

# 25 Megapixel Thermografieaufnahmen – Projekt »ThermoHead«

## 25 Megapixel Thermal Imaging – Project »ThermoHead«

Sebastian Fiedler | Roland Clauß | Hartmut Clauß | Stefan Knoblauch

### Zusammenfassung

Die Thermografie ist ein Messverfahren mit einem breiten Anwendungsspektrum. In der Bauphysik können Wärme- und Kältelecks sowie Baumängel und Schäden aufgespürt werden. Die zerstörungsfreie Materialprüfung erlaubt die Qualität eines Bauteils im Inneren zu analysieren, ohne das Bauteil dafür öffnen oder zerlegen zu müssen. Aktuell werden mobile Thermografiekameras mit bis zu  $1024 \times 768$  Pixeln angeboten; durch eine Verschiebung des Sensors während der Messung sind Aufnahmen von 3,1 Megapixeln möglich. Da der Preis hauptsächlich mit der Auflösung skaliert, kosten diese High-End-Produkte bereits ca. 40.000 Euro. Aufgrund der hohen Kosten sowie der schwierigen Herstellung fehlerfreier Sensoren in dieser Größe, ist nicht davon auszugehen, dass in absehbarer Zeit Thermografiekameras mit signifikant höheren Auflösungen angeboten werden können.

In diesem Beitrag wird ein neues Messinstrument vorgestellt, das Thermografieaufnahmen mit 25 Megapixeln ermöglicht. Hierfür wird in einem Forschungsprojekt der »ThermoHead« entwickelt, ein Instrument, das mittels segmentierter Bildaufnahme die Auflösungsgrenze gewöhnlicher Thermografiekameras umgeht. Die so angefertigten Aufnahmen sind geometrisch kalibriert und liegen in vollständiger Radiometrie vor, was auch eine Weiterverarbeitung in spezieller Thermografie-Software erlaubt.

Der ThermoHead kann mit anderen Instrumenten für Panoramaaufnahmen kombiniert werden, um z.B. durch die Überlagerung mit hochauflösenden RGB-Aufnahmen die Dateninterpretation zu verbessern. Wird dieser mit handelsüblichen terrestrischen 3D-Laserscannern kombiniert, können den Thermografieaufnahmen sogar Dimensionen, Abstände und Winkel zugeordnet werden.

**Schlüsselwörter:** Geometrisch kalibrierte Thermografieaufnahmen, Thermografiepanorama, 25 Megapixel Thermografie, kombinierbar mit RGB

### Summary

*Thermography is a method with a broad variety of application. In building physics it is possible to detect heat or cold losses as well as failures and damages. The destruction-free material analysis allows to check the inner quality of an object without opening or disassembling it. Presently, mobile thermography cameras with  $1024 \times 768$  pixels are offered. Due to a sensor motion during the measurement, recordings up to 3.1 megapixels are possible. These high-end-products already cost ca. 40,000 Euros, the price is mainly driven by the resolution. Due to these high prices and*

*the difficult manufacturing process of error-free sensors of this size it is not likely to offer thermography cameras with higher resolutions in the near future.*

*In this abstract a novel measuring device is presented, which allows thermal resolutions with 25 megapixels. Therefore, in a research project the »ThermoHead« is developed, a device, which bypasses this resolution limit via segmented imaging. Additionally these so recorded images are geometrically calibrated and obtain the complete radiometry, so they can be further processed in special software, too.*

*The ThermoHead can be combined with any device for panorama imaging, to e.g. use high-resolution RGB-images to improve data interpretation. If combined with commercially used terrestrial 3D-laser-scanners, thermal images can be provided with dimensions, distances and angles.*

**Keywords:** *geometrically calibrated thermographic images, thermal imaging panorama, 25 megapixel thermography, combination with RGB*

### 1 Einleitung

Thermografieaufnahmen finden mittlerweile in einer Vielzahl von verschiedenen Bereichen statt. Am gängigsten ist die Identifikation von Wärme- und Kälteverlusten an Gebäuden sowie die Auffindung von Baumängeln oder Schäden (Dittié 2015). In der Bauphysik können so z.B. undichte Fenster und Türen aufgespürt werden, Kältebrücken innerhalb eines Mauerwerks, aber auch die Einlagerung von Feuchtigkeit oder Schäden an Dämmungen sind durch thermografische Messungen auffindbar. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die energetische Inventarisierung von energieintensiven Industriezweigen (eDIan 2019). Hier besteht die Möglichkeit, eine terrestrische 3D-Lasermessung durch Thermografieaufnahmen zu erweitern, um Energieverluste aufzuspüren und zu beurteilen. In der zerstörungsfreien Materialprüfung (IZPF 2020) oder der Qualitätssicherung (IPA 2018) werden Werkstücke und Bauteile im Inneren überprüft, ohne diese dafür öffnen oder zerlegen zu müssen. Einschlüsse oder Sprünge im Bauteil verursachen eine unregelmäßige Wärmeverteilung, die in der Thermografie sichtbar wird. Alle diese Anwendungsbeispiele haben eine Gemeinsamkeit: Sie hängen maßgeblich von der Auflösung und Qualität des thermografischen Messsystems ab.

Aktuell werden Thermografiekameras mit einer Sensorauflösung von bis zu  $1024 \times 768$  Pixeln angeboten (T1020 2020). Um die Auflösung zu erhöhen, bieten einige Hersteller Systeme an, bei denen der Bildsensor während der Messung verschoben wird. Hierdurch sind Auflösungen von bis zu 3,1 Megapixel möglich. Um die Auflösung von Thermografiekameras weiter steigern zu können, wären demnach Sensoren mit mehr Pixeln nötig. Die Kosten für thermografische Messsysteme werden jedoch hauptsächlich durch den verbauten Sensor verursacht, wobei die derzeit angebotenen Kameras bereits ca. 40.000 Euro kosten (TOPA 2020). Da größere Sensoren mit mehr Pixeln zudem schwieriger herzustellen sind, steigt der Preis dementsprechend mit der Auflösung.

