

# Multi-modale 3D-Kartierung – Kombination von 3D-Punktwolken mit Thermo- und Farbinformationen<sup>1</sup>

Dorit Borrmann<sup>2</sup>

**Abstract:** Man stelle sich eine Technologie vor, die automatisch ein vollständiges 3D-Thermographiemodell einer Umgebung generiert und Temperaturspitzen darin erkennt. Die Analyse einer Umgebung bezüglich Energieeffizienz oder zur Überwachung wichtiger Infrastruktur anhand von Thermalbildern ist zeitaufwändig und nur durch Erfahrung und Expertise möglich. Die hier vorgestellte Arbeit [Bo17] schlägt ein Robotersystem vor, das durch Kombination von Thermographie mit terrestrischem Laserscanning ein vollständiges 3D-Modell der Umgebung mit Farb- und Temperaturinformation erstellt. Die ergänzende Farbkamera vereinfacht die Interpretation der Daten und eröffnet weitere Anwendungsfelder. Die an unterschiedlichen Positionen aufgenommenen Daten aller Sensoren werden durch Kalibrierung und Scanmatching in einem gemeinsamen Bezugssystem zusammengefügt. Die Arbeit beschreibt und evaluiert die hierzu benötigten Verfahren und zeigt Methoden zur Weiterverarbeitung der Daten auf.

Ein vollständiges multi-modales 3D-Modell enthält alle relevanten geometrischen Informationen der aufgenommenen Szene und ermöglicht einem Experten, diese standortunabhängig zu analysieren. Diese Technologie ebnet den Weg für die automatische Erkennung relevanter Bereiche und für die Analyse des Wärmeflusses und vereinfacht somit die Lokalisierung und Identifikation von Wärmelecks für den Experten. Das vorgestellte modulare Konzept ist weder auf den Anwendungsfall Energieeffizienz beschränkt noch auf die Verwendung einer mobilen Plattform angewiesen. Es ist beispielsweise auch in Feldern wie der Archäologie und Geologie einsetzbar und kann durch zusätzliche Sensoren erweitert werden.

## 1 Einführung

Fortschritte in Technologie und Forschung führen zur vermehrten Bemühungen Umgebungen am Computer zu analysieren. Die Kombination unterschiedlicher Sensordaten erzeugt ein vollständiges Umgebungsbild. Ein Foto ist in der Regel vom Benutzer schnell zu erfassen hat aber ein eingeschränktes Sichtfeld. Auch in Panoramabildern, die diesen Mangel kompensieren, fehlen die geometrischen Informationen weitestgehend. Die Rekonstruktion der Geometrie einer Szene durch die Verwendung von Bildmerkmalen scheitert in merkmalsarmen Umgebungen und ist nicht skaliergenaus. Bei Aufgaben in der Bauindustrie, der Archäologie oder der Geologie, die geometrisch korrekte Messwerte verlangen, haben sich in den letzten Jahren 3D-Laserscanner durchgesetzt. Neben Entfernungsmesswerten liefern diese heutzutage häufig auch die Intensität des reflektierten Lichtstrahls. Wenn das Einfärben der Punktwolke mit diesen Intensitätswerten auch die Interpretation einer Szene erleichtert, so wirkt es doch für einen ungeübten Benutzer schwer erkenntlich. In Zeiten reger Diskussion über Energieeffizienz ist Thermografie

---

<sup>1</sup> Englischer Originaltitel der Dissertation: "Multi-modal 3D mapping – Combining 3D point clouds with thermal and color information"

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Robotik und Telematik, Universität Würzburg, borrmann@informatik.uni-wuerzburg.de



Abb. 1: Links: Skizze eines multi-modalen Modells des Bremer Rathauses, eine Punktwolke mit Temperatur- und Farbinformationen. Rechts: Der Roboter Irma3D vor den Kalibrieremustern.

sehr gefragt. Sie kommt auch für die Sicherung wichtiger Infrastruktur, wie Energieversorgung und Temperaturregulierungssystemen, zum Einsatz. Mit Infrarotkameras lässt sich das Wärmebild eines Gebäudes dokumentieren. Für die Interpretation und genaue Lokalisierung auffälliger Bereiche wäre jedoch ein komplettes 3D-Modell mit Thermaldaten und Echtfarben wünschenswert. Bisher wird aufwendig per Hand modelliert. Erschwerend kommt bei Außenaufnahmen bereits der Einfluss diffuser Sonneneinstrahlung an einem bewölkten Tag hinzu. Thermografie bei Nacht verhindert jedoch die zeitgleiche Aufnahme von Fotos und Thermalbildern.

