch Mehrelementdetektoren in Form einer Detektorzeile möglich. Nach BREUCKMANN (1993, S. 30) wird bei diesem Verfahren wird eine Fläche mechanisch in einer Richtung abgerastert (Parallelskan), die Information über eine gesamte Zeile liegt zeitgleich vor. Dabei erzielt man Bildraten von maximal 25 Hz. Weiterhin gibt es noch Kameras mit einer Kombination aus Parallel- und Seriellabtastung, wobei mehrere (n) übereinander angeordnete Detektoren eine Gruppe von (n) Zeilen parallel scannen und anschließend um (n) Zeilen weiter springen. Zweidimensionale Scannerkameras sind mit zwei Ablenkvorrichtungen im Strahlengang ausgestattet (Schwingspiegel, rotierende Prismen, oder eine Kombination aus beiden). Die Ablenkelemente werden durch einen Positionsgeber entsprechend den x- und y-Koordinaten des erfassten Objekts elektronisch gesteuert, so dass sie in der Abfolge des Aufnahmevorganges über eine Fläche empfangen und abbilden können. Die Helligkeit des Bildpunktes wird in der Art einer z-Koordinate durch das Signal der momentan erfassten Strahlung gesteuert. Erst seit Einführung der digitalen Bildverarbeitung ist das schnelle Abtasten einer Probestfläche unter vertretbarem Zeitaufwand möglich. Seitdem hat die Anwendung solcher Geräte größere Verbreitung gefunden. Diese Systeme sind in einzelne Komponenten aufgeteilt, die über Kabel miteinander verbunden sind: Scanner, Monitor, Netzgerät und Batterie. Moderne Infrarot-Kameras verfügen über ein Feld von Detektorelementen (Detektormatrix). Jeder Pixel wird wie bei einem „Schnappschuss“ von einem separaten Detektor aufgenommen. Nach MANGOLD (2000, S. 33) sind durch diese Technik sind Bildraten von bis zu 2 kHz möglich. Diese Kameras arbeiten schneller, weil kein linienförmiges Abtasten mehr notwendig ist. Die gesamte Bildinformation steht zur gleichen Zeit zur Verfügung und wird analog elektronisch ausgelesen. Wegen der Anordnung ihrer Sensoren in der Bildebene des IR-Systems nennt man diese Kameras Focal-Plane-Array-Kameras. Sie sind robuster, weil sie keine Mechanik für das Abtasten (Schwingspiegel, rotierende Prismen, usw.) mehr benötigen. Nach SCHÖNBACH (2002, S. 1-3) werden allgemein die FPA-Kameras in zwei Gruppen unterteilt, in Thermische Detektoren und Quantendetektoren. Thermische Detektoren (Bolometer und Pyroelektrische Sensoren) absorbieren die einfallende Wärmestrahlung, ändern ihr Temperatur und messen danach die Änderung temperaturabhängiger Materialeigenschaften (z. B. Widerstand, Polarisierung etc.). Quanten- oder Photodetektoren sind Halbleiterdetektoren bei denen absorbierte Lichtquanten (IR-Photonen) über den photoelektrischen Effekt in Ladungsträger (höheres Energieniveau) umgewandelt werden. Der Vorteil von FPA-Kameras liegt in der Aufnahmemöglichkeit schneller Bildfolgen, weil das Scannen des Bildes entfällt. Bei der Übertragung der Bilder zum PC können hohe Geschwindigkeiten

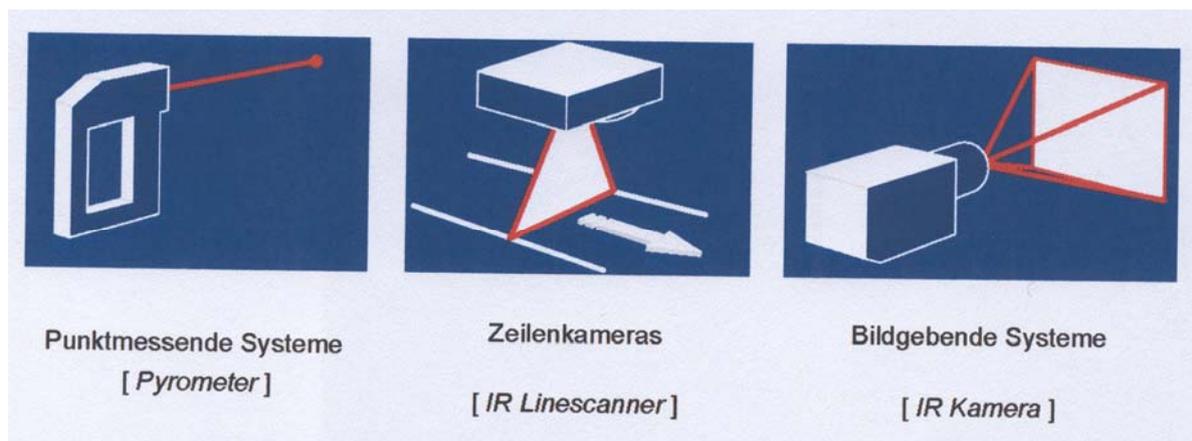


Abb. 13: IR-Radiometer – Grundformen.
(Quelle: SCHÖNBACH 2002, S. 1, pdf-Datei)

6 Impuls-Thermografie

Die Impulsthermografie ist eine relativ einfache Prüfmethode, die schnell und effektiv zu Ergebnissen⁶⁰ führt ohne genauere Kenntnisse über das Vorhandensein und die Art von Fehlern eines Prüfobjektes zu besitzen. Es handelt sich hierbei um ein photothermisches Messverfahren⁶¹ bei dem eine Probe durch einen kurzen Energieimpuls in wenigen Millisekunden durch schnell reagierende Strahler oder bevorzugt durch Blitzlampen mit möglichst kurzer Pulsdauer und hoher Blitzleistung um einige Grad erwärmt wird (in der Regel weniger als 5°C)⁶² und danach wieder abkühlt. Unter Umständen lassen sich auch Impulslaser einsetzen.⁶³ Die Pulsdauer kann dabei auf die Wärmeleitfähigkeit der Probe abgestimmt werden. Höhere Wärmeleitfähigkeit ermöglicht kürzere Impulsdauer. Nachteile bestehen insofern, dass bei einem zu hohen Energieeintrag Proben beschädigt werden könnten. Außerdem führt eine Bestrahlung mit

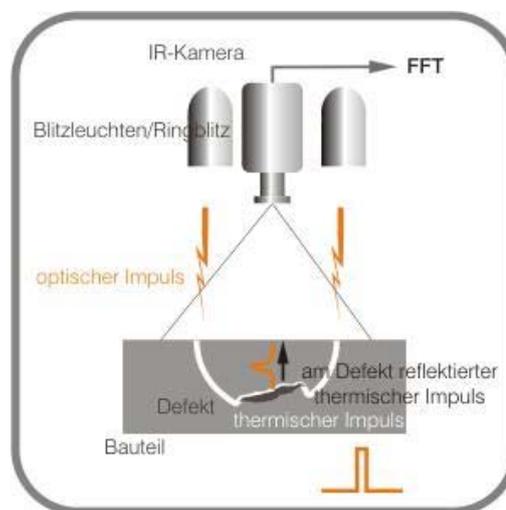


Abb. 14: Impulsthermografie.
(Quelle: URL : <http://www.edevis.de>)

erreicht werden. 50 bis 60 Echtzeitaufnahmen pro Sekunde sind möglich, während Einzeldetektorsysteme nur etwa ein Bild pro Sekunde aufnehmen. Nach RAICU (1999, S. 7) ist bei allen sonstigen Vorteilen der FPA-Kameras die Temperaturauflösung und Genauigkeit der Kalibrierung langwelliger Scannerkameras zurzeit noch besser als jene langwelliger FPA-Kameras. Ein Problem bei den FPA-Kameras besteht darin, dass bei großflächigen Detektormatrizen die Wärmebildaufnahmen Inhomogenitäten aufweisen und ein festes Bildmuster erzeugen können, welches dem Wärmebild überlagert ist. Dieses äußert sich in Moire-Effekten, die in der Szene nicht vorhanden sind und trifft nach KÜRBITZ (1999, S. 340) dann auf, „wenn die Ortsfrequenzen von Objekten in der Szene und die des Detektorrasterns in der Bildebene vergleichbar sind.“ Es sind Korrekturverfahren notwendig, die diese Inhomogenitäten speichern und das aufgenommene Wärmebild nachträglich in Echtzeit elektronisch korrigieren. Für die Korrektur solcher Inhomogenitäten gibt es nach SCHULZ und CALDWELL (1994, S. 46) verschiedene Verfahren, die es gestatten dennoch Wärmebilder mit hoher Temperaturauflösung darzustellen. Wenn eine gewisse Ungenauigkeit die auf räumlicher Inhomogenität der Detektormatrix beruht, überschritten wird, so muss das System im Sinne einer Anpassung der individuellen Kennlinien nachkalibriert werden.

⁶⁰ URL : <http://www.fraunhofer.de/german/press/pi/pi2000/pi08-2000-t.html>

⁶¹ „Seit etwas mehr als 10 Jahren diskutiert man das Potential photothermischer Messverfahren für die zerstörungsfreie Prüfung. Grundlage ist die Erwärmung eines Materials infolge Absorption von Strahlungsenergie, die damit gekoppelte Erzeugung thermischer Wellen und deren Fortpflanzung in einem möglicherweise thermisch inhomogenen Festkörper. [...] Nordal und Kanstad leisteten in der Nutzung der photothermischen Radiometrie (PTR) Pionierarbeit und sehr früh schon fand die PTR Anwendung, in der Detektion thermischer Wellen zur zerstörungsfreien Prüfung.“ (Quelle: SCHMITZ; GEERKENS; SEIDEL; GOCH 1998, S. 177-178).

⁶² MEINLSCHMIDT; BROSCHE 2001, S. 136.

⁶³ KARPEN; BOHNACKER; BUSSE 1993, S. 24.

einem breiten Frequenzspektrum zu einem großen Signalanteil ohne Information, der das Rauschen begünstigt und „eine quantitative Auswertung nur in wenigen Fällen möglich“⁶⁴ macht.

Da die Zeit zwischen Anregungsimpuls und maximalem Temperaturkontrast für dünne gut leitende Schichten besonders kurz ist, muss am Ende des Impulses die Aufnahme der Wärmebilder eben so schnell erfolgen, wie die Wärme eingebracht wurde, also mit Hochgeschwindigkeitsthermografiekameras, mit den sog. Focal Plane Array (FPA) Kameras.⁶⁵

„Mit einer Scan-Frequenz von bis zu 2000 Hertz können Wanddicken bis 4 mm gemessen werden. Voraussetzung für die Messung von Schichtdicken ist jedoch ein Unterschied der Wärmeleitfähigkeit beider Materialien.“⁶⁶

Mit Hilfe einer Infrarotkamera werden im räumlichen und zeitlichen Verlauf Temperaturveränderungen wie das Abklingen eines Signals bzw. das Fortschreiten einer Wärmewelle in einer Schicht in Bildfolgen aufgenommen und anschließend mit einer Software analysiert. Damit lässt sich eine dreidimensionale Rekonstruktion von Fehlern in oberflächennahen Bereich realisieren. Inhomogenes Material stört den Wärmestrom. Die Diffusion der eindringenden Wärme ist abhängig von den thermophysikalischen Eigenschaften des Prüfobjekts, die wiederum von der Porosität abhängen. Das heißt, dass die Ausbreitung der Wärme innerhalb des Prüfobjekts von den thermischen Materialeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Rohdichte) abhängig ist. Nur in einem thermisch homogenen Prüfkörper kann die Ausbreitung der Wärme gleichmäßig erfolgen.⁶⁷ Inhomogenes Material oder Materialfehler unter der Oberfläche (Schichtdickenunterschiede, Fehlstellen, Haftungsfehler, verändertes Schichtgefüge, Oxidation, metallische Einschlüsse, Porenester, Fraßgänge von Insektenlarven, Putz- und Farbunterschiede⁶⁸, Delamination⁶⁹, Bestimmung von Fehlertiefen⁷⁰, Honeycomb Strukturen⁷¹, Verbundwerkstoffen⁷², Klebeverbindungen⁷³, Schichtdicken⁷⁴, Bestimmung von Porositäten⁷⁵, Schweißverbindungen⁷⁶, Lackierung⁷⁷, Aushärtezustand und Korrosionsschutzwirkung usw.) bewirken deutliche Signaländerungen durch Störung des Wärme­flusses. Vor Inhomogenitäten mit einer geringeren Wärmeleitfähigkeit bildet sich ein Wärmestau. Die Störung macht sich nach einer bestimmten Zeit durch lokale Temperaturunterschiede auf der Oberfläche bemerkbar, da Inhomogenität⁷⁸ die Strahlung zum Teil reflektiert. Dadurch kommt es zu einem inhomogenen Wärmebild.

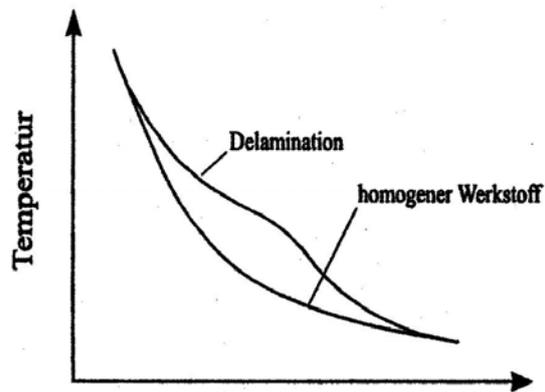


Abb. 15: Delamination im Werkstoff.
(Quelle: WU 1992, S.41)

⁶⁴ MANGOLD 2000, S. 104.

⁶⁵ URL : http://www.itema.de/ir_grundlagen.html

⁶⁶ URL : http://www.t-zfp.de/Downloads/5_Delamination.pdf

⁶⁷ MEINLSCHMIDT 2001, S. 1553.

⁶⁸ URL : <http://www.wki.fraunhofer.de/projekte/wki-1-6.html>

⁶⁹ URL : http://www.t-zfp.de/Downloads/5_Delamination.pdf

⁷⁰ URL : http://www.t-zfp.de/Downloads/6_Wanddicke.pdf

⁷¹ URL : http://www.t-zfp.de/Downloads/7_Honeycomb.pdf

⁷² URL : http://www.t-zfp.de/Downloads/8_Verbund.pdf

⁷³ URL : http://www.t-zfp.de/Downloads/9_Kleben.pdf

⁷⁴ URL : www.t-zfp.de/Downloads/10_Schichtdicke.pdf

⁷⁵ URL : www.t-zfp.de/Downloads/12_Porositat.pdf

⁷⁶ URL : www.t-zfp.de/Downloads/11_Schweisspunkt.pdf

⁷⁷ BURGMAYER 2000, S. 529.

⁷⁸ BRINKMANN 1998, S. 12.

„Aus dem Zusammenhang zwischen dem Temperaturkontrast und der Zeit kann man auf die Schichtdicke rückschließen.“⁷⁹

Oberflächennahe Fehler weisen natürlich die intensivsten Kontraste auf, sie klingen jedoch auch früher ab. Tiefer liegende Defekte zeigen erst später einen Kontrast und klingen auch langsamer wieder ab.⁸⁰

Unterschiedliche Arten der Erzeugung der Wärmequellen liefern verschiedene Ergebnisse. Zur Fehlercharakterisierung sind Tiefenlage, seitliche Ausdehnung, und Dicke des Defekts wichtig. Die seitliche Ausdehnung eines Defekts lässt sich bei hohen Frequenzen an ihrem frühzeitigen Temperaturverhalten bestimmen. Fehler können meist erkannt werden, wenn ihre seitliche Ausdehnung mindestens der Tiefenlage unter der Oberfläche entspricht.

„Als Grenzwert kann bei der Impuls-Thermografie – unabhängig vom Werkstoff – eine Fehlertiefenlage von ca. 5 mm angegeben werden.“⁸¹

Ablösungen zwischen Beschichtung und Untergrund (Delaminationen, Klebeschichten) sind als thermische Kontraste zu erkennen, da nach Günter WALLE⁸², wissenschaftlicher Mitarbeiter des IZFP, die Luft ein schlechter Wärmeleiter ist und sich daher das Material über eine Delamination stärker erwärmt als die Umgebung. Diese Art der Analyse wird auch als „Thermische Thomographie“⁸³ bezeichnet.

Dr. Steve SHEPARD von Thermal Wave Imaging meldete dank der innovativen Signalverarbeitung die Impulsthermographie als berührungsfreie Methode der zerstörungsfreien Prüfung zum Patent an.⁸⁴

„Die Impulsthermografie hat ihre Wurzeln in der Zerstörungsfreien Materialprüfung (ZfP). Dort wird sie in immer ausgefeilteren Anwendungsmethoden schon seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Und zwar überall dort, wo es sich um mehrschichtige Werkstoffe (CFK, GFK etc.) oder dünne Schichten auf einem Trägermaterial handelt, sowie um unterschiedliche Materialdicken festzustellen.“⁸⁵

Die Impuls-Thermografie-Prüftechnik wurde vom Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP entwickelt.⁸⁶ Das Verfahren ist überall einsetzbar, wo Unterschiede in Wärmeleitfähigkeit oder Wärmekapazität vorliegen und eignet sich zu punktueller und flächenhafter Schichtdickenmessung ohne werkstoffspezifische Einschränkungen.

„Die Entwicklung und Verfügbarkeit einer neuen Generation von Infrarotsensoren und ultraschneller Elektronik ermöglicht heutzutage die industrielle Verwendung der so genannten aktiven bzw. Puls-Thermographie.“⁸⁷

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes werden zurzeit an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung von der DGZfP in Kooperation mit der TU Berlin die möglichen Anwendungen der Impuls-Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Strukturuntersuchung von Bauteilen erforscht. Sie bietet hierzu gute Lösungsansätze, da sie berührungslos und zerstörungsfrei arbeitet, schnell und universell einsetzbar ist und zudem flächenhafte Messungen durch scannende Abtastung ermöglicht. Die Tiefenauflösung ist über die Modulationsfrequenz technisch einfach und kontrolliert einzustellen; Frequenzscans (Variation der Modulationsfrequenz des Anregungslasers) benötigen wenige Minuten und sind frei von subjektiven Bedieneinflüssen. Eine erhöhte Prüfhäufigkeit und verbesserte Wiederholbarkeit bei solchen photothermischen Messungen ermöglichen eine effektivere Prozesssteuerung gegenüber den zerstörenden Prüfverfahren.⁸⁸

⁷⁹ WU 1996, S. 21.

⁸⁰ WALLE; DOBMANN; MEYENDORF; NETZELMANN 1993, S. 323.

⁸¹ URL : <http://www.t-zfp.de/Thermografie/Licht/Funktion/funktion.html>

⁸² URL : <http://www.iqost.com/deu/produkte/schichtdicken.htm>

⁸³ URL : <http://www.ndt.net/article/dgzfp/dach58/wu/wu.htm#2>

⁸⁴ URL : www.lot-oriel.com/pdf/all/twi_pulsthermo.pdf

⁸⁵ URL : <http://www.ndt.net/article/dgzfp02/papers/v45/v45.htm>

⁸⁶ URL : <http://www.fraunhofer.de/german/press/pi/pi2000/pi08-2000-t.html>

⁸⁷ URL : <http://www.iqost.com/deu/produkte/schichtdicken.htm>

⁸⁸ SCHMITZ; GEERKENS; SEIDEL; GOCH 1998, S. 177.

Bei einer anderen Art der Impulsthermografie werden durch einen „photoakustischen Effekt“ Temperaturwellen indirekt über den Mechanismus des „Thermischen Kolbens“ nachgewiesen. Nach Wärmeübergang durch Wärmewellen in das umgebende Medium, meist Luft, werden dort Druckschwankungen, gleichzusetzen mit Schallwellen, erzeugt, die man mit einem Mikrofon aufzeichnen kann. Mikrofon und Messort befinden sich dabei meist in einer geschlossenen Kammer.

Allgemein lässt sich sagen, dass durch Wiederholprüfungen und eine Mittelwertbildung eine bessere Sicherheit gegen stark abweichende Zufallsergebnisse zu erwarten ist.⁸⁹ Neben der Impuls-Thermografie gibt es noch ein paar andere Verfahren.⁹⁰

⁸⁹ SCHMITZ; GEERKENS; SEIDEL; GOCH 1998, S. 182.

⁹⁰ **Online-Thermografie (Hochgeschwindigkeits-Impulsthermografie):** „Die Online-Thermografie ist eine besondere Form der Impuls-Thermografie, die von den WKI-Wissenschaftlern [Wilhelm-Klauditz-Institut] speziell für die Möbel- und Holzindustrie entwickelt wurde. [...] Es muss für diesen Industriezweig zum einen für große Objekte wie Holzplatten geeignet sein und sich gleichzeitig gut in den Produktionsablauf integrieren lassen.“ (Quelle: URL : www.wki.fhg.de) Nach MEINLSCHMIDT (2001, S. 1553) wird bei diesem Verfahren während des laufenden Herstellungsprozesses eine quer zur Förderrichtung über dem Band angebrachte Wärmequelle kontinuierlich das zu untersuchende Objekt bestrahlen. Eine danach installierte Kamera kann Beschichtungsfehler, also z. B. Verklebungen, Ablösungen, Blasenbildung und Korrosionserscheinungen direkt hinter der Presse erkennen. Gekrümmte Oberflächen lassen sich nicht so einfach untersuchen, weil bei Objekten mit starker Oberflächenkrümmung ein homogener Wärmeeintrag stark erschwert ist. Je nach Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des zu prüfenden Materials können Geschwindigkeiten von über 50 Metern pro Minute erreicht⁹⁰ und das Verfahren den jeweilig gewünschten Untersuchungsbedingungen angepasst werden. Die Online-Thermografie wird auch Hochgeschwindigkeits-Impulsthermografie genannt. Peter Meinschmidt und Günther Walle vom IZFP in Saarbrücken arbeiten mit diesem Verfahren. Ebenso gibt es eine Pilotanlage am Fraunhofer-Institut für Holzforschung, (WKI). Nach MEINLSCHMIDT und BROSCHE (2001, S. 134-140) lässt sich bei nicht mobilen Objekten, beispielsweise bei Wandvertäfelungen und Fußböden das Untersuchungsverfahren abwandeln, so dass auch „in-situ“ Haftungsschäden erkannt werden können.

Transiente-Thermografie: Nach BÜSCHER (1999, S. 5-43) wird bei diesem Verfahren wird die Oberfläche einer Probe impulsartig thermisch angeregt. Anschließend wird die zeitliche und örtliche Temperaturverteilung gemessen. Aus dem unterschiedlichen Abkühlverhalten kann auf Inhomogenitäten in Tiefenlagen oder auf oberflächennahe Feuchtigkeit geschlossen werden. Mit Hilfe dieses Verfahrens lässt sich bei Kenntnis von Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität und Dichte der Wärmeeindringkoeffizient abschätzen.

Puls-Phasen-Thermografie (PPT): „Im Unterschied zur Impuls-Thermografie wird bei der Puls-Phasen Thermografie das beobachtete Abkühlverhalten eines Testkörpers nach impulsartiger Anregung einer Frequenzanalyse unterzogen. Versuchsaufbau und Durchführung bleiben dabei gleich. Amplituden- und Phasenbild bieten eine selektive, frequenzabhängige Darstellung der inneren Probenstruktur. Zwischen beiden gibt es jedoch Unterschiede: Die Amplitudenbilder lösen die Darstellung bis zu einer maximalen Tiefe bei einer bestimmten Frequenz auf (Tiefpassfilter), während in den Phasenbildern in einer bestimmten Tiefe bei einer bestimmten Frequenz die beste Auflösung mit reduzierter Darstellbarkeit für mittlere Tiefen (Bandpassfilter) erreicht wird. Da die meiste Energie sich auf die niedrigen Frequenzen konzentriert, sind Amplitudenbilder weniger verrauscht, jedoch im Gegensatz zu den Phasenbildern empfindlich für ungleichförmige Erwärmungen an der Oberfläche oder für Oberflächenverunreinigungen (unterschiedliche Emissivitäten auf der Oberfläche). Dieser Effekt lässt sich erklären, wenn man die Oberflächeninhomogenitäten als Defekte in der Tiefe 0 betrachtet. Im Phasenbild (Bandpassfilter) wird dieser Effekt herausgefiltert. [...] Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens wird untersucht, welche sinnvollen Anwendungsmöglichkeiten und Ergebnisse die PPT im Bauwesen liefert.“ (Quelle: URL : http://www.bam.de/kompetenzen/arbeitsgebiete/abteilung_4/fachgruppe_44/fachgruppe_44j_i.htm)

Ultraschall-Lock-In-Thermografie (ULT): Die Ultraschall-Lock-In-Thermografie ist eine Messmethode die besonders auf beschädigte Bereiche anspricht. Im Gegensatz zur OLT, bei der externe Wärmequellen zum Einsatz kommen, werden Proben bei der ULT durch Ultraschall angeregt. Da ein Defekt veränderte mechanische Eigenschaften aufweist, wird diese Tatsache zur modulierten Wärmeerzeugung genutzt. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die thermischen Wellen nur am Riss erzeugt werden weil im Bereich des Defektes eine Erhöhung des mechanischen Verlustwinkels („Hystereseeffekt“) auftritt. Wird ein Ultraschallsender an der Ecke einer Probe befestigt, so breiten sich Ultraschallwellen in der gesamten Probe aus, werden geschwächt und erzeugen dabei im Inneren Wärme. Die Umsetzung der mechanischen Energie in Wärme ist besonders groß im Bereich von Defekten, z. B. bei höherer Spannung oder durch Reibung an Risskanten. Wird die Amplitude des Ultraschalls mit einer tiefen Frequenz moduliert, so entsteht das Bild einer Amplitude, das die Defekte selektiv hervortreten lässt, also wie bei einer Dunkelfeldmethode. Nach FISCHER (1987, S. 153-162) erfolgt die Belastung des Bauteils erfolgt sowohl mit hydraulischen Prüfmaschinen (bis ca. 100 Hz), jedoch bevorzugt auch mit elektrodynamischen Schwingeregeln (bis ca. 18 kHz) oder piezoelektrisch (bis ca. 40 MHz). Zur Ankopplung hochfrequenter Erreger sind besondere Anordnungen erforderlich, um störende oder unzulässige Erwärmungen an der Krafteinleitung durch Reibeffekte zu vermeiden. Die Erwärmung eines Bauteils erfolgt, sofern es sich um einen homogenen Werkstoff handelt, durch den dissipierten Anteil der äußeren Belastung. Nach MANGOLD (2000, S. 126) wurde zum ersten Mal Ultraschall als Anregungsquelle von RANTALA ET. AL. 1997 eingesetzt, es handelt sich also um ein sehr neues Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung. „Der Unterschied zwischen beiden Anregungsarten [...] führt zu unterschiedlichen Bildern: Bei Lampenanregung zeigen die Bilder Wärmeflussstörungen, während die ‚Ultraschall-Lock-In-Thermografie‘ Bilder der lokalen Hysteresefläche liefert [...]“. (Quelle: URL : <http://www.ndt.net/article/dgzfp/dach58/wu/wu.htm#2>)

Lock-In-Vibro-Thermografie: Das Verfahren der Lock-In-Vibro-Thermografie beruht auf einer kombinierten Anwendung der (OLT) und der (ULT). Es ist ein speziell für Kunststoffe geeignetes Verfahren, wobei eine Probe unter oszillierender mechanischer Belastung einer Temperaturänderung unterzogen und diese mit einer Thermografiekamera erfasst wird. Hierbei überlagert sich der Hystereseeffekt mit dem thermoelastischen Effekt zu einer resultierenden Temperaturamplitude. Die Lock-In-Vibro-Thermografie ist besonders für die Risserkennung geeignet, vor allem im Bereich von Risspitzen, weil dort die beteiligten Grenzflächen einen größeren Druck aufeinander ausüben.

Ultraschall Burst-Phasen-Thermografie: Bei dieser Thermografieart erfolgt die Anregung eines Objektes ebenfalls durch Ultraschall. Im Unterschied zur Ultraschall-Lock-In-Thermografie (URT), die mit einem sinusförmig modulierten Schall anregt, erfolgt die Anregung hier mit einem Ultraschall-Burst (Explosion), das heißt mit einem kurzen Wellenstoß (z. B. 100 ms Anregungsdauer bei 2000 W Ultraschalleistung). Die IR-Bilder müssen in einzelnen Frequenzen ausgewertet werden, um Defekte bestimmten Tiefenlagen zuzuordnen zu können. Hohe Frequenzen zeigen Defekte in oberflächennahen, Tiefe Frequenzen mit größerer Reichweite Defekte im Inneren eines

7 Strahlungsquellen und ihre Spektren

Wärme ist eine Energieform, die durch die Bewegung von Molekülen verursacht wird. Eine Beschleunigung der Moleküle tritt ein bei Zufuhr von Wärme, während sich bei Entzug ihre Geschwindigkeit verringert. Wärmeübertragungen von einem Körper zu einem anderen kann in Form von Leitung, Strahlung oder Konvektion stattfinden.⁹¹ Zur Messung der Wärmeübertragung werden in der Praxis berührende als auch berührungslose Temperaturmessverfahren eingesetzt. In diesem Zusammenhang interessieren hauptsächlich die berührungslos arbeitenden.

Es steht eine große Anzahl von Wärmequellen zur Verfügung. Die Auswahl muss entsprechend den objektspezifischen Parametern und den Versuchsanforderungen ausgewählt werden, um für eine Zeitdauer von 20 ms oder länger einen messbaren Temperaturkontrast bei Inhomogenitäten zu erreichen, was eine Regelbarkeit der Energiezufuhr voraussetzt. Es kommen ausschließlich Wärmequellen zur Anwendung, deren Spektrum zum großen Teil im IR-Bereich liegen. Die Auswahl soll in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit und der Geometrie des zu prüfenden Materials erfolgen. Ein genügend großer Temperaturkontrast wird nur durch ausreichende Energiezufuhr erreicht, wobei zu beachten ist, dass der Prüfkörper nicht beschädigt wird.

Frequenz gesteuerte Messungen können Informationen über Tiefenverteilung und Härte von Materialien liefern, „wenn man den Zusammenhang zwischen den Ausbreitungseigenschaften von thermischen Wellen und der Gefügestruktur kennt. Durch Variation der Modulationsfrequenz kann die Eindringtiefe der thermischen Wellen, die so genannte thermische Diffusionslänge, verändert werden.“⁹²

Als Anregungstechniken werden Laserlicht, Halogenlampen, Blitzlampen, Heißluft, Mikrowellen, Elektrische Heizung, Wirbelstrom und Ultraschall verwendet. Bei dem so genannten Reflexions-Verfahren finden die Anregung und Detektion auf der gleichen Seite statt, während beim Transmissions-Verfahren die Probe auf einer Seite erwärmt und ihr Temperaturverlauf auf der gegenüberliegenden Seite detektiert wird.

„[...] kontinuierliche Strahler lassen sich vor allem für Wärmeflussverfahren einsetzen, bei denen die Entwicklung des Temperaturkontrastes auf der Rückseite des bestrahlten Objektes erfolgt. Leistungsfähige kontinuierliche Wärmestrahler, die periodisch moduliert werden, sind auch für die Lock-in-Thermographie erforderlich. Die Impulsthermographie hingegen erfordert Blitzlampen mit möglichst kurzer Pulsdauer und hoher Blitzleistung. Unter Umständen lassen sich auch Impulslaser einsetzen. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, einen linienförmigen Wärmestrahler während des Prüfprozesses über das Bauteil zu führen, oder ein Objekt unter einem feststehenden Wärmestrahler durchlaufen zu lassen. Diese Erwärmungsmethode ist insbesondere für kontinuierliche Prüfprozesse in der Industrie interessant. Eine hinter den Strahler angeordnete Zeilen- oder Flächenkamera erfasst in diesem Falle die Abkühlung des

Objektes auf. Bei tiefen Frequenzen sind alle Defekte zu erkennen, aber die Bilder verlieren aufgrund seitlicher Diffusionseinflüsse an Abbildungsschärfe. Bei dem Verfahren sind keine Referenzbilder unbeschädigter Vergleichsstrukturen erforderlich.

⁹¹ „**Leitung:** Bei der Wärmeleitung wird lediglich Energie, keine Materie, transportiert. Grundlage für diesen, die Temperaturausgleichvorgänge hauptsächlich beeinflussenden Prozess, ist die Molekularbewegung ohne Lageänderung von Stoffteilchen. Dies bedeutet, dass die Moleküle in Festkörpern innerhalb fester Grenzen hin und her schwingen und durch die Erhöhung der Frequenz der Schwingungen Wärme übertragen wird. [...] **Konvektion:** Diese Art des Wärmetransportes ist an die Bewegung von Materie gebunden, wobei die transportierenden Stoffteilchen zugleich ihre Lage verändern. Dies ist in Gasen und Flüssigkeiten der Fall. Dabei nimmt die Materie an Orten höherer Temperatur Wärme auf und bewegt sich zu Stellen tieferer Temperatur. [...] **Strahlung:** Wärme kann auch durch Strahlung übertragen werden. Die Sonne strahlt Energie in Form elektromagnetischer Wellen aus, die beim Auftreffen auf die Erdoberfläche absorbiert, in Wärme umgewandelt und als so genannte Wärmestrahlung wieder emittiert wird. Aber auch alle Körper, deren Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts, der tiefstmöglichen Temperatur, bei der die mittlere Bewegungsenergie der Moleküle und das Volumen eines Gases Null werden, hegt, emittieren Wärme und strahlen sich so gegenseitig Energie in Form elektromagnetischer Strahlung zu. Geben heiße Körper Wärmestrahlen an kältere Körper ab, werden die Moleküle des bestrahlten Körpers beschleunigt, so dass sich dieser erwärmt. [...]“ (Quelle: BROCKEIS 2001, S. 46).

⁹² HEINZ; LAN; LAN 1998, S. 186.

Bauteiles.⁹³ Es gibt verschiedene Strahlungsquellen, die in der Thermografie zur Anwendung kommen.⁹⁴

⁹³ MEYENDORF; NETZELMANN; VETTERLEIN; WALLE 1998, S. 1503.

⁹⁴ **Laserquellen:** In der klassischen Photothermik wurden üblicherweise Laserquellen verwendet, die eine Punktmessung erlaubten, da sich ihre Strahlung gut fokussieren lässt und auch bei hohen Frequenzen bis zu einigen MHz leicht modulieren lässt. Es ist von Vorteil, wenn zur Bestrahlung von Proben ein Laserlicht verwendet wird, dessen Wellenlänge vom Empfindlichkeitsbereich des IR-Kameradetektors abweicht. Zusätzlich sollte durch einen optischen Filter ausgeschlossen werden, dass der Detektor von Streustrahlung erwärmt wird. Nach SCHMITZ ET. AL. (1998, S. 183) ist die Verwendung von Lasern aufwändig. Sobald sie eine Ausgangsleistung von einigen Watt erbringen, handelt es sich um empfindliche größere Geräte mit hoher elektrischer Leistungsaufnahme. Eine einfachere Anwendung gestatten CO₂-Laser, deren Nachteil darin zu sehen ist, dass ihre Wellenlänge im Spektrum langwelliger Thermografie-Kameras liegt. Für die Vermeidung von Streulicht und dem damit verbundenen Rauschen benötigen die zugehörigen Kamerasysteme spezielle Filter um die Wellenlänge des CO₂-Lasers herauszufiltern. Zur mechanischen Modulation der Wellenlänge können im begrenzten Frequenzbereich von 1-10 kHz so genannte Shutter eingesetzt werden. Es gibt zwei Möglichkeiten für die Anwendung von Lasern: sie können in Form von kurzen Impulsen eingesetzt oder als kontinuierliche Wärmequelle über eine Oberfläche gescannt werden. Außerdem können sie sinus- oder rechteckförmig moduliert werden. Ein Nachteil bei der Anwendung aller Laser mit entsprechender Leistung liegt im erforderlichen Sicherheitsaufwand. Die preiswerte Alternative zu Laserdioden sind die Leuchtdioden (LEDs). Die heute im Kfz-Bereich eingesetzten Leistungs-LEDs liefern eine Leuchtdichte von bis zu 6000 Candela. Ein Nachteil gegenüber den Laserdioden besteht in der geringeren optischen Leistung.

Glühlampen: Nach MEYENDORF ET. AL. (1998, S. 1503) beträgt die Temperatur einer Halogenlampe bei normalem Betrieb 2400-3000 K. Sie sind für die Beleuchtung großer Flächen geeignet und werden am häufigsten für die Lock-In-Thermografie verwendet. Glühlampen strahlen außer dem sichtbaren Licht zusätzlich einen großen Bereich von IR-Strahlung ab. Die von einem Glühfaden ausgehende Strahlung dieser Lampen besitzt eine thermische Trägheit, die die Modulierbarkeit begrenzt. Es wird eine softwaremäßige Korrektur benötigt, da die optische Ausgangsleistung keinen Sinus-Verlauf besitzt. Bei ihrer Anwendung müssen Filter eingesetzt werden, weil der langwellige Teil ihres Emissionsspektrums im Empfindlichkeitsbereich von Thermografiekameras liegt. Dazu werden vorzugsweise Wasser- oder Polycarbonatfilter verwendet, die in der Praxis einfacher zu handhaben sind, deren Absorptionsspektrum bereits bei einer Wellenlänge von 5,5 µm beginnt, während das entsprechende Spektrum des Wassers schon bei 2 µm beginnt. Durch Polycarbonatfilter kann mehr Energie auf die Probe gelangen, weil die energiereiche NIR-Strahlung eine höhere Temperaturmodulation der Probe verursacht. Für die Impuls-Thermographie sind die Leistungen von Halogenlampen (bis zu 6 kW) meist zu gering. Daher muss bei Ihrer Verwendung mit längeren Pulsdauern bestrahlt werden.

Blitzlampen: Sie eignen sich gut zur optischen Anregung bei der Impuls-Thermographie. Blitzlampen aus der Fotoindustrie verfügen über eine Leistungsfähigkeit von bis zu 12 kJ. Nach MANGOLD (2000, S. 6.) lässt sich damit an einer schwarzen Fläche von 20 · 20 cm eine Energieabsorption von 1,5 J/cm² erreichen.⁹⁴ Blitzlampensysteme werden häufig für impulsförmige Aufheizungen von Prüfobjekten genutzt. Sie arbeiten üblicherweise mit Lichtimpulsen von 1 bis 10ms Dauer und Lichtenergien bis zu 6000 Js oder mehr. Nach WALLE ET. AL. (1999, S. 316) sind besonders Blitzlampen geeignet, die es erlauben, je nach Anwendungsfall die abgegebene Lichtenergie in mehreren Stufen zu regeln, um etwa die Nachweisbarkeit für Fehlstellen zu steigern.

Xenon-Hochdrucklampe: Nach MILNE (1987, S. 281) ermöglicht diese Wärmequelle eine Wärmeabgabe von bis zu 20 J/cm² im Bereich sehr kleiner Impulszeiten, die von einem Bruchteil einer Millisekunde bis zu mehreren hundertstel Sekunden oder länger dauern können. Sie eignet sich für die Aufheizung von Metallen, die aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften Wärme schnell diffundieren lassen. Weil ein Teil der von Xenon-Hochdrucklampen imitierten Energie im sichtbaren Bereich liegt, ist es wichtig, dass die zu bestrahlende Oberfläche bei kurzen Wellenlängen nicht reflektiert. Nur so wird eine gleichmäßige Erwärmung garantiert.

