

Laser-SLAM-Based Mobile Mapping mit Software-Integration und Visualisierung

Stefan Keller und Joël Schwab

17. März 2022 (Version 2)

Mitwirkende

- Stefan Keller, Professor, Institut für Software, OST Campus Rapperswil
- Joël Schwab, Institut für Software, OST Campus Rapperswil
- Daniel Mayer, Amt für Archäologie des Kantons Thurgau
- Luzian Caduff, Kanton Thurgau, Amt für Geoinformation
- Melanie Sütterlin, KGK-CGC
- Dejan Šeatović, Professor, Institut für Lab Automation und Mechatronics, OST Campus Rapperswil

Lizenz CC-BY-SA 4.0

Zitiervorschlag (APA-Stil): Keller Stefan & Schwab Joël. (2022) Laser-SLAM-Based Mobile Mapping mit Software-Integration und Visualisierung. A technical paper from the Institute for Software, OST Eastern Switzerland University of Applied Sciences. Webaccess: <http://eprints.ost.ch/> (tba.)

Table of Content

1.	Überblick.....	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Ziele.....	1
1.3	Aufbau des Dokuments.....	2
2.	Vergleich der Geräte	3
2.1	Leica BLK2GO	3
2.2	GeoSLAM ZEB Revo-RT	4
2.3	IPad Pro	5
2.4	Übersicht der Handheldscanner	5
2.5	Vergleich Geräte zu "Structure from Motion"-Verfahren.....	6
3.	Anwendungsfälle	10
3.1	Archäologie	10
3.2	Denkmalschutz.....	10
3.3	Energieversorgung.....	10
3.4	Städteplanung.....	11
4.	Messkampagnen	12
4.1	Eisenplastik, Rapperswil	12
4.2	Villa Aurum, Rapperswil.....	13
4.3	Mauer der Burgruine Neuenburg, Weinfelden	14
5.	Zusätzliche Eigenschaften	14
5.1	Punktedichte	14
5.2	Duplizierte Punkte	15
6.	Verarbeitung der Point Cloud	15
6.1	CloudCompare	16
6.2	QGIS	16
6.3	WebODM	16
6.4	Webapplikation Point Cloud Browser.....	16
7.	Abschluss und Ausblick	18
7.1	Abschluss	18
7.2	Ausblick	18
8.	APPENDIX.....	19
8.1	Bibliographie	19
8.2	Tabellenverzeichnis	19
8.3	Abbildungsverzeichnis	19

1. Überblick

1.1 Ausgangslage

Für die Darstellung von 3D Modellen sind Punktwolken gut geeignet. Eine Punktwolke besteht aus einer Sammlung von Punkten, wobei jeder Punkte Koordinaten (X, Y, Z) und ggf. weitere Attribute, wie zum Beispiel Farbe hat. Die Erfassung von Punktwolken kann durch mehrere verschiedene Verfahren durchgeführt werden.

In der Archäologie werden heutzutage vielerorts photogrammetrische Strategien zur Gewinnung von 3D Daten Angewendet. Dabei werden Bilder von verschiedenen Standorten miteinander verglichen mit dem Ziel der exakten dreidimensionalen geometrischen Rekonstruktion. Diese Aufnahmen erfolgen mit dem sogenannten 'Stop and Go'-Prinzip mit einem Stativ. Dabei muss das Stativ an verschiedenen Positionen aufgestellt und Messungen durchgeführt werden. Durch das Zusammenfügen der verschiedenen Messungen kann das Objekt oder der Standort dreidimensional rekonstruiert werden.

Messungen mit diesem Verfahren erfordern einen hohen Zeitaufwand, sowohl für die Messung, als auch für das Weiterverarbeiten der Punktwolke. Ein weiterer Nachteil ist, dass man durch das Erstellen von Bildern abhängig von Lichtverhältnissen ist.

1.2 Ziele

Kürzlich kamen professionelle Handheld/Mobile 3D Laser Scanning-Systeme auf den Markt, die eine neue Generation von relativ günstiger Hardware darstellen. Die Erfassung der Punktwolke mit diesen Geräten basiert auf LiDAR und SLAM Technologien. Dadurch sind Messungen nicht abhängig von den Lichtverhältnissen. Auch die Durchführung und Verarbeitung soll um einiges schneller sein, als bei dem photogrammetrischen Verfahren.