Die vorgestellte Arbeit löst dieses Problem mit einem Robotersystem, das durch Kombination von Thermographie mit terrestrischem Laserscanning ein vollständiges 3D Modell der Umgebung mit Farb- und Temperaturinformationen erstellt (vgl. Abb. 1). Die ergänzende Farbkamera vereinfacht die Dateninterpretation und eröffnet weitere Anwendungsfelder. Kalibrierung und Scanmatching fügen die an unterschiedlichen Positionen aufgenommenen Daten aller Sensoren in einem gemeinsamen Bezugssystem zusammen. Der erste Teil der Arbeit behandelt 3D-Punktwolkenverarbeitung mit Schwerpunkt auf effizientem Punktzugriff, Erkennung planarer Strukturen und Registrierung mehrerer Punktwolken in einem Koordinatensystem. Der zweite Teil beschreibt die autonome Erkundung und Datenakquise mit einem mobilen Roboter, mit dem Ziel, die bisher nicht erfassten Bereiche im 3D-Raum zu minimieren. Die Kombination von Farbbildern, Thermalbildern und Punktwolken durch Kalibrierung wird ausgearbeitet. Den abschließenden Teil stellen Anwendungsszenarien für die gesammelten Daten dar, darunter Methoden zur Erkennung der Innenraumstruktur für die Rekonstruktion von Gebäuden und der anschließenden Klassifizierung von Fenstern. Ein System zur Rückprojektion der Thermalinformation in die Umgebung wird ebenso vorgestellt wie Methoden zur Verbesserung der Farbinformationen und zum Zusammenfügen separat aufgenommener Punktwolken und Fotoreihen.

## 1.1 Wissenschaftlicher Beitrag

Die Entwicklung der 3D-Messtechnik in den letzten Jahren und die damit verbundene Kostenreduktion hat die 3D-Punktwolkenverarbeitung in den Fokus vieler Anwendungsbereiche gerückt, darunter Archäologie und Denkmalpflege, Geologie sowie die Bau- und

Unterhaltungsindustrie. Mit der Verfügbarkeit schneller Messgeräte kommt die Notwendigkeit Daten effizient zu verarbeiten. Die vorgestellte Arbeit ist das Ergebnis von Forschung im Bereich der Robotik mit dem Schwerpunkt des Laserscannings und der 3D-Punktwolkenverarbeitung. Sie stellt das Bestreben dar, 3D-Punktwolken automatisch mit anderen Modalitäten, wie Farb- und Thermalbildern, zu kombinieren und diese so aufzubereiten, dass sie in diversen Anwendungen verwendet werden können. Der wissenschaftliche Beitrag lässt sich in den Kategorien 3D Datenstrukturen, Ebenenerkennung, Punktwolken-Registrierung, 3D Exploration und thermale Modellierung zusammenfassen. Die Grundlagenforschung in der 3D-Punktwolkenverarbeitung in diesen Kategorien kommt in diversen Anwendungen in unterschiedlichen Bereichen zum Einsatz.

## 2 Datenakquise

Der mobile Roboter Irma3D (Abk. Intelligent robot for mapping applications in 3D, siehe Abb.1) wurde speziell für die 3D-Kartierung entwickelt. Die beiden Antriebsräder verfügen über Radencoder zur Berechnung der Odometrie, die zur Bewegungsschätzung mit einer inertialen Messeinheit (IMU) fusioniert wird. Ein 2D-Laserscanner dient zur Hindernisvermeidung und Navigation. Für die Datenakquise verwendet Irma3D einen Riegl VZ-400 3D-Laserscanner. Auf diesem werden wahlweise eine Optris PI Imager Thermokamera, eine Webcam oder eine Spiegelreflexkamera angebracht. Die Roboterkontrollarchitektur ist in ROS (Abk. Robot Operating System) realisiert.

Irma3D erkundet eine Umgebung autonom mit einem zweigeteilten Pfadplanungsalgorithmus. An der Startposition wird ein 3D-Laserscan mit  $360^\circ \times 100^\circ$  Öffnungswinkel aufgenommen und mehrere Fotos, um den horizontalen Bildwinkel von  $360^\circ$  abzudecken. In einer Linienkarte, generiert aus einem horizontalen Schnitt der Punktwolke auf Höhe des Roboters, markieren Sprungkanten Bereiche zwischen explorierten und nicht explorierten Bereichen. Der Roboter fährt für die nächste Aufnahme eine Position vor der Sprungkante an, bei der die meisten neuen Informationen zu erwarten sind. Sobald ein Raum, d.h. ein abgeschlossener Bereich, erkannt wird, wechselt die Pfadplanung in den 3D-Modus, bei dem die Anzahl der ungesehenen Voxel in einer 3D-Karte minimiert wird. Anschließend wird die Pfadplanung in 2D fortgesetzt. Abb. 2 zeigt die 2D-Karte und die Scanpositionen an einer beispielhaften Büroumgebung. Der Mehrwert durch die 3D-Exploration wird in [Bo14] gezeigt.