Quecksilberdampflampe: Der Einsatz von Quecksilberdampflampen ist in der Praxis kaum von Bedeutung, da ihr Spektrum fast ausschließlich außerhalb des IR-Bereichs liegt.

Heißluft: Nach MANGOLD (2000, S. 48.) erzeugt ein Heizluftfön bei dieser Art der Erwärmung einen modulierten Luftstrom. Wegen der Trägheit der Heizdrähte liegt die obere Grenzfrequenz bei 0,04 Hz.

Modulierter Luftstrom (Erzwungene Konvektion): Nach MANGOLD (2000, S. 48) ist bei der Suche nach Möglichkeiten, die oben genannte „Manipulation“ der Probe [schwarz machen oder ähnliches] zu vermeiden – das Grundanliegen der zerstörungsfreien Prüfung ist nämlich, dass keine Probenveränderungen erfolgen – erschien die Wärmeübertragung mit einem Temperatur modulierten Luftstrom besonders attraktiv: Die warme Luft wird von der Thermographiekamera nicht wahrgenommen, denn die Atmosphäre ist im Wellenlängenbereich von 8-12 µm praktisch transparent und bei der Wärmeübertragung durch den Luftstrom spielen die optischen Eigenschaften der Probe praktisch keine Rolle. Diese Art der Wärmewellenerzeugung ist in der Praxis leicht und ohne größeren Aufwand einsetzbar.

Mikrowellen: Nach MANGOLD (2000, S. 57) kann diese Methode nur bei elektrisch nicht leitenden Materialien angewandt werden. Wärme entsteht, indem Moleküle durch Absorption von Mikrowellenstrahlung zu Rotations-Schwingungen angeregt werden. Mikrowellensender können elektromagnetische Wellen von 20-3000 GHz abstrahlen. In Kunststoffen wird durch Absorption die Mikrowellenenergie in Wärme umgewandelt.

Elektrische Heizung: Nach MANGOLD (2000, S. 59) können Elektrische Bauteile überprüft werden, indem ihre angelegte Spannung direkt verändert wird. Damit können defekte Stellen als „Hot Spots“ sichtbar gemachten werden.

Wirbelstrom: Nach MANGOLD (2000, S. 59) kann durch eine Magnetspule in einer Probe ein Induktionsstrom erzeugt werden, der in elektrisch leitenden Materialien stark gedämpft ist. Die Anwendung beschränkt sich auf oberflächennahe Fehler. Die Eindringtiefe für Kupfer liegt nur bei 50 µm bei einer Frequenz von 1 MHz. Die Proben müssen abgerastert und können nicht flächig erwärmt werden.

Ultraschall: Bei der neuen Leistungs-Ultraschall-Anregungsmethode mit Leistungen bis zu 5kW breitet sich nach MANGOLD (2000, S. 62) die Wärme gleichförmig, senkrecht zur Oberfläche aus. Durch Wärmestau können Ablösungen detektiert, vertikale Risse können nur durch seitliche lokale Heizung sichtbar gemacht werden. Die so entstehende Wärme kann an der Oberfläche erfasst werden. Diese Methode arbeitet schnell und empfindlich. Nachteil ist die Möglichkeit der Schädigung der Probe.

8 Thermografische Messungen mit Infrarot-Kameras

8.1 Ortsbestimmung

Bei einer Fotografie sind Formen, Umrisse und Details aufgenommener Objekte klar erkennbar, während bei einem Infrarotbild Einzelheiten und Übergänge von Bauteilen oftmals nicht so gut zu sehen sind, besonders wenn Oberflächentemperaturen einzelner Bildelemente annähernd gleich sind. Es sollte für eine Fotografie ein etwa gleicher Bildausschnitt wie bei der thermografischen Aufnahme gewählt werden. Bemaßungen und Bezugspunkte werden besser in einem optischen Bild festgelegt und können danach leichter auf das Infrarotbild übertragen werden. Will man mit beiden Kameras annähernd den gleichen Bildausschnitt aufnehmen, so müssen die Bilder meist von unterschiedlichen Standpunkten erfasst werden, weil Brennweite und Bildwinkel von optischer und infraroter Kamera normalerweise voneinander abweichen. Als Identifikationshilfe können unter Umständen vier Punkte einer ebenen Objektfläche gekennzeichnet, oder in der Bauthermografie markante sichtbare Stellen (Fenster, Lisene, usw.) zur Identifizierung verwendet werden.⁹⁵

8.2 Einfluss der Atmosphäre

Es gibt Einflüsse der Atmosphäre die die Infrarot-Strahlung abschwächen, oder Messergebnisse durch Eigenstrahlung beeinflussen können. Strahlen werden auf dem Weg durch die Atmosphäre absorbiert und gestreut, die Dämpfung ist wellenlängenabhängig.⁹⁶ In manchen Bereichen existiert ein hoher Transmissionsgrad, in anderen ein niedriger, der wesentlich von in der Luft enthaltenen Gasen und von Wasserdampf (Luftfeuchtigkeit) bestimmt wird. Es existieren zwei Bereiche mit relativ hoher atmosphärischer Transmission (3-5 μm und 8-12 μm), die durch spektrale Absorptionsbanden von Wasser (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) getrennt sind. Wasserdampf und Gase, wie auch Reflexion, Remission und Eigenstrahlung, können zu Verlusten und Störstrahlungen führen. Bei größeren Entfernungen, hohen Gaskonzentrationen und/oder hoher Luftfeuchtigkeit sind diese Einflüsse zu beachten. Um sie möglichst zu umgehen, werden Infrarotkameras überwiegend für das so genannte kurzwellige (3-5 μm) oder langwellige (8-13 μm) „atmosphärische Fenster“ ausgelegt.⁹⁷

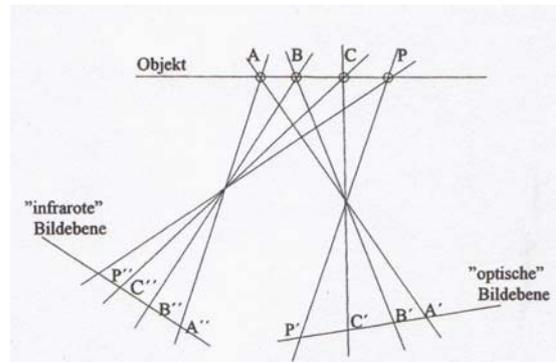


Abb. 16: Ortsbestimmung. Eindeutige Zuordnung beliebiger Punkte P' und P'' in der optischen und infraroten Bildebene durch Fixierung dreier Markierungspunkte A, B und C. Mit Hilfe für die projektive Geometrie gültigen Konstanz des Doppelverhältnisses ($AC/BC : AP/BP$) lässt sich der Objektpunkt P von der Bildebene der optischen Kamera auf die der infraroten Kamera übertragen. Für zweidimensionale Objekte benötigt man vier Markierungspunkte (A, B, C, D), die nicht alle auf einer Geraden liegen dürfen.

(Quelle: HEIDT; KALENDER 1998, Heft 5, S. 249)

⁹⁵ HEIDT; KALENDER 1998, S. 249.

⁹⁶ URL : http://surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/THG/imag_thg_basics.htm

⁹⁷ BROCKEIS 2001, S. 58.

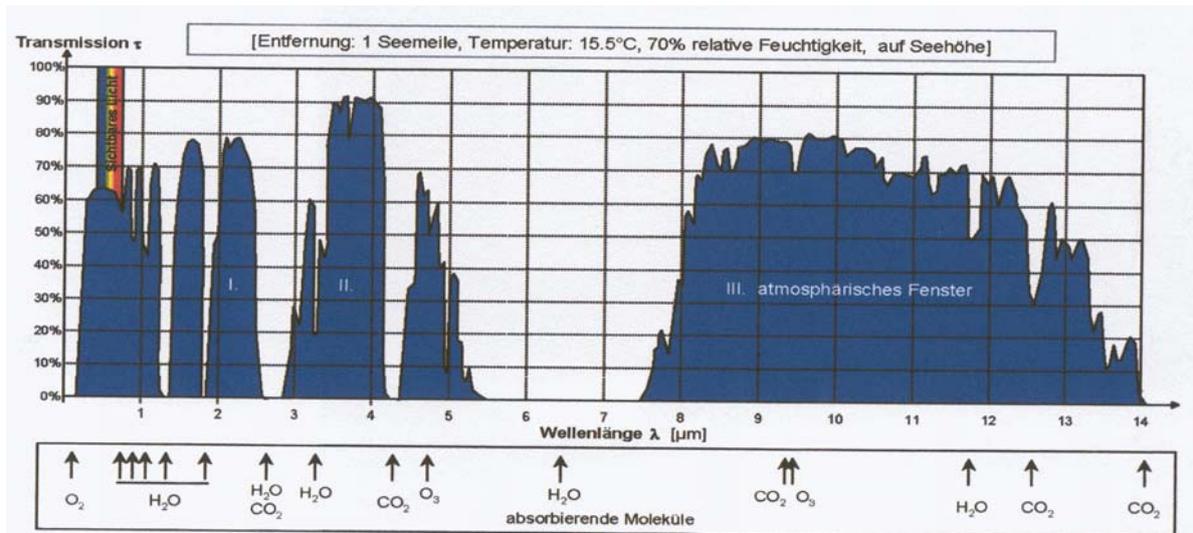


Abb. 17: Spektrale Transmission der Atmosphäre.
(Quelle: SCHÖNBACH : 2002, S. 2, pdf-Datei)

In bestimmten Wellenlängenbereichen⁹⁸ (z. B. 2,6-2,9 μm , 4,3-4,5 μm und 5,4-7,0 μm) wird die IR-Strahlung nahezu vollständig absorbiert. Den größten Einfluss dabei haben Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O).

Die physikalischen Grundlagen der Dämpfungsmechanismen können mit einem Rechenmodell sehr genau berechnet werden. Dabei sind Objektentfernung, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit der Atmosphäre maßgebliche Größen. Diese Einflüsse, die zu unterschiedlichen Wellenlängen führen würden, werden durch das so genannte LOWTRAN-Modell⁹⁹ kompensiert.

Weiter können Streuungseffekte durch schwebende Teilchen in der Luft, wie z. B. Staub und Wassertropfen auftreten.¹⁰⁰

8.3 Beschaffenheit der Oberfläche

Bei Infrarotmessungen ist im Gegensatz zum optischen Licht die Oberflächenbeschaffenheit wichtiger als die Farbe. Allgemein gilt: Je rauer eine Oberfläche ist, desto größer ist ihr Emissionsgrad infolge eines „mikroskopischen Hohlraumeffekts“. Glatte, polierte Oberflächen desselben Materials haben einen niedrigeren Emissionsgrad. Verwitterung, Alterung, Schmutz, Oxidation oder ein Feuchtigkeitsfilm können ihn jedoch stark ansteigen lassen. Oxidschichten von Metallen weisen in Abhängigkeit von ihrer Schichtstruktur wesentlich veränderte Emissionsverhalten gegenüber nicht oxidierte metallische Oberflächen auf. Sie sind im Wesentlichen von der Wellenlänge unabhängig und weisen im Spektrum von 8-12 μm hohe Emissionsgrade auf.¹⁰¹ Bei der Messung reflektierender metallischer Oberflächen ist zusätzlich der Einfluss von Umgebungsstrahlung zu berücksichtigen, die die Eigenstrahlung überlagert, so dass die scheinbar gemessene Strahlung höher als die tatsächlich von der Oberfläche abgestrahlte ist. Bei dieser thermischen Reflexion macht sich der Einfluss warmer Körper der Umgebung bemerkbar, was zur Verfälschung der Messergebnisse und zur Vortäuschung von auf der Metallplatte nicht vorhandenen Temperaturunterschieden führen kann. Es kann der Fall eintreten, dass sich eine näher kommende Person nicht auf der sichtbaren, aber zu rauen Objektoberfläche,

⁹⁸ URL : http://surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/THG/imag_thg_basics.htm

⁹⁹ SCHÖNBACH 2002, S. 1.

¹⁰⁰ URL : http://surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/THG/imag_thg_basics.htm

¹⁰¹ BRINKMANN 1998, S. 5-7.

wohl aber im IR-Bild spiegelt. Dazu ist es nicht einmal notwendig, dass sich die Temperaturquelle im Blickfeld der Kamera befindet, wenn deren Wärmestrahlung in die Kamera reflektiert wird. Störstrahlungen können von Personen, Heizungen, Lampen, Sonnenlicht usw. ausgehen.¹⁰² Reflektierte Störstrahlung kann durch einen Positionswechsel der Kamera oder Bewegungen des Messobjekts festgestellt werden. Der Reflex wandert auf dem Objekt, während die Eigentemperatur an der gleichen Stelle bleibt. Die Störstrahlung kann durch schwarze Stellwände abgeschirmt werden.¹⁰³

Bei der Bestimmung der Oberflächentemperatur von blanken Metallen durch Pyrometer können leicht Messfehler auftreten. Die Ergebnisse sind sehr schwer zu bewerten.

Bei Glas, Quarz, Wasser, Kunststofffolien u.a. gibt es Wellenlängenbereich, in denen der Emissionsgrad besonders hoch ist. So können Kunststofffolien im Bereich einer Absorptionsbande mit einem hohen Emissionsgrad gemessen werden, wobei zu beachten ist, dass der Emissionsgrad mit geringerer Foliendicke niedriger wird.¹⁰⁴

Besonders auffallend ist die Wirkung von Wasser. Bereits bei einem Film von 0,5 mm und ab einer Wellenlänge von 3 μm ist der Emissionsgrad $\varepsilon > 0,95$. Das führt auch bei hellen, aber an der Oberfläche feuchten Materialien (Pflanzen, Haut), zu hohen Emissionsgraden.

8.4 Bestimmung des Emissionsgrades

Thermografie ist kein Verfahren zur genauen Messung der Oberflächentemperatur in jeder Messsituation.¹⁰⁵ Der Emissionsgrad ist für die Thermografie von zentraler Bedeutung. Doch selbst wenn das Oberflächenmaterial bekannt ist, reicht dieses Kenntnis zur Messung noch nicht aus. In der Praxis ist eine qualitative Kenntnis verschiedener Oberflächenstrukturen und damit des Emissionsgrades erforderlich.¹⁰⁶

Je höher der Emissionsgrad ist, umso größer ist die vom Objekt ausgehende und von der Kamera erfasste Strahlenmenge, was zu besseren Messergebnissen führt. Daher sollte die spektrale Empfindlichkeit eines Thermografiegerätes in einem Wellenlängenbereich liegen, in dem das zu messende Objekt einen hohen Emissionsgrad hat. Bei stark reflektierenden Materialien müssen durch geeignete Maßnahmen Reflexionen abgeschottet bzw. muss der Emissionsgrad der Oberfläche künstlich erhöht werden, um eine Temperaturmessung durchführen zu können.

Ein Thermogramm kann beispielsweise einen aus verschiedenen Materialien zusammengesetzten Gegenstand abbilden, der sowohl schwarze mit $\varepsilon = 0,95$ als auch metallfarbene Teile mit einem sehr niedrigen Emissionsfaktor enthält (Tafelgemälde mit Blattgold). Um die Temperatur zu messen reicht es nicht aus, den Cursor von einem Objektteil zum andern zu bewegen. Es muss zuvor der Emissionsgrad eines jeden Materials eingestellt werden. IR-Kameras verfügen dazu über einen sog. Emissionsgradsteller. Da Tabellenwerte besonders für metallische Materialien nicht kritiklos übernommen und eingestellt werden können, müssen die Emissionsgrade jeweils ermittelt werden. Je genauer der Emissionsfaktor bekannt ist, desto genauer lassen sich auch absolute Temperaturen feststellen und im Bereich zwischen -40°C und $+1200^\circ\text{C}$ bis auf $1/10\text{ K}$ genau erfassen.¹⁰⁷

Die Emissionskorrekturen bei Thermografie an allen nicht elektrisch leitenden Oberflächen, also auch an lackierten Metallen, sind allerdings sehr klein, wenn man davon ausgeht, dass die Emissionskoeffizienten für Nichtmetalle bei 0,92 für Gips und 0,98 für Blattgrün liegen.¹⁰⁸

¹⁰² KARSTÄDT; MÖLLMANN; PINNO; VOLLMER 1998, S. 17.

¹⁰³ THAMM 1999, S. 80-81.

¹⁰⁴ VDI/VDE 3511, Blatt 4 : Januar 1995, S. 44.

¹⁰⁵ URL : http://www.itema.de/grenzen_infrarot.html

¹⁰⁶ GLÜCKERT 1992, S. 91-93.

¹⁰⁷ fehlt

¹⁰⁸ URL : http://www.fh-merseburg.de/fbz/energiemanagement/body_infrarot_thermografie.htm

Als Beispiel für den Einfluss des Emissionsgrades sei ein Objekt angeführt, dessen Temperatur bei einem eingestellten Emissionsgrad von 1,00 mit 206°C gemessen wurde. Dessen wahre Temperatur läge bei $\varepsilon = 0,95$ bei 212°C und bei $\varepsilon = 0,73$ bei 245°C.¹⁰⁹

Eine direkte Möglichkeit den Emissionsgrad genauer zu bestimmen besteht darin, die Temperatur einer Oberfläche, die Wärmestrahlung emittiert, gleichzeitig berührend mit einem Präzisionsthermometer und berührungslos mit einer IR-Kamera zu messen und dabei den Emissionsgrad an der Kamera so einzustellen, dass die Messergebnisse übereinstimmen.

Den indirekten Möglichkeiten zur Bestimmung ist gemeinsam, dass der Emissionsgrad einer Oberfläche durch den Messwertvergleich der Strahlung einer zu untersuchenden Oberfläche mit der eines bekannten „schwarzen“ Strahlers ermittelt wird. Dazu kann die zu messende Oberfläche auf verschiedene Art und Weise verändert und „schwarz“ gemacht wird, so dass ihre Eigenschaften einem Planck'schen Strahler ähnlich werden. Natürlich müssen der Schwarze Strahler und die Probenoberfläche die gleiche Temperatur aufweisen, und die Messungen müssen im gleichen Abstand und im gleichen Winkel erfolgen um für jede Messung identische Fehlereinflüsse bei der Übertragung zu erreichen. Der Emissionsgrad kann bestimmt werden durch:

- Referenzfläche¹¹⁰
- Schwärzung der Messfläche¹¹¹
- Verwendung von Folien¹¹²
- Vergleichsmessung¹¹³
- Pixelweise Emissionswertkorrektur für das Gesamtbild¹¹⁴

¹⁰⁹ URL : http://www.irmotion.com/manual/index_g.html

¹¹⁰ **Referenzfläche:** Um einen Schwarzen Strahler zu simulieren, wird in einem Messobjekt ein Loch gebohrt. Das Verhältnis von Lochtiefe zu Durchmesser muss > 4 sein. Nachdem die Temperatur des Loches bei einem angenommenen Emissionsgrad von $\varepsilon = 1,00$ und die Temperatur der Oberfläche bestimmt ist, lässt sich der Emissionsgrad errechnen. Das Verfahren scheidet für die Anwendung in der Restaurierung praktisch aus. (Quelle: URL : http://ourworld.comuserve.com/homepages/christoph_mueller_ibm/thermogr.htm)

¹¹¹ **Schwärzung der Messfläche:** Anstatt ein Loch zu bohren, kann ein Referenzpunkt der Messfläche mit einem Material, dessen Emissionsgrad bekannt ist, behandelt werden, mit schwarzer Farbe (Graphit oder Ruß). Die gemessene Temperatur an dieser Stelle dient zur Kalibrierung. Anschließend wird der Messpunkt ein kleines Stück verschoben. Die nun angezeigte Temperatur wird durch Verstellen des Emissionsgradstellers abgeändert, bis sie mit der vorher gemessenen Temperatur übereinstimmt. Am Gerät kann nun der bis dahin unbekannte Emissionsgrad abgelesen werden. Nach VDI/VDE 3511 (1995, S. 47) „stellt man den Emissionsgradsteller auf den Wert von ε_1 , (z. B. $\varepsilon_1 = 0,95$ bei schwarzem Mattlack) und notiert die Temperaturanzeige. Nun wird das Strahlungsthermometer auf die Fläche mit dem unbekanntem Emissionsgrad ε_2 ausgerichtet und die Temperaturanzeige mit dem Emissionsgradsteller so lange korrigiert, bis die Anzeige mit der vorherigen übereinstimmt. An der Emissionsgradskala kann nun der unbekannte Wert ε_2 , abgelesen werden. Er ist aber nur dann genau bzw. brauchbar, wenn bei Ausrichtung auf die Fläche, von der vorwiegend die durch Reflexion mit gemessene Strahlung stammt, die jeweilige Temperaturanzeige bei beiden Emissionsgradeinstellungen übereinstimmt. Damit wird kontrolliert, dass der im Gerät verwendete Bezugswert für die Umgebungstemperatur mit dem Wert für die Temperatur der mit der gemessenen Fläche (Umgebungstemperatur) übereinstimmt. Problemlos wird diese Methode, wenn am Strahlungsthermometer eine Einstellung von verschiedenen ‚Umgebungstemperaturen‘ möglich ist.“

¹¹² **Verwendung von Folien:** Wenn Oberflächen nicht verändert werden dürfen, kann man dünne, dunkle Kunststofffolien (Teflon oder Kapton mit einer Dicke $< 100 \mu\text{m}$) mit bekanntem Emissionsgrad als Emissionsgradumsetzer an die zu untersuchende Oberfläche andrücken. In diesem Fall wird die Folienoberfläche mit der Temperatur des Messobjekts weitgehend übereinstimmen. Damit kann die Temperatur der Folienoberfläche gemessen und zur Kalibrierung genutzt werden.

¹¹³ **Vergleichsmessung:** Diese Methode eignet sich nur für kleine Objekte. Es wird ein Schwarzer Strahler zur Vergleichsmessung benötigt. Das Objekt muss auf die Temperatur dieses Strahlers gebracht werden. Stellt man die gemessene Strahlungsenergie des Objektes mit der Energie des Schwarzen Strahlers ins Verhältnis, so ergibt sich daraus der Emissionskoeffizient. Diese Verfahren sind abgestimmte Messverfahren für selektive Strahler, deren Emissionsgrad stark von der Wellenlänge der emittierten Strahlung abhängt ungeeignet.

¹¹⁴ **Pixelweise Emissionswertkorrektur für das Gesamtbild:** Um eine exakte Korrektur durchzuführen sind entsprechende Messaufbauten erforderlich. Es sind immer zwei Aufnahmen notwendig, eine bei Umgebungstemperatur und eine unter Betriebsbedingungen (bezieht sich hauptsächlich auf industrielle Anwendung). Die Versuchsanordnung (Abstände usw.) muss absolut identisch sein, da sonst falsche Bildpunkte miteinander korrigiert werden. Besonders bei Metallen muss die Referenztemperatur nahe bei den Betriebsbedingungen liegen, da deren Emissionsgrad auch von der Temperatur abhängt. A) *Flächenmäßige Emissionswertkorrektur für frei definierbare Konturen:* Sie wird angewendet bei großen Objekten und wenn die geometrischen Aufnahmebedingungen nicht exakt gewährleistet sind. Der Anwender kann beliebig Konturen festlegen, für die er jeweils einen eigenen ε -Wert angeben kann. Die Software kann nun den Bildinhalt innerhalb der Kontur farblich und gemäß der Temperatur dem vorgegebenen Wert entsprechend korrigieren. Auch hier darf die Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrades nicht vernachlässigt werden. B) *unkontourmäßige Emissionswertkorrektur für einzelne Messpunkte:* Diese Korrektur erfolgt wie bei den vorher beschriebenen C) *Flächenbezogene Temperaturkorrektur für frei definierbare Konturen:* Nach Jakovics et. al. (1998, S. 95) wird wie bei der flächenmäßigen Emissionswertkorrektur eine mit einem Präzisionsthermometer gemessene Temperatur vorgegeben, woraus die Software den ε -Wert innerhalb der definierten Fläche berechnet, ohne dass umständliche Schwärzungen der Oberfläche erfolgen müssen.

- Beobachtungswinkel¹¹⁵

Emissionswertkorrekturen sind als Unterstützung bei thermografischen Messungen nützlich, erfordern aber zur Interpretation Erfahrung. Vorsicht ist bei sehr niedrigen oder instabilen Emissionsgraden geboten. Für den Einsatz über große Temperaturbereiche sind am ehesten Gesamtstrahlungs-pyrometer geeignet. Weil jedoch der Einfluss des Emissionsgrades mit kürzer werdendem Wellenlängenbereich des Thermografiegerätes sinkt, werden für pyrometrische Messungen neuere Geräte mit kurzwelligem Spektralbereich angeboten.¹¹⁶

Die Daten eines jedes Infrarot-Bildes sind nur überprüf- bzw. nachvollziehbar mit der Angabe des bei der Aufnahme eingestellten Emissionsgrades, weil im Falle einer Vergleichsmessung wieder der gleiche Wert eingestellt werden muss. Ohne diese Kenntnis besitzt ein Thermografie-Bild keine qualitative Aussage.

8.5 Kameraabstand

Da bei geringerem Abstand zwischen Kamera und Objekt die zu untersuchende Stelle im Bild größer erscheint, kann für die Aufnahme in der Regel ein engerer Temperaturbereich eingestellt werden. Damit werden schon kleine Temperaturunterschiede mit unterschiedlichen Farben dargestellt und Fehler lassen sich daher leichter optisch identifizieren.

„Es ist also möglich, dass aufgrund eines zu großen Abstands der Kamera zur Fassade Fehlstellen am Bau, die eigentlich nachweisbar sind, nicht visualisiert werden können. In der Praxis sollte deshalb, nach einer Gesamtaufnahme der Fassade, diese in Teilflächen aufgeteilt werden, die dann mit geringerem Abstand der Kamera separat aufgenommen werden.“¹¹⁷

Genaue Aussagen über absolute Oberflächentemperaturen können nur durch Berücksichtigung des Emissionsgrades gemacht werden, der vom Beobachtungswinkel abhängig ist (Lambert'sches Gesetz). Die Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrades kann bei zu untersuchenden Oberflächen (Putz, Steine, etc.) jedoch vernachlässigt werden.

„Bei senkrechtem Beobachtungswinkel (Position der Kamera senkrecht zur Testfassade) muss im Falle der Vermessung von Körpern, die sich nach dem Lambert-Gesetz verhalten, keine Korrektur wegen unterschiedlichen Abstrahlwinkeln innerhalb des Öffnungswinkels der Kamera durchgeführt werden. Beim Abtasten des Objektes durch die Kamera kompensieren eine größere erfasste Fläche und die nach dem Kosinusetz abnehmende Emissivität einander. Die Temperatur der vermessenen Körper wird über die ganze vermessene Fläche richtig wiedergegeben.“¹¹⁸

Wie bei jeder Photokamera ergibt sich auch bei einer Thermografie-Kamera durch einen Aufbau nicht rechtwinklig zum Objekt eine Verschlechterung der räumlichen Auflösung und der Verzerrung des Bildes, was für die Visualisierung von Fehlern neben der Temperaturauflösung von Bedeutung sein kann. Beides ist für eine Schadensfeststellung von Nachteil. Weil mit fortschreitender Neigung der Kamera die Abbildung immer weiter verzerrt wird, sollten Kameras möglichst senkrecht zur Fassade aufgestellt werden.

Veränderungen der Strahlung einer Oberfläche können allerdings auch von Reflexion an einer anderen Oberfläche herrühren. Um darüber eine Aussage zu treffen, wird die zu

¹¹⁵ **Beobachtungswinkel:** Darunter versteht man nach Schönbach (2002, S. 3) den Winkel, in dem ein Beobachter (die Kamera) zum Aufnahmeobjekt steht. Der Winkelbereich von 90° (senkrecht) bis ca. 50° ist in der Regel unkritisch. Unter noch flacheren Beobachtungswinkeln erscheinen elektrische Leiter wärmer, elektrische Nichtleiter kälter als bei senkrechter Beobachtung. Sehr blanke Metalle weisen eine starke Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades auf, während Nichtmetalle nur in geringem Maße winkelabhängig sind.

¹¹⁶ ZIMMERHACKL; NAGEL; BUDZIER; HOFMANN 1999, S. 110.

¹¹⁷ RAICU 1999, S. 40.

¹¹⁸ RAICU 1999, S. 34.

untersuchende Oberfläche am günstigsten von unterschiedlichen Positionen aufgenommen, weil sich eine Reflexion im Allgemeinen mit der Position verändert.

8.6 Fehlermöglichkeiten bei Messungen

Hersteller von Thermografiegeräten treten meistens mit dem Anspruch auf exakt arbeitende Kameras zu liefern, die Temperaturfelder mit verblüffend geringen Fehlern messen können. Kritisch zu prüfen ist, ob die angegebene thermische und geometrische Auflösung unter „idealen“ oder auch „normalen“, praxisnahen Bedingungen zu erreichen ist. Die Qualität einer Messung hängt nicht nur von der Gerätequalität sondern auch von dem Messproblem selbst und der Sorgfalt des Thermografen ab.

In vielen Fällen ist die exakte Bestimmung der absoluten Temperatur einer Oberfläche nicht von höchster Wichtigkeit. Meist geht es bei thermografischen Messungen um das Auffinden von untypisch zu hohen oder zu niedrigen Temperaturen, die auf Schwachstellen hinweisen. Der Vergleich ähnlicher Anlagenteile sagt oft mehr aus als der reine Temperaturwert einer Messung. Insofern ist die vom Hersteller angegebene meist sehr gute Temperaturauflösung ein unverzichtbares Qualitätskriterium, die Angabe von absoluten Temperaturen jedoch kritisch zu beurteilen.¹¹⁹ Es wird zwischen zwei Arten von Fehlern unterschieden:

- Fehler, deren Ursachen im Messvorgang begründet sind¹²⁰
- Fehler, die auf das Messgerät rückzuführen sind¹²¹

8.7 Auswertungsmethoden von Wärmebildern

Jedem Strahlungswert eines jeden Pixels wird über einen Rechner mit Hilfe von Kalibrierungskennlinien ein Temperaturwert zugeordnet, farbig kodiert und als Wärmebild

¹¹⁹ GLÜCKERT 1992, S. 63.

¹²⁰ A) Emissionsgrad ungenügend bekannt oder ungenau ermittelt. B) bei sehr kleinen Emissionsgraden ist die für die Messung zur Verfügung stehende Temperaturstrahlung niedriger. Außerdem führen kleine Emissionsgrade zu hohen Reflexionsvermögen für Störstrahlungen. Daher können bei kleinen Emissionsgraden Fehler auftreten, die unvermeidbar hoch werden. C) Stark unterschiedliche Emissionsgrade. Besteht die Oberfläche eines Messobjektes aus Materialien mit sehr unterschiedlichen Emissionsgraden, (z. B. Metall und Holz), so reicht eine globale Kompensation (gleichmäßig über das gesamte IR-Bild) der extremen Einflüsse meist nicht aus. Von Vorteil wäre eine Infrarot-Kamera, deren Software in solchen Fällen für einzelne Bildbereiche unterschiedliche Kompensationsmöglichkeiten bietet. D) Winkeln zur Flächennormale. Bei blanken Metalloberflächen gibt es das Problem der starken Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades. Solche Oberflächen haben im Winkelbereich von 70-80° ein Maximum der Emission. Die Abweichung ist umso größer, je spiegelnder die Oberfläche des Metalls ist. Weil solche Messungen durch Thermografiesysteme schlecht möglich sind, sollten Bewertungen von Oberflächentemperaturen an blanken Metallen möglichst vermieden werden. Ein Auftrag dielektrischer Deckschichten kann den Emissionsgrad stark anheben, führt allerdings zu einer zusätzlichen thermischen Isolation der Oberfläche und damit zu falschen absoluten Temperaturentwürfen. E) Messfeld ist nicht homogen temperiert. F) Die Infrarot-Kamera erfasst Bereiche die über den eigentlichen Messfleck hinausgehen, wie heiße oder kalte Nachbarbereiche. G) Wird die Temperaturstrahlung eines Messobjektes durch Störstrahlung oder reflektierte Hintergrundstrahlung überlagert, so wird diese häufig falsch eingeschätzt, bzw. kann nicht korrigiert werden. Weist das Messobjekt eine wesentlich höhere Temperatur als die Umgebung auf, so wird der Messfehler gering sein. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss viel höher, wenn Messobjekt und Umgebung sich auf ungefähr gleicher Temperatur befinden und zusätzlich noch etwa gleiche Emissionsgrade aufweisen. H) Der spektrale Einfluss der Übertragungsstrecke zwischen Infrarot-Kamera und Untersuchungsobjekt wird unterschätzt. Zwischenmedien wie Rauchgase, Staub, Nebel, Regen oder Schneefall, sowie erheblich schwankende Lufttemperaturen und Windgeschwindigkeiten beeinträchtigen die Messergebnisse. Wasser- und Kohlendioxid weisen z. B. ein oder mehrere stark absorbierende Wellenlängenbereiche auf. In einem solchen Fall ist es ratsam statt mit Kameras, die die Gesamtstrahlung erfassen, mit Bandstrahlungs-pyrometern zu arbeiten, die den Absorptionsbereich nicht mit erfassen. Die Absorption durch Zwischenmedien wird bei Gesamtstrahlungs-pyrometern erst bei größeren Messentfernungen (< 1m) bemerkbar. Sofern der Emissionsgrad $\varepsilon \approx 1$ ist, liegt der Fehlerbereich nach WEBER (1982, S. 56-57) bei 0,5-1,5 % des Messwertes. Fehler, die durch Nichtbeachtung dieser Bedingungen entstehen, können um ein Vielfaches größer sein.

¹²¹ A) Die spektrale wie auch die absolute Empfindlichkeit einer Infrarot-Kamera hat sich nach langem Gebrauch verändert. B) Die thermische Anpassung der Infrarot-Kamera wurde nach Transport, Anpassung an Sommer- oder Wintertemperaturen nicht gemäß Herstellerangabe abgewartet. C) Die eingebaute automatische Kalibrierung arbeitet nicht korrekt. D) Der Spektralbereich des Kameradetektors ist nur bedingt für die Messstrahlung geeignet. E) Die Störstrahlung des Aufnahmeegerätes (Gehäusetemperatur) wird nur ungenügend ausgeglichen. Besonders Infrarot-Kameras, die im Bereich der Umgebungstemperatur eingesetzt werden, sind sehr anfällig für Störstrahlung des eigenen Gerätes. Eine Möglichkeit zu deren Vermeidung besteht in der Modulation der einfallenden Strahlung. Wird anschließend nur der modulierte Signalanteil weiterverarbeitet, wird dadurch der Einfluss der Störstrahlung praktisch eliminiert. Eine genaue Messung erfordert Erfahrung und ausreichende Kenntnisse der Gesamtproblematik.

dargestellt.¹²² Bei Thermogrammen handelt es sich generell um „Falschfarbendarstellungen.“ Abhängig vom gewählten, darzustellenden Temperaturbereich wird eine empfangene Temperaturinformation auf einem Monitor entweder in Grauwerten oder durch „Falschfarben“ dargestellt. Man spricht von „Falschfarben“, weil die auf dem Monitor dargestellten Farben nicht absolut „kalt“ oder „warm“ sind, sondern eine Temperaturdifferenz anzeigen, entsprechend dem an der Kamera eingestellten Temperaturbereich. Über die Software sind Anzahl und Auflösung von Farbstufen, wie auch obere und untere Temperaturgrenze einstellbar. Was bei einer Temperatureinstellung rot erscheint (= wärmer), kann bei einer anderen Einstellung als blau (= kälter) in Erscheinung treten. Innerhalb eines Temperaturbereichs entspricht dunkelblau immer der unteren und dunkelrot der oberen gewählten Temperaturgrenze. Daraus ergibt sich das IR-Bilder sich überhaupt nur miteinander vergleichen lassen, wenn obere und untere Temperaturgrenzen bekannt und identisch gewählt sind.

Die visuelle Wahrnehmung von Thermogrammen verführt leicht zu einer direkten (subjektiven) Beurteilung der Messung. Man glaubt in den anschaulichen Bildern „offensichtliche“ Merkmale zu erkennen, wie man sie aus fotografischen Aufnahmen gewohnt ist. Das menschliche Auge kann allerdings nur maximal etwa 30 Grau- oder Farbwerte unterscheiden, während Thermogramme bis zu 256 Grau- oder Farbwerte aufweisen können. Daher sind objektive Auswertungsmethoden von Wärmebildern für eine zuverlässige Anwendung eine Grundvoraussetzung. Erst eine professionelle Auswertung führt zu brauchbaren Ergebnissen, weil die Anwendung und die Darstellung in Grau- oder Falschfarben allein noch keine genauen Aussagen zulassen. Grundsätzlich gibt es zurzeit zwei Systeme der Farbzuordnung und Bilddarstellung. Das 8-Bit System¹²³ und 12-Bit System¹²⁴.

Dem Thermografen stehen heute leistungsstarke und variable IR-Systeme auch zur Aufnahme dynamisch-thermischer Vorgänge zur Verfügung, deren Messbereich sich von -20°C bis 2000°C erstreckt. Die Auswertung erfolgt je nach Bedarf qualitativ¹²⁵, vergleichend¹²⁶ oder quantitativ¹²⁷.

¹²² URL : <http://www.thermo-bild.com/prod01.htm>

¹²³ 8-Bit System: Im 8-Bit-System wird lediglich der Temperaturbereich erfasst der auch in der Temperaturskala der thermografischen Bilder dargestellt ist. Im gespeicherten Bild ist nur dieser Bereich verfügbar. Die Breite und Lage des Temperaturbereiches wird mit Hilfe der Parameter Helligkeit $\sqrt{\text{Level}}$ und Kontrast $\sqrt{\text{Span}}$ aus dem analogen Signal ausgewählt. 8-Bit-System = 256 Temperaturstufen = 256 Farbstufen.

¹²⁴ 12-Bit System: Im 12-Bit-System wird der erweiterte Messbereich, die Temperatur im Bereich der gesamten Kennlinie erfasst und auf dem gespeicherten Bild verfügbar gemacht. 12-Bit-Systeme können 4096 Temperaturstufen erfassen. Mit Hilfe der Parameter Helligkeit $\sqrt{\text{Level}}$ und Kontrast $\sqrt{\text{Span}}$ wählt man die Breite und Lage der im Bild dargestellten Temperaturskala aus.

¹²⁵ Nach DIN 54190 (2003, S. 3) ist die Qualitative Thermografie eine Auswertetechnik, bei der bereits die Darstellung der flächenhaften Strahlendichte- bzw. scheinbaren Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Prüfobjektes für eine Beurteilung des Prüfergebnisses ausreichend ist. Eine qualitative Auswertung kann ausreichend sein für die Auffindung von Undichtigkeiten, für die Darstellung einer unter Putz liegenden Fachwerkstruktur oder den Verlauf einer Fußbodenheizung. Ebenso kann die Delamination von Schichtwerkstoffen mit einer qualitativen Auswertung von thermischen Verfahren nachgewiesen werden. Folgende Punkte müssen dabei beachtet werden: A) Wahl eines geeigneten Bildausschnittes (zum visuellen Vergleich der Anzeige mit dem ungestörten Zustand); B) Wahl eines geeigneten Blickwinkels (zur Vermeidung von Reflexionen); C) Kontrolle bzw. Minimierung von Störeinflüssen (Fremdstrahlungsquellen, Luftzug, Feuchtigkeit); D) Wahl eines geeigneten Objektivs (zur Einhaltung der geforderten geometrischen Auflösung); E) sorgfältige Fokussierung des Bildes; F) Wahl der geeigneten Darstellungsparameter (Temperaturskala, Kontrast, Helligkeit, Farbpalette usw.).

