

Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und
Landmanagement

Band: 122 (2024)

Heft: 9-10

Artikel: Automatische Generierung thermaler 3D-Gebäudemodelle aus
drohnengestützten Aufnahmen

Autor: Ferrari, Elia / Koch, Andreas / Meyer, Jonas

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1073035>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Automatische Generierung thermaler 3D-Gebäudemodelle aus drohnengestützten Aufnahmen

Gebäude tragen massgeblich zum globalen Energieverbrauch und zu den Treibhausgasemissionen bei. Die thermische Leistung der Gebäudehüllen beeinflusst den Gesamtenergieverbrauch wesentlich. Zur effizienten Detektion von Wärmebrücken (Schwachstellen in der Wärmedämmung) können Drohnen (engl. unmanned aerial vehicles [UAV]) mit einer Thermalkamera zur Inspektion eingesetzt werden. Diese Kamera macht die für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotstrahlung als thermisches Infrarot-Bild (TIR-Bild) sichtbar. Mit einem solchen Sensor können unsichtbare Mängel oder Schäden, die die thermische Leistung der Gebäudehülle beeinträchtigen, durch visuelle Kontrollen erkannt werden.

Les bâtiments contribuent de façon significative à la consommation globale d'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre. La puissance thermique des enveloppes des bâtiments influence considérablement la consommation totale d'énergie. Pour la détection efficace des ponts thermiques (points faibles de l'isolation thermique) on peut employer des drones (angl. unmanned aerial vehicle [UAV]) équipés d'une caméra thermique pour l'inspection. Cette caméra rend visible le rayonnement infrarouge, lui-même invisible pour l'oeil humain, sous forme d'image infrarouge thermique (image TIR). Avec un tel capteur des défauts ou des dégâts invisibles qui entravent la puissance thermique de l'enveloppe du bâtiment peuvent être détectés par des contrôles visuelles.

Gli edifici influiscono in modo significativo sul consumo energetico globale e sulle emissioni di gas a effetto serra. Le prestazioni termiche degli involucri degli edifici hanno un impatto significativo sul consumo energetico complessivo. Per individuare efficacemente i ponti termici (punti deboli nell'isolamento termico), è possibile utilizzare per le ispezioni dei droni (UAV) dotati di telecamera termica. Quest'ultima visualizza i raggi infrarossi, invisibili all'occhio umano, sotto forma di immagine a infrarossi termici (immagine TIR). Con un sensore di questo tipo, è possibile individuare con controlli visivi, difetti o danni solitamente invisibili che compromettono le prestazioni termiche dell'involucro degli edifici.

E. Ferrari, A. Koch, J. Meyer, S. Nebiker

Wird nun mit einem UAV das gesamte Gebäude mit überlappenden Aufnahmen erfasst, kann aus diesen Aufnahmen mittels einer photogrammetrischen Mehrbildauswertung – konkret mittels Structure-from-Motion (SfM) – ein 3D-Modell des erfassten Objekts generiert werden. Dieses Verfahren wird mit RGB-Bildern routinemässig eingesetzt, ist aber mit

TIR-Bildern noch kaum untersucht und nicht etabliert – u.a. wegen der deutlich geringeren Auflösung der TIR-Aufnahmen.

Seit Kurzem sind erste UAVs mit Multi-Sensor-Konfigurationen ausgestattet und können dadurch synchron Bilder im sichtbaren und thermalen Infrarot erfassen (vgl. Abb. 1). Eine kombinierte Auswertung der RGB- und TIR-Bilddaten soll eine robustere und genauere Generierung thermaler 3D-Gebäudemodelle ermögli-

chen. Solch geometrisch exakte 3D-Modelle würden eine deutlich bessere Beurteilung der gesamten Gebäudehülle und Planung von Sanierungsmassnahmen erlauben.

In Rahmen eines Masterprojekts am Institut Geomatik FHNW (Koch, 2024) wurden RGB- und TIR-Bilder von einem Testgebäude aufgenommen, um damit einen Prozess für die automatisierte Erstellung eines thermischen 3D-Modells zu entwickeln. In diesem Zusammenhang wurden Genauigkeitsuntersuchungen bezüglich Geometrie und Temperaturwerte durchgeführt, um die erzielbare Qualität des Endproduktes zu überprüfen.

