

# DT360: Digital Thermography 360° – Projekt »ThermoHead«

## DT360: Digital Thermography 360° – Project »ThermoHead«

Sebastian Fiedler | Andreas Görtler | Stefan Knoblauch

### Zusammenfassung

Im Projekt »ThermoHead« wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich per Knopfdruck ganze Gebäude oder Industrieanlagen (energetisch) digitalisieren lassen. Hierfür werden zwei verschiedene Panoramaköpfe verwendet; der neu entwickelte ThermoHead für Thermografiepanoramen mit 25 Megapixeln in vollständiger Radiometrie sowie der piXplorer 500 für RGB-Panoramen mit 500 Megapixeln in siebenfachem HDR. Beide Instrumente nehmen innerhalb von fünf Minuten vollautomatisch geometrisch kalibrierte 360° × 180°-Panoramen auf, die auch mit maßhaltigen 3D-Punktwolken deckungsgleich kombinierbar sind. Dadurch entsteht ein Datensatz, der Energieverluste aufzeigt und zudem die Identifikation der vermessenen Objekte im sichtbaren Spektralbereich erlaubt. Objektabstände von 1 m bis 20 m sind möglich, wodurch Areale bis 40 m abgedeckt werden können.

Zusätzlich kann mit dem piXplorer 500 sowie geeignetem Stativ und Software eine Bildmessung stattfinden: Hierbei wird für eine zweite Messung das Stativ erhöht; die Software kann anschließend mittels Stereophotogrammetrie Maße aus den Panoramen extrahieren. Mit dem Verfahren können z.B. Planungsunterlagen angefertigt oder Baumaßnahmen digital kontrolliert werden.

Die Datenauswertung findet ebenfalls vollautomatisch statt, weshalb das ganze Verfahren sehr bedienerfreundlich ist. Die Ergebnisse sind mit wenig Aufwand in ein Format überführbar, indem sie online per Browser betrachtet werden können. Sie sind somit ohne Softwareinstallation auf nahezu jedem Smartphone, Tablet oder PC durch Anklicken eines Hyperlinks nutzbar.

**Schlüsselwörter:** Geometrisch kalibrierte Panoramen, Thermografie, RGB, Bildmessung, Stereophotogrammetrie, online Kommunikation

### Summary

*In the project »ThermoHead«, a new method has been developed, which allows the (energetically) inventory of whole buildings or industrial facilities. Therefore, two different panorama heads are used; the newly developed ThermoHead for thermographic panorama images with 25 megapixels and complete radiometric information as well as the piXplorer 500 for RGB panoramas with 500 megapixels and seven times HDR. Both devices fully automatically record 360° × 180° panoramic images within five minutes which are geometrically calibrated and can even be combined completely congruent with dimensionally stable*

*3D-point-clouds. The result is a dataset that shows energy losses and allows for the identification of the measured objects in the visible spectrum. Measuring distances from 1 m up to 20 m are possible, allowing to cover up areas of up to 40 m.*

*Additionally, with a suitable stand and software, the piXplorer 500 is able to use photogrammetric measurements. Therefore, a second panoramic image has to be recorded after expanding the stand; the software extract the dimensions out of the panoramic images using stereo photogrammetry. With this method e.g. planning documents can be made or building measures verified.*

*The data processing is also fully automatically, making the new method very user-friendly. With only little effort, the results can be compiled into a format that can be viewed via online browsers. Therefore, they are accessible without software installation on almost every smartphone, tablet or PC by clicking a hyperlink.*

**Keywords:** *geometrically calibrated panoramic images, thermography, RGB, photogrammetry, stereo photogrammetry, online communication*

### 1 Einleitung

In dem ZIM-Projekt (Zentrum Innovation Mittelstand) »ThermoHead« fand die Neuentwicklung eines Instruments und Verfahrens statt, das die Digitalisierung kompletter Gebäude oder Industrieanlagen per Knopfdruck erlaubt (1-Klick-Lösung). Hierbei werden zwei verschiedene von CLAUSS (Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH) (Clauss 2021) produzierte Panoramaköpfe verwendet, der ThermoHead sowie der piXplorer 500. Beide Instrumente fertigen innerhalb von fünf Minuten geometrisch kalibrierte 360° × 180°-Panoramen an. Das Thermografiepanorama des ThermoHead hat eine Auflösung von 25 Megapixeln und wird mit der vollständigen Radiometrie abgespeichert (Fiedler et al. 2021), der piXplorer 500 erstellt RGB-Panoramen mit 500 Megapixeln in sieben HDR-Stufen (High Dynamic Range).

Die Panoramaköpfe können, je nach Anwendungsfall, einzeln eingesetzt werden; durch die geometrische Kalibrierung der aufgenommenen Panoramen ist jedoch auch eine Kombination untereinander oder mit anderen maßhaltigen Aufnahmeverfahren, wie z.B. der terrestrischen 3D-Lasermessung, möglich (Fiedler et al. 2019).

