



Anwendung von 3D Laserscanning im Himalaya – Erste Auswertungen

Application of 3D Laser scanning in the Himalaya – First Results

Peter Bauer und Helmut Woschitz, Graz

Kurzfassung

Im Rahmen des 2022 gestarteten, interdisziplinären, FWF-Projekts „Buddhist Architecture in Western Himalayas“ sollen bedeutende buddhistische Tempelstätten in einem abgelegenen Gebiet in Nepal (Upper Dolpo) für bauhistorische Analysen dokumentiert werden. Unsere Aufgabe ist es, die zum Teil über 4000 m Höhe liegenden Anlagen vor Ort geodätisch zu erfassen, was im Wesentlichen mit einem Laserscanner (Leica RTC360) erfolgte. Die erfassten Datensätze und davon abgeleiteten Modelle bilden eine wichtige Grundlage für die Architekturforschung mit der Untersuchung der Bauphasen, der historischen Entwicklung der Tempelanlagen und der Bewertung der strukturellen Integrität. In diesem Beitrag werden die Herausforderungen der geodätischen Felduntersuchungen, und die Weiterentwicklung von 3D-Datenverarbeitungsstrategien im Bereich des Kulturerbes diskutiert. Darüber hinaus werden 3D-Ansätze mit Virtual Reality zur Unterstützung der in der Bauforschung etablierten 2D-Analysemethoden getestet. Ebenso wurden erste Versuche zur Automatisierung der Punktwolkenverarbeitung bei nepalesischen Tempelanlagen mit standardmäßig verfügbaren technischen Möglichkeiten durchgeführt.

Schlüsselwörter: Laserscanning, Reality Capturing, Virtual Heritage, Himalaya

Abstract

In 2022 the interdisciplinary research project “Buddhist Architecture in Western Himalayas” has been established, with the aim to investigate and document significant temple sites in Upper Dolpo, a remote area in Nepal. Modern 3D laser scanning technology (Leica RTC360) has been used mainly for the geodetic measurements in heights of about 4000 m above sea level. The acquired datasets and derived geometric models are a major base for the upcoming architectural research and the investigations of the construction phases, the historical development of the temple sites and for the assessment of their structural integrity. This paper discusses the challenges of the geodetic field surveys and elaborates further development of 3D data processing strategies in the cultural heritage sector. Furthermore, 3D approaches with Virtual Reality have been tested to support the well-established 2D analysis methods. Also, first attempts on the automatization of point cloud processing of point of Nepalese temples have been carried out with state-of-the-art methods.

Keywords: Laser scanning, Reality Capturing, Virtual Heritage, Himalaya

1. Einleitung

Verglichen mit anderen geodätischen Aufnahmeverfahren wird das terrestrische Laserscanning noch immer als relativ junge Messmethode betrachtet, wahrscheinlich wegen der vielen Innovationsschritte seit seiner Kommerzialisierung in den frühen 2000er Jahren. Durch die schnelle Erfassung großer Datenmengen ergeben sich vielseitige Anwendungsmöglichkeiten in der Dokumentation und der Visualisierung, aber auch im Deformationsmonitoring, weshalb sich diese Messmethode schnell etabliert hat. Mittlerweile gehört das terrestrische Laserscanning zum Standard-Repertoire im Vermessungsbereich, wie der Fachliteratur (z.B. Kuhlmann und Holst, 2017) entnommen werden kann, oder die vielen Beispiele aus der Praxis zeigen (z.B. DVW 2022 aus der DVW Seminarreihe „Terrestrisches Laserscanning“).

Für die Erstellung von Punktwolken werden dazu von Instrumentenherstellern solide und einfach zu bedienende Gesamtlösungen angeboten. Damit ist es nicht verwunderlich, dass sich dieses Messmittel auch weit über den Bereich der Geodäsie hinaus verbreitet hat, mit unterschiedlichsten Anwendungsbereichen und unterschiedlichsten Vorkenntnissen der Nutzer. Beispielsweise sind die schnell erfassten 3D Daten heutzutage aus der Immobilienbranche, Architektur oder Filmindustrie nicht mehr wegzudenken. Trotzdem ist die Verarbeitung von großen 3D Datenmengen noch immer eine gewisse Herausforderung, vor allem da die notwendige Hard- und Software mit entsprechenden Investitionen verbunden ist und für Low-Cost Lösungen und Eigenentwicklungen das notwendige Know-How oftmals fehlt. Weiters mangelt es oft an langfristigen Konzepten für die effiziente Wertschöpfung aus den erfassten 3D

Daten. Daher ist die generelle Rolle von hochauflösenden 3D Daten in vielen wissenschaftlichen Bereichen noch ein offener Diskussionspunkt.

Eine Branche, in der intensive Versuche unternommen werden den Mehrwert in den 3D Daten auszuschöpfen, ist die Bauwirtschaft. Durch einen hohen Grad an Automatisierung wird im BIM Prozess versucht den Übergang von unstrukturierten 2D Daten auf verknüpfte und semantische 3D Objektmodelle zu etablieren (siehe z.B. Sacks et al. 2018). Durch den Zugriff auf eine umfassende 3D Datenbank und allgemeine Abfragen von Attributen und Topologien soll der Bauprozess transparenter und die Interaktionen zwischen Disziplinen vereinfacht werden. Obwohl die praktische Realisierung dieser Systeme noch vielerorts in den Kinderschuhen steckt, können dem Konzept einige zugrunde liegenden Aspekte und Methoden bereits entnommen werden, welche auch eine Verbesserung in anderen Disziplinen herbeiführen könnte.

In diesem Beitrag wird der Fokus auf die Bauaufnahme im Denkmalsbereich gerichtet, da auch hier mit dem Begriff „Virtual Heritage“ das Bewusstsein für 3D Daten gewachsen ist (siehe z.B. Champion, 2021 oder EU-VIGIE2022).

Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojektes zwischen dem Institut für Architekturtheorie, Kunst- und Kulturwissenschaften (akk) und dem Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz wurden mehrere Tempelanlagen in Upper Dolpo, einer Region im äußersten Nordwesten Nepals, mit moderner Messtechnik vollständig in 3D aufgenommen.

Unsere Aufgabe am IGMS bestand unter anderem in der Planung und Durchführung der Vermessungsarbeiten vor Ort sowie in der Generierung der 3D Modelle, vorrangig mit Standardausrüstung. Dabei stellten sowohl die Abgeschiedenheit der Region (keine/schwache Internet-Verbindung und nur autarke Stromquellen) sowie die Dauer der Expedition von etwa 8 Wochen (2022) als auch die große Höhe im Projektgebiet (mittlere Arbeitshöhe ca. 4000 m) die Arbeitsabläufe und das Instrumentarium vor Herausforderungen. Neben der geometrischen Erfassung der Objekte wurden vor Ort vom akk Detailskizzen angefertigt, erste Abstraktionen durchgeführt und die für die Bauforschung notwendigen weiteren Informationen (z.B. Konstruktionsdetails, Baumaterial, Gebäudeformen) erfasst.

Bei der Prozessierung der hochauflösten 3D Daten und deren Weiterverarbeitung sollten bestehende Arbeitsabläufe für die projektinterne Verwendung von Punktwolken hinterfragt und bei Bedarf überarbeitet werden und damit im Projekt auch neue 3D Zugänge in der Bauforschung aufgezeigt bzw. etabliert werden.

Das Forschungsprojekt reiht sich in eine Reihe von Projekten zur „Buddhist Architecture in the Western Himalayas“ (archresearch, 2023) ein, welche in unterschiedlichen Konstellationen bereits seit 1998 an der TU Graz durchgeführt werden. Unter Federführung von Prof. Holger Neuwirth wurden zahlreiche Sakral- und Profanbauten in Nepal, Indien und Tibet inventarisiert und erforscht. Kulturgeschichtlich sollte in diesen Projekten geklärt werden, welchen Zeitperioden die Bauwerke zuzuordnen sind, welche Merkmale und Bautechniken gewissen Typologien entsprechen und wie sich die Bauwerke im Laufe der Zeit verändert haben. Dabei wurden im Wesentlichen 2D Grundrisspläne und Vertikalschnitte verwendet, die – in diesem schwer zugänglichen Gebiet – hauptsächlich auf einfach durchführbare Messungen (Maßband, einfache Laser-Entfernungsmesser) basieren. Die Methoden und Ergebnisse der vorangegangenen Projekte wurden in Neuwirth und Auer (2013, 2015, 2021) umfangreich dokumentiert.

2. Datenaufnahme in hochalpinem Gelände

In der Literatur werden für Bauaufnahmen je nach Anwendungsgebiet oft unterschiedliche Genauigkeitsstufen verwendet, die von einer „Genauigkeit besser ± 10 cm“ für die Stufe II bis zu „besser ± 2 cm“ für die Stufe IV reichen (siehe z.B. Wiedemann, 2004). Neuere nationale Werke, z.B. Bundesdenkmalamt (2018), empfehlen heute in der Regel digitale Vermessungsverfahren anzuwenden. Hier wird für historische Objekte auf eine Messgenauigkeit von 1 cm unter Bezugnahme auf die ÖNORM A 6250-2 verwiesen, wobei für Außenanlagen größere Messabweichungen (bis 10 cm) zulässig sind.

Diese zu erreichende „Messgenauigkeit“ von 1 cm wurde im Projekt als lokale 3D Messpräzision ausgelegt, unabhängig von Registrierung und Modellierung, welche im Nahbereich mit terrestrischem Laserscanning, auch unter Berücksichtigung von systematischen Messfehlern, als durchaus realistisch zu sehen ist. Die terrestrischen Laserscans wurden teilweise durch photogrammetrische Aufnahmen ergänzt und bei



Abb. 1: a) Außenbereich einer Tempelanlage auf 4500 m Seehöhe und b) Innenraum mit künstlicher Beleuchtung

größeren Anlagen durch präzisere Messungen mit einer Totalstation gestützt. Die Vorteile der Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie in der Bauaufnahme wurden u. a. bereits in Bauer et al. (2022) anhand der Vermessung der Burgruine Neu-Wildon gezeigt.

Die Laserscans wurden mit einem Leica RTC360 (Leica, 2018, Biasion et al., 2019) durchgeführt, da er einen guten Kompromiss zwischen erreichbarer Genauigkeit im niedrigen Millimeterbereich, der räumlichen Auflösung (3 mm @ 10 m) und einer hohen Scan Rate (2 Mio. Punkte/sec) bietet. Der damit erreichbare Detaillierungsgrad der Aufnahme wurde vorab jedenfalls als ausreichend festgestellt. Weiters waren auch das relativ geringe Gewicht (5,4 kg RTC360, 15 kg mit Akkus und Zubehör im Transportkoffer) und die relativ kleine Größe (120 x 240 x 230 mm³ RTC360) wichtige Kriterien. Bei der Anreise musste der Transport aller Instrumente im Handgepäck von Flugzeugen möglich sein und das Instrumentarium auch für den mehrtägigen Transport mit Maultieren über steile Wege und über 5000 m hohe Bergpässe geeignet sein. Darüber hinaus erlaubt die weitgehend realisierte Automatisierung des Scanner-Systems ein effizientes Vorgehen im Feld.