¹²⁶ Nach DIN 54190 (2003, S. 3) ist die Vergleichende Thermografie eine Auswertetechnik, bei der scheinbare Temperaturdifferenzen ausgewertet werden. Eine vergleichende Auswertung kann bei Prüfungen im Bauwesen (Kältebrücken) von Elektroanlagen (Fehlerklassifizierung) oder von mechanischen Komponenten sinnvoll sein. Vergleichbare Temperaturdifferenzen können ausgewertet werden, wenn gleiche Prüfobjekte zu verschiedenen Zeitpunkten unter möglichst gleichen Bedingungen, oder wenn baugleiche, aber nicht identische Prüfobjekte unter den gleichen Bedingungen untersucht werden. Zur erfolgreichen Anwendung der vergleichenden Auswertung muss zusätzlich beachtet werden: A) Wahl des gleichen Bildausschnittes wie bei der Referenzmessung; B) Wahl des geeigneten Temperatur-Messbereiches; C) Abschätzung der Mess-Parameter (Emissionsgrad, Umgebungstemperatur usw.).

¹²⁷ Nach DIN 54190 (2003, S. 4) ist die Quantitative Thermografie eine Auswertetechnik, bei der aus den gemessenen Strahlungswerten Temperaturen bestimmt und ausgewertet werden. Eine quantitative Auswertung ist geeignet für Temperatur gesteuerte Produktionsprozesse, die Quantifizierung von Wärmeflüssen oder die Klassifizierung von Fehlern bei der thermischen Prüfung von elektrischen Anlagen. Quantitative thermografische Prüfungen sind aufwendiger als qualitative, da sie ausreichende Informationen über Materialparameter (Emissionsgrad etc.) und Umgebungsparameter (Umgebungstemperatur usw.) voraussetzen. In Ergänzung zu den Kriterien die für die qualitative und vergleichende Thermografie genannt sind, muss bei der quantitativen Auswertung weiter beachtet werden: A) Wahl des geeigneten Temperatur-Messbereiches; B) Wahl des geeigneten Spektralfilters (zur Anpassung an spektrale Besonderheiten des Prüfobjektes), C) Einstellung der korrekten Mess-Parameter (Emissionsgrad, Umgebungstemperatur usw.).

8.8 Prüfbericht

Nach Durchführung thermografischer Untersuchung und deren Auswertung muss ein ausführlicher thermografischer Bericht mit Angabe aller relevanten Parameter und Erkenntnissen erstellt werden.¹²⁸ Ein solcher Bericht, hier als Beispiel für die Prüfung an einem Gebäudeteil, muss folgende Angaben enthalten:

- a) eine Beschreibung der Prüfung unter Verweis auf diese Norm mit Angabe, dass Prüfung mit einer IR-Kamera durchgeführt wurde, den Namen des Auftraggebers, dessen Anschrift und Angabe des Prüfgegenstandes;
- b) eine kurze Beschreibung der Art und Konstruktion des Gebäudes (diese Information sollte durch Zeichnungen, Fotografien, oder andere verfügbare Unterlagen belegt sein);
- c) Art(en) des (der) im Bauwerk verwendeten Oberflächenwerkstoff(werkstoffe) und geschätzter (geschätzte) Wert(e) des Emissionsgrades dieses (dieser) Werkstoffs (Werkstoffe);
- d) Orientierung des Gebäudes, bezogen auf die Himmelsrichtungen, dargestellt in einem Plan, und eine Beschreibung der Umgebung (Gebäude, Vegetation, Landschaftsmerkmale usw.);
- e) Spezifikation der verwendeten Geräte, Fabrikat Modell und Seriennummer-, Datum und Uhrzeit der Prüfung;
- f) Außenlufttemperatur. Es sind mindestens die beobachteten Mindest- und Höchstwerte während der 24h vor und während der Untersuchung anzugeben,
- g) allgemeine Angaben zur Sonneneinstrahlung, beobachtet während der 12h vor Beginn und während der Untersuchung;
- h) Niederschlag, Windrichtung und Windgeschwindigkeit während der Untersuchung;
- i) Innenlufttemperatur und Lufttemperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite der Umschließungsfläche während der Untersuchung;
- j) Luftdruckdifferenz zwischen der windab- und windzugewandten Seite, gegebenenfalls für jedes Geschöß;
- k) weitere die Ergebnisse beeinflussende wesentliche Faktoren, zum Beispiel schnelle Änderungen der Witterungsbedingungen;
- l) Angabe aller Abweichungen von den vorgegebenen Prüfanforderungen;
- m) Skizzen und/oder Photographien des Gebäudes mit den Positionen der Thermogramme;
- n) Thermogramme mit Angabe der aus der Prüfung erhaltenen Temperaturpegel, die Teile des Gebäudes zeigen, bei denen Fehlstellen nachgewiesen wurden, mit Angaben ihrer jeweiligen Positionen und der Position der IR-Kamera, bezogen auf das Messziel, und mit Bemerkungen über das Aussehen der Wärmebilder; falls möglich mit Verweisung auf Teile der Gebäudehülle mit akzeptablen Eigenschaften;
- o) Identifikation der untersuchten Gebäudestelle;
- p) Analyseergebnisse, die sich mit Art und Umfang jedes beobachteten Konstruktionsmangels befassen. Relativer Umfang der Fehlstelle durch einen Vergleich des Fehler behafteten Teils der Gebäudehülle mit gleichartigen fehlerfreien Teilen des Gebäudes;
- q) Ergebnisse von ergänzenden Messungen und Untersuchungen;
- r) Prüfdatum und Unterschrift.

¹²⁸ DIN 13187 : Mai 1999, S. 8-9.

9 Anwendung

Während im industriellen Bereich meist aktive thermografische Verfahren zur Produktionskontrolle eingesetzt werden, finden Verfahren der passiven Thermografie häufig Anwendung im Bauwesen und in der Denkmalpflege.

„Bei thermografischen Untersuchungen im nichtstationären Zustand [aktive Thermografie] ist die räumliche Auflösung der thermischen Abbildung von unterschiedlichen Strukturen im Inneren des Bauteils meist größer als bei Untersuchungen im stationären Zustand [passive Thermografie], und Untersuchungen im nichtstationären Zustand bieten auch die Möglichkeit zur Ermittlung der räumlichen Ausdehnung und der Überdeckung der Strukturen.“¹²⁹

9.1 Bauwesen und Denkmalschutz

Seit Jahrzehnten wird die Infrarotthermografie zur Qualitätssicherung und Sanierungsplanung bei Gebäuden eingesetzt, zur Überwachung der Bauausführung zur Schadenserkennung und bei Untersuchung von Schäden an Altbauten (Denkmalpflege). Hier stehen eine gezielte Fehlerortung und Schadenminimierung im Vordergrund. Erkenntnisse über Fehler und Schwachstellen bieten klare Planungsgrundlagen für den wirtschaftlichen Einsatz finanzieller Mittel. So ermöglicht zum Beispiel eine schnelle und exakte Ermittlung von Fehlern bei Rohrleitungsschäden eine Unterscheidung zwischen Haupt- und Lateralschäden und damit eine gezielte Instandsetzung. Im Denkmalschutz können Ablösungen mit Thermografie-Aufnahmen erkannt und Maßnahmen zur Erhaltung geplant werden.

Da der Einsatz der Thermografie unter ungünstigen Witterungsverhältnissen und durch Staub und Schmutz beeinflussten Bedingungen an Baustellen schwieriger als unter Laborbedingungen ist, sind lokale Messungen nicht einfach. Die Messungen wurden zusätzlich erschwert durch den Umstand, dass die meisten Thermografiekameras mechanisch oder mit Stickstoff gekühlt werden müssen. Heute gibt es speziell für die Anwendung auf Baustellen konstruierte Kameras, die kostengünstig, schnell und einfach zu bedienen sind und genaue Messergebnisse liefern.

In der Bauwerksdiagnostik werden überwiegend Materialien mit hoher Strahlungsleistung untersucht, besonders im Wellenlängenbereich von 8-12 μm , deren Strahlung nicht im sichtbaren IR-Wellenlängenbereich emittiert wird und deren Temperatur meistens im Bereich von 0°C bis 50°C angesiedelt ist.¹³⁰

Die Energieeinsparverordnung ENEC 2002 hat neue Maßstäbe für Wärmedämmung und Luftdichtigkeit von Gebäuden gesetzt. In diesem Zusammenhang kommt der Thermografie zukünftig sowohl in der Qualitätssicherung als auch bei der Abnahme von Neubauten eine größere Bedeutung zu. Eine sehr gute Bewertung der Bauausführung und eine Bestimmung von thermischen Schwachstellen lassen sich durch eine Kombination von IR-Thermografie mit einem Blower-Door-Test erreichen.¹³¹ Soll bei der Thermografie eine Lokalisierung von Luftströmungen untersucht werden, muss die Druckdifferenz zwischen Innen und Außen mindestens 5Pa betragen. Die Untersuchung muss von der Seite mit dem geringeren Druck

¹²⁹ Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) : Berlin 1993, S. 2-3.

¹³⁰ Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. 1993, S. 1-2.

¹³¹ Blower-Door-Test: „Hierbei wird der Luftvolumenstrom gemessen, der erforderlich ist um einen Differenzdruck zwischen einem Innenraum und der Umgebung aufrecht zu halten. Hierzu wird ein drehzahl geregelter Ventilator mit einem Spannrahmen in eine Raumöffnung (Tür oder Fenster) montiert. Der Volumenstrom des Ventilators wird gemessen. Für einen Über- bzw. Unterdruck von $\Delta p \pm 50$ Pa ergibt sich der Wert V50. Bezieht man diesen Wert auf das Raumvolumen VR erhält man die volumenbezogene Luftdurchlässigkeit $n_{50} = V50/VR$. Zur Erhöhung der Genauigkeit wird der Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung gebildet und der Volumenstrom bei verschiedenen Druckdifferenzen gemessen. Zusätzliche Informationen zur Ortung von Undichtheiten des Gebäudes liefert die Kombination der Blower-Door-Messungen und der Infrarotthermografie. Voraussetzung ist eine genügend große Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außenluft (z. B. im Winter). Wird im Raum ein Unterdruck erzeugt, strömt Außenluft durch die Lecks in den Raum und kühlt die entsprechenden Wandbereiche ab. Dieser Effekt kann dann mit den Infrarotaufnahmen sichtbar gemacht werden.“ (Quelle: URL : <http://www.tu-cottbus.de/AngewandtePhysik1/tracer.htm>).

durchgeführt werden. Die Prüfflächen sollten möglichst frei sein, da z. B. Möbel oder Bilder das Ergebnis beeinflussen könnten.

9.2 Feuchtigkeit und Schimmelbefall

Durch Einsatz falscher Materialien, falscher Konstruktion oder durch fehlerhafte Verarbeitung kann es durch Temperaturunterschiede auf Wandoberflächen bei Wasserdampf gesättigter Raumluft zur Unterschreitung des Taupunktes innerhalb eines Raumes führen. Das heißt, dass die Raumluft an dieser Stelle kondensiert und große Flächen durchfeuchtet und neben Ausblühungen und Kristallisation auch Schimmelbildung hervorrufen kann.¹³²

Moderne Thermografiekameras zeigen die betroffenen Stellen im Vergleich mit der Umgebung an, so dass drohende Gefahr erkannt und abgewendet werden kann. Sind Abdichtungen fehlerhaft ausgeführt oder beschädigt worden, so können sie durch die genaue Lokalisierung von Kältebrücken, Schallbrücken und Luft-Undichtigkeiten nachgewiesen werden. Dazu wird IR-Thermografie, wenn es möglich ist, von innen und außen angewandt.

Weiter können Heizungs-, Wasser- oder Abwasserleitungen unter Putz- oder Wandverkleidungen geortet und Defekte sichtbar gemacht werden. Lage und Größe von Dachschäden und Schäden der Gebäudehülle, sowie feuchte Stellen bei an das Erdreich angrenzenden Bauteilen (durch Kapillarwirkung vom Erdreich aufsteigende Feuchtigkeit bei fehlender Horizontalsperre) erkannt werden.

Mit Hilfe der Thermografie lässt sich (auch unter Fliesen und Kacheln) beurteilen, ob ein Nässeschaden von einer defekten Leitung oder durch frei eindringendes Wasser verursacht wird.¹³³ Beschädigungen, fehlerhafte Ausführungen oder Dimensionierung von Wärmedämmung der Gebäudehülle können auf einfache und unmittelbare Weise sichtbar gemacht werden (Türen, Rollläden, Kamine an Außenwänden, Dachkonstruktionen, ungedämmt in Außenmauerwerk eingreifende Innenwände und Decken, unzureichend gedämmte Heizkörpernischen, usw.).

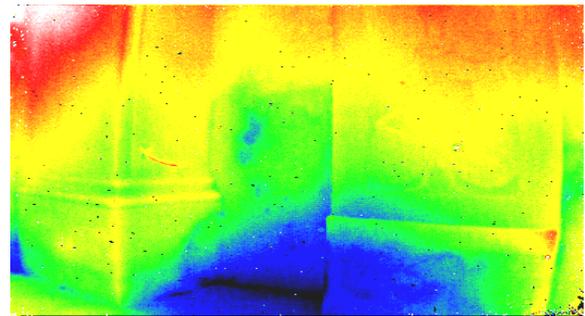


Abb. 18: Durchfeuchtung von Mauerwerk. Kapillaraktivität durch fehlende Horizontalsperre hervorgerufene Durchfeuchtung von unterem Wand- und angrenzenden Fußbodenbereichen, mit passiver Thermografie im Falschfarbendiagramm als Temperaturabnahme erkennbar.
(Quelle: HOTTER 2003, S. 61)

¹³² „Zum Feuchtigkeitsnachweis wird der Effekt ausgenutzt, daß Wasser die Infrarotstrahlung in bestimmten Frequenzbereichen absorbiert und sich damit auch der Reflexionskoeffizient der Oberfläche ändert. Reduziert man den Frequenzbereich der Strahlung einmal auf den Bereich dieser Wasserabsorption (2000nm bis 5000nm) und benutzt eine Referenzaufnahme in einem größeren Frequenzbereich (2000nm bis 12000 nm), so lassen sich trockene und feuchte Bereiche unterscheiden. Evtl. sind auch quantitative Angaben über die Verteilung der Oberflächenfeuchte möglich. Die bisher vorliegenden Versuchsergebnisse zur Kalibrierung reichen aber noch nicht aus. Für das Verfahren liegen vorwiegend Laborerfahrungen vor, für eine praktische Anwendung bei Feldmessungen bedarf es noch einer gezielten Entwicklung. Für die Feuchtemessung in Baustoffen und anderen Werkstoffen findet auch das Verfahren der Infrarot-Reflektometrie ohne bildgebende Darstellung Anwendung. Solche Geräte sind auf dem Markt erhältlich und im Feuchtebereich von 0 bis 10% einsetzbar.“... (Quelle: URL : http://www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompodium/geraete/g037/g037_3.html).

¹³³ URL : <http://www.thermografie.de/bauwesen.htm>

Die Abbildung 19 zeigt das Thermogramm einer passiven Thermografie nach starker Sonnenbestrahlung, Falschfarbenbild (links) und Fotografie (rechts). Sichtbar sind sehr unterschiedliche Temperaturbereiche: im Sockelbereich starke Durchfeuchtung bis zu einer Höhe von 80cm, zwischen beiden Fenstern bis zu 100cm, sehr kalter Bereich unterhalb des rechten Obergeschossfensters, gemalte Fensterrahmung (rechts) zeigt sich im Thermogramm aufgrund eines anderen ϵ -Wertes als ein eigener Farbbereich.

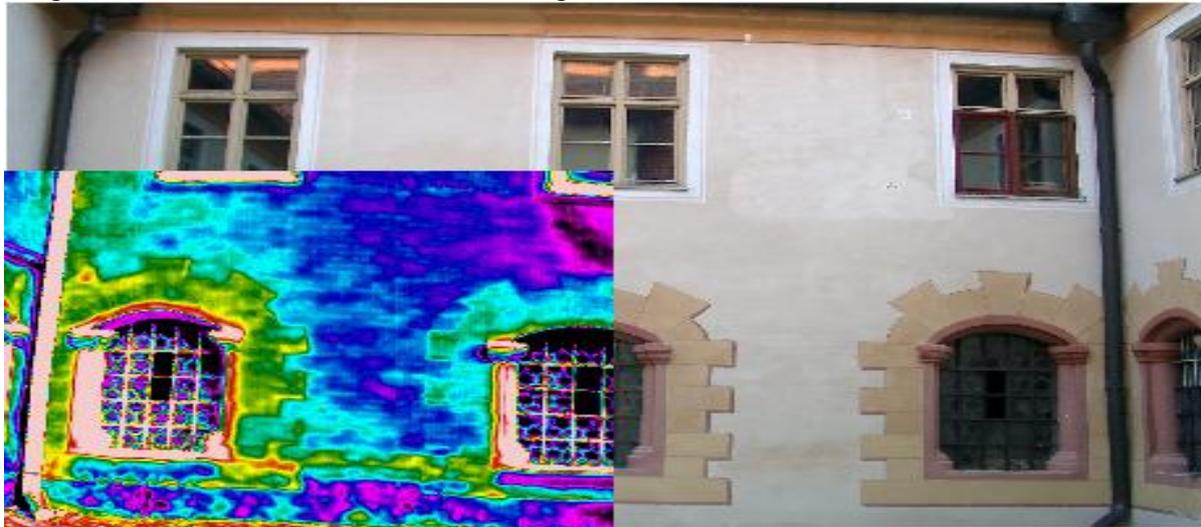


Abb. 19: Feuchtebelastung der Westfassade des Innenhofes, Klosteranlage Beyharting.
(Quelle: HOTTER 2003, S. 1)

Thermogramm Abb. 20 visualisiert die Feuchtebelastung im Treppenhaus eines Schlosses hinter einer Wandvertäfelung. Mögliche Ursachen: erhöhte Feuchtigkeitsbelastung von außen, Materialfehler, fehlende Luftzirkulation im Eckbereich.

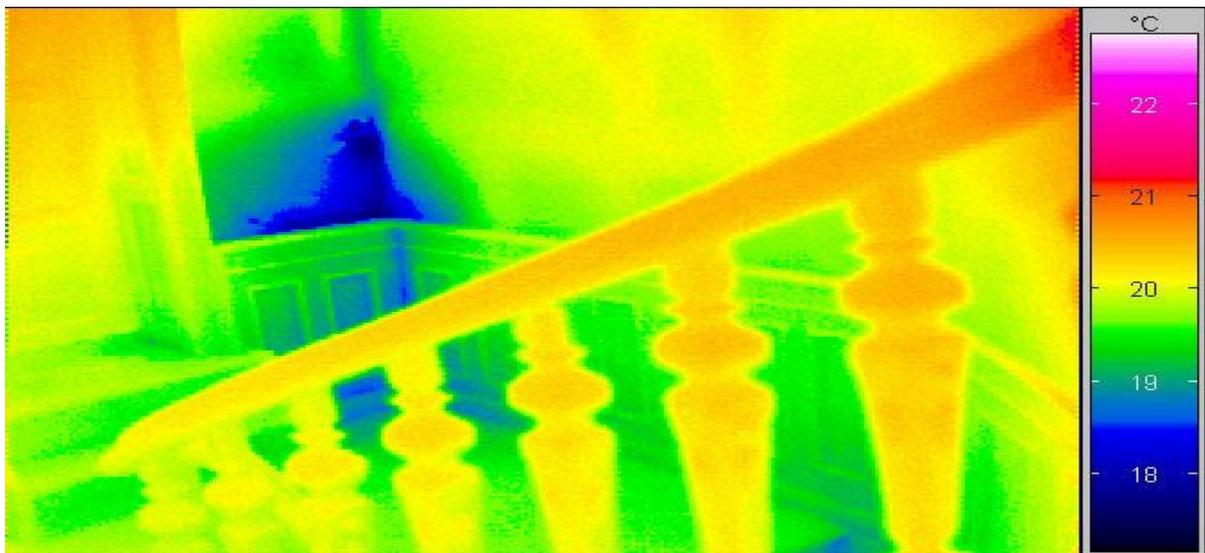


Abb. 20: Feuchtebelastung.
(Quelle: URL : <http://www.fh-jena.de/fh/fb/gw/forschung/otto/bauwesen.html>)

Thermogramm Abb. 21 verdeutlicht eine deutliche Temperaturerhöhung im Übergang von Deckenbalken zu Sparren, hervorgerufen durch unsachgemäße Abdichtung an den Holzelementen. Von unten dringt warme Luft ein, führt zu Schimmelbefall und kann Holzfäule verursachen.

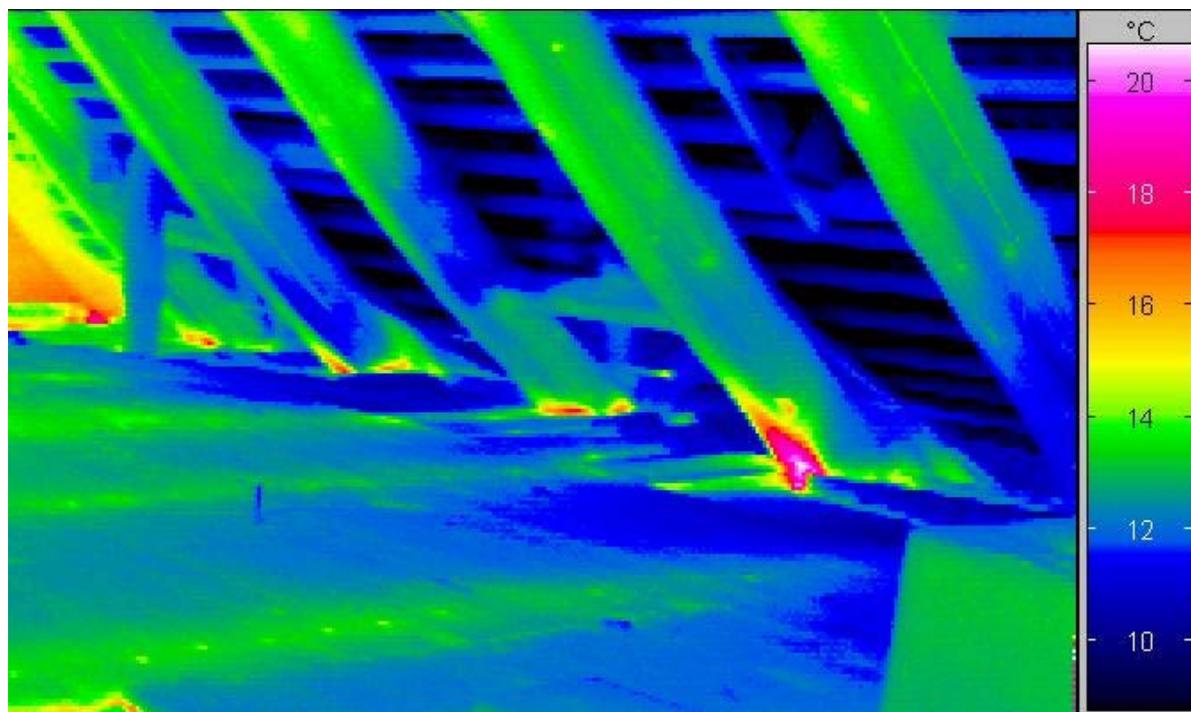


Abb. 21: Schimmelbefall Dachstuhl.
(Quelle: URL : <http://www.fh-jena.de/fh/fb/gw/forschung/otto/bauwesen.html>)

9.3 Fachwerk

Ein typischer Einsatz der IR-Thermografie im Bereich der Denkmalpflege ist seit Jahrzehnten das Auffinden von Fachwerk unter verputzten Fassaden. Dadurch lassen sich die Konstruktion der Fassade, die Dimensionierung und das Fehlen von Fachwerkteilen, sowie die Art der Ausfachungen zerstörungsfrei erkennen. Es lassen sich aber auch Putzablösungen und Tauwasserbildung hinter verputzten Gebäudeteilen sowie verborgene Maueranker, offene Stoßfugen oder Mauerwerk aus unterschiedlichen Materialien (zugemauerte Türen oder Fenster) erfassen.¹³⁴

Abbildung 48 zeigt die Überlagerung von Fotografie und Thermogramm und verdeutlicht wie unter dem Putz verborgene Fachwerkstrukturen sichtbar gemacht werden können.



Abb. 22: Fachwerk unter Putz.
(Quelle: http://bautrocknung.de/_Bautrocknung/_messtechnik/_agema_470.htm)

¹³⁴ URL : <http://www.bfbk.de/leirthe.htm>

Unter der Voraussetzung, dass die Oberflächentemperatur einer Fassade überall gleichmäßig ist, lassen sich unterschiedliche Materialien kenntlich machen, in diesem Fall Kalk- und Sandstein.

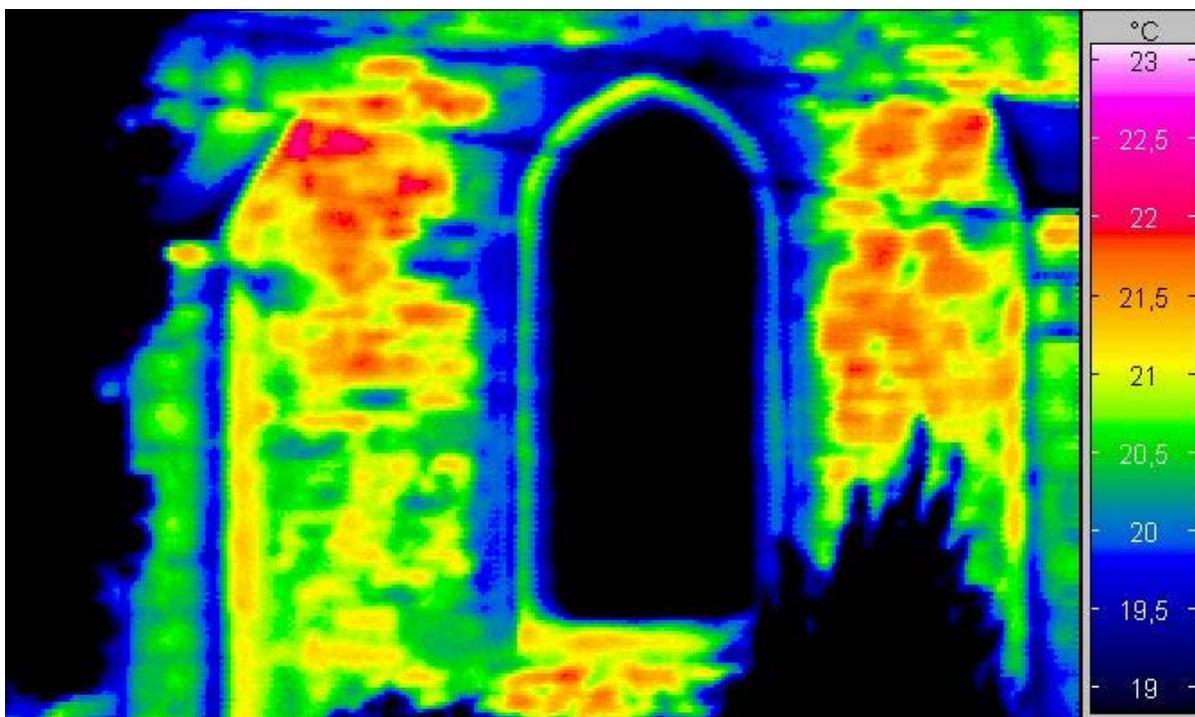


Abb. 23: Außenfassade einer Kirche
(Quelle: URL: www.fh-jena.de/fh/fb/gw/forschung/otto/bauwesen.html)

9.4 Thermografische Messungen an Gebäuden

Bei Messungen lassen sich Genauigkeiten der ermittelten Oberflächentemperatur von annähernd 0,5 K erreichen, abhängig von Randbedingungen und der Kenntnis der Emissionskoeffizienten der betrachteten Fläche.

„Bei Bauwerken aus nur einem Material wird im Allgemeinen ein konstantes ϵ angenommen, so daß das Thermobild direkt die thermischen Eigenschaften, sprich die Wärmedämmung, widerspiegelt.“¹³⁵

Die Emissionsgrade von Baumaterialien lassen sich grob in fünf Gruppen einteilen: Naturstein, Ziegel, Metall, Glas und Holz. Die Materialien haben unterschiedliche Emissionsgrade und Wärmeleitfähigkeiten, innerhalb einer Materialgruppe sind die Unterschiede aber gering. Wo es notwendig ist, sollte der Emissionsgrad des Oberflächenmaterials anhand der existierenden Tabellen abgeschätzt werden. Die Emissionsgrade für die klassischen Baumaterialien mit diffus reflektierenden Oberflächen streuen stark. Für die Streuung kann mit guter Näherung $\epsilon = (0,90 \pm 0,05)$ angenommen werden.¹³⁶

Ein Hauptproblem aller Thermografieaufnahmen liegt in der Auswertung der Abbildung von Gebäudeteilen die aus unterschiedlichen Materialien zusammengesetzt sind, da Thermografiebilder normalerweise von einem konstanten Emissionskoeffizienten ausgehen. In einem solchen Bild sind die Auswirkungen unterschiedlicher Temperatur und unterschiedlicher Emissionsgrade nicht eindeutig zuzuordnen. Es kann eine qualitative Auswertung durchgeführt werden, aber ohne die Kenntnis der verschiedenen Emissionsgrade kann keine eindeutige, absolute Temperaturinformation gewonnen werden

¹³⁵ KARSTÄDT; MÖLLMANN; PINNO; VOLLMER 1998, S. 66.

¹³⁶ Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) : Berlin 1993, S. 8.

und damit keine quantitative Auswertung solcher Aufnahmen erfolgen. Sollen wahre Oberflächentemperaturen verschiedener Baustoffe verglichen werden, müssen die verschiedenen Emissionskoeffizienten beachtet werden.

Mehrschalige Außenwände können nicht thermografiert werden.

Bei Untersuchungen an Gebäuden mit Hilfe von passiven Thermografieverfahren sollte die Innentemperatur gleichmäßig sein und die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen mindestens 10 K betragen, ideal ist eine Temperaturdifferenz ΔT von ca. 20 K zwischen Innen- und Außen. Eine Beheizung von mindestens 24 h ist als Vorbereitung ratsam, dass Thermografien bevorzugt in der kalten Jahreszeit¹³⁷ durchgeführt werden sollten.¹³⁸

Da es sich bei Thermografiebildern immer um die Momentaufnahme des thermischen Zustandes einer Gebäudehülle handelt, erfordert es Erfahrung, Störeinflüsse von Sonnen- und Globalstrahlung, Reflexion von Objekten aus der Umgebung, Verschattung, Schnee, Nebel und Regen (Relative Luftfeuchtigkeit), Windgeschwindigkeit oder Temperaturwechsel der Außenluft soweit wie möglich zu vermeiden und eine entsprechend geeignete Aufnahmezeit zu wählen, abhängig von der Tageszeit, z. B. nachts oder am frühen Morgen bei gleichmäßig tiefen Außenlufttemperaturen.¹³⁹

Thermografische Messungen bei stark variierender Sonneneinstrahlung führen aufgrund wiederholter Aufheiz- und Abkühlprozesse zu eben so schnell variierenden Thermografieaufnahmen. Aussagen über oberflächennahen Strukturen mit unterschiedlicher Speicherfähigkeit lassen sich daher nicht zuverlässig machen.

Allgemein gilt, dass Untersuchungen zur Entdeckung von Fehlerstellen unter dem Putz bei Sonneneinstrahlung stark gestört werden können. Die Fassade wird zwar genügend stark aufgeheizt, Wind oder Verschattung können jedoch leicht Änderungen in der Temperaturverteilung bewirken, die in der Größenordnung liegen, die normalerweise die Fehlerstellen selbst bewirkt hätten.

Daher gilt es z. B. Messungen an wechselhaften warmen Sommertagen möglichst zu vermeiden. Wenn im Sommer und in den Übergangszeiten innen und außen während des ganzen Tages nur geringe Temperaturunterschiede herrschen, kann jedoch unter Abwägung aller Umstände, an Tagen ohne starke Veränderung der Einstrahlung, nach den ersten 2-3 Stunden Aufwärmzeit (nach Sonnenaufgang oder nach Abzug von Bewölkung) gemessen werden.

In der Literatur¹⁴⁰ werden fünf „Repräsentative Tageskategorien“ bezüglich der Umgebungsparameter genannt, in Hinblick auf Temperaturunterschiede Innen und Außen, sowie Sonneneinstrahlung auf die zu untersuchende Fläche.

1. Winter, bedeckt

- hoher Temperaturunterschied zwischen innen und außen
- niedrige Einstrahlung

2. Winter, klar

- hoher Temperaturunterschied zwischen innen und außen
- hohe Einstrahlung, ohne starke Schwankungen über den Tag

3. Winter, wolzig

- hoher Temperaturunterschied zwischen innen und außen
- hohe Einstrahlung, mit starken Schwankungen über den Tag

4. Sommer, klar

¹³⁷ „Trotzdem führten die Untersuchungen, die in der Regel unter erschwerten Bedingungen im Winter durchgeführt wurden, in etwa 20 % der Fälle zu keinem aussagekräftigen Ergebnis.“ (Quelle: RAICU 1999, S. 3).

¹³⁸ URL : www.bpy.uni-kassel.de/de/lehre/messtechnik.pdf

¹³⁹ URL : www.bpy.uni-kassel.de/de/lehre/Bauschaeden.pdf

¹⁴⁰ RAICU 1999, S. 17.

- geringer Temperaturunterschied zwischen innen und außen
- hohe Einstrahlung über den Tag

5. Sommer, bedeckt

- geringer Temperaturunterschied zwischen innen und außen
- niedrige Einstrahlung über den Tag

Kurzwellige Kameras (SW-Bereich 2-5 μm) werden bei thermografischen Messungen im Außenbereich wesentlich stärker durch Sonnenreflexionen gestört als langwellige Kameras (LW-Bereich 8-12 μm), weil von der Sonne deutlich mehr Strahlung im sichtbaren Bereich abgegeben wird.

Bei Regen oder hoher Luftfeuchtigkeit sollten Messungen nicht durchgeführt werden, denn auch bei langwelligen Kameras, die im Bereich des atmosphärischen Fensters (8-14 μm) arbeiten, wird Strahlung von Wassermolekülen absorbiert. Außerdem kann ein Wasserfilm auf der zu vermessenden Fläche zu einer Veränderung des Emissionsgrades und damit zu einer verfälschten, höheren Temperaturmessung führen. Auf der anderen Seite können zu tiefe Temperaturen gemessen werden, wenn verdunstende Wassertropfen der Oberfläche Wärme entziehen.¹⁴¹ Der große Vorteil von IR-Kameras gegenüber anderen Systemen liegt darin, dass hierbei ganze Flächen erfasst und beurteilt werden können, und es sich somit nicht um eine punktförmige Messung handelt. Es ist ratsam zusätzlich zur Gesamtaufnahme von Gebäudeteilen weitere Detailaufnahmen thermischer Schwachstellen aufzuzeichnen.

Windströmungen können auf einer Oberfläche in Verbindung mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten ungleichmäßige Temperaturverteilungen hervorrufen. Bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s ist der Einfluss noch nicht sehr groß.

„Die genannten meteorologischen Einschränkungen bei der Durchführung von Thermographieaufnahmen haben einen erheblichen Zeit- und Personalaufwand zur Folge, der sich naturgemäß in Kosten niederschlägt. Automatisierte Auswertung von Thermogrammen sind nicht möglich. Vielmehr bedarf es großer Fachkenntnisse für die exakte Deutung von Thermogrammen.“¹⁴²

Bei Untersuchungen an Fassaden mit Hilfe von aktiven Thermografieverfahren wird häufig die Impuls-Thermografie angewandt. Dazu werden Teile einer Wand über eine längere Zeitspanne mit Lampengruppen aufgeheizt und danach das Abkühlverhalten thermografisch untersucht. Zunächst stellen sich kurz nach einer intensiven Aufheizung die Fehler nahe der Oberfläche durch erhebliche Temperaturunterschiede dar, weil der Wärmefluss an der Oberfläche sehr groß ist. Das führt zu einem unregelmäßigen Erscheinungsbild der Wand und es kann schwer werden gravierende Dämmfehler von kleinen Oberflächenabweichungen zu unterscheiden. Daher ist es ratsam über längere Zeit aufzuheizen, um in tiefere Schichten vorzudringen.

Wird beispielsweise die ordnungsgemäße Verlegung von Dämmplatten untersucht, so zeigen sich zu Beginn Lücken oder Mörtelfugen dunkler als die Dämmplatten ab. Nach einer gewissen Zeit ändert sich das Temperaturbild und der Effekt von Speichermassen (Mörtelfugen) macht sich bemerkbar, indem diese langsamer abkühlen als die Umgebung. Im Zeitverlauf der Beobachtung gibt es also einen („Nulldurchgang“), von kälter als die Umgebung zu wärmer als die Umgebung. Zu diesem Zeitpunkt unterscheiden sich die Fehler nur wenig von ihrer Umgebung. Aus dieser Tatsache lassen sich jedoch keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen ziehen. Die Ergebnisse sind abhängig von der Bestrahlungsleistung, vom untersuchten System, vom Wärmeübergang, usw. In der Praxis ist es ratsam eine Serie von Aufnahmen während der Abkühlphase zu machen und

¹⁴¹ URL : http://www.zds-chornsteinfeger.de/Hefte2001/Heft_Februar_2001/Aktuelles02/Leitartikel02/Technik02/thermotechnik02.html

¹⁴² URL : www.bpy.uni-kassel.de/de/lehre/Bauschaeden.pdf

Schlussfolgerungen aus der gesamten Messreihe zu ziehen. Ähnliche Beobachtungen beim Abstrahlverhalten („Nulldurchgang“) können auch bei Besonnung registriert werden.

9.5 Bewertungskriterien / Untersuchungsergebnisse

Untersuchungsergebnisse werden in Form von Thermogrammen wiedergegeben, wobei in Abhängigkeit der Einstellung des Temperaturbereiches an der Kamera blaue Bereiche Gebäudeteile mit niedriger Temperatur und rote Gebäudeteile mit höherer Temperatur darstellen. Bei Außenaufnahmen wird durch die blauen Bereiche ein geringerer und durch die roten Bereiche ein höherer Wärmedurchgang angezeigt. Bei Thermogrammen, die von Innen aufgenommen wurden, ist das Gegenteil der Fall.¹⁴³ Farbwechsel auf einer thermografischen Aufnahme können sowohl auf Temperaturwechsel als auch auf Materialwechsel an der Oberfläche hinweisen.¹⁴⁴

Um zu beurteilen, ob beobachtete Veränderungen von Wärmeschutzeigenschaften anormal sind oder nicht, werden die auszuwertenden Thermogramme mit der erwarteten Verteilung der Oberflächentemperatur verglichen, in Abhängigkeit von den Entwurfsdaten des Gebäudes (Zeichnungen, Materialien, Heizanlage, usw.) und der zum Zeitpunkt herrschenden Umgebungsverhältnisse ist. Die erwarteten Temperaturverteilungen können durch entsprechende Versuchsaufbauten (Labor) kontrolliert oder durch Berechnungen ermittelt werden.

Es sind immer wieder einige charakteristische Thermogramm-Muster erkennbar. Treten in einer Gebäudehülle an Fugen oder Verbindungen Luftströmungen auf, so erzeugen sie neben großen Temperaturänderungen häufig unregelmäßige Formen mit ungenauen Grenzen. Bei fehlender Dämmung weist der fehlerhafte Bereich eine relativ ausgeglichene Temperaturänderung auf, erzeugt regelmäßige und klar ablesbare Formen, die nicht mit den typischen Merkmalen der konstruktiven Struktur verwechselt werden dürfen. Ist ein Bauteil durchfeuchtet, so treten nur geringe Temperaturänderungen auf, und in der Regel wird ein gesprenkeltes oder diffuses Muster erzeugt. Jede Fehlstelle sollte nach Art und Umfang analysiert werden.

