

# Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: Julius Maximilians Universität Würzburg

Förderkennzeichen: 13N15313

Vorhabenbezeichnung: **Denkmalschutz 3D (Deals3D)**

Teilvorhaben : Multimodale 3D-Modellierung für den Denkmalschutz

Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2020 - 31.05.2023

Autoren:  
Helge Andreas Lauterbach  
Andreas Nüchter

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des Projektes DealsD ist die Entwicklung einer technischen Lösung, welche als Sekundärsystem im Nachgang von Schadenslagen und Katastrophen aber auch präventiv zum Einsatz kommt und genaue annotierte dreidimensionale Modelle von gefährdeten Objekten von kulturellem Interesse erstellt. Das Teilprojekt hat zum Ziel, die anfallenden Daten eines Sensornetzwerks, bestehend aus verschiedenen Kartierungssensoren, sowie Aufnahmen früherer Vermessungen, automatisiert zu einer präzisen dreidimensionalen Karte zusammenzuführen und zu interpretieren. Dadurch werden wichtige Informationen für die Begutachtung, Dokumentation und den Erhalt von Denkmälern für den Endanwender zugänglich gemacht. Durch Einsatz unterschiedlicher Sensormodalitäten müssen Algorithmen entworfen und erweitert werden, welche vom jeweiligen Sensormodell abstrahieren und eine Datenfusionierung ermöglichen. Neben der geometrischen Zusammenführung der Punktwolken soll dies durch radiometrische Fusion der erfassten Sensordaten, sowie einer Änderungsanalyse im zeitlichen Kontext gelingen.

## 1.2 Voraussetzungen

Eine der Folgen des Klimawandels ist die steigende Bedrohung durch Naturkatastrophen wie Hochwasser, Stürme und Flächenbrände, welche eine Gefährdung von Kulturgütern darstellt. Darüber hinaus bestehen auch menschengemachte Gefahren durch Feuer und Terrorismus, welche Zerstörung materieller, unwiederbringlicher Kulturgütern führen. Präventive Strategien versuchen vor Zerstörung zu bewahren. Ergänzend kann eine Archivierung des Ist-Zustandes, welcher für eine Rekonstruktion wichtig ist, Aufschluss über Gefahren, wie strukturelle Probleme geben.

## 1.3 Planung und Ablauf

Der Fokus der Universität Würzburg liegt innerhalb des Verbundes auf der Erstellung der hochgenauen multimodalen 3D-Karten sowie deren Interpretation. Das Teilprojekt wurde in 5 Arbeitspakete aufgeteilt, mit Schwerpunkt auf Datenerfassung, Verarbeitung und Modellentwicklung. Die zeitliche Planung ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

Im Rahmen des Teilprojektes wurde zunächst ein Konzept zur Datenerfassung erarbeitet. Das beinhaltet zum einen, in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, die Auswahl der Sensoriken als auch die Erarbeitung und Implementierung eines geeigneten Arbeitsablauf zur Datenerfassung mit unterschiedlichen Sensormodalitäten. Des Weiteren wurde ein Konzept erarbeitet und implementiert, welches die erfassten multimodalen Daten auswertet und in ein gemeinsames multimodales 3D Modell zusammenführt. Das beinhaltet zum einen die geometrische und radiometrische Kalibrierung der Sensoren, zum anderen die 3D Rekonstruktion SfM und Registrierung mit SLAM. Das verwendete Rekonstruktionsverfahren wurde dabei um die Erzeugung multispektraler Punktwolken erweitert. Zur Nachverarbeitung der erzeugten Punktwolken wurde ein radiometrisches Korrekturverfahren entwickelt, welches

AP	Beschreibung (AP Leiter)	Jahr 1												Jahr 2												Jahr 3													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
	<b>Meilensteintreffen</b>																		M																				
2000	<b>Sof - und Hardwareintegration in Sensornetzwerk (ZfT)</b>																																						
2100	Soft- und Hardwareintegration in Sensornetzwerk																																						
3000	<b>Sensorsysteme (ZfT)</b>																																						
3100	Sensorsysteme																																						
4000	<b>Datenerfassung, Verarbeitung und Modellentwicklung (JMU)</b>																																						
4100	Datenerfassung im Sensornetzwerk																																						
4200	Photogrammetrie und Punktwolkengenfusion																																						
4300	Multimodale 3D-Modellierung																																						
4400	Änderungsanalyse (Change Detection)																																						
5000	<b>Datenverwaltung und Standardisierung (denkmal3D)</b>																																						
5100	Punktwolkendarstellung																																						
6000	<b>System Evaluat on und Verwertung (denkmal3D)</b>																																						
6100	System Evaluation																																						

Abbildung 1.1: Zeitplan der Arbeitspakete

die farbliche Inhomogenitäten aufgrund von Beleuchtungsunterschieden korrigiert.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Es existieren verschiedene Ansätze zur dreidimensionalen Rekonstruktion von Objekten. Ein Laserscanner ist ein Instrument, das die Distanz zu einem Objekt in einer gegebenen Richtung mit Hilfe von Laufzeitmessung des Lichtes bestimmt. Laserscanner, sind in der Regel sehr präzise, aber auch teuer, so dass sie hauptsächlich in der Vermessungstechnik eingesetzt werden. Unter den bildbasierten, photogrammetrischen Verfahren kommt Structure from Motion (SfM) für dreidimensionale Rekonstruktion zum Einsatz. Aus einer Sequenz von Fotos und der Parallaxe zwischen diesen werden Merkmalspunkte durch Triangulation rekonstruiert, sowie die Bewegung der Kamera ermittelt.<sup>1</sup> <sup>2</sup> <sup>3</sup> <sup>4</sup>