Anwendungsgebiete werden im Folgenden kurz vorgestellt und in Kap. 4 ausführlich mit Beispielen erläutert:

- piXplorer 500: **Inventarisierung** (4.1) von Räumen, Gebäuden, Industrieanlagen oder Grundstücken durch hochauflöste RGB-Panoramen.
- ThermoHead: **Einfache Thermografiepanoramen** (4.2) zur Überprüfung von Gebäuden auf Kältebrücken, schadhafte Dämmungen oder Baumängel wie Feuchtigkeitseinlagerungen oder Hohlräume.
- piXplorer 500 für Stereophotogrammetrie: **Vermessung** (4.3) von Gebäuden mittels Photogrammetrie. Erstellung von Planungsunterlagen für z. B. Renovierungs- oder Umbaumaßnahmen. Abgleich von Bauplänen mit Baumaßnahmen.
- piXplorer 500 + ThermoHead: Anfertigung von **hochwertigen Thermografiepanoramen** (4.4) mit RGB-Überlagerung. Das zusätzliche Panorama im sichtbaren Spektralbereich mit einer zwanzigfach so hohen Auflösung erlaubt eine bessere Identifikation der in der Thermografie vermessenen Objekte. Zudem können Emissionswerttabellen (Micro-Epsilon 2018) verwendet werden, um den Emissionskoeffizienten genauer zu bestimmen.
- piXplorer 500 + Stereophotogrammetrie: **Kalkulation von Energieverlusten** (4.5) unter wirtschaftlichen Aspekten für z. B. Energieaudits (TIPCHECK) (EiiF 2021) und ISO 50001-Zertifizierungen. Der Energieverlust setzt sich aus Temperaturunterschied und Abstrahlüberfläche des ungedämmten Bauteils zusammen.
- 3D-Thermografie: Kombination von Thermografiepanoramen mit maßhaltigen 3D-Punktwolken aus terrestrischen 3D-Lasermessungen. Hieraus entstehen die **hochwertigsten Thermografiepanoramen** (4.6), die auch für Planung und BIM (Building Information Modeling) nutzbar sind. Außerdem wird eine neue Methode zur berührungslosen Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von Oberflächen und somit des Emissionskoeffizienten möglich (Fiedler et al. 2020b).

## 2 ThermoHead und piXplorer 500

Bei dem ThermoHead handelt es sich um eine komplexe Neuentwicklung auf Grundlage des Labormusters aus dem BMBF-Projekt »eDIan« (effiziente Dämmung von Industrieanlagen) (Grümpel und Karl 2017). Sowohl der ThermoHead als auch der piXplorer 500 verwenden den Panoramakopf »piXplorer« von CLAUSS (Abb. 1). Auf diesem Panoramakopf kann eine beliebige Kamera montiert werden, die anschließend vollautomatisch um die horizontale und vertikale Achse rotiert und dabei Aufnahmen auslöst. Hierbei bewegt sich die Kamera immer um den Nodalpunkt (Gabriel 2018), wodurch parallaxefreie Aufnahmen möglich sind (Fiedler et al. 2020a). Für beide Instrumente wurde eine 1-Klick-Lösung umgesetzt, sodass der Nutzer die Panoramaaufnahmen vollautomatisch durch

die Betätigung nur eines Knopfes, am Panoramakopf selbst oder per Fernbedienung, starten kann. Innerhalb von fünf Minuten nehmen beide Instrumente ein vollständiges  $360^\circ \times 180^\circ$ -Panorama auf und speichern die Einzelbilder auf der jeweils verbauten Kameraeinheit. Die fest verbauten Akkus sind ausreichend stark, dass die Instrumente einen kompletten Arbeitstag verwendbar sind.



Abb. adaptiert aus Fiedler et al. 2021

Abb. 1: ThermoHead (links) und piXplorer 500 (rechts). Beide Kamerasysteme basieren auf dem piXplorer Panoramakopf von CLAUSS und rotieren eine Kamera entlang des Nodalpunkts um die Vertikale und Horizontale (rote Pfeile). Panoramen werden vollautomatisch per Knopfdruck aufgenommen; beim ThermoHead bleibt dabei die Radiometrie vollständig erhalten, der piXplorer 500 arbeitet in sieben HDR-Stufen.

Beide Instrumenttypen werden einer aufwändigen geometrischen Kalibrierung unterzogen, wodurch die damit aufgenommenen Panoramen im Anschluss verzeichnungsfrei vorliegen (Clauß 2011). Damit ist gewährleistet, dass die so angefertigten Panoramen die aufgenommene Geometrie exakt wiedergeben und auch mit maßhaltigen Datensätzen wie z. B. 3D-Punktwolken, aufgenommen mit einem beliebigen terrestrischen 3D-Laserscanner, kombiniert werden können.

Der ThermoHead nimmt 104 Einzelbilder auf und speichert diese als 16-Bit-TIF-Dateien ab. Das Datenformat wurde so gewählt, um die 14 Bit der Thermografiekamera vollständig in einem Kanal abzuspeichern, wodurch die komplette Radiometrie erhalten bleibt. Die Einzelaufnahmen sowie die Thermografiepanoramen können in spezieller Thermografiesoftware, wie z. B. FLIR ResearchIR (MAX) (FLIR 2015), in vollem Umfang weiterverarbeitet werden. Zudem ist das Datenformat aber auch in gewöhnlicher Bildbearbeitungssoftware verarbeitbar, um z. B. die gemessene Temperatur pixelgenau auszulesen oder den Kontrast zu verändern.

