

Thermografie

Definition



Thermografie ist ein zerstörungsfreies Verfahren zur Messung und Visualisierung, d.h. zur bildhaften Darstellung, der von einem Objekt ausgesendeten Wärmestrahlung, welche für das menschliche Auge unsichtbar ist. Anhand der Wärmestrahlung kann die Verteilung der Wärmeemission am Objekt erkannt werden.¹²

Unterschieden werden kann zwischen *passiver* und *aktiver* Thermografie. Bei der passiven Thermografie wird die vom Objekt ausgesendete Eigenwärme passiv detektiert, während bei der aktiven Thermografie das Objekt zuvor oder gleichzeitig mit einer Wärmequelle (z.B. Infrarotstrahler) angeregt wird, so dass mit der Thermalkamera der künstlich erzeugte Wärmefluss detektiert wird.¹³

(Flohrrer 2002, Taffe & Wiggenhauser 2008)

Anwendungsfall

Anwendungsbereich

- 
- Thermische Bestandsaufnahme zur Detektion von Schäden oder Baumängeln, wie z.B. Risse, Einschlüsse von Hohlräumen
 - Lokalisierung von Wärmebrücken
 - Lokalisierung und Visualisierung von feuchten Stellen/Feuchtigkeitsschäden und ggf. Identifikation von Ursachen (Leckageortung)

Rahmenbedingungen

- 
- Windgeschwindigkeiten unter 5m/s^{8,9,11}
 - kein Regen, Schneefall oder Nebel¹¹
 - Neben Außen- auch Innenthermografien von Gebäuden erfassbar
 - Qualitativ hochwertige Ausrüstung mit hochauflösender Kamera für scharfe, gut erkennbare Thermografieaufnahmen. Nach DIN EN ISO 9712 zertifizierter Thermograf⁸
 - Im Vorfeld der Messung sollten die täglichen Temperaturschwankungen möglichst gering sein. Ein bedeckter Himmel ist ebenfalls vorteilhaft, da direkte Sonneneinstrahlung die Gebäudeteile je nach Himmelsrichtung und Neigung unterschiedlich erwärmt und diese Wirkung nur allmählich abklingt
 - Stabile Klimasituation vor und während der Messung wünschenswert¹¹
 - Günstiger Messzeitpunkt in den Monaten von November bis März in den frühen Morgenstunden von 6:00 bis 8:30 Uhr

(Pearson 2011, Lucchi 2018, Tomita et al. 2022, DIN EN ISO 9712)



Technischer Hintergrund

Erläuterung der Funktionsweise

Die *passive Thermografie* basiert darauf, dass alle Gegenstände mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts ($-273,15^{\circ}\text{C}$) Strahlung aussenden.¹⁴ Die Temperatur des jeweiligen Körpers sowie die Intensität der ausgesendeten Strahlung hängt von den physikalischen Eigenschaften des Körpers in Bezug auf Wärmeaufnahme und -abgabe ab (bspw. Oberflächenbeschaffenheit, *Emissionsgrad*, Transmission, Wärmespeicherefähigkeit). Dabei gilt, dass je höher die Temperatur eines Objekts ist, desto intensiver ist die von ihm abgegebene Strahlung.¹⁵

Die Wärmestrahlung liegt im Infrarotbereich und ist für das menschliche Auge nicht sichtbar¹⁴. Mit Hilfe der Thermographie ist es jedoch möglich, die Intensität der Wärmestrahlung zu messen, daraus die entsprechenden Temperaturen zu ermitteln und diese zu visualisieren, d.h. in einem Bild in unterschiedlichen Farben darzustellen. Daher wird die Thermographie umgangssprachlich auch als „Wärmebildtechnik“ bezeichnet.¹⁵

Die abgestrahlte Energie wird in der Kamera auf Sensoren gelenkt, die diese in ein elektrisches Signal umwandeln. Dieses Signal wird digitalisiert und in die Temperatur umgerechnet. Die Messergebnisse werden dann in Form eines Wärmeverteilungsbildes auf einen Bildschirm projiziert und für eine spätere Analyse gespeichert. Zur einfachen Identifizierung können die spezifischen Temperaturen mit unterschiedlichen Farben dargestellt werden.