Multispektrale Kameras erfassen anders als normale Kameras ein erweitertes Spektrum elektromagnetischer Strahlung. Üblicherweise erstreckt sich der Messbereich neben dem sichtbaren Spektrum über zusätzliche Frequenzbänder, zum Beispiel bis in den nahen infraroten Bereich (NIR). Die für das menschliche Auge unsichtbare elektromagnetische Strahlung von Körpern wird so sichtbar gemacht. Messungen im nicht sichtbaren Spektrum lassen unter anderem Rückschlüsse auf nicht sichtbare Konstruktionsaspekte oder auch Defekte zu. Multispektralkameras werden in verschiedenen Ausführungen gebaut. Verbreitet sind dabei Multikamerasysteme, welche für jeden Spektralbereich einen eigenen Sensor mit Objektiv aufweisen.

Die Geometrie von Kameras wird in der Regel durch das Lochkameramodell beschrieben. Dies bedeutet, dass man 3D-Punkte (X,Y,Z) auf 2D-Punkte (x,y) in die Bildeckebene projiziert. Verzeichnungen, welche durch Kameralinsen entstehen können durch gängige Kalibrierungsverfahren ermittelt

<sup>1</sup> Martell, A., Lauterbach, H.A., Schilling, K., Nüchter, A.: Benchmarking Structure from Motion Algorithms of Urban Environments with Applications to Reconnaissance in Search and Rescue Scenarios. Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR 2018). p. 1-7. , Philadelphia, PA, USA (2018).

<sup>2</sup> Wu, Changchang. Towards linear-time incremental structure from motion. 2013 International Conference on 3D Vision-3DV 2013. IEEE, 2013.

<sup>3</sup> Schönberger, Johannes L., and Jan-Michael Frahm. Structure-from-motion revisited. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016.

<sup>4</sup> Barnes, Connelly, et al. PatchMatch: A randomized correspondence algorithm for structural image editing. ACM Transactions on Graphics (ToG). Vol. 28. No. 3. ACM, 2009.

werden.<sup>5</sup> Zur Kalibrierung von Kameras setzen sich zunehmend Kalibriermuster auf Basis Markersystemen durch, welche gegenüber den ebenso weitverbreiteten Schachbrettmustern den Vorteil der eindeutigen Bestimmung der Orientierung bieten.<sup>6</sup>

Neben den geometrischen Zusammenhängen von Kamerasyystemen spielt Radiometrie eine Rolle. Diese befasst sich mit der Messung elektromagnetischer Strahlung und beschreibt die Zusammenhänge zwischen einer Lichtquelle und den gemessenen Sensorwerten einer Kamera. Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Strahlung und dem resultierenden Bildpunkt wird durch eine Kamerakurve (englisch: Camera Response Function) modelliert, welche nichtlineare kamerainterne Vorgänge approximiert.<sup>7</sup> Äußere Einflüsse, wie die dynamische Veränderung der Lichtverhältnisse resultieren in einer heterogenen radiometrischen Abbildung der Umgebung. Bestehende radiometrische Korrekturverfahren treffen die Annahme von konstanten Umgebungsbedingungen und minimieren den radiometrischen Abstand zu einem Referenzbild.<sup>8</sup> <sup>9</sup> Je nach Anwendung werden dabei auch Atmosphärische Einflüsse berücksichtigt.<sup>10</sup>

Mit Bezug auf die Fusion von Punktwolken besteht ein globale Kartierungsproblem darin, aus mehreren lokalen Karten eine globale zu erzeugen. Diese Karte muss mit der wirklichen Umgebung übereinstimmen, also korrekt und konsistent sein. In diesem Zusammenhang spricht man vom simultanen Lokalisations- und Kartierungsproblem (SLAM). 3D-Scan-Registrierung mit dem ICP-Algorithmus<sup>11</sup> bildet die Grundlage des GraphSLAM-Verfahrens der Antragsteller.<sup>12</sup>

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die weiteren Arbeiten im Verbund waren klar verteilt und strukturiert: Das Zentrum für Telematik ist zum einen verantwortlich für UAV und Bodenstation, die Sensorik und die Datenerfassung und zum anderen auch der Verbundkoordinator. Der Fokus von Denkmal3D liegt in der effektiven Datenverwaltung und -standardisierung sowie der Systemevaluation. Als assoziierte Projektpartner beteiligten sich die Staatliche Feuerwehrschule Würzburg und das Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege an dem Projekt. Die Feuerwehrschule Würzburg stand für Diskussionen über Anforderungen bereit und stellte für Tests ihr Gelände zur Verfügung. Das Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege ist dem Schutz des kulturellen Erbes verpflichtet und brachte Fachwissen auf dem Gebiet des Denkmalschutzes und den Zugang zu verschiedenen Kulturdenkmälern in das Projekt mit ein. Mit dem NLD war ein möglicher Endnutzer des entwickelten System in das Projekt eingebunden.

---

<sup>5</sup>Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(22):1330 – 1334, 2000.

