

3D-Punktwolke mit thermografischer Information

Sebastian Fiedler, Philipp Grümpel, Georg Karl und Stefan Knoblach

Zusammenfassung

Thermografische Messverfahren sind vielseitig einsetzbar, z.B. bei Bestandsaufnahmen, der Schadensanalyse oder für die Identifikation von Energieverlusten. Werden Thermografieaufnahmen mit 3D-Punktwolken kombiniert, kann zudem die Geometrie der Umgebung einbezogen werden, was nicht nur die Interpretation der Messdaten erleichtert, sondern neue Techniken wie BIM (Building Information Modeling), Reverse-Engineering oder 3D-Visualisierungen ermöglicht. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie man ein hochauflösendes und geometrisch kalibriertes Thermografiepanorama anfertigt und mit einer 3D-Punktwolke kombiniert. Hierfür werden zwei eigenständige Instrumente, ein terrestrischer 3D-Laserscanner sowie eine Thermografiekamera auf einem motorisierten Nodalpunktadapter, verwendet. Mit der beim Nodalpunktadapter enthaltenen Software werden hunderte Einzelbilder erst geometrisch kalibriert und anschließend zu einem Panorama mit aktuell 50 Megapixeln zusammengefügt. Da beide Instrumente nacheinander vom gleichen Standpunkt aus messen, sind die Blickwinkel der Datensätze deckungsgleich und können daher lückenlos miteinander kombiniert werden. Mit dieser Methode wird die Identifikation thermografischer Reflexionen vereinfacht und eine rudimentäre Materialanalyse ermöglicht. Durch den motorisierten Nodalpunktadapter sind Thermografiekameras nahezu beliebiger Größe und somit Auflösung verwendbar, wodurch Messungen auf spezifische Aufgabenstellungen angepasst werden können. Mit dem hier vorgestellten Verfahren kann nahezu jede Art von Kamera kalibriert und somit ein bereits bestehendes System erweitert werden. Dadurch, dass die Thermografieaufnahmen als Panorama zur Verfügung gestellt werden, ist die Kombination mit 3D-Punktwolken mit kommerzieller Software möglich.

Summary

Thermal imaging has a variety of applications, e.g. for inventory, identification of damages or energy losses. If the thermal images are combined with a 3D point-cloud, the geometry of the surrounding gets included, which does not only benefit the interpretation of the data, but enables for new technologies like BIM (Building Information Modeling), reverse-engineering or 3D visualisation.

In this manuscript, a method is presented, how to record a high resolution geometrically calibrated thermal imaging panorama and combine it with a 3D point-cloud. Therefore, two separate instruments, a terrestrial 3D laser-scanner and a thermographic camera on an automatic optical pivot point adapter, are used. With software, which is included by the pivot point adapter, hundreds of single thermal images first are calibrated geometrically and then stitched to a panoramic picture with actually 50 megapixels. Since both instruments record successively from the same location, both datasets are identical and

can be combined without gaps. With this method, the identification of reflexions in thermography is simplified and a rudimentary material analysis is possible. Due to the automatic panorama head, almost all sizes and therefore resolutions of thermal cameras are possible, which allows to adapt the measurement to specific tasks. With this method, almost every kind of camera can be calibrated and used for the extension of an existing system. Since the thermal images are included via a panoramic picture, the combination with the 3D point-cloud can be performed using commercial available software.

Schlüsselwörter: 3D-Digitalisierung, Lasermessung, Punktwolke, Thermografie, Panorama

1 Einleitung

Das Interesse an der Digitalisierung von Strukturen für Bestandsaufnahmen, Soll-Ist-Vergleiche und Reverse-Engineering-Prozesse steigt kontinuierlich. Zudem werden Thermografiekameras nicht mehr nur zur Detektion von Energieverlusten, sondern immer häufiger für die Qualitätskontrolle (IPA 2018) und zur Identifikation von Schäden (IZPF 2018) eingesetzt. Für die Erstellung dreidimensionaler Objekte mit thermografischen Oberflächeninformationen (Maierhofer et al. 2010, Lagüela et al. 2012, Costanzo et al. 2014, Chromy und Klima 2017) gibt es verschiedene Ansätze.

Eine Vorgehensweise ist die Fotogrammetrie mittels Thermografieaufnahmen (Hoegner 2013). Zuerst wird hierfür ein Objekt mit einer Thermografiekamera aufgenommen. Anschließend kann anhand der Fotos eine dreidimensionale Darstellung des Objektes errechnet werden. Ein Problem stellt hierbei die Auflösung der Thermografiekamera dar: Diese ist für gewöhnlich, verglichen mit einer normalen RGB-Kamera, um bis zu einem Faktor 10 geringer, wodurch die Auflösung der hierbei generierten Punktwolke ebenfalls gering ausfällt. Zudem muss die starke geometrische Verzerrung der Thermografiekamera korrigiert werden, da die Geometrie des Objektes ansonsten nicht korrekt wiedergegeben wird. Hierfür wird meist eine Bündelblockausgleichung verwendet, weshalb der Fokus der Kamera innerhalb einer Aufnahmesequenz konstant gehalten werden muss (Luhmann 2010). Unterläuft bei der Kalibrierung der Kamera ein Fehler, pflanzt sich dieser durch den kompletten Prozess der Objektrekonstruktion fort, eine Kontrolle ist aufgrund fehlender Referenzmessungen meist nicht möglich. Für Reverse-Engineering-Prozesse wird jedoch eine möglichst hochauflösende und geometrisch korrekte 3D-Punktwolke benötigt, die thermale Fotogrammetrie ist hierfür nicht geeignet.

Eine andere Herangehensweise stellt die Kombination thermografischer Bilder mit 3D-Punktwolken dar (Borrman et al. 2012, Liebelt 2013, Gleichauf et al. 2017). Der Vorteil im Gegensatz zur Fotogrammetrie ist, dass mittels Lasermessung eine hochauflösende und geometrisch korrekte 3D-Punktwolke aufgenommen wird, die als Unterkonstruktion für die Thermografie dient. Etwaige Fehler bei der Kalibrierung der Thermografiekamera sind dadurch relativ leicht festzustellen, da es zu einem Versatz zwischen 3D-Punktwolke und Thermografieaufnahme kommen würde.

Aktuell gibt es drei kommerziell erhältliche Systeme, bei denen ein terrestrischer Laserscanner um eine Thermografiekamera erweitert wurde. Hierbei kann die aufgenommene 3D-Punktwolke, standardmäßig eingefärbt mit RGB, um thermografische Informationen der Oberfläche erweitert werden. RGB-Kamera und Laserscanner arbeiten in vergleichbaren Wellenlängenbereichen, daher sind z.B. auch Transmissions- und Reflexionseigenschaften der verwendeten Optiken für beide Methoden vergleichbar. Der Messbereich der Thermografie unterscheidet sich jedoch deutlich von dem des sichtbaren Spektrums, weshalb eine Thermografiekamera nicht in die bestehende Optik eines Laserscanners integriert werden kann. Bei dem Zoller+Fröhlich IMAGER 5010 + T-CAM (Zoller+Fröhlich 2018), dem Leica BLK360 (Leica 2018) sowie dem RIEGL VZ-2000i (RIEGL 2018) sind die Thermografiekameras daher extern angebracht, was zwar einfach und kostengünstig ist, jedoch auch Einschränkungen verursacht. Da zusätzlich beim Leica BLK360 sowie RIEGL VZ-2000i nur ein horizontaler Thermografieausschnitt und kein vollständiges Panorama möglich ist, werden diese hier nicht näher behandelt.

Mobile Systeme wie der ThermalMapper (Borrman 2013) oder der SmokeBot (SmokeBot 2018) liefern zwar im Nahbereich gute Ergebnisse, können aber bauartbedingt für größere Entfernung nur Daten mit niedriger Auflösung anfertigen, weshalb auch diese nicht näher behandelt werden.