Methoden

Aufnahme- und Passpunktkonfiguration

Für die Erfassung der Luftbilder wurde das Drohnenmodell «DJI Mavic 3 Enterprise Thermal M3T» eingesetzt, welches mit einem Multi-Sensor-Kamerakopf gleichzeitig RGB- und TIR-Bilder erfassen kann. Die Thermaldaten werden mit einer Genauigkeit von $\pm 2^\circ\text{C}$ erfasst, während die Weitwinkelkamera die Erfassung des sichtbaren Lichts auf Bildern mit 48 Megapixeln erlaubt. Die Befliegungen wurden mit verschiedenen Aufnahmekonfigurationen getestet, um die optimale Lösung für eine automatische Bildorientierung mit RGB- und TIR-Bildern zu evaluieren. Dazu wurden Nadir-Aufnahmen (senkrecht nach unten), Schräg- bzw. Oblique-Aufnahmen (um 45° geneigt) sowie manuelle Aufnahmen in unterschiedlichen Flugplan-Varianten kombiniert und getestet. Eine Thermalsensorkalibrierung erfolgte jeweils zu Beginn des Fluges, um optimale Temperaturwerte für jeden Datensatz zu erhalten.

Die Verteilung der Bodenpasspunkte hat einen Einfluss auf die Homogenität der Resultate sowie auf die erzielbaren Genauigkeiten. Daher wurden gut verteilte Pass- und Kontrollpunkte aus Alufolie sowohl auf dem Boden als auch an der Fassade befestigt, welche in den RGB- und Thermalbildern gut ersichtlich sind, wie in Abb. 2 illustriert.



Abb. 1: Beispiel für RGB- und TIR-Bild einer Nachtbefliegung in Winterthur mit einer DJI M3T-Drohne, im Rahmen des Projektes ThermoPlaner3D (<https://www.thermoplaner3d.ch>).

Die Kontrollpunkte sollen bei der Analyse eine Aussage über die Genauigkeit der Textur ermöglichen, während die Passpunkte zur Stützung der Bildorientierung und zur Georeferenzierung des Objektes dienen. Die Koordinaten der Pass- und Kontrollpunkte wurden durch mehrfache RTK-GNSS-Messungen bestimmt. Zusätzlich wurden mittels tachymetrischer Messungen auch die Koordinaten der Kontrollpunkte an den Fassaden bestimmt.

Referenzmessungen

Für die Validierung von absoluten Temperaturwerten wurde vor und nach den UAV-Befliegungen mit einer Wärmebildkamera «FLIR E40» die Temperatur von ausgewählten Punkten aus jeweils drei verschiedenen Positionen mit einem Objektstand von ca. zwei Metern gemessen. Diese Wärmebildkamera erlaubt es, unabhängige Wärmebilder und punktuelle Messungen mit einer Genauigkeit von $\pm 2^\circ\text{C}$ zu erfassen. Die Temperaturmessungen der gleichen Punkte wurden mehrfach durchgeführt, wobei jeweils etwa 20 Minuten zwischen den Aufnahmen lagen, um mögliche Schwankungen in den Messwerten durch vorübergehende Einflüsse zu minimieren.

Bildorientierung und Kamera-Rig-Definition

Der photogrammetrische Kernprozess ist die Schätzung der inneren und äusseren Orientierung. Dabei werden die internen Kameraparameter wie etwa Brennweite und Bildhauptpunkt sowie die Lage und

