

Kombination von Thermographie und Laserscanning zur Erfassung und Visualisierung von Störstellen mittels BIM

Melanie Müßle¹

¹Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie,
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: melanie.muessle@kit.edu

Abstract: Die Thermographie ist ein wichtiges Verfahren zur Analyse von Bestandsbauten. Mit dieser zerstörungsfreien Prüfmethode können z. B. Schadensinspektionen durchgeführt oder Wärmebrücken an Gebäuden aufgespürt werden. Standardwärmebildkameras liefern zweidimensionale Thermogramme ohne räumlichen Bezug. Zur besseren Interpretierbarkeit und räumlichen Verortung der Wärmebilder ist es notwendig, diese mit einem dreidimensionalen Modell des Gebäudes zu verknüpfen. Die Gebäudestruktur kann z. B. mithilfe eines Laserscanners erfasst und als dreidimensionale Punktwolke dargestellt werden, welche als Grundlage für das BIM-Modell dient. In diesem Beitrag wird ein Überblick über Methoden zur Kombination von Wärmebildern und 3D-Punktwolken gegeben und diese miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass die automatisierte Interpretation und BIM-Integration der kombinierten Daten aktuell noch in den Kinderschuhen steckt und weiter Gegenstand zukünftiger Forschung sein wird. Als Fallbeispiel wird die aktive Thermographie zur Erfassung von visuell nicht sichtbaren metallischen Störstellen beim Rückbau von Kernkraftwerken eingesetzt. Diese in den Betonflächen der Gebäude eingebauten Objekte sind zur Planung des Rückbaus exakt zu erfassen und innerhalb der Gebäudeflächen zu lokalisieren. Die Eignung der vorgestellten Methoden für die beschriebene kerntechnische Anwendung wird diskutiert und ein aus 3 Schritten bestehendes Verfahren zur BIM-Integration der Ankerplatten vorgeschlagen.

Keywords: Building information modeling (BIM), Bestandserfassung, Thermographie, Datenfusion



Erschienen in Tagungsband 35. Forum Bauinformatik 2024, Hamburg, Deutschland, DOI: 10.15480/882.13496
© 2024 Das Copyright für diesen Beitrag liegt bei den Autoren. Verwendung erlaubt unter Creative Commons Lizenz Namensnennung 4.0 International.

1 Einleitung

Als Grundlage für die Planung von Sanierungen, Umbauten, Erweiterungen oder dem Rückbau bestehender Gebäude und Infrastrukturen wird häufig ein digitales Bestandsmodell erstellt. Voraussetzung ist die 3D-Bestandserfassung des Bauwerks. Als Ergebnis wird dabei eine Punktwolke erzeugt, anhand derer ein dreidimensionales Modell des Bauwerks abgeleitet werden

kann, welches die Grundlage für die Anwendung der BIM-Methodik bildet. Insbesondere zur Planung von Sanierungsmaßnahmen werden zusätzliche Informationen über den Zustand eines Bauwerks benötigt, welche mit optischen Methoden wie z. B. dem Laserscanner nicht erkennbar sind. Hier kommt die bildgebende Thermographie ins Spiel. Mit dieser zerstörungsfreien Prüfmethode können z. B. Schäden inspiziert oder Wärmebrücken an Gebäuden aufgespürt werden [1]. Das Ergebnis ist ein Wärmebild, also eine zweidimensionale farblich oder in Grauwerten codierte Darstellung der Temperaturverteilung auf der Oberfläche der abgebildeten Objekte. Wärmebilder lassen sich ohne Hintergrundwissen über die abgebildeten Objekte und Strukturen oft nur schwer interpretieren [1]. Für viele Anwendungen ist es daher von Vorteil, die Informationen der Wärmebilder mit einer dreidimensionalen Darstellung des entsprechenden Bauwerks zu verknüpfen, so dass diese Informationen eindeutig lokalisiert und im Zusammenhang betrachtet werden können [1], [2]. Um die Thermaldaten räumlich verorten zu können, muss eine Fusion der Wärmebilder mit der Punktwolke sowie eine Integration der Informationen in das BIM-Modell stattfinden.