Der verbaute Sensor arbeitet im Spektralbereich von  $8 \mu\text{m}$  bis  $14 \mu\text{m}$  bei einer thermischen Empfindlichkeit (NETD: Noise Equivalent Temperature Difference) von  $75 \text{ mK}$ , die jedoch bei Bedarf durch Bildmittelungen ver-

bessert werden kann: Hierfür wird die Verweildauer des ThermoHead pro Aufnahmeposition erhöht und das Instrument nimmt automatisch eine Bildmittelung zur Verbesserung des SNR (Signal-to-Noise Ratio) vor. Drei Temperaturbereiche sind wählbar: -20 °C bis 100 °C, 0 °C bis 250 °C sowie 150 °C bis 900 °C. Am Objektiv ist ein Ring mit Skala verbaut, mit dem der jeweilige Objektabstand eingestellt werden kann. Über das fest im ThermoHead verbaute LCD-Color-Display kann die Fokussierung nochmals überprüft werden. Das Display zeigt außerdem den aktuellen Bildausschnitt mit einer Temperaturskala, die Anzahl an Aufnahmen und die verbleibende Akkukapazität. Da der ThermoHead alle benötigten Elemente zur Aufnahme, Datenverarbeitung und -speicherung beinhaltet, ist zusätzlich ein Einsatz als mobiles Handgerät vorgesehen. Damit wäre der ThermoHead das erste Instrument, dass sowohl Einzelaufnahmen als auch geometrisch kalibrierte Panoramen anfertigen kann. Ebenfalls ist geplant, den ThermoHead mit verschiedenen Objektiven anzubieten, wodurch z.B. eine viermal so hohe Auflösung möglich wird (100 Megapixel pro Panorama) (Fiedler et al. 2021). Die Objektive sind zudem wechselbar, was neue Möglichkeiten eröffnet: So könnten z.B. Übersichtspanoramen mit 25 Megapixel aufgenommen und anschließend einzelne Areale mit 100 Megapixel hinzugefügt werden. Da für jedes Objektiv eine geometrische Kalibrierung durchgeführt wird und somit die erhaltenen Bilder verzeichnungsfrei vorliegen, ist eine anschließende Kombination der verschiedenen aufgelösten Thermografieaufnahmen mit gewöhnlicher Bildbearbeitungssoftware möglich (16-Bit-Bildverarbeitung vorausgesetzt).

Der piXplorer 500 nimmt 58 Einzelpositionen mit siebenfachem HDR (Higher-Dynamic-Range) auf (26 Blendenstufen oder »Stops«) und speichert demnach pro Aufnahme 406 Einzelbilder ab. Ferner ist ein leuchtstarker LED-Ring um das Objektiv angebracht, wodurch das Instrument selbst bei schlechten Lichtverhältnissen hervorragende Aufnahmen liefert. Da Thermografieaufnahmen in völliger Dunkelheit stattfinden können (Thermografie nimmt die Emission eines Objekts auf, Fotografie hingegen die Reflexion), ist dieser Punkt wichtig, um den piXplorer 500 bei beliebigen Lichtverhältnissen einsetzen zu können. Die ebenfalls geometrisch kalibrierten Panoramen werden als TIF, PSB oder JPG ausgegeben und können somit in der gleichen beliebigen Bildbearbeitungssoftware wie die Thermografiepanoramen bearbeitet werden.

### 3 Automatische Datenverarbeitung

Sowohl für die Generierung der Thermografie- als auch der RGB-Panoramen wird die Software »piXplorer 500 Professional« von CLAUSS verwendet (Abb. 2). Für jedes einzelne Instrument werden die Kameraparameter über eine aufwändige geometrische Kalibrierung ermittelt. Damit wird im Anschluss jedes aufgenommene Bild kalibriert, bevor diese Einzelbilder zu einem Panorama zusammengefügt werden. Zwar ist die geometrische Kalibrierung der Einzelaufnahmen ein großer Aufwand, jedoch wird dadurch erst die Bildmessung via Stereophotogrammetrie möglich. Außerdem sind kalibrierte Panoramen sowohl untereinander als auch mit maßhaltigen Aufnahmen, wie z.B. 3D-Punktwolken, fehlerfrei kombinierbar. Auch eine Objektgeometrie lässt sich erst nach einer erfolgreichen geometrischen Kalibrierung korrekt in einem Bild wiedergeben.