Die Betrachtung eines Objekts von verschiedenen Standpunkten aus führt zu verschiedenen Darstellungen. Bei einer zweidimensionalen Oberfläche, wie einer Fassade, einem Tunnel oder der Außenfläche einer Brücke, kann der Versatz zwischen Scanner und Kamera korrigiert werden. Hier sind zwar die Blickwinkel verschieden, jedoch ist der Informationsgehalt in beiden Messungen identisch. Da die Orientierung beider Messinstrumente zueinander bekannt ist, kann die Punktwolke korrekt mit den thermografischen Informationen überlagert werden. Bei der Vermessung dreidimensionaler Objekte hingegen führen verschiedene Blickwinkel zu unterschiedlichen Informationsgehalten. Wird der Würfel (Abb. 1a) von einem anderen Blickwinkel aus betrachtet (Abb. 1b), ändert sich nicht nur die Information über das Objekt, es findet zudem eine Abschattung des Untergrunds statt. Nach der Änderung des Blickwinkels ist die rote und grüne Seite des Würfels erkennbar, jedoch wird ein Teil

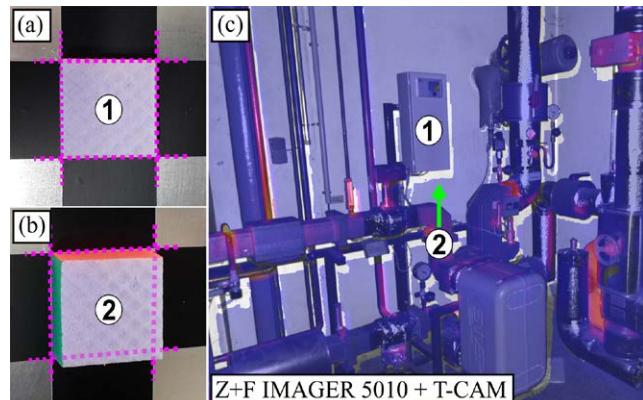


Abb. 1: (a) Ein dreidimensionales Objekt auf einem zweidimensionalen Untergrund. (b) Wird der Würfel unter verändertem Blickwinkel abgebildet, ist zum einen die Darstellung verschieden (rote und grüne Fläche werden erkennbar), zum anderen werden Bereiche des Schachbretts überdeckt (gestrichelte Linien). (c) Haben Laserscanner (1) und Thermografiekamera (2) unterschiedliche Blickwinkel, entstehen Bereiche ohne thermografische Informationen (weiße Flächen).

des darunter liegenden Schachbretts verdeckt (gestrichelte Linien). Beim Zoller+Fröhlich IMAGER 5010 ist die T-CAM in Scanrichtung links oben angebracht, wodurch Teilebereiche rechts und unten nicht erfasst werden können (Abb. 1c, analog zu den Positionen 1 = Laserscanner und 2 = Thermografiekamera). Die bei den Laserscannern fest installierte Thermografiekamera weist bauartbedingt häufig eine sowohl niedrige geometrische als auch thermografische Auflösung auf; das Thermal-Panorama der T-Cam hat eine Auflösung von 2.500 Pixeln/360°. Zudem arbeiten diese Systeme meist autark, weshalb Messparameter nur bedingt auf die aktuelle Situation angepasst werden können.

In diesem Beitrag soll eine neue Methode zur Kombination von 3D-Punktwolken und thermografischen Aufnahmen gezeigt werden. Hierfür wird zuerst mit einem terrestrischen Laserscanner eine 3D-Punktwolke mit RGB-Information der Umgebung erstellt. Anschließend wird der Laserscanner gegen eine Thermografiekamera auf einem motorisierten Nodalpunktadapter ausgetauscht und die thermografischen Informationen der Oberflächen werden als Panorama hinzugefügt (Grümpel und Karl 2017). Durch den Zwischenschritt als Panorama kann die Kombination von 3D-Punktwolke und Thermografie mit kommerzieller Software erfolgen (z. B. Trimble RealWorks (Trimble 2018) oder FARO Scene (FARO 2018c)). Aufgrund der identischen Blickwinkel beider Systeme sind die Datensätze deckungsgleich und können lückenlos miteinander kombiniert werden. Durch einen geschickten Messablauf entspricht die Aufnahmedauer der einer klassischen Laserscanneraufnahme (etwa 12 Minuten). Die Kombination beider Messmethoden eröffnet darüber hinaus noch weitere innovative Möglichkeiten, wie die Identifikation von Reflexionen in thermografischen Bildern und rudimentäre Materialanalysen.

2 Kurze Einführung in die Thermografie

Die Wellenlängen des optisch sichtbaren Spektrums (380–780 nm) sind mehr als 15-mal kleiner, verglichen mit jenen, in denen thermografische Aufnahmen stattfinden (7,5–13 μm). Daher sind auch die Arbeitsweisen von RGB- und Thermografiekameras unterschiedlich. Glas ist ein gutes Beispiel; es lässt den sichtbaren Teil des Lichts ungehindert passieren, reflektiert jedoch den langwelligen Infrarotbereich (Treibhauseffekt), was ihn zum idealen Baustoff für Fenster macht. Dies ist auch der Hauptgrund, weshalb eine Thermografiekamera nicht in die Optik eines Laserscanners (905 nm) integriert werden kann. So ist z. B. die Linse der in diesem Beitrag verwendeten Thermografiekamera aus Germanium gefertigt (FLIR 2018).

Zudem unterscheiden sich die Messprinzipien für RGB- und Thermografieaufnahmen deutlich: Bei einer

RGB-Aufnahme wird die Reflexion der Oberfläche gemessen. Fotografien sind stark von der Beleuchtung abhängig, weshalb bei schlechten Lichtverhältnissen eine separate Lichtquelle (z. B. ein Blitz) verwendet werden muss. Bei der Thermografie hingegen wird im Idealfall nur die Emission, also die Eigenstrahlung eines Objektes, gemessen. Eine Thermografieaufnahme kann daher auch in völliger Dunkelheit stattfinden. Die in der Thermografie detektierte Oberflächentemperatur hängt stark vom Emissionskoeffizient ε ab, der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann (Micro-Epsilon 2018). Wird zum Beispiel ein Objekt mit $\varepsilon = 0,75$ abgebildet, so entspricht die in der Thermografie ermittelte Temperatur zu 75 % der tatsächlichen Oberflächentemperatur. Der Emissionskoeffizient hängt wiederum maßgeblich von der Struktur und der elektrischen Leitfähigkeit der Oberfläche ab. Bei elektrisch nichtleitenden Materialien (Beton, Holz, Glas, Lack, Kunststoff, etc.) sind Emissionskoeffizienten von $> 0,9$ typisch. Thermografie an derartigen Oberflächen verläuft meist unkritisch, da die gemessene Temperatur somit zu $> 90\%$ der tatsächlichen Oberflächentemperatur entspricht. Bei glatten Metalloberflächen können $\varepsilon \leq 0,1$ auftreten, was die tatsächliche Bestimmung der Oberflächentemperatur mit einer Thermografiekamera sehr schwierig bis unmöglich macht. Mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten nimmt auch die Reflexion zu ($\text{Emission} + \text{Reflexion} = 1$). Die Aussagefähigkeit thermografischer Messungen an Metallen wird dadurch zusätzlich verfälscht, da gegebenenfalls nicht die Eigenemission eines Objekts gemessen wird, sondern die Reflexion einer anderen Wärmequelle der Umgebung.

Dieser Sachverhalt wird in Abb. 2 veranschaulicht: Eine Aluminiumplatte ($\varepsilon \approx 0,05$) wird durch zwei Heizfolien auf der Rückseite auf 50 °C erwärmt. Die Mitte der Platte wurde mit mattschwarzem Lack ($\varepsilon \approx 0,97$) be-

schichtet, das untere Drittel wurde mit einer Kunststofffolie ($\varepsilon \approx 0,93$) beklebt (Abb. 2a). In der Thermografieaufnahme geben die beiden elektrisch nichtleitenden Oberflächen die Temperatur korrekt wieder (Abb. 2b), die Metalloberfläche hingegen erscheint aufgrund ihres niedrigen Emissionskoeffizienten auf Raumtemperatur.