10 Thermografie an Kunstwerken

10.1 Untersuchung eines Tafelgemäldes: Maria mit Kind und Johannesknaben

Das Tafelbild (73 · 57cm) wurde von einem florentinischen Meister in der 1. Hälfte des 16. Jahrhunderts mit Öl auf Holz gemalt. Es ist auf der Rückseite einmal unmittelbar auf der Holztafel und ein anderes Mal auf einem alten Klebezettel, der von einem fürstlichen Sammlersiegel (wohl Anfang 19. Jahrhundert) „beglaubigt“ wird, mit Andrea DEL SARTO bezeichnet (Florenz 1486 bis 1530) und trägt noch ein weiteres Sammlersiegel. Die Siegel konnten nicht gedeutet werden. Die Zuschreibung auf Andrea DEL SARTO ist wohl nicht zu halten.

Das Bild wurde auf einer zweiteiligen Tafel aus Obstbaumholz gemalt, deren senkrechte Leimfuge von hinten mit quer geleimten Klötzchen gesichert ist. Auf der Rückseite sind mehrere, meist in Richtung der Holzstruktur verlaufende Fraßgänge sichtbar. Auf der Vorderseite lässt sich die Mittelfuge deutlich erkennen. Sie ist mehrfach ausgekittet, und die Farbfassung ist an diesen Stellen retuschiert worden. Beide Hälften der Tafel haben sich verzogen. Am Rahmen kann man ablesen, dass sie nach hinten gewölbt sind.

¹⁴³ URL : http://www.koewoge-innovativ.de/messprogramm/kwg_mess_03.htm

¹⁴⁴ URL : <http://www.cwaller.de/klimaim.htm>



Abb. 24: Tafelgemälde : Maria mit Kind und Johannesknaben.

Prüfbericht

Das Tafelgemälde hängt in einem Privathaus, an einer 36,5 cm starken Außenwand aus massivem Ziegelmauerwerk, innen und außen verputzt, ohne zusätzliche Wärmedämmung. Das Gemälde ist leicht geneigt, Wandabstand unten 2 cm und oben 6 cm. Am oberen Rahmenholz ist als Beleuchtungsquelle eine mit zwei OSRAM-Lampen (2 · 25 W, 230 V, 165 lm · 1000 h) bestückte Messingsuffitte angebracht. Der Abstand der Lampen zur Gemäldeoberfläche beträgt 11cm. Vor Beginn der Messungen betrug die Oberflächentemperatur der Wand unterhalb des Bildes ca. 17°C. Mit Hilfe der Thermografie sollte der Einfluss der Bildbeleuchtung (Aufheizung und Wärmeverteilung), wie sie in vielen privaten Haushalten unkontrolliert auch bei bedeutenden Gemälden angewandt wird, untersucht werden.

Der Kameraabstand zum Gemälde betrug 2 m.

Die Innentemperatur lag bei 21°C.

Störstrahlungen waren nicht vorhanden.

Kamera:	ThermaCAM® SC500 (Flir Systems)
Field of view (min focus distance):	7° · 5,3 / (0,5 m)
Detektor:	Focal Plane Array (FPA), 320 · 240 Pixel
Wellenlängenbereich:	7,5-13 µm
(IFOV):	1,3 mrad
Thermische Auflösung (NETD):	0,03°C
Bildwiederholungsrate:	60 Hz
Video output:	14 Bit digital video
Messbereich:	-40°C bis +500°C
Messgenauigkeit:	± 2°C, ± 2%
Emissionsgrad (ε):	1
Software:	ThermaCAM® Researcher 2002
Abstand Kamera zu Kunstwerk:	2 m
Innentemperatur:	21°C
Relative Feuchte:	60%
Beleuchtung:	OSRAM-Lampen (2 · 25 W, 230 V, 165 lm · 1000 h)

Aus dem Thermogramm vor Einschalten der Beleuchtung waren keine nennenswerten Informationen zu erlangen (der Bilderrahmen und die Suffitte zeichneten sich etwas wärmer als die Bildtafel ab, die Tafel erscheint oben etwas wärmer als unten).

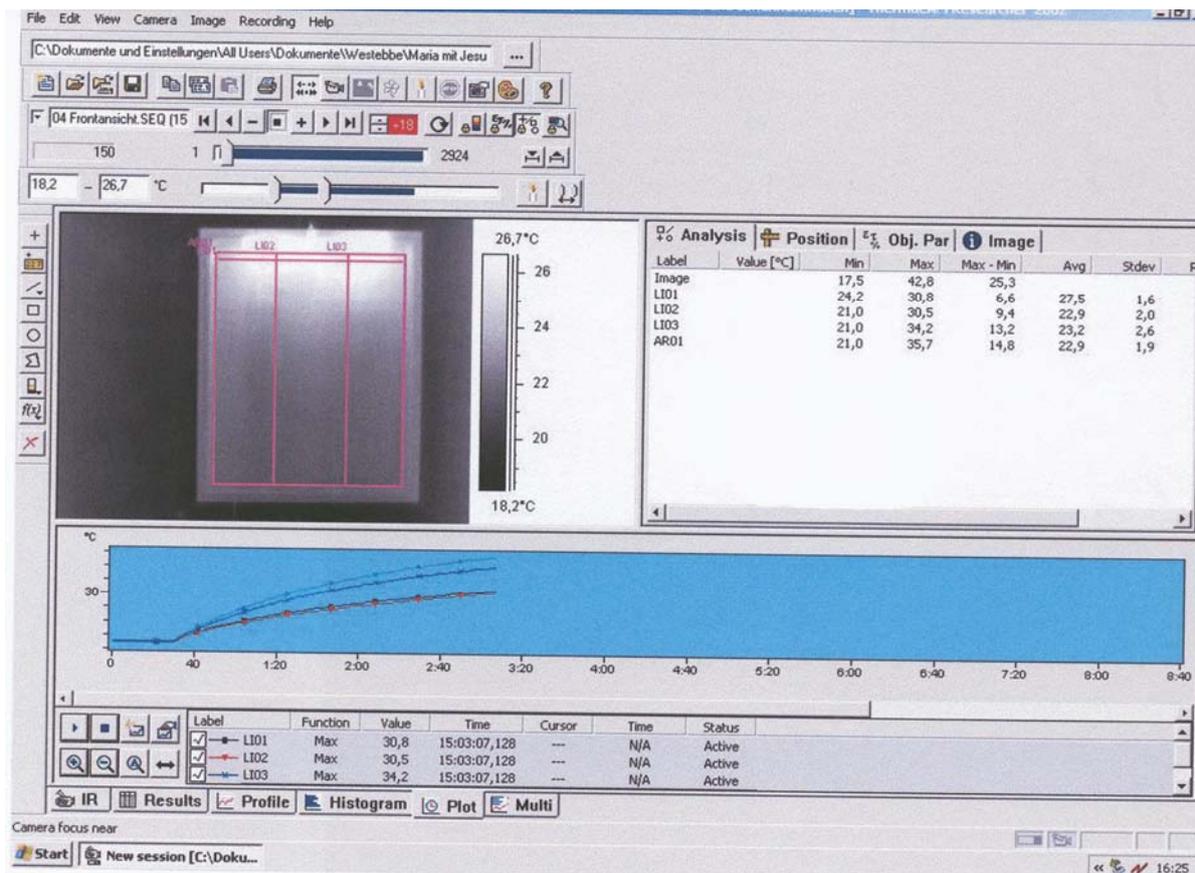


Abb. 25: Das Gesamtbild (Image), aufgenommen als 150stes Bild der Sequenz, weist nach einer Bestrahlungsdauer von ca. 2:36 min auf der Wand ein Temperaturminimum von 17,5°C auf und im Bereich der Lampe ein Maximum von 42,8°C. Im Thermogramm wird, wie auch bei den folgenden, der Temperaturverlauf an drei festgelegten Linien (LI01, LI02 und LI03) und an dem gewählten Flächenausschnitt (AR01) beobachtet. Am blauen Zeitdiagramm lässt sich ablesen, dass ab Beginn der Beleuchtung die Linien LI01 und LI02 nahezu gleichmäßig ansteigen LI01 auf 30,8°C und LI02 auf 30,5°C. Der etwas höhere Anstieg der LI03 auf 34,2°C erklärt sich aus einer leicht asymmetrischen Lampenanordnung in der Halterung. Den höchsten Temperaturanstieg, bis auf 35,7°C, weist die hellblaue Kurve auf, welche die Maximaltemperaturen im Flächenausschnitt aufzeigt. Die Temperatur bezieht sich wahrscheinlich auf eine Störstelle (Nagel) oben rechts im Thermogramm. Man kann also feststellen, dass sich nach der Bestrahlung von ca. 2:36min entlang der Linie LI01 bereits eine kräftige Temperaturerhöhung von durchschnittlich 27,5°C nachweisen lässt, die mittlere Temperaturerhöhung im gesamten Flächenausschnitt liegt bei 22,9°C.

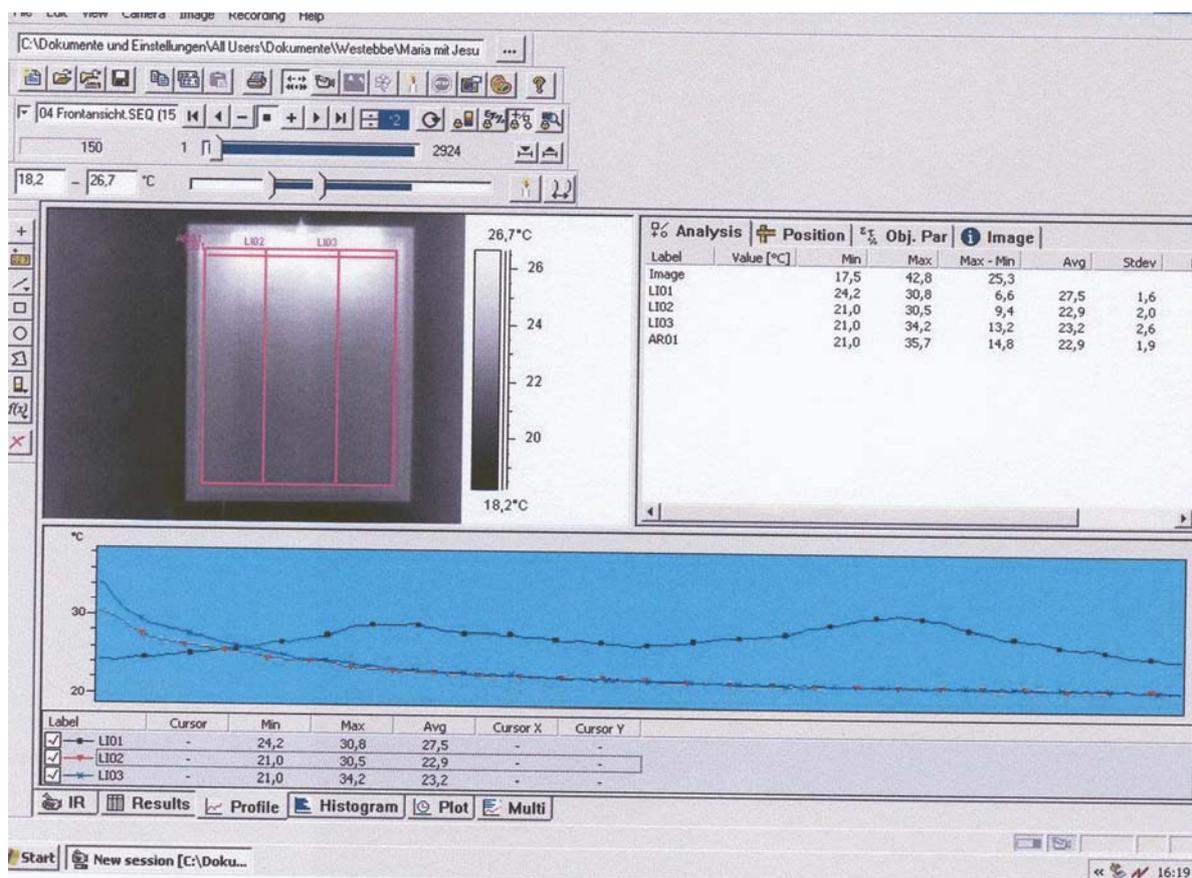


Abb. 26: Dieses Thermogramm ergänzt das vorherige, indem es den Temperaturverlauf entlang der einzelnen Messlinien darstellt. Bei LI02 und LI03 fällt die Temperatur vom oberen Bildrand ausgehend von 30,5°C, bzw. 34,2°C auf jeweils 21°C. Das heißt, dass zum Zeitpunkt der Messung entlang dieser Linien auf der Bildoberfläche von oben nach unten Temperaturdifferenzen von 9,4°C bzw. 13,2°C bestehen. Die Temperaturlinie LI01, horizontal zum oberen Bildrand, hat ihren Anfangs- und Endpunkt außerhalb des direkten Strahlbereichs der Lampen, ihre Ausgangs- und Endtemperatur liegt jeweils bei 24°C und steigt wellenartig zu den Stellen der intensivsten Einstrahlung auf ca. 29°C bis 30,8°C an. An ihr lässt sich ebenfalls ablesen, dass sich die rechte Lampe näher an der Bildoberfläche befindet und dadurch auch mehr aufheizt.

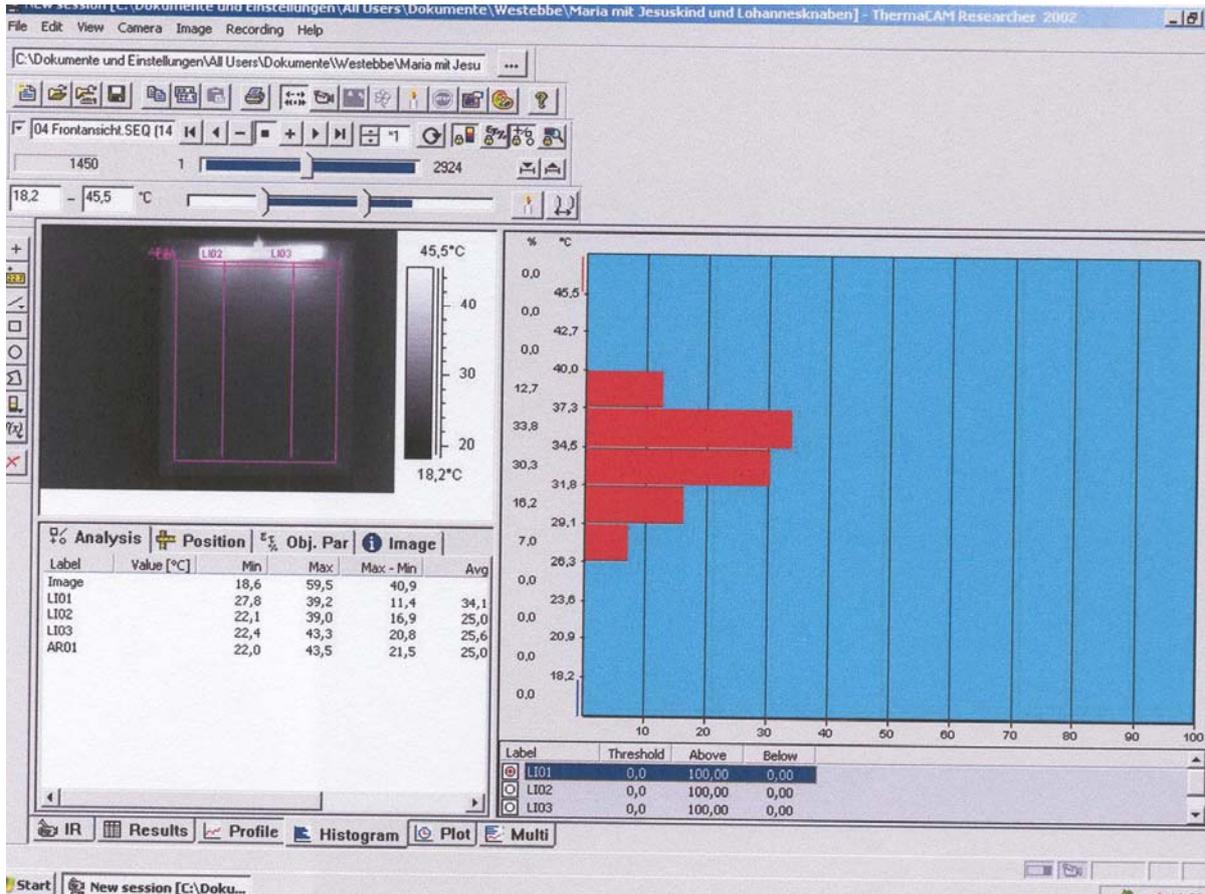


Abb. 27: Histogramm entlang der dargestellten Linien. Das zugrunde liegende Thermogramm wurde nach 26:30 min, unmittelbar nach Ausschalten der Lampen aufgenommen, als 1450ste Aufnahme der Sequenz. Die drei blauen Histogramme zeigen als Balkendiagramm die augenblickliche Temperaturverteilung, eingeteilt in Temperaturbereiche von je ca. 2,8°C entlang der festgelegten Linien (LI01, LI02 und LI03). LI01 entlang des oberen Bildrandes ist insgesamt wärmer als die beiden anderen Linien und weist ein geringeres ΔT von 11,4°C auf. Es kann festgestellt werden, dass 64,1% der Linie in einem Temperaturbereich zwischen 31,8°C und 37,3°C, also in einem Temperaturunterschied von 5,5°C liegen. Der Gesamttemperaturunterschied entlang der Linie beträgt 11,4°C. LI02 und LI03 weisen abweichende, jedoch einander ähnliche Temperaturverteilungen auf. Bei beiden Linien liegen ca. 75% der Temperaturen in einem Bereich zwischen 22,1°C und 26,3°C, also in einem Temperaturunterschied von 4,2°C. Beide weisen gegenüber LI01 größere Temperaturextreme auf, LI02 von 16,9°C und LI03 von 20,8°C. Wie zu erwarten bedeutet das für das Tafelgemälde, dass im Bereich der Lampen hohe, relativ gleichmäßige Temperaturen auftreten, die zum unteren Bildrand stark abfallen. Gegenüber der Ausgangssituation (21°C) vor Bestrahlung hat sich der untere Bildrand relativ wenig aufgeheizt, nämlich auf 22,1°C, bzw. 22,4°C, also etwas mehr als 1°C. Der obere Bildrand weist zu diesem Zeitpunkt Temperaturen bis zu 43,3°C und im Bereich der Störstelle bis zu 43,5°C, also eine Temperaturerhöhung von bis zu 22,5°C.

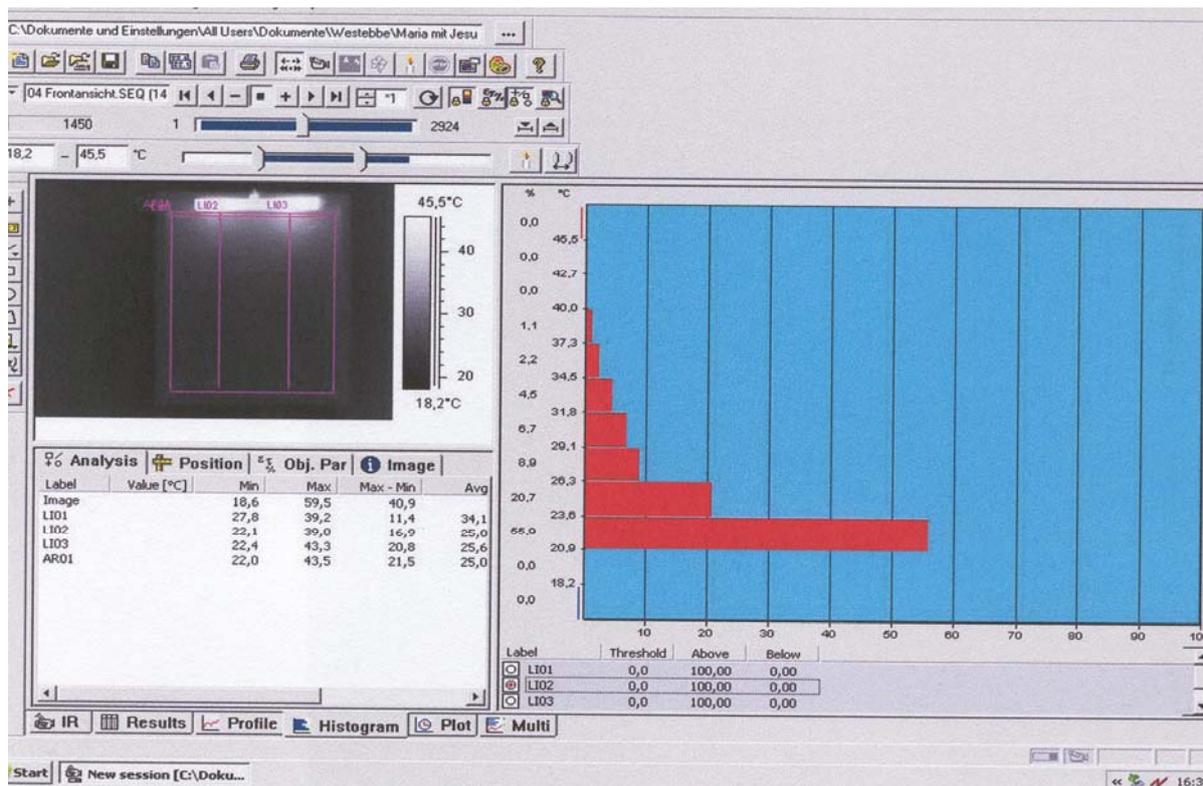


Abb. 28: Histogramm entlang der dargestellten Linien.

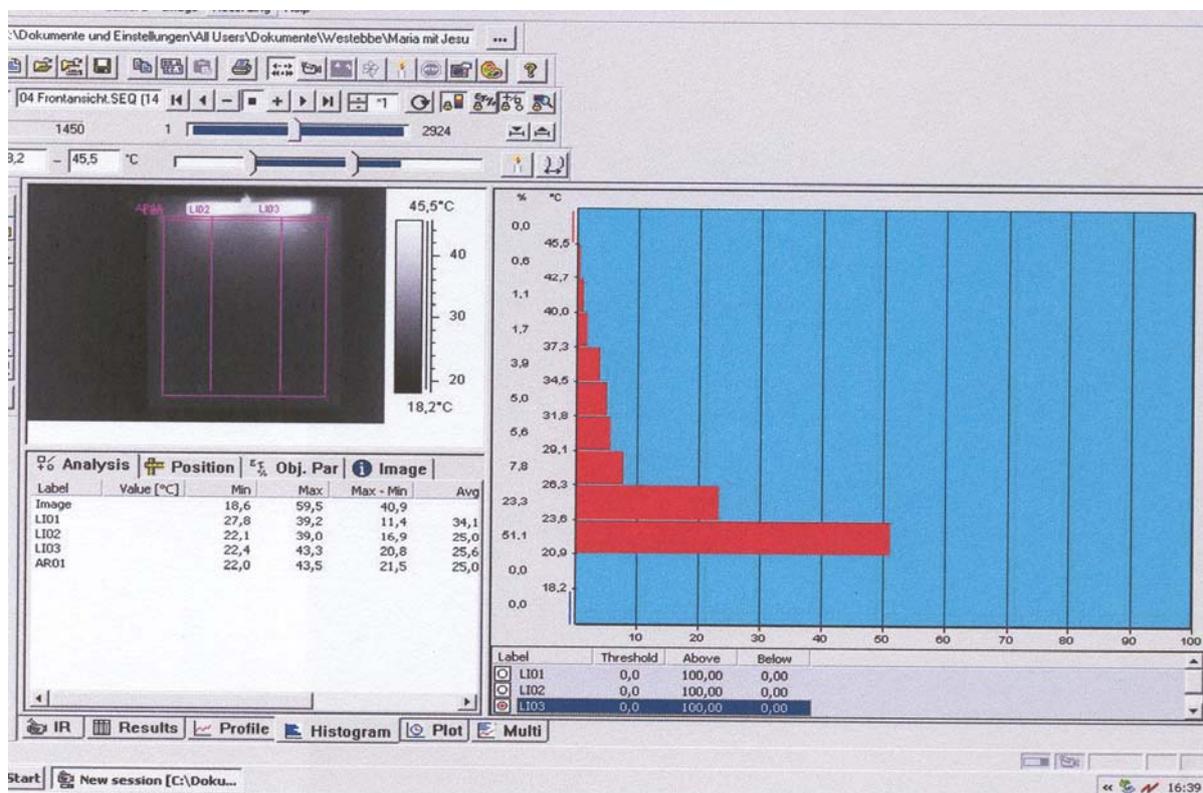


Abb. 29: Histogramm entlang der dargestellten Linien.

Die dargestellten Temperaturprofile bestätigen die Aussagen der Histogramme. Im Prinzip verlaufen die Linien ähnlich wie in Abbildung 26, lediglich parallel in höhere Temperaturbereiche verschoben.

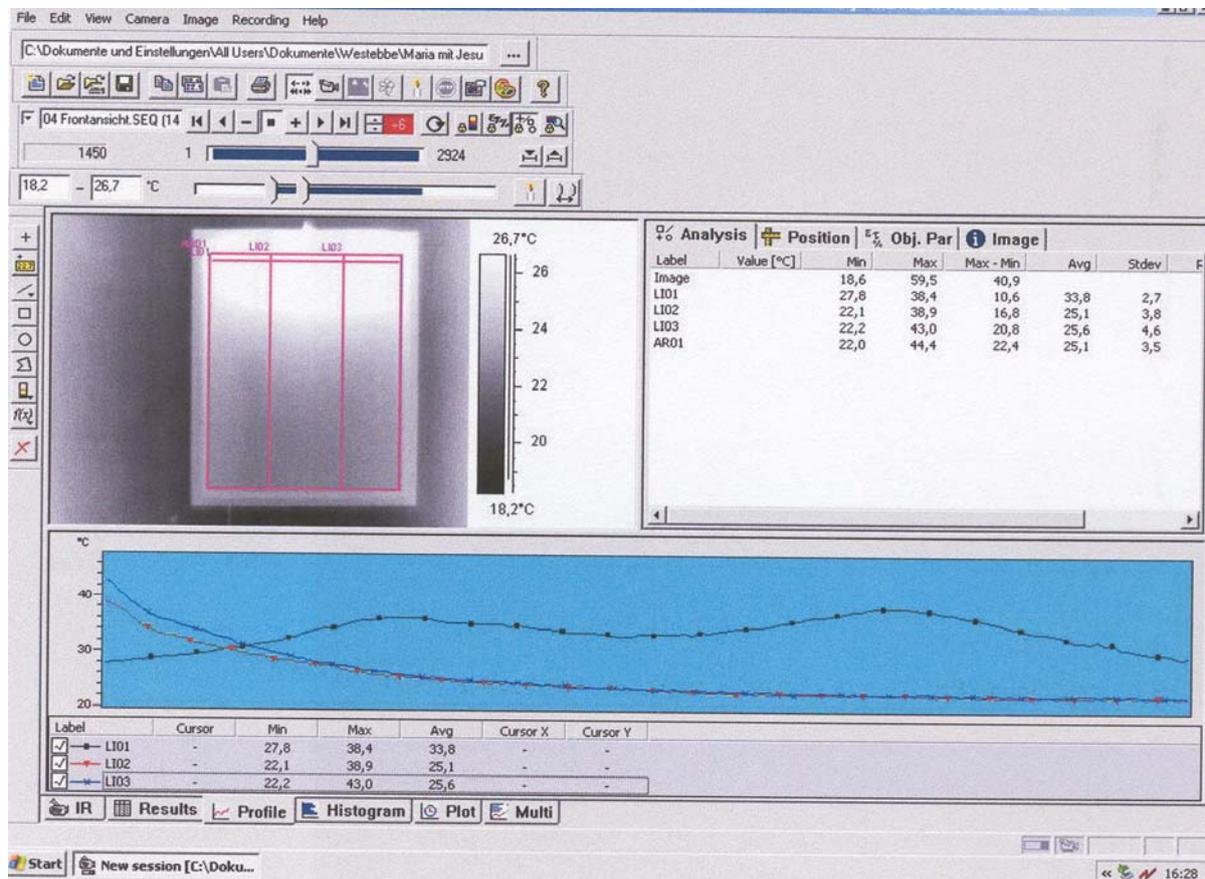


Abb. 30: Temperaturprofile entlang der dargestellten Linien.

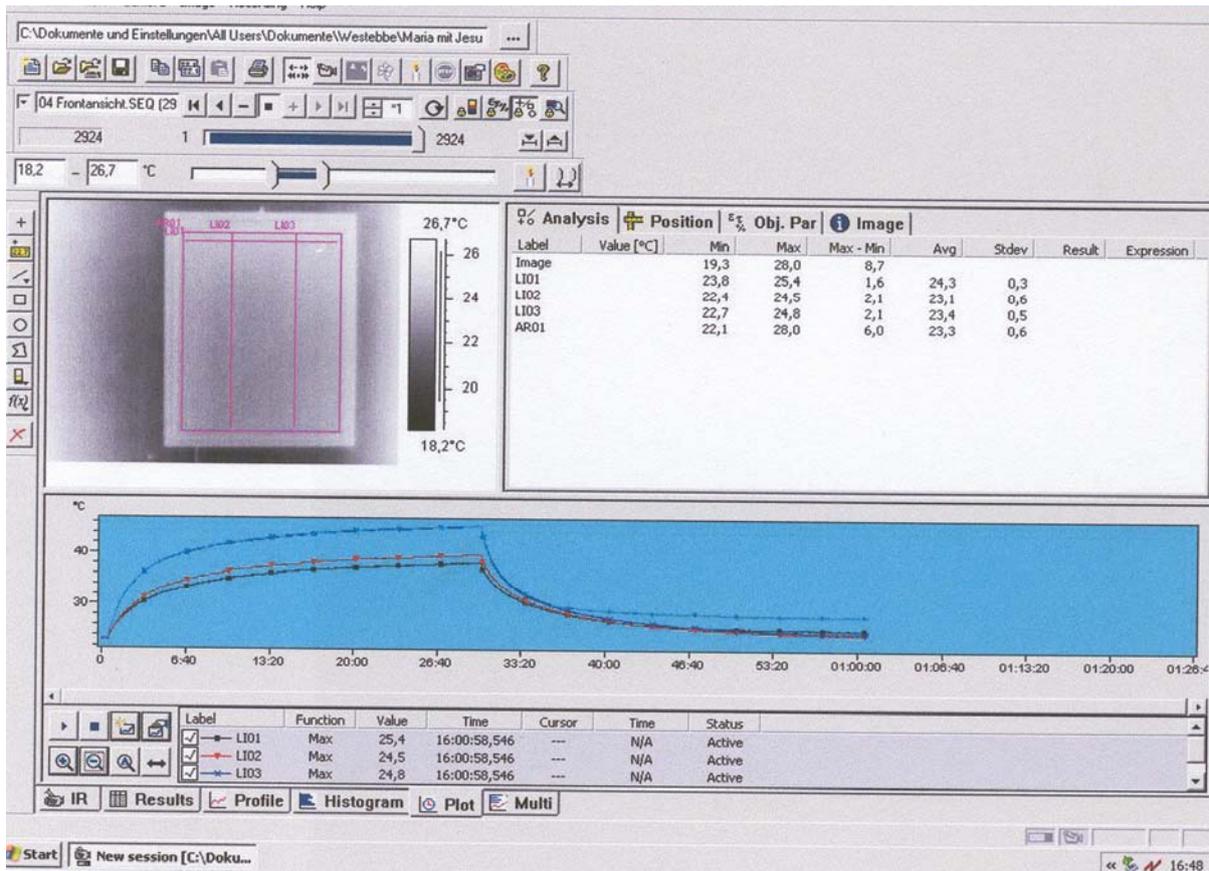


Abb. 31: Temperaturverlauf entlang der dargestellten Linien. Das zugrunde liegende Thermogramm wurde ca. 1:00 h nach Beginn der Bestrahlung, also nach etwas mehr als einer halben Stunde Abkühlzeit, als 2924ste Aufnahme und als letzte der Sequenz aufgenommen. Die Gesamtentwicklung der Temperaturverläufe lässt sich an den vorliegenden Kurven sehr gut ablesen. Ausgehend von der Anfangstemperatur steigen alle Kurven sehr steil an, werden danach flacher und nähern sich asymptotisch einem bestimmten Höchstwert. Nach ca. einer halben Stunde steigen die Kurven kaum noch an. Schaltet man danach die Wärmequelle ab, ist der Kurvenverlauf sehr ähnlich wie bei der Aufheizung, aber entgegengesetzt gerichtet: zunächst starker Abfall, der abflacht und sich langsam asymptotisch der Ausgangstemperatur wieder nähert. Nach Abschluss der Beobachtung liegen alle Endpunkte der Temperaturlinien bereits in einem sehr engen Bereich, die einzig abweichende ist die Linie, die die Maximaltemperatur im gesamten untersuchten Flächenausschnitt AR01 angibt, was wiederum auf die Schadstelle im rechten oberen Bildbereich zurückzuführen ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese thermografische Untersuchung gute Aufschlüsse gibt über die Temperaturverteilung auf einem Tafelbild, das mit einer weit verbreiteten, mit zwei schwachen Glühlampen bestückten Bilderleuchte erhellt wird. Es kommt durch diese Beleuchtung zu einer erheblichen Aufheizung der direkt bestrahlten Bereiche bereits nach wenigen Minuten. Es ist offenkundig, dass so starke lokale und wiederholt erzeugte Temperaturdifferenzen in einer Holztafel nicht ohne Folgen bleiben, was an der vorliegenden Verwerfung und dem Aufplatzen der mittleren Leimfuge abzulesen ist.

10.2 Untersuchung eines Tafelgemäldes: Brustbild einer weiblichen Heiligen

Die Thermografie wurde am Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, IZFP, in Saarbrücken in Zusammenarbeit mit Dr. Günter Walle durchgeführt. Die kurzweilige Kamera war 45 cm vor dem Kunstwerk positioniert. Der Abstand der Blitzlampe betrug 30 cm.

Daraus ergab sich bei allen Thermogrammen ein Bildausschnitt von 8 · 8cm. Die Raumtemperatur während allen Messungen betrug 25°C, die Relative Feuchte 60 %. Die Kunstwerke wurden mit einer Blitzlampe mit 6000 Ws bestrahlt. Die Blitzdauer betrug 10 ms. Als Filter diente ein Plexiglas, der nur Infrarot-Anteile durchlässt.

Das Tafelbild (35,2 · 24,5cm) wurde wohl im 19. Jahrhundert von einem deutschen Meister nach einem Vorbild des frühen 16. Jahrhunderts gemalt. (Ein Klebezettel auf der Rückseite der Tafel verweist auf Ähnlichkeit zu einem Ausschnitt des Altarbildes von St. Severin in Köln (um 1510)). Die Eichenholztafel ist aus zwei nahezu gleich großen, vertikalen Brettern zusammengeleimt, deren Stirnseiten oben und unten mit schmaleren Querleisten eingefasst sind. Die Struktur der Maserung verläuft jeweils in Längsrichtung der einzelnen Holzteile und zeichnet sich auf der Vorderseite in der gesamten Oberfläche bereits im visuellen Bereich deutlich ab, weil es entlang fast aller Maserungslinien zu Ablösungserscheinungen gekommen ist. Die feine, lasierende Malerei wird dadurch, besonders im dunkleren Farbbereich des Hintergrundes, empfindlich gestört. Die Störungen treten im Bereich des Gewandes und des Inkarnats weniger auffällig in Erscheinung.

Ebenso zeichnet sich das Gefüge der vier Holzteile deutlich ab, besonders im Bereich der vertikalen Mittelfuge, die an einigen kleineren Ausbrüchen zu erkennen. Außerdem ist eine ca. 4 cm lange retuschierte Stelle im roten Gewand, unten auf der Brust, zu erkennen, von der eine stärkere ca. 5 cm lange Farbablösung schräg nach rechts oben ausgeht.

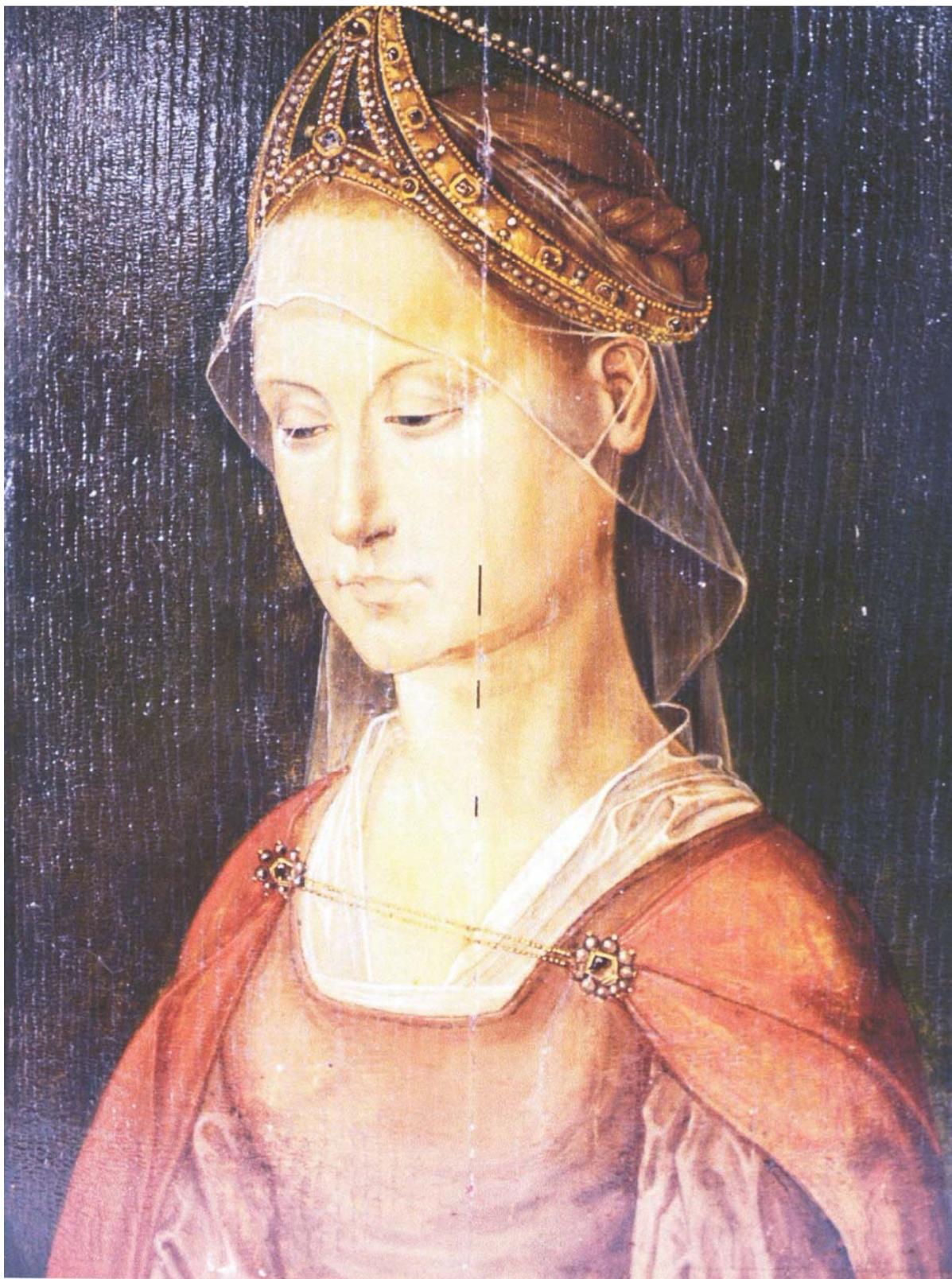


Abb. 32: Brustbild einer weiblichen Heiligen.