Mit der Kamera selbst wird nur Strahlung empfangen, es wird keine Strahlung ausgesendet. Somit ist die Messung im Rahmen der passiven Thermografie berührungslos und ohne Einwirkung von außen.

Dem gegenüber wirkt bei der *aktiven Thermografie* ein Wärmeimpuls auf das Bauteil ein.¹³ Als Wärmequellen eignen sich hierfür Infrarotstrahler, Lampen oder auch Laser. Eingesetzt wird diese Form der Thermografie vor allem im Industriesektor. Nimmt die Wärmeleitfähigkeit an einer bestimmten Stelle ab, kann dies auf einen Produktfehler wie z.B. einen Hohlraum, ein Loch oder einen Riss hindeuten.¹⁶

(Bauer 2005, Fouad & Richter 2007, Taffe & Wiggenhauser 2008, Maierhofer et al. 2008)

Mehrwert

Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit

- Berührungslose und somit zerstörungsfreie Messung der Objekte
- Kurze Aufenthaltszeiten vor Ort erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit
- Bei Wasserbauwerken konnte in ersten Versuchen der Mehrwert von Thermografiekameras als Instrument für die Erkennung von Schäden (z.B. Risse) festgestellt werden, da der Feuchtigkeitsgehalt von Schadstellen mutmaßlich zu einem messbaren Temperaturdifferential führt.



Zeitersparnis Inspektion



- Erheblich bei Kombination der Methode mit einem UAS

Kosten



- Erfassungssensorik (Thermalkamera mit Objektiven): > 10.000 EUR (Marktrecherche 2022)
- Beispiel: Mittelklasse-Thermalkamera FLIR B360
- Preise abhängig von Sensordaten (Erfassbare Temperaturbereiche, thermische Empfindlichkeit, *Sichtfeld*, Auflösung, Gehäuseschutz, ...)
- Auswertesoftware: ca. 200 bis 1500 EUR (Marktrecherche 2022)
- Wärmestrahler (nur für aktive Thermografie): Infrarot Stativstrahler für industrielle Anwendungen ab ca. 1000 EUR (Wärmelampen oder herkömmliche Infrarotstrahler für Messungen kleinerer Bereiche günstiger)
- ggf. Personalkosten (zertifizierter Thermograf) für Aufnahmen und Auswertung

Datenqualität



- In Abhängigkeit der verwendeten Sensorik (Erfassbare Temperaturbereiche, thermische Empfindlichkeit, Kameraauflösung, ...)
- Am Beispiel der Thermalkamera FLIR B360:
- Ortung, Messung und Visualisierung der Wärmeabstrahlung eines Gebäudes oder Gegenstands mit einer Auflösung von 0,06 Grad Celsius.
- Auflösung des *Thermogramms* (Bildauflösung): 320 Pixel in der Horizontalen und 240 Pixel in der Vertikalen (also insgesamt 76.800 Einzelmessungen).

Voraussetzungen

Hardware



- Thermalkamera mit Objektiv(en)
- evtl. zusätzliche Optiken und Displays
- Wärmestrahler (bei aktiver Thermografie)

Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Generell keine Vorbereitung des Untersuchungsobjektes selbst notwendig

- bewegliche Gegenstände im Außenbereich wegen Wärmerückstrahlung bzw. Eigenstrahlung vom Bauwerk entfernen

Vorbereitung Datenerhebung

- Konfiguration der Systemeinstellungen der Kamera in Abhängigkeit des Anwendungsfalls

Umweltbedingungen

- Windgeschwindigkeiten unter 1 -2 m/s, kein Regen, Schneefall oder Nebel.
- Im Vorfeld der Messung sollten die täglichen Temperaturschwankungen möglichst gering sein. Ein bedeckter Himmel ist ebenfalls vorteilhaft, da direkte Sonneneinstrahlung die Bauwerksteile je nach Himmelsrichtung und Neigung unterschiedlich erwärmt und diese Wirkung nur allmählich abklingt. Zusammengefasst ist eine stabile Klimasituation vor und während der Messung wünschenswert.