Orientierung der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme bestimmt. Da die RGB- und TIR-Bilder kombiniert ausgewertet werden sollten und die zwei Sensoren (RGB und TIR) nicht dieselben Projektionszentren aufweisen, muss ein sogenanntes Kamera-Rig mit den zwei Sensoren definiert werden. Dieses definiert die relative Orientierung der TIR-Kamera in Bezug auf die RGB-Kamera und garantiert somit, dass diese für alle Bildaufnahmen konstant bleibt. Da erwartet werden kann, dass die RGB-Bilder erfolgreich orientiert werden können, stellt die Rig-Definition eine Hilfestellung für die Orientierung der TIR-Bilddaten dar. Zusätzlich werden durch die Rig-Definition die Anzahl unbekannter Parameter in der Ausgleichung deutlich reduziert. Um ein konsistentes Ergebnis zu erzielen, musste die Brennweite der TIR-Kamera fixiert werden. Die restlichen Parameter der inneren und äusseren bzw. relativen

Orientierung beider Kameras wurden im Rahmen der Bündelausgleichung mitgeschätzt.

3D-Modell und Prozessautomatisierung

Ein weiterer Forschungsaspekt des Projekts war die Automatisierung des Auswerteverfahrens bis zur 3D-Modellgenerierung. Dazu wurden die einzelnen Prozessschritte mithilfe der Python-Programmierschnittstelle (API) der Software Agisoft Metashape zu einem Gesamtprozess zusammengefügt. Darin werden zuerst die Daten eingelesen, das Kamera-Rig festgelegt und das Zielkoordinatensystem für die Transformation definiert. Danach erfolgt die kombinierte Bildorientierung der RGB- und TIR-Bilder. Aus den orientierten Bildern werden dann eine dichte Punktwolke sowie eine Dreiecksvermaschung (3D-Mesh) gerechnet. Mithilfe des DJI-Thermal-SDK werden anschliessend die Temperaturwerte der TIR-Bilder anhand von Aufnahmedistanz und Kalibrierungswerten wie Luftfeuchtigkeit und -temperatur sowie Strahlungsintensität des Hintergrundes korrigiert. Danach werden die Thermalbilder vom proprietären radiometrischen JPG-Format in ein praktischeres TIFF-Format mit einem einzigen Kanal konvertiert. Die orientierten Originalthermalbilder werden durch die neu generierten Thermalbilder ersetzt und für die Kolorierung der Punktwolke sowie die Texturierung des 3D-Meshes weiterverwendet (Abb. 3, rechts).

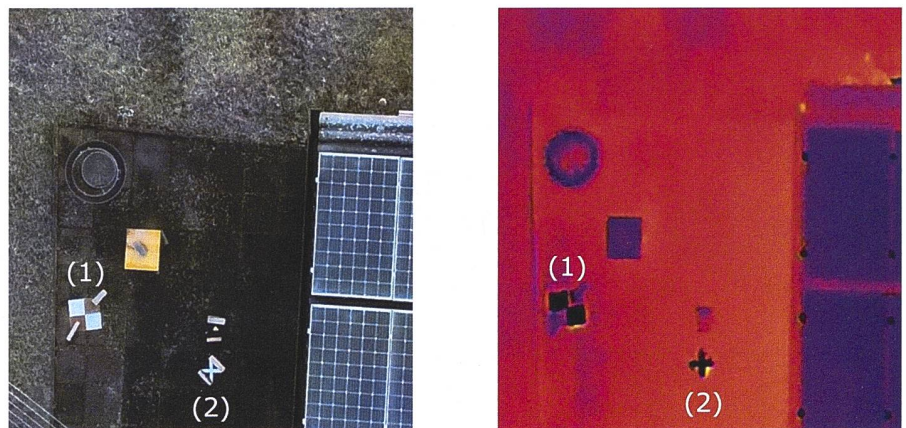


Abb. 2: Beispiel für einen befestigten Passpunkt (1) und Kontrollpunkt (2) in einer RGB- (links) und TIR-Aufnahme (rechts).