<sup>6</sup>Olson, Edwin. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2011

<sup>7</sup>Grossberg, Michael D.; Nayar, Shree K.: Determining the camera response from images: What is knowable? In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on* 25 (2003), Nr. 11, S. 1455–1467

<sup>8</sup>Goldman, D. B., 2010. Vignette and exposure calibration and compensation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 32(12), pp. 2276–2288.

<sup>9</sup>d'Angelo, Pablo: Radiometric alignment and vignetting calibration. In: *Proc. Camera Calibration Methods for Computer Vision Systems* (2007).

<sup>10</sup>Gehrke, S., and B. T. Beshah. Radiometric Normalization Of Large Airborne Image Data Sets Acquired By Different Sensor Types. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* 41 (2016)

<sup>11</sup>Besl, P.; McKay, N.: A method for Registration of 3-D Shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)* 14 (1992), Nr. 2, S. 239–256.

<sup>12</sup>Borrman, D.; Elseberg, J.; Lingemann, K.; Nüchter, A.; Hertzberg, J.: Globally Consistent 3DMapping with Scan Matching. In: *Journal Robotics and Autonomous Systems (JRAS)* 65 (2008).

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

#### 2.1.1 AP2100

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Zentrum für Telematik erfolgte zunächst die Auswahl der Hardware (Multispektralkamera) bezüglich des sowie die Erarbeitung der optimalen Sensorsausrichtung am UAV. Hierzu wurden die Daten verschiedener Testflüge analysiert. Mit der angestrebten Ausrichtung für Schrägbilder (oblique) konnten aufgrund der Funktionsweise der Kamera keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden, sodass die Entscheidung auf die nadir Ausrichtung (senkrecht nach unten) fiel. UAV und Sensorsystem sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

#### 2.1.2 AP3100

Die ausgewählte Multispektralkamera zeichnet Rohdaten in einem proprietären, herstellerspezifischem Format auf, welche zunächst durch ein Softwaremodul des Hersteller prozessiert werden muss. Die so erzeugten Mehrkanal Tiff Bilder dienen als Eingabe der in diesem Arbeitspaket definierten und implementierten Schnittstelle zur Structure from Motion (SfM) Software Colmap. Aus den Daten werden dabei die relevanten Kanäle für die 3D Rekonstruktion extrahiert und mit den passenden GPS Positionen verknüpft.

Für die bodengestützte Datenerfassung wurde die Multispektralkamera auf einen terrestrischen Laserscanner montiert und beispielhaft eine Kalibrierung des RGB Kanals zum Laserscanner durchgeführt. Abbildung 2.2 zeigt den Hardwareaufbau. Ein Softwaremodul berechnet die notwendigen Blickwinkel der Kamera zur größtmöglichen Abdeckung des Blickfeld des Laserscanners und sendet entsprechende Steuerkommandos zum Anfahren dieser an den Laserscanner. Vergleichbar mit der Schnittstelle zu Colmap werden die Daten Multispektralkamera zunächst prozessiert, anschließend werden die Bilder auf die Laserscans projiziert.

Sowohl das zur Verfügung stehende UAV als auch die Multispektralkamera sind mit einem RTK GPS System ausgestattet, welches eine genaue Positionsbestimmung der Sensoren ermöglicht. Zur Positionsbestimmung der Laserscans des Bodensegments wird auf die GPS Positionen der Multispektralkamera zurückgegriffen.

#### 2.1.3 AP4100 – Datenerfassung

Der erarbeitete Arbeitsablauf, wie in Abschnitt 2.1.4 und 2.1.5 dargestellt, wurde am Beispiel des Weltkulturerbe Erzbergwerk Rammelsberg erprobt. Dabei handelt es sich um ein historisches Erzbergwerk. Das Gelände umfasst auf eine Fläche von etwa 500m x 200m einen Komplex aus Gebäuden verschiedener Zeitepochen und Architekturstile. Neben der Größe des Geländes stellt auch die Lage am Hang eine Herausforderung für die Erfassung dar.

Aufmaßkampagnen mit Fokus auf Multispektraldaten wurden durchgeführt. Dabei kam neben der Sensorkonfiguration UAV/Multispektralkamera auch das Bodensegment mit terrestrischem Laserscanner und Multispektralkamera zum Einsatz. Das erarbeitete Konzept zur Datenerfassung ist schema-



Abbildung 2.1: UAV mit montiertem Sensormodul, bestehend aus Laserscanner und Multispektralkamera



Abbildung 2.2: Bodensegment. Die auf dem Laserscanner montierte Multispektralkamera dient zur Erzeugung multimodaler Punktwolken