Prüfbericht:

Für die Untersuchungen an diesem Tafelgemälde wurde ein Ausschnitt gewählt, der bereits im visuellen Bereich Defekte erkennen lässt. Aus der Bildsequenz, aufgenommen während der Abkühlphase, wurden vier Abbildungen ausgewählt.

Kamera:	AEG Infrarotmodule
Field of view:	45° · 34° / 0,3 m
Detektor:	Focal Plane Array (FPA), 256 · 256 Pixel
Wellenlängenbereich:	3-5 µm
(IFOV):	1,3 mrad
Thermische Auflösung (NETD):	0,03°C
Bildwiederholungsrate:	200 Hz
Video output:	14 Bit digital video
Messbereich:	-40°C bis 500°C
Messgenauigkeit:	± 2°C, ± 2%
Emissionsgrad (ε):	1
Software:	VisoTherm®
Abstand Kamera zu Kunstwerk:	45 cm
Abstand Blitzlampe zu Kunstwerk:	30 cm
Raumtemperatur:	25°C
Relative Feuchte:	60%
Anregung:	Blitzlampe mit 6000 Ws, Blitzdauer von 10 ms
Filter:	Plexiglas (lässt nur Infrarot-Anteile durch)
Temperaturerhöhung auf der Oberfläche:	max. 35°C

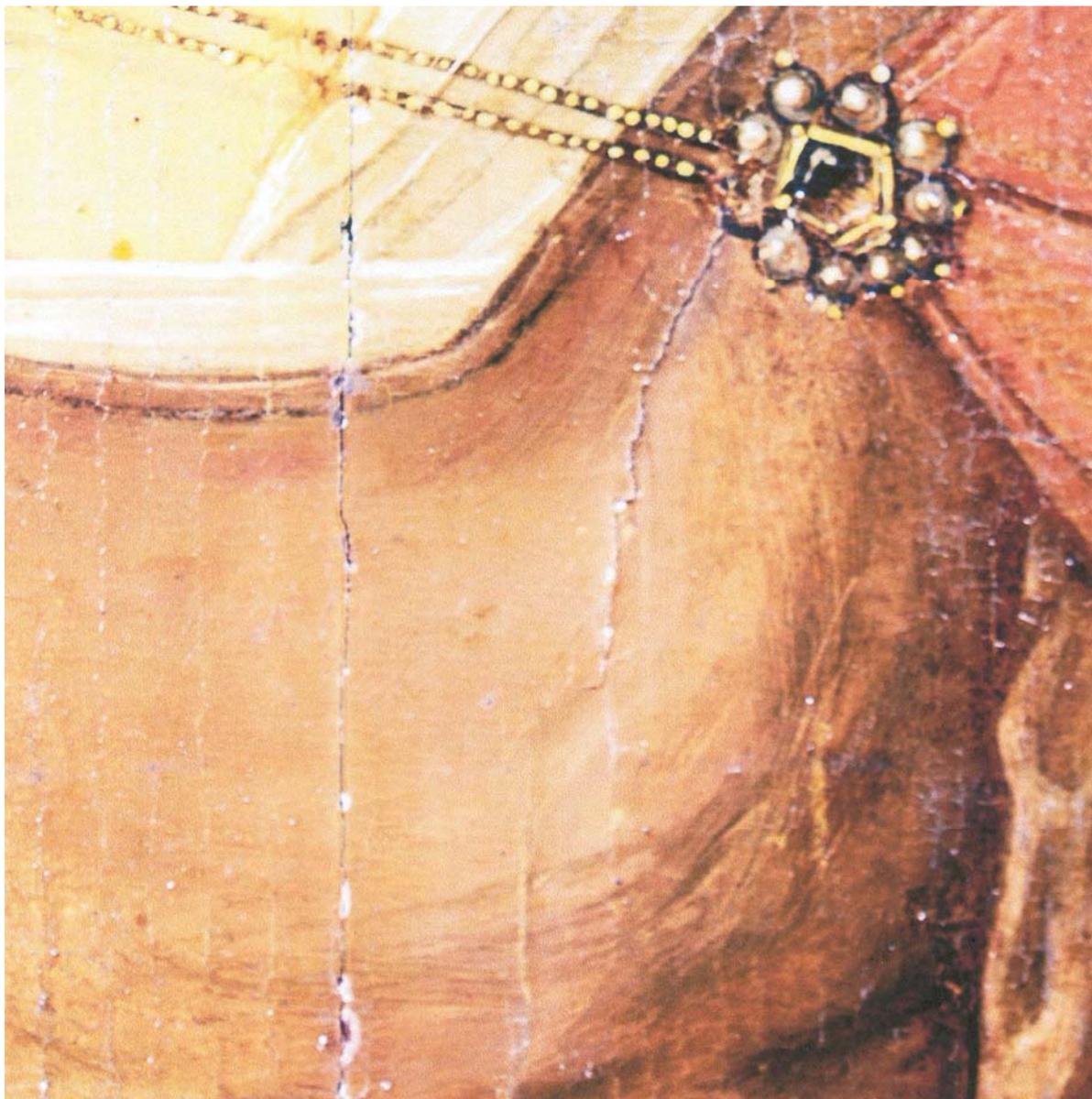


Abb. 33: Detail : Brustbild einer weiblichen Heiligen.

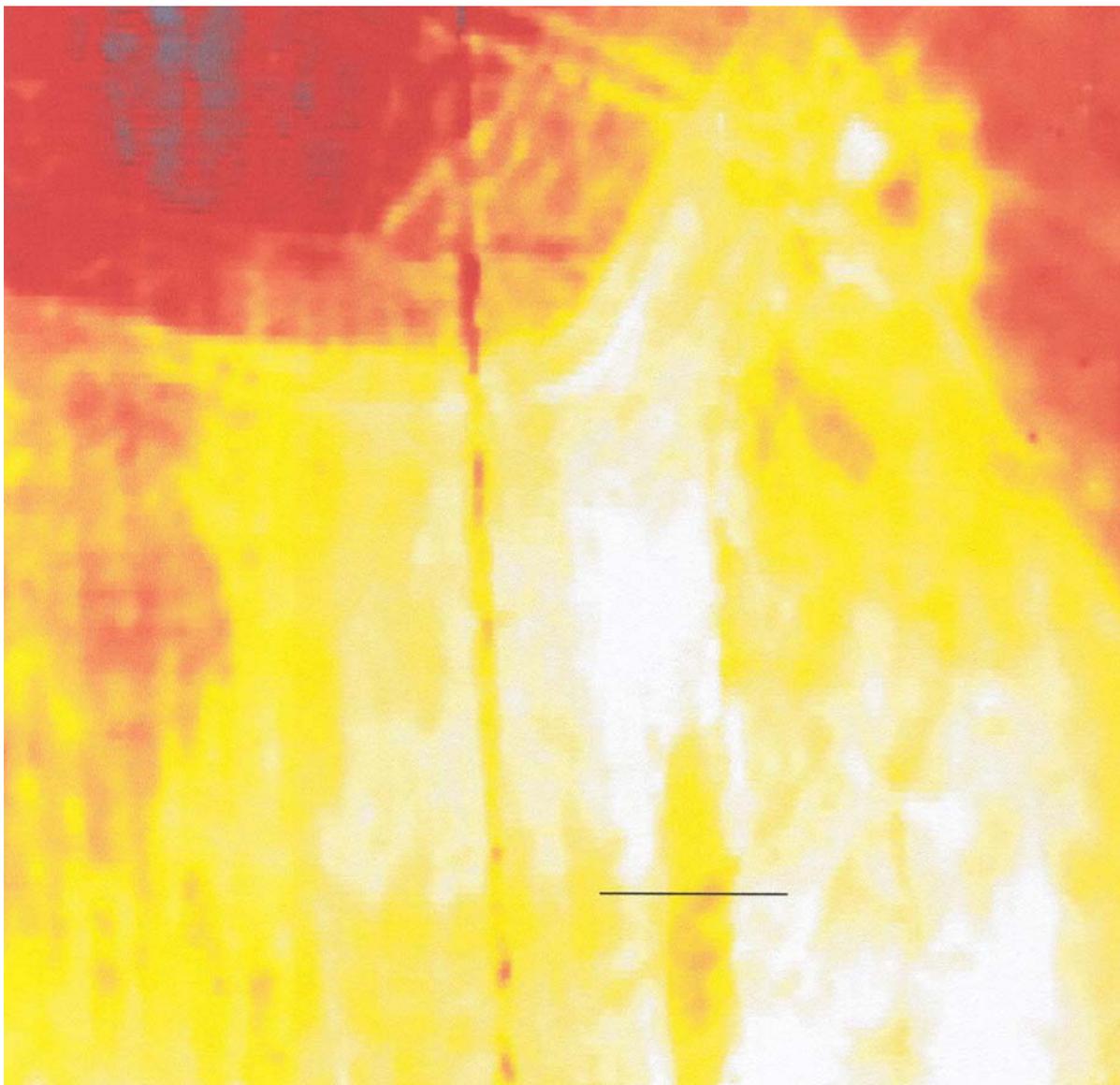


Abb. 34: Dieses Thermogramm wurde unmittelbar nach der Beleuchtung mit der Blitzlampe aufgenommen. Es zeichnen sich drei in Falschfarben unterschiedlich dargestellte Temperaturbereiche ab. Vorwiegend im rechten unteren Bildteil ist anhand der Weißfärbung die größte Aufheizung erfolgt, was auf die dunkleren Farbtöne mit größerer Emissivität zurückzuführen ist. Ein mittlerer Temperaturbereich, gelb dargestellt, lässt sich im Brustbereich des Gewandes erkennen, während das durch Brosche gehaltene Schultertuch bereits in ein helles, nicht so stark emittierendes Rot übergeht, was der hellen Tönung im Gemälde entspricht. Brosche und ein Teil der Kette sind am oberen Bildrand sichtbar. Links oben erfasst das Thermogramm einen Bereich des Inkarnats der oberen Brustpartie. Hier wechselt die Falschfarbe, bedingt durch einen höheren Reflexionsanteil, zu einem dunkleren Rot und geht zum Teil in Blau über.

Bereits aus diesem ersten Thermogramm lassen sich Rückschlüsse ziehen. Zum einen zeichnet sich der ausgekittete Längsriß der Tafel deutlich durch kältere Bereiche ab. Rechts davon kann man die reparierte, Kittstelle und deren kleinere Fortsetzung nach oben hin erkennen, deren Oberflächen sich weniger stark erwärmt haben. Die Ursache hierfür liegt wohl in der Tatsache, dass Kitt ein wesentlich besserer Wärmeleiter ist als Holz, eindringende Wärme also schneller in die Tiefe abgeleitet werden kann und sich nicht im oberflächennahen Bereich staut.

Besonders im oberen linken Teil werden sowohl im Gewand wie im Inkarnat wabenartige Strukturen sichtbar, die auf Risse in der Farbschicht zurückgehen. Die Ursachen hierfür sind zum einen durch Schrumpfen bei Trocknung und Quellen bei Feuchtigkeitsaufnahme, also durch Bewegung der Holztafel in der Querrichtung zu suchen. Die kleinern quer dazu verlaufenden Risse gehen auf Längendehnung und Schrumpfung zurück. Weil die Längendehnung des Holzes geringer ist als die Breitendehnung zeichnen sich die in Richtung der Maserung verlaufenden Längsrisse breiter ab. Wahrscheinlich ist diese Rissbildung noch durch einen zu dünn aufgetragenen oder wenig elastischen Kreidegrund verstärkt.

In der unteren linken und rechten Ecke des Thermogramms zeigen sich kleine gelb und weiß hervortretende geometrische Strukturen, die nichts mit dem untersuchten Kunstwerk zu tun hatten. Sie sind verursacht durch „tote Pixel“ in der Hardware.

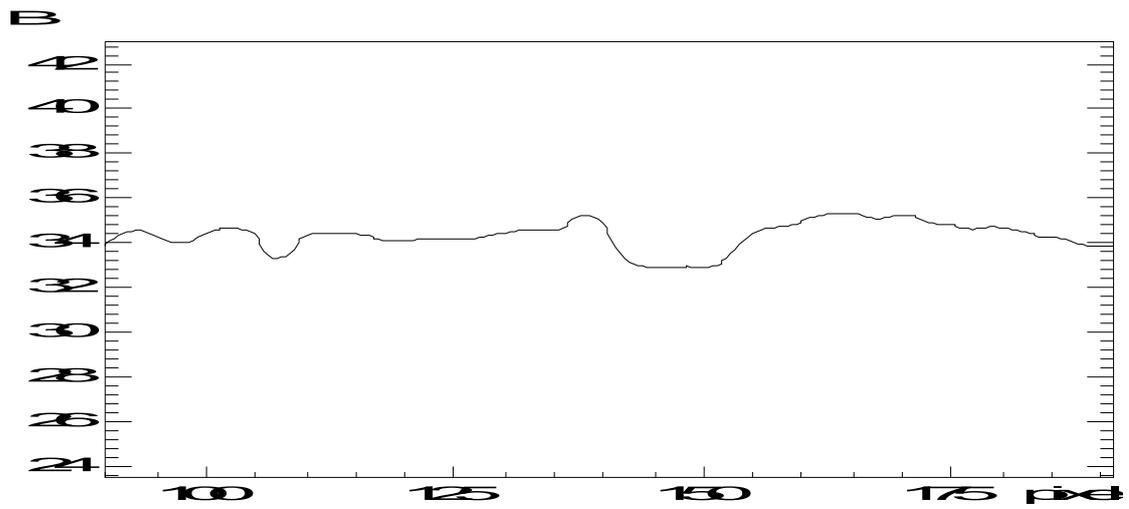


Abb. 35: Temperaturverlauf entlang der Linie. Im gemessenen Bereich liegt die Maximaltemperatur bei ca. 35°C, die Temperaturdifferenzen betragen ca. 2,2°C, dabei lassen sich zwei Absenkungen im Bereich der Leimfuge und der Kittstelle feststellen, deren Ränder jeweils durch leichte Temperaturerhöhungen charakterisiert sind.

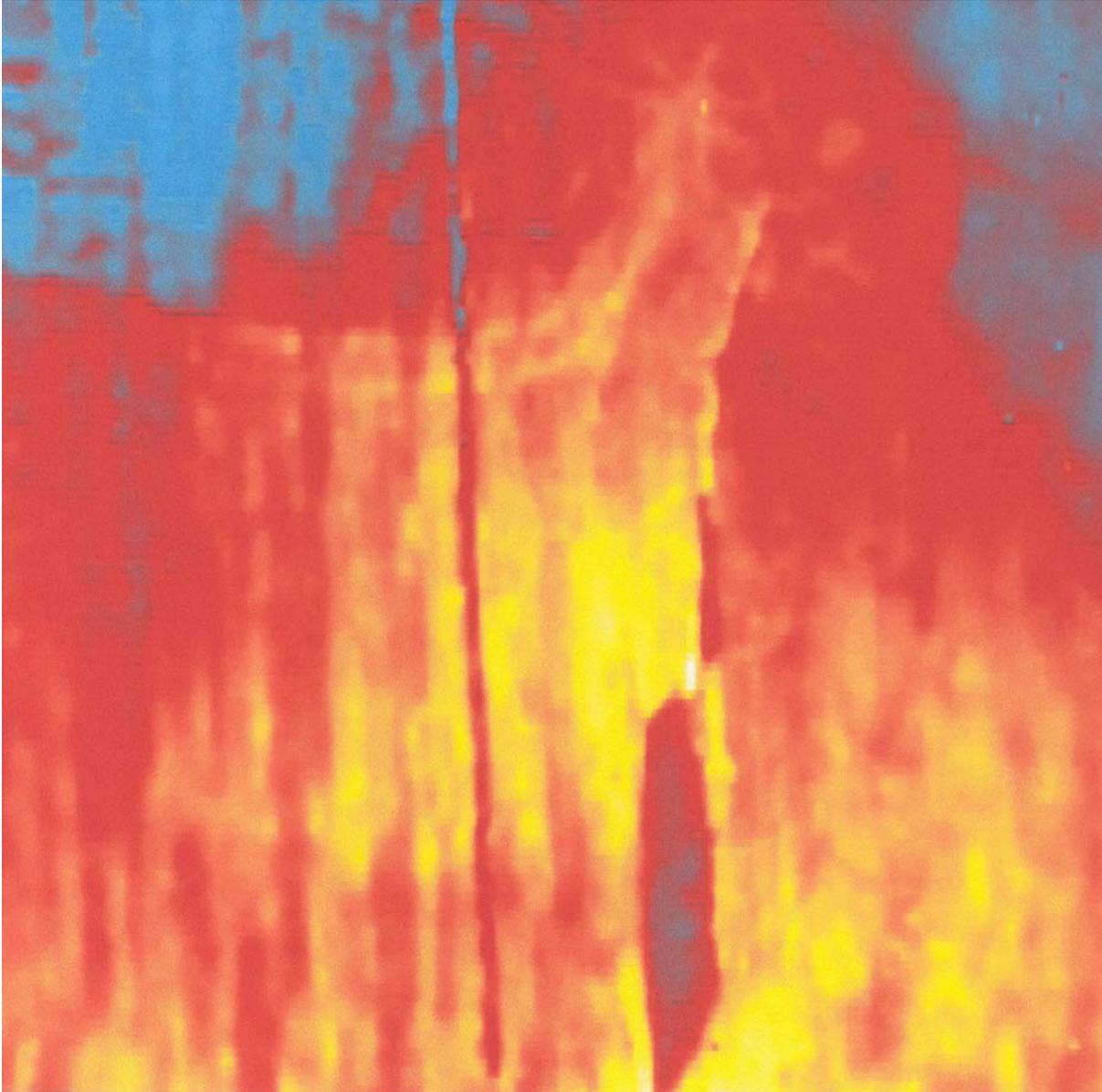


Abb. 36: Thermogramm nach 1,7sec. Die Falschfarben zeigen hier bereits eine Abkühlung an. Die Kittstelle hat sich wegen einer dem Holz gegenüber größeren Wärmeleitfähigkeit stärker abgekühlt als andere Bereiche. Inzwischen weist sie den gleichen Farbwert auf wie das Inkanat, woraus folgt, dass dieses langsamer abkühlt, bzw. dass die Wärme langsamer eindringt. Da die größere Kittstelle entlang der Ränder eine hellblaue und im Zentrum eine grüne Färbung aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass diese sich konisch nach unten verjüngt, weil im Bereich der grünen Färbung die Wärme bereits in tiefere Schichten vorgedrungen ist. Der Bereich des Schultertuchs liegt ebenfalls im blauen Farbbereich, ist also, bedingt durch seine hellere, stärker reflektierende Oberfläche, stärker abgekühlt als das rote Gewand. Die oberflächennahen warbenförmigen Strukturen sind nicht mehr zu sehen nachdem die Wärme tiefer eingedrungen ist. Dafür tritt in diesem Thermogramm nun die Längsstruktur der Holztafel mehr in Erscheinung durch abwechselnd rot und blau verlaufende Farbbänder. Die Faserstruktur im Holz ist gut zu erkennen, weil die Wärme aufgrund der unterschiedlichen Holzdicke unterschiedlich schnell weitergeleitet wird.

Der Längsriss der Leimfuge zeichnet sich weiterhin durch deutlicher und schärfer umrissen als die Holzstrukturen ab.

Im Bereich zwischen den beiden Kittstellen, etwas oberhalb und links davon, zeichnen sich hellere, gelbe Stellen ab, die Farbveränderung deutet hier auf Defekte, möglicherweise Ablösungen, oder seitliche Risse hin. Die gleichen Erscheinungen gibt es auch am unteren rechten Bildrand.



Abb. 37: Nach 4 sec ist der Wärmeimpuls tiefer eingedrungen, es zeichnen sich die Umrisse des Gewandausschnittes und des Brusttuches klarer ab. Die zuvor gelb erschienenen Fehlstellen sind nun rot. Die Kittstellen zeigen sich fast komplett im grünen Farbbereich. Die roten Farbbereiche, besonders oberhalb und seitlich der Kittstellen und am unteren rechten Bildrand, lassen sich als Haftungsdefekte interpretieren. Manche Ränder der Kittstellen weisen im Seitenlicht bei Überprüfung am Original leichte Schüsselbildungen auf, die sich im Temperaturprofil entlang der eingezeichneten Linie als stärker erwärmt erweisen.



Abb. 38: Das Thermogramm wurde nach ca. 10 sec nach Bestrahlung aufgenommen. Es bestätigt die vorherigen Aussagen, macht jedoch die zuvor ermittelten Störstellen, jetzt in roten Falschfarben dargestellt, deutlicher sichtbar.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich verschiedene Pigmente durch ihr unterschiedliches Absorptionsverhalten auch zu unterschiedlichen Temperaturerhöhungen und damit verbundenen Falschfarbendarstellungen führen, sonst wären im Thermogramm dem Original entsprechenden Konturen nicht ablesbar (Gewand, Schultertuch, Brosche). Es wäre zu überprüfen, ob sich auf diese Weise mit einer Thermografiekamera noch Untermalungen erfassen lassen. Risse und Ablösungen zeigen sich in der obersten Farbschicht, in diesem Falle in der wabenartigen Form eines „geometrischen Craqueles“. Restaurierte und gekittete Stellen, sowie Haftungsschäden werden sichtbar. Die Abkühlphase hätte länger beobachtet werden müssen, über 8-10 min. Erst danach hätte man die Tiefe der Kittstelle ausloten können und den „Nulldurchgang“, den Übergang von kälter zu wärmer als die Umgebung, sichtbar machen können.

10.3 Untersuchung einer Ikone

Die Ikone besteht aus zwei gefügten Holztafeln. Die Höhe beträgt 29 cm und die Gesamtbreite 31 cm. Auf der Rückseite ist zu erkennen, dass beide Teile an der Stoßfuge gefälzt sind, was darauf schließen lässt, dass es sich um die zwei Flügel einer kleinen Tür gehandelt hat. Jeder Flügel ist unterteilt in einen größeren unteren, fast quadratischen und einen kleineren oberen Bereich mit unregelmäßig geschwungenen Konturen. Die einzelnen Felder werden von kräftigen, erhobenen Rändern eingerahmt, seitlich und oben von doppelten, parallel verlaufenden Rändern.

Die beiden oberen Felder zeigen einen Architekturinterieur mit Türen und Fenstern. Im linken Teil ist der Erzengel Gabriel zu sehen mit ausgestreckter linker Hand. Er verkündet Maria die Geburt Jesu. Maria sitzt auf einem roten Kissen auf einer geschnitzten Holzbank und hat den rechten Arm in Richtung Gabriel erhoben.

Im linken unteren Bildteil ist die Geburt Christi dargestellt. Maria ist auf einem roten Untergrund auf einen Steinboden gebettet und schaut nach links zu Josef. Hinter ihr, zum Ausgang der Höhle, liegt das gewickelte Jesuskind in einer Krippe, rechts davon ein Engel. Im Höhleneingang sind Ochs und Esel zu sehen.

Der rechte untere Bildteil zeigt die Taufe Christi im Jordan durch Johannes den Täufer begleitet von den vier Erzengeln. Auf den unteren und den mittleren Rahmenteilern sind kyrillische Bildunterschriften erkennbar.

Die Ikone wurde auf Hartholz gemalt. Die Mittelfuge ist offen gelassen. Der äußere Rand liegt etwas tiefer als der Innere. Im Bereich des inneren Randes sind viele kleine Nagellöcher sichtbar, was darauf hindeutet, dass die Ikone einmal auf einer anderen Unterlage befestigt war, bzw. dass die beiden Türflügel einmal fixiert wurden, so dass man sie nicht mehr öffnen konnte.

Es sind Schäden in den Bildteilen in Form kleiner Farbverluste und von Craquelés zu erkennen. Die Ränder weisen stärker sichtbare Schäden durch Farbverluste auf. Auffallend sind schlecht ausgeführte Kittübergänge zwischen Rändern und Bildflächen.



Abb. 39: Gesamtansicht der Ikone.

Prüfbericht:

Kamera:	AEG Infrarotmodule
Field of view:	45° · 34° / 0,3 m (8 · 8 cm)
Detektor:	Focal Plane Array (FPA), 256 · 256 Pixel
Wellenlängenbereich:	3-5 µm
(IFOV):	1,3 mrad
Thermische Auflösung (NETD):	0,03°C
Bildwiederholungsrate:	200 Hz
Video output:	14 Bit digital video
Messbereich:	-40°C bis 500°C
Messgenauigkeit:	± 2°C, ± 2%
Emissionsgrad (ε):	1
Software:	VisoTherm®
Abstand Kamera zu Kunstwerk:	45 cm
Abstand Blitzlampe zu Kunstwerk:	30 cm
Raumtemperatur:	25°C
Relative Feuchte:	60%
Anregung:	Blitzlampe mit 6000 Ws, Blitzdauer von 10 ms
Filter:	Plexiglas (lässt nur Infrarot-Anteile durch)
Temperaturerhöhung auf der Oberfläche:	max. 32,3°C



Abb. 40: Das Foto bezieht sich auf einen Ausschnitt im rechten, oberen Quadranten der Ikone. Mit bloßem Auge lassen sich Unregelmäßigkeiten und Beschädigungen erkennen: mehrere Risse und Craquelés in der Farboberfläche, ein Nagelloch oben rechts sowie einige abgeplatzte oder grob ausgebesserte Farbstellen, hauptsächlich an der wulstartigen Umrandung. Aus der Bildfolge der thermografischen Aufnahmen wurden drei Bilder ausgewählt.

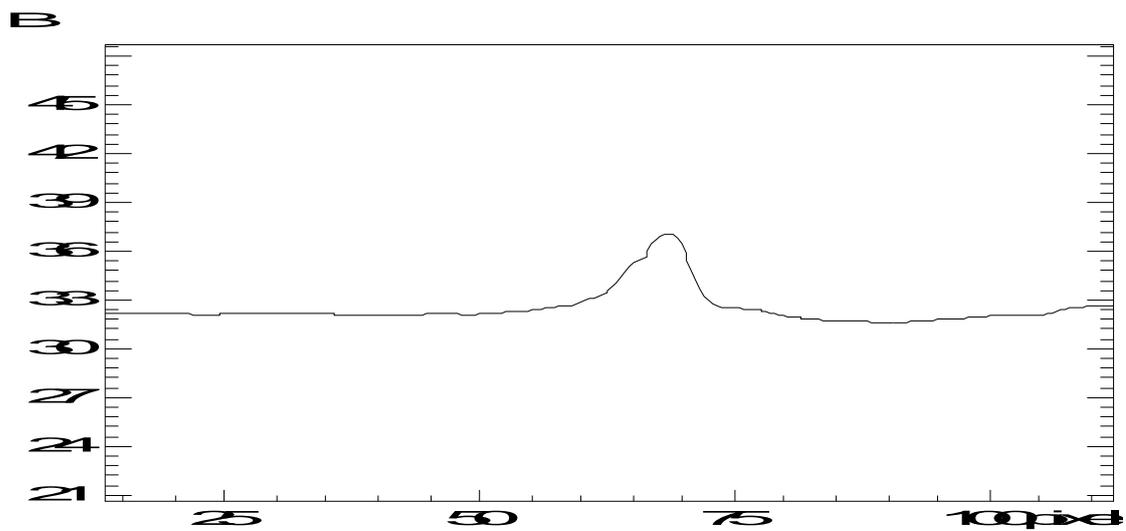


Abb. 42: Temperaturverlauf entlang der Linie in Abbildung 41. An der gemessenen Stelle liegt die Maximaltemperatur bei ca. 37,5°C, während sich die Temperaturen links und rechts dieser Störung in einem Bereich zwischen 32°C und 33°C bewegen. Da die Farbgebung der Ikone keinen Rückschluss auf stark geänderte Emissivität zulässt, deutet diese Temperaturerhöhung auf eine Hohlstelle hin.

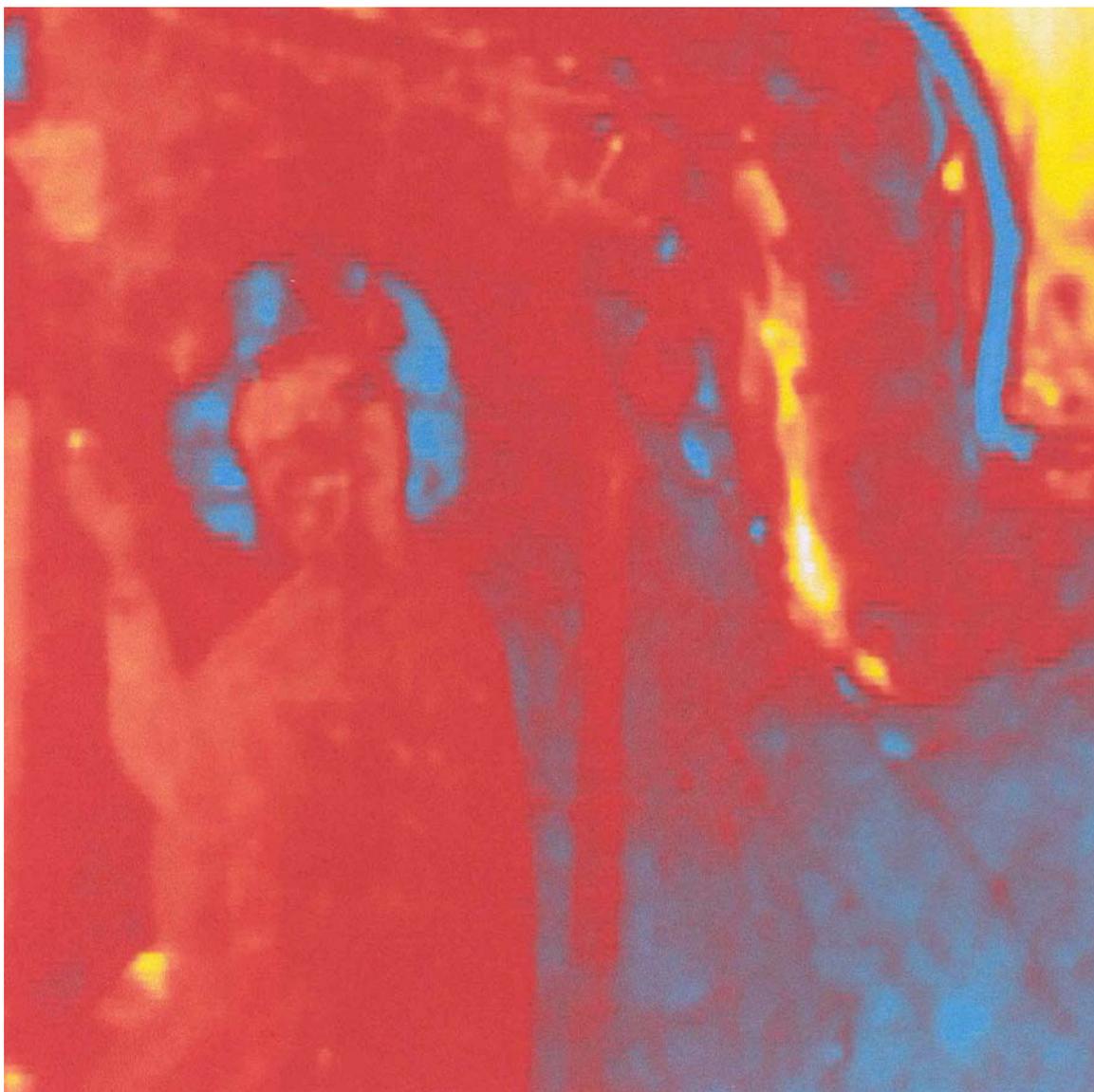


Abb. 43: Das Thermogramm wurde ca. 1,5 sec nach der Blitzeinwirkung aufgenommen. Anhand dieser Aufnahmen gut nachvollziehen, dass eine Darstellung mit identischen Falschfarben nicht unbedingt auf gleiche Ursachen zurückgehen muss. Die mit goldener Farbe belegten Stellen erscheinen ebenso blau wie das Nagelloch am oberen Bildrand oder wie die Löcher in der diagonal in der unteren rechten Bildecke verlaufenden Risses. Einmal liefert die blaue Darstellung also eine Aussage über eine Materialeigenschaft (Gold) und anders mal eine Aussage über fehlendes Material (Loch). Das gleiche gilt auch für die gelbe Farbe. Zum einen weist sie den äußeren Rand der Ikone, bedingt durch die dunkle Farbe und die raue Oberfläche als besonders stark absorbierend aus, zum anderen weist sie rechts, in der Bildmitte, an der Innenseite des Randwulstes, und in der linken unteren Ecke sowie an den Fingerspitzen auf Hohlstellen hin und bekräftigt auch die anhand der Temperaturkurve aufgestellten Vermutung. Der Nagel oben rechts ist auch noch zu erkennen.

Durch gelbe Spots zeichnen sich zwei Stellen mit abgebrochenen, im Holz verbliebenen Nägeln aus: rechts unterhalb des bereits früher erwärmten durch blau erkennbaren Nagellochs und ca. 4,5 cm darunter, an der Stelle, wo der Randwulst von der Senkrechten in die Waagerechte umbiegt. In der rechten unteren Ecke lassen sich nun auch die auf dem Foto sichtbaren Risse in der Farbschicht ausmachen.



Abb. 44: Dieses Thermogramm wurde ca. 2,5 sec nach der Blitzeinwirkung aufgenommen. Die Konturen von helleren und dunkleren Originalfarben lassen sich auch nach weiterer Abkühlung noch erkennen. Der Bereich des Randes oben rechts erweist sich wahrscheinlich wegen einer Russablagerung, noch als erstaunlich warm gegenüber den anderen Bildbereichen. Die Hohlstelle an der Innenseite des Randwulstes ist weiterhin gut sichtbar, weil sie tief in den Untergrund reicht, und der Nagel oben rechts ist auch noch zu erkennen.

10.4 Untersuchung eines Tafelbildfragments

Das Fragment entstammt einem, demnach Teil eines Flügelaltars der Stadtpfarrkirche St. Stephanus in Moosen a. d. Vils (Landkr. Freising; heute Diözesanmuseum Freising, Inv.nr. DNF: L7805. Das Fragment hat eine Größe von 16 · 102 cm und wurde auf Nadelholz gemalt. Die ursprüngliche Fassung stammt wohl aus dem 3. Viertel des 15. Jahrhunderts und wurde als Temperamalerei ausgeführt unter Verwendung einer Wachs/Harzmischung als Festigungsmittel. Es lassen sich Übermalungen mit Ölfarben ausmachen, die wohl in das 17. Jahrhundert zu datieren ist und weitere flächige Übermalungen in fetter Ölmalerei aus dem 17., 18. oder 19. Jahrhundert. Als Festigungsmittel jüngerer Übermalungen wurde Hausenblase verwendet.

Die thermografische Untersuchungen des Tafelbildes beschränkten sich auf die untere Hälfte der Tafel, Ausschnitte im Bereich des Gewandes, des Gesichtes und des unteren Bildrandes.

In fast allen Teilen sind bereits mit bloßem Auge Schäden festzustellen: abgeplatzte Farbschichten, Risse, die bis ins Holz reichen, Risse und Craquelés in der oberen Farbschicht, Haftungsschäden und Übermalungen.

Prüfbericht:

Kamera:	AEG Infrarotmodule
Field of view:	45° · 34° / 0,3 m (8 · 8 cm)
Detektor:	Focal Plane Array (FPA), 256 · 256 Pixel
Wellenlängenbereich:	3-5 µm
(IFOV):	1,3 mrad
Thermische Auflösung (NETD):	0,03°C
Bildwiederholungsrate:	200 Hz
Video output:	14 Bit digital video
Messbereich:	-40°C bis 500°C
Messgenauigkeit:	± 2°C, ± 2%
Emissionsgrad (ε):	1
Software:	VisoTherm®
Abstand Kamera zu Kunstwerk:	45 cm
Abstand Blitzlampe zu Kunstwerk:	30 cm
Raumtemperatur:	25°C
Relative Feuchte:	60%
Anregung:	Blitzlampe mit 6000 Ws, Blitzdauer von 10 ms
Filter:	Plexiglas (lässt nur Infrarot-Anteile durch)
Temperaturerhöhung auf der Oberfläche:	max. 37,4°C



Abb. 45: Gesamtansicht des Tafelgemäldes.



Abb. 46: Detailansicht des Gesichtes vom Johannes dem Täufer. Der Fotoausschnitt bezieht sich auf das Gesicht der Figur. Mit dem Auge lässt sich auch hier das zuvor erläuterte Schadensbild erkennen.
Aus der Bildfolge der thermografischen Aufnahmen wurden fünf Bilder ausgewählt.

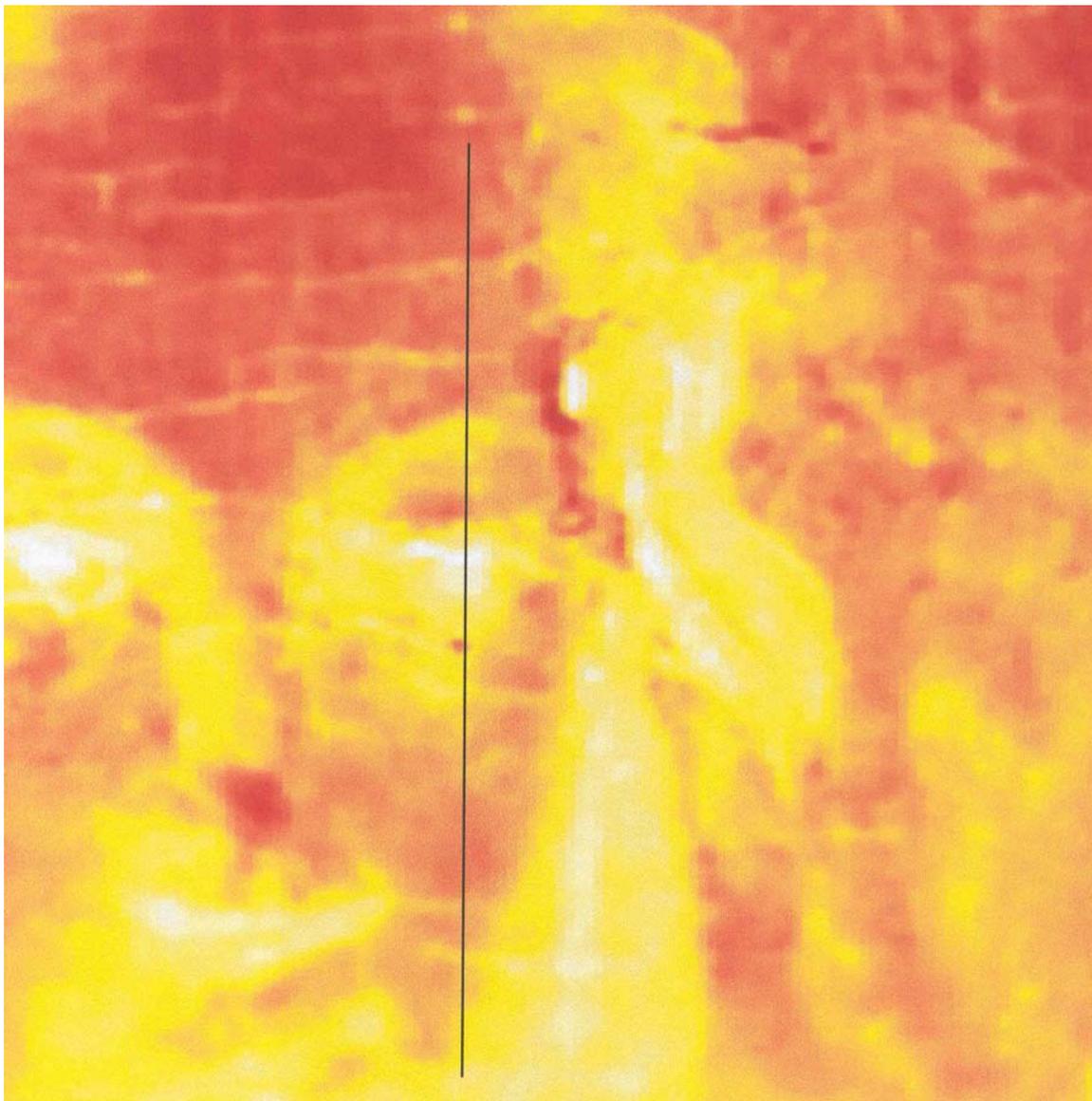


Abb. 47: Das Thermogramm wurde ca. 0,5 sec nach Einwirkung des Blitzlichtes aufgenommen. Die Konturen des Gesichtes zeichnen sich aufgrund der unterschiedlichen Emissivität der Farben relativ gut ab, indem dunklere Originalfarben wie Augen, Mund oder Haare als wärmste und hellere Originalfarben an Stirn und Wangen als kältere Falschfarben erscheinen. Besonders deutlich zeichnet sich im Stirnbereich das Craquelés ab, bedingt durch die Tatsache, dass Risskanten der Farbablösung als Störung des Wärmefflusses und damit wärmer erscheinen.