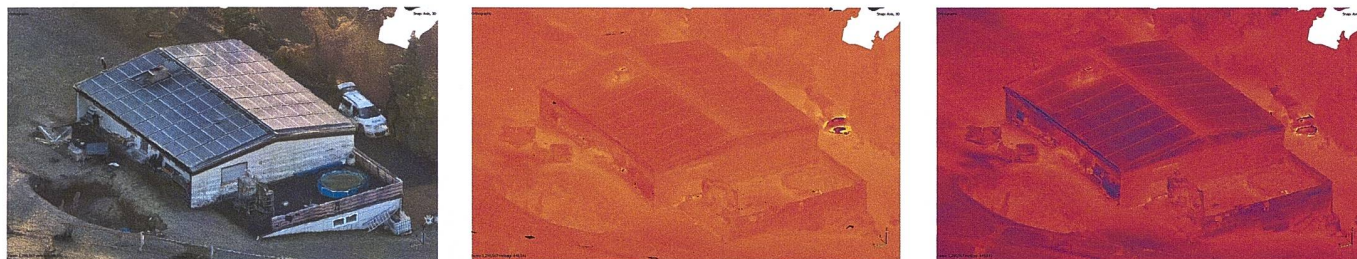


Abb. 3: Finales 3D-Modell aus der kombinierten Auswertung von RGB- und TIR-Bilddaten. Von links nach rechts texturiert mit: RGB-Bildern, original TIR-Bildern und korrigierten TIR-Bilddaten (TIR-Daten in Falschfarbendarstellung).

Dies ist ein wesentlicher Schritt zur Ermittlung der tatsächlichen Temperaturwerte am Objekt, die ohne Kalibrierungswerte nicht der Realität entsprechen würden (Abb. 3, Mitte/rechts).

Ergebnisse und Diskussion

Bildorientierung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die drei Standard-Aufnahmekonfigurationen Nadir, manuell-kreisförmig und Oblique (Abb. 4, a–c) getestet. Während Nadir und manuell-kreisförmig Lücken oder Bereiche mit niedrigerer Dichte zur Folge haben, ermöglichen Oblique-Aufnahmen sowohl eine zufriedenstellende Erfassung der Fassaden sowie eine homogene Bodenauflösung. Sämtliche RGB-Bilder der Oblique-Aufnahmen liessen sich erfolgreich automatisch orientieren. Im Gegensatz dazu konnte trotz der Kamera-Rig-Definition nur rund die Hälfte der TIR-Bilder orientiert werden. Mithilfe zusätzlicher manueller Oblique-Nahaufnahmen (Abb. 4, d) konnten die RGB- und TIR-Bilder schlussendlich kombiniert orientiert werden. Möglicher Grund für die Schwierigkeiten ist die deutlich geringere Auflösung des Thermalsensors im Vergleich zum RGB-Sensor. Die Nahaufnahmen ermöglichen die Verknüpfung der Bilder

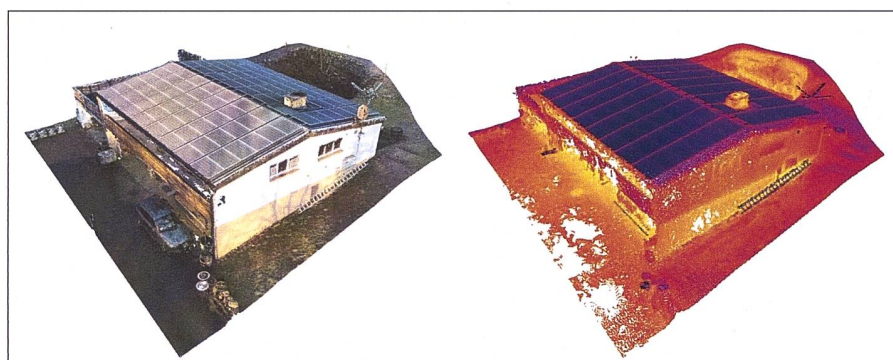


Abb. 5: Dichte Punktwolke generiert aus RGB-Bildern (links); generiert aus Kombination von RGB- und TIR-Bildern mit Falschfarben-Thermaltextur (rechts).

aufgrund vergleichbarer Bodenaufl sungen. Die Ergebnisse zeigen einen durchschnittlichen Reprojektionsfehler von 2.3 Pixeln für die TIR-Bilder mit einer Bodenauflösung von 3 cm/px und von 1.3 Pixeln für die RGB-Bilder mit einer Bodenauflösung von 1 cm/px.