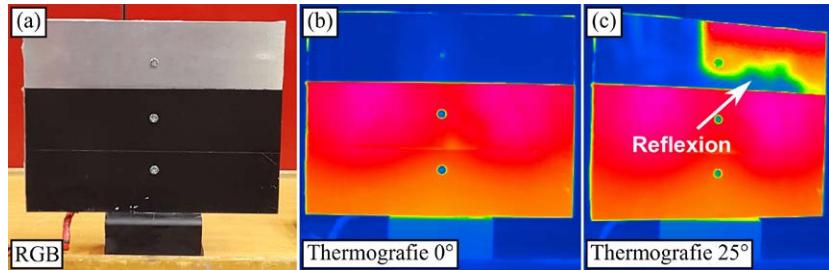


Abb. 2: (a) Eine auf 50 °C beheizte Aluminiumplatte; oben blank, in der Mitte lackiert und unten mit Folie beklebt. (b) Die Temperaturen der elektrisch nichtleitenden Oberflächen Lack und Kunststofffolie werden in der Thermografie korrekt wiedergegeben, das Metall hingegen zeigt Raumtemperatur. (c) Unter 25° Neigung reflektiert die Metalloberfläche zudem eine Wärmequelle aus der Umgebung.

So kann es z. B. vorkommen, dass eine Blechverkleidung in der Thermografie mit Raumtemperatur angezeigt wird, tatsächlich jedoch über 100 °C heiß ist. Die Farbskala verläuft hier von Blau (kalt) zu Rot (warm) und stellt keine absoluten Temperaturwerte dar. Sie entspricht der radiometrischen Messung der Thermografiekamera, multipliziert mit einer herstellerspezifischen Funktion. In Abb. 2c wurde die Platte um 25° nach rechts gedreht (spezifischer Winkel des Versuchsaufbaus). Nun ist im rechten oberen Bereich die Reflexion einer Wärmequelle der Umgebung erkennbar, die zuvor (0° in Abb. 2b) nicht abgebildet wurde. Da die Aluminiumoberfläche einen sehr niedrigen Emissionskoeffizienten aufweist, können sehr starke Reflexionen auftreten und so zu Fehlinterpretationen der Oberflächentemperatur führen. Die Temperaturbestimmung einer elektrisch leitenden (metallischen) Oberfläche mittels Thermografie ist daher äußerst kompliziert.

3 Arbeitsweise des Systems

Voraussetzung für die lückenlose Kombination einer Punktwolke mit thermografischen Informationen ist die Aufnahme beider Datensätze aus identischen Blickwinkeln, da diese ansonsten nicht deckungsgleich sind (siehe Abb. 1). Hierfür werden beide Messungen nacheinander vom gleichen Standpunkt aus durchgeführt. Das hier gezeigte Verfahren ist daher in zwei Arbeitsschritte unterteilt: Erstellung einer 3D-Punktwolke der Umgebung mittels terrestrischer Lasermessung sowie die Aufnahme eines Thermografiepanoramas mit einem NodalpunktadAPTER. Die Kombination dreidimensionaler Punktwolken mit thermografischen Oberflächeninformationen wurde zuerst mit einem manuell steuerbaren NodalpunktadAPTER erprobt (Grümpel und Karl 2017) und anschließend

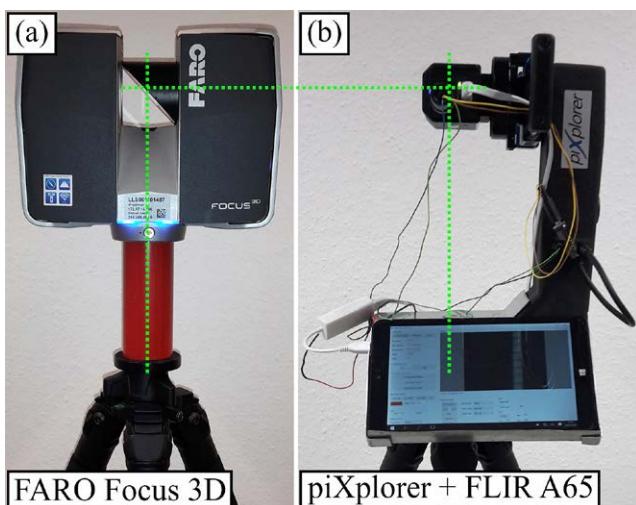


Abb. 3: (a) FARO Focus 3D auf Höhenadapter, (b) FLIR A65 auf dem fernsteuerbaren Nodalpunktadapter CLAUSS piXplorer

in ein vollautomatisch arbeitendes System überführt. In Abb. 3 sind die beiden für die Aufnahmen verwendeten Instrumente gezeigt, wobei die Schnittpunkte der grünen Linien den jeweiligen Abbildungszentren entsprechen.

Mit dem FARO Focus 3D (FARO 2018a) auf einem eigens angefertigten Höhenadapter (Abb. 3a) muss beim Tausch der Instrumente keine Höhenanpassung des Stabtis als mehr vorgenommen werden, um für beide Messungen identische Blickwinkel zu erhalten. Zusätzlich zu den Koordinaten der gescannten Punkte wird die Intensität des reflektierten Laserstrahls gemessen, die anschließend als Graustufenbild ausgegeben wird. Je nach Laserscanner kann eine vollständige 3D-Punktwolke aus bis zu 100 Mio. Bildpunkten bestehen. Im hier gezeigten Beispiel dauerte eine Laserscannermessung inklusive RGB-Aufnahme etwa 12 Minuten (Auflösung: 1/4, Qualität: 4x). Die daraus resultierende 3D-Punktwolke umfasst mehr als 40 Mio. Punkte.

Der motorisierte Nodalpunktadapter CLAUSS piXplorer (CLAUSS 2018) (Abb. 3b) wird über ein Bedienelement aktiviert und löst die Aufnahme automatisch aus, sobald eine vordefinierte Winkelposition erreicht ist. Die Position jeder Aufnahme wird abgespeichert und für das Zusammenfügen der Aufnahmen (eng. stitching) verwendet. Die Aufnahmezeit für ein Panorama beträgt ebenfalls ca. 12 Minuten (522 Einzelbilder bei 60 % Bildüberlappung). Da die FLIR A65 weder über einen internen Speicher noch über eine eigene Stromversorgung verfügt, wird in unserem Beispiel ein Tablet zur Speicherung der Thermografieaufnahmen verwendet; die Stromversorgung kann über den Nodalpunktadapter realisiert werden.

Bei den meisten Thermografieaufnahmen wird der Temperaturbereich individuell für jede Messung definiert. Hierzu wird eine Farbskala, wie z.B. in Abb. 2 (von Blau nach Rot), verwendet und linear dem kompletten Temperaturbereich der Aufnahme zugeordnet. Da für ein Panorama jedoch aus vielen Einzelaufnahmen ein Gesamtbild

erstellt werden soll, muss ein einheitlicher Temperaturbereich für alle Bilder vorliegen. Hierfür wird vor dem Zusammenfügen die niedrigste und höchste Temperatur der gesamten Aufnahme ermittelt und auf alle Einzelaufnahmen übertragen.

Generell sind Thermografiekameras nicht geometrisch kalibriert, weshalb vor dem Zusammenfügen der Einzelbilder jedes Bild separat entzerrt werden muss. Durch Kalibrieraufnahmen wird der Abbildungsfehler des Objektivs ermittelt und kann für die Bildkorrektur verwendet werden (Luhmann et al. 2011). Die Ermittlung der Kalibrierparameter muss für jede Kamera-Objektiv-Kombination und sogar für jeden Fokus separat durchgeführt werden. Die Kalibrierung von Thermografiekameras gestaltet sich schwierig und ist Gegenstand vieler Veröffentlichungen; möglich sind z.B. Kalibrierungen mittels aktiver Targets aus Passpunktfeldern mit Glühbirnen oder passiven Targets mit unterschiedlich stark reflektierenden Oberflächenbeschichtungen (Luhmann 2010, Borrmann et al. 2012).