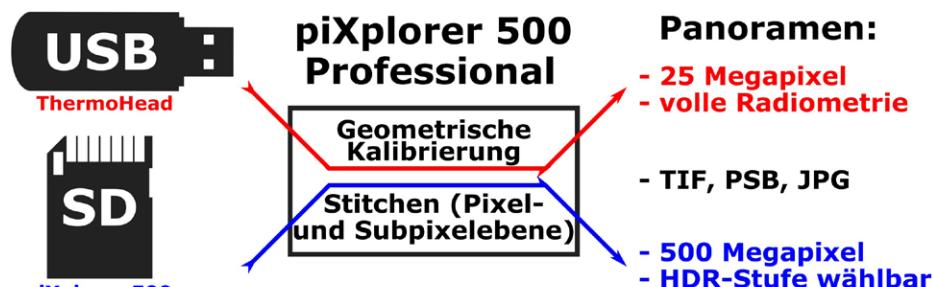


Abb. 2: Sowohl die Datenträger des ThermoHead (USB-Stick) als auch des piXplorer 500 (SD-Karte) werden von der Software piXplorer 500 Professional automatisch erkannt und die darauf gespeicherten Einzelbilder zu Panoramen gruppiert. Die Software nimmt für beide Panoramtypen sowohl eine geometrische Kalibrierung als auch ein Stitching der Einzelbilder zum Panorama auf Pixel- und Subpixelebene vor. Während das Thermografiepanorama mit der vollständigen Radiometrie ausgegeben wird, kann bei dem RGB-Panorama die HDR-Stufe frei gewählt werden.

Für jedes Instrument (ThermoHead und piXplorer 500) wird ein sogenanntes »Stitching-Pattern« angefertigt, dass die nun geometrisch kalibrierten Einzelbilder zueinander ausrichtet. Das anschließende Stitching findet Feature-basierend auf Pixel- und Subpixelebene statt. Hierbei sucht die Software Merkmale an den Bildrändern und fügt diese zusammen.

### 4 Einsatzgebiete

In der Einleitung (Kap. 1) wurden bereits Kombinationsmöglichkeiten und Einsatzgebiete vorgestellt, die in diesem Abschnitt etwas genauer ausgeführt werden sollen. Sowohl der ThermoHead als auch der piXplorer 500 können als eigenständige Instrumente angewendet werden, jedoch bietet die geometrische Kalibrierung beider Panoramen auch Kombinationsmöglichkeiten untereinander oder sogar mit anderen maßhaltig bildgebenden Instrumenten,

wie z.B. terrestrischen 3D-Laserscannern. Für Teile der genannten Einsatzgebiete werden Links zur Verfügung gestellt, unter denen Onlinebeispiele im Webbrowser betrachtet werden können.

#### 4.1 Inventarisierung von Gebäuden

Mit dem piXplorer 500 können innerhalb von fünf Minuten pro Aufnahmestandort hochauflösende RGB-Panoramen angefertigt werden. Ein Anwendungsfall ist z.B. die Aufnahme von Gebäuden vor und nach einer Renovierung, von Industrieanlagen (Abb. 3) vor einem Umbau oder von Parks und Außenanlagen vor einer Neugestaltung. Speziell bei historischen Bauwerken und Denkmälern ist die schnelle und einfache Digitalisierung gut geeignet, um Baufortschritte lückenlos dokumentieren zu können.



Abb. 3: Digitalisierte Industrieanlage zur Inventur. Da der piXplorer 500 sieben HDR-Stufen aufnimmt und ab ~1 m fokussiert abbildet, sind keine Anpassungen nötig.

In Zeiten von Corona-Reisebeschränkungen wurden auf diese Weise auch Wohnungen digitalisiert, um Besichtigungstermine online abhalten zu können. Oder es können z.B. Museen digitalisiert werden, um so bei einer erneuten Schließung virtuelle Rundgänge zu ermöglichen.

#### 4.2 Energetische Inventarisierung

Hierfür wird der ThermoHead ebenfalls verwendet. Gebäude können sowohl von innen (Abb. 4) als auch von außen auf Kältebrücken, schadhafte Dämmungen oder Baumängel überprüft werden. Ideal sind diese Aufnahmen in den kalten Wintermonaten bei beheizten Gebäuden, da Defekte im Inneren als kalte bzw. außen als warme Stellen hervortreten. Dieses Verfahren bietet z.B. für die energetische Sanierung von Wohnhäusern ein großes Potenzial, da mit so angefertigten Aufnahmen in Zukunft bedarfsorientiert gedämmt werden kann: Man erkennt z.B., ob die Fenster undicht sind, das Dach nicht korrekt gedämmt

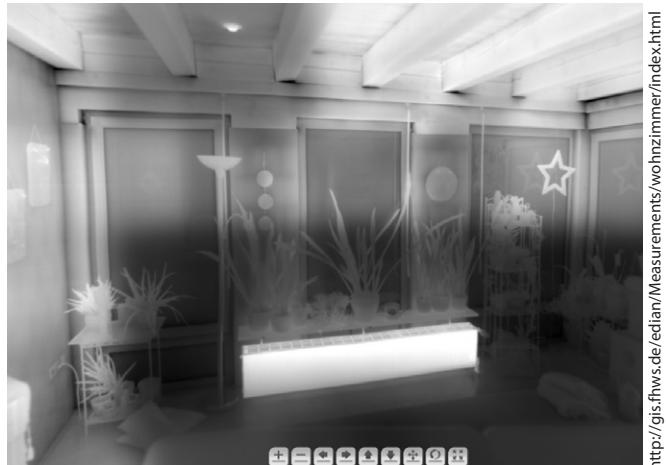


Abb. 4: Thermografiepanorama eines Wohnzimmers; Kältebrücken an der Decke und den Türen erscheinen dunkel, Wärmequellen, wie z.B. der Heizkörper, hingegen hell.

wurde oder tatsächlich die komplette Fassade mit einer Außendämmsschicht verkleidet werden sollte.