Evaluation Punktwolke

Der Vorteil des vorgestellten kombinierten Auswerteverfahrens von RGB- und TIR-Daten gegenüber der Auswertung von reinen TIR-Bilddaten liegt in den sehr hohen Punktdichten der resultierenden Punktwolken. Die Punktwolke aus dem kombinierten Verfahren (Abb. 5, rechts) weist eine vergleichbare Punktdichte wie

die RGB-Punktwolke auf (Abb. 5, links). Allerdings ist bei genauer Betrachtung beider Punktwolken ein deutlich höheres Rauschen in der Punktwolke aus dem kombinierten Verfahren zu erkennen. Ein geometrischer Vergleich zwischen RGB-Punktwolke (Referenz) und Punktwolke aus der kombinierten Auswertung zeigt, dass rund 40% der Punkte Abweichungen von bis zu 2 cm und 90% der Punkte Abweichungen von bis zu 5 cm zur RGB-Punktwolke aufweisen. Dieses Rauschen und die damit einhergehenden Abweichungen der kombinierten Punktwolke sind durch die deutlich ungenaueren Bildorientierungen der TIR-Bilddaten zu erklären.

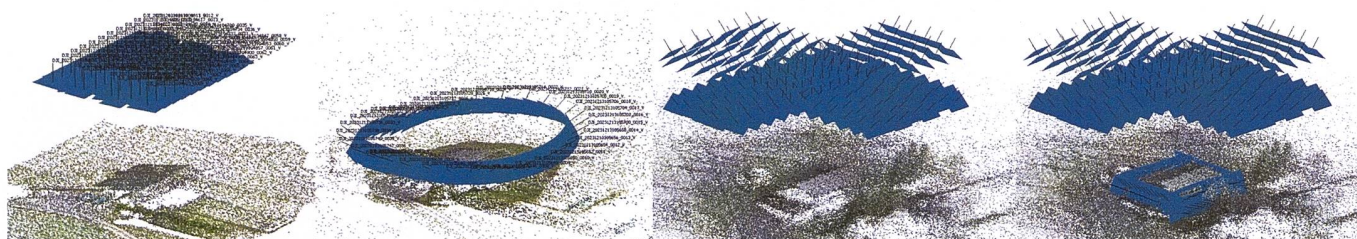


Abb. 4: Getestete Aufnahmekonfigurationen von links nach rechts: a) Nadir; b) manuell-kreisförmig; c) Oblique; d) Oblique mit zusätzlichen Oblique-Nahaufnahmen.

Evaluation 3D-Modell und Thermaltextur

Die Bildorientierung der TIR-Bilder ist mit einer durchschnittlichen Abweichung von rund 7 cm im Objektraum deutlich ungenauer als jene der RGB-Bilder mit einer durchschnittlichen Abweichung von rund 1.5 cm. Um die Auswirkung dieser Diskrepanzen auf das finale Produkt – ein texturiertes 3D-Modell – zu untersuchen, wurde das 3D-Mesh aus der kombinierten Punktwolke sowohl mit RGB- als auch mit den korrigierten TIR-Bilddaten texturiert. Die generierten Texturen aus den RGB- und TIR-Bilddaten haben eine Auflösung von 1 cm/px respektive von 3 cm/px. An den Fassaden angebrachte Kontrollpunkte wurden in beiden Modellen gemessen und die Differenzen (Raumdistanz) berechnet. Dabei ergaben sich Differenzen von 5 bis 11 cm. Es ist davon auszugehen, dass die Differenzen hauptsächlich durch die ungenaueren Parameter der äusseren Orientierungen der TIR-Bilddaten zustande kommen. Abb. 6 zeigt einen visuellen Vergleich der beiden Texturen. Darauf lässt sich erkennen, dass die Struktur der Photovoltaikanlage sowie die verschiedenen Isolationsstärken zwischen dem Erdgeschoss und dem 1. Obergeschoss gut zu unterscheiden sind. Trotz einer maximalen Abweichung von 11 cm zeigen die Gesamtmodelle zufriedenstellende Resultate für die Anwendungen eines thermischen Modells.