Für unsere Kalibrierung wurde die Software des Nodalpunktadapterherstellers verwendet, die Kalibrierung findet über ein virtuelles Passpunktfeld statt (Clauß 2011). Im Gegensatz zur Kalibrierung über ein Passpunktfeld (Luhmann 2010) wird beim virtuellen Passpunktfeld nur ein Passpunkt verwendet, der jedoch unter verschiedenen Kamerablickwinkeln sofort abgebildet wird, bis jeder Teil des Sensors mindestens einmal abgedeckt wurde. Wurden alle Kalibrieraufnahmen angefertigt, sucht die Software nach runden Targets und ermittelt die Abweichung zu einem perfekten Kreis. Die notwendigen geometrischen Korrekturen, um die Abbildung des Targets in einen perfekten Kreis überführen zu können, werden als Kalibrierparameter gespeichert. Hierfür sind zusätzlich die Informationen Sensorgröße, Anzahl der Pixel und Aufnahmebereich nötig. Für die Kalibrierung der Thermografiekamera wurde ein aktives Target konstruiert: eine mit einer Kunststofffolie beschichtete und beheizbare runde Metallscheibe mit 24 cm Durchmesser (Abb. 4a). Diese wird vor einen homogenen Hintergrund befestigt und im Abstand von 9 m aufgenommen (Abb. 4b). Mit der verwendeten FLIR A65 mit 25 mm Objektiv wurden 1.344 Einzelbilder angefertigt. Die Kalibriersoftware wurde ursprünglich für RGB-Kameras hergestellt, für die eine schwarze runde Scheibe auf einer weißen Wand

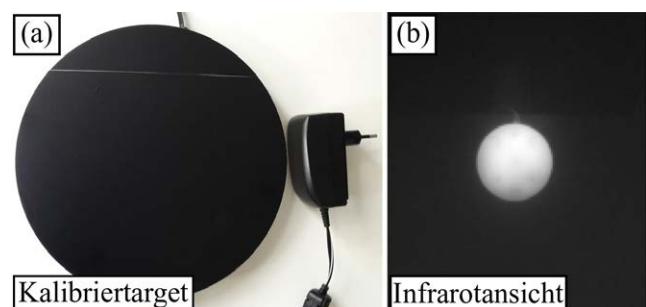


Abb. 4: (a) aktives Target (beheizbar) und (b) die Infrarotansicht mit der Thermografiekamera

fotografiert wird. Wird durch eine geeignete Modifikation des Targets ein ausreichend deutlicher Kontrast zum Hintergrund realisiert, kann mit der Software jede Art von Kamera kalibriert werden.

Bei der Kalibrierung über ein Passpunktfeld muss Größe und Position jedes einzelnen Passpunktes bekannt sein. Bei der Kalibrierung über das virtuelle Passpunktfeld ist nur ein Passpunkt vorhanden; die Größe bleibt somit konstant, die Position wird über die Positionsparameter des Nodalpunktadapters vordefiniert. Der Nachteil bei dem Verfahren ist, dass deutlich mehr Bilder

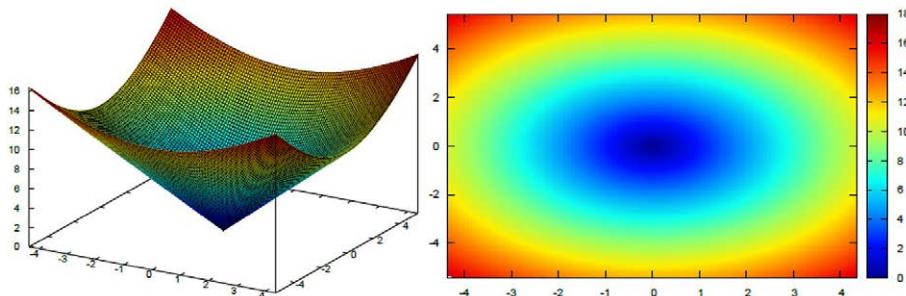


Abb. 5: Das Kalibrierergebnis für die FLIR A65 mit 25 mm Brennweite; das Objektiv ist radialsymmetrisch verzeichnet.

aufgenommen werden müssen. Die Kaliberaufnahmen werden jedoch ebenfalls vollautomatisch mit Hilfe des Nodalpunktadapters durchgeführt, weshalb der zeitliche Aufwand gering bleibt. Wird der Fokus der Kamera nicht verändert, muss die geometrische Kalibrierung nur einmal durchgeführt werden. Das Kalibrierergebnis für die hier verwendete FLIR A65 mit 25 mm Brennweite (FLIR 2018) ist in Abb. 5 zu sehen und zeigt eine radial-symmetrische Verzeichnung des Objektivs.

Die Kalibrierparameter werden zusammen mit den gespeicherten Winkelpositionen zum vollautomatischen Entzerren und Zusammenfügen der Einzelbilder zu einem Panorama verwendet, was wiederum die Nachbearbeitungszeit drastisch reduziert. Ein durch die Hersteller-software erstelltes Thermografiepanorama zeigt Abb. 6. Bei kontrastarmen Regionen (z.B. Bereiche homogener

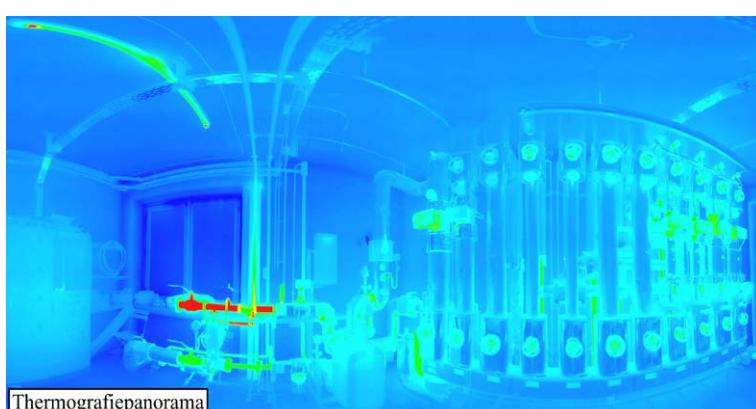


Abb. 6: Ausschnitt eines mit der FLIR A65 und dem CLAUSS piXplorer automatisch aufgenommenen, entzerrten und gestickten Thermografiepanoramas. Bei 640×512 Sensorpixeln sind Panoramen mit bis zu 16.000×8.000 Bildpunkten möglich.

Temperatur) kann ein karoartiges Muster im Panorama entstehen. Verursacht wird dies durch die laut Hersteller stärker ausgeprägte Randabschattung (Vignettierung) der vergleichsweise günstigen FLIR A65 Thermografiekamera. Bei hochwertigeren Modellen war die Randabschattung deutlich schwächer ausgeprägt. Aktuell wird an einer Lösung gearbeitet, eine Vignettierungskorrektur über Referenzmessungen eines homogenen Hintergrundes als zusätzlichen Kalibrierparameter mit einfließen zu lassen. Die Randabschattung kann jedoch auch durch einen größeren Bildüberlapp reduziert werden; hier wurde daher mit einem Überlapp von 60 % gearbeitet, während für RGB-Panoramen bereits ein Überlapp von 25 % ausreichend ist.