In diesem Beitrag wird ein neuartiges Messinstrument vorgestellt, mit dem Thermografieaufnahmen mit Auflösungen möglich sind, die weit über dem aktuellen Stand der Technik liegen. Der ThermoHead ist eine auf der Panoramafotografie basierende eigenständige Gerätekombination, die durch die segmentierte Bildaufnahme ein Objekt in mehrere Detailaufnahmen zerlegt und anschließend zu einem Gesamtbild zusammenfügt (Stitching). Vor dem Stitchen werden die Einzelaufnahmen zudem geometrisch kalibriert, um eine fehlerfreie Kombination an den Schnittkanten garantieren zu können. Ein weiterer Vorteile der hier durchgeführten Kalibrierung ist, dass im Anschluss auch das erhaltene Gesamtbild verzeichnungsfrei vorliegt, was eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten erlaubt. Das AusgabefORMAT beinhaltet die vollständige radiometrische Messung und kann daher zudem in spezieller Thermografiesoftware weiterverarbeitet werden, was z. B. die Anpassung des Emissionskoeffizienten ermöglicht sowie die Änderung der Temperaturskala oder des Temperaturbereiches.

Die in diesem Beitrag gezeigten Messungen sind mit dem Prototyp des ThermoHead 25 entstanden (Abb. 1 rechts). Nach dem Projekt sind kommerzielle Messsysteme geplant, bei denen die Messdaten ebenfalls in vollständiger Radiometrie vorliegen, jedoch mit einer Auflösung von bis zu 100 Megapixeln.

## 2 Bildsegmentierung

Die Art, wie in der Thermografie momentan Aufnahmen angefertigt werden, ist vergleichbar mit klassischer Fotografie: Ein Objekt wird, z. B. mit einer mobilen Kamera, möglichst formatfüllend abgebildet. Hierbei gibt die Auflösung des Sensors die Auflösung der Abbildung vor. Zwar gibt es bereits vereinzelt Hersteller, die Thermografiekameras mit  $1920 \times 1200$  Pixeln (Sierra 2020) bzw.  $1280 \times 1024$  Pixeln entwickeln bzw. anbieten, aber selbst bei diesen Systemen liegt die maximale Auflösung derzeit bei 5,2 Megapixeln (Infratec 2020). Gängige Systeme mit 3,1 Megapixeln (T1020 2020) kosten bereits mehrere zehntausend Euro (TOPA 2020).

Da auch in der Fotografie die Auflösung der verwendeten Kameras endlich ist, hat sich z. B. in der Panoramafoto-



Abb. 1: Links piXplorer 500 und rechts der Prototyp des ThermoHead 25. Beide Systeme nehmen per Knopfdruck vollständige  $360^\circ \times 180^\circ$ -Panoramen innerhalb von 5 Minuten auf. Der piXplorer 500 erstellt ein RGB-Panorama mit 500 Megapixeln Auflösung, der ThermoHead ein 25 Megapixel-Thermografiepanorama. Durch die geometrische Kalibrierung der Kameras sind beide Panoramen verzeichnungsfrei.

grafie die Bildsegmentierung etabliert, um die Auflösung weiter erhöhen zu können (Gigapixel-Fotografie (Clauss 2012)). Hierfür wird auf einem Stativ ein Panoramakopf befestigt, der wiederum eine RGB-Kamera trägt. Bei dem Panoramakopf handelt es sich um einen Nodalpunktadapter, der eine Kamera um ihr Abbildungszentrum sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung schwenkt. Dadurch können  $360^\circ \times 180^\circ$ -Panoramen aufgenommen werden, ohne dass die Bilder parallaktisch verzeichnet sind. Der Nodalpunktadapter rotiert die Kamera auf zuvor festgelegte Winkel und nimmt automatisch Bilder auf (Clauss 2014).

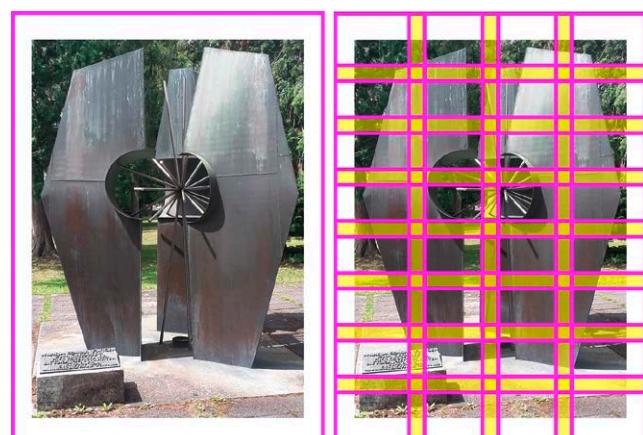


Abb. 2: Objekt abgebildet als formatfüllendes Foto (links) und segmentiert aufgenommen (rechts). Die jeweilige Auflösung des Bildsensors ist als lila Rahmen dargestellt. Bei der Bildsegmentierung werden Kameras mit höheren Brennweiten verwendet und vom Objekt mehrere Teilbereiche fotografiert. Gelb markiert ist der Bereich des Bildüberlapps, an dem die einzelnen Aufnahmen zusammengefügt werden (Stitching). Das so erstellte Bild weist eine höhere Auflösung auf, als es der Bildsensor der Kamera ermöglicht.

In Abb. 2 wird das Verfahren veranschaulicht: Bei der Fotografie wird ein Objekt möglichst formatfüllend aufgenommen, die Auflösungsgrenze ist hierbei durch den verbauten Bildsensor vorgegeben. Bei der segmentierten Bildaufnahme wird ein Objektiv mit größerer Brennweite verwendet, um mit der Sensorauflösung nur noch einen Teilbereich des Objekts aufzunehmen. Die Auflösung wird also durch eine Kombination aus Bildsensor und Objektivbrennweite vorgegeben.