## 3 3D-Punktwolkenverarbeitung

Moderne Laserscanner erfassen die Umgebung präzise mit einer Datenrate im sechs- bis siebenstelligen Bereich pro Sekunde. Die Rohdatenverarbeitung ist somit schon aufgrund der Menge und dem damit verbundenen Zeit- und Speicheraufwand problematisch. Aufgabenabhängig muss ein schneller Zugriff bei geringem Speicheraufwand gewährleistet werden. In [Bo17] kommen zu diesem Zwecke Baumstrukturen, welche die räumliche Struktur der Daten nutzen, namentlich Octrees und  $kD$ -Bäume, und den Aufnahmeprozess widerspiegelnde Panoramabilder zum Einsatz.

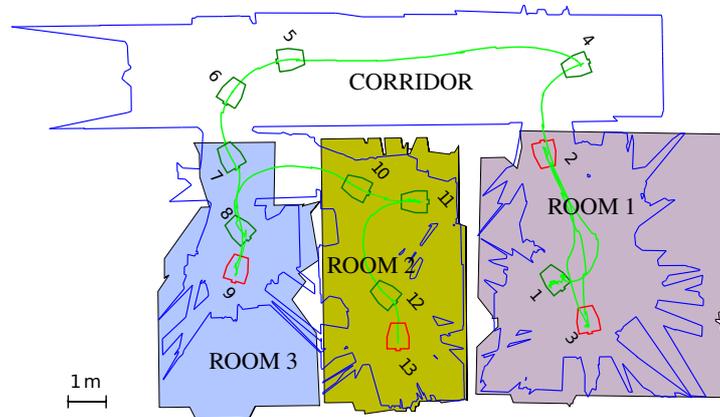


Abb. 2: Roboterpfad und Scanpositionen während der Exploration. Grün markiert sind die Posen aus der 2D-Pfadplanung, während rote Posen im 3D-Modus angefahren wurden. (Video eines multi-modalen Modells der Versuchsumgebung: <http://youtu.be/qoQ1P8F0zg0>)

### 3.1 Ebenenerkennung

Die Verwendung primitiver Formen reduziert die Verarbeitungszeit weiter. In künstlich geschaffenen Umgebungen sind Ebenen dominant. Drei grundlegende Ansätze detektieren diese in Punktwolken. RANSAC (engl. Random Sample Consensus) Algorithmen sind generelle randomisierte Verfahren, um für beobachtete Daten ein parametrisiertes Modell zu finden. Hierzu wird mehrfach eine minimale Menge an Daten, die das Modell definieren, ausgewählt und überprüft, wie gut dieses Modell die Daten repräsentiert. Die Hough Transformation sucht im Parameterraum die Ebene, auf der die meisten Punkte liegen und transformiert dazu die Punkte vom kartesischen Raum in den Raum der Ebenenparameter. Bei Region Growing Ansätzen wird die Ebene sukzessive durch Nachbarpunkte vergrößert. In der vorgestellten Arbeit werden Algorithmen von jedem Typ für die Erkennung eines Kalibrierungsmusters und die Bestimmung der Gebäudestruktur analysiert. Während die Hough Transformation die dominanten Ebenen zuverlässiger findet als Region Growing Ansätze, verhält es sich für die Erkennung eines klar definierten Musters andersherum.

### 3.2 3D-Kartierung

Um ein komplettes verschattungsfreies Umgebungsmodell zu erhalten, müssen Laserscans an unterschiedlichen Positionen aufgenommen und registriert, d.h. in ein gemeinsames Koordinatensystem gebracht werden. Das Registrierungsverfahren besteht aus zwei Komponenten, einer paarweisen Registrierung und einer globalen Optimierung [Bo08].