Die FLIR A65 hat eine Auflösung von 640×512 Pixeln. Hieraus können, je nach Objektiv, Thermografiepanoramen mit bis zu 16.000×8.000 Bildpunkten (128 Megapixel) erstellt werden. Da das Stativ, auf dem der Scanner oder der Nodalpunktadapter steht, nicht mit aufgenommen wird, ist

das Bild rechteckig. Auch der Scannerstandpunkt ist in terrestrischen Lasermessungen als schwarzer Kreis erkennbar. Wie eingangs bereits erwähnt, war eines der Ziele, dass die Aufnahme des Thermografiepanoramas in etwa so lange dauert wie die der Punktwolke. Hierdurch können auch beide Messungen zeitgleich an zwei verschiedenen Standpunkten stattfinden: An Position A wird dann zuerst der Laserscanner aufgebaut und an Position B der Nodalpunktadapter. Sind beide Messungen abgeschlossen, werden die beiden Instrumente getauscht. Hierdurch kommt es zu keinen nennenswerten Zeitverlusten gegenüber kombinierten Messinstrumenten.

Nach der Erstellung des Thermografiepanoramas kann dies mit jeder beliebigen Software auf die 3D-Punktwolke gelegt werden, die eine Einfärbeoption bietet; z.B. in Abb. 7 geschehen mit Trimble RealWorks (Trimble 2018).

Zusätzlich zur Graustufenintensität (Abb. 7c) wird standardmäßig eine RGB-Aufnahme erstellt, um die Punktwolke mit Bildinformationen des sichtbaren Bereichs einzufärben zu können. Genügt es, eine Punktwolke mit Graustufenintensität und thermografischen Oberflächeninformationen einzufärben, bietet RealWorks die Möglichkeit, den RGB-Kanal durch das Thermografiepanorama zu ersetzen. Hierbei ist eine Präsentationsform möglich, wie sie in Abb. 7d gezeigt wird. Die Auswertung kann als reduzierter Datensatz exportiert und über den Viewer in einem Webbrowser betrachtet werden. Zudem sind bereits einfache Längenmessungen im 3D-Datensatz sowie das Hinzufügen von Notizen möglich. Per Menüleiste kann zwischen Graustufenintensität und

Thermogramm gewechselt werden, was eine effektive Identifikation der Wärmeverlustquellen erlaubt.

Soll die Thermografie jedoch zusätzlich zur Graustufenintensität und RGB-Information hinzugefügt werden, ist zuvor eine Weiterverarbeitung des Datensatzes nötig. Mit einem Spatial ETL-Tool (Extract-Transform-Load) kann die thermografische Information als zusätzliche Spalte in die bestehende Punktwolke mit Graustufenintensität und RGB-Information eingefügt werden. Das Resultat ist eine 3D-Punktwolke (X, Y, Z) mit Graustufenintensität (I), Umgebungsfarben (R, G, B) sowie der thermografischen Information (T oder R_2, G_2, B_2), wie sie in Abb. 11 gezeigt wird. Der Datensatz kann anschließend z.B. in CloudCompare (CloudCompare 2018) eingelesen werden. In Abb. 7 sind die Einzelschritte nochmals grafisch dargestellt:

Mit einer Thermografiekamera auf einem Nodalpunktadapter werden Einzelbilder der Umgebung parallaxenfrei aufgenommen (Abb. 7a). Die Bildüberlappung sollte groß genug gewählt werden (mindestens 40 %), sodass die Stitching-Software fehlerfrei arbeiten kann. Da die Aufnahmen für gewöhnlich stark verzeichnet sind (siehe weiße Markierungen), müssen sie entzerrt werden (Abb. 7b). Hierfür werden die Kalibrierparameter bei den Kameraeinstellungen der Aufnahme benötigt. Die Kamera wird gegen den terrestrischen Laser-scanner ausgetauscht und die 3D-Punktwolke aufgenommen (Abb. 7c). Anschließend kann die Punktwolke mit dem Thermografiepanorama eingefärbt und beliebig weiterverarbeitet werden (Abb. 7d). Aufgrund der identischen Blickwinkel ist der Informationsgehalt beider Aufnahmen deckungsgleich, es entstehen keine Bereiche ohne thermografische Informationen, wie sie in Abb. 1c vorhanden sind.

Wie gut die thermografischen Informationen über die 3D-Punktwolke passen, hängt von zwei Parametern ab; der Qualität der Kalibrierung der Thermografiekamera sowie der Genauigkeit, mit der beide Datensätze kombiniert werden. In Trimble RealWorks kann das Panorama automatisch oder halbautomatisch auf die 3D-Punktwolke gelegt werden. Mit der automatischen Routine sucht das Programm identische Features in der 3D-Punktwolke sowie in dem Panorama und kombiniert anschließend beide. Bei der halbautomatischen Routine werden in beiden Datensätzen drei identische Features manuell gewählt, die der Software als Näherungswerte dienen. Bei Thermografiepanoramen mit viel Kontrast und eindeutigen Kanten liefert das automatische Verfahren einwandfreie Ergebnisse.

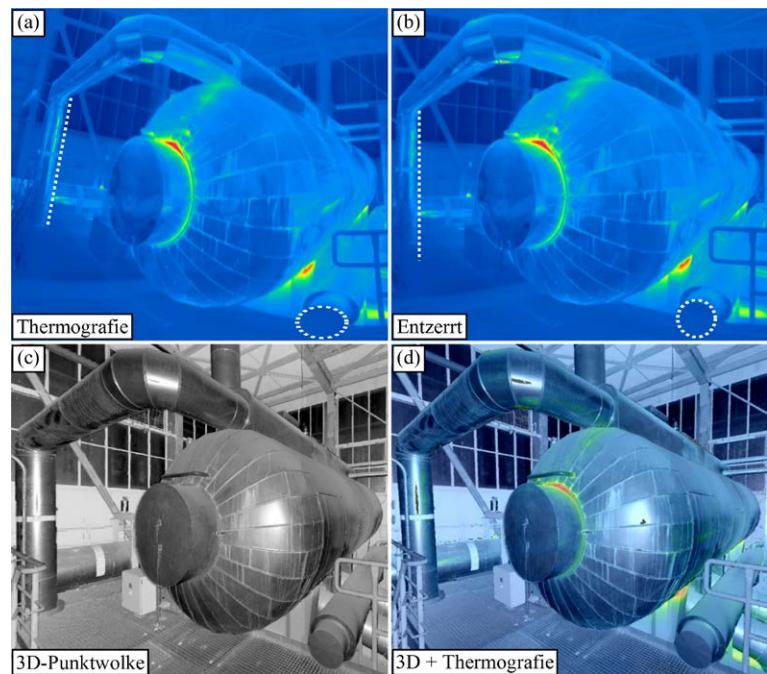


Abb. 7: Kombination thermografischer und geometrischer Daten.
 (a) Zuerst werden mittels Nodalpunktadapter thermografische Einzelbilder erstellt. (b) Jedes Bild muss vor dem Stitchen über die Kalibrierparameter entzerrt werden, um die Geometrie korrekt wiederzugeben. (c) Erst dann kann das Thermografiepanorama fehlerfrei auf die 3D-Punktwolke gelegt werden. (d) Hieraus resultiert ein 3D-Modell mit thermografischen Informationen.

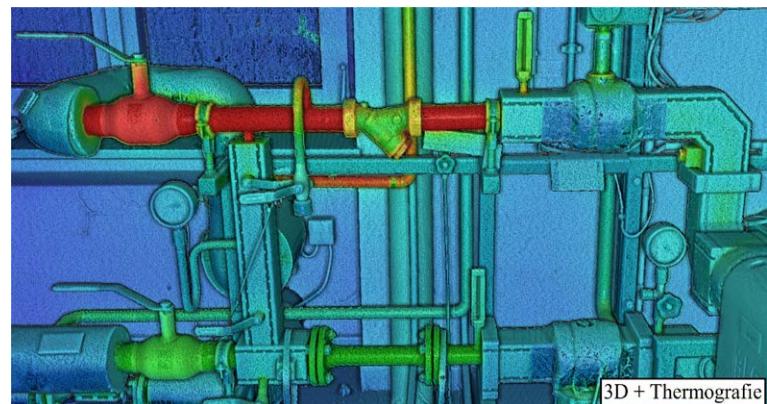


Abb. 8: Visuelle Kontrolle der geometrischen Kalibrierung. Hierfür wird das Thermografiepanorama mit einer 50 %-igen Transparenz über die 3D-Punktwolke gelegt. Sollten Fehler in der Kalibrierung und/oder Überlagerung vorliegen, liegen die Kanten der Thermografie neben der 3D-Punktwolke.