Genauigkeit der Temperaturwerte

Für die Validierung der absoluten Temperaturwerte wurden die Bilder der Wärmebildkamera FLIR E40 verwendet. Die Referenzwerte für die drei Überwachungspunkte wurden aus dem Mittel von 6 Bildern gebildet. Pro Bild wurde die Temperatur als Mittelwert aus sämtlichen Werten im Umkreis von 6 Pixel berechnet. Die Differenzen zwischen den Referenz-

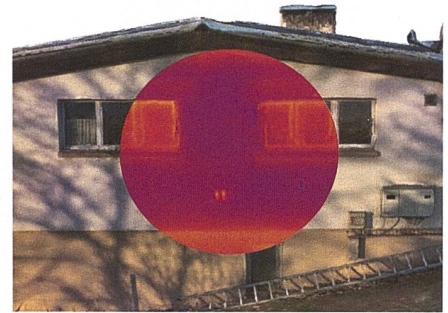
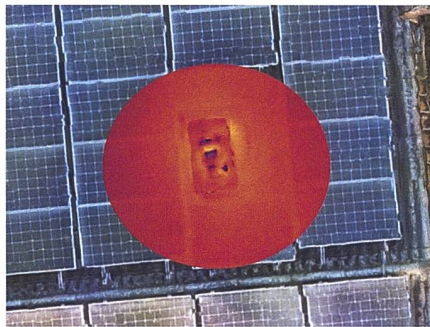


Abb. 6: Ausschnitte von RGB- (im Hintergrund) und Thermaltextur (kreisförmig, im Zentrum), Dachaufsicht (links), Ostfassade (rechts).

daten und den UAV Thermaldaten streuen zufällig und liegen innerhalb der einfachen Standardabweichung von 2.8°C ($2 \cdot \sqrt{2}$). Somit kann konstatiert werden, dass die erzielten Ergebnisse innerhalb der zu erwartenden Genauigkeit liegen.

Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieses Projekts konnte gezeigt werden, dass die automatisierte, kombinierte Auswertung von RGB- und Thermalbilddaten zu einem thermischen 3D-Modell machbar ist. Die angestellten Untersuchungen haben zudem aufgezeigt, dass unterschiedliche geometrische Auflösungen von RGB- und TIR-Sensoren zusätzliche Nahbereichsaufnahmen notwendig machen, um eine automatisierte Auswertung zu ermöglichen. Die resultierenden Endprodukte weisen eine zufriedenstellende Qualität hinsichtlich Geometrie und Texturinformationen für den Anwendungsfall von thermischen 3D-Modellen auf. Insbesondere die sehr hochaufgelöste Punktwolke mit Thermalinformation eröffnet neue Möglichkeiten für deutlich detailliertere Beurteilungen der gesamten Gebäudehülle und die Planung von Sanierungsmassnahmen. Zusätzlich wurde demonstriert, dass die erfassten UAV-Thermalwerte im Rahmen der Hersteller-genauigkeit liegen.

In weiterführenden Arbeiten wären vertiefte Genauigkeitsanalysen basierend auf terrestrischen Referenzdaten spannend sowohl in Bezug auf geometrische wie auch thermale Informationen. Weiter existieren neuartige 3D-Rekonstruktionsmethoden wie Neural Radiance Fields (NeRF) oder Gaussian Splatting, welche potenziell Vorteile in Bezug auf die Auswertung von Thermaldaten gegenüber traditionellen photogrammetrischen Methoden bieten.

Referenzen:

Koch, A., 2024. 3D-Modellierung mittels drohnengestützter Thermalaufnahmen. Master-Vertiefungsprojekt 1, MSE in Geomatics, Institut Geomatik, FHNW.

Elia Ferrari
Andreas Koch
Jonas Meyer
Stephan Nebiker
Institut Geomatik
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik
Fachhochschule Nordwestschweiz
Hofackerstrasse 30
CH-4132 Muttenz
elia.ferrari@fhnw.ch
andreas.koch@students.fhnw.ch
jonas.meyer@fhnw.ch
stephan.nebiker@fhnw.ch