In der Literatur lassen sich zwei wesentliche Ansätze zur Kombination von Thermographie- und 3D-Messdaten unterscheiden [3], je nachdem, ob der Fokus auf der kombinierten Messdurchführung der unterschiedlichen Sensoren liegt oder auf der Zusammenführung der unabhängig voneinander erfassten Daten. In allen untersuchten wissenschaftlichen Artikeln zum Thema wird entweder der erste oder der zweite Ansatz verfolgt. Dieser Beitrag liefert dahingegen einen Überblick und Vergleich beider Ansätze (Kapitel 2). Kapitel 3 gibt einen Überblick über die BIM-Integration der kombinierten Daten. In Kapitel 4 wird ein Fallbeispiel aus dem kerntechnischen Rückbau vorgestellt und die Eignung der Verfahren dafür diskutiert. Abschließend erfolgt in Kapitel 5 ein Fazit.

2 Kombination von Wärmebildern und Punktwolken

Unabhängig vom gewählten Ansatz sollte die Wärmebildkamera vor dem Einsatz geometrisch (siehe z. B. [1], [4]) und – sofern absolute Temperaturwerte von Interesse sind – auch radiometrisch (z. B. [2]) kalibriert werden, um die Qualität der Ergebnisse zu steigern und zu validieren [2].

2.1 Sensorgetriebene Fusion

2.1.1 Kombiniertes Messsystem

Für diesen Ansatz zur Kombination von Thermal- und 3D-Daten ist der Aufbau eines Messsystems wesentlich, das eine gemeinsame Durchführung und Zuordnung der Messungen ermöglicht. Im besten Fall existiert ein mobiles Multisensorsystem [5], bestehend aus mindestens einem Sensor zur 3D-Datenerfassung (z. B. Laserscanner, 360°-Kamera oder RGB-Stereokamerasystem) sowie einer (360°-)Wärmebildkamera. Die Sensoren sind in einem festen Abstand auf einer (mobilen) Plattform montiert. Die relative Position und Ausrichtung der Sensoren untereinander kann im Rahmen einer gemeinsamen gegenseitigen Kalibrierung vor Beginn der eigentlichen Aufnahmen ermittelt werden [5], [6]. Mithilfe der dabei bestimmten Transformationsparameter können die Lage und Ausrichtung der Wärmebildkamera im dreidimensionalen Koordinatensystem der Punktwolke

aus der 3D-Vermessung zu jedem Aufnahmezeitpunkt berechnet werden [6]. Sofern die Sensoren keinen festen Abstand zueinander haben, kann der sensorgetriebene Ansatz trotzdem realisiert werden, indem Lage und Ausrichtung der Wärmebildkamera z. B. mittels eines Tracking-Systems zu jedem Messzeitpunkt exakt erfasst werden. Beispiele dafür finden sich in [7] und [8].

2.1.2 Thermale Texturierung der Punktwolke

Sind Position und Ausrichtung der Wärmebildkamera relativ zum 3D-Messsystem bekannt, kann eine korrekte Registrierung der Wärmebilder auf die 3D-Punktwolke mittels Ray-Tracing ermöglicht werden [6], [7]. Dabei wird für jeden Punkt der Punktwolke der Verbindungsstrahl vom Messzentrum des Laserscanners (bzw. vom Referenzpunkt des entsprechenden RGB-(Stereo-)Kamerasystems) zum entsprechenden 3D-Punkt hinsichtlich eines Schnittes mit der Bildebene der Wärmebildkamera zum Zeitpunkt der jeweiligen Aufnahme untersucht. Existiert ein solcher Schnittpunkt, wird der Wert des Wärmebildes an dieser Stelle interpoliert und auf den 3D-Punkt des jeweiligen Verbindungsstrahls übertragen, so dass nach und nach die gesamte Punktwolke mit Thermalwerten texturiert wird. Der entsprechende Algorithmus wird insbesondere in [7] ausführlich erläutert.

2.2 Datengetriebene Fusion

In vielen Fällen existiert kein kombiniertes Messsystem, d. h. 3D-Vermessung und Thermographie werden unabhängig voneinander durchgeführt, oft auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Positionen der Sensoren zum Aufnahmezeitpunkt sind hierbei nicht genau bekannt. Die Verortung der Wärmebilder in der Punktwolke muss nachträglich durch eine rein datenbasierte Fusion erfolgen.