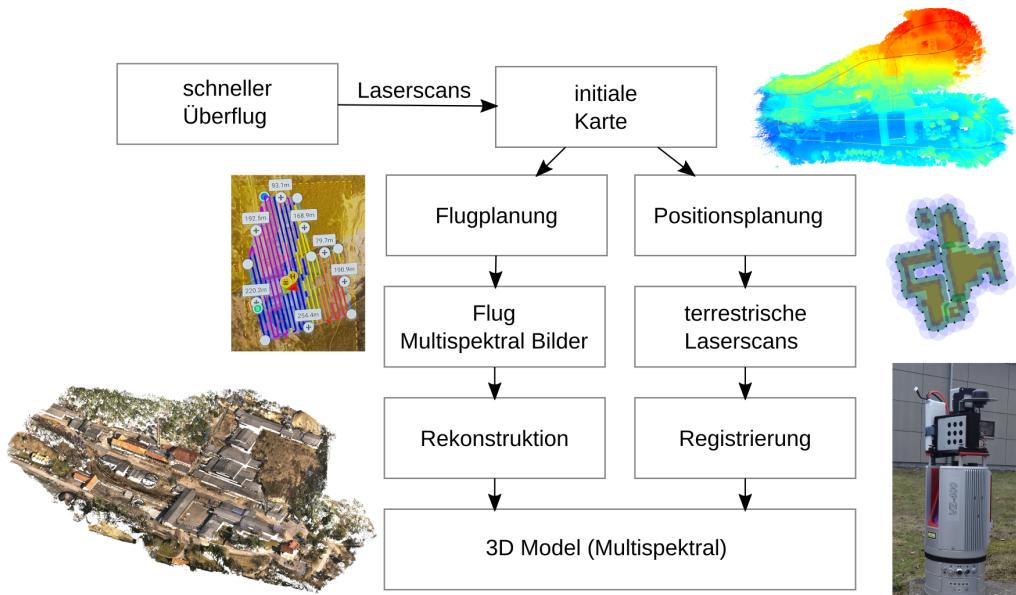


Abbildung 2.3: Ablauf der Datenerfassung

tisch in Abbildung 2.3 dargestellt. Anhand eines manuellen Übersichtfluges wurde zunächst auf Basis von Laserscans ein grobes Geländemodell erstellt, welches für die Flugplanung unter Berücksichtigung der Gelände Topographie sowie der Gebäudehöhen verwendet wurde. Die Datenaufnahme erfolgte daraufhin automatisiert anhand des Flugplans. Zur zusätzlichen Abdeckung vertikaler Strukturen, welche aufgrund der Konfiguration der Multispektralkamera am UAV nicht erfasst werden konnten wurden auch terrestrische Laserscans mit Multispektraldaten erfasst.

In der Nachverarbeitung wurden die entwickelten Konzepte angewendet und ein Modell des Erzbergwerkes rekonstruiert und mit Multispektraldata angereichert. Abbildung 2.4 zeigt die resultierende Punktwolke in Farbdarstellung, während Abbildung 2.5 den aus den Multispektraldata berechneten Normalisierten Differenz Vegetations Index (NDVI) zeigt. Die Auswertung von Multispektraldata erfolgt über die Analyse von Indexbildern. Dabei werden Verhältnisse der Spektralkanäle untereinander betrachtet. Der NDVI betrachtet das Verhältnis zwischen Rot und Nahem Infrarot und lässt dabei einen Rückschluss auf den Chlorophyllgehalt von Pflanzen zu. Mit Bezug auf Gebäudebegutachtung eignet sich das sichtbare und nahe Infrarot Spektrum zur Segmentierung von Vegetation. Pflanzlicher Bewuchs auf Gebäuden ist dabei ein Indiz für Feuchtigkeitsschäden. In Abbildung 2.5 sind Bäume (rot) von Gebäuden (grün) gut zu unterscheiden. Auffällige Werte im Bereich von Gebäudestrukturen wurden nicht identifiziert.

Im Hinblick auf den Denkmalschutz, kann Multispektrale Modellierung zum Aufspüren von Bodendenkmälern eingesetzt werden, wenn sich je nach Verdichtung des Untergrundes die Vegetation unterschiedlich stark entwickelt. Dazu wurde eine Testkampagne zum Aufspüren aufgelassener Deiche im Marschland bei Wilhelmshaven durchgeführt. Dazu wurden Multispektraldata mit Structure from Motion zu einem multispektralen 3D Modell rekonstruiert und die Indices ausgewertet.

#### 2.1.4 AP4200 – Photogrammetrie und Punktwolkenfusion

Ziel des Arbeitspakete ist, alle erfassten Sensordaten in ein gemeinsames 3D Modell zusammenzuführen. Ausgehend von den Anforderungen und Möglichkeiten der gewählten Hardware wurde dazu ein Datenverarbeitungskonzept entwickelt, welches in Abbildung 2.6 dargestellt ist. Im ersten Schritt werden die Multispektraldata extrahiert und für die Rekonstruktion bzw. Projektion vorbereitet.