**Registrierung mittels 3D-Scanmatching** Für die paarweise Registrierung verwenden wir den bekannten ICP-Algorithmus (Abk. Iterative Closest Point) [BM92]. Der ICP ist in

der Lage eine lokale Verbesserung der initialen Transformationen einer Sequenz von 3D-Scans zu erzeugen. Sei  $M$  die Modellmenge der 3D-Punkte des Scans mit fester Transformation und  $D$  die Datenmenge von Punkten des zu matchenden Scans, dann berechnet der ICP die Transformation von  $D$  basierend auf Punktkorrespondenzen zwischen den beiden Punktmengen. Iterativ werden die metrisch nächstgelegenen Punkte aus beiden Punktmengen als korrespondierend ausgewählt, sofern ihr Abstand unter einem Schwellwert liegt. Berechnet wird nun die Transformation  $(R, t)$ , welche die Fehlerfunktion

$$E_{\text{ICP}}(R, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|m_i - (Rd_i + t)\|^2 \quad (1)$$

minimiert.  $N$  ist die Anzahl der Punktpaare in  $M$  und  $D$ . Unter Annahme korrekter Punktkorrespondenzen in der letzten Iteration lässt sich in geschlossener Form die Transformation berechnen, welche die Fehlerfunktion minimiert. Um Umgebungen vollständig zu digitalisieren, müssen mehrere 3D-Scans registriert werden. Diese 3D-Scans seien in einer Sequenz von  $n + 1$  3D-Scanposen  $V_0, \dots, V_n$  gespeichert. Die einfachste Methode zum Registrieren mehrere 3D-Scans ist das so genannte paarweise Scanmatching. Hierbei wird die Modellmenge  $M$  von dem 3D-Scan der Pose  $V_{j-1}$  und die Datenmenge  $D$  von dem 3D-Scan an Pose  $V_j$  für alle  $j$  in  $[1, n]$  gebildet. Alternativ kann man als Modellmenge auch die Vereinigung aller bereits registrierter Scans verwenden. Diese Methode wird als Metascan-Matching bezeichnet. Zur Bestimmung der initialen Transformation eignen sich die Odometrie des Roboters, GNSS-Messungen, 2D-Kartierung oder merkmalsbasierte Registrierung. Eine Untersuchung dazu findet sich in [Bo17].

**Global konsistentes Scanmatching** Sowohl paarweises als auch Metascan-Matching korrigieren die Poseschätzungen für die einzelnen 3D-Scans. Dennoch summieren sich Registrierungsfehler auf. SLAM-Algorithmen aus der Robotik verwenden die Methode des Schleifenschließens, um diese Fehler zu begrenzen. Falls die Differenz der Poseschätzungen  $V_j = (x_j, y_j, z_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj})$  und  $V_k = (x_k, y_k, z_k, \theta_{xk}, \theta_{yk}, \theta_{zk})$  zweier 3D-Scans nach paarweisem bzw. Metascan-Matching unterhalb eines Schwellwertes liegen, nehmen wir an, dass sich diese Scans matchen lassen. Dem korrespondierenden Graphen, der anfänglich mit der Scanposensequenz  $((V_0, V_1), (V_1, V_2), \dots, (V_{n-1}, V_n))$  initialisiert wird, wird die Kante  $(V_j, V_k)$  hinzugefügt.

Nachdem die 3D-Scans mit paarweisem bzw. Metascan-Matching registriert worden sind und der Graph erzeugt wurde, wenden wir eine globale Relaxation an. Gegeben sei ein Netz mit  $n + 1$  Knoten  $X_0, \dots, X_n$ , das die Posen  $V_0, \dots, V_n$ , und die gerichteten Kanten  $D_{j \rightarrow k}$  repräsentiert. Das Ziel ist nun, eine global konsistente Karte zu erzeugen, also die Posen  $V_0, \dots, V_n$  so zu schätzen, dass alle 3D-Scans konsistent registriert werden. Die Fehlerfunktion wird erweitert, so dass alle Kanten des Graphen berücksichtigt werden

$$E_{\text{opt}} = \sum_{j \rightarrow k} \sum_{i=1}^{N_{j \rightarrow k}} \|R_j m_i + t_j - (R_k d_i + t_k)\|^2. \quad (2)$$

Die Fehlerfunktion beinhaltet die Punktkorrespondenzen für alle Scans, die durch eine Kante verbunden sind. Gesucht sind die Transformationen, die das Netz von Korrespon-

denzen minimieren. Zur Minimierung der Fehlerfunktion muss diese linearisiert werden. Für 3D-Scans und 6D-Posen ist dies in [Bo08] beschrieben. Im vollständigen Algorithmus zur schrittweisen Optimierung der Scanposen wird jeder Scan zuerst an seinen Vorgänger registriert. Sobald eine Schleife erkannt wird, d.h., der Abstand zu einem bereits registrierten Scan ist klein genug, wird automatisch ein Graph erstellt, der die Nachbarschaftsbeziehungen der Scans darstellt und das zugehörige Gleichungssystem minimiert. Dies wird iterativ wiederholt, bis die Veränderung der Posen klein ist.