2.2.1 Kombination von 2D- und 3D-Thermaldaten mit den Daten der 3D-Vermessung

Im Standardfall geht es darum, zweidimensionale Wärmebilder mit einer dreidimensionalen Punktwolke zu kombinieren. Die räumliche Verortung der Wärmebilder in der Punktwolke wird in diesem Fall über die Zuordnung abgebildeter Objekte durchgeführt, welche sich sowohl in den Wärmebildern als auch in der Punktwolke eindeutig identifizieren lassen. Die Herausforderung dabei liegt in der relativ niedrigen räumlichen Auflösung von Wärmebildkameras sowie in der Tatsache, dass sich viele Objekte in Wärmebildern deutlich schwerer identifizieren lassen als in RGB-Bildern oder Laserscans [9]. Dafür enthalten Wärmebilder wiederum auch Strukturen, die in RGB-Bildern überhaupt nicht sichtbar sind. Manche Wärmebildkameras bieten die Möglichkeit, gleichzeitig Thermal- und RGB-Bilder aufzunehmen. Obwohl es sich um ein und dasselbe Gerät handelt, sind die Objektive und Bildebenen der beiden Kamerasensoren nicht identisch. Analog zur gegenseitigen Kalibrierung der einzelnen Messgeräte eines Multisensorsystems muss auch hier die relative Orientierung der beiden Kamerasensoren vorab bestimmt werden, wie z. B. in [9] erläutert. Sofern die Abweichung rechnerisch berücksichtigt wird, kann die Identifizierung der markanten Objekte daraufhin in den RGB-Bildern anstelle der Wärmebilder vorgenommen werden [9], wofür bereits Algorithmen zur automatisierten Zuordnung erprobt sind. Ein Spezialfall des datengetriebenen Ansatzes beruht auf der Kombination von direkt dreidimensional erfassten Thermographiedaten mit einer dreidimensionalen Punktwolke aus der 3D-Vermessung. Die 3D-Thermographie kann auf

verschiedene Wege realisiert werden: In [11] wurde ein Panoramakopf entwickelt, auf welchem eine Wärmebildkamera in zwei verschiedenen Höhen angebracht und horizontal sowie vertikal rotiert werden kann. Durch Kombination der Bilder aus beiden Höhen lassen sich nach dem Prinzip der Stereophotogrammetrie [11] dreidimensionale Koordinaten berechnen. Eine Erweiterung dieses Prinzips der 3D-Rekonstruktion auf Multi-View-Stereo sowie eine Zuordnung mehrerer sich überlappender Wärmebilder mittels Structure from Motion (SfM) wird z. B. in [12] durchgeführt. In [13] dagegen werden direkt thermale Punktwolken von Indoor- und Outdoor-Szenen mithilfe einer 360°-Wärmebildkamera erzeugt. Nachteile der dreidimensionalen Thermographie, wie die relativ niedrige räumliche Auflösung und Genauigkeit, lassen sich gemäß [3] und [11] durch eine Kombination mit einer höher aufgelösten Punktwolke aus der 3D-Vermessung ausgleichen.

2.2.2 Transformation der Thermaldaten in die Punktwolke über identische Punkte

Für die räumliche Transformation eines Bildes an die richtige Position in der Punktwolke sind mindestens sechs identische Punkte erforderlich [4]. Oft (u. a. in [4] und [9]) wird die Auswahl und Zuordnung dieser Punkte, z. B. markanter Objektecken, händisch vorgenommen. Anhand der Koordinaten der Punkte im jeweiligen Koordinatensystem werden für jedes Bild die Transformationsparameter berechnet und die Bilder transformiert. Im nächsten Schritt muss die Punktwolke wie in Abschnitt 2.1.2 mit den Wärmebilddaten texturiert werden [4], [9]. Ansätze zur automatisierten Zuordnung identischer Objekte zwischen Wärmebildern und RGB-Daten existieren ebenfalls: In [10] erfolgt die Zuordnung über automatisch segmentierte Linien. In [1] wird der sog. RIFT-Algorithmus vorgestellt, der eine automatisierte Zuordnung von Bildern unterschiedlicher Spektralbereiche ermöglicht. Auch 3D-Thermaldaten können anhand von identischen Objekten in die Punktwolke der 3D-Vermessung transformiert werden. Darauf aufbauend wird jeder Punkt der höher aufgelösten Punktwolke mit dem nächstgelegenen Temperaturwert der thermalen Punktwolke texturiert [1].