Abbildung 2.4: Punktwolke des Erzbergwerk Rammelsberg

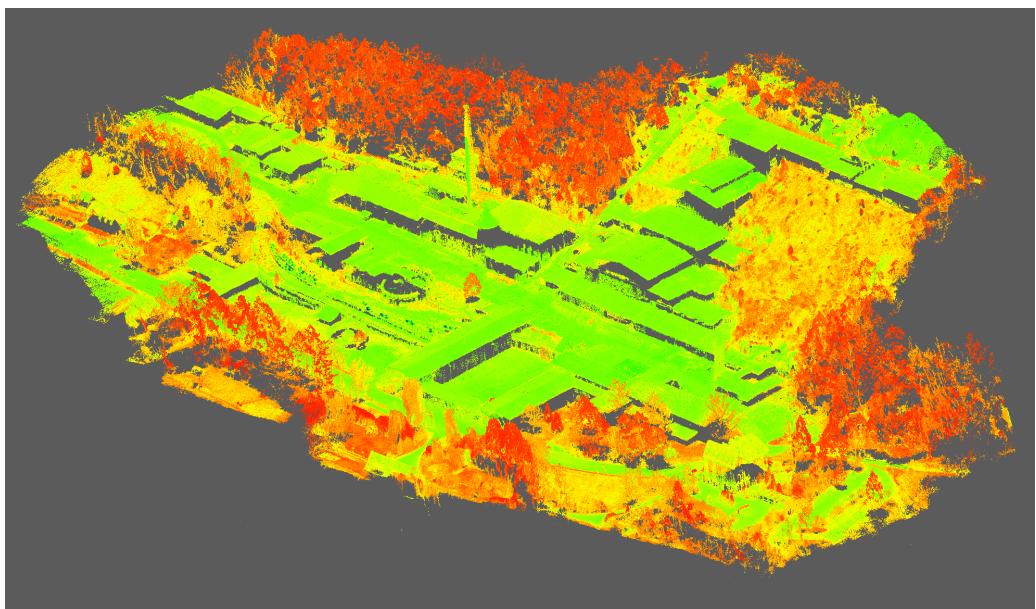


Abbildung 2.5: Punktwolke des Erzbergwerk Rammelsberg. Normalisierter Differenz Vegetations Index berechnet aus den Multispektraldaten

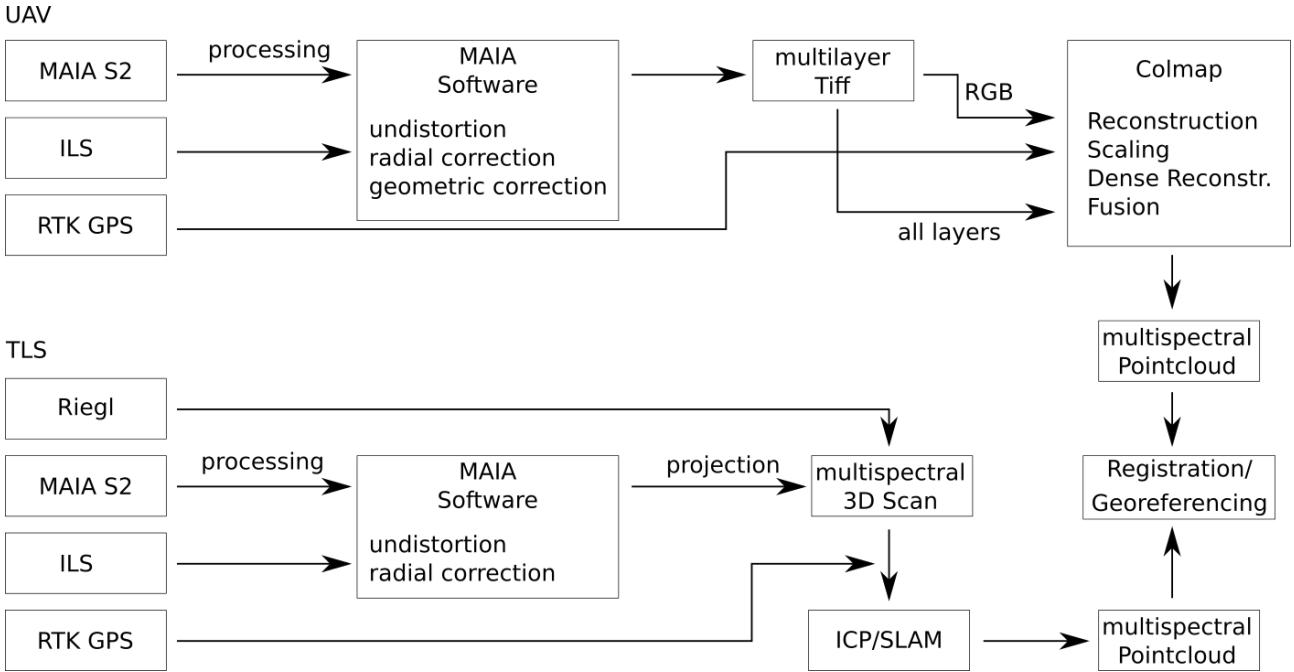


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Datenverarbeitung bis zur fusionierten multispektralen Punktwolke

Anschließend erfolgt auf der einen Seite eine 3D Rekonstruktion mit dem Structure from Motion Verfahren aus den multispektralen Luftbildern. Auf der anderen Seite werden die multispektralbilder auf die terrestrischen Laserscans (TLS) projiziert und diese mit dem ICP Algorithmus registriert. Die Fusion der Daten beider Systeme resultiert in einem multispektralen Gesamtmodell. Die angestrebte Vollautomatisierung des Datenverarbeitung konnte aufgrund der notwendigen proprietären Software zur Extraktion der Multispektraldaten nicht gänzlich erreicht werden.

Für den Aufbau der Punktwolke aus Kameradaten des UAV musste zunächst eine geeignete SfM Software ausgewählt werden. Ein Kriterium war neben der Güte der erzeugten Modelle auch die Erweiterbarkeit zur Einbindung der Multispektraldaten. Die Entscheidung fiel auf Colmap<sup>13 14</sup>, dessen Funktionalität in externe Programme eingebunden aber auch Selbstständig verwendet werden kann.