Das Ziel ist ein Vergleich zwischen den Messungen mit den Handheldscannern zu dem 'Stop and Go' Prinzip. Bei dem Vergleich sind mehrere Punkte Wichtig:

- Messdauer
- Verarbeitungsdauer
- Messgenauigkeit

Bei den Handheldscannern wird zwischen zwei Kategorien unterschieden. Zum einen gibt es professionelle Geräte mit dem Wert von ca. 50'000 CHF und zum anderen Consumer Geräte, die billiger als 2'000 CHF sind.

Der Vergleich wird zwischen 'Structure from Motion' zu den verschiedenen Handheldscannern gemacht.

Der Hauptanwendungsfall dieser Technologien ist die Archäologie. Ein weiteres Ziel ist es nun weitere Anwendungsfälle und deren Interesse daran aufzuzeigen.

Zusammen mit der Studie wurde eine Bachelorarbeit durchgeführt bei der die Handheldscanner getestet und die Punktwolken ausgewertet wurden. Zusätzlich wurde noch der Point Cloud Browser und die Point Cloud Pipeline entwickelt im Rahmen der Bachelorarbeit.

Als Rahmenbedingung sowohl bei der Studie, wie auch der Bachelorarbeit wurde das Verwenden von Open Source Programmen gesetzt.

1.3 Aufbau des Dokuments

In einem ersten Schritt werden in dem Dokument die verschiedenen Handheldscanner vorgestellt, welche im Rahmen dieses Projektes und der Bachelorarbeit benutzt wurden. Anschliessend werden potentielle Anwendungsfälle, welche über den Hauptanwendungsfall der Archäologie hinausgehen genauer beschrieben. In einem nächsten Schritt werden die Messungen, die durchgeführt wurden, miteinander verglichen und ausgewertet. Dabei wird ein Kapitel besonderen Kennzahlen gewidmet. Am Schluss werden noch Programme beschrieben, welche für die Verarbeitung und Visualisierung von Punktwolken genutzt werden können.

Danksagung: Dieses Dokument mit der Projektnummer NGDI 21-20 ist 2021 dank der freundlichen Unterstützung der zweckgebundenen Mittel der Nationalen Geodateninfrastruktur (NGDI) entstanden.

2. Vergleich der Geräte

Bei den professionellen Geräten handelt es sich um den Leica BLK2GO und den GeoSLAM ZEB Revo-RT, welche beiden einen Anschaffungswert von ca. 50'000 CHF haben. Das Consumer Produkt ist das iPad Pro. Bei diesem 2'000 CHF teurem Produkt wird noch zwischen verschiedenen Apps aus dem AppStore verglichen.

Die Punktwolken wurde mit CloudCompare georeferenziert und ausgewertet.

2.1 Leica BLK2GO



Abbildung 1 Leica BLK2GO

Der Leica BLK2GO ist ein sehr kompaktes Gerät, welches lediglich aus einem Griff und einer Kuppel besteht. In dem Gerät befindet sich der Akku und eine Speichereinheit, sowie ein rotierender Laser in der Kuppel. Der Messfortschritt kann mit Hilfe einer dazugehörigen Android oder iOS App visualisiert und mitverfolgt werden.

Für die Bedienung des BLK2GO ist nicht viel notwendig. Um eine Messung durchführen zu können muss das Gerät auf einer möglichst horizontalen Fläche auf den dazugehörigen Standfuss platziert werden. Die Farbe eines leuchtenden LED-Rings gibt den Status des Gerätes bekannt. Bei beispielsweise grüner Farbe ist das Gerät einsatzbereit. Das Gerät kann mit einem Knopf bedient werden. Je nach der Farbe des leuchtenden LED-Rings hat dieser eine andere Funktion. Wenn das Gerät messbereit ist, kann dieses durch einen Knopfdruck gestartet werden. Ein langes drücken des Knopfes während der Messung führt beispielsweise zu einem zusätzlichen Bild der Umgebung.

Das Gerät liegt komfortable in der Hand und auch das Gewicht lässt grössere Messung zu. Ein weiterer Pluspunkt ist die Reichweite. So deckt er Objekte in einem 15 Meter Radius problemlos ab. Auf einem Mobilgeräte lässt sich die Messung Live mit verfolgen und überprüfen welche Bereich noch gescannt werden müssen.