Eine weitere Möglichkeit bietet FARO Scene (FARO 2018c), eine Software, die beim Kauf des FARO Focus 3D mitgeliefert wird. Dort wird das Panorama manuell mit der 3D-Punktwolke kombiniert. Hierfür muss der Nutzer mindestens sechs identische Punkte in beiden Datensätzen anklicken; das Ergebnis wird umso genauer, je mehr Markierungen gesetzt werden.

Die erfolgreiche Entzerrung der Thermografieaufnahmen sowie die Passgenauigkeit der Überlagerung mit der 3D-Punktwolke werden gleichzeitig im letzten Arbeitsschritt überprüft. Nachdem die 3D-Punktwolke mit dem

Thermografiepanorama eingefärbt wurde, können beide Datensätze unterschiedlich stark gewichtet werden. Bei einer fehlerhaften Kalibrierung und/oder Überlagerung wäre dort ein Versatz zwischen der Thermografieaufnahme und der 3D-Punktwolke erkennbar, sprich, die Thermografieaufnahmen würden neben dem Objekt lokalisiert sein. In Abb. 8 ist eine transparente Überlagerung von je 50 % 3D-Punktwolke und Thermografie gezeigt. Diese Art der Kontrolle zeichnet sich durch eine einfache Handhabe aus und kann an mehreren Stellen (Nahfeld und Fernfeld) durchgeführt werden. Hierbei wird die Qualität der geometrischen Kalibrierung der Thermografiekamera an der originalgetreuen Abbildung des Objekts durch die terrestrische Lasermessung geprüft. Da hier kein Versatz zwischen beiden Messungen erkennbar ist, kann das Verfahren als erfolgreich gewertet werden.

4 Vorteile des Verfahrens

Weisen verschiedene Objekte keinen deutlichen Kontrastunterschied auf, ist deren Identifikation in Thermografieaufnahmen mitunter sehr schwierig. Wird das Thermografiebild jedoch mit einer 3D-Punktwolke kombiniert, können solche Objekte deutlich leichter identifiziert werden. Die gestrichene Wand und der lackierte Schaltkasten in Abb. 9a haben vergleichbare Emissionskoeffizienten und Temperaturen, weshalb sie in der Thermografie kaum voneinander unterscheiden werden können (siehe weißer Kreis). Wird die Thermografieaufnahme jedoch mit der 3D-Punktwolke kombiniert, ist der Schaltkasten deutlich erkennbar (Abb. 9b). Da es sich hierbei um einen dreidimensionalen Datensatz handelt, kann das Objekt zudem unter verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden.

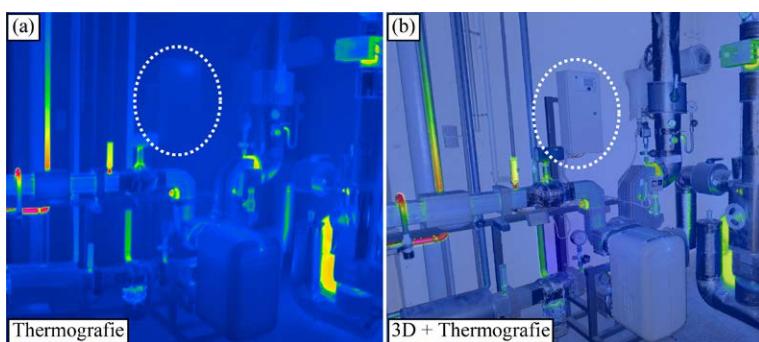


Abb. 9: (a) Vergleich von Thermografie und (b) mit 3D-Informationen kombinierte Messung. Die einzelnen Objekte können deutlich besser identifiziert und unter verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden.

Die in diesem Beitrag gezeigte Methode der Kombination von Thermografieaufnahmen und 3D-Punktwolken bietet viele neue Möglichkeiten, wie z.B. die Erweiterung bereits bestehender terrestrischer Lasermesssysteme. Dadurch, dass kaum Einschränkungen bei der Wahl der Thermografiekamera bestehen, ist eine optimale Anpassung an eine aktuelle Fragestellung möglich. Die

Kalibrierung der Thermografiekamera kann vom Nutzer selbst durchgeführt werden; das hierfür anzufertigende aktive Infrarottarget ist einfach herzustellen und kostengünstig (ca. 30 Euro). Der Nutzer hat vollen Zugriff auf die radiometrischen Informationen der Messung, während bei geschlossenen Systemen oft nur ein Farbschema und eine Temperatur ausgegeben wird. Dadurch, dass ein geometrisch entzerrtes Thermografiepanorama angefertigt wird, kann die Kombination von Thermografie und 3D-Punktwolke mit handelsüblicher Software erfolgen. Zudem kann der Nodalpunktadapter mit einer RGB-Kamera bestückt werden, um RGB-Aufnahmen in noch höherer Auflösung anfertigen und über die 3D-Punktwolke legen zu können; für die Kalibrierung der Kamera kann ebenfalls das Infrarottarget und die Kalibrierroutine des Herstellers verwendet werden.

Wie eingangs erwähnt, nimmt mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten die Reflexion zu, was die Aussage thermografischer Messungen zusätzlich verfälscht (siehe Abb. 2c). Praxis bei der Thermografie metallischer Oberflächen ist es daher, nicht nur das Objekt abzubilden, sondern zusätzlich sein direktes Umfeld, um etwaige Messfehler durch die Reflexion sekundärer Wärmequellen ausschließen zu können. Da bei der hier vorgestellten Methode über das Thermografiepanorama eben auch das komplette Umfeld aufgenommen wird, sind bereits alle potenziellen Störquellen in der Messung enthalten und können berücksichtigt werden. Durch die thermografische Vermessung der kompletten Umgebung als Panorama kann zudem die diffuse Hintergrundstrahlung ermittelt werden. Weiterhin ist der Blickwinkel der Thermografiekamera identisch zur terrestrischen Laserscanneraufnahme, weshalb neben der Entfernung des Objekts zusätzlich der Winkel bekannt ist, unter dem es aufgenommen wurde. Reflexionen können daher unter Berücksichtigung des Ein- und Ausfallwinkels identifiziert werden.

Durch die Kombination der Daten ist zudem eine rudimentäre Materialidentifikation möglich. Wird im Thermografiekanal ein Hot-Spot identifiziert, kann im RGB-Kanal geprüft werden, um welches Material es sich handeln könnte, was zur Bestimmung des Emissionskoeffizienten beitragen kann. In der Anwendung könnte dies wie folgt verlaufen:

Bei der Durchsicht der Daten wurde im Thermografiekanal ein Energieverlust (Hot-Spot) festgestellt. Im RGB-Kanal kann dessen Beschaffenheit näher geprüft werden. Zeigt das Objekt eine Farbe, handelt es sich voraussichtlich um eine lackierte Oberfläche und ein hoher Emissionskoeffizient ist wahrscheinlich, da Lacks elektrisch nichtleitend sind. Im Graustufenkanal kann schließlich das Objekt in noch höherer Auflösung betrachtet werden, zudem lässt sich der Winkel feststellen, unter dem der Hot-Spot aufgenommen wurde, was die Identifikation von Reflexionen ermöglicht.