Die verwendete Multispektralkamera ist als ein Mehrkamerasystem zu betrachten, dessen Kanäle zueinander geometrisch kalibriert werden. Für die Erstellung multimodaler Punktwolken wurde auf Basis der zur Verfügung stehenden Hardware zwei Anwendungsfälle unterschieden. Luftgestützt wird die Punktwolke mit dem SfM Ansatz auf Basis von Kamera Bildern erzeugt. Sowohl die 3D Information als auch Farbinformation stammen dabei vom selben Typ Sensor. Colmap wurde in diesem Arbeitspaket derart erweitert, dass multispektrale Punktwolken erzeugt werden können. Im Fall des bodengebundenen Sensorsystems Laserscanner/Multispektralkamera werden die Multispektralbilder auf den Laserscan projiziert und diese mit dem ICP Algorithmus gegeneinander registriert um die 3D Rekonstruktion zu erhalten.

Bei der anschließend notwendigen Registrierung der Punktwolken aus den unterschiedlichen Sensormodalitäten handelt es sich um ein globales Registrierungsproblem, bei dem jede Punktwolke in ihrem eigenen lokalen Koordinatensystem vorliegt und keine Schätzung der Transformation zueinander vorliegt. Bestehende Verfahren zur globalen Registrierung wurden auf ihre Eignung bezüglich der

<sup>13</sup><https://colmap.github.io>

<sup>14</sup>Schönberger, Johannes L., and Jan-Michael Frahm. Structure-from-motion revisited. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016.

vorliegenden Sensorgegebenheiten und Testdatensätze, sowie der zu erwartenden Größe der Punkt wolken der im weiteren Projektverlauf zu erfassenden Objekte überprüft. Gängige Verfahren erwiesen sich als nicht geeignet aufgrund der zu erwartenden Struktur der Daten. Zur Lösung des Problem wurde das globale Registrierungsproblem durch eine grobe initiale Ausrichtung der Punkt wolken mit Hilfe von GPS Informationen in ein lokales Registrierungsproblem überführt, welches mit dem Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus gelöst wird. Hierzu werden die Punkt wolken derart aufbereitet, dass die Bodenebene weniger stark gewichtet in die Registrierung eingeht. Die fusionierte Punkt wolke wird anhand der GPS Information anschließend erneut ausgerichtet und damit in ein geodätisches Koordinatensystem übertragen.

### 2.1.5 AP4300 – Geometrische und Radiometrische Korrektur

Nach Aufbau des multispektralen Bodensegmentes bestehend terrestrischem Laserscanner und Multi spektralkamera wurde ein geometrisches Kalibrierverfahren implementiert um die, für die Projektion der Multispektraldata auf den Laserscan benötigte Transformation zu bestimmen. Zunächst wurden Kalibrierpattern identifiziert, welche sowohl im Laserscan lokalisierbar sind, als auch in jedem Spektralkanal der Kamera detektierbar sind. Anschließend wurde ein Kalibrierverfahren implementiert, welches die Multispektralkamera als Mehrkamerasytem berücksichtigt und mit Hilfe detekterter Kalibrierpattern die Transformation zwischen Laserscanner und jeder der neun Einzelkameras bestimmt.

Lichtbedingungen einer Umgebung sind ständigen Veränderungen unterworfen. Insbesondere bei Messkampagnen, welche sich über einen längeren Zeitraum von einigen Stunden oder Tagen erstrecken kommen die Auswirkungen zum Tragen, aufgenommene Bilder weisen Farbunterschiede auf. Durch den integrierten Lichtsensor der Multispektralkamera werden zwar für jede Aufnahme Korrekturdaten erfasst, mit welchen während der Verarbeitung eine radiometrische Korrektur durch geführt wird. Dabei handelt es sich nicht um eine absolute Korrektur gegen einen Referenzwert. Diese Korrektur stellt hauptsächlich das korrekte Verhältnis der Spektralkanäle untereinander sicher um verwertbare multispektrale Informationen zu gewährleisten. Variationen in den Beleuchtungsverhältnissen zwischen den Bildern, insbesondere über längere Zeiträume wie zwischen 2 Flügen werden dabei nicht korrigiert. Basierend auf Ideen aus der Panoramabilderstellung wurde ein Ansatz zur radiometrischen Korrektur entwickelt.<sup>15</sup> Dazu wurde zunächst ein Verfahren zur radiometrischen Kalibrierung implementiert, bei welchem mit Hilfe von Farbtafeln mit bekannten Reflexionswerten die Kamerakurve, welche den Zusammenhang zwischen Lichtstärke und Bildintensität beschreibt, geschätzt wird. Als Kostenfunktion kommt die Differenz zwischen Intensitätswerten zum Einsatz. Der nicht lineare Zusammenhang der Radiometrischen Abbildung wird dadurch umgangen, indem die Intensitäten eines Bildes mit Hilfe der Kamerakurven in den radiometrischen Raum des korrespondierenden Bildes transformiert werden.