#### 4.3 Stereophotogrammetrie

Die Stereophotogrammetrie (Pulfrich 1902) ist eine spezielle Art der Bildmessung (Meydenbauer 1867), bei der mindestens zwei fest zueinander verbaute Kameras verwendet werden (»stereos« Griechisch für »fest«). Durch den fixen und bekannten Abstand beider Kameras zueinander können 3D-Koordinaten errechnet werden. Bei der hier verwendeten Stereophotogrammetrie kommt dagegen nur eine Kamera zum Einsatz, die jedoch für eine zweite Aufnahme um eine bekannte Strecke versetzt werden muss. Die beiden fest zueinander verbauten Kameras werden hier quasi nur simuliert. Ein Nachteil ist, dass die Genauigkeit der Bildmessung davon abhängt, wie exakt der Versatz beider Aufnahmen zueinander reproduziert werden kann. Der Vorteil hingegen ist, dass man nur eine Kamera benötigt und somit keine zwei verschiedenen Kameraparameter vorhanden sein können.

Für die Messung wird ein spezielles, höhenverstellbares Stativ verwendet und mit dem piXplorer 500 ein zweites Panorama aufgenommen (Abb. 5). Die Aufnahme findet am selben Standort wie die des ersten Panoramabildes statt, jedoch 60 cm höher. Mit der Software »View n Measure« von CLAUSS ist anschließend eine Bildmessung möglich: Hierfür werden beide Panoramen in die Software geladen und die Information hinzugefügt, dass sich das zweite Panorama 60 cm über dem ersten befindet. Der Nutzer muss anschließend in beiden Panoramen identische Objektpunkte auswählen, die Software kann daraufhin 3D-Koordinaten kalkulieren und schließlich Strecken ausgeben. Das Verfahren befindet sich aktuell noch im Betatest, ist jedoch mit gewissen Genauigkeitseinschränkungen bereits nutzbar.

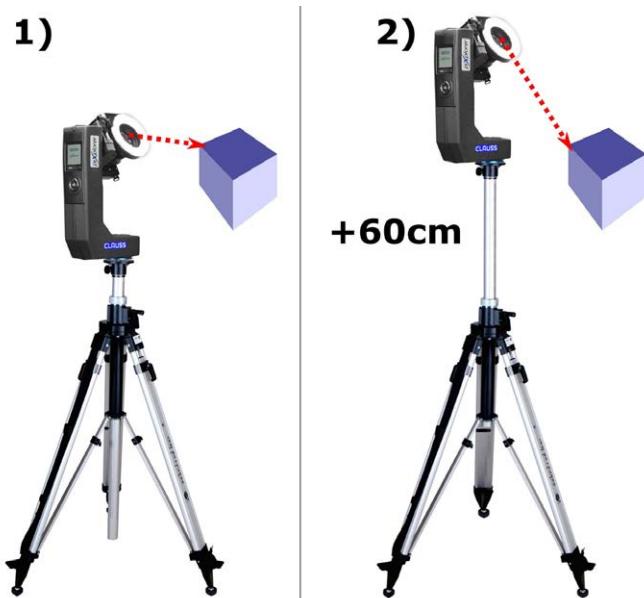


Abb. 5: Für die stereophotogrammetrische Vermessung findet eine zweite Aufnahme zwar vom selben Standpunkt aus statt, jedoch um 60 cm erhöht. Dadurch verändert sich der Blickwinkel auf das Objekt. Mit der Software »View n Measure« kann nun eine Bildmessung durchgeführt werden, indem der Nutzer angibt, dass sich Aufnahme 1) 60 cm unterhalb von Aufnahme 2) befindet, und anschließend in beiden Panoramen identische Merkmale anwählt, wodurch 3D-Koordinaten erzeugt werden.