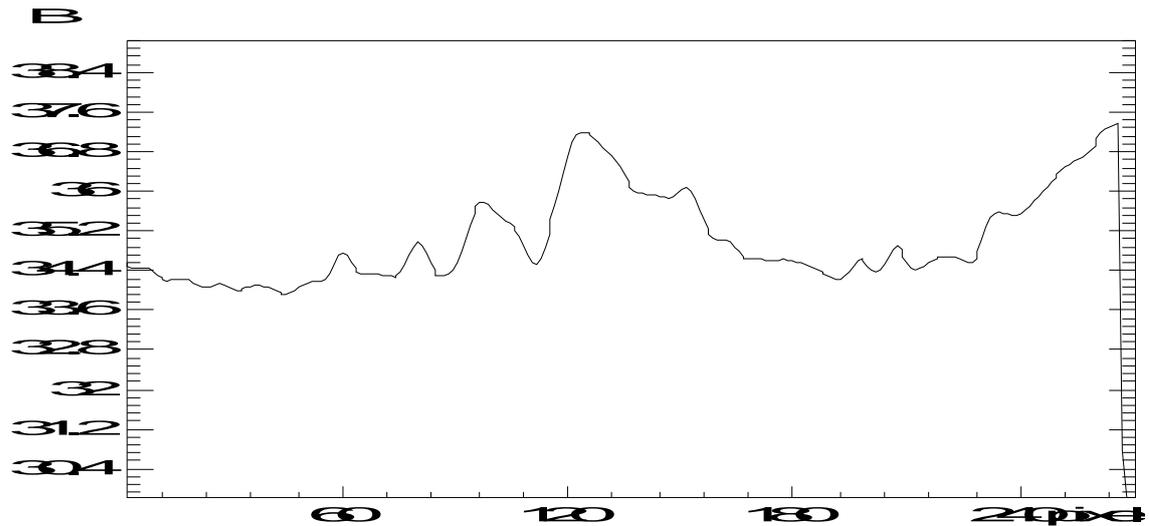


Abb. 48: Temperaturverlauf entlang der Linie in Abbildung 47. Im gemessenen Bereich lag die Maximaltemperatur bei ca. 37,4°C und die Minimaltemperatur bei ca. 33,9°C. Entsprechend der durch Farbunterschiede hervorgerufenen Oberflächenerwärmung entwickelt sich durch den Wechsel von hellen und dunklen Farben von der kühleren Stirn über wärmere Augenbrauen, kühlere Augenlider, wärmere Augen und kühlere Wangen bis zu den wärmeren Schatten unter dem Kinn eine zickzackförmige Temperaturkurve, die im Bereich der Augen und des Kinnschattens ihre wärmsten Stellen aufweist.

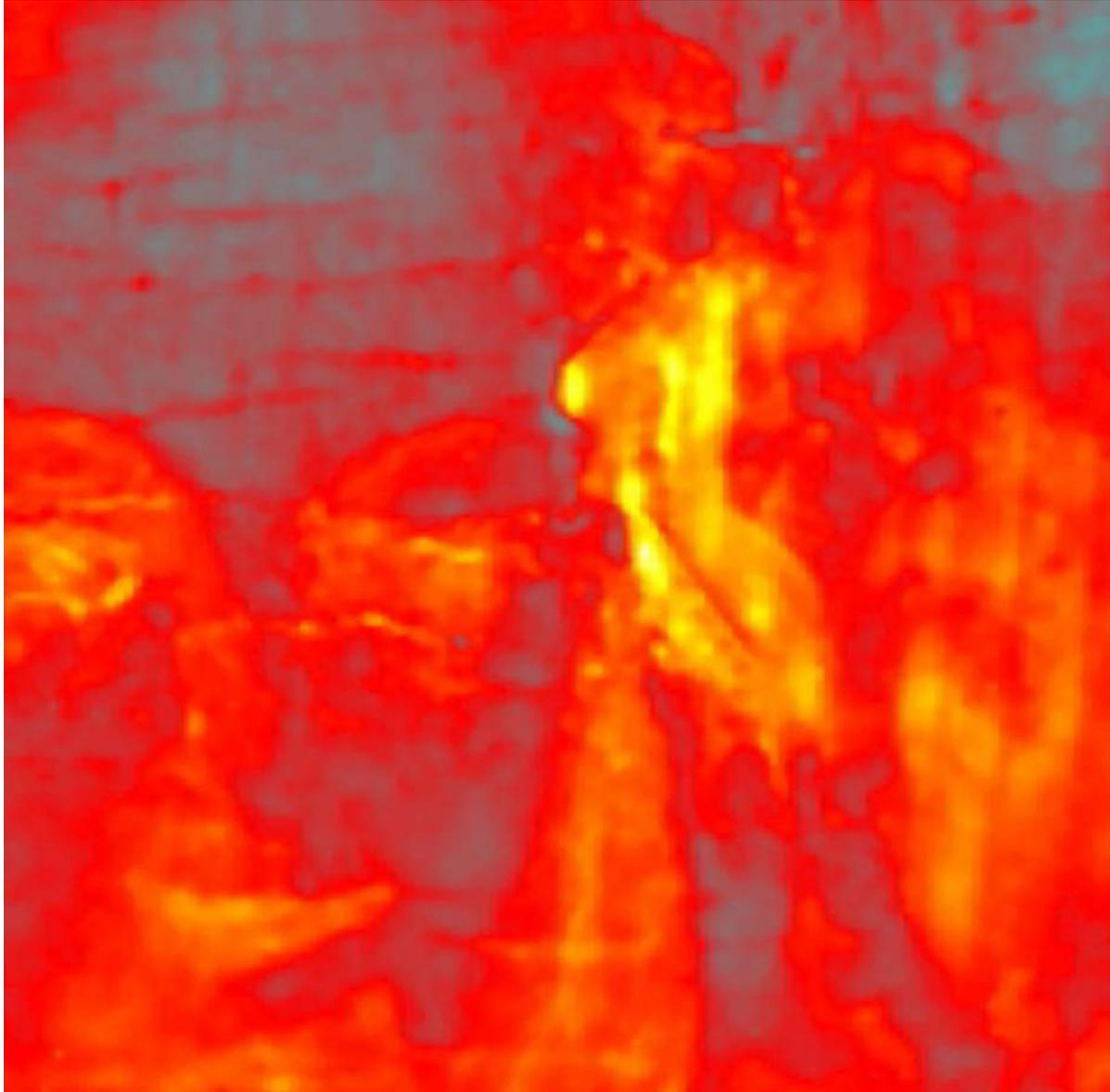


Abb. 49: Das Thermogramm wurde ca. 1,0 sec nach der Blitzeinwirkung aufgenommen. Es zeigt kühlere Falschfarben, die bereits in den blauen Bereich spielen. Am wärmsten treten Teile der Augen, des Mundes und der Haare hervor, sowie jetzt auch auf Augenhöhe rechts der Haare eine Stelle, die sich im sichtbaren Bereich in heller Farbe darstellt. Das Craquelés der Stirn ist weiterhin gut sichtbar.

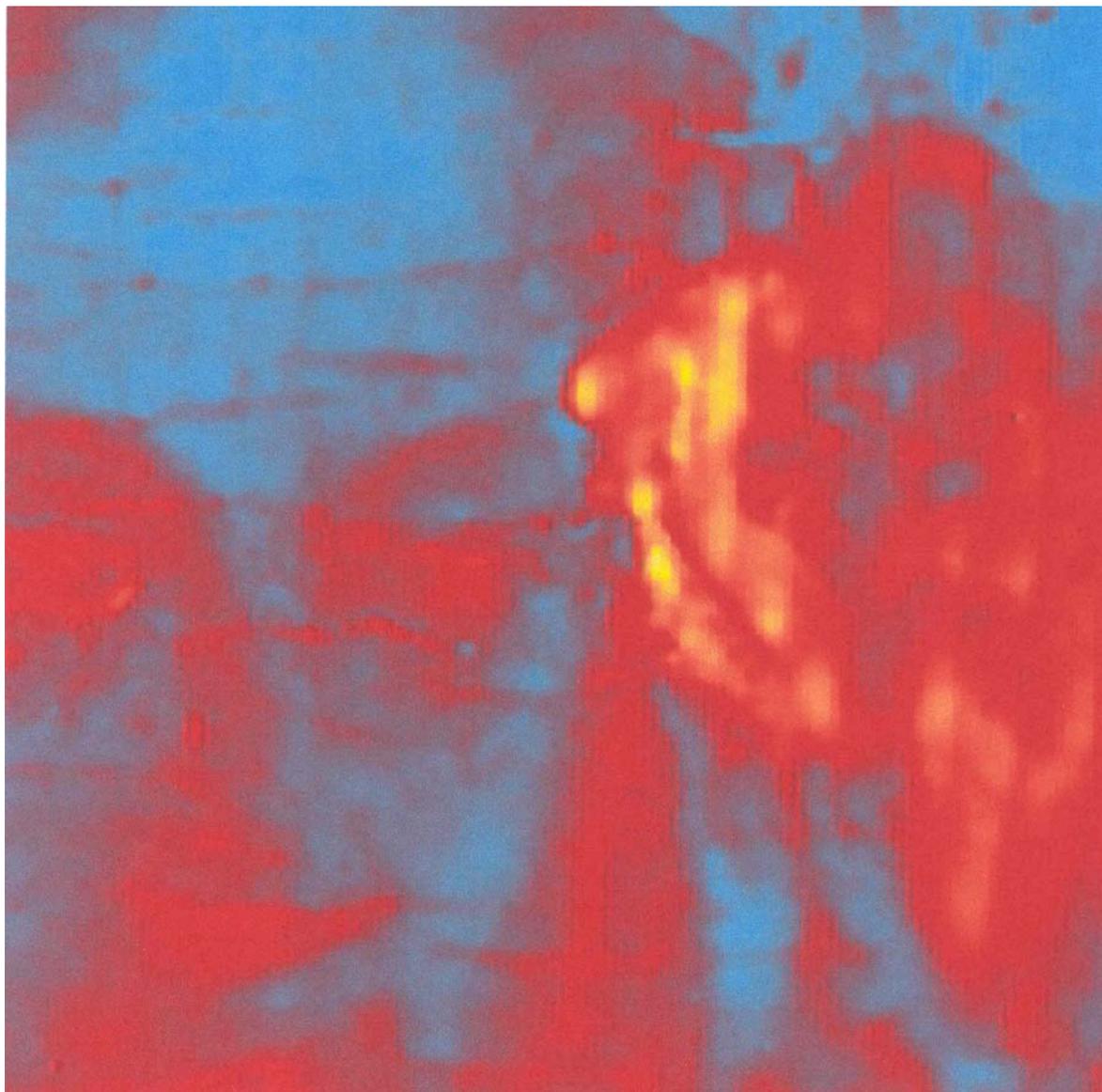


Abb. 50: Dieses Thermogramm wurde ca. 1,5 sec nach der Blitzeinwirkung aufgenommen. Die Abkühlung ist weiter fortgeschritten. Im gelben Bereich befinden sich nur noch die Haarlocke rechts der Augen und der Bereich rechts davon.

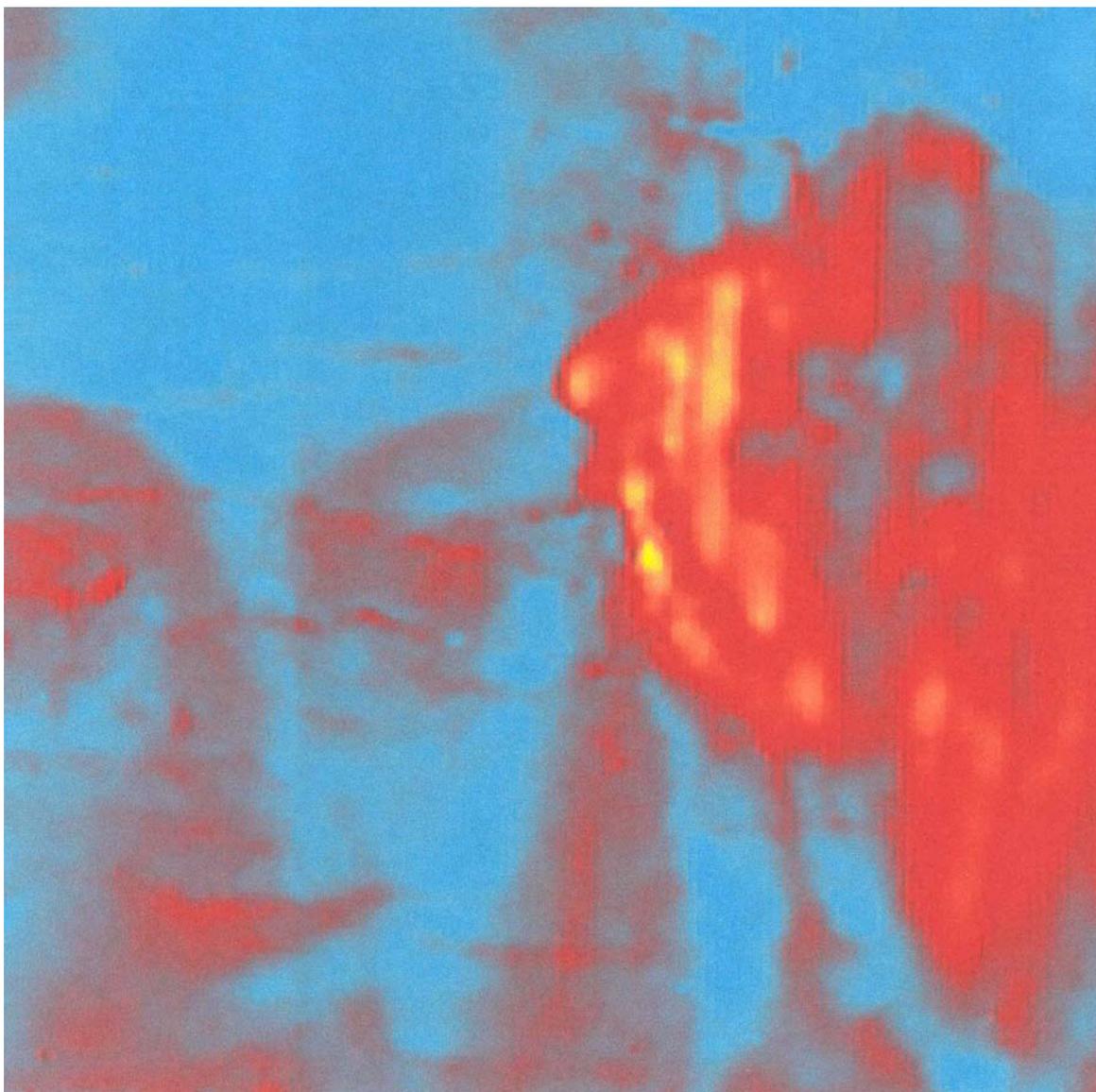


Abb. 51: Dieses Thermogramm wurde ca. 2,0 sec nach Blitzeinwirkung aufgenommen. Die Konturen des Gesichtes treten jetzt nach weiterer Abkühlung sehr deutlich hervor, und als wärmere Stellen zeichnen sich fast nur noch die im vorigen Thermogramm erwähnten Partien ab.

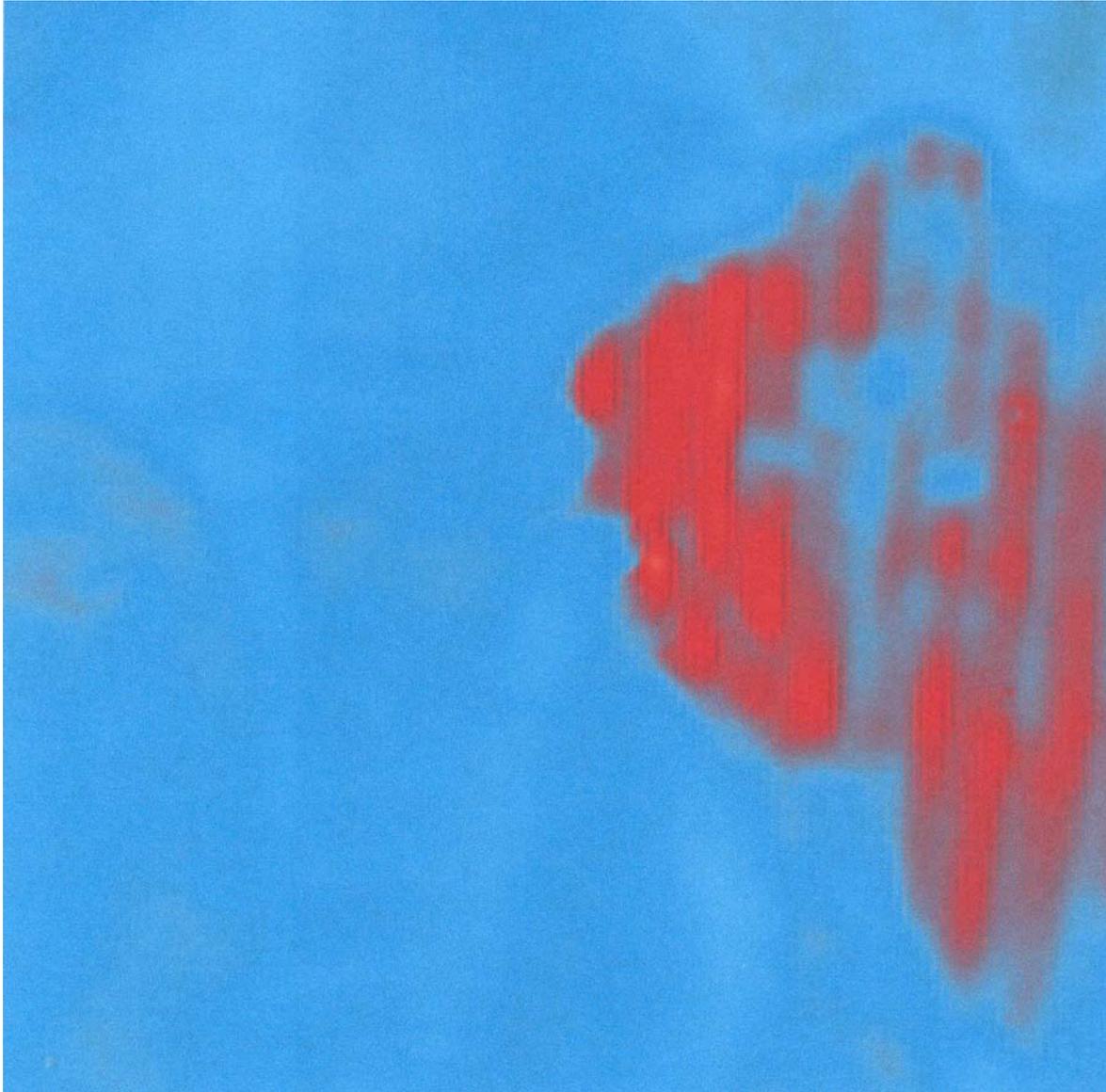


Abb. 52: Dieses Thermogramm wurde ca. 2,5 sec nach Blitzeinwirkung aufgenommen. Die Gesichtskonturen sind praktisch verschwunden, nur die zuvor erwärmten Stellen zeichnen sich weiterhin warm ab. Die Wärme ist inzwischen soweit eingedrungen, dass die senkrecht verlaufende Holzmaserung zu erkennen ist. Die Tatsache, dass sich diese beobachteten warmen Stellen sowohl im Bereich heller als auch dunkler Originalfarben befinden, lässt vermuten, dass es sich hier um Ablösungen der Farbe oder Kreidegrundes handelt.

Anhand der ausgewählten und thermografisch untersuchten Bildbereiche lässt sich feststellen, dass mit Hilfe der Thermografie unter der Farbschicht verborgene Schadstellen wie Ablösungen (oder früher gekittete Stellen) entdeckt und in ihrer flächenmäßigen Ausdehnung eingegrenzt werden können. Ebenso kann festgestellt werden, wie weit abgelöste Bereiche in die Tiefe reichen, was Hinweise zur Untergrund- oder Farbfestigung geben kann.

11 Zusammenfassung

Während thermografische Untersuchungsverfahren im Bauwesen und in der Denkmalpflege seit längerer Zeit für Bauphysiker und -techniker zum Standard gehören, setzt sich die Thermografie in der Restaurierung nur langsam durch. Zum einen ist das sicher auf die Befürchtung von Restauratoren zurückzuführen, dass ein unkontrollierter Energieeintrag ein Kunstwerk beschädigen könne, zum anderen hindern wohl auch die mit der Thermografie verbundenen technischen Anforderungen eine intensivere Beschäftigung mit dieser Technik.

Die IR-Thermografie eröffnet in der Restaurierung jedoch Erkenntnismöglichkeiten, die für sich oder im Zusammenhang mit anderen Untersuchungsmethoden von Bedeutung sein können. Messungen von Wärmeverteilung auf Oberflächen lassen sich berührungslos und zerstörungsfrei auch ohne äußere Wärmezufuhr durchführen. Von der Fachhochschule Karlsruhe wurden in der Vierungkuppel im Dom zu Speyer und im Kloster Maulbronn Versuche unternommen mit fest installierten, scannenden IR-Kameras, die Rechner gesteuert mit den Regelkreisen der Raumluftklimatisierung gekoppelt waren, tages- und jahreszeitliche Veränderungen der Oberflächentemperaturen von Malfassungen aus dem 15. Jahrhundert nicht punktuell, wie bisher üblich, sondern als Ganzes zu erfassen und dementsprechend die Raumluftverhältnisse genauer online steuern zu können.

Unstrittig sind die Möglichkeiten, die die aktive Thermografie bietet, um Defekte (Risse, Blasen, Hohlräume, Fraßgänge, Fugen oder Ablösungen) im oberflächennahen Bereich zu erkennen, aber auch Materialunterschiede wie Holzstrukturen, Äste, Nägel oder Einschlüsse anderer Art. Es lassen sich wohl auch Schichtdicken von Furnieren oder Beschichtungen und Tiefenlagen von Defekten ermitteln.

Ein Problem liegt weiterhin in der Anwendung der aktiven Thermografie bei stärkeren Holzstrukturen. Die Erwärmung um wenige Grade im oberflächennahen Bereich bis 10 mm erscheint für die meisten Objekte verträglich zu sein. Je tiefer die Untersuchung jedoch gehen soll, desto höher ist der notwendige Energieeintrag. Ein weiteres Problem liegt in der Thermogrammauswertung. Bedeutungslose Material- oder Oberflächenfehler (Struktur, Korrosion, Verschmutzung) können sich im Thermogramm ähnlich darstellen wie Strukturfehler, was besonders für Messungen an metallischen Gegenständen zutrifft. Das heißt, dass zur Thermogrammauswertung Erfahrung notwendig ist. Die Anwendung hochempfindlicher IR-Kameras, verbunden mit einer genauen Steuerung des Energieeintrags, ist zurzeit wohl nur im Labor möglich. Es bleibt dem Kriterium des Restaurators überlassen, ob und in welchem Maße eine Temperaturbeeinflussung des Kunstwerkes zu verantworten ist oder nicht. Da mit der Thermografie ähnliche Ergebnisse wie bei Röntgen-Verfahren erzielt werden können, jedoch ohne die bei diesen erforderlichen erheblichen Sicherheitsmaßnahmen, stellen die thermografischen Verfahren eine Alternative zur Röntgentechnik dar.

12 Bibliografie

- ROST, Arno (bearb. u. hrsg.): *Thermographie und Thermoregulationsdiagnostik*, Medizinisch-Literarische Verlagsgesellschaft 1980, S. 11-13, ISBN 3-88136-077-8
- HAFERKORN, Heinz (Hrsg.): *Lexikon der Optik*, Hanau 1988, ISBN 3-7684-6858-5
- HERMANN, Klaus; WALTHER, Klaus; BERENDT, Reinhard (Hrsg.): *Wissenspeicher Infrarottechnik - Theoretische Thermografie*, 1. Auflage, Leipzig 1990, S. 436, ISBN 3-343-00498-7
- LUGSCHEIDER, Erich (Hrsg.): *7. Werkstoffwissenschaftliches Kolloquium - Innovative Werkstofftechnologie 1999*, VDI-Ges. Werkstofftechnik Kreis Aachen, Werkstoffwissenschaftliche Schriftenreihe, Bd. 41, Aachen (2000), S. 23-32, ISBN 3-8265-7301-3
- TRÄNKLER, Hans Rolf; OBERMEIER, Ernst (Hrsg.): *Kapitel 15 - Infrarot-Strahlungssensoren zur berührungslosen Temperaturmessung*. In : *Sensortechnik, Handbuch für Praxis und Wissenschaft*, Berlin, Heidelberg, New York 1998, S. 953-1020, ISBN 3-540-58640-7
- ADENSTEDT, Ralf; HALLER, Manfred: *Fehlstellen statistisch bewerten - Ein neues Konzept für die Lebensdauerabschätzung*. In : *Materialprüfung*, Bd. 41, München 1999, Heft 6, S. 241-246
- ARNOLD, Michael: *Entwicklung von Spezialobjektiven für messtechnische Aufgaben im IR-Bereich*. In : Gerald Gerlach (Hrsg.): *Infrarot-Sensoren und -Systeme*, Dresdner Beiträge zur Sensorik, Bd. 4, Dresden 1997, S. 161-165, ISBN 3-931828-66-2
- ARZ, Rainer: *Induktive Messung von Temperaturgradienten*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): *tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik*, Bd. 66, München 1999, Heft 4, S. 151-155
- BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG (BAM): *Infrarot-Thermografie, ZfPBau-Kompodium 1999*
- BÄR, Jürgen; VOLPP, Thorsten: *Vollautomatische Experimente zur Ermüdungsrissausbreitung*. In : *Materialprüfung*, Bd. 43, München 2001, Heft 6, S. 242-247
- BATHKE, Werner; STAHLFELD, Gerhard: *Rissentstehung thermometrisch ermitteln - Zerstörungsfreie Bestimmung in mechanisch gefügten und widerstandspunktgeschweißten Verbindungen*. In : *Materialprüfung*, Bd. 42, München 2000, Heft 3, S. 67-73
- BAUMANN, J.; NETZELMANN, Udo: *Zerstörungsfreie Prüftechniken für Materialverbunde - Ergebnisbericht des Verbundprojektes Zerstörungsfreie Prüftechniken für Materialverbunde (ZfP)*, Forschungszentrum Karlsruhe, Projektträgerschaft Produktion und Fertigungstechnologien, Karlsruhe 2003, S. 73
- BEAUDOIN, Jean Louis; MERIENNE, Etienne; DANJOUX, Raphael; EGEE, Michel: *Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry*. In : *Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers: Infrared Technology and Applications*, Bd. 590, (1985), S. 285-292
- BECK, W. A.; FASKA, T. S.; LITTLE, J. W.; ALBRITTON, J.; SENSIPER, M.: *In Long Wavelength Infrared Detectors and Arrays - Physics and Applications II*. In : (Editors)

- V. S. Swaminathan, F. Radpour, T. S. Faska, S. S. Li, H. C. Liu: *Electrochemical Society Proceedings*, Bd. 94, (1994), Heft 30, S. 69
- BEIN, B. K.; DELGADILLO-HOLTFORT, I.; GIBKES, J.; PELZL, J.: *Photothermische Feuchtebestimmung an Baumaterialien*. In : BAM, mfpa, DGZfP : DGZfP-Berichtsband BB 69-CD, Feuchtetag 99, Umwelt · Meßverfahren · Anwendungen, Berlin 7./8. Oktober 1999
- BLANKE, W.: *Thermophysikalische Stoffgrößen*, 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Berlin 1989
- BLOMENSCHT, Ferdinand: *Infrarot-Thermographie*, 3. Aufl., Stuttgart 1990, ISBN 3-8167-0044-6
- BOCK, Thomas: *Messen und Prüfen an Beschichtungen : Besonderheiten - Anforderungen - Grenzen*. In : tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 67, München 2000, Heft 12, S. 513-518
- BODME, James: *Intelligenter Sensorschalter*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 66-67, ISBN 3-86005-142-3
- BREITENSTEIN, Otwin; KONOVALOV, I.; LANGENKAMP, Martin : *Highly sensitive lock-in thermography investigation of local heat sources implying 2-dimensional spatial deconvolution*. In : (Editors) D. Balageas, J. L. Beaudoin, G. Busse, G. M. Carlomagno: *Quantitative InfraRed Thermography 5 (QIRT'2000)*, Proceedings of the Eurotherm Seminar n° 64, France, Reims, 18.-21 Juli 2000, S. 218-223
- BREITENSTEIN, Otwin; LANGENKAMP, Martin; RAKOTONIAINA, J. P.; ZETTNER, J.: *The imaging of shunts in solar cells by infrared lock-in thermography*. In : (Eds.) McNelis, B., Palz, W., Ossenbrink, H. A. and Helm, P.. WIP-ETAFlorence: Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Italy 2002, S. 1499-1502
- BREITENSTEIN, Otwin; LANGENKAMP, Martin; ZETTNER, J.; PEPPERMÜLLER, Ch.: *Hochempfindliche Lock-in Thermographie zur Abbildung von μ W-Wärmequellen*. In : (Hrsg.) H.-J. Möller, E. Buhrig: *Kristallisation und Technik - Halbleitermaterialien, Prozesstechnologie und Diagnostik*, Freiburger Forschungsforum, Vorträge zum 51. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 14.-16. Juni 2000, B321 Werkstofftechnologie, TUBA Freiberg 2002, S. 254-263
- BREUCKMANN, Bernd: *Bildverarbeitung und optische Meßtechnik in der industriellen Praxis - Grundlagen der 3D-Meßtechnik, Farbbildanalyse, Holografie und Interferometrie mit zahlreichen praktischen Applikationen*, München 1993, S. 21-52, ISBN 3-7723-4861-0
- BRINK, A.; HILLEMEIER, B.; MAIERHOFER, Ch.; RIECK, C.; RÖLLIG, M.; WIGGENHAUSER, H.: *Untersuchung des Einflusses von Feuchtigkeit auf die Ortung von Hohlstellen in Betonstrukturen mit der Impuls-Thermografie*. In : (Hrsg.) K. Kupfer, E. Trinks: *Feuchtemessung - ein vielfältiges Problem mit großen Perspektiven*, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, MFPA Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, 11. Feuchtetag 2002 in Weimar, 18.-19. September 2002, S. 47-58
- BRINK, A.; MAIERHOFER, C.; RÖLLIG, M.; WIGGENHAUSER, H.: *Anwendung der Impuls-Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren im Bauwesen*. In : (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): *Zerstörungsfreie Materialprüfung, ZfP in Anwendung und Forschung*, Weimar, 6.-8. Mai 2002, DGZfP-Berichtsband 80-CD, Elektronische Ressource, Berlin 2002, ISBN 3-931381-39-0

- BRINKMANN, Dipl.-Ing. Jörg: *Beitrag zur prozeßintegrierten Qualitätsprüfung mittels Thermographie für den Aluminiumkokillenguß*. In : (Hrsg.) Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2, Fertigungstechnik, 483 Bericht aus dem Institut für Werkstoffkunde, Düsseldorf 1998, S. 3-83, ISBN 3-18-348302-5
- BROCKEIS, Dipl.-Ing. Anke: *Infrarot-Thermographie zur Überwachung von Flächenbiofiltern*. In : (Hrsg.) Schriftenreihe WAR: Wasserversorgung, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., Verein zur Förderung des Instituts WAR, Technisches Hochschulschreiben Darmstadt, Univ., Diss., Darmstadt 2001, S. 44-65, ISBN 3-932518-32-2
- BÜCHTEMANN, Dr. Wolf: *Wärmebildgeräte der zweiten Generation mit IRCCD*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden: Infrarot-Sensoren und -Systeme, 5. Fachtagung, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 54-67, ISBN 3-86005-142-3
- BURGMAYER, Thomas: *Anwendungsmöglichkeiten der Thermografie in der Automobillackierung*. In : tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 67, München 2000, Heft 12, S. 529-531
- BURMESTER, Andreas: *Remote imaging spectroscopy of drawings*. In : (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGfZP): 4th International Conference Non-Destructive Testing of Works of Art : 4. Internationale Konferenz Zerstörungsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern, Berlin 3.-8. Oktober 1994, DGfZP-Berichtsband 45, Teil 1, S. 183-192
- BURNSTOCK, A.; LEARNER, T.: *Changes in the Surface Characteristics of Artificially Aged Mastic Varnishes After Cleaning*. In : Studies in Conservation 37 (1992) 3, S. 165
- BÜSCHER, Ing. Konstantin Alexander: *Einsatz der Modulationsthermografie zum Nachweis von Feuchtigkeit in Baustoffen*, Hochschulschreiben Rostock, Berichte aus dem Bauwesen, Univ., Diss., Aachen 1999, S. 5-43, ISBN 3-8265-6818-4
- BÜSCHER, K.; WILD, W.; WIGGENHAUSER, H.: *Amplitudenempfindliche Modulationsthermografie zur Feuchtemessung im Bauwesen*. In : Tagungsband AHMT XII. Meßtechnisches Symposium 28.-30.9.1998, Saarbrücken 1998, S. 9-16
- BÜSCHER, Konstantin A.; WILD, Walter; WIGGENHAUSER, Herbert: *Feuchtemessung im Bauwesen mit der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie*. In : (Hrsg.) Prof.-Dr. Elmar Wagner: tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 66, München 1999, Heft 4, S. 139-145
- BUSSE, G.: *Nondestructive evaluation with thermal waves*. In : (Hrsg.) P. Hess: Photoacoustic, Photothermal and Photochemical Processes at Surfaces and in Thin Films, Heidelberg 1989, S. 251-271, ISBN 3-540-51703-0
- BUSSE, G.: *Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal*. In : Applied Physics Letters, Bd. 35, November 1979, Heft 10, S. 759-760, AIP · 0003-6951/79/220759-02\$00.50
- BUSSE, G.; BAUER, M.; RIPPEL, W.; WU, D.: *Lockin Vibrothermal Inspection of Polymer Composites*. In : D. Balageas; G. Busse; (Hrsg.) G. M. Carlomagno: Quantitative Infrared Thermography (QIRT'92), Editions Européennes Thermique et Industrie Paris 1992, S. 154-159

- BUSSE, G.; VERGNE, D.: *Characterization of Varnish Layers Using Optically Generated Thermal Waves*. In : (Editors) P. Höller, V. Hauk, G. Dobmann, C. O. Ruud, R. E. Green: *Nondestructive Characterization of Materials, Proceedings of the 3rd International Symposium Saarbrücken, FRG, 3.-6. Oktober 1988, Heidelberg 1989*, S. 215-222, ISBN 3-540-51856-8
- BUSSE, G.; WU, D.; KARPEN, W.: *Thermal Wave Imaging with Phase Sensitive Modulated Thermography*. In : (Hrsg.) Steven J. Rothman: *Journal of Applied Physics*, Bd. 71, American Institute of Physics August 1992, Heft 8, S. 3962-3965, ISSN 0021-8979
- CHÂTENAY-MALABRY; BALAGEAS, D.: *Quantitative infrared thermography - Proceedings of the Eurotherm seminar Nr. 27, 7.-9. July 1992*. In : *Europ. Thermique et Industrie*, Paris 1992, S. 401, XVI, ISBN 2-85933-031-3
- CHRISTOPH, Sebastian Garbe: *Measuring heat exchange processes at the air water interface from thermographic image sequence analysis*, 2001
- CIELO, P.: *Pulsed photothermal evaluation of layered materials*. In : *Journal of Applied Physics*, Bd. 56, American Institute of Physics, Juli 1984, Heft 1, S. 230-234, AIP · 0021-8979/84/130230-05\$02.40
- CRAMER, J.: *Thermographie in der Bauforschung*. In : *Archäologie und Naturwissenschaften*, 2, (1981), S. 44-54
- CRAMER, K. E.; WINFREE, W. P.: *Thermographic imaging of cracks in thin metal sheets*. In : (Editor) K. Eklund: *Thermosense XIV, Proc. SPIE 1682*, (1992), S. 162-170
- DAHLE, Terje Nils: *Infrarot-Thermographie*, 2. erw. Aufl., Stuttgart 1988, S. 98, ISBN 3-8167-0044-6
- DANESI, S.; SALERNO, A.; WU, D.; BUSSE, G.: *Cooling down thermography: principle and results for NDE*. In : *Proceedings of the International Society for Optical Engineering, Thermosense XX*, Orlando, 1998, S. 266-274
- DENGEL, D.; HARIG, H.: *Die Temperatur als Indikator von Deformationsvorgängen im Werkstoff*. In : *Härtereitechn. Mitt.*, Bd. 30, (1975), Heft 2, S. 112-116
- DERENIAK, Eustace; SAMPSON, Robert: *Infrared detectors and focal plane arrays VII*. In : *Proc. SPIE*, Orlando, FL 2002, ISBN 08194447152
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG E. V. (DGZfP): *Merkblatt über thermografische Untersuchungen an Bauteilen und Bauwerken (B5)*, DGZfP-Ausschuß für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (AB), Unterausschuß Optische und thermografische Verfahren, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin, Oktober 1993, S. 15
- DILLENZ, A.; BUSSE, G.: *Ultraschallthermografie an Polymerbauteilen*. In : H. G. Fritz, C. D. Eisenbach (Hrsg.): *17. Stuttgarter Kunststoffkolloquium*, Stuttgart 2001, Beitrag 6/V1, ISBN 3-00-007297-7
- DILLENZ, A.; ZWESCHPER, Th.; BUSSE, G.: *Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features*. In : *Insight 42* [12], (2000), S. 815-817
- Dipl. Ing. (FH) HOTTER, Susan: *Thermographie als zerstörungsfreies Prüfverfahren zur möglichen Feuchtigkeitsbestimmung an historischen Bauwerken*, Masterarbeit, Bamberg 2003, S. 95