Um die gemessenen Daten zu exportieren muss der Leica BLK Data Manager oder Cyclone verwendet werden. Der BLK2Go kann via USB-C mit einem Computer verbunden werden. Dort können die Daten direkt auf das Dateisystem des Computers exportiert werden in dem .blk-Format. Für die Weiterverwendung wird jedoch Cyclone verwendet, um das .blk-Format in das .e57- Format zu exportieren. Dieser Schritt dauert

extrem lange und braucht viel Speicherplatz. Beim Auftreten von Fehlern liefert das Tool keine Fehlermeldungen. Oft heisst es, dass alles erfolgreich war, aber das Resultat war eine korrupte Datei.

Bei einem erfolgreichen Export ist das Ergebnis jedoch sehr gut. Die Punkte liegen in der Punktwolke dicht neben einander und es gibt auch sehr weniger Outliers.

2.2 GeoSLAM ZEB Revo-RT



Abbildung 2 GeoSLAM ZEB Revo-RT

Im Gegensatz zu dem BLK2GO ist der GeoSLAM ZEB Revo-RT wesentlich schwerer und mehrere Einzelteile sind in einem Koffer gepackt. Diese Einzelteile müssen zuerst zusammengesetzt werden damit man ihn nutzen kann. Bei den Messungen muss das Gerät auch etwas unhandlich getragen werden. Es ist wie beim BLK2GO möglich die Visualisierung der Messung Live auf einem Mobilgerät zu verfolgen. Jedoch ist es hier nicht notwendig eine App zu installieren, sondern man muss sich mit dem WLAN des Feldcomputers verbinden, um auf eine lokale Seite zuzugreifen.

Nachdem der Feldcomputer, Scanner und die GoPro über die Kabel miteinander verknüpft wurden, wird der GeoSLAM ZEB Revo-RT an den Startpunkt der Messung gesetzt. Die Komponenten werden dann in der richtigen Reihenfolge gestartet und dann kann die Messung beginnen.

Das Tragen des Gerätes ist relativ umständlich, da der Schwerpunkt viel höher ist, als der Griff an dem das Gerät gehalten wird. Das macht längere Messung sehr anstrengend und kraftintensiv. Auf dem Feldcomputer, welcher mit einer Schlaufe um die Schulter gehängt werden kann, kann man die Messung Live beobachten. Wie bei dem Leica BLK2Go beträgt die Reichweite stolze 15 Meter.

Wenn die Messung abgeschlossen ist wird ein Computer an das Netz des Feldcomputers gekoppelt und die Daten können als .geoslam oder .e57 exportiert werden. Die daraus resultierende Punktwolke kann in der Gratisversion des GeoSLAM Hubs weiterverarbeitet werden. Um die Punktwolke einfärben zu können braucht man jedoch eine kostenpflichtige Lizenz.

2.3 iPad Pro



Abbildung 3 iPad

Im Vergleich zu den beiden 50'000 CHF teuren Geräten ist das iPad Pro mit Abstand das Günstigste. Für die Nutzung muss man lediglich die passende App installieren. Im Appstore hat man eine grosse Auswahl an möglichen Optionen. Die Bezahlmodelle reichen von kostenlos, Monats- oder Jahresabonnement bis zu Kosten pro Export. Bei der Durchführung der Messung stellt jede App die visuelle Darstellung des gemessenen Bereiches anders dar. So zeigen die Polycam und die 3D Scanner App ein Polygon-Gitter, das genutzt werden kann um den Detailgrad des gemessenen Bereiches zu ermitteln. Scanniverse färbt den nicht gemessenen Bereich rot/weiss ein, während SiteScape schon einzelne Punkte der Punktwolke darstellt.

Die grössten Probleme des iPad Pros sind die eingeschränkte Reichweite und dass es die Möglichkeit für 360° nicht gibt. Das Gerät kann nur in eine Richtung messen. So ist es relativ umständlich ein grösseres Objekt zu scannen. Dafür muss man das iPad hoch und runter bewegen, um ein möglichst genaues Resultat zu bekommen. Dadurch dauert das Messen einiges länger im Vergleich zu den professionellen Geräten.