2.3 Vergleich

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der geschilderten Kombinationsmöglichkeiten. Der in Abschnitt 2.1 beschriebene sensorgetriebene Ansatz zur Kombination von bildgebender Thermographie und 3D-Vermessung beruht auf einer kombinierten Durchführung der verschiedenen Messungen. Dabei liegen Informationen zu den einzelnen Sensoren und deren relativer Position und Ausrichtung bereits während der Messung vor oder werden in Echtzeit erfasst. Dies erfordert einen erhöhten Aufwand für den Aufbau des Messsystems und die Vorbereitung der Messungen. Der in Abschnitt 2.2 geschilderte Ansatz dagegen beinhaltet eine rein datenbasierte Fusion. Hierbei können die Messungen unabhängig voneinander erfolgen und die Zusammenführung von Punktwolke und Thermaldaten wird allein auf Grundlage der erfassten Daten durchgeführt, was einen erhöhten Auswerteaufwand bedeutet. Die Qualität des datenbasierten Ansatzes hängt im Wesentlichen davon ab, wie viele gemeinsame Strukturen in den unterschiedlichen Datensätzen identifiziert und wie genau diese zugeordnet werden können. Dieser Ansatz kann nur gewählt werden, wenn die erfassten Objekte eine eindeutige Zuordnung erlauben. Die Genauigkeit des ersten Ansatzes dagegen wird im Wesentlichen durch die Genauigkeit der gegenseitigen Kalibrierung bzw. der

Positionsbestimmung festgelegt. Dieser Ansatz ist vor allem dann zu wählen, wenn die Zuordnung unabhängig von den erfassten Objekten erfolgreich sein soll. Wiederholte Wärmebildaufnahmen können beim zweiten Ansatz auf demselben Wege wie die Erstaufnahme integriert werden. Die Datenmenge ist relativ gering, insbesondere wenn Wärmebilder nur punktuell von einzelnen zu inspizierenden Objekten oder Gebäudeteilen benötigt werden. Der erste Ansatz dagegen erfordert jedesmal eine parallele 3D-Vermessung, was zu einer großen Menge an redundanten Daten führt.