## 4 Erstellung der 3D-Thermomodelle

Bei der gleichzeitigen Aufnahme mit mehreren Sensoren sieht ein jeder Sensor die Welt in seinem eigenen Koordinatensystem. Die Zuordnung zueinander wird vereinfacht, wenn die Sensoren zueinander kalibriert sind, d.h., ihre relative Positionierung bekannt ist. Um dies zu erreichen, benötigt man ein Kalibrierungsmuster, das in den Daten beider Sensoren eindeutig erkannt wird. Für die Kalibrierung von Kameras wird üblicherweise ein Schachbrettmuster verwendet, da die Ecken des Musters gut in Fotos identifizierbar sind. Für Infrarotkameras eignet sich dieses Muster schlechter, da die Kanten selbst nach vorheriger Bestrahlung in der Aufnahme sehr verschwommen erscheinen. Als Alternative bieten sich eindeutig identifizierbare Wärmequellen an. Abb. 1 zeigt ein Kalibrierungsmuster für Infrarotkameras, bei dem 30 kleine Glühlampen gleichmäßig in einem Raster auf einem Brett angeordnet sind. Diese erscheinen deutlich in den Aufnahmen. Um die Kalibrierungsmuster auch in den Laserscans zu lokalisieren, werden sie auf einem Brett angebracht. Für Farbkameras kommt das gleiche Verfahren mit einem Schachbrettmuster zum Einsatz (vgl. Abb. 1). Durch Evaluation verschiedener Ebenenerkennungsverfahren wurde ein Verfahren entwickelt, das mit hoher Wahrscheinlichkeit automatisch, robust und präzise das Kalibriermuster in Punktwolken erkennt. Gegeben die Spezifikation des Kalibrierungsmusters detektiert Algorithmus 1 das Brett in einer Punktwolke.

---

**Algorithmus 1** Kalibriermustererkennung in einem Laserscan.

---

**Require:** Punktwolke, Spezifikation des Kalibrierungsmusters

- 1: Entferne alle Punkte außerhalb des Erwartungsbereichs des Brettes.
  - 2: Finde die Ebene, die das Brett enthält
  - 3: Projiziere ein generiertes Modell des Brettes in den Mittelpunkt der detektierten Ebene.
  - 4: Verwende den ICP-Algorithmus um das Modell an die Datenpunkte anzupassen.
  - 5: **if** Jeder Punkt des Ebenenmodells hat eine Korrespondenz in der Punktwolke **then**
  - 6:     **return** Position der Glühlampen anhand des ICP Ergebnisses
  - 7: **end if**
- 

Die Erstellung eines 3D-Thermalmodells ist in Abb. 3 dargestellt. Mit den Glühlampen in den Thermogrammen wird zuerst die Wärmebildkamera intrinsisch und dann entsprechend Algorithmus 1 extrinsisch zum 3D-Sensor kalibriert. Um die Genauigkeit zu erhöhen, insbesondere aufgrund der geringen Auflösung der Infrarotkamera, werden mehrere Datenpaare aus Thermalbild und Punktwolke aufgenommen und durch Gradientenabstieg die optimale Transformation bestimmt. Mit der so bestimmten Transformation werden die 3D-Punkte auf das Bild projiziert und die Temperaturwerte den Punkten zugeordnet.

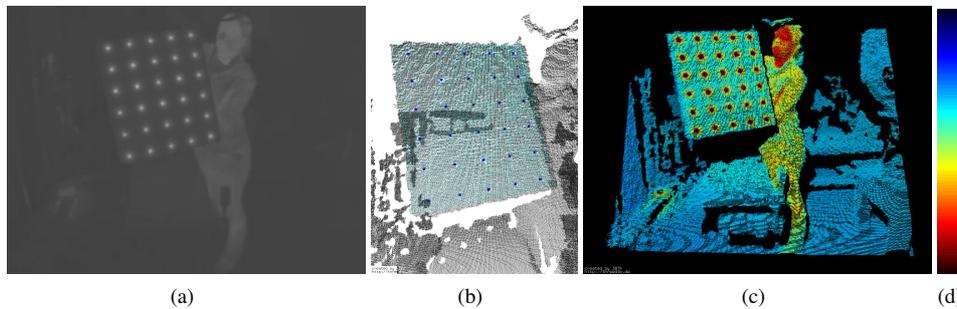


Abb. 3: Erstellung einer thermalen Punktwolke. (a) Thermogramm (weiß  $\hat{=}$  0 °C, schwarz  $\hat{=}$  100 °C). (b) Das Modell (cyan) wird bei der Kalibrierung an die Daten registriert um die Position der Glühlampen (blau) zu bestimmen. (c) Punkte nach der Skala aus (d) von 10 °C to 40 °C eingefärbt.