- DRACH, V.; HARHAUSEN, G.; EBERT, H.-P.; FRICKE, J.: *Quantitative Thermal Characterisation of Small Samples via Thermography*. In : Proceedings Infrared Sensors and Systems, Erfurt, May 2002, S. 191-196
- DUCHÂTEAU, Rüdiger; KÜRBITZ, Gunther: *Höchstaflösendes scannendes Wärmebildgerät für den 7...12 µm-Bereich*. In : (Hrsg.) Gerald Gerlach: Infrarot-Sensoren und -Systeme, Dresdner Beiträge zur Sensorik, Bd. 4, Dresden 1997, S. 173-179, ISBN 3-931828-66-2
- EBERLE, Klaus; GOLD, Norbert: *Impulswellenanalyse - Anwendung zur Beschreibung von Schäden in plattenförmigen Probekörpern*. In : Materialprüfung, Bd. 40, München 1998, Heft 4, S. 144-148
- EHRFELD, W.; HESSEL, V.; LÖWE, H.: *Microreactors New Technology for Modern Chemistry*, WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim 2000
- EHRENSPIEL, Johannes: *Thermobilder höchster Auflösung*. In : Fraunhofer Magazin, Preis Stifterverband, Fraunhofer-Gesellschaft, (2001), Heft 4, S. 34-35
- ETTEL, Philipp; DEUTSCH, Volker; PLATTE, Michael: *Bestimmung der Schräglage von Rissen bei der Risstiefenmessung*. In : Materialprüfung, Bd. 39, München 1997, Heft 10, S. 414-417
- FARNSWORTH, M.: *Infra-Red Absorption of Paint Materials*. In : Technical Studies in The Field of The Fine Arts, Bd. 7, (1938), S. 88-98
- FAVRO, L. D.; Xiaoyan Han; Yingxia Wang; KUO, P. K.; THOMAS, R. L.: *Pulse-Echo Thermal Wave Imaging*. In : (Editors) D. O. Thompson; D. Chimenti: Review of progress in quantitative NDE, Vol. 14, Plenum, New York 1995, S. 425-429
- FAVRO, L. D.; Xiaoyan Han; Zhong Ouyang; Gang Sun; Hua Sui; THOMAS, R. L.: *Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse*. In : Proceedings of AIP, American Institute of Physics - Review of Scientific Instruments, Bd. 71, Juni 2000, Heft 6, S. 2418-2421, AIP · 0034-6748/2000/71(6)/2418/4/\$17.00
- FIEDLER, B.; KOLITSCH, C.: *Die Bauteilermüdung zerstörungsfrei ermitteln*. In : Materialprüfung, Bd. 36, München 1994, Heft 5, S. 167-172
- FISCHER, Dipl.-Ing. G.: *Thermographie - bildgebende Temperaturmessung*, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) der Universität Stuttgart, Vortrag auf der Tagung : Thermographie in der Industrie, Luzern, 7.10.1988, S. 1-7
- FISCHER, G.: *Vibrothermographie - ein zerstörungsfreies Verfahren zur Verformungsanalyse und Schadensdetektion bei Kunststoffen : Vibrothermography - a nondestructive method for deformation analysis and flaw detection in plastics*. VDI-Berichte (1987) Nr. 631, S. 153-162
- FLIR SYSTEMS: *Einen Fehler Sehen, bevor er zum Problem wird - Infrarot-Thermografie für vorbeugende Instandhaltung und Gebäudeuntersuchung*, Informationsbroschüre der Firma FLIR Systems
- FLIR SYSTEMS: *news - FLIR Systems: neue Standards für die Infrarot-Thermografie*, Informationsbroschüre der Firma FLIR Systems
- FLIR SYSTEMS: *Technischer Kundendienst - Eine breite Palette von Dienstleistungen, mit denen Sie alle Möglichkeiten Ihres Infrarot-Systems ausschöpfen können*, Informationsbroschüre der Firma FLIR Systems
- FLIR SYSTEMS: *ThermaCAM - Researcher - Leistungsstarke Software zur Echtzeit-Speicherung und -Analyse*, Informationsbroschüre der Firma FLIR Systems

- FLIR SYSTEMS: *ThermaCAM[®] SC 500 - Technische Daten*, Informationsbroschüre der Firma FLIR Systems
- FLIR SYSTEMS: *ThermaCAMTM ResearcherTM*, Informationsbroschüre der Firma FLIR Systems, Informationsbroschüre der Firma FLIR Systems
- FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE PHYSIK: *33. IR-Kolloquium, 8. und 9. April 2003*
- FRIEDRICHS, H. A.; VON GUERICKE, Otto: *Messung der Temperaturleitfähigkeit flüssiger metallurgischer Schlacken bei hohen Temperaturen*, Aachen 2000
- GALMICHE, F.; VALLERAND, S.; MALDAGUE, X.: *Pulsed Phase Thermography with the Wavelet Transform*. In : (Editors) D.O. Thompson, D.E. Chimenti: *Review of Progress in Quantitative NDE*, Am. Institute of Physics, 19A, Montréal, Juli 2000, S. 609-615
- GARRECHT, Harald; WOLFRUM, Klaus; SCHMIDER, Ralf: *Großflächige Bewertung der raumklimatischen Beanspruchungen von Raumschalen mittels eines online-Infrarot-Thermografie-Messsystems (OITM)*
- GAUSSORGUES, G.: *Infrared thermography*, London 1994, S. 508, ISBN 0-412-47900-1
- GEBHARDT, Andreas: *Thermografie - Anwendung bei der geophysikalischen Naherkundung*, 1. Auflage, Leipzig 1981, S. 7-39, VLN 152-915/182/81, LSN 1445
- GENILKE, Kai: *Vergleichende Wärmebrückenberechnung und Thermographie*, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Bauphysik, Diplomarbeit, Kassel 2002
- GERLACH, G.: *Stand und Trends der Infrarotmesstechnik (II)*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): *tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik*, Bd. 66, München 1999, Heft 9, S. 311
- GERLACH, G.: *Stand und Trends der Infrarotmesstechnik*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): *tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik*, Bd. 66, München 1999, Heft 3, S. 87-88
- GEYER, E.; ARNDT, D.; GRÜNDER, K.-P.; ROOS, A.; WIGGENHAUSER, H.: *Thermographic and shearographic investigations of carbon fibre on concrete surfaces*. In : Fondazione Giorgio Ronchi (Hrsg.): *Proceedings of 4th Internal Workshop on Advanced Infrared technology and Applications*, 15.-16. September 1997, Florenz 1998, S. 297-304
- GEYER, E.; ARNDT, D.; WIGGENHAUSER, H.: *Anwendung der Transient-Thermografie im Bauwesen*. In : VDI/VDE-GMA (Hrsg.): *Experimentielle Beanspruchungsanalyse - neue Entwicklungen und Anwendungen*, GMA-Bericht 29, GESA-Symposium 1996, Schliersee, 10.-11.10.96, Düsseldorf 1996, S. 351-352
- GIEBELER, Karl Heinz: *Untersuchungen bei Luftundichten der Gebäudehülle : Neue Prüfmethode, Feststellungen am Objekt, Schadenbeispiele*, September 1995
- GLANTSCHNIGG, Norbert: *Infrarotthermographische Messungen in der Bautechnik : Praktische Anwendungsfälle für Sachverständige*, 1996, S. 1-12
- GLÜCKERT, Udo: *Erfassung und Messung von Wärmestrahlung - Eine praktische Einführung in die Pyrometrie und Thermographie*, München 1992, S. 153, ISBN 3-7723-6292-3
- GROSS, M.: *Neue Möglichkeiten der Gemäldeuntersuchung mit infraroter Strahlung*, Diplomarbeit an der Höheren Fachklasse für Konservierung und Restaurierung HFG, Schule für Gestaltung Bern, Bern 1993

- GROSS, W.; SCHEUERPFLUG, H.; HIERL, Th.; SCHULZ, M.; KARG, F.: *Defect localization in CuInSe₂ thin film solar modules by thermal infrared microscopy*. In : (Editors) J. Schmidt, H. A. Ossenbrink, P. Helm, H. Ehmman, E. D. Dunlop: Proc. 2nd World Conf. Photovolt. Energy Conversion, Joint Research Center European Commission, Ispra 1998, S. 522-524
- HAKENESCH, Peter: *Dünnschichtthermographie - Ein neues Meßverfahren für Wärmeübertragungsvorgänge*, Technisches Hochschulschreiben München, Fak. für Maschinenwesen, Lst. für Fluidmechanik, Diss., München 1996, S. 79-85
- HALL, Monika: *Bauphysik - Messtechnische Bestimmung des Gebäude-Ist-Zustandes*, Weiterbildendes Studium Energie und Umwelt, WS 2001
- HARIG, H.; MIDDELDORF, K.; MÜLLER, K. (Hrsg.): *Überblick über thermometrische Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Stählen*. In : HTM, Bd. 41, München 1986, Heft 5, S. 286-296
- HARWOOD, N.; CUMMINGS, W. M.: *Thermoelastic Stress Analysis*, Bristol, Philadelphia, New York 1991, ISBN 0-7503-0075-2
- HÄBLER, Rüdiger: *Grenzschichten mikrothermisch analysieren - Die mikrothermische Analyse als neue Methode zur Grenzschichtuntersuchung in Verbindungen*. In : Materialprüfung, Bd. 42, München 2000, Heft 3, S. 79-83
- HAUSER, Gerd: *Bauschäden und energetische Sanierung*, Vorlesungsskript 2003
- HEIDT, Frank-Dietrich; KALENDER, Volker: *Quantitative Thermografie - Verbesserte Möglichkeiten zur Untersuchung von Gebäuden*. In : Gesundheitsingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik, Bd. 119, München 1998, Heft 5, S. 247-252
- HEINRICH, H.; DAHLEM, K.-H.; EDINGER, M.; VOGEL, J.: *Einsatz aktiver Thermographie zur Detektion von Einschlüssen in Baukonstruktionen und im Erdreich*. In : Thermografie-Kolloquium, DGZfP-Berichtsband 77-CD, Stuttgart 2001
- HEINZ, G.; LAN, Walther; LAN, Ton T. N.: *Erfassung von Härtetiefe und Härteprofil in Eisenwerkstoffen mit photothermischen Verfahren*. In : tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 65, München 1998, Heft 5, S. 185-191
- HESSEL, V.; EHRFELD, W.; GOLBIG, K.; HAVERKAMP, V.; LÖWE, H.; STORZ, M.; WILLE, C.; GRUBER, A.; JÄHNISCH, K.; BAERNS, M.: *Gas/Liquid Microreactors for direct Fluorination of Aromatic Compounds using elemental Fluorine*. In : W. Ehrfeld (Hrsg.): Microreaction Technology - industrial prospects, Proceedings of the 3th International Conference on Microreaction Technology, Berlin 2000, S. 526-540
- HIERL, T.; GROSS, W.; ZETTNER, J.; SCHULZ, M.: *Thermal IR Microscopy (TIM) with 10 µm spatial resolution*, High Temperatures-High Pressures 32, xx (2000)
- HIERL, Th.; GROSS, W.; SCHEUERPFLUG, H.; LUTZ, A.; SCHIRL, U.; SCHULZ, M.: *Infrared imaging of buried heat sources and material nonuniformities*. In : Björn F. Andresen, Marija Strojnik (Editors): Infrared Technology and Applications XXIII, Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bd. 3061, Bellingham 1997, S. 943-953, SPIE · 0277-786X/97
- HOFFMANN, Uwe; REICHARDT, Thomas; BUDZIER, Helmut; Krause, Volker: *Infrarot-Linienkamera mit pyroelektrischem Zeilensensor*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 76-82, ISBN 3-86005-142-3

- HOFFMANN, Günter; NEUMANN, Norbert; NORKUS, Volkmar; BUDZIER, Helmut: *Stand und Perspektiven ungekühlter IR-Arrays*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 19-22, ISBN 3-86005-142-3
- HOFFMANN, U.; REICHARDT, T.; BUDZIER, H.; ZIMMERHACKL, M; HOFFMANN, G.; HEB, N.: *Ungekühlte IR-Kameras PYROLINE und PYROFIELD für die industrielle Temperaturmessung*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, ISBN 3-86005-142-3
- HOFFMANN, Uwe; REICHARDT, Thomas; BUDZIER, Helmut; ZIMMERHACKL, Manfred; HOFMANN, Günter: *Ungekühlte IR-Kameras PYROLINE und PYROFIELD für die industrielle Temperaturmessung*. In : Gerald Gerlach (Hrsg.): *Infrarot-Sensoren und -Systeme*, Dresdner Beiträge zur Sensorik, Bd. 4, Dresden 1997, S. 183-189, ISBN 3-931828-66-2
- HOLST, Gerald C.: *Common sense approach to thermal imaging*, Bellingham, Washington 2000, S. 377, ISBN 0-8194-3722-0
- HOLZHAUSEN, Ute; MILLOW, Sieghard; ADLER, Hans-Jürgen P.: *Untersuchungen zur thermischen Alterung von Beschichtungen*. In : tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 67, München 2000, Heft 12, S. 524-528
- HOPKINS, John-Mark; SIBBETT, Wilson: *Ultrakurze Laserblitze*. In : Spektrum der Wissenschaft Verlag mbH, Heidelberg, November 2000, Heft 11, S. 66-73
- HORKUS, V.; BUDZIER, H.; SOKOLL, T.; HOFMANN, G.; HOFFMANN, U.; HEB, N.: *High-sensitivity pyroelectric linear arrays and their applications*. In : SPIE Infrared Detectors and Focal Plane Arrays IV 2746, (1996), S. 51-59, ISBN 0819421278
- HÜTTNER, R.; SCHOLLMMEYER, E.: *The on-line detection of moisture and moist coatings by means of thermal waves*. In : ETS (Edizioni): *Proceedings of QIRT'96*, Pisa 1997, S. 215-219
- ISRAEL, Helmut: *Messen und Orten mit Infrarot, Optische und elektronische Grundlagen-Applikationen*, München 1988, S. 5-42, ISBN 3-7723-9801-4
- JAKOVICS, A.; JEKABSONS, N.; MÜHLBAUER, A.; TRÜMMANN, H.: *Bestimmung der effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauelementen unter praxisnahen Bedingungen*. In : *Elektrowärme International A*, Bd. 55, 1997, S. 77-83
- JAKOVICS, A.; SHNIDERE, L.; GENDELIS, S.: *Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauelementen in existierenden Gebäuden und in der Thermokamera*. In : Technische Universität Ilmenau (Hrsg.): *44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, 20.-23.09.1999, Maschinenbau im Informationszeitalter*, Bd. 1, S. 238-243, ISSN 0943-7207
- JAKOVICS, A.; TRÜMMANN, H.; BANGA, A.; MÜHLBAUER, A.: *Einsatz der Gebäudethermographie zur Diagnostik der Wärmedämmung an osteuropäischen Hochbauten*. In : *Elektrowärme international*, Bd. 56, September 1998, Heft A 3, S. 93-100, ISSN 0174-6189
- JOHANNSEN, Karsten: *Kombination von Ergebnissen unterschiedlicher Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung*, Technisches Hochschulschreiben Berlin, Diss., Berlin 1996, S. 25-32

- KALENDER, Volker: *Auswertungsmethoden und Fehlerbetrachtungen für die quantitative Thermographie*, Diplomarbeit, Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie, Universität-GH Siegen, Mai 1996
- KALUS, G.; BEIN, B.; PELZL, J.; BOSSE, H.; LINNENBRÜGGER, A.: *Characterization of tribological protective films and friction wear by IR radiometry of thermal waves*. In : ETS (Edizioni): Proceedings of QIRT'96, Pisa 1997, S. 203-208
- KAPLAN, Herbert: *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*, Bellingham, Washington 1999, S. 1-135, ISBN 0-8194-3138-9
- KARPEN, W.; BOHNACKER, A.; BUSSE, G.: *Mit thermischen Wellen Lackdicken messen - Photothermische Dickenmessung an Ein- und Zwei-Schicht-Lack-Systemen*. In : Materialprüfung, Bd. 35, München 1993, Heft 1-2, S. 24-27
- KARSTÄDT, D.; MÖLLMANN, K.-P.; PINNO, F.; VOLLMER, M.: *Anschauliche Wärmelehre im Unterricht - Ein Beitrag zur Visualisierung thermischer Vorgänge*. In : Praxis der Naturwissenschaften - Physik, Bd. 5, 1999, Heft 48, S. 24-31
- KARSTÄDT, Detlef; MÖLLMANN, Klaus-Peter; PINNO, Frank; VOLLMER, Michael: *Sehen im Infrarot - Grundlagen und Anwendungen der Thermographie*. In : Physik in unserer Zeit, Bd. 29, Weilheim 1998, Heft 1
- KEHL, Gerhard: *Verformungen experimentell analysieren - Berührungslose Ganzfeldverfahren - Ein Überblick und Vergleich*. In : Materialprüfung, Bd. 42, München 2000, Heft 5, S. 166-171
- KOEPERNIK, Jochen: *Systemkomponenten von Infrarot-Wärmebildgeräten*, Dresden, Technische Universität Diss., 1996, Institut für Festkörperelektronik. In : Gerald Gerlach (hrsg.): *Dresdner Beiträge zur Sensorik, Band 3*, Technisches Hochschulschreiben Dresden, Univ., Diss., Dresden 1997, S. 130, ISBN 3-931828-65-4
- KOLLMANN, F.; SCHNEIDER, A.; TEICHGRÄBER, R.: *Untersuchungen über die Erwärmung, Verwölbung, und Trocknung hölzerner Bildtafeln bei starker Beleuchtung*. In : Holz als Roh- und Werkstoff, Mitteilung aus dem Institut für Holzforschung und Holztechnik der Universität München, 19. Jahrgang, Februar 1961, Heft 2
- KRAPEZ, J.; GARDETTE, G.; BALAGEAS, D.: *Thermal ellipsometry in steady-state and by lock-in thermography. Application to anisotropic materials characterization*. In : ETS (Edizioni): Proceedings of QIRT'96, Pisa 1997, S. 257-262
- KREIDER, James F.; PREIS, Mark K.; ROBERTS, Peter C. T.; OWEN, Larry D.; SCOTT, Walter M.: *Multiplexed mid-wavelength IR long, linear photoconstantive focal plane arrays*. In : Georg Y. Baaklini, Eric S. Boltz, Steven M Shepard, Peter J. Shull (Editors): *Nondestructive Evaluation of Materials and Composites V, Infrared Imaging Systems - Design, Analyses, Modeling and Testing II*, Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bd. 1488, (1991), S. 376-388, SPIE · 0-8194-0597-3/91
- KÜBITZ, Dr. Günther: *Tendenzen der Wärmebildgeräte-Technik*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 29-40, ISBN 3-86005-142-3
- Kundenmagazin der Stadtwerke Essen AG: stadtgespräch: *Gebäudecheck : Heiße Aufnahmen für kühle Rechner : Mit der Kamera Energieverlusten auf der Spur - die*

- Stadtwerke bieten einen Gebäudecheck für Haus- und Wohnungseigentümer an*, Herbst 2002
- KUNZE, Ralf: *Charakterisierung von Beschichtungen durch thermische Verfahren*. In : tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 67, München 2000, Heft 12, S. 514-518
- KUO, P. K.; FENG, Z. J.; AHMED, T.; FAVRO, L. D.; THOMAS, R. L.; HARTIKAINEN, J.: *Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in video technique*. In : P. Hess; J. Pelzl: Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Heidelberg 1987, S. 415-418
- KÜRBITZ, G.: *Wärmebildgerätetechnik – quo vadis?* In : Elmar Wagner (Hrsg.): tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 66, München 1999, Heft 9, S. 338-343
- KÜRBITZ, Gunther: *Entwicklungstendenzen bei Wärmebildgeräten*. In : Gerald Gerlach (Hrsg.): Infrarot-Sensoren und -Systeme, Dresdner Beiträge zur Sensorik, Bd. 4, Dresden 1997, S. 167-171, ISBN 3-931828-66-2
- KÜRBITZ, Gunther: *Thermographie - Radiometrisch messende Wärmebildgeräte*. In : Helmut Hutten (Hrsg.): Biomedizinische Technik, Bd. 1, Berlin 1992, S. 350-369, ISBN 3-540-52537-8
- KUSSMAUL, Karl; STÄRK, Klaus: *Untersuchung metallischer Werkstoffe mit thermometrischen Methoden*. In : Materialprüfung, Bd. 23, München 1981, Heft 11, S. 391-395
- LESNIAK, Jon R.; BOYCE, Bradley R.: *Forced diffusion thermography*. In : Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineer: Nondestructive inspection of aging aircraft, 14.-15. July 1993, San Diego, California, Bd. 2001, Bellingham, Washington, USA 1993, S. 92-102, ISBN 0-8194-1250-3
- LUTZ, W.; GÖSCHEL, U.; EYERER, P.: *Phasenstruktur thermoplastischer Materialien im nano- und mikroskopischen Maßstab*. In : H. G. Fritz; C. D. Eisenbach (Hrsg.): 17. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart 2001, Beitrag 5/P5, S. 1-6, ISBN 3-00-007297-7
- MAHLER, Guido: *Ein universelles System von Hard- und Softwarekomponenten für die Infrarot-Thermografie in verschiedensten Anwendungsfeldern*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 57-59, ISBN 3-86005-142-3
- MAIER, Anton: *Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung: Messung der Luftdichtigkeit eines Gebäudes (Blower-Door, Infrarot-Kamera)*, Januar 2002
- MAIER, Horst; CABABSKI, Wolfgang; WENDLER, Joachim; ZIEGLER, Johann: *Abbildende Infrarot-Detektoren und -Kameras für die Wärmemesstechnik*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 66, München 1999, Heft 3, S. 89-96
- MAIERHOFER, C.; BRINK, A.; HILLEMEIER, B.; RIECK, C.; RÖLLIG, M.; WIGGENHAUSER, H.: *Struktur- und Feuchteuntersuchung in Betonstrukturen mit der Impuls-Thermografie*. In : Bauphysik, Bd. 25, (2003), Heft 1, S. 22-26
- MAIRINGER, F.; PAPST, A.: *Die Erstellung von Infrarot-Reflektogrammen von Kunstwerken mittels des Programmpakets IREIKON : IREIKON - A program package for the production of computer generated infrared reflectograms*. In : Deutsche Gesellschaft

- für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGfZP) (Hrsg.): 4th International Conference Non-Destructive Testing of Works of Art - 4. Internationale Konferenz Zerstörungsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern, Berlin 3.-8. Oktober 1994, DGfZP-Berichtsband 45, Teil 1, S. 175-182
- MALDAGUE, X.; COUTURIER, J. P.: *Review of pulsed phase thermography*. In : Proceedings of the 4th Intern. Workshop Advanced Infrared Technology and Applications, Florence, 1997, S. 271-286
- MALDAGUE, X.; COUTURIER, J.; MARINETTI, S.; SALERNO, A.; WU, D.: *Advances in pulsed phase thermography*. In : D. Balageas, G. Busse, G. M. Carlomagno (Editors): Quantitative InfraRed Thermography (QIRT'96), Proceedings of Eurotherm Seminar n° 50, Germany, Stuttgart, 2.-5. September 1996, Pisa 1997, S. 377-382
- MALDAGUE, X.; COUTURIER, J.; SALERNO, A.; WU, D.: *Phase Analysis in Pulsed Thermography*. In : CSNDT Journal, 7/8, (1997), S. 5-10
- MALDAGUE, X.; MARINETTI, S.: *Pulse Phase Thermography*. In : American Institute of Physics: Journal of Applied Physics, Bd. 79, März 1996, Heft 5, S. 2694-2698, AIP · 0021-8979/96/79(5)/2694/5
- MALDAGUE, Xavier P. V.: *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography*, London 1993, ISDN: 3-540-19769-9
- MALDAGUE, Xavier P. V.: *Theory and Practice of Infrared technology for Nondestructive testing*, 2001
- MALLWITZ, Regine; BECKER, Wolf-Jürgen: *Bestimmen von Rissparametern - Ein Verfahren zur optimierten Merkmalsextraktion aus empirischen Primärdaten*. In : Materialprüfung, Bd. 41, München 1999, Heft 1-2, S. 40-44
- MANGOLD, Thomas: *Dynamische Thermographie mit einer schnellen IR-Array*, Hochschulschreiben Saarbrücken, Univ., Diss., 2001, Saarbrücken 2000, S. 126
- MATTEINI, A. Moles: *Naturwissenschaftliche Untersuchungsmethoden in der Restaurierung*, A. Burmester (Übers./Bearb.), München 1990, S. 97-98
- MAURER, J. L.; FROUIN, J.; SATHISH, S.; MATIKAS, T.; EYLON, D.: *Internal damage characterization of cyclically loaded Ti-6Al-4V, using TEM and non linear acoustics*. In : Proceedings of the 9th Titanium World Conference, St. Petersburg, International Titanium Association 1999, Science and Technology, Bd. 1, St. Petersburg 2000, S. 760-767, ISBN 5-900791-06-8
- MEINLSCHMIDT, Peter; BROSCHE, Klaus: *Untersuchung mithilfe der IR-Thermographie - Schäden an Wandvertäfelungen im Potsdamer Neuen Palais*. In : RESTAURO - Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen, Bd. 2, März 2001, S. 134-140
- MEINLSCHMIDT, Peter: *Lokale Erwärmung deckt Fehler auf, neue Entwicklungen in der Thermographie*. In : Gerd Kamiske (hrsg.): Qualität und Zuverlässigkeit (QZ), Qualitätsmanagement in Industrie und Dienstleistung, Wilhelm-Klauditz-Institut, München 2001, WKI-Mitteilung 784/2001, Nr. 12, 46. Jg., S. 1552-1554
- MEYENDORF, N.; KARPEN, W.; NETZELMANN, Udo; VETTERLEIN, T.; WALLE, G.: *Berührungsfreie Charakterisierung von Schichten durch thermographische Verfahren am Beispiel von Prüfproblemen aus der Luft- und Raumfahrt*. In : R. Stauber, C. Liesner, R. Bütje (Hrsg.): Werkstoffwoche '98, Bd. 2, Weinheim 1998, S. 491-496

- MEYENDORF, N.; NETZELMANN, U.; VETTERLEIN, T.; WALLE, G.: *Neuere Anwendung thermographischer Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Prüfung und Prozesskontrolle DGZfP-Jahrestagung*. In : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) (Hrsg.): Zerstörungsfreie Materialprüfung, Jahrestagung 1998, Berichtsband 63.2, Plakatbeiträge, 70 Jahre ZfP von Schweißverbindungen, Bamberg, 7-9. September 1998, S. 499-505
- MEYENDORF, N.; NETZELMANN, Udo; VETTERLEIN, T.; WALLE, G.: *Zerstörungsfreie Schichtcharakterisierung mit thermographischen Verfahren*. In : Galvanotechnik, Bd. 89, (1998), Nr. 5, S. 1500-1505
- MEYENDORF, N.; NETZELMANN, Udo; WALLE, G.; KARPEN, W.: *Impulsthermographie mit hoher Orts- und Zeitauflösung*. In : (Hrsg.) DGZfP: Thermografie-Kolloquium, Stuttgart, 25.09.1999, Berlin 1999, S. 20-22
- MEYERS GROßES KONVERSATIONS-LEXIKON: Sechste Auflage, 12. Bd., Leipzig, Wien 1905
- MIGNOGNA, R. B.; GREEN, R. E.; DUKE, J.; HENNEKE, E. G.; REIFSNIDER, K. L.: *Thermographic investigations of highpower ultrasonic heating in materials*. In : Ultrasonics 7, (1981), S. 159-163
- MILNE, J. M.: *Wärmeimpuls-Videothermographie im industriellen Bereich*. In : Materialprüfung, Bd. 29, München 1987, Heft 9, S. 280-281
- MÖLLMANN, K.-P.; VOLLMER, M.; KARSTÄDT, D.; LUTZ, N.; PINNO, F.: *Entwicklung und Anwendung von Methoden der Infrarotthermographie*
- MOOK, G.; POHL, J.; MICHEL, F.; HILBIG, A.; BENZINGER, T.; VEIT, P.: *Schadensanalyse an adaptiven Kompositen mit Hilfe kombinierter zerstörungsfreier Verfahren*. In : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) (Hrsg.): Zerstörungsfreie Materialprüfung, Jahrestagung 1998, Berichtsband 63.1, Plakatbeiträge, 70 Jahre ZfP von Schweißverbindungen, Bamberg, 7-9. September 1998, S. 319-329
- MOOK, Gerhard; POHL, Jürgen; MICHEL, Fritz: *Adaptive Werkstoffsysteme - Schadens-Phänomene zerstörungsfrei charakterisiert*. In : Materialprüfung, Bd. 42, München 2000, Heft 1-2, S. 31-36
- MOROPOULOU, Antonia I.; THEOULAKIS, P.; TSIOURVA, Th.; HARALAMPOPOULOS, G.: *Compatibility evaluation of consolidation treatments in monument scale*. In : Antonia I. Moropoulou, G. Biscontin, Jose Delgado Rodrigues, M. Erdik (Editors): Compatible materials recommendations for the preservation of European cultural heritage, Part 59, 2000, Association of Civil Engineers of Greece, National Technical University of Athens, Department of Materials Science and Engineering, Athens 2000, S. 209-230
- MRUSEK, R.; FUCHS, R.: *Beyond the visible : Digital image-recording in spectral channels of the UV- and IR-ranges – Jenseits des Sichtbaren : Digitale Bildaufzeichnung in spektralen Kanälen des UV- und IR-Bereichs*. In : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGfZP) (Hrsg.): 4th International Conference Non-Destructive Testing of Works of Art – 4. Internationale Konferenz Zerstörungsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern, DGfZP-Berichtsband 45, Berlin 3.-8. Oktober 1994, Teil 1, S. 203-205
- MÜLLER, Jürgen; DILLNER, Ulrich; GÜTTICH, Rudolf; KEBLER, Ernst; POSER, Siegfried; RATZ, Peter: *Thermische Sensoren aus Jena : Aktuelle Vorhaben*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und

- Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 15-22, ISBN 3-86005-142-3
- MÜLLER-HUMMEL, Peter: *Entwicklung einer Inprozess-temperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung*, Stuttgart, Leipzig 1999, S. 139, ISBN 3-519-06242-9
- MÜNZBERG, M.; PÄHLER, G.: *Infrarot-Sensoren und -Systeme*, Dresden University Press, Dresden 1997, S. 11
- NETZELMANN, Udo: *Anwendungen der dynamischen Thermographie und neue Entwicklungen*. In : (DGZfP) Arbeitskreis Zwickau-Chemnitz, Zwickau, 04.12.2001
- NETZELMANN, Udo: *Mikrothermographie als Werkzeug zur Prüfung von Klebeverbindungen*. In : Materialprüfung, Bd. 38, München 1996, Heft 6, S. 246-247
- NETZELMANN, Udo: *Ortsaufgelöste Messungen der ferromagnetischen Resonanz mit Hilfe photothermischer Nachweismethoden*, Hochschulschriften Bochum, Diss., Bochum 1986, S. 1-9
- NETZELMANN, Udo; WALLE, G.: *High-Speed Thermography of Thin Metallic Coatings*. In : F. Scudieri; M. Bertolotti (Editors): 10th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, New York 1999, S. 401-409
- NETZELMANN, Udo; WALLE, G.: *Zerstörungsfreie Charakterisierung von Korrosionsschutzschichten und Hochtemperatur-Wärmedämmschichten mit Hilfe der Hochgeschwindigkeits-Impuls-Thermographie und dem Hochfrequenz-Ultraschallverfahren – Impuls-Video-Thermographie, Wärmewelle, Hochfrequenz-Ultraschall, Hochgeschwindigkeitsthermographie, Beschichtung, Schichtdicke, Porosität*, Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Bd. 21, Saarbrücken 1998, S. 1-20
- NETZELMANN, Udo; WALLE, G.; KARPEN, W.; MEYENDORF, N.: *Impulsthermographie mit hoher Orts- und Zeitauflösung*. In : DGZfP-Thermografie-Kolloquium, Stuttgart 25.09.1999, Kurzfassungen der Beiträge, S. 20-22
- NETZELMANN, Udo; ZHANG, H.: *Einsatz von Wärmewellenverfahren bei der Charakterisierung von Keramik*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 65, München 1998, Heft 5, S. 192-196
- NEUMAIER, Peter; FISCHER GmbH, Helmut: *Möglichkeiten der Schichtdickenmessung an Lackschichten: Vergleich und Stand der Technik*. In : tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 67, München 2000, Heft 12, S. 519-523
- NICOLAUS, Knut: *Handbuch der Gemälderestaurierung*, Köln, 1998, ISBN 3-89508-921-4
- NIEBUHR, Johannes: *Physikalische Messtechnik mit Sensoren*, 4., überarb. Aufl., München 1996, ISBN 3-486-23614-8
- NOLTING, Jürgen: *Wärmebildgeräte auf Basis der OPHELIOS-Module*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 47-53, ISBN 3-86005-142-3
- NORKUS, Volkmar; SOKOLL, Torsten; GERLACH, Gerald; HOFMANN, Günter: *Pyroelectric infrared arrays and their applications*. In : Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers: Infrared Spaceborn Remote Sensing, Bd. 3122, (1997), S. 409-419, SPIE · 0277-786X/97

- NOTHAFT, Dr. Peter: *Signalverarbeitung für Infrarot-Detektorarrays*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 23-28, ISBN 3-86005-142-3
- OSTENDARP, Dipl.-Ing. Heinrich: *Flächige Verformungsmessverfahren - Neue Möglichkeiten zur hochgenauen Strukturanalyse*, Technisches Hochschulschreiben Aachen, Univ., Diss., Aachen 1996, S. 22-112, ISBN 3-8265-1422-X
- PATEL, P. M.; LAU, S. K.; ALMOND, D. P.: *A review of image analysis techniques applied in transient thermographic nondestructive testing*. In : Res. Non-Destructive Evaluation 6, (1992), S. 343
- PAULY, Holger: *Digitale Pyrometer mit verbesserter Auflösung – Digital Pyrometers have higher resolution* In : Elmar Wagner (Hrsg.): *tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik*, Bd. 66, München 1999, Heft 9, S. 333-337
- POPP, G.; HEIDT, F. D.: *Optische und thermische Materialdaten transparenter und opaker Bauteile*. In : F. D. Heidt (Hrsg.): *Bestandsaufnahmen zur Niedrigenergie- und Solar-Architektur (NESA)*, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 4, Nr. 139, Düsseldorf 1997, S. 64-69, ISDN 3-18-313904-9
- RAICU, Alexandra: *IR-Thermografie im Bauwesen - Aufstellung eines Leitfadens zur Anwendung der Infrarotthermografie bei instationären Temperaturverhältnissen zur Feststellung versteckter Baufehler*, Abschlußbericht TOS4-AR-9910-E01 für das Bundesministerium für Verkehr Bau- und Wohnungswesen, Stuttgart 1999, S. 70, ISBN 3-8167-4845-7
- RAKOTONIAINA, J. P.; BREITENSTEIN, O.; LANGENKAMP, M.: *Localization of weak heat sources in electronic devices using highly sensitive lock-in thermography*. In : Materials Science and Engineering B91-92, (2002), S. 481-485, PII: S0921-5107(01)01011-X
- RANTALA, J.; WU, D.; BUSSE, G.: *Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites*. In : Research Nondestructive Evaluation, Bd. 7, New York 1996, S. 215-228
- RANTALA, J.; WU, D.; BUSSE, G.: *Amplitude modulated lockin vibrothermography for NDE of polymers and composites*. In : Research Nondestructive Evaluation, Bd. 7, New York 1996, S. 215-228
- RENN, M.; HEIDT, F. D.: *Blower-Door und Thermographie als Unterstützung für die energetische Diagnose von Gebäuden*. In : F.D. Heidt (Hrsg.): *Niedrigenergie- und Solar-Architektur (NESA)*. Fortschritt-Berichte des VDI, Reihe 6, Nr. 319, 1995, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 43-52
- RITTER, R.; SCHMITZ, B.: *Photothermal inspections of adhesion strengths and detection of delaminations*. In : ETS (Edizioni): *Proceedings of QIRT'96*, Pisa 1997, S. 197-202
- RÖDLING, Steffen; BÄR, Jürgen; GUDLADT, Hans-Joachim: *Charakterisieren des Rissausbreitungsverhaltens - Anwendungen der Gleichstrompotenzialsonde im Umfeld der Ermüdungsrissausbreitung*. In : Materialprüfung, Bd. 44, München 2002, Heft 11-12, S. 454-460
- ROIDER, Helmut: *Gewichtung thermischer Schwachstellen der Gebäudehülle - Neue Beurteilungsperspektiven mit Zielrichtung „Passivhaus-Standard“*. In : „Bauphysik und Umweltschutz“ - Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg, WBFÖ 1/2002

- RÖSNER, H.; KARPEN, W.: *Zerstörungsfreie Charakterisierung von Ermüdungserscheinungen mittels Thermografie*. In : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP) (Hrsg.): Zerstörungsfreie Materialprüfung, ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung, DGZfP-Jahrestagung 2001, Berlin, 21.-23. Mai 2001, Berichtsband 75-CD, Elektronische Ressource
- BRINK, A.; MAIERHOFER, C.; RÖLLIG, M.; WIGGENHAUSER, H.: *Anwendung der Impuls-Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren im Bauwesen*. In : Zerstörungsfreie Materialprüfung, ZfP in Anwendung und Forschung, DGZfP-Jahrestagung, Berichtsband 80-CD, Berlin 2002, Elektronische Ressource, ISBN 3-931381-39-0
- RÖSNER, H.; KARPEN, W.; SCHAMACHARY, S.; MEYENDORF, N.: *Zerstörungsfreie Charakterisierung von Ermüdungsschädigungen mittels Thermographie*. In : Zerstörungsfreie Materialprüfung, ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung, DGZfP-Jahrestagung 2001, Berlin, 21.-23. Mai 2001, Berichtsband 75-CD, Elektronische Ressource
- RÖSNER, H.; MEYENDORF, N.; SATISH, S.: *Nondestructive Characterization of Fatigue Damage with Thermography*. In : Georg Y. Baaklini; Eric S. Boltz; Steven M Shepard; Peter J. Shull (Editors): Nondestructive Evaluation of Materials and Composites V, 6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, Newport Beach, 4.-8. März 2001, Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bd. 4336, Univ. of Dayton 2001, S. 167-175, SPIE · 0277-786X/01/\$15.00
- RÖSNER, Henrik; SATHISH, Shamachary; MEYENDORF, Norbert: *Nondestructive characterization of fatigue damage with thermography*. In : Georg Y. Baaklini, Eric S. Boltz, Steven M Shepard, Peter J. Shull (Editors): Nondestructive Evaluation of Materials and Composites V, 6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, Newport Beach, 4.-8. März 2001, Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bd. 4336, Univ. of Dayton 2001, Heft 24, S. 167-175, SPIE · 0277-786X/01
- RUDTSCH, Steffen; ROGAß, Harald: *Materialfeuchtemessungen mit thermischen Messverfahren*. In : tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 67, München 2000, Heft 12, S. 476-480
- SANDNER, I.: *Die Analyse von Unterzeichnungen auf Gemälden mit Hilfe der Infrarotreflektografie am Beispiel von Werken Lucas Cranach d.Ä. - Infrared analysis of underdrawings on paintings with the help of Infraredreflectography on works of art by Lucas Cranach the Older as an example*. In : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGfZP) (Hrsg.): 4th International Conference Non-Destructive Testing of Works of Art - 4. Internationale Konferenz Zerstörungsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern, Berlin 3.-8. Oktober 1994, DGfZP-Berichtsband 45, Teil 1, S. 193-202
- SANDNER, Thilo; GERLACH, Gerald; SUCHANECK, Gunnar; KÖHLER, Reinhard: *Tiefenaufgelöste Polarisationsprofile in pyroelektrischen Dünnschichtsystemen - Investigation of the spatal polarization distribution of pyroelectric thin films using the Laser Intensity Modulation Method*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 66, München 1999, Heft 9, S. 322-332