Bilder können z. B. freihändig mit einer beliebigen Kamera aufgenommen und anschließend mit einer geeigneten Software gestitched werden (z. B. PTGUI 2020). Das Stitchen findet meist auf Pixelebene statt. Hierbei hängt die Qualität jedoch auch erheblich von der Art ab, wie die Aufnahmen durchgeführt werden. Durch die Verwendung eines Panoramakopfs ist gewährleistet, dass sich die Kamera um den Nodalpunkt dreht und somit die Aufnahmen nicht parallaktisch verzeichnet sind (Gabrhel 2018).

### 3 Kalibrierung und Stitchen

Die geometrische Kalibrierung von Einzelbildern und das Stitchen zu einem Panorama ist von RGB auf Thermografie übertragbar (Luhmann et al. 2013, Schneider und Maas 2005, Hoegner und Stilla 2015) und wurde ebenfalls für dieses Verfahren getestet (Grümpel und Karl 2017). Für qualitativ hochwertige und verzeichnungsfreie Aufnahmen ist jedoch zusätzlich die Berücksichtigung des Nodalpunkts und das Stitchen auf Subpixelebene nötig (Clauss 2014).

CLAUSS hat ein Verfahren entwickelt, mit dem die Kameraparameter des piXplorer 500 über die Methode des virtuellen Passpunktfeldes ermittelt werden (Clauss 2011). Hierfür wird eine runde Scheibe mit ausreichendem Kontrast auf einem homogenen Hintergrund angebracht. Der Panoramakopf, der die Kamera trägt, ist so konfiguriert, dass das Target auf jedem Teil des Bildsensors mindestens einmal abgelichtet wird. Dafür sind je nach Fokus der Kamera verschiedene Targetgrößen nötig. Mit dieser Methode wird auch der ThermoHead kalibriert, wobei über 1000 Einzelaufnahmen (Stützstellen) aufgenommen werden. Anschließend errechnet eine von CLAUSS entwickelte Kalibriersoftware aus den Parametern Sensorgröße, Anzahl an Pixeln, horizontale und vertikale Anzahl an Stützstellen, Aufnahmereihenfolge und Panoramakopfposition die Kameraparameter. Mit den Kameraparametern lassen sich die Einzelaufnahmen geometrisch kalibrieren (entzerren), wodurch das fehlerfreie Stitchen möglich wird. Die Kalibrierung muss für jede Kamera-Objektiv-Kombination und teilweise jeden eingestellten Fokus durchgeführt werden.

In Abb. 3 sind zwei Einzelbilder gezeigt, die der Thermo Head aufnimmt sowie ein Ausschnitt aus dem daraus zusammengefügten Panorama. Bei dem vorliegenden Beispiel handelt es sich um eine Lüftungsanlage in etwa 6 m Höhe. Durch die Rotation des Panoramakopfs um beide Achsen ändert sich der Blickwinkel und somit die relative Position der Einzelaufnahmen zueinander, wie in den

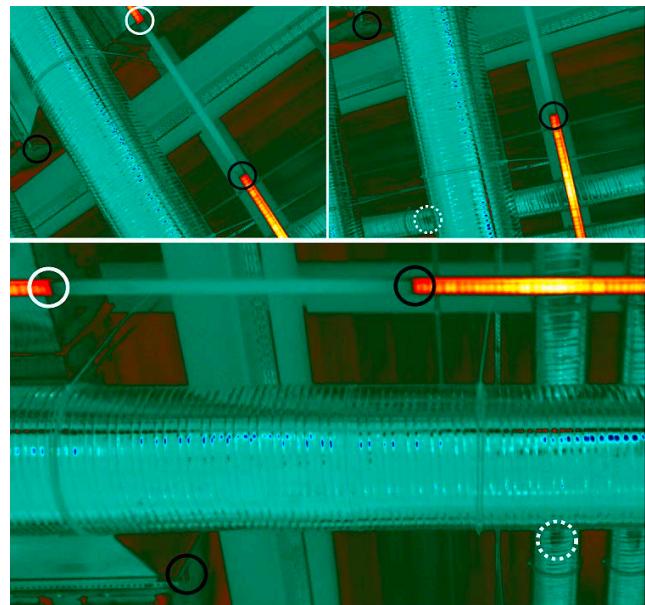


Abb. 3: Einzelaufnahmen einer Lüftungsanlage in etwa 6 m Höhe als Rohdaten (oben) und entsprechender Ausschnitt aus dem Thermografiepanorama (unten). Markiert sind Bereiche, die in beiden Aufnahmen vorkommen (schwarz) und solche, die nur in jeweils einer Aufnahme zu sehen sind (weiß). Durch die geometrische Kalibrierung und das Stitchen fügen sich die Einzelbilder nahtlos zusammen (Aufnahmestandort: va-Q-tec AG Würzburg).

beiden kleinen Bildausschnitten oben erkennbar ist. Dort wurden markante Stellen, die in beiden Einzelaufnahmen vorkommen, schwarz markiert und solche, die nur in jeweils einem Bild vorliegen, weiß.

Zuerst werden die Einzelaufnahmen durch die Kameraparameter automatisch geometrisch kalibriert, anschließend mit den im ThermoHead hinterlegten Aufnahmepositionen grob zueinander ausgerichtet und schließlich gestitched. Hierfür führt die von CLAUSS entwickelte Software eine Objekterkennung (Feature-basierend mit Punkten und Clustern) durch und fügt innerhalb des Überlappungsbereichs (Abb. 2 gelb markiert) identische Merkmale auf Pixel- und Subpixelebene zusammen.