Abb. 4: Ein Scan aus dem Kaisersaal der Würzburger Residenz eingefärbt aus Fotos ohne (links) und mit (rechts) Korrektur mittels Raytracing. (Video: <http://youtu.be/jKVx1Lvu7Pk>).

#### 4.1 Ergebnisse

Das Verfahren zur Kombination von 3D-Punktwolken mit Temperatur- und Farbinformationen wurde an zahlreichen Datensätzen visuell überprüft. Für eine Evaluation der einzelnen Schritte des Kalibrierverfahrens sei auf [Bo17] verwiesen. Im folgenden wird an einigen Beispielen der Mehrwert durch die 3D-Geometrie dargestellt.

Abb. 4 zeigt ein 3D-Modell, das Irma3D im Kaisersaal der Würzburger Residenz aufgenommen hat. Aufgrund des Versatzes zwischen Laserscanner und Kamera ist die Einfärbung durch Projektion der Punkte auf das Kamerabild im Bereich von Verschattungen fehlerhaft. Darum wurde ein Raytracing-Verfahren entwickelt, mit dem für jeden Punkt der Punktwolke überprüft wird, ob dieser von der Kamera aus sichtbar ist, oder durch andere Punkte verdeckt wird. Die Punkte sind in einem  $k$ D-Baum organisiert, was neben schnellem Verwerfen nicht zu betrachtender Punkte die parallele Verarbeitung erlaubt. Im Kaisersaal erkennt man die Korrektur deutlich hinter den Kronleuchtern und den Stativen.

Die bei der Thermographie gemessene abgegebene Strahlung einer Oberfläche wird maßgeblich durch die Emission  $\varepsilon$ , die Reflektion  $\rho$ , und die Transmission  $\tau$  beeinflusst. Für

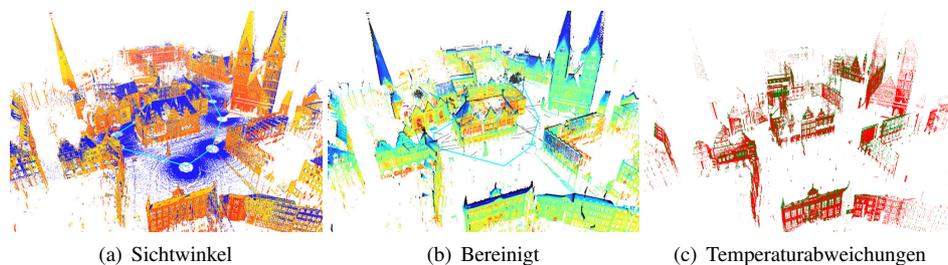


Abb. 5: Der Bremer Marktplace (Video: <http://youtu.be/TPoCebERySc>) (a) Punkte eingefärbt anhand des Winkels zwischen Normale und Sichtvektor. Blaue Punkte haben einen Winkel größer als  $60^\circ$ . (b) Die Szene ohne die Punkte mit einem Winkel größer als  $60^\circ$  eingefärbt anhand der Temperaturwerte. (c) Punkte mit Nachbarn im Abstand von 1 cm. Grün markierte Punkte haben eine Temperaturabweichung von  $> 1$  K.

aussagekräftige Messwerte muss die Reflektion der Umgebungsstrahlung durch günstige Wahl der Aufnahmewinkel gering gehalten werden. Da diese bei der Aufnahme schwer zu bestimmen sind, werden nachträglich jene Punkte gelöscht, bei denen die Winkelbegrenzung von  $60^\circ$  nicht eingehalten wurde. Im Octrees werden die nächsten Nachbarn eines jeden Punktes und mit ihnen die Normale bestimmt. Ist der Winkel zwischen Messrichtung und Normale zu groß, gilt die Messung als unzuverlässig. Abb. 5 zeigt das Ergebnis am Beispiel des Bremer Marktplaces. Rund um das Rathaus hat Irma3D an 13 Positionen Laserscans und Wärmebilder aufgenommen. Von den 81.398.810 Punkten erfüllen 62.272.650 Punkte das Winkelkriterium. Insbesondere Dächer und Boden, aber auch entfernte Wände, erfasst der bodennahe Roboter unzureichend.