Erforderliche Genehmigungen

- ggf. Genehmigungen erforderlich für die Begehung des Bauwerks

Umsetzung

Datenerhebung

- in Abhängigkeit der zu erfassenden Fläche können einzelne Aufnahmen oder gesamte Bildverbände aufgenommen werden

Datenprozessierung

- ggf. individuelle Anpassung der Farbschemata zur visuellen Darstellung von Temperaturen
- Prozessierung der Bildverbände zu gesamtheitlichen *Thermogrammen* des Bauwerks
- Für die räumliche Referenzierung der Aufnahmen sind ggf. Verfahren zur Georeferenzierung oder Registrierung bzw. Koregistrierung mit anderen Datenquellen (z.B. RGB-Bildern) erforderlich

Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Kombinierbar mit anderen (bildhaften) Messmethoden (Photogrammetrie, Laserscanner, ...) um z.B. Objekte dreidimensional zu vermessen und mit dem Wärmebildern zu überlagern
- Thermalkameras können sowohl vom menschlichen Operateur getragen und bedient als auch von anderen Trägerplattformen (z.B. UAV) betrieben werden

Output

Informationen



- Temperaturmesswerte
- *Emissionsgrad*
- Transmission
- Umgebungstemperatur
- *Field of View*

Dateiformate



- Standard-Bilddateiformate mit oder ohne radiometrische Daten (z.B. JPG)
- Rohdaten (z.B. IS2)

Referenzen

Beispielanbieter



- Kreher und Lindner GbR, Ingenieurbüro in Aachen (<https://www.bau-messtechnik.de/>)
- BAUING & IMM, Energieberatung in Wuppertal (<https://www.bauing-immobilien.de/>)

Beispielanwendungen



- Detektion von Rissen auf Betonoberflächen ¹
- Maschinelle Lernverfahren zur Ermittlung von Risstiefen unter Nutzung von Thermografie ²
- Bewertung von (Feuchtigkeits-) Schäden an Gebäuden ^{3/4}
- Inspektion elektrischer Anschlüsse in Bauwerken zur Gefahrenprävention ⁵
- Diagnose energetischer Gebäudedaten (Analyse von Heizungs- und Kühlungssystemen sowie elektrischer und mechanischer Installationen zur Detektion von Energieverlusten von Bauwerken) ⁶
- Bestandsaufnahme mittels Einfärbung von 3D -Punktwolken mit thermografischen Bilddaten ⁷

(Sham et al. 2008, Jang et al. 2022, Barbosa et al. 2021, Maierhofer et al. 2011, Huda et al. 2012, Balaras & Argiriou 2002, Fiedler et al. 2019)