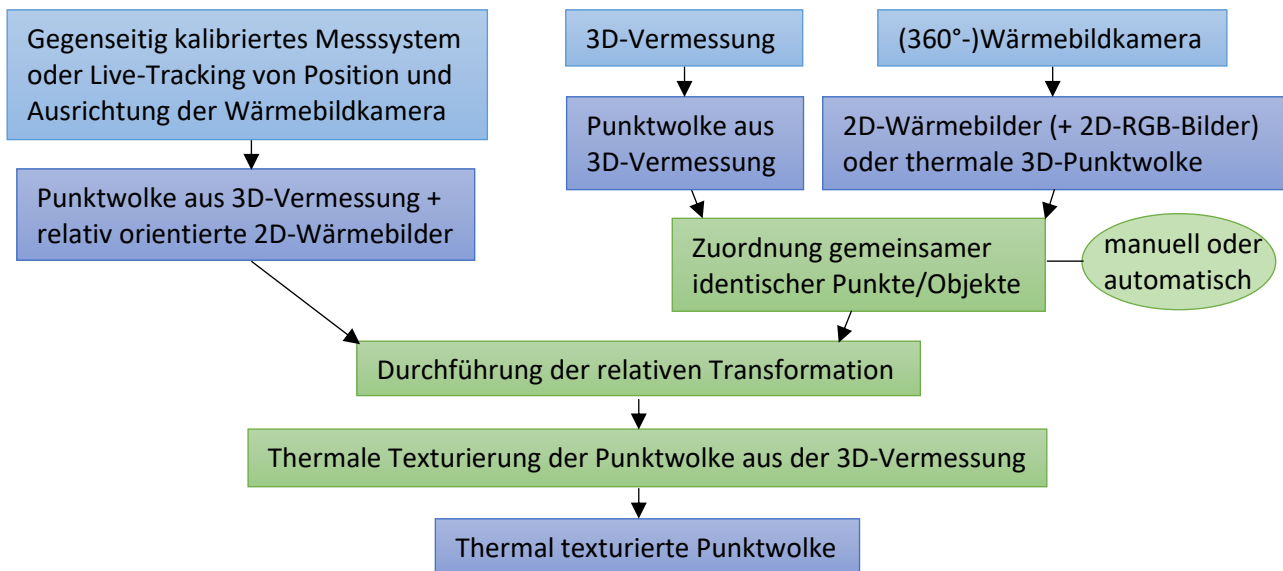


Abbildung 1: Übersicht über Kombinationsmöglichkeiten

3 BIM-Integration der Thermaldaten

Der Schwerpunkt in der Literatur liegt eindeutig auf der Erzeugung von thermal texturierten Punktwolken. Nur wenige Artikel behandeln die BIM-Integration dieser kombinierten Daten oder davon abgeleiteter Informationen. Ausgewählte Verfahren werden in diesem Kapitel vorgestellt.

3.1 Grafische Integration von Thermaldaten ins BIM als zusätzlicher Layer

Eine grafische Integration und Visualisierung kann z. B. durch Projektion der Thermaldaten auf das zugehörige Gebäudemodell umgesetzt werden, wie in [6] für weitere Untersuchungen vorgeschlagen wird. Eine Umsetzung erfolgt z. B. in [12], wo manuell ein grobes Gebäudemodell erstellt wird, auf welches die thermal texturierte Punktwolke orthogonal projiziert und das Orthothermogramm in Form eines Zusatzlayers zum Modell in der BIM-Software abgespeichert wird.

3.2 Semantische Integration von Thermaldaten ins BIM

Auch für die semantische Integration von Thermaldaten werden in vielen Fällen Orthothermogramme für einzelne Gebäudeteile berechnet. Diese werden jedoch nicht grafisch ins Modell integriert. Stattdessen wird daraus z. B. die Durchschnittstemperatur des Objekts [13] oder für Wände eine bauphysikalische Kenngröße [14], [15] (in der Regel R- oder U-Wert)

teilautomatisiert ermittelt und dem jeweiligen BIM-Objekt tabellarisch zugeordnet. Die Geometriedaten sowie die jeweilige thermale Kenngröße werden in den genannten Beiträgen in einer sogenannten gbXML-Datei zusammengefasst, einem Standard zum Austausch von BIM-Daten, welcher vor allem zur energetischen Analyse von Gebäuden eingesetzt wird.

3.3 BIM-Integration von extrahierten Objekten aus der thermalen Punktwolke

Die Ableitung von Informationen aus den dreidimensionalen Thermaldaten findet oftmals manuell statt [2]. Es finden sich nur wenige Beispiele, bei denen automatisiert Strukturen in thermalen Punktwolken segmentiert werden, z. B. [16] und noch weniger, in denen daraus BIM-Objekte erzeugt werden, z. B. [17]. Hier werden sowohl die wärmsten als auch die kältesten Bereiche einer Decke selektiert und mithilfe eines Clustering-Algorithmus gruppiert und zu Bauteilen zusammengefasst.

4 Praktische Anwendung beim Rückbau kerntechnischer Anlagen

Für den Rückbau eines Kernkraftwerks müssen sämtliche Betonflächen des Gebäudes erfasst und freigemessen werden, um nachzuweisen, dass die Aktivität unterhalb des Freigabegrenzwerts gemäß der Strahlenschutzverordnung liegt. Vor der Freimessung sind alle in den Betonflächen oberflächennah enthaltenen Objekte, wie z. B. (Rohr-)Durchführungen oder Ankerplatten exakt zu erfassen und zu lokalisieren, da diese bei der Messung und deren Auswertung separat zu betrachten sind. Eine Herausforderung liegt darin, Ankerplatten zu detektieren, die völlig plan in den Betonflächen liegen und gleichzeitig mit einer mehrere Millimeter dicken Dekontaminationsschicht überdeckt sind (Abbildung 2 links). Diese Platten sind in der Punktwolke nicht sichtbar, aber nach aktiver Erwärmung thermographisch erfassbar (Abbildung 2 rechts). Ziel ist es, diese Ankerplatten an richtiger Position in das BIM-Modell zu integrieren. In einer Fallstudie wurden 5 Räume mit insgesamt 35 Gebäudeflächen untersucht, wovon knapp 20% verdeckte Ankerplatten enthalten, die thermographisch zu erfassen sind. Zur Integration der Ankerplatten in das BIM-Modell sind 3 Schritte notwendig: Der 1. Schritt ist die Transformation der Wärmebilder in die Punktwolke. Um die Zahl der notwendigen identischen Punkte zu reduzieren, wird alternativ eine Transformation in die gemäß [18] erzeugten RGB-Orthobilder der Gebäudeflächen durchgeführt. Es zeigt sich, dass die meisten Gebäudeflächen viele zuordenbare Strukturen (Öffnungen oder sichtbare Metallteile) enthalten, was einer datenbasierten Kombination förderlich ist oder so klein sind, dass die Flächen komplett mit einer Aufnahme erfasst werden können, was eine Zuordnung über die Eckpunkte ermöglicht. Etwa ein Drittel der Flächen dagegen enthält nur verdeckte Ankerplatten und wenige sichtbare Strukturen. Da gleiche Strukturen in der Punktwolke und im Wärmebild zudem oft unterschiedlich aussehen, würde eine Wärmebildkamera mit integriertem RGB-Sensor (wie in Abschnitt 2.2.1) die Zuordnung deutlich erleichtern. Ob sich die Anschaffung eines Multisensorsystems lohnt, wäre anhand von Genauigkeitsuntersuchungen zu evaluieren und wirtschaftlich abzuwägen. Ansonsten wäre für unstrukturierte Flächen auch die Anbringung von thermographisch und optisch sichtbaren Markierungen als Passpunkte denkbar. In Schritt 2 der BIM-Integration müssen die einzelnen Ankerplatten aus den transformierten Wärmebildern extrahiert werden. Hier zeigt der Clustering-