Die überlappenden Aufnahmen erfassen große Bereiche mehrfach. Dies dient ebenfalls der Überprüfung der Messungen. Bestimmt man für jeden Punkt den jeweils nächsten Punkt aus allen anderen Scans, so lassen sich alle Punkte mit einer Abweichung entfernen, wie in Abb. 5(c) exemplarisch für Nachbarn mit einem Maximalabstand von einem Zentimeter und einer Temperaturabweichung von 1 Kelvin dargestellt.

## 5 Anwendungen

Die in der Arbeit entwickelten Methoden bilden die Grundlage für zahlreiche weitere Anwendungen die hier kurz zusammengefasst werden. Basierend auf der Ebenenerkennung werden die Strukturelemente von Innenräumen bestimmt. Dies ermöglicht die Rekonstruktion von verdeckten Bereichen (vgl. Abb. 6(a)) oder in einem Thermalmodell die Klassifizierung von Fenstern als offen oder geschlossen (vgl. Abb. 6(b) und 6(c)). Wird der Laserscanner durch eine 3D-Kamera ersetzt und das System mit einem Projektor erweitert, so können die Thermaldaten direkt wieder in die Szene zurück projiziert werden. Beispielsweise in der Fertigung werden dadurch die entstanden Wärmeverteilungen direkt sichtbar gemacht (vgl. Abb. 6(f)). Bei der zeitversetzten Aufnahme von Farbfotos verändern die wechselnden Lichtverhältnisse die farbliche Darstellung einer Scene. In einem Modell entstehen dadurch deutlich sichtbare Übergänge. Durch Ausnutzung der räumlichen

Struktur des Modells kann ein Gleichungssystem aufgestellt werden, um die Bilder radiometrisch zu korrigieren (vgl. Abb. 6(d) und 6(e)). Um den Einfluss der Sonnenstrahlung zu vermeiden, wird Thermographie nachts durchgeführt. Dies bedeutet, dass Farbbilder nicht zeitgleich aufgenommen werden können. Soll das Modell nun trotzdem mit Farbwerten bereichert werden, muss die Transformation anders bestimmt werden. Eine Möglichkeit ist es, ein 3D-Modell durch Photogrammetrie zu erstellen, dieses an das Lasermodell zu registrieren und dadurch die Transformation der Fotos zu berechnen. Dies erhöht die Dichte insbesondere in strukturarmen Regionen (vgl. Abb. 6(g) und 6(h)).

## 6 Zusammenfassung

Die vorgestellte Arbeit untersucht die Kombination von 3D-Punktwolken mit Farb- und Thermobildern mit dem Schwerpunkt auf der Kokalibrierung zwischen Laserscanner und Wärmebildkamera. Das entwickelte Glühlampenmuster wird sowohl im Laserscan als auch im Thermobild zuverlässig erkannt. Da das Verfahren direkt auf Farbbilder übertragbar ist, ist es in Bereichen wie der Geologie und der Archäologie anwendbar. Die Ebenenerkennungsmethoden, die bei der Erkennung des Kalibrierungsmusters zum Einsatz kommen, sind auch für weitere Verarbeitung des fertigen Modells hilfreich. Global agierende Ebenendetektionsverfahren erweisen sich als vorteilhaft, wenn die Hauptstruktur von Gebäuden erkannt werden soll, während Region Growing Ansätze besser kleinere Strukturen detektieren. Zusätzlich zur Kalibrierung, die Daten unterschiedlicher Sensoren kombiniert, vereint das Scanmatching Daten unterschiedlicher Positionen. Die globale Optimierung hilft dabei, ein global konsistentes Modell zu erzeugen. Um die enorme Datenmenge verarbeiten zu können, kommen effiziente Implementierungen von Octree, *k*D-Baum und Panoramen zum Einsatz. Das 3D-Explorationsverfahren zur autonomen Erstellung eines 3D-Modells erreicht eine bessere Abdeckung als das 2D-Verfahren. Die entwickelte Technologie wurde erfolgreich in zahlreichen Umgebungen getestet und ist in vielerlei Hinsicht erweiterbar. Zusätzlich zu den vorgestellten Anwendungsszenarien sind noch viele weitere denkbar. Zu den nächsten Zielen gehören die Beschleunigung der Aufnahme durch mobiles Laserscanning, die Erweiterung der Fensterklassifizierung auf andere Objekte und die Erstellung von Oberflächenmodellen aus den Punktwolken.