Zunächst wurde eine geeignete Strategie zu Auswahl von geeigneten radiometrischen Korrespondenzen erarbeitet. Während der Rekonstruktion berechnete Merkmalspunkte eignen sich hierfür nicht, da diese hauptsächlich auf Kanten liegen und größere Helligkeitsunterschiede mit benachbarten Bild punkten aufweisen. Als besser geeignet erweisen sich Bildbereiche mit homogener Helligkeit. Im finalen Schritt der photogrammetrischen Rekonstruktion wird die Punkt wolke aus zuvor geschätzten Tiefen bildern generiert. Zu jedem Punkt der Punkt wolke werden dabei Farbwerte aus allen auf diesen projizierten Bildpunkten gesammelt, woraus Colmap den Mittelwert bildet. Dieser Verarbeitungsschritt wird zur Wahl der Korrespondenzen herangezogen, indem für jedes fusionierte Bild randomisiert eine

---

<sup>15</sup>d'Angelo, Pablo: Radiometric alignment and vignetting calibration. In: Proc. Camera Calibration Methods for Computer Vision Systems (2007).

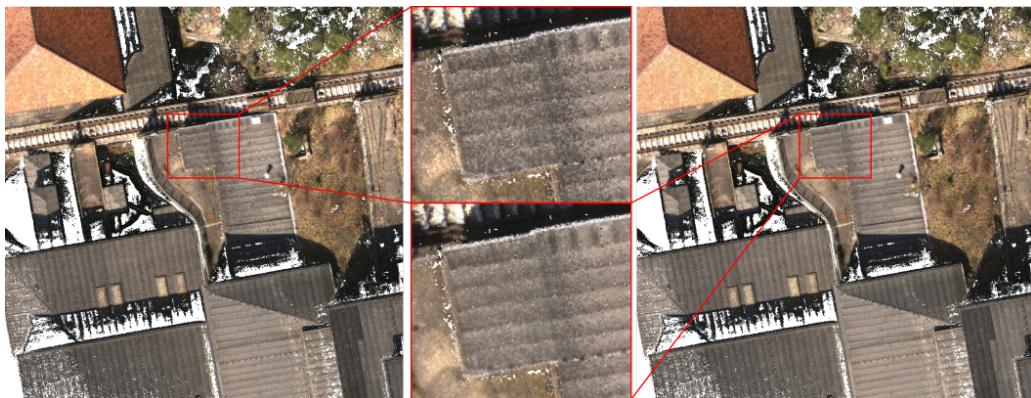


Abbildung 2.7: Punktwolke vor (links) und nach (rechts) der radiometrischen Optimierung auf einem Teildatensatz des Erzbergwerk Rammelsberg. Hervorgehobene Bereiche zeigen Verbesserungen in den Farbverläufen

Auswahl von Bildpunkten getroffen wird. Alle auf diesen Punkt projizierte Bildpunkte bilden dann die Korrespondenzen. Die Homogenität der Umgebung wird durch statistische Analyse dieser bewertet.

In Experimenten hat sich gezeigt, dass das Verfahren für kleine Datensätze gute Ergebnisse liefert und die radiometrischen Abweichungen zwischen Bildern reduziert werden, wie in Abbildung 2.7 visualisiert. Eine Anwendung auf den Gesamtdatensatz des Erzbergwerk Rammelsberg schlug allerdings aufgrund von Speicherbeschränkungen des eingesetzten Optimierers fehl. Eine Reimplementierung mit alternativen, besser skalierenden Optimierungsalgorithmen (Ceres<sup>16</sup>) lieferten zunächst weniger gute Ergebnisse. Eine Analyse des Problems zeigte, dass die Wahl der Korrespondenzen mit oben erwähntem Verfahren nicht gleich verteilt auf allen Bilder erfolgt, was eine ungünstige Gewichtung der radiometrischen Abweichungen zur Folge hat. Als alternativen Ansatz zur Korrespondenzfindung wurde ein Verfahren auf Basis von Orthoprojektionen entwickelt. Dazu wird zunächst die erzeugte Punktwolke in ein DEM (Digitales Höhen Modell) überführt. Die Bilder werden im nächsten Schritt auf das Höhenmodell projiziert und in Orthophotos überführt. Mit Hilfe Positionen der Orthophotos werden dann gleich verteilte Bildpunkte in sich überlappenden Orthophoto gewählt. Ergebnisse aus radiometrischer Korrektur sind vergleichbar mit dem ursprünglichen Ansatz, bei verbesserter Skalierbarkeit durch Einsatz von Ceres. Wie in Abbildung 2.8 dargestellt, erscheinen die Bildintensitäten von Flächen homogener. Anzumerken ist dabei, dass der radiometrische Fehler von beiden Verfahren nicht vollständig eliminiert werden konnte und weiterhin sichtbar ist.

### 2.1.6 AP6100 – System Evaluation

Das erarbeitete Sensorsystem und die Datenverarbeitungsverfahren wurden fortlaufend anhand von Testdatensätzen und Daten aus den Aufmaßkampagnen getestet und evaluiert.

## 2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt Deals3D wurde aus Bundesmitteln durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF im Rahmen des SiFo Programms gefördert. Im Rahmen des Teilprojekts Multimodale 3D-Kartierung für den Denkmalschutz wurde eine wissenschaftliche Mitarbeiterstelle finanziert.