Mit einer vorab Registrierung der Punktwolken konnten bereits vor Ort erste Analysen basierend auf geometrisch richtigen Grundrissen durchgeführt werden. Mit dem RTC360 konnten nicht nur die Bauelemente in den Innenräumen dokumentiert werden, sondern auch die Form und Lage der Bebauung im Außenbereich ausreichend erfasst werden (siehe Abbildung 1). Die Reichweite von 65 m bei der verwendeten räumlichen

Auflösung von 3 mm (siehe Leica 2018) war für die Erfassung des Hauptgebäudes (Seitenlängen von etwa 10–30 m), der umgebenden Objekte sowie des umliegenden Geländes (wenige 100 m Gesamtausdehnung) ausreichend. Mit etwa 50 Scan-Standpunkten pro Tag benötigte die Aufnahme einer mittelgroßen Anlage in etwa zwei Tage. Die detaillierte Erfassung von Wandmalereien und Schnitzereien im Innenbereich ist mit dem RTC360 aber nur bedingt möglich. Die übergeordnete Erfassung der Lage dieser Elemente im Objekt bringt aber den Vorteil, Detailfotos richtig zuordnen zu können und diese Aufnahmen auch über das Oberflächenmodell später entzerren zu können.

Trotz der rasanten Weiterentwicklungen im Bereich des „Reality Capturing“ (i.e. ein Sammelbegriff verschiedener 3D Messtechniken) ist für das Erreichen von hohen Genauigkeiten im niederen Millimeterbereich noch immer geodätisches Wissen erforderlich.

Die Einbindung unabhängiger Referenzkoordinaten bildet nach wie vor eine Grundvoraussetzung einer zuverlässigen Bauaufnahme, zumindest bei größeren Objekten. Hierfür wurden Zielmarken (Sektorzieltafeln mit 10 x 10 cm²) verwendet, die mit einer manuellen Totalstation (Leica TS11, gewählt wegen des relativ geringen Stromverbrauchs) in lokal angelegten, sehr einfachen, geodätischen Netzen koordinativ bestimmt wurden. Transport- und gewichtsbedingt standen nur zwei Reflektoren mit Mini-Spinnen zur Verfügung, die unter permanenter Kontrolle der Teilkreisverdrehung, in einem Halbsatz eingemessen wurden. Die Messkonfiguration wird exemplarisch

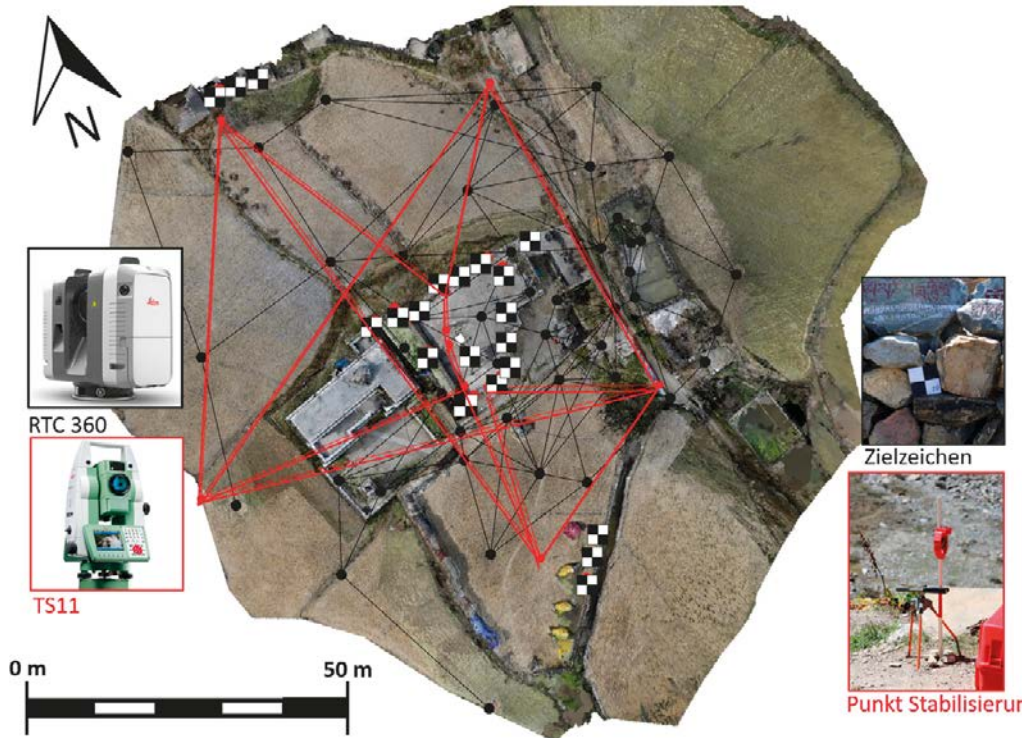


Abb. 2: Messkonfiguration mit dem RTC360 und der TS11 im Außenbereich des Nesar Tempels

für den Nesar Tempel in Abbildung 2 gezeigt. Die Scans wurden anschließend im Programm *Leica Register 360* in einer Kombination aus Cloud-to-Cloud Verbindungen und den Messungen zu den Zielzeichen registriert.

Eine Besonderheit stellte der Einsatz in großer Höhe dar. Der geringe Luftdruck in einer mittleren Projekthöhe von über 4000 m und die tagsüber während der Messung auftretenden Temperaturschwankungen von etwa 20°C können sich in Fehlern der Distanzmessungen von über 100 ppm auswirken. Werden atmosphärische Korrekturen bei kleinräumigen Projekten unter Standardbedingungen üblicherweise vernachlässigt, so ergeben sich hier aber bereits Abweichungen von mehr als 1 cm bei einer Ausdehnung des Objektes von 100 m; im Vergleich zu den Genauigkeitsspezifikationen des Herstellers ein doch beachtlicher Wert. Im Benutzerhandbuch des RTC360 (Leica 2018) findet sich kein Hinweis zu atmosphärischen Korrekturen, weshalb wohl davon ausgegangen werden kann, dass die notwendigen Streckenreduktionen bis jetzt noch nicht in der Standard Scanning Software berücksichtigt werden. Experimente zur

Verifikation wurden bereits durchgeführt, darüber wird aber an anderer Stelle berichtet werden.