Algorithmus aus Abschnitt 3.3 erste vielversprechende Ergebnisse. Um die exakten Ränder zu erkennen, muss zusätzlich eine Kantendetektion erfolgen. Auch ist eine Unterscheidung zwischen Öffnungen und Ankerplatten vorzunehmen, da sich diese im Wärmebild ähnlich dunkel darstellen (siehe Abbildung 2 rechts). In Schritt 3 soll schließlich ein entsprechendes BIM-Objekt an richtiger Position im Gebäudemodell platziert werden. Hier können analog zu [18] mit der visuellen Programmiersprache Dynamo in der Software Autodesk Revit entsprechende Bauteile erzeugt und anhand der Raumkoordinaten der detektierten Ankerplatten ins Gebäudemodell eingefügt werden.

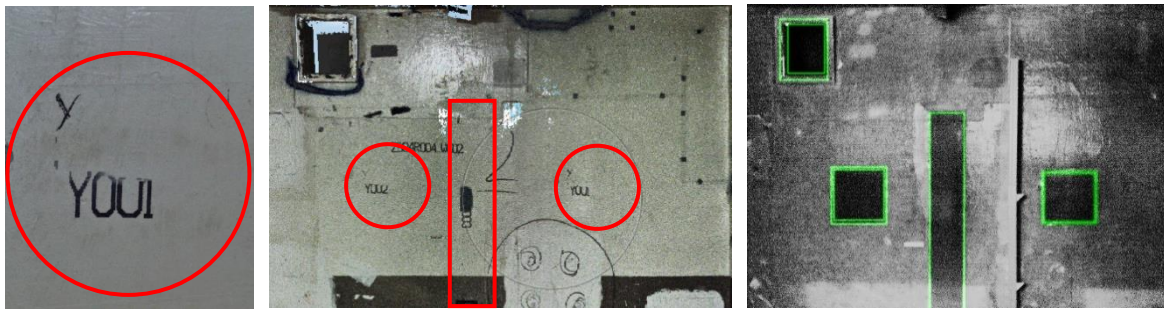


Abbildung 2: beschichtete Ankerplatten in RGB-Großaufnahme, Punktwolke und Wärmebild

5 Fazit

Die meisten Beiträge in der wissenschaftlichen Literatur beschäftigen sich nur mit der Kombination von Punktwolken und Wärmebildern zur Erzeugung von thermal texturierten Punktwolken. Dafür existieren verschiedene Verfahren, deren Auswahl je nach Anwendung abzuwägen ist. Für den beschriebene Fall im kerntechnischen Rückbau wäre entweder ein kombiniertes Messsystem oder eine Wärmebildkamera mit integriertem RGB-Sensor zielführend. Eine BIM-Integration von Thermaldaten findet sich in der Literatur laut [2] nur in sehr wenigen Fällen. Hier besteht noch großer Forschungsbedarf, vor allem hinsichtlich einer automatisierten Extraktion von relevanten Strukturen oder Informationen aus den Thermaldaten und deren Darstellung im BIM-Modell. Zur Erkennung der Ankerplatten in den Thermaldaten stellt sich eine Kombination aus Clustering und Kantendetektion als vielversprechend heraus. Für die BIM-Integration der detektierten Platten wird eine Erzeugung und Platzierung entsprechender Bauteile mit visueller Programmierung in Dynamo vorgeschlagen.