- SCHELP, Mirko; EIFLER, Dietmar: *Temperatur- und Dehnungsmessungen in Ermüdungsversuchen - Untersuchungen an vergütetem Stahl*. In : Materialprüfung, Bd. 44, München 2002, Heft 3, S. 87-94
- SCHIEFERDECKER, Jörg; SCHULZE, Mischa; QUAD, Reiner: *Thermophile-IR-Sensormodul zur berührungslosen Temperaturmessung in Haushaltgeräten*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 41-53, ISBN 3-86005-142-3
- SCHIEWE, Christian; NAGEL, Frank: *Anwendungsspezifische Parameteroptimierung bei der mehrkanalpyrometrischen Temperaturmessung*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 59-62, ISBN 3-86005-142-3
- SCHMITZ, Bernhard; GEERKENS, Jürgen; SEIDEL, Uwe; GOCH, Gert: *Grundlagen der photothermischen zerstörungsfreien Materialprüfung*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 65, München 1998, Heft 5, S. 177-184
- SCHNEIDER, Harald; EHRET, Stefan; LARKINS, Eric C.; KOIDL, Peter; RALSTON, John D.: *Quantumwell-Intersubband-IR-Detektoren für FPA-Kameras und Heterodyn-Anwendungen bei 3...5 μm und 8...12 μm* . In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 13-14, ISBN 3-86005-142-3
- SCHNEIDER, H.; KOIDL, P.; WALTHER, M.; FLEIBNER, J.; ZIEGLER, J.: *GaAs/AlGaAs-Quantenfilm-Photodetektoren für Kameras im 8-12 μm -Bereich - GaAs/AlGaAs quantumwell photodetectors for cameras in the 8-12 μm regime*. In : (Hrsg.) Prof.-Dr. Elmar Wagner: tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 66, München 1999, Heft 9, S. 344-349
- SCHNITGER, C.: *Thermografie mit Wärme- oder "Kälte"pulsen*. In : DACH-Zeitung 64, Berlin 1998, Heft 12, S. 56-58
- SCHÖNBACH, Dr. Bernd: *FLIR Systems: Thermografie-Trainingskurs EN 473 Stufe 1, R&D Forschung & Entwicklung*, Juli 2002
- SCHRECK-OFFERMANN, Ursula: *Infrarot-Thermographie*, Stuttgart 1984, S. 65, ISBN 3-8167-0044-6
- SCHREIBER, Herrmann: *Infrarot-Elektronik - Eine Einführung in die Infrarottechnik mit Hobbyschaltungen und Experimenten*, 5. unveränderte Auflage, München 1992, S. 140, ISBN 3-7723-1755-3
- SCHULZ, Max; CALDWELL, Larry: *Korrektur der Inhomogenitäten und Korrigierbarkeit von Infrarot-Detektormatrizen*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 44-47, ISBN 3-86005-142-3
- SCHUSTER, Norbert; KOLOBRODOV, Valentin G.: *Infrarotthermographie, Thermografie in Theorie und Praxis, Grenzen der Thermografie* 1. Auflage, Berlin 2000, S. 339, ISBN 3-527-40130-X
- SCHWARZ, A: *Infrarot-Thermographie zu berührungslosen Bestimmung von Dichte- und Feuchtedifferenzen an historischen Wandmalereien*. In : Zeitschrift für

- Bauinstandhaltung und Denkmalpflege: Bautenschutz + Bausanierung, Bd. 6, Dezember 1989, Heft 12, S. 105-109, ISSN 0170-9267
- SEIDEL, Uwe; WALTHER, Heinz G.: *Quantitative Charakterisierung von vergrabenen Inhomogenitäten in Festkörpern durch thermische Wellen*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): *tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik*, Bd. 65, München 1998, Heft 5, S. 204-210
- SHEPARD, Steven M.; LHOTA, James R.; AHMED, Tasdiq; RUBADEUX, Bruce A.; WANG, D.: *Quantification and Automation of Pulsed Thermographic NDE*. In : Georg Y. Baaklini; Eric S. Boltz; Steven M. Shepard; Peter J. Shull (Editors): *Nondestructive Evaluation of Materials and Composites V, Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics*, Newport Beach, 4.-8. März 2001, Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bd. 4336, Univ. of Dayton 2001, Heft 9, S. 73-78, SPIE · 0277-786X/01
- SHIH, J. K. C.; Ming Hsin; DELPAK, R.; HU, C. W.; PLASSMANN, P.; KOGUT, M.: *Application of Infrared Thermography for Damage Detection in Structural Concrete - a Preliminary Report*. In : *NDTISS'99*, Torres, 22.-26.11.99.
- SKLARCZYK, Christoph; EHLEN, Frank; NETZELMANN, Udo: *Schichten charakterisieren - Einsatz von Mikrowellen zur zerstörungsfreien und berührungslosen Charakterisierung*. In : *Materialprüfung*, Bd. 40, München 1998, Heft 4, S. 149-153
- SPIES, M.; GEBHARDT, W.; KRÖNING, M.: *Neue Entwicklung der Phased-Array-Technologie*. In : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP) (Hrsg.): *Zerstörungsfreie Materialprüfung, Jahrestagung 1998, Berichtsband 63.1, Plakatbeiträge, 70 Jahre ZfP von Schweißverbindungen*, Bamberg, 7-9. September 1998, S. 71-80
- STAHL, K.; MIOG, G.: *Infrarottechnik, Grundlagen, Strahlungssender und Detektoren, Infrarotbildaufnahmen und -wiedergabe Fernmeßverfahren*, 2. Aufl., Heidelberg 1986
- STEINBERGER, Robin; GRÜNBERGER, Thomas; O'LEARY, Paul: *Simulations and analytical models for optimization of photothermal surface crack detection*. In : Andrés E. Rozlosnik; Ralph B. Dinwiddie (Editors): *Thermosense XXIII, Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, Bd. 4360, (2001), S. 524-533, SPIE · 0277-786X/01/\$15.00
- STÖBEL, Rainer; DILLENZ, Alexander; KROHN, Nils; BUSSE, Gerd: *Defektselektives Abbildungsverfahren*. In : *Materialprüfung*, Bd. 42, München 2000, Heft 1-2, S. 38-44
- TANK, Volker: *Infrarotspektrometrie für quantitative Fernmessungen*. In : *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 33-44, ISBN 3-86005-142-3
- TAYLOR, Jack H.: *Radiation Exchange - an introduction*, San Diego 1990, S. 1-127, ISBN 0-12-684560-3
- THAMM, Dipl.-Ing. Uwe: *Bewertung von Tiefziehprozessen durch Infrarot-Thermografie*. In : *Berichte aus dem IWU, Fraunhofer-Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Technisches Hochschulschreiben Chemnitz, Diss., Chemnitz, 1. Auflage*, Bd. 5, Zwickau 1999, S. 55-196, ISBN 3-928921-52-5
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG E.V. (DGZfP): *Thermografie-Kolloquium 2001, Vorträge*, 22. September 2001, Berlin 2001, Elektronische Ressource

- TIZIANI, H. J.; WINDECKER, R.; WEGNER, M.; LEONHARDT, K.; STEUDLE, D.; FLEISCHER, M.: *Messung und Beschreibung von Mikrostrukturen unter Berücksichtigung materialspezifischer Eigenschaften*. In : tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 66, München 1999, Heft 11, S. 429-436
- VAN ASPEREN DE BOER, J. R. J.: *Examination by Infrared Radiation*. In : Roger van Schoute; Hélène Verougstraete-Marcq (Editors): Scientific Examination of Easel Paintings, Journal of the European Study Group on Physical, Chemical and Mathematical Techniques Applied to Archaeology, PACT 13, Court-Saint-Étienne 1986, S. 109-130, ISSN 0257-8727
- VAVILOV, V.; KAUPPINEN, T.; GRINZATO, E.: *Thermal Characterisation of Defects in Building Envelopes Using Long Square Pulse and Slow Thermal Wave Techniques*. In : Research Nondestructive Evaluation, Bd. 9, (1997), S. 181-200
- VAVILOV, V.; MALDAGUE, X.: *Optimisation of Heating Protocol in Thermal NDT, Short and Long Heating Pulses: A Discussion*. In : Research Nondestructive Evaluation, Bd. 6, (1994), S. 1-17
- VERGNE, D.; STOCKMAYER, P.; BUSSE, G.: *Berührungslose und zerstörungsfreie Untersuchung organischer Beschichtungen mit thermischen Wellen*. In : Materialprüfung, Bd. 30 (1988) Heft 6, S. 189-192
- VIETS, Roman: *Analyse von Wärmebildern zur Prozeßüberwachung von Gießverfahren*. In : Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2, Fertigungstechnik, 562 Bericht aus dem Institut für Werkstoffkunde, Düsseldorf 2000, S. 5-91, ISBN 3-18-356202-2
- VOGDT, Frank Ulrich: *Bauschäden - Gebäudeschäden - Diagnoseverfahren bei undichten Flachdächern*, 2003
- WALLE, G.: *Impuls-Video-Thermographie*. In : Materialprüfung, Bd. 36, München 1994, Heft 3, S. 86-88
- WALLE, G.; BURGSCHEWIGER, J.; NETZELMANN, Udo: *Numerical Modelling of the Defect Response in Pulsed-Video Thermography on Samples with Finite Optical Penetration*. In : D. Balageas; G. Busse (Hrsg.): Quantitative Infrared Thermography (QIRT'94), Proceedings. Sorrento 1994, S. 238-243, ISBN 2-85933-031-3
- WALLE, G.; DOBMANN, G.; MEYENDORF, M.; NETZELMANN, U.: *Impuls-Video-Thermographie - ein leistungsfähiges Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung neuer Werkstoffe*. In : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGfZP) (Hrsg.): 60 Jahre DGfZP - Erfahrungen und Nutzen für Europa, Berichtsband 37, DGfZP-Jahrestagung 1993, Garmisch-Partenkirchen, 17.-19.5.1993, S. 320-327
- WALLE, G.; KARPEN, W.; NETZELMANN, Udo; RÖSNER, H.; MEYENDORF, N.: *Zerstörungsfreie Prüfung mittels thermographischer Verfahren - Non-Destructive Testing with Thermographic Techniques*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 66, München 1999, Heft 9, S. 312-321
- WALLE, G.; NETZELMANN, U.; VETTERLEIN, T.; MEYENDORF, N.: *Infrarotsensoren für diedynamische Thermographie und ihre Anwendung in der zerstörungsfreien Materialprüfung*. In : Gerald Gerlach (Hrsg.): Infrarot-Sensoren und -Systeme, Dresdner Beiträge zur Sensorik, Band 4, Dresden 1997, S. 189-194, ISBN 3-931828-66-2

- WALLE, G.; NETZELMANN, Udo; VETTERLEIN, T.; MEYENDORF, N.: *Infrarotsensoren für dynamische Thermografie und ihre Anwendung in der zerstörungsfreien Materialprüfung*. 8. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und Systeme“, Technische Universität Dresden 1997
- WALLRABE, Arnulf: *Nachtsichttechnik - Infrarot-Sensorik: physikalische Grundlagen, Aufbau, Konstruktion und Anwendung von Wärmebildgeräten*, 1. Auflage, Braunschweig 2001, S. 461, ISBN 3-528-03947-7
- WALMSLEY, E.; METZGER, C.; DELANEY, J. K.; FLETCHER, C.: *Improved visualization of underdrawings with solid-state detectors operating in the infrared*. In : *Studies in Conservation*, Bd. 39, (1994), Heft 4, S. 217-231
- WALTHER, H. G.; KARPEN, W.: *Monitoring of Paint Adhesion on Polymers Using Photothermal Detection*. In : D. Balageas; G. Busse, G. M. Carlomagno (Hrsg.): *Quantitative InfraRed Thermography (QIRT'92)*, Proceedings of the Eurotherm Seminar n° 27, France, Châtenay-Malabry, Juli 7.-9. 1992, Editions Européennes Thermique et Industrie, Paris 1992, S. 388-392
- WEBER, Helmut: *Thermografie im Bauwesen*, (Kontakt & [und] Studium, Bd. 81), Grafenau/Württ. 1982, S. 149, ISBN 3-88508-767-7
- WESER, Andreas: *Zur Anwendung der Thermografie auf Probleme der Verbrennung*, Diss., Dresden 1986, S. 116
- WHITE, G.; Torrington, G.: *Crack detection and measurement using laser pulse heating and thermal microscopy*. In : *Materials Evaluation - an official journal of the Society for Nondestructive Testing*, Bd. 53, Columbus 1995, S. 1332-1334, ISSN 0025-5327
- WOLFE, W. L.; ZISSIS, G. J.: *The Infrared Handbook*, The Infrared Information Analysis Center, Environmental Research Institute of Michigan, USA, revised edition, 4th printing, (1993)
- WOLLRAB, R.; BRUDER, M.; CABANSKI, W.; MAIER, H.; ZIEGLER, J.; HOFFMANN, K.; OELMAIER, R.: *HgCdTe-Focal-Plane-Arrays für höhere Betriebstemperaturen*. In : *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 68-69, ISBN 3-86005-142-3
- WU, D.: *Lockin thermography for defect characterisation in veneered wood*. In : D. Balageas; G. Busse; G. M. Carlomagno (Editors): *Quantitative InfraRed Thermography (QIRT'94)*, Proceedings of Eurotherm Seminar n° 42, Italien, Sorrento, 23.-26. August 1994, Paris 1995, S. 298-302
- WU, D.: *Lockin-Thermographie in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung*. In : *DACH-Zeitung* 58, Berlin 1997, Heft 6, S. 67-72
- WU, D.; BUSSE, G.: *Remote inspection of wood with lock-in-thermography*. In : *TAPPI Journal*, Vol. 79, 1996, No. 8
- WU, D.; BUSSE, G.: *Remote inspection of wood with lockin-thermography*. In : *Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI) (Hrsg.): European Plastic Laminates Forum*, Heidelberg, 15.-17.11.1995, Bd. 79, August 1996, Nr. 8, S. 119-122, ISSN 0734-1415
- WU, D.; BUSSE, G.: *Zerstörungsfreie phasenempfindliche Modulationsthermographie - Prinzip und Anwendungen*. In : *Materialprüfung*, Bd. 36, München 1994, Heft 10, S. 393-399

- WU, D.; KARPEN, W.; BUSSE, G.: *Lockin Thermography for Multiplex Photothermal Nondestructive Evaluation*. In : D. Balageas; G. Busse; G. M. Carlomagno (Editors): Quantitative InfraRed Thermography (QIRT'92): Proceedings of the Eurotherm Seminar n° 27, France, Châtenay-Malabry, 7.-9. Juli 1992, Editions Européennes Thermique et Industrie, Paris 1992, S. 371-376
- WU, D.; KARPEN, W.; BUSSE, G.: *Wärmewellenabbildung mit phasenempfindlicher Modulationsthermographie*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGfZP): DGfZP-Jahrestagung, Garmisch-Partenkirchen, 17.-19.05.1993, S. 328-334
- WU, D.; SALERNO, A.; MALTER, U.; AOKI, R.; KOCHENDÖRFER, R.; KÄCHELE, P.; WOITHE, K.; PFISTER, K.; BUSSE, G.: *Inspection of aircraft structural components using lockin-thermography*. In : ETS (Edizioni): Proceedings of QIRT'96, Pisa 1997, S. 251-256
- WU, D.; WU, C.; BUSSE, G.: *Investigation of resolution in lock-in thermography: theory and experiment*. In : ETS (Edizioni): Proceedings of QIRT'96, Pisa 1997, S. 269-274
- WU, M. Sc. Datong: *Lock-In-Thermografie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*, Hochschulschriften Stuttgart, Diss., Stuttgart 1996, S. 123
- WYSS, P.; LÜTHI, T.; PRIMAS, R.; ZOGMAL, O.: *Factors affecting the detectability of voids by infrared thermography*. In : ETS (Edizioni): Proceedings of QIRT'96, Pisa 1997, S. 227-232
- ZENZIGER, G.: *Thermographie - Neue Möglichkeiten in der ZfP*. In : DACH-Zeitung, Bd. 63, Berlin 1998, Heft 10, S. 58-61
- ZIMMERHACKL, M.; HOFFMANN, U.; KELDENICH, K.; MÖLLENHOFF, H.; HOVEN, G.: *IR-Camera for Control of Combustion Processes*, 3. Internationaler Kongreß OPTO, Erfurt 1998
- ZIMMERHACKL, Manfred; NAGEL, Frank; BUDZIER, Helmut; HOFMANN, Günter: *Berührungslose Temperaturmesstechnik für industrielle Prozesse*. In : Elmar Wagner (Hrsg.): tm - technisches Messen, Naturwissenschaften, Informatik, Technik, Bd. 66, München 1999, Heft 3, S. 109-115
- ZOGG, H.; FACH, A.; JOHN, J.; MASEK, J.; MÜLLER, P.; PAGLINO, C.: *Photovoltaic $Pb_{1-x}Sn_x$ Se-on-Si- IR-sensor arrays for thermal imaging*. In : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 5. Fachtagung „Infrarot-Sensoren und -Systeme“, Bd. 43, Technische Universität Dresden 1994, Heft 6, S. 8-12, ISBN 3-86005-142-3
- ZWESCHPER, Th.; BUSSE, G.: *Ultraschallthermografie an Luftfahrtbauteilen*. In : H.G. Fritz; C. D. Eisenbach (Hrsg.): 17. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Beitrag 6/P3, Stuttgart 2001, ISBN 3-00-007297-7
- ZWESCHPER, Th.; WU, D.; BUSSE, G.: *Detection of tightness of mechanical joints using lockin thermography*. In : Diagnostic imaging technologies and industrial applications, SPIE Vol. 3827, (1999), S. 16-21, ISBN 0-8194-3313-6

Internetquellen

URL : <http://www.itw.uni-stuttgart.de/>
URL : alpen.sac-cas.ch/html_d/archiv/1999/199906/6_99_d_30_33.pdf
URL : krahmer.freepage.de/klima/thuene/thuen01.html
URL : members.aol.com/ReDiedererengebäude/bauaus.htm
URL : members.aol.com/ReDiedererengebäude/fachwerk.htm
URL : members.aol.com/ReDiederer/serv_geb.htm
URL : surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/IR/imag_ir_photo.htm
URL : surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/IR/imag_ir_filter.htm
URL : surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/IR/imag_ir_applic.htm
URL : surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/THG/imag_thg_basics.htm
URL : surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/THG/imag_thg_camera.htm
URL : www.ablwerbung.de/download/flir/flir_pr_p60.doc
URL : www.adnex.de/data/strahlungsmessung/
URL : www.almeda.de/almeda/roche/0,1086,37108,00.html
URL : www.bam.de/kompetenzen/arbeitsgebiete/abteilung_4/fachgruppe_44/fachgruppe_44i_i.htm
URL : www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompendium/geraete/g037/g037_3.html
URL : www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompendium/geraete/g030/g030.html
URL : www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompendium/geraete/g003/g003_3.html
URL : www.bergen.de/rm/irt.htm
URL : www.bernhard-group.ch/
URL : www.bfbk.de/leiirthe.htm
URL : www.bpy.uni-kassel.de/de/lehre/Bauschaeden.pdf
URL : www.bvfs.at/html/pub/kurz/ir.htm
URL : www.corak.ch/Fassadenthermographie.html
URL : www.cwaller.de/klimaim.htm
URL : www.dfo-online.de/deutsch/pdf/2200-028.pdf
URL : www.ebs-thermography.com/manual/auswahl_g.html
URL : www.elektro-grundler.at/aa_thermografie.htm
URL : www.fh-brandenburg.de/~piweb/projekte/forschungsbericht/Forschungsbericht.htm
URL : www.fh-merseburg.de/fbz/energiemanagement/body_infrarot_thermografie.htm
URL : www.fh-rosenheim.de/live/fachbereiche/aw/laboratorien/labor_waermeschutz_ene.htm
URL : www.fraunhofer.de/german/publications/df/df2001/mag2-2001_48.html
URL : www.helot.de/h_seite19.htm
URL : www.iemb.de/veroeffentlichungen/infobl%E4tter/inf99_13.htm
URL : www.ifu-burkon.de/thermografie.html
URL : www.ifu-burkon.de/thermografie.html
URL : www.ikv-aachen.de/Ww/studbet/studiapl/ext/ir.html
URL : www.ikv-aachen.de/Ww/studbet/studiapl/ext/ir.html
URL : www.infratec.de/thermographie/index_de.html
URL : www.infratherm.at/Thermografie.htm
URL : www.ingenieurbuero-adler.de/Bauwesen/body_bauwesen.html
URL : www.ingenieurbuero-adler.de/Leckageortung/body_leckageortung.html
URL : www.ingenieurbuero-jahrstorfer.de/seite/thermogr.htm
URL : www.ingenieurbuero-jahrstorfer.de/thermogr.htm
URL : www.iqost.com/deu/produkte/schichtdicken.htm
URL : www.irmotion.com/manual/index_g.html
URL : www.isocell.at/messtechnik_temperatur.asp?print=true
URL : www.itema.de/bauphysik.html
URL : www.itema.de/bauschaedensanalyse.html
URL : www.itema.de/denkmalpflege.html
URL : www.itema.de/filter_objektive.html
URL : www.itema.de/grenzen_infrarot.html
URL : www.itema.de/ingenieurleistungen.html
URL : www.itema.de/ir_grundlagen.html
URL : www.itema.de/luftundichtigkeiten.html
URL : www.itw.uni-stuttgart.de/
URL : www.keuthen-messtechnik.de/km_gebaeude.htm
URL : www.koewoge-innovativ.de/messprogramm/kwg_mess_03.htm
URL : www.ndt.net/article/dgzfp/dach58/wu/wu.htm#2
URL : www.ndt.net/article/dgzfp/dach64/schnitg/schnitg.htm

URL : <http://www.ndt.net/article/dgzfp02/papers/v45/v45.htm>
URL : http://www.oekodaem.at/Folgeseite/Main/produkte_5.htm
URL : <http://www.pruftechnik.com/main/index.htm>
URL : <http://www.sw-ing.de/faq.htm>
URL : <http://www.technik-center.at/thermografie/system.htm>
URL : <http://www.thermo-bild.com/prod01.htm>
URL : <http://www.thermo-bild.de/>
URL : <http://www.thermografie.de/bauwesen.htm>
URL : <http://www.thermografie.de/dienst.htm>
URL : <http://www.thermografie.de/gutacht.htm>
URL : <http://www.thermografie.de/handwerk.htm>
URL : <http://www.thermografie.de/kamera.htm>
URL : <http://www.thermografie.de/software.htm>
URL : <http://www.thermografie.net/thermo.html>
URL : <http://www.thermografie-bader.de/bader.html>
URL : <http://www.thermografie-schweiger.de/theorie.htm>
URL : <http://www.thermoscan.de/Leckortung/Lecksuche.htm#leck2>
URL : <http://www.thermoscan.de/TechInfo/TechInfo.html>
URL : <http://www.thermotemp.de/irtechnik.htm>
URL : <http://www.tu-berlin.de/fak3/staff/handke/thermogr.html>
URL : <http://www.tu-berlin.de/zuv/IIC/fordat/06/30/11990.htm>
URL : http://www.t-zfp.de/Downloads/1_Kamerabeispiel.pdf
URL : <http://www.t-zfp.de/Downloads/downloads.html>
URL : <http://www.t-zfp.de/Thermografie/Licht/Anwendung/anwendung.html>
URL : <http://www.vath.de>
URL : <http://www.wallstein.de/thermografie.html>
URL : http://www.wdr.de/tv/service/bauen/archiv/01/0706_4.html
URL : http://www.wernet-ds.de/thermographie/blower_door.htm
URL : <http://www.wernet-ds.de/thermographie/index.htm>
URL : <http://www.wernet-ds.de/thermographie/Lexikon.htm>
URL : <http://www.wki.fraunhofer.de/projekte/wki-1-3.html>
URL : <http://www.wki.fraunhofer.de/projekte/wki-1-5.html>
URL : http://www.zae.uni-wuerzburg.de/zentral/%20pdf/tb_2002/kap3bis5_tb2002.pdf%20
URL : <http://www.zahm-irt.de/zahmirt.htm>
URL : <http://www.zds-nrw.de/technik-thermo.htm>
URL : <http://www-lit.maschinenbau.tu-ilmeneau.de/seiten/download/Infrarotthermografie.pdf>
URL : www.bernhard-group.ch
URL : www.bpy.uni-kassel.de/de/lehre/messtechnik.pdf
URL : www.dgzfp.de/pages/zeitung/fachbeitraege/zfp71-zwescher.pdf
URL : www.erhatec.de/downloads/Tempmessung09XX.ppt
URL : www.flirthermography.de/success/pdfs/abl_bauphysik_screen.pdf
URL : www.pruftechnik.com/deutsch/home/downloads/Seminarplan2004.pdf
URL : www.unique-ngt.de/download/Thermoflyer.pdf
URL : www.wki.fraunhofer.de/publikat/WK-Forum_2.pdf
URL : www.woehler.de/Download/ik21.pdf
URL : alpen.sac-cas.ch/html_d/archiv/1999/199906/6_99_d_30_33.pdf
URL : archiv.tu-chemnitz.de/pub/2002/0125/data/bericht.pdf
URL : <http://home.fhtw-berlin.de/~gruhle/thermo.html>
URL : <http://home.t-online.de/home/ing.buero.j.holtmann/ir.htm>
URL : <http://krahmer.freepage.de/klima/thuene/thuen01.html>
URL : http://members.pgv.at/ctg/html/ir_daten.htm
URL : http://solar.fh-rhein-sieg.de/bericht/kapitel/kap9_2.htm
URL : http://surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/IR/imag_ir_intro.htm
URL : http://surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/IR/imag_ir_refltrans.htm
URL : http://surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/IR/imag_ir_photo.htm
URL : http://surf.agri.ch/wuelfert/lecture/physics/imaging/THG/imag_thg_basics.htm
URL : <http://www.adnex.de/data/strahlungsmessung/>
URL : http://www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompendium/geraete/g030/g030.html
URL : http://www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompendium/geraete/g003/g003_3.html
URL : <http://www.baubiologie-regional.de/blower-door.php>
URL : <http://www.baucon.de/bauphysik.html>

URL : <http://www.bergen.de/rm/navigation.htm>
URL : <http://www.bfbk.de/leiirthe.htm>
URL : <http://www.bienergy.de/term/term.htm>
URL : http://www.brockmeyer.de/Deutsch/Leistungsspektrum/Elektrotechnik/thermo_grap.html
URL : <http://www.bvfs.at/htm/pub/ir.htm#2.%20Grundlagen%20der%20Infrarotthermographie>
URL : <http://www.cwaller.de/klimaim.htm>
URL : http://www.diagtech.fr/Version%20Allemande/Tir_al.htm
URL : <http://www.dimagb.de/info/bauphys/pmpaneh.html>
URL : http://www.energetischesbauen.de/Forschung/Proj_Steinbeis/body_proj_steinbeis.html
URL : <http://www.e-technik.tu-ilmenau.de/Forsch/gebiete/hochspannung/pages/forschung/IR-info.htm>
URL : http://www.fachwerkhaus.de/fh_haus/info/thermogr.htm
URL : <http://www.fgw.at/wbfoe/2002-1/roid.htm>
URL : <http://www.fh-brandenburg.de/~piweb/projekte/forschungsbericht/Forschungsbericht.htm>
URL : <http://www.fh-jena.de/fh/fb/gw/forschung/otto/bauwesen.html>
URL : <http://www.fh-karlsruhe.de/iit/projekte/oitm.htm>
URL : <http://www.fh-karlsruhe.de/presse/bb1100.htm>
URL : http://www.fh-merseburg.de/fbz/energiemanagement/body_infrarot_thermografie.htm
URL : <http://www.fish-wenden.de/thermografie.htm>
URL : <http://www.flir.ch/deu/tunnelscanner/inhalt.htm>
URL : <http://www.fraunhofer.de/german/press/pi/pi2000/pi08-2000-t.html>
URL : http://www.ib-schulz.com/Gebaudethermografie/hauptteil_gebaudethermografie.html
URL : <http://www.ifu-burkon.de/thermografie.html>
URL : http://www.infratec.de/thermographie/index_de.html
URL : http://www.irmotion.com/manual/index_g.html
URL : http://www.isocell.at/messtechnik_temperatur.asp?print=true
URL : http://www.itema.de/grenzen_infrarot.html
URL : http://www.itema.de/ir_grundlagen.html
URL : <http://www.luftdichtheit.de/untersuchungen.htm>
URL : http://www.schadenfreiesbauen.de/inhalt/04_06.html
URL : <http://www.schnelli.ch/index.htm>
URL : <http://www.solarbau.de/monitor/doku/proj11/dokuindex.htm>
URL : <http://www.thermografie.net/thermo.html>
URL : <http://www.thermografie-schweiger.de/theorie.htm>
URL : <http://www.thermotemp.de/>
URL : http://www.t-zfp.de/Downloads/1_Kamerabeispiel.pdf
URL : http://www.t-zfp.de/Downloads/2_physik.pdf
URL : <http://www.uni-stuttgart.de/itlr/forschung/infrarot.html>
URL : <http://www.vath.de/literat2.htm>
URL : http://www.wdr.de/tv/service/bauen/archiv/01/0706_4.html
URL : <http://www.wki.fraunhofer.de/projekte/wki-1-11.html>
URL : <http://www.zds-nrw.de/technik-thermo.htm>
URL : <http://www1.fh-aalen.de/sgo/labors/IR/altbau.htm>
URL : <http://www1.fh-aalen.de/sgo/labors/IR/torsion2.htm>
URL : tsb.fh-bingen.de/projektblatt/blowerdoor.pdf
URL : www.adib-th.de/images/aib_broschur.pdf
URL : <http://www.thermotemp.de/>
URL : www.bernhard-group.ch/pdf/luftdicht2.pdf
URL : www.biblio.tu-bs.de/ediss/data/20021205a/20021205a.pdf
URL : www.bpy.uni-kassel.de/de/lehre/Bauschaeden.pdf
URL : www.bpy.uni-kassel.de/de/lehre/messtechnik.pdf
URL : www.brockmeyer.de/Deutsch/Download/downloads/termographie.pdf
URL : www.bvfs.at/htm/pub/download/ir.PDF
URL : www.dgzfp.de/pages/tagungen/berichtsbaende/bb_69-CD/bb69-m1.pdf
URL : www.dgzfp.de/pages/zeitung/fachbeitraege/zfp71-zwescher.pdf
URL : www.eipos.de/eipos/leistung/biw/bsv/bs/dload/s_knaute.pdf
URL : www.empa.ch
URL : www.erhatec.de/downloads/Tempmessung09XX.ppt
URL : www.flirthermography.com/success/pdfs/abl_elektronik_screen.pdf
URL : www.holzweg.at/de/content/Thermographie.pdf
URL : www.htwm.de/lmt/Vorlesungen/PDF/Thermo.pdf
URL : www.irbdirekt.de/irbbuch/irbb_frame3/irbb_iv_fachzeitschriften/arconis/leseprobe.pdf

URL : www.is.siemens.de/power-services/html_de/pdf_de/thermografie.pdf
URL : www.mpg.de/pdf/jahrbuch_2000/jahrbuch2000_547_558.pdf
URL : www.pattensen.de/pages/service/download/Herold02_03.pdf
URL : www.stadtwerke-essen.de/kservice/stgespr_10_02_endf.pdf
URL : www.transmetra.ch/pdf/thermografie/d02/d02.02.ir50.pdf
URL : www.t-zfp.de/Downloads/12_Porositat.pdf
URL : www.t-zfp.de/Downloads/Allgemein.pdf
URL : www.uni-kl.de/FB-ARUBI/AG-Heinrich/mitarb/dahlem/abstract/Dgzfp_2001.pdf
URL : www.windays.ch/referate/
URL : www.woehler.de/Download/ik21.pdf
URL : www.zae.uni-wuerzburg.de/zentral/pdf/tb_2002/kap3bis5_tb2002.pdf
URL : www-lit.maschinenbau.tu-ilmenau.de/seiten/download/Infrarotthermografie.pdf
URL : <http://www.zds-nrw.de/technik-thermo.htm>
URL : www.flirthermography.com/media/Prospekt%20Researcher%20deutsch.pdf
URL : www.woehler.de/Download/ik21.pdf
URL : <http://wolf-rahlenbeck.de/vor1.html>
URL : http://www.nextroom.at/article.php?article_id=5079

13 Anhang

13.1 Physikalische Formeln

Größe	Definition	SI-Einheit	Sonstige Einheit
Strahlungsfluss	$\Phi = dW / dt$	W	
Spektraler Strahlungsfluss	$\Phi_\lambda = d\Phi / d\lambda$	W m ⁻¹	W (nm) ⁻¹
Strahlstärke	$I = d\Phi / d\Omega$	W sr ⁻¹	
Spektrale Strahlstärke	$I_\lambda = dI / d\lambda$	W m ⁻¹ sr ⁻¹	W (nm) ⁻¹ sr ⁻¹
Spezifische Ausstrahlung	$M = d\Phi / dA_1$	W m ⁻²	
Spektrale spezifische Ausstrahlung	$M_\lambda = dM / d\lambda$	W m ⁻³	Wm ⁻² (nm) ⁻¹
Strahldichte	$L = d^2\Phi / dA_1 \cdot \cos \nu \cdot d\Omega$		W m ⁻² sr ⁻¹
Spektrale Strahldichte	$L_\lambda = dL / d\lambda$	W m ⁻³ sr ⁻¹	Wm ⁻² (nm) ⁻¹ · sr ⁻¹
Bestrahlungsstärke	$E = d\Phi / dA_2$	W m ⁻²	
Spektrale Bestrahlungsstärke	$E = dE / d\lambda$	W m ⁻³	Wm ⁻² (nm) ⁻¹

Konstanten:

$$c = (2,997925 + 0,000003) \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$h = (6,6256 \pm 0,0005) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$k = (1,38054 \pm 0,00018) \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

$$c_1 = (3,7415 \pm 0,0003) \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$c_2 = (1,43879 \pm 0,00019) \cdot 10^{-2} \text{ Km}$$

$$c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ Km (Internationale Temperaturskala von 1948, ergänzt 1960)}$$

$$\sigma = (5,6697 \pm 0,0029) \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

$$C_s = 5,67 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

13.2 DIN-Normen

Folgende DIN-Normen befinden sich als PDF-Dateien auf der beiliegenden CD-ROM:

- DIN 13187: *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäudehüllen : Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen : Infrarotverfahren*, Mai 1999, S. 1-12
- DIN 1349, Blatt 1: *Durchgang optischer Strahlung durch Medien, Optisch klare Stoffe, Größen Formelzeichen und Einheiten*, Juni 1972
- DIN 1349, Blatt 2: *Durchgang optischer Strahlung durch Medien, Optisch trübe Stoffe, Begriffe*, April 1975
- DIN 4512, Teil 7: *Photographische Sensitometrie, Bestimmung der optischen Dichte, Begriffe Symbole Kennzeichnungen*, Januar 1993
- DIN 4512, Teil 10: *Photographische Sensitometrie, Bestimmung der optischen Dichte, Geometrische Bedingungen für Messungen bei Reflexion*, Januar 1993
- DIN 5030, Teil 1: *Spektrale Strahlungsmessung, Begriffe Größen Kennzahlen*, Juni 1985
- DIN 5030, Teil 2: *Spektrale Strahlungsmessung, Strahler für spektrale Strahlungsmessungen, Auswahlkriterien*, September 1982
- DIN 5030, Teil 5: *Spektrale Strahlungsmessung, Physikalische Empfänger für spektrale Strahlungsmessungen, Begriffe Kenngrößen Auswahlkriterien*, Dezember 1987
- DIN 5031, Beiblatt 1: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Inhaltsverzeichnis über Größen Formelzeichen Einheiten, Stichwortverzeichnis zu DIN 5031 Teil 1 bis Teil 10*, November 1982
- DIN 5031, Teil 1: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik*, März 1982
- DIN 5031, Teil 8: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Strahlungsphysikalische Begriffe und Konstanten*, März 1982
- DIN 5036, Teil 1: *Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien, Begriffe und Kennzahlen*, Juli 1978

13.3 VDI-Richtlinien

Folgende VDI-Richtlinie befindet sich als PDF-Datei auf der beiliegenden CD-ROM:

- VDI/VDE 3511, Blatt 4: *Technische Temperaturmessungen, Strahlungsthermometrie*, Januar 1995, S. 1-112

14 Adressen

Prof. Dipl.-Restaurator Erwin EMMERLING · Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft · Technische Universität München · Oettingenstr. 15 · D-80538 München · Tel. + 49 (0)89 / 21124-568 · Fax: + 49 (0)89 / 21124-554 · E-Mail: sekretariat@rkk.arch.tu-muenchen.de · Internet: [URL : <http://www.rkk.arch.tu-muenchen.de/>]

Dr.-Ing. Franz IRLINGER und Dipl.-Ing. Martin SCHINDLER · Lehrstuhl für Feingerätebau und Mikrotechnik · Technische Universität München · Boltzmannstr. 15 · D-85747 Garching · Tel. + 49 (0)89 / 289-15191 · Fax: + 49 (0)89 / 289-15192 · E-Mail: Kontakt@fgeb.mw.tum.de · Internet: [URL : <http://www.fgeb.mw.tum.de/>]

Dr. Dipl.-Phys. Andreas KRATZER · Physik Departments an der Technischen Universität München · James Franck Str. · D-85748 Garching · Tel. + 49 (0)89 / 289-12596 · Tel. + 49 (0)89 / 289-16363 · E-Mail: www.kratzer@ph.tum.de · Internet: [URL : <http://www.physik.tu-muenchen.de/>]

Dr. Udo NETZELMANN · Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren - IZFP · Universität, Gebäude 37 · D-66123 Saarbrücken · Tel. + 49 (0)681 / 9302 0 · Fax: + 49 (0)681 / 9302 59 01 · E-Mail: udo.netzelmann@izfp.fraunhofer.de · Internet: [URL : <http://www.izfp.fhg.de/>]

Dipl.-Phys. Alexander DILLENZ · Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, IKP · Universität Stuttgart · Abt. ZfP · Pfaffenwaldring 32 · D-70569 Stuttgart · Tel. + 49 (0)711 / 685-2694 · Fax: + 49 (0)711 / 685-2066 · E-Mail: dillenz@ikp.uni-stuttgart.de

Dipl.-Phys. Peter MEINLSCHMIDT · Fraunhofer-Wilhelm-Klauditz-Institut, Holzforschung · Bienroder Weg 54 E · D-38108 Braunschweig · Tel. + 49 (0)531 / 2155-0 · Fax: + 49 (0)531 / 351587 · E-Mail: peter.meinlschmidt@wki.fraunhofer.de · Internet: [URL : <http://www.wki.fraunhofer.de/profil/gebiete.html>]

Dipl.-Ing. Gernot RIEGERT · Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde · Zerstörungsfreie Prüfung · Universität Stuttgart · Pfaffenwaldring 32 · D-70569 Stuttgart · Tel. + 49 (0)711 / 685-2572 · E-Mail: riegert@ikp.uni-stuttgart.de

Bernd SCHINDEL · Wildermuthstrasse 88 · Postfach 500566 · D-80993 München · Tel. + 49 (0)89 / 140-3446 · Fax: + 49 (0)89 / 140-3190 · Hotline: +49 (0)171 / 3633066 · E-Mail: thermography@t-online.de · Internet: [URL : www.ebs-thermographie.de/]