Für die Texturierung der Punktwolken und späteren Modelle besitzt der RTC360 drei HDR Kameras zur on-board Erzeugung von 360° Panoramafotos (432 Mpx). Die Auflösung der Panoramen (1 Pixel entspricht ca. 1 mm² bei Entfernung bei 2 m) war ausreichend für die Texturierung in den Innräumen bei überwiegend geringem Objekt-Abstand (siehe Abbildung 3a), um die Malereien in einen 3D Kontext zu setzen. Die eingebauten Kameras passen durch Mehrfachaufnahmen die Helligkeit des Bildes automatisch an die unterschiedlichen Beleuchtungen im Raum an. In Innenräumen mit schlechter Beleuchtung beobachteten wir eine Farbverschiebung der Panoramen ins bläuliche (vermutlich durch die internen Bild-Korrekturen der HDR Kameras in den sehr dunklen Abschnitten), weshalb wir für die Scans in Innenräumen ohne natürliche Lichtquelle eine Beleuchtungseinrichtung mit drei Streulichtlampen entwickelt haben, die für ein homogeneres Resultat sorgt (siehe Abbildung 1b).

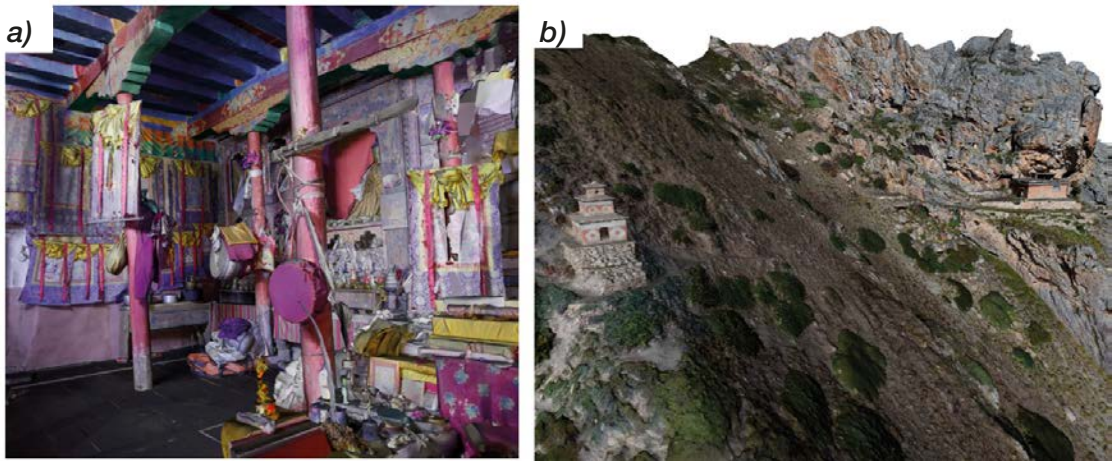


Abb. 3: a) 3D Modell eines Tempelraums im Innenbereich und b) Automatisch vermaschtes und texturiertes 3D Modell im Außenbereich

Für die Texturierung des Modells der Außenanlagen wurden die Laserscans mit hochauflösenden photogrammetrischen Bildern (Canon EOS760D Spiegelreflexkamera) ergänzt. Wo es möglich war, kam für die Ableitung von Objekt- und Geländeinformation in unwegsamen oder abgeschatteten Bereichen auch eine DJI Mini 2 Drohne zum Einsatz. Die Scans wurden im E57 Format und die Fotos als JPG im Programm *Reality Capturer* co-registriert und ein gemeinsames texturiertes Modell abgeleitet (Vermaschungen im Außenbereich, siehe Abbildung 3b).

3. Nachhaltige Datenspeicherung

Abhängig von der Größe des Objektes und der Prozessierung der Daten kann der benötigte Speicherbedarf von mehreren GB bis hin zu einigen TB betragen, und damit die weitere Bearbeitung oder Darstellung recht zeitintensiv sein. Die Grenzen in der Datenverarbeitung, welche uns jetzt noch vor Probleme stellen, werden aber durch die Entwicklungen im IT Sektor wohl schon in naher Zukunft aufgebrochen werden. Daher ist es bei der Bearbeitung keine triviale Entscheidung zu beurteilen, welche Daten (Rohdaten oder fertige Modelle) von zukünftigen Generationen überhaupt wiederverwendet werden können und den größten Nutzen für diese bieten.

Vor allem bei Projekten, die das kulturelle Erbe betreffen, ist die nachhaltige Archivierung von digitaler Bestandsdokumentationen ein schwieriges Thema, wie auch in der facheinschlägigen ÖNORM A 6250-2 angemerkt wird. Die langfris-

tige Interoperabilität und Reproduzierbarkeit der Daten muss hier eine Grundvoraussetzung sein und daher ist im Zweifel die analoge Archivierung in gedruckter Form noch immer praktisch relevant (ÖNORM A 6250-2). Da sich dieses Konzept auf 3D Daten aber nicht sinnvoll anwenden lässt, müssen bestmöglich Übergangslösungen gefunden werden bis die Ressourcen für eine einheitliche Archivierung von 3D Daten an zentraler Stelle zur Verfügung stehen. Champion und Rahman (2020) haben die Problematik der (Langzeit-) Speicherung von 3D Daten diskutiert, verfügbare Repositorien für 3D Daten kritisch beleuchtet und damit aufgezeigt, dass aus rein technischer Sicht bereits einiges mehr möglich wäre.