Folgt man nun den Markierungen in Abb. 3, sind die Merkmale der jeweiligen Einzelaufnahmen wiederzufinden. Das daraus entstandene Panorama zeigt nahtlose Übergänge sowie eine homogene Intensitätsverteilung.

Neben der geometrischen Kalibrierung wird zudem eine radiometrische durchgeführt. Abb. 4 zeigt wiederum zwei Einzelaufnahmen (oben) sowie den korrespondierenden Panoramaausschnitt (unten). Werden Thermografieaufnahmen individuell verarbeitet, wird für jede Aufnahme ein eigener Temperaturbereich im Color-Code festgelegt, der die minimale und maximale Temperatur im Bild wiedergibt. Auf den ersten Blick erscheinen so die beiden Spezialtransportcontainer »va-Q-tainer« (va-Q-tec 2020) in Abb. 4 oben identisch. In der Legende rechts im Bild ist der Wertebereich hinterlegt; beim linken Container ist die niedrigste Temperatur mit  $-5,1^{\circ}\text{C}$  angegeben, während sie beim rechten Container  $-21,1^{\circ}\text{C}$  beträgt.

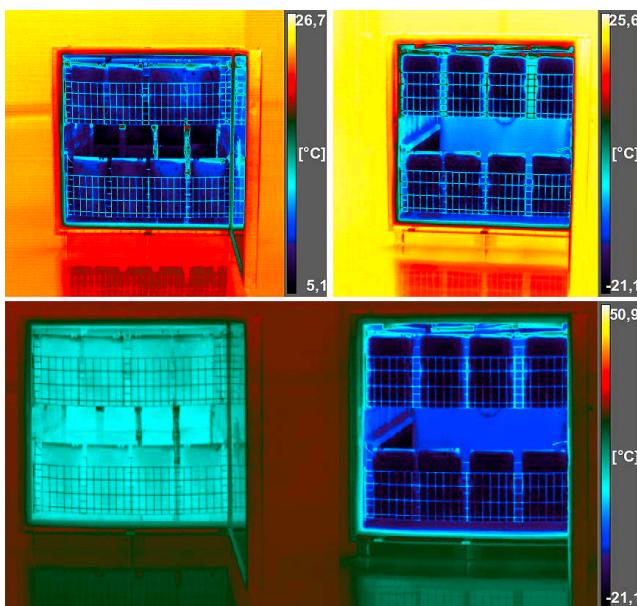


Abb. 4: Einzelaufnahmen der beiden va-Q-tainer in etwa 5 m Entfernung als Rohdaten (oben) und entsprechender Ausschnitt aus dem Thermografiepanorama (unten). Während die Einzelaufnahmen jeweils individuelle Temperaturbereiche anzeigen, wird für das Thermografiepanorama die komplette Radiometrie weiterverarbeitet, was in einer übergeordneten Temperaturskala resultiert, die alle aufgenommenen Objekte mit einbezieht (Aufnahmestandort: va-Q-tec AG Würzburg).

Im ThermoHead wird die Temperatur jeder Einzelaufnahme hingegen als radiometrischer Wert gespeichert und beim Stitchen des Thermografiepanoramas verlustfrei weiterverarbeitet. Hierdurch entsteht ein Panorama, bei dem die Temperaturbereiche jedes Objekts in einer übergeordneten Temperaturskala eingeordnet werden. Dadurch ist erkennbar, dass die beiden Container deutlich verschiedene Temperaturen aufweisen (Abb. 4 unten). Die Temperaturskala reicht nun von 50,9 °C bis -21,1 °C, was dem höchsten und niedrigsten Wert der gesamten Panoramamessung entspricht. Da hierbei keine Informationen verloren gehen, kann der Temperaturbereich wiederum individuell angepasst werden, wodurch auch der ursprüngliche Color-Code aus Abb. 4 wählbar ist.

#### 4 Datenverarbeitung

Die Erstellung des Thermografiepanoramas findet vollautomatisch statt. Der USB-Stick des ThermoHead wird entnommen und an einen PC angeschlossen, auf dem die Stitching-Software von CLAUSS installiert ist. Die Software erkennt den Stick und durchsucht ihn nach den Panoramafotos. Anschließend wird der Anwender gefragt, in welchem Ausgabeformat er das Panorama haben möchte, hierbei kann die Bilddatei sowie die Panoramagröße definiert werden. Kalibrierung und Stitching laufen anschließend automatisch durch.

Die Thermografiemessungen können als Bilddateien (JPG oder BMP) ausgegeben und mit einem beliebigen

Bildbearbeitungsprogramm betrachtet oder weiterverarbeitet werden. In der Software bleibt jedoch auch die vollständige Radiometrie der thermografischen Messung erhalten, wodurch die Ausgabe eines 16 Bit-Bildformats (TIF und PSB) möglich ist. Die Stitching-Software wurde so abgestimmt, dass z.B. das als PSB ausgegebene Thermografiepanorama in PhotoShop weiterverarbeitet werden kann. Das TIF-Thermografiepanorama kann sogar in geeigneter Thermografiesoftware (z.B. FLIR ResearchIR (RIR 2020)) vollständig eingebunden werden. Hierbei ist unter anderem die Anpassung des Color-Codes, des Temperaturbereichs, des Emissionskoeffizienten und anderer relevanter Parameter möglich. Die Temperatur wird hierbei in hundertstel Kelvin (0,01 K) ausgegeben und kann direkt abgelesen werden.