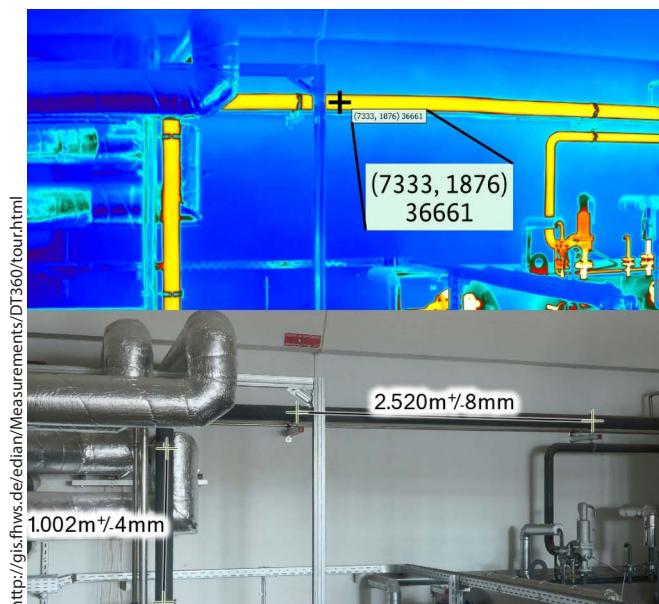


Abb. 6: Im Thermografiepanorama kann die Oberflächentemperatur ( $366,61\text{ }^{\circ}\text{C} = 93,64\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pixelgenau (7333 Pixel von links, 1876 Pixel von oben) ausgelesen werden. In der Software CLAUSS »View n Measure« werden die 3D-Koordinaten gesetzt und anschließend die Maße der Objekte extrahiert. Dadurch lässt sich der Energieverlust in kW/h berechnen; multipliziert man diesen wiederum mit den Kosten der Primärenergieträger, ist der Energieverlust in Euro pro Jahr kalkulierbar. Der obere Bildausschnitt ist aus FLIR ResearchIR MAX entnommen, der untere aus CLAUSS »View n Measure«.

#### 4.4 Kombinierte Aufnahmen

Für die Kombination von RGB- und Thermografieaufnahmen (Abb. 6) wird zuerst ein Panorama mit dem piXplorer 500 aufgenommen, anschließend mit dem ThermoHead. Da beide Instrumente auf dem Panoramakopf »piXplorer« basieren, haben sie den exakt gleichen Blickwinkel, weshalb die beiden  $360^\circ \times 180^\circ$ -Panoramen deckungsgleich übereinandergelegt werden können. Mit dem Programm »KR Pano« können die Aufnahmen so kombiniert werden, dass man z. B. im Thermografiepanorama einen Wärmeverlust anvisieren und dann auf das RGB-Panorama umschalten kann, ohne die Position zu verlieren. Dadurch ist eine sehr einfache und zuverlässige Identifikation von Energieverlusten möglich (Panorama-wechsel mit »>><<«).

#### 4.5 Kalkulation von Energieverlusten

Um die identifizierten Energieverluste schließlich wirtschaftlich beziffern zu können, wird die Thermografieaufnahme mit der Stereophotogrammetrie kombiniert. Die Energiekosten setzen sich aus der Temperatur des Bauteils relativ zur Umgebung, der Abstrahloberfläche sowie den Kosten für die Energie zusammen (Abb. 7). Ist nämlich einer dieser drei Werte null, dann sind die Energiekosten folglich ebenfalls null. Hierfür wird ein Thermografiepanorama des Bauteils mit dem ThermoHead aufgenommen und daraus die Temperatur mit einer professionellen Thermografiesoftware ausgelesen. Man kann jedoch auch das Thermografiebild in einer gewöhnlichen Bildbearbeitungssoftware öffnen, den Graustufenwert an jedem Pixel individuell auslesen und von  $^{\circ}\text{K}$  in  $^{\circ}\text{C}$  umrechnen. Für die

Component/Location Uninsulated pipe	Annual consumption
Length (m) 3	120C current situation
Diameter (mm) 120	28C economic insulation
Surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) 90	
Ambient temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) 30	
Energy price (€/kWh) 0.03	Annual saving 93C

Abb. 7: Mit dem neuen Verfahren sind erstmals vollständig digitale Energie- und ISO 50001-Audits möglich. Nach der Vermessung wird die Oberflächentemperatur aus dem Thermografiepanorama ausgelesen und die Maße der verlustbehafteten Bauteile via Stereophotogrammetrie bestimmt. Diese Werte ergeben zusammen mit den Kosten der Primärenergie und der Laufzeit den Energieverlust. Das Resultat ist eine komplett Analyse des Einsparpotenzials sowie der Kostenersparnis im Falle einer Dämmung (hier kalkuliert mit der kostenlosen TBI-App der EiF (TBI 2021)).

Abstrahloberfläche werden mittels Stereophotogrammetrie die Maße aus dem Bild extrahiert, die Energiekosten vom Anlagenbetreiber erfragt.

#### 4.6 3D-Thermografie

Für noch genauere Messergebnisse wird das Thermografiepanorama mit einer maßhaltigen 3D-Punktwolke kombiniert (Abb. 8). Hierdurch können Strecken, Flächen und Winkel um ein Vielfaches genauer ausgelesen werden, als es mit der Stereophotogrammetrie möglich ist (Fiedler et al. 2019). Wie bereits gezeigt werden konnte, sind so erstellte 3D-Punktwolken geeignet, um BIM-Datensätze anzufertigen (Hochreiner 2018). Erweitert man die 3D-Punktwolken mit der Thermografieinformation der Oberfläche, könnten auch diese Informationen in das BIM mit einfließen.



Abb. 8: Browsergestützte 3D-Thermografieaufnahme, in der direkt Messungen (Strecken, Winkel, Flächen etc.) möglich sind. Die Oberfläche kann als RGB, Thermografie oder Laserreflexionsintensität eingefärbt werden. Mit den 3D-Thermografiedaten können auch BIM-Datensätze erstellt sowie die elektrische Leitfähigkeit der Oberfläche berührungslos bestimmt werden.