In diesem Projekt wird auf die Langzeit-Speicherung von Rohdaten bzw. Zwischenergebnissen in herstellerproprietären Formaten bewusst verzichtet, da für die meisten Programme eine Kompatibilität für die nächsten 50 Jahre (und mehr) sehr unwahrscheinlich scheint. Eine zu komplexe Datenstruktur erschwert darüber hinaus eine zukünftige Nutzung in Softwareprodukten von Drittanbietern.

In unserem Datenmodell bildet die registrierte Punktwolke in einem herstellerunabhängigen und offenen Format das zentrale Element. Dabei ist aber darauf zu achten, dass die Punktwolke getrennt nach ihren einzelnen Scanner-Standpunkten gespeichert wird. In dem weit verbreiteten E57 Format (Huber 2011) fallen für einen einzelnen Panorama Scan des RTC360, mit der höchsten Auflösung (3 mm @ 10 m), ca. 3,5 GB an Punkt-

wolkendaten an. Durch das Separieren der Standpunkte kann die Registrierung zu einem späteren und technologisch fortgeschrittenen Zeitpunkt angepasst werden, und die Möglichkeiten für die weitere Anwendung von Filtermethoden oder stochastischen Analysen wird erheblich erleichtert. Im E57 Format betrachten wir es allerdings als kritisch, dass die einzelnen Standpunktskoordinaten des Scanners nicht direkt mitgespeichert werden, was mögliche spätere Korrekturen, z.B. wegen unterschiedlicher Auftreffwinkel, erschwert und eine nachträgliche Rekonstruktion des Scanner-Zentrums benötigt. Dennoch erhält damit ein künftiger Nutzer einen Datenpool, der direkt verwendbar ist. Darüber hinaus beinhaltet er auch noch viele Möglichkeiten zur Neu- und Weiterverarbeitung, um für eine spätere Anwendung mit anderem Focus auch ein möglichst optimales Ergebnis erzielen zu können.

Um den Zugang zu den Daten für Forscher aus anderen Fachgruppen zu erleichtern, werden auch texturierte Dreiecks-Vermaschungen aus der bearbeiteten Punktwolke erzeugt und gespeichert. Modelle im textbasierten und offenen OBJ-Format werden beinahe von allen herkömmlichen Grafik-Programmen unterstützt und sind weit verbreitet. Ein hochaufgelöstes Modell (ca. 3 GB) und ein niedrig aufgelöstes Modell (ca. 300 MB) von jeder Anlage decken bereits ein breites Anwendungsspektrum ab, ohne eine weitere Punktwolkenprozessierung zu benötigen, z.B. Rendern für Präsentationen oder VR Rundgänge. Aufgrund des rasanten Fortschritts von Vermaschungs- und Texturierungsalgorithmen werden aber diese Daten, im Vergleich zu den E57 Punktwolken und JPG Bildern, wohl am schnellsten die technische Relevanz verlieren.

4. Aufbereitung der Punktwolken für die Datenanalyse

Die Datenaufnahme und Sicherheit der Datenarchivierung bilden die Eckpunkte des Lebenszyklus einer Punktwolke; ihr Hauptzweck ist aber der Informationsgewinn durch eine Datenanalyse, wünschenswerterweise aus mehreren Perspektiven. Die hierbei nötigen Bearbeitungs- und Abstrahierungsschritte sind stark von den individuellen Bedürfnissen der (Forschungs-) Disziplin und der Aufgabenstellung abhängig. Aus derselben Punktwolke können unterschiedliche Informationen abgeleitet werden, weshalb auch die Resultate je nach verwendeter Prozessierung variieren können.

Aus den primär generierten 3D Modellen können über das Anfertigen von z.B. horizontalen oder vertikalen Schnitten auch klassische 2D Pläne der Gebäude erstellt werden. Diese thematischen 2D Pläne bilden ein langerprobtes und anerkanntes Mittel in der vergleichenden Bauforschung. Beinahe alle herkömmlichen Instrumentenhersteller bieten für diesen Arbeitsschritt einfache Software-Tools an. Die Extrahierung von diesen Plänen aus den rohen 3D Punktwolken oder bereits verarbeiteten 3D Modellen entspricht damit in vielen Disziplinen der Hauptanwendung und dem aktuellen Stand der Technik (siehe z.B. Bruschke 2016).

Vor allem in komplexen 3D Situationen kann dies aber dennoch schwierig sein, da dabei in der Regel Generalisierungsschritte mit einer Vorinterpretation des Bearbeiters, entsprechend der Aufgabenstellung, durchlaufen werden. Die 2D Schnitte erleichtern es zwar den Überblick zu bewahren und damit die folgende visuelle Beurteilung, sorgen aber auch dafür, dass die Plangrundlage im Analyseprozess frühzeitig subjektiven Einflüssen unterliegt.

Neben dem 2D Plan ist die 3D Visualisierung in einer Virtual Reality (VR) Umgebung eine weitere Methode für die visuelle Analyse der Daten. Mit VR-Brillen können direkt die texturierten Modelle betreten und aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden. Damit erleichtert sich die Interpretation von 3D Sachverhalten, da die Visualisierung den beschränkten Möglichkeiten eines 2D Bildschirms überlegen ist. Auch die Betrachtung in VR ist nicht mehr an die individuelle geometrische Vorstellungskraft, aus einem 2D Plan gedanklich ein 3D Gebäude entstehen zu lassen, gebunden.