Das Datenformat des ThermoHead bietet weitere große Vorteile wie z.B. die Anwendung von Bildfiltern. In Abb. 5 ist die aus Abb. 3 bekannte Lüftungsanlage gezeigt, jedoch ein anderer Bildausschnitt. Dargestellt als das klassische lineare Temperaturprofil gehen die feinen Nuancen der Aufnahme nahezu vollständig verloren. Die FLIR ResearchIR MAX bietet hingegen drei zusätzliche Algorithmen, mit denen die Details bei kontrastarmen Bereichen deutlich hervorgehoben werden können:

- PE (Plateau Equalization): Nichtlinearer und histogrammbasierender Algorithmus. Der dargestellte Temperaturbereich wird auf den vorliegenden Wertebereich reduziert.
- APE (Advanced Plateau Equalization): FLIR-eigener Algorithmus für verbesserte Bilddarstellung, bei dem der Color-Code mehrfach überschnitten wird.
- DDE (Digital Detail Enhancement): FLIR-eigener Algorithmus, nutzt einen Gauß-Fit um über benachbarte Pixel die Kantenschärfe zu erhöhen.

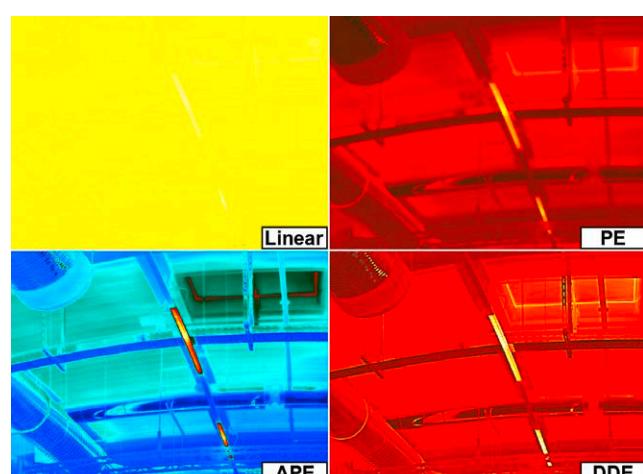


Abb. 5: Da beim ThermoHead die Radiometrie komplett erhalten bleibt, können Aufnahmen sowohl in normaler Bildbearbeitungssoftware als auch in spezieller Thermografiesoftware weiterverarbeitet werden. Durch Bildfilter ist so z.B. eine Verbesserung des Kontrasts und/oder der Bildschärfe möglich. Die vier Abbildungen zeigen den selben Bildausschnitt, der lediglich durch einen Algorithmus nachbearbeitet wurde (Aufnahmestandort: va-Q-tec AG Würzburg).

Bei der klassischen linearen Temperaturverteilung wird ein beliebiger Color-Code, wie hier z. B. FLIR 1234, verwendet und über den gesamten Wertebereich verteilt. Hierdurch sind Objekte mit geringem Kontrast beinahe nicht mehr erkennbar. In Abb. 5 (links oben) ist kaum etwas zu sehen, lediglich die Position der Leuchtstoffröhre kann als weißer Streifen erahnt werden. Der Wertebereich kann nun manuell so angepasst werden, dass das Objekt erkennbar wird, eine bessere Erkennbarkeit ist jedoch auch durch eine Änderung des Algorithmus möglich.

Wird die Plateau Equalization (PE) verwendet, reduziert die Software den Wertebereich des Color-Codes auf die individuell vorliegenden aufgenommenen Werte. Hierbei wird die Verteilung der radiometrischen Daten als Histogramm dargestellt und das Minimum bzw. Maximum der Werte innerhalb des Histogramms auf den Color-Code reduziert. Der Anwender erspart sich dadurch eine manuelle Anpassung des Wertebereichs und stellt sicher, nicht versehentlich Informationen wegzuschneiden.

Bei der Advanced Plateau Equalization (APE) handelt es sich um eine FLIR-eigene Weiterentwicklung der Plateau Equalization. Hierdurch kann die Sichtbarkeit weiter erhöht werden. Der Color-Code wird mehrfach überschritten, was zwar zu einer Wiederholung innerhalb des gesamten Wertebereichs führt, die lokale Sichtbarkeit jedoch deutlich verbessert.

Das Digital Detail Enhancement ist ebenfalls ein FLIR-eigener Algorithmus. Hierbei wird ein Gauß-Fit verwendet, um die Konturen von Objekten zu schärfen (Vollmer und Möllmann 2017): Das Programm nutzt somit benachbarte Pixel, um die Kantenschärfe zu erhöhen. Zusätzlich wird der Color-Code ebenfalls mittels Hysteresenanalyse auf den tatsächlich aufgenommenen Wertebereich reduziert (analog zur PE).

## 5 RGB-Kombination

Aktuelle Thermografiekameras bieten die Möglichkeit, die Thermografieaufnahmen mit RGB-Aufnahmen zu kombinieren. Hierdurch fällt es dem Betrachter leichter, das in der Thermografie aufgenommene Objekt identifizieren zu können. Die RGB-Aufnahmen haben nicht nur eine deutlich höhere Auflösung, durch die zusätzliche Aufnahme im sichtbaren Spektralbereich kann der Emissionskoeffizient der Oberfläche genauer bestimmt werden. Hierfür wird z. B. die Temperatur in der Thermografieaufnahme analysiert, anschließend in der RGB-Aufnahme das Objekt bzw. dessen Oberfläche identifiziert und ein passender Emissionskoeffizient aus einer entsprechenden Liste entnommen (Micro-Epsilon 2018). Multipliziert man nun die gemessene Temperatur mit dem richtigen Emissionskoeffizienten, erhält man die tatsächliche Oberflächentemperatur. Der ThermoHead kann problemlos mit anderen panoramabildgebenden Instrumenten kombiniert werden. Um die Thermografieaufnahmen z. B. mit RGB-Informationen

zu erweitern, kann nach der Messung ein Panorama mit einem geeigneten Panoramakopf aufgenommen werden. Hierfür wurde der CLAUSS piXplorer 500 (Abb. 1 links) verwendet.