Durch Abb. 10 soll das zuvor genannte Beispiel verdeutlicht werden: Vier Hot-Spots (Abb. 10a) wurden durch die Thermografie identifiziert (weiße Pfeile). Durch die RGB-Aufnahme (nicht gezeigt) und die Graustufenintensität (Abb. 10b) wird deutlich, dass es sich hierbei um eine Keramik (oben links) und ein lackiertes Ventil (unten mittig) handelt. Beide Materialien sind elektrisch nichtleitend und besitzen daher einen hohen Emissionskoeffizienten. An der Position der anderen beiden Hot-Spots befindet sich eine Verkleidung aus Aluminium, die eine niedrige Emission und daher eine hohe Reflexion aufweist. Durch die Kombination beider Methoden können die vier Hot-Spots als zwei Wärmequellen und zwei Reflexionen identifiziert werden. Da zudem durch die Laserscanneraufnahme die Position aller Objekte relativ zum Aufnahmestandpunkt sowie zueinander bekannt ist, sind die Reflexionen eindeutig als solche identifizierbar.

Die Darstellung der Punktwolken in einer Onlinepräsentationsform (Abb. 11) eröffnet neue Möglichkeiten. Durch die Weiterverarbeitung der Punktwolke in Potree (Schuetz 2018) kann der Datensatz ohne die Installation von Zusatzsoftware über einen Onlinebrowser analysiert werden. Hierbei reduziert das Programm die Punktwolke, um die Kosten für Datenspeicherung und -transfer zu minimieren; in unserem Beispiel hat eine Punktwolke mit etwa 40 Mio. Einzelpunkten mit RGB-, Intensitäts- als auch Thermografie-Informationen noch ca. 220 MB. Zudem sind Flächen- und Längenmessungen in Potree möglich, was dabei hilft, über die Temperaturdifferenz sowie die Abstrahloberfläche den Energieverlust abzuschätzen. Der Betrachter kann die Ergebnisse problemlos mit anderen Personen teilen, die einfache Benutzeroberfläche, welche hier auf das Projekt eDIan (effiziente Dämmung von Industrieanlagen) angepasst wurde, ermöglicht die Bedienung ohne Spezialkenntnisse (eDIan 2018).

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde ein Verfahren zur Kombination von Thermografieaufnahmen und 3D-Punktwolken vorgestellt. Hierfür sind folgende Schritte notwendig:

1. Die geometrische Kalibrierung (Entzerrung) der Thermografiekamera (einmalig bei gleichbleibenden Kameraeinstellungen)
2. Erstellung einer 3D-Punktwolke der Umgebung (z.B. mittels terrestrischem Laserscanner)
3. Aufnahme der thermografischen Einzelbilder mittels (fernsteuerbarem) Nodalpunktadapter

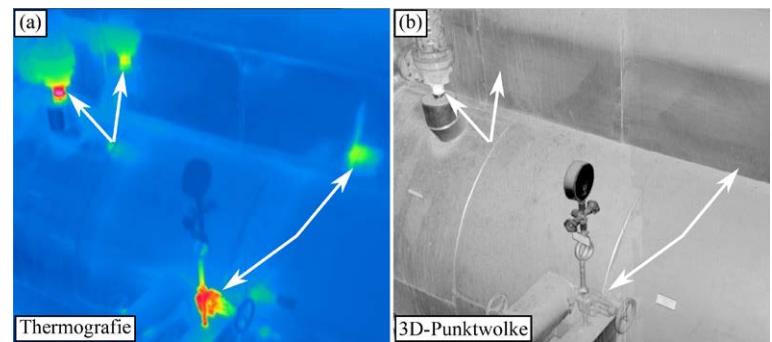


Abb. 10: (a) Identifikation von Reflexionen in thermografischen Messungen durch den Vergleich mit den anderen Kanälen wie z.B. Graustufe (b) der 3D-Punktwolke. Zwei der »Hot-Spots« konnten als Reflexion identifiziert werden.

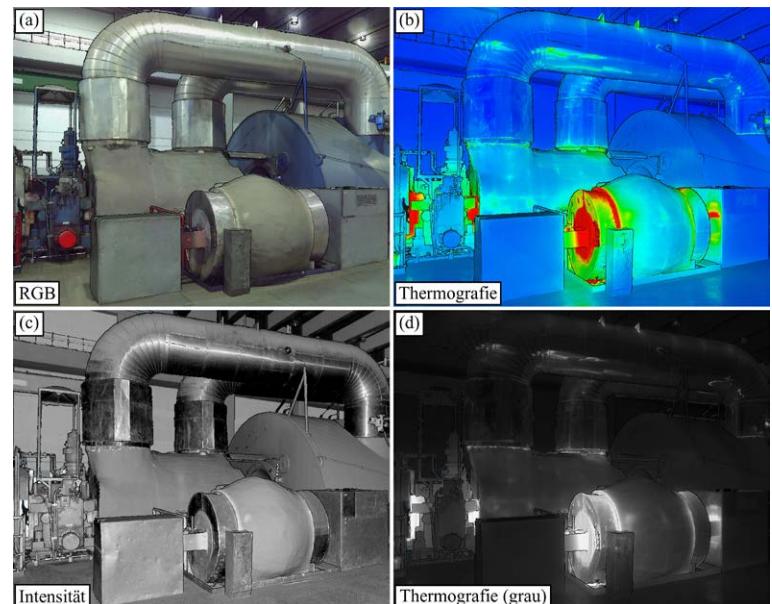


Abb. 11: 3D-Thermografie-Datensatz in einer online-fähigen Präsentationsform (Potree). Ergebnisse können so via Internet zugänglich gemacht und analysiert werden. Das Objekt kann in RGB (a), Thermografie (b), Intensität (c) und einer Thermografie in Grauwerten (d) betrachtet werden. In dem Datensatz können zudem Flächen, Strecken und Winkel gemessen werden.

4. Festlegung einheitlicher Temperaturbereiche für alle Einzelbilder einer Messung
5. Zusammenfügen der entzerrten Einzelbilder zum Thermografiepanorama (mittels gespeicherter Winkelpositionen und Kalibrierparameter)
6. Kombination der 3D-Punktwolke mit thermografischen Daten (gegebenenfalls als zusätzlicher Kanal zu RGB und Graustufe) mit kommerzieller Software
7. Überprüfung auf Versatz zwischen 3D-Punktwolke und Thermografie zur Validierung von Kalibrierung und Kombination
8. Darstellung der Ergebnisse als reduzierter Datensatz bzw. in einer Online-Präsentationsform zur Analyse
9. Überprüfung der Ergebnisse auf Reflexionen bzw. niedrige Emissionskoeffizienten

Das hier vorgestellte Verfahren zur Kombination von Thermografie und 3D-Punktwolken ermöglicht u.a. die digitale Bestandsaufnahme von Industrieanlagen. Sind Oberfläche und Temperatur bekannt, können Energieverluste identifiziert und beziffert werden, was die Kalkulation des Einsparpotenzials einer Dämmmaßnahme ermöglicht (EiiF 2018). Durch die Einfärbung der 3D-Punktwolke mit mehreren Kanälen (Graustufenintensität, RGB und Thermografie) können Daten einfacher interpretiert und besser visualisiert werden. Da hier eine Thermografiekamera verwendet wird, die nicht in ein System integriert wurde, ist eine größere Einflussnahme auf die Daten möglich (z.B. Extraktion radiometrischer Werte aus der Thermografiemessung oder Anpassung der Emissionskoeffizienten). Die vollautomatische Erstellung des hierfür benötigten Thermografiepanoramas ist auf andere Spektrometer übertragbar (z.B. Multispektralkameras), weshalb der hier vorgestellte Workflow eine Vielzahl von Möglichkeiten eröffnet. Die Punktwolke dient als Grundlage zur Anfertigung von maßgeschneiderten Dämmungen und kann bei Bedarf durch handgeführte Geräte ergänzt werden (FARO 2018b). In Zukunft soll durch die Kombination aller Datensätze in einer selbstlernenden Datenbank eine automatische Bestimmung des Emissionskoeffizienten möglich sein, was zur verbesserten Thermografie an Metallen verwendet werden könnte. Zudem wäre die Weiterentwicklung zu einem kombinierten System denkbar: Hierfür könnte beispielsweise die Thermografiekamera durch Änderung des Linsensystems ebenfalls in den Scanner integriert werden. Denkbar wäre auch ein Revolverkopfsystem, bei dem terrestrischer Laserscanner und Nodalpunktadapter in der Vertikalen gegeneinander getauscht werden und das gerade inaktive System unter dem Stativ verbleibt. Aktuell wird weiter an einer Verbesserung des Verfahrens gearbeitet. Zudem wird geprüft, inwieweit das System für den Building-Information-Modelling-Prozess (BIM) von Bestandsanlagen verwendet werden kann. Ein weiterer möglicher Anwendungsbereich wäre die Überprüfung von Rohbauten auf Kältebrücken, um gegebenenfalls Gegenmaßnahmen in Form von Außendämmungen zielgerichtet einsetzen zu können. Durch die hohe thermografische Auflösung und die exakte räumliche Zuordnung wäre auch der Einsatz zur Schadensermittlung bei Gebäuden (Rissbildung, Feuchtigkeitsansammlung, Kondensation) denkbar.