Zusätzlich wird bei den so erstellten 3D-Thermografiedaten ein neues Verfahren möglich, mit dem sich die elektrische Leitfähigkeit der Oberfläche bestimmen lässt (Fiedler et al. 2020b). Dieses Verfahren macht es sich zu nutzen, dass der Blickwinkel des ThermoHead exakt identisch mit einem beliebigen terrestrischen 3D-Laserscanner eingestellt werden kann. Anschließend findet eine Objektrekonstruktion über den 3D-Datensatz statt, der die Verteilung der Oberflächentemperatur enthält. Nun sind alle Aufnahmewinkel in der Thermografie bekannt. Da sich die Emission bei hohen Winkeln stark zwischen elektrischen Leitern und Nichtleitern unterscheidet, kann nun ein Rückschluss auf die Leitfähigkeit der Oberfläche erfolgen. Dies hilft zudem, den Emissionskoeffizienten genauer zu bestimmen, der sich speziell zwischen Leitern und Nichtleitern stark unterscheidet.

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wird ein neuartiges Mess- und Datenverarbeitungssystem vorgestellt, mit dem Digitalisierungen für Dokumentationen sowie Vermessungen im sichtbaren und infrarotthermografischen Spektralbereich per Knopfdruck möglich sind. Das System wurde schon erfolgreich in Feldversuchen getestet. Folgende Verfahren sind realisierbar (siehe Kap. 4):

- Panoramaaufnahmen per 1-Klick-Lösung: RGB für z.B. Inventarisierungen, Dokumentationen von Baufortschritten oder Planung von Umbaumaßnahmen. Energetisch zur Anfertigung von Energieaudits, ISO 50001-Zertifikaten oder Energieausweisen. Überprüfung auf Baumängel und -schäden oder zur Planung von Dämmmaßnahmen.
- Geometrische kalibrierte Panoramen zur Kombination untereinander oder mit maßhaltigen 3D-Punktwolken. Exakte Wiedergabe der Objektgeometrie.
- Bildvermessung mittels Stereophotogrammetrie. Kosten günstiges und schnelles Verfahren zur Überprüfung von Baufortschritten auf Einhaltung der Maße, zur Planung von Renovierungen oder Umnutzungen.
- Thermografieaufnahmen von höchster Qualität; geometrisch kalibriert, in vollständiger Radiometrie sowie kombinierbar (25 Megapixel Thermografie mit 500 Megapixel RGB).
- 3D-Thermografie für BIM (Building Information Modeling) mit exakter Wiedergabe von Strecken, Flächen und Winkeln. Zusätzlich können Emissionskoeffizienten und elektrische Leitfähigkeit der Oberfläche berührungslos bestimmt werden.
- Automatische Generierung der Panoramen und Onlinedarstellung im Browser ohne Drittsoftware.

Das System soll hauptsächlich dazu verwendet werden, die Digitalisierung, die Erhöhung der Energieeffizienz und somit den Umweltschutz zu fördern. In einem Feldversuch bei der NIPRO PharmaPackaging GmbH in Münnerstadt konnte erfolgreich gezeigt werden (Fiedler und Görtler 2020), dass so angefertigte Aufnahmen für Energieaudits und ISO 50001-Zertifizierungen verwendbar sind. Hierbei wurde zuerst die Anlage digitalisiert und anschließend anhand der Aufnahmen ein virtuelles Energieaudit (TIP-CHECK via kostenloser TBI-App) durchgeführt. Die dabei identifizierten Einsparpotenziale wurden bereits umgesetzt.

Im weiteren Verlauf ist geplant, das System flächendeckend einzusetzen und so den Umweltschutz signifikant voranzutreiben. Zum aktuellen Zeitpunkt befindet sich das System in einem Stadium, indem es bereits eingesetzt werden kann. Die Arbeiten sollen jedoch bis Mitte/Ende 2021 abgeschlossen sein.

Diverse Weiterentwicklungen und Adaptionen sind in Planung (Pistolengriff für den mobilen Einsatz, Wechsel der Linse für höhere Auflösungen), die auch jetzt schon möglich sind, jedoch noch nicht zum Standardrepertoire

gehören. Ebenfalls wird aktuell daran gearbeitet, sämtliche Messungen (RGB und Thermografie) mit der Software CLAUSS »View n Measure« auswerten zu können.

Der modulare Einsatz beider Instrumente sowie die Kombinationsfähigkeit mit anderen maßhaftig bildgebenden Messinstrumenten eröffnen eine große Bandbreite neuer Möglichkeiten.

### Danksagung

Vielen Dank an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF-Projekt »eDIan«, Förderkennzeichen 03FH021PX5) sowie an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW-ZIM-Projekt »ThermoHead«, Förderkennzeichen ZF4662502JA9) für die finanzielle Unterstützung unserer Forschung.

Danke an den Lehrstuhl Geo (Geovisualisierung und Vermessung) der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt (FHWS) für die Unterstützung mit Messinstrumenten und Laborräumen.