Jedoch beinhaltet das reine geometrische 3D Modell – im Gegensatz zum thematischen 2D Plan – neben der Punktnachbarschaft und einem RGB Wert keine Informationen der Objekte im Raum. Daher ist die VR Visualisierung des Modells alleine für eine typologische Analyse aufgrund des Datenmodells zum jetzigen Technologiestand ungeeignet. Als Ergänzung zu klassischen 2D Methoden hat sich VR aber als wertvolle 3D Darstellung durchgesetzt, siehe z.B. auch die virtuelle Rekonstruktion der Hansestadt Stade (Kersten und Walmsley 2020).

VR und andere immersive Technologien bieten aber langfristig den großen Vorteil gegenüber 2D Methoden, dass sie als Visualisierungsmethoden noch keine Grenzen in der Komplexität der Da-

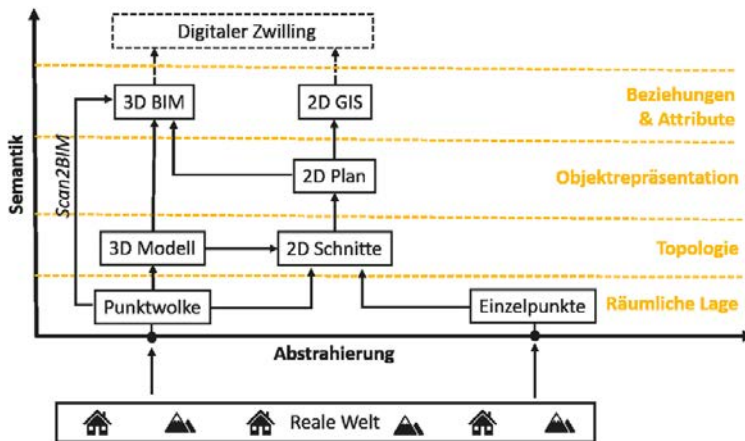


Abb. 4: Komplexitätsgrad in der Datenstruktur bei der Abbildung der realen Welt

tenstruktur aufweisen. Daher sind sie auch mit BIM Prozessen kompatibel und werden in Zukunft als wichtige Mensch-Computer Schnittstelle in komplexen 3D Informationssystemen eine noch größere Rolle spielen.

In Abbildung 4 wird ein Versuch unternommen, die Abbildung der realen Welt in verschiedenen Abstraktions- und Informationsstufen darzustellen. Dies soll verdeutlichen, dass eine komplexere Datenstruktur auch neue Analysemöglichkeiten mit sich bringt. Gut zu erkennen ist das an der Beziehung zwischen 2D Plan und 2D GIS, wo sich der disziplinenübergreifende Mehrwert durch die Attributierung und Herstellung von Objektbeziehungen bereits flächendeckend etabliert hat.

Für die Bauaufnahme, wo vermehrt 3D Daten verwendet werden, überschneiden sich damit die Zielsetzungen der „Virtual Heritage“ mit jenen der Bauwirtschaft. In der Literatur wird hierbei bereits die Analogie zu den BIM Prozessen mit der Einführung des Begriffs des Heritage BIM (H-BIM) in der Denkmalpflege diskutiert. Entscheidend für diesen Prozess ist aber eine Balance zwischen Automatisierung und Expertenwissen. Dadurch, dass die manuelle Digitalisierungsarbeit auf ein Minimum reduziert werden kann, werden Kapazitäten frei um das Fachwissen an überge-

ordneter Stelle wieder einzubinden. Ein gutes Beispiel für einen Scan2BIM Ansatz im Denkmalsektor für H-BIM wurde von Croce et al. (2023) bereits für eine Klosteranlage in Pisa gezeigt.

Im Rahmen dieses Projekts haben wir damit begonnen ähnliche Ansätze an den gewonnen 3D Punktwolken zu testen, um beurteilen zu können, was mit Standardsoftware bereits alles möglich ist. Schon nach kurzer Einarbeitungsphase konnten erste Erfolge punktuell bei der Bearbeitung von Stupa-

Gruppen erzielt werden. Stupas sind einfache Bauten, die häufig auftreten, unterschiedlich groß sein können und durch geometrische Primitive (z. B. Ebenen) einfach approximiert werden können. In der Folge lassen sie sich in unterschiedliche Bautypen gliedern, die auch regional und kulturell bedingt unterschiedliche Ausprägungen haben können.

In Abbildung 5 ist zu sehen, wie die gesamte Punktwolke einer Tempelanlage, mit bereits vorhandenen Algorithmen und vortrainierten Klassen, in der Software *Leica Cyclone 3DR* zuverlässig in Bauwerke, Gelände und Bewuchs getrennt werden kann, deren Punktwolken einzeln gespeichert werden können.