Der Vorteil bei dieser Vorgehensweise ist, dass beide Systeme aufeinander abgestimmt sind, weshalb der Nutzer keine weiteren Einstellungen vornehmen muss. Während bei Thermografiekameras mit RGB-Funktion beide Aufnahmen von verschiedenen Bildhauptpunkten aus stattfinden, ermöglicht die sukzessive Aufnahme von RGB- und Thermografiepanorama durch piXplorer 500 und Thermo-Head Aufnahmen von exakt identischen Standpunkten aus. Da zudem beide Systeme geometrisch kalibriert sind, passen beide Panoramen absolut deckungsgleich übereinander. Beide Messungen lassen sich per Knopfdruck und sogar mittels Fernbedienung starten, um den Aufenthalt von Personen im Aufnahmebereich zu vermeiden.

In Abb. 6 ist oben eine RGB-Aufnahme und unten die dazugehörige Thermografieaufnahme gezeigt. In der RGB-Aufnahme ist erkennbar, dass die Kühlakkus in den jeweiligen va-Q-tainern farblich unterschiedlich markiert sind, wobei blau für 6 °C und weiß für -19 °C steht. In dem Thermografiepanorama gibt die Position des Cursors drei Werte aus; in der Klammer befindet sich die Position des ausgelesenen Pixels (6305 Pixel vom linken Bildrand und 2154 Pixel vom oberen Bildrand) sowie die Temperatur in hundertstel Kelvin (279,19 K, was 6 °C entspricht). Der rechte va-Q-tainer zeigt an der Position des Cursors (6776, 2174)

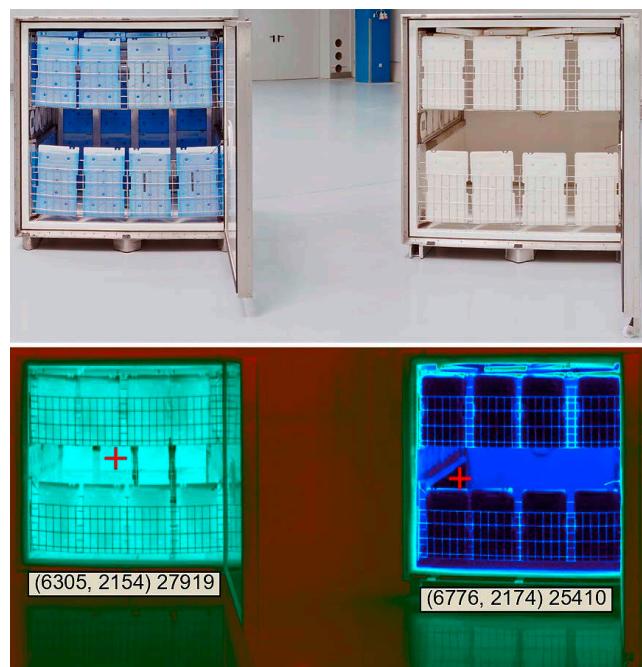


Abb. 6: va-Q-tainer bestückt mit Akkus für 6 °C (links, blau) und -19 °C (rechts, weiß). Da sowohl die Panoramen des piXplorer 500 (oben) als auch des ThermoHead (unten) beide geometrisch kalibriert werden, die Aufnahmen im Nodalpunkt stattfinden und die Höhen beider Instrumente gleich sind, ist eine lückenlose Kombination der RGB- und Thermografiedaten möglich (Aufnahmestandort: va-Q-tec AG Würzburg).

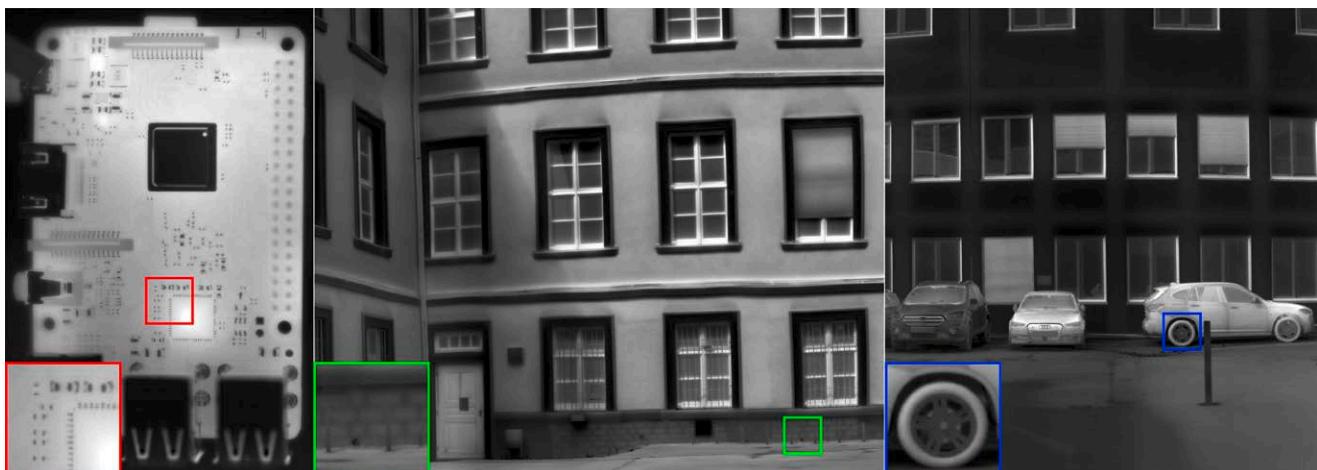


Abb. 7: Aufnahmen mit dem ThermoHead 100 Labormuster, der Fokus wurde auf den jeweiligen Objektabstand angepasst. Links die Aufnahme eines Mikrocomputers im Abstand von 20 cm; das Objekt ist ca.  $9\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  groß. Mittig wurde die Front der FHWS in einem Abstand von 20 m aufgenommen; unter dem Verputz sind die Backsteine erkennbar. Rechts ist die Gebäudefront der psychologischen Fakultät abgebildet; ebenfalls im Abstand von 20 m.

eine Temperatur von  $-19^\circ\text{C}$  (254,10 K). Die farbliche Markierung der Kühlakkus stimmt demnach mit der gemessenen Temperatur überein.