## Literaturverzeichnis

- [BM92] Besl, P.; McKay, N.: A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239 – 256, February 1992.
- [Bo08] Borrmann, D.; Elseberg, J.; Lingemann, K.; Nüchter, A.; Hertzberg, J.: Globally consistent 3D mapping with scan matching. *Journal of Robotics and Autonomous Systems (JRAS)*, 56(2):130–142, February 2008.
- [Bo14] Borrmann, D.; Nüchter, A.; Đakulović, M.; Maurović, I.; Petrović, I.; Osmanković, D.; Velagić, J.: A mobile robot based system for fully automated thermal 3D mapping. *Advanced Engineering Informatics*, 28(4):425–440, October 2014.
- [Bo17] Borrmann, D.: Multi-modal 3D mapping – Combining 3D point clouds with thermal and color information. Doctoral thesis, Universität Würzburg, 2017.

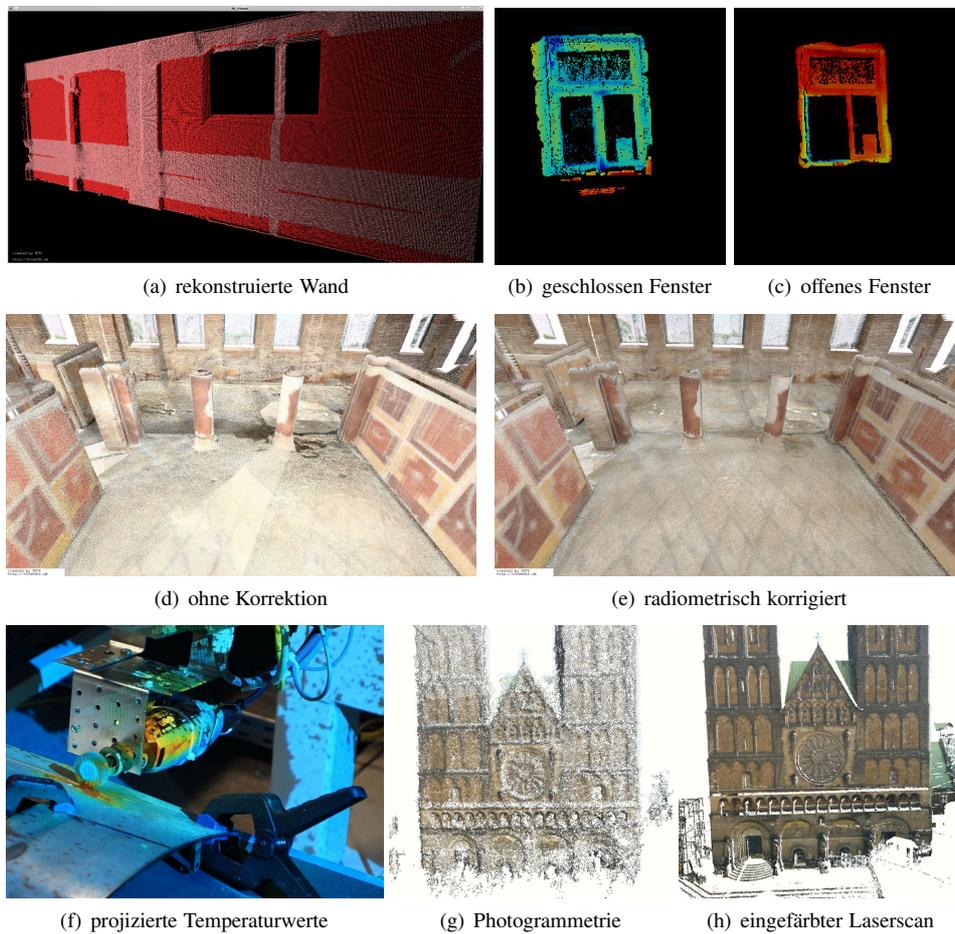


Abb. 6: Anwendungsbeispiele.



**Dorit Borrmann** wurde am 21. März 1984 in Haselünne geboren. Seit Juli 2013 ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Informatik - Robotik und Telematik der Julius-Maximilians-Universität Würzburg beschäftigt, wo sie im Dezember 2017 ihre Promotion abschloss. Zuvor war sie an der Jacobs University Bremen, dem Rochester Institute of Technology und der Universität Osnabrück tätig, von wo sie 2009 einen Masterabschluss in Informatik und 2006 einen Bachelorabschluss in Mathematik und Informatik erlangt hat. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Robotik, 3D-Umgebungskartierung, Laserscanningstechnologien, 3D-Punktwolkenverarbeitung und Multi-Sensor-Fusion. Ihre Forschungsarbeit ist wesentlicher Bestandteil der Open-Source Software “3DTK - The 3D Toolkit”, die 2009 mit dem Intevation Förderpreis für freie Software der Universität Osnabrück ausgezeichnet wurde.