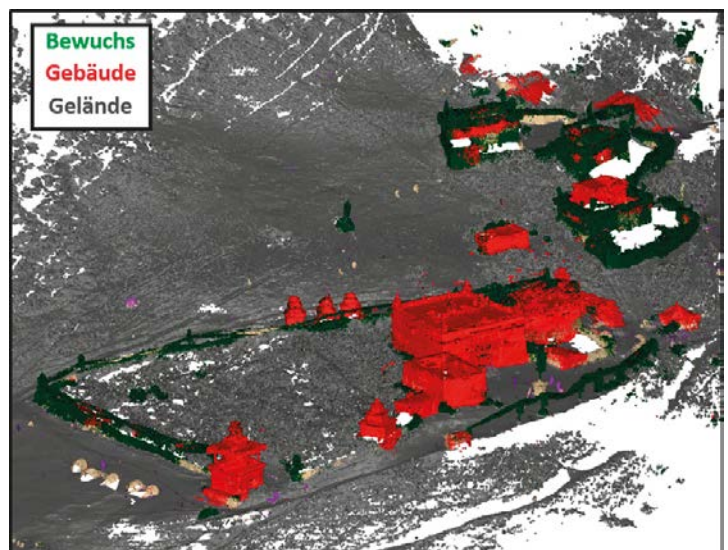


Abb. 5: Segmentierung einer Tempelanlage in Cyclone 3DR

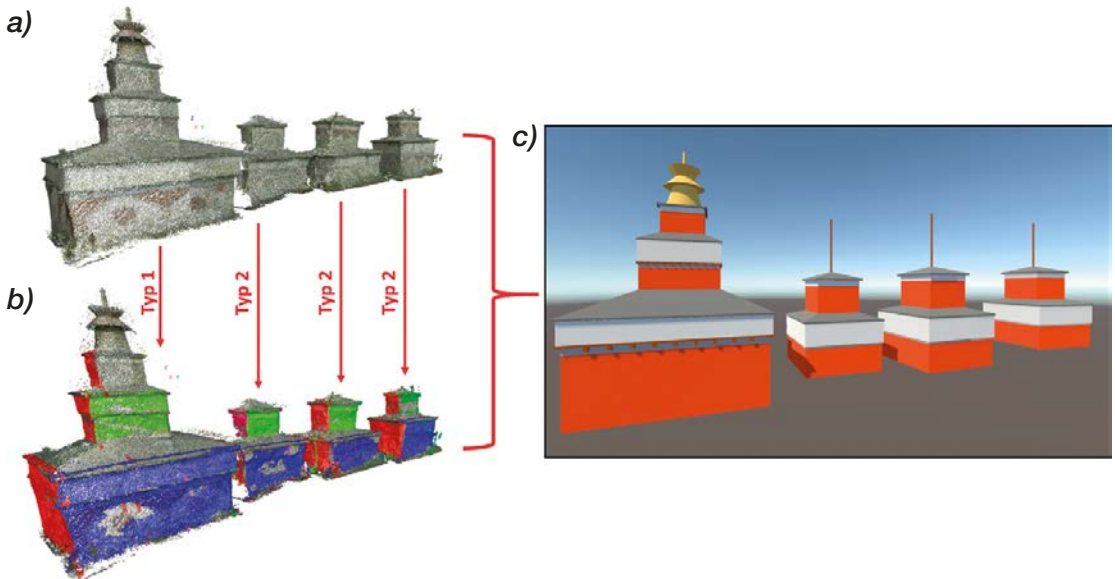


Abb. 6: a) Punktwolke einer Stupa-Gruppe, b) Mittels RANSAC Algorithmus in open3D detektierte Vertikalfächen und c) automatisch generiertes Modell aus Objekt-Templates in Unity

Die Punktwolken einiger Stupas (Abbildung 6a) wurden im Anschluss unter Verwendung der *open3D* Toolbox in Python weiterverarbeitet, wobei die vertikalen Flächen der einzelnen Objekte mittels RANSAC Algorithmus detektiert wurden (Abbildung 6b). Aus den Flächen wurde die Orientierung, der Maßstab, das Zentrum und der übergeordnete Stupa-Typ automatisch extrahiert, wobei für diesen Versuch nur zwischen zwei- bzw. dreiteiliger Stupa unterschieden wurde. Für beide Typen wurden zuvor Objekt-Templates definiert. In der aus dem Spielbereich stammenden Game Engine *Unity* kann mit den extrahierten Informationen und den Templates ein objektbasiertes 3D Modell aufgebaut werden (Abbildung 6c).

Die automatische Konvertierung und Attributierung der gesamten Anlage mit komplexeren Objekten, wie Tempel und Wohnhäusern, stellt für solche Projekte jedoch noch weitgehend eine Zukunftsvision dar. Zum jetzigen Zeitpunkt konnte aber gezeigt werden, dass für einfache Baugruppen mit den standardmäßig verfügbaren technischen Möglichkeiten eine automatisierte Bearbeitung bereits durchgeführt werden kann.

Mit der weiteren Entwicklung von intelligenten Algorithmen und Klassifizierungsansätzen im Scan2BIM Bereich ist hier großes Potential für eine überregionale Bearbeitung von Punktwolken zu sehen. Vor allem da auch bereits in Nepal Möglichkeiten diskutiert werden, über crowd-

basierte Ansätze mit low-cost Ausrüstung (und den entsprechenden Genauigkeiten) großflächig 3D Daten von Baudenkmälern zu erfassen (z.B. Dhonju et al. 2017). Spätestens dann sollte man sich mit einer einheitlichen und effizienten Analyse in einem größeren Kontext auch praktisch auseinandersetzen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des vorgestellten Projekts wurden mehrere abgelegene nepalesische Tempelanlagen vollständig in 3D vermessen. Der Leica RTC360 Laserscanner hat sich dabei auch im Hochgebirge als geeignetes Messmittel zur Erfassung der Geometrie der Objekte herausgestellt. Für die homogene Texturierung in den Innenbereichen mussten aber zusätzliche Streulichlampen verwendet werden und auch die im Projekt notwendigen atmosphärischen Korrekturen der Distanzmessungen werden in der Dokumentation des Instruments ungenügend behandelt.

Für die architektonische Bauanalyse wurden Bestandspläne aus Hand-Aufmaßen um hochauflösende 3D Daten ergänzt und zahlreiche Anlagen überhaupt zum ersten Mal messtechnisch aufgenommen. Zuzüglich zu klassischen 2D Analysemethoden wurden auch neue 3D Zugänge erprobt. Ein Mehrwert in der Darstellung und Analyse kann vor allem durch die Einbeziehung von Virtual Reality erzielt werden.

Gezeigt wurde auch, dass nicht nur die Datenerfassung mittels Laserscanning vor Ort, sondern auch die Punktwolkenprozessierung, technologisch schon sehr weit fortgeschritten sind. Mit der Entwicklung von intelligenten Algorithmen sind hier in den nächsten Jahren weitere Verbesserungen zu erwarten. Dies eröffnet Möglichkeiten, auch in der Bauforschung von komplexeren Datenstrukturen in der Analyse zu profitieren. Welche Prozesse aber tatsächlich in der Bauforschung akzeptiert werden, und in der Folge vermehrt Anwendung finden könnten, bleibt eine noch zu klärende Fragestellung im laufenden Projekt.