## 6 Überblick Leistungsdaten

Der Prototyp des aktuellen Projekts ermöglicht die Aufnahme eines 25 Megapixel-Thermografiepanoramas in vollständiger Radiometrie. Durch die geometrische Kalibrierung liegen die Aufnahmen verzeichnungsfrei vor und können daher beliebig mit anderen Systemen (z.B. terrestrischer 3D-Lasermessung oder RGB-Panoramen) kombiniert werden. Das System nimmt innerhalb von 5 Minuten ein komplettes  $360^\circ \times 180^\circ$ -Panorama auf, die Aufnahme findet per Knopfdruck (Ein-Klick-Lösung) statt. Die Kalibrierung der Einzelaufnahmen und das Stitchen zum Panorama erfolgt ebenfalls vollautomatisch am PC, der Nutzer kann zwischen verschiedenen Auflösungen und Ausgabeformaten wählen. Der Messbereich des Thermo Head kann in verschiedene Bereiche eingestellt werden und deckt somit einen Temperaturbereich von  $-20^\circ\text{C}$  bis  $900^\circ\text{C}$  bei einer Auflösung von mindestens 75 mK ab. Über ein OLED-Display kann die aktuelle Messsituation betrachtet werden; zudem sind auf dem Display alle relevanten Informationen einsehbar (Temperaturbereich, Akkulaufzeit, Nummer der Aufnahme etc.).

Im weiteren Projektverlauf ist eine Umfangreiche Anpassung des ThermoHead geplant, um das Messsystem flexibel für eine Vielzahl von verschiedenen Anwendungsbereichen einsetzen zu können. Neben der Aufnahme von 25 Megapixel-Panoramen für die Inventarisierung ist ein Instrument mit Weitwinkelobjektiv vorgesehen, mit dem Panoramen in zwar niedrigerer Auflösung, jedoch in einem Bruchteil der Zeit aufgenommen werden können.

Weiterhin ist ein System mit Teleobjektiv geplant, mit dem Panoramen mit 100 Megapixeln möglich sind. Da hier

die Aufnahmedauer deutlich steigt, ist dieses System in erster Linie nicht für vollständige Panoramen vorgesehen, jedoch um mittels segmentierter Bildaufnahme Bildausschnitte in sehr hoher Auflösung und Qualität anfertigen zu können. Ein Anwendungsbeispiel hierfür ist z.B. die Aufnahme von Objekten in größerer Entfernung oder mit einer sehr großen Ortsauflösung.

In Abb. 7 sind drei Thermografieaufnahmen gezeigt, die mit dem ThermoHead 100 Labormuster angefertigt wurden. Für den Mikrocomputer (links), der gerade mal ca.  $9\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  groß ist, wurde der Fokus auf 20 cm eingestellt. Für die Aufnahmen der beiden Gebäudefronten (FHWS mittig und psychologisches Institut rechts) wurde auf 20 m fokussiert. Jedes Thermografiebild ist aus 15 Einzelbildern zusammengerechnet und hat eine Auflösung von knapp 2 Megapixeln. Die Aufnahmedauer der hier gezeigten Bildausschnitte beträgt etwa 35 Sekunden. Wird ein komplettes Panorama erstellt, hat dies eine Auflösung von 100 Megapixeln.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wird ein neuartiges thermografisches Messsystem vorgestellt, das mittels segmentierter Bildaufnahme die Auflösungsgrenze gewöhnlicher Thermografiekameras umgeht. Der ThermoHead bietet hierbei:

- Geometrisch kalibrierte Thermografiepanoramen mit einer Auflösung von 25 Megapixeln, wodurch die Aufnahmen mit anderen Methoden (z.B. Panoramafotografie oder terrestrischer 3D-Lasermessung) kombinierbar sind.
- Radiometrische Kalibrierung, wodurch die Zuordnung einer übergeordneten Temperaturskala stattfindet.
- Weiterverarbeitung der vollständigen Radiometrie, was eine Nachbearbeitung in spezieller Thermografiesoftware erlaubt.

- Ausgabe als normales Bildformat (JPG oder BMP) oder aber als 16 Bit-Datenformat (PSB oder TIF).
- Ablesen der Temperaturen im Thermografiepanorama in hundertstel Kelvin (0,01 K).
- Ein-Klick-Aufnahme sowie Auswertung der Daten.

Der ThermoHead 25 kann innerhalb von 5 Minuten vollständige Panoramen aufnehmen, was z. B. zur Analyse von Bauwerken genutzt werden kann. Die optionale Kombination mit RGB-Daten und/oder 3D-Punktwolken erlaubt eine Aufwertung der Thermografiemessung und somit eine leichtere und genauere Interpretation der Messdaten. Hierbei sind noch zwei weitere Systeme denkbar:

Der ThermoHead 100 soll die Möglichkeit bieten, einzelne Objekte oder Bildausschnitte in hoher Auflösung thermografisch abilden zu können. Hierbei ist der Fokus des Systems sowie die Größe des Bildausschnittes frei wählbar, Objektabstände bis 30 m sind realisierbar. Auch vollständige Thermografiepanoramen mit einer Auflösung von 100 Megapixeln sind möglich.

Für spezielle Anwendungen ist ein ThermoHead »full« angestrebt, bei dem die Objektive getauscht werden können. Hierbei kann der erfahrene Kunde sowohl Auflösungen als auch Bildausschnitte individuell anpassen.