<sup>16</sup>Agarwal, Sameer and Mierle, Keir and The Ceres Solver Team: Ceres Solver. In: <https://github.com/ceres-solver/ceres-solver>, (2023)

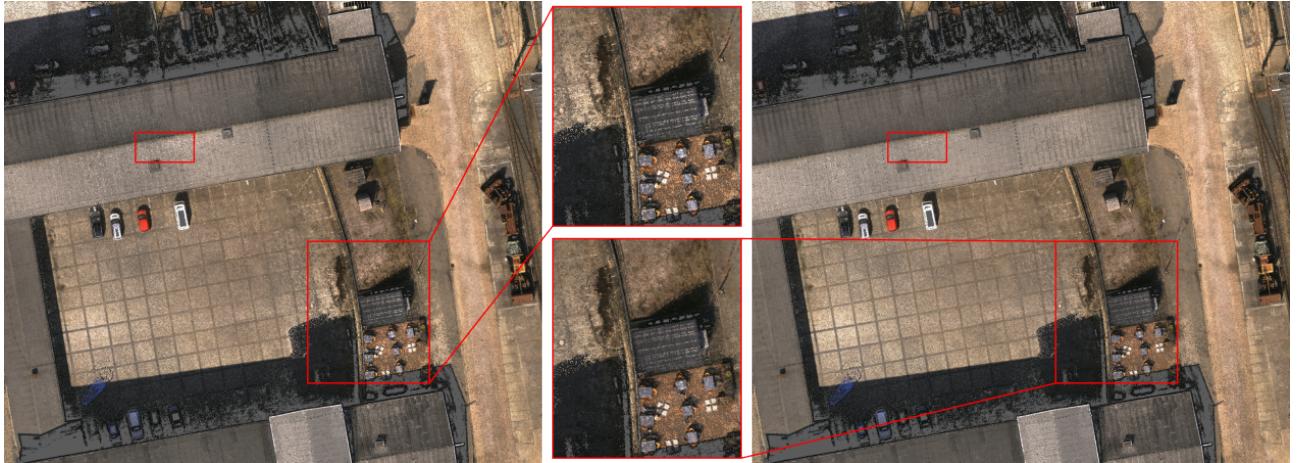


Abbildung 2.8: Ausschnitt aus der Punktwolke vor (links) und nach (rechts) der radiometrischen Optimierung auf dem Gesamtdatensatz des Erzbergwerk Rammelsberg. Hervorgehobene Bereiche zeigen Verbesserungen in den Farbverläufen

## 2.3 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Für die Universität Würzburg war vor Projektbeginn bereits der Umgang mit Laserscannern in der mobilen Robotik bekannt und es wurden Entwicklungsprojekte mit dieser Technologie umgesetzt, unter anderem im Bereich luftgestützter Kartierung. Allerdings ist der Einsatz und die Handhabung von Multispektralkameras insgesamt und im multimodalen, photogrammetrischen Kontext im speziellen für die Universität eine Neuheit. Neben der Herausforderung, Komponenten zu verwenden, welche für einen anderen Einsatzzweck konzipiert wurden, lag ein technisches Risiko auch in der Handhabung des Umfangs an Messdaten aus unterschiedlicher Herkunft. Bei den Messprozessen mit unterschiedlichen Sensoren, welche sehr viel komplexer ausfallen als es bei der Universität bislang der Fall war, ist ein extrem großes Datenvolumen anfallen. Das Handling von Datenmengen in diesem Umfang stellte eine Neuheit und auch ein technisches Risiko dar, welches sich in Bezug auf multimodale Rekonstruktion von Punktwolken und deren radiometrische Korrektur bemerkbar machte. Durch Optimierung der verfolgten Ansätze konnten dahingehende Probleme im Laufe des Projektes gelöst werden.

## 2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

### 2.4.1 wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Als Universität findet keine direkte wirtschaftliche Verwertung statt. Die Ergebnisse wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und dort verwertet. Durch den know-How Gewinn, besteht dennoch eine wesentlich bessere Ausgangsposition, Industriedirektaufträge und Auftragsforschung in Folgeprojekten zu betreiben.

### 2.4.2 wissenschaftliche Erfolgsaussichten

Das Projekt wird in die Lehre des Lehrstuhls Informatik XVII – Robotik einfließen, z.B. in das regelmäßig angebotene Modul „Photogrammetric Machine Vision“. Mit dem Entwicklungsvorhaben konnte der Lehrstuhl seine Kenntnisse in diesem Arbeitsfeld erweitern. Diese Erkenntnisse können durch Einsatz in der Lehre auch an zukünftige Informatiker weitergegeben werden.

Die im Teilprojekt behandelten Fragestellungen lassen sich auf andere Anwendungen übertragen, beispielsweise in den Bereichen industrielles Laserscanning und Bergbautechnologien. Ein zuverlässiges kartierendes System aus Laserscannern, Kameras und UAVs könnte zum Beispiel im Tagebau eingesetzt werden. Weitere Anwendungsmöglichkeiten der Algorithmen sehen wir im Bereich der Tafeldokumentation.

## **2.5 Fortschritt bei anderen Stellen**

Es sind während der Durchführung des Projektes keine neuen Ergebnisse bei anderen Stellen bekannt geworden, welche einen relevanten Einfluss auf die Durchführung des Vorhabens hatten.

## **2.6 erfolgte oder geplante Veröffentlichungen**

Ergebnisse aus dem Deals3D Teilprojekt Kartierung wurden auf dem Workshop „Digitale Repräsentation komplexer UNESCO-Welterbestätten des montanen Erbes“, Goslar, 2023 präsentiert. Eine Veröffentlichung dazu ist in Planung.