Danksagung

Ein großer Teil der Arbeiten wurde im Rahmen des FWF Projekts P 35897 „Buddhistische Architektur im westlichen Himalaya“ durchgeführt.

Referenzen

archresearch (2023): Buddhist architecture in the Western Himalayas. Projekthomepage, <https://archresearch.tugraz.at> [17.08.2023]

Bauer P, Kaufmann V, Mikl T, Sulzer W, Lienhart W, Seier G (2021): 3D modelling of the castle Neu Wildon – Applying drone based photogrammetry and terrestrial laser scanning – a comparative study. Proc. 26th Int. Conf. on Cultural Heritage and New Technologies 2021, in Druck.

Biasion A, Moerwald T, Walser B, Walsh G (2019): A new approach to the Terrestrial Laser Scanner workflow: the RTC360 solution. FIG Working Week 2019, Hanoi, Vietnam, April 22–26, 2019. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2019/papers/ts05f/TS05F_biasion_et_al_9968.pdf

Bruschke A (2016): Praxisratgeber zur Denkmalpflege – Bauaufnahme, Teil 1. Informationsschriften der Deutschen Burgenvereinigung e.V. (DBV), D-56338 Braubach, <https://www.deutsche-burgen.org/de/institut/assets/pdf/nr14.pdf> [10.08.2023]

Bundesdenkmalamt (2018): Richtlinie für Bauhistorische Untersuchungen, 2. Fassung 1. Oktober 2018. <https://www.bda.gv.at/dam/jcr:792390e3-0a24-472c-baf7-46e5d72d6f9d/Richtlinien%20f%C3%BCr%20bauhistorische%20Untersuchungen.pdf> [2023.08.10]

Champion E, ed. (2021): Virtual Heritage: A Guide. London: Ubiquity Press. <https://doi.org/10.5334/bck>

Champion E, Rahman H (2020): Survey of 3D digital heritage repositories and platforms. Virtual Archaeological Review 11(23): 1–15. doi: 10.4995/var.2020.13226

Croce V, Caroti G, Piemonte A, De Luca L, Véron P (2023): H-BIM and Artificial Intelligence: Classification of Architectural Heritage for Semi-Automatic Scan-to-BIM Reconstruction. Sensors 2023, 23, 2497. <https://doi.org/10.3390/s23052497>

Dhonju H, Xiao W, Sarhosis V, Mills J, Wilkinson S, Wang Z, Thapa L, Panday US (2017): Feasibility study of low-cost image-based heritage documentation in Nepal. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W3: 237–242. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-237-2017>

DVV (2022): Terrestrisches Laserscanning 2022 (TLS2022). Schriftenreihe des DVV 104, Wißner-Verlag.

EU-VIGIE (2022): Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage: mapping parameters, formats, standards, benchmarks, methodologies, and guidelines. - VIGIE 2020/654 Final Study Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi: 10.2759/471776

Huber D (2011): The ASTM E57 file format for 3D imaging data exchange. Proc. SPIE 7864, 78640A. doi: 10.1117/12.876555

Kersten T, Walmsley A (2020): Entwicklung einer interaktiven, immersiven Virtual-Reality-Applikation des historischen Stadtmodells Stade 1620. Tagungsband der 40. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, 4.-6. März 2020 in Stuttgart, Publ. Deutschen Ges.f. Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation 29: S.99–113.

Kuhlmann H, Holst C (2017): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. In Schwarz W (Hrsg.) Ingenieurgeodäsie. Springer, Berlin: S.167–212.

Leica (2018): Leica RTC360 User Manual. Dok.Nr. 870891-1.0.1en, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz.

Neuwirth H, Auer C (eds.) (2013): The ancient monastic complex of Dangkar. Buddhist architecture in the Western Himalayas, Bd.1. Graz, Verlag der Technischen Universität Graz. ISBN: 978-3-85125-298-9, <https://openlib.tugraz.at/the-ancient-monastic-complex-of-dangkar-2013>

Neuwirth H, Auer C (eds.) (2015): The Three Storied Temple of Wanla. Buddhist Architecture in the Western Himalayas, Bd.2. Graz, Verlag der Technischen Universität Graz. ISBN 978-3-85125-392-4, <https://openlib.tugraz.at/the-three-storied-temple-of-wanla-2015-2>

Neuwirth H, Auer C (eds.) (2021): The Ancient Monastic Complexes of Tholing, Nyarma and Tabo. Buddhist Architecture in the Western Himalayas, Bd.3. Graz, Verlag der Technischen Universität Graz. ISBN 978-3-85125-775-5, <https://openlib.tugraz.at/the-ancient-monastic-complexes-of-tholing-nyarma-and-tabo-2021>

ÖNORM A 6250-2 (2015): Aufnahme und Dokumentation von Bauwerken und Außenanlagen. Teil 2: Bestands- und Bauaufnahme von denkmalgeschützten Objekten, Ausgabe 2015-03-15. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Sacks R, Eastman C, Lee G, Teicholz P (2018): BIM Handbook - A guide to building information modelling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers. 3rd ed., Wiley, Hoboken, New Jersey: S.1–31.

Wiedemann A (2004): Handbuch Bauwerksvermessung, Geodäsie-Photogrammetrie-Laserscanning. Birkhäuser, Basel: S.59.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Peter Bauer, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz.

E-Mail: peter.bauer@tugraz.at

Dipl.-Ing. Dr. Helmut Woschitz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz.

E-Mail: helmut.woschitz@tugraz.at