Quellen



- F C Sham, Nelson Chen and Liu Long. Surface crack detection by flash thermography on concrete surface, 2008, DOI: 10.1784/insi.2008.50.5.240
- ² Arum Jang, Jihyung Kim, Min Jae Park, Young K. Ju, Sung Jig Kim. Analysis of Machine Learning for Detect Concrete Crack Depths Using Infrared Thermography Technique, 2022, DOI: 10.2749/prague.2022.0758
- ³ Maria Teresa Gomes Barbosa, Vicente Junio Rosse, Náira Gaudereto Laurindo. Thermography evaluation strategy proposal due moisture damage on building facades, 2021, DOI: 10.1016/j.job.2021.102555
- ⁴ Christiane Maierhofer, Rainer Krankenhagen, Mathias Röllig, Rüdiger Mecke, Michael Schiller, Thomas Seidl, Uwe Kalisch, Christiane Hennen and Jeannine Meinhardt, Jeannine. Bewertung von Schäden an historischen Bauteilen mit aktiver Thermografie und 3D-Laserscanner, 2011
- ⁵ A.S. Nazmul Huda, Soib Taib, Mohd Shawal Jadin, Dahaman Ishak. A semi-automatic approach for thermographic inspection of electrical installations within buildings, 2012, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.09.014
- ⁶ C.A. Balaras and A.A. Argiriou. Infrared thermography for building diagnostics, 2002, DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00105-0
- ⁷ Sebastian Fiedler, Philipp Grümpel, Georg Karl and Stefan Knoblach. 3D-Punktwolke mit thermografischer Information, 2019, DOI: 10.12902/zfv-0247-2018
- ⁸ C.Pearson. Thermal Imaging of Building Fabric, Bisra Guide Bg39, 2011
- ⁹ E. Lucchi. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 3077–3090
- ¹⁰ DIN e.V. (Hrsg.) (ISO 9712:2021): DIN EN ISO 9712 Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung, Brüssel, 2021
- ¹¹ Tomita, Ko and Chew, Michael Yit Lin. A Review of infrared thermography for delamination detection on infrastructures and buildings. *Sensors*, 2022, 22. Jg., Nr. 2, S. 423.
- ¹² Flohrer, M. Wärmetechnische Schwachstellen: Aufgedeckt, lokalisiert und bewertet mittels Infrarot-Thermografie-Messungen. *Bauphysik*, 2002, 24. Jg., Nr. 5, S. 308-312.
- ¹³ Taffe, A. und Wiggerhauser, H. Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – angewandte Forschung und Praxis. 2008
- ¹⁴ Norbert Bauer. *Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie: zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*. Fraunhofer-Allianz Vision, 2005.
- ¹⁵ Nabil Fouad and Torsten Richter. *Leitfaden Thermografie im Bauwesen: Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung*. Fraunhofer IRB Verlag, 2007
- ¹⁶ Maierhofer, Christiane et al. Praktische Anwendung der aktiven Thermografie zur Untersuchung von Stahlbetonbauteilen. *Fachtagung Bauwerksdiagnose, 21.-22.02. 2008, Berlin*, 2008.

Glossar:

- Thermogramm:** Als Thermogramm wird die bildliche Darstellung der gemessenen Temperaturwerte der Thermalkamera bezeichnet. Thermogramme liefern somit einen visuellen Überblick zu den thermischen Verhältnissen am Messobjekt. Dabei repräsentiert jede Farbe oder Schattierung eine einzelne Temperatur.
- Emissionsgrad:** Der Emissionsgrad ist ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, Strahlung auszusenden. Der Wertebereich für den Emissionsgrad liegt zwischen 0 und 1, wobei ein Emissionsgrad von 1 (100%) in der Realität nie auftritt, da reale Körper zusätzlich reflektieren und eventuell transmittieren. Die Ausprägung des Emissionsgrades ist stets in Abhängigkeit der Wellenlänge zu betrachten und maßgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers abhängig. Nichtmetallische und nichttransparente Objekte strahlen in der Regel viel Wärme aus und weisen einen Emissionsgrad von über 80% auf. Bei metallischen Oberflächen kann der Emissionsgrad hingegen stark variieren. Hierbei gilt, dass je glänzender ein Metall ist, desto niedriger ist der Emissionsgrad.
- Transmissionsgrad:** Der Transmissionsgrad ist ein Maß für die Fähigkeit eines Materials Strahlung durchzulassen. Der Wertebereich für den Transmissionsgrad liegt zwischen 0 und 1. Der jeweilige Wert steht in Abhängigkeit zu der Art und Dicke des Materials. Die meisten Materialien sind für langwellige Strahlungen nicht durchlässig.
- Field of View:** Der Begriff Field of View (Sichtfeld) beschreibt die mit der Thermalkamera erfassbare Fläche. Das Sichtfeld ist von der Entfernung zwischen Messobjekt und Kamera sowie von dem verwendeten Objektiv abhängig. Während sich Weitwinkelobjektive für große Sichtfelder eignen, dienen Teleobjektive für eine strukturiertere räumliche Auflösung.