Danksagungen

Das Forschungsprojekt “ViSDeMe – Visualisierung von Störstellen für Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen mit Hilfe von BIM” wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Förderprogramms FORKA (FKZ: 15S9435A) gefördert. Die gezeigten Bilder wurden mit Genehmigung der RWE Nuclear GmbH im Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich erfasst.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Zhu et al.: "Generation of thermal point clouds from uncalibrated thermal infrared image sequences and mobile laser scans", IEEE Trans. on Instr. and Measurement, Band 72, 2023.
- [2] A. Ramón et al.: "Thermal point clouds of buildings: A review", Energy and Buildings, Band 274, Elsevier, Amsterdam, 2022.
- [3] L. Hoegner et al.: "Fusion of 3D point clouds with TIR images for indoor scene reconstruction", ISPRS-Archives, Band XLII-1, 2018.
- [4] S. Lagüela et al.: "Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies", Energy and Buildings, Band 43, Ausgabe 6, Elsevier, Amsterdam, 2011.
- [5] F. Collins et al.: "360-Degree Tri-Modal Scanning: Engineering a Modular Multi-Sensor Platform for Semantic Enrichment of BIM Models", ISPRS-Archives, Band X-1-2024, 2024.
- [6] A. Schischmanow et al.: "Seamless Navigation, 3D Reconstruction, Thermographic and Semantic Mapping for Building Inspection", Sensors 2022, 22, 4745, 2022.
- [7] A. Chromy, O. Klima: "A 3D Scan Model and Thermal Image Data Fusion Algorithms for 3D Thermography in Medicine", Journal of Healthcare Engineering, Band 2017, 2017.
- [8] C. Maierhofer et al.: „Kombination der aktiven Thermografie mit laserbasierten Verfahren zur Erfassung von 3D-Geometrien in der Denkmalpflege“, Fachtagung Bauwerksdiagnose, 2010.
- [9] H. Macher, T. Landes: "Combining TIR images and point clouds for urban scenes modelling", ISPRS-Archives, Band XLIII-B2-2022, 2022.
- [10] E. Coiras et al.: "Segment-based registration technique for visual-infrared images", Optical Engineering Band 39, S. 282–289, 2000.
- [11] S. Fiedler et al.: „DT360: Digital Thermography 360° – Projekt »ThermoHead«“, zfv 2/2022, 147. Jahrgang, DVW-Schriftenreihe, Wißner-Verlag, Augsburg, 2022.
- [12] M. Angelosanti et al.: "Combination of Building Information Modeling and Infrared Point Cloud for Nondestructive Evaluation", IEEE Intern. Workshop on Metrology for Living Env., 2022.
- [13] V. Pérez-Andreu et al.: "Thermal Characterization of Buildings with as-is Thermal-Building Information Modelling", Buildings 2023, 13, 972, 2023.
- [14] C. Wang and Y. K. Cho: "Automated gbXML-Based Building Model Creation for Thermal Building Simulation" in Proc. - 2014 Int. Conf. 3D Vis. Work. 3DV 2014, pp. 111–117, 2015.
- [15] Y. Ham et al.: "Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling," in Autom. Constr., Band 49, S. 214–224, 2015.
- [16] A. Adán et al.: "Temporal-Clustering Based Technique for Identifying Thermal Regions in Buildings" in Lect. Notes in Computer Science, Band 12002, S. 290–301, 2020.
- [17] P. Kim et al.: "Building element recognition with thermal-mapped point clouds" in ISARC 2017 - Proceedings of the 34th Intern. Symp. on Autom. and Robotics in Constr., S. 872–878, 2017.
- [18] M. Müßle: "Scan2BIM: Automatisierte Detektion von Störobjekten in Wänden in Punktwolken und Visualisierung mit Hilfe von BIM" in Tagungsband 34. Forum Bauinformatik, Bochum, 2023.