Beim derzeitigen Verlauf des Projekts »ThermoHead« ist eine kommerzielle Lösung ab Mitte 2021 geplant, der Preis soll deutlich unter dem liegen, was eine klassische 3,1 Megapixel Thermografiekamera kostet. Feldversuche werden derzeit von CLAUSS und der FHWS durchgeführt.

## Dank

Vielen Dank an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF Projekt »eDIan«, Förderkennzeichen 03FH021PX5) sowie das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi 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 (2012): Gigapixel-Fotografie. Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH. <https://dr-clauss.de/de/blog-3/gigapixel>.
- Clauss (2014): RODEON piXplorer 500. Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH. <https://pix500.net/>.
- Clauß, R. (2011): Universelles Kamerakalibriersystem mit zentraler Zielmarke. In: Luhmann/Müller (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage (2011). Wichmann, Berlin/Offenbach. S. 179. [www.dgpf.de/pfg/2011/Heft\\_3.pdf](http://dgpf.de/pfg/2011/Heft_3.pdf).
- Dittié, G. (2015): Bauwesen & Bauphysik. [www.thermografie.de/bauwesen.htm](http://www.thermografie.de/bauwesen.htm).
- eDIan (2016–2019): BMBF-Projekt zur »effizienten Dämmung von Industrieanlagen«. <https://gis.fhws.de/edian/>.

- FLIR (2015): ResearchIR 4 – User's Guide (AGC Algorithm 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).
- FLIR (2020): HD-Wärmebildkamera mit Sucher – FLIR T1020. [www.flir.de/products/t1020/](http://www.flir.de/products/t1020/).
- Fraunhofer-Allianz Vision (2018): Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP. [www.izfp.fraunhofer.de/de/technologien/portfolio/Thermographie.html](http://www.izfp.fraunhofer.de/de/technologien/portfolio/Thermographie.html).
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (2018): Qualitätssicherung mit Thermographie. [www.ipa.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/bild-und-signalverarbeitung/qualitaetssicherung-mit-thermographie.html](http://www.ipa.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/bild-und-signalverarbeitung/qualitaetssicherung-mit-thermographie.html).
- 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).
- Hoegner, L., Stilla, U. (2015): Building Facade Object Detection From Terrestrial Thermal Infrared Image Sequences Combining Different Views. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. II-3/W4. [www.researchgate.net/publication/273903177\\_Building\\_facade\\_object\\_detection\\_from\\_terrestrial\\_thermal\\_infrared\\_image\\_sequences\\_combining\\_different\\_views](http://www.researchgate.net/publication/273903177_Building_facade_object_detection_from_terrestrial_thermal_infrared_image_sequences_combining_different_views).
- InfraTec GmbH (2020): ImageIR 9400. [www.infratec.de/thermografie/waermebildkameras/imageir-9400/](http://www.infratec.de/thermografie/waermebildkameras/imageir-9400/).
- Luhmann, T., Peichel, J., Roelfs, T. (2013): Geometric Calibration of Thermographic Cameras. Springer, Dordrecht. Vol. 17. Print ISBN: 978-94-007-6638-9. DOI: 10.1007/978-94-007-6639-6\_2.
- Micro-Epsilon (2018): Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung. [www.micro-epsilon.de/download/products/dat-infrarot-grundlagen-de.pdf](http://www.micro-epsilon.de/download/products/dat-infrarot-grundlagen-de.pdf).
- PTGui (2020): Create high quality panoramas. [www.ptgui.com](http://www.ptgui.com).
- Schneider, D., Maas, H.-G. (2005): Combined bundle adjustment of panoramic and central perspective images. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 36. [www.researchgate.net/publication/237781959\\_2005\\_Combined\\_bundle\\_adjustment\\_of\\_panoramic\\_and\\_central\\_perspective\\_images](http://www.researchgate.net/publication/237781959_2005_Combined_bundle_adjustment_of_panoramic_and_central_perspective_images).
- Sierra-Olympic (2020): VAYU HD. <https://sierraolympic.com/thermal-imaging-articles/company-news/sierra-olympic-launches-1900x1200-vayu-hd/>.
- TOPA GmbH (2020): FLIR Wärmebildkamera T1020. [www.topa.de/flir-waermebildkamera-t1020/](http://www.topa.de/flir-waermebildkamera-t1020/).
- va-Q-tec AG (2020): va-Q-tainer. [https://va-q-tec.com/produkte/va-q-tainer/](http://va-q-tec.com/produkte/va-q-tainer/).
- Vollmer, M., Möllmann, K.-P. (2017): Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. Second Edition. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. [https://books.google.de/books?id=PY5FDwAAQBAJ&pg=PA312&lpg=PA312&dq=ResearchIR+averaging+signal+to+noise&source=bl&ots=-zbX2jQce2&sig=AcFu3U2VvhvNZRu-\\_1SV22KFJ94gLWg&hl=de&sa=X&ved=2ahUKEwiby7O3mZrqAhUI8KQKHZIpCegQ6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?id=PY5FDwAAQBAJ&pg=PA312&lpg=PA312&dq=ResearchIR+averaging+signal+to+noise&source=bl&ots=-zbX2jQce2&sig=AcFu3U2VvhvNZRu-_1SV22KFJ94gLWg&hl=de&sa=X&ved=2ahUKEwiby7O3mZrqAhUI8KQKHZIpCegQ6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q&f=false).

## Kontakt

- Dr. Sebastian Fiedler | [sebastian.fiedler@fhws.de](mailto:sebastian.fiedler@fhws.de)  
 Roland Clauß | [roland.clauss@dr-clauss.de](mailto:roland.clauss@dr-clauss.de)  
 Hartmut Clauß | [hartmut.clauss@dr-clauss.de](mailto:hartmut.clauss@dr-clauss.de)  
 Prof. Stefan Knoblach | [stefan.knoblach@fhws.de](mailto:stefan.knoblach@fhws.de)

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