Dank

Das Forschungsprojekt eDIan wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF: 03FH201PX5) gefördert. Vielen Dank an unsere Kooperationspartner (EiiF European Industrial Insulation Foundation, KAEFER Isoliertechnik GmbH & Co. KG, Hertel B.V., VIB Nederlandse vereniging van ondernemers in het thermisch isolatiebedrijf, Knauf Insulation GmbH, G+H Isolierung GmbH, Arnold Group GmbH, GWK Kuhlmann GmbH und Bilfinger OKI Isoliertechnik GmbH) für

ihre Unterstützung. Vielen Dank an alle Mitarbeiter der Fakultät Maschinenbau und des Studienbereichs Geo für ihre Mithilfe. Danke auch an die Dr. Clauss Bild- und Datentechnik GmbH für die Unterstützung bei der Adaption der Hard- und Software des CLAUSS piXplorer und piXpert für thermografische Anwendungen.

Literatur

- Letzter Zugriff auf Onlinequellen: 13.11.2018
- Borrmann, D. (2013): Project ThermalMapper. Jacobs University. Homepage. www.faculty.jacobs-university.de/anuechter/thermalmapper.html.
- Borrmann, D., Afzal, H., Elseberg, J., Nüchter, A. (2012): Mutual Calibration for 3D Thermal Mapping. Paper. <https://pdfs.semanticscholar.org/cd37/5d3f032f9f6ae278199381d7beb6d3921228.pdf>.
- Chromy, A., Klima, O. (2017): A 3D Scan Model and Thermal Image Data Fusion Algorithms for 3D Thermography in Medicine. Journal of Healthcare Engineering. Paper. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5698832.
- CLAUSS (2018): piXplorer. Homepage. www.pixplorer.net.
- Claub, R. (2011): Universelles Kamerakalibriersystem mit zentraler Zielmarke. In: Luhmann/Müller (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011, Berlin/Offenbach, S. 348–355. Paper. www.dgpf.de/pfg/2011/Heft_3.pdf.
- CloudCompare (2018): 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project. Homepage. www.cloudcompare.org.
- Costanzo, A., Minasi, M., Casula, G., Musacchio, M., Buongiorno, M. F. (2014): Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and IR Thermography Applied to a Historical Building. Sensors (Basel). Paper. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4327014.
- eDIan – Effiziente Dämmung von Industrieanlagen (2018): BMBF Forschungsprojekt. 3D-Datensatz. <https://gis.flws.de/edian/Measurements/Standpunkt3/Staudinger.html>.
- EiiF – European Industrial Insulation Foundation (2018): TIPCHECK. Homepage. www.eiif.org.
- FARO (2018a): FARO Focus. Homepage. www.faro.com/de-de/produkte/bausektor-bim-cim/faro-focus.
- FARO (2018b): Freestyle 3DX. Homepage. www.faro.com/de-de/produkte/bausektor-bim-cim/faro-scanner-freestyle3d-x.
- FARO (2018c): SCENE. Homepage. www.faro.com/de-de/produkte/produktdesign/faro-scene.
- FLIR (2018): A65. Homepage. www.flir.de/products/a65.
- Gleichauf, J., Pfitzner, C., May, S. (2017): Sensor Fusion of a 2D Laser scanner and a Thermal Camera. PDF. www.scitepress.org/Papers/2017/63973/63973.pdf.
- Grümpel, P., Karl, G. (2017): Identifikation und Lokalisation energetischer Verluste in Industrieanlagen durch die Kombination thermografischer und geometrischer Informationen. Masterarbeit. https://bvg.flws.de/fileadmin/FKV/v/laboratorien/ingenieurvermessung/eDIan/Masterthesis_eDIan.pdf.
- Hoegner, L. (2013): Automatische Texturierung von Fassaden aus terrestrischen Infrarot-Bildsequenzen. Dissertation. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1178212/1178212.pdf>.
- IPA – Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (2018): Qualitätsicherung mit Thermografie. Homepage. www.ipa.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/bild-und-signalverarbeitung/qualitaetssicherung-mit-thermografie.html.
- IZFP – Fraunhofer-Allianz Vision (2018): Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP. Homepage. www.vision.fraunhofer.de/de/vision/ueber/institute/izfp.html.
- Lagüela, S., Diaz-Vilarino, L., Armesto, J., Arias, P. (2012): Thermographic 3D models as the foundation for Building Information Models. 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Paper. www.ndt.net/article/qirt2012/papers/QIRT-2012-180.pdf.
- Leica Geosystems (2018): Der Leica BLK360. Homepage. <https://lasers.leica-geosystems.com/eu/de/blk360>.

- Liebelt, T. M. (2013): Fusion von 3D-Laserscanner-Daten mit 2D-Thermal-Bilddaten. Paper. <http://publica.fraunhofer.de/starweb/servlet.starweb?path=urn.web&search=urn:nbn:de:0011-n-4388250>.
- Luhmann, T. (2010): Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Dissertation. https://dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-645.pdf.
- Luhmann, T., Ohm, J., Piechel, J., Roelfs, T. (2011): Geometrische Kalibrierung von Thermografiekameras. Paper. www.dgpf.de/pfg/2011/pfg2011_1_Luhmann.pdf.
- Maierhofer, C., Krankenhagen, R., Röllig, M., Mecke, R., Schiller, M., Kalisch, U., Meinhardt, J., Hennen, C. (2010): Kombination der aktiven Thermografie mit laserbasierten Verfahren zur Erfassung von 3D-Geometrien in der Denkmalpflege. Paper. www.ndt.net/article/bau-zfp2010/papers/p06.pdf.
- Micro-Epsilon (2018): Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung. Paper. www.micro-epsilon.de/download/products/dati-infrarot-grundlagen--de.pdf.
- RIEGL (2018): RIEGL VZ-2000i. Homepage. www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/58.
- Schuetz, M. (2018): Potree. Homepage. <http://potree.org>.
- SmokeBot (2018): Mobiler Roboter zur Inspektion von Unglücksstellen. Paper. <https://donar.messe.de/exhibitor/hannovermesse/2018/T517169/smokebot-ger-553082.pdf>.
- Trimble Geospatial (2018): RealWorks. Homepage. <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-realworks>.
- Zoller + Fröhlich (2018): Z+F T-Cam. Homepage. www.zf-laser.com/Z-F-T-Cam.150.0.html.

Kontakt

Sebastian Fiedler | Philipp Grümpel | Georg Karl | Stefan Knoblach
Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt
Studiengang Geo
Röntgenring 8, 97070 Würzburg
sebastian.fiedler@fhws.de | PhilippGruempel@gmx.de
GeorgKarl1992@googlemail.com | stefan.knoblauch@fhws.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodesie.info.