### Literatur

- Clauss (2021): Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH. <https://dr-clauss.de>.
- Clauß, R. (2011): Universelles Kamerakalibriersystem mit zentraler Zielmarke. In: Luhmann/Müller (Hrsg.): Photogrammetrie – Laser-scanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011, Wichmann, Berlin/Offenbach; 179 ff. [www.dgpf.de/pfg/2011/Heft\\_3.pdf](http://www.dgpf.de/pfg/2011/Heft_3.pdf).
- EiiF – European Industrial Insulation Foundation (2021): [www.eiif.org](http://www.eiif.org).
- Fiedler, S., Grümpel, P., Karl, G., Knoblach, S. (2019): 3D-Punktwolke mit thermografischer Information. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2019, 144. Jg. DOI: 10.12902/zfv-0247-2018.
- Fiedler, S., Clauß, R., Knoblach, S. (2020a): Geometrically Corrected 50 Megapixel Thermal Imaging with Full Radiometric Information. In: PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, Vol. 88, 509–518. DOI: 10.1007/s41064-020-00126-9.
- Fiedler, S., Clauß, R., Clauß, H., Knoblach, S. (2020b): Approximation of the emission coefficient for thermography by the combination of geometrical and spectral information – ThermoHead, Cornell University. <https://arxiv.org/abs/2012.11332>.
- Fiedler, S., Clauß, R., Clauß, H., Knoblach, S. (2021): 25 Megapixel Thermografieaufnahmen – Projekt »ThermoHead«. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 1/2021, 146. Jg. DOI: 10.12902/zfv-0335-2020.
- Fiedler, S., Gürtler, A. (2020): Thermografie – Ermittlung von Energieeinsparung. In: MB Media Isolierer.net – Fachmagazin für Isolierer und Fachplaner. [www.isolierer.net/thermografie-ermittlung-von-energieeinsparung](http://www.isolierer.net/thermografie-ermittlung-von-energieeinsparung).
- FLIR (2015): ResearchIR 4 – User's Guide (AGC Algothm, page 24). [https://assets.tequipment.net/assets/1/26/FLIR\\_ResearchIR\\_User\\_Manual.pdf](https://assets.tequipment.net/assets/1/26/FLIR_ResearchIR_User_Manual.pdf).
- Gabrhel, J. (2018): Ein perfekt zusammengestelltes Panorama? Der Nodalpunkt wird Ihnen helfen. <https://lernen.zoner.de/panorama-der-nodalpunkt-wird-ihnen-helfen/>.
- Grümpel, P., Karl, G. (2017): Identifikation und Lokalisation energetischer Verluste in Industrieanlagen durch die Kombination thermografischer und geometrischer Informationen. Masterthesis. [https://geo.fhws.de/fileadmin/FKV/v/laboratorien/ingenieurvermessung/eDIan/Masterthesis\\_eDIan.pdf](https://geo.fhws.de/fileadmin/FKV/v/laboratorien/ingenieurvermessung/eDIan/Masterthesis_eDIan.pdf).
- Hochreiner, K. (2018): Building Information Modeling – Absteckung, Modellierung und Aufnahme einer Industriehalle. Masterthesis. [https://geo.fhws.de/fileadmin/FKV/v/laboratorien/ingenieurvermessung/eDIan/Masterarbeit\\_BIM\\_Hochreiner.pdf](https://geo.fhws.de/fileadmin/FKV/v/laboratorien/ingenieurvermessung/eDIan/Masterarbeit_BIM_Hochreiner.pdf).
- Meydenbauer, A. (1867): Die Photogrammetrie. Wochenblatt des Architektenvereins zu Berlin. Jg. 1, Nr. 49, 471–472. <https://opus4.kobv.de/opus4-btu/files/784/db186749.pdf>.
- Micro-Epsilon (2018): Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung. <https://www.micro-epsilon.de/download/products/dati-infrarot-grundlagen--de.pdf>.
- Pulfrich, C. (1901): Über einen für metronomische und andere Zwecke bestimmten stereoskopischen Komparator! Naturwissenschaftliche Abtheilung: Bericht aus den naturwissenschaftlichen Abtheilungen der 73. Versammlung deutscher Naturforscher und Aerzte in Hamburg. Naturwissenschaftliche Rundschau. XVI Nr. 46. <http://www.astropa.inaf.it/wp-content/uploads/2018/01/Zeiss1903.pdf>.
- TBI (2021): Free Insulation Self-Inspection & Reporting Tool. [www.eiif.org/tbi](http://www.eiif.org/tbi).

Zugriff auf Onlinequellen: 14.07.2021

### Kontakt

Dr. Sebastian Fiedler  
[sebastian.fiedler@fhws.de](mailto:sebastian.fiedler@fhws.de)

Andreas Gürtler  
[andreas.guertler@eiif.org](mailto:andreas.guertler@eiif.org)

Prof. Stefan Knoblach  
[stefan.knoblach@fhws.de](mailto:stefan.knoblach@fhws.de)

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter [www.geodaezie.info](http://www.geodaezie.info).