Beim iPad ist das Resultat sehr App abhängig. So kann es sein, dass die Messgrösse bei einigen Apps beschränkt ist und um grössere Objekte scannen zu können mehrere Messungen zusammengeführt werden müssen. Auch die Einstellungsmöglichkeiten im Bereich Genauigkeit und Erfassungsdistanz unterscheiden sich von App zu App. Das Übertragen auf den Computer, sowie das Exportieren ist jedoch bei allen Apps sehr einfach.

2.4 Übersicht der Handheldscanner

Der Vergleich der Handheldscanner basiert auf 3 Vergleichen an verschiedenen Objekten. Diese Objekte sind die Eisenplastikskulptur an der Ost in Rapperswil, die Villa Aurum in Rapperswil und die Mauer der Neuenburg-Ruine. Die genauen Resultate der Messungen sind im Kapitel "Messkampagne" ausführlicher beschrieben.

Kriterium	Leica BLK2GO	GeoSLAM ZEB Revo RT	SiteScape	3D Scanner App	Scaniverse	Polycam
Aufnahmezeit	Sehr schnell	Schnell	Mittel	Mittel	Langsam	Langsam
Messungen unterteilt	Nein	Nein	Ja (Villa 4 Teile)	Nein	Nein	Nein

Outliers	Wenige Outliers	Wenige Outliers	Einige Outliers	Viele Verschiebungen und Löcher	Einige Verschiebungen und Löcher	Viele Verschiebungen und Löcher
Messbereich	15m	15m	4m	4m	4m	4m
3D Completion	98%	98%	92%	82%	83%	83%
2D Grundriss ermittelbar	Sehr genau	Sehr genau	Genau	Genau	Genau	Eher ungenau
Abweichung zu Referenz-punkten	0.06m	0.08m	0.39m	1.05m	0.46m	0.6m

Tabelle 1 Vergleich der Handheldscanner

2.5 Vergleich Geräte zu "Structure from Motion"-Verfahren

Für die Vergleiche der verschiedenen Handheldscanner wurde die Messung der Mauer der Neuenburg Ruine in Weinfelden Kanton Thurgau verwendet. Diese Messungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Amt für Archäologie des Kantons Thurgau durchgeführt. Die Messungen mit den Handheldscannern wurde am 14.04.2021 durchgeführt. Daniel Mayer hat am 15.04.2021 bei derselben Mauer die Messung mit dem Structure from Motion-Verfahren durchgeführt.

Für die Bilderaufnahme wurde eine Yuneec H 520 Drohne mit einer E90 Kamera (1 Inch CMOS-Sensor mit 20 Megapixel) verwendet. Dabei wurde eine 4K-Videoaufnahme gemacht. Aus den 60 Bildern pro Sekunde wurden je 48 davon für die Berechnung verwendet. Dabei wurden ca. 200'000 Verknüpfungspunkte festgestellt für die Berechnung. Als Ergebnis lieferte die AgiSoft Metashape Software eine detaillierte Punktwolke.

Kriterium	Structure from Motion	Leica BLK2GO	GeoSLAM ZEB Revo RT	IPad	
Aufnahmezeit	20 min	5 min	5 min	20 min	
Auswertungszeit	2h 27 min	30 min	10 min	5 min	
Georeferenzierungsaufwand	30-45 min	20 min	1h	Scanniverse Polycam 3D Scanner App SiteScape	20 min 20 min 40 min 40 min
Anzahl Punkte	32'939'936	23'346'161	2'634'453	Scanniverse Polycam 3D Scanner App SiteScape	1'038'461 815'460 2'234'417 18'471'492
Durchschnitt der Punkteabstände	0.006	0.014	0.040	Scanniverse Polycam 3D Scanner App SiteScape	0.018 0.025 0.014 0.029
Ausdehnung	X37.60 Y13.87 Z8.15	X72.29 Y45.81 Z28.53	X62.58 Y41.58 Z23.37	Scanniverse Polycam 3D Scanner App SiteScape	X30.48 Y5.67 Z5.44 X31.81 Y12.94 Z5.45 X36.38 Y9.48 Z5.63 X30.98 Y9.44 Z8.12

3D Completion	100%	95%	95%	Scanniverse Polycam 3D Scanner App SiteScape	85% 85% 70% 90%
---------------	------	-----	-----	---	--------------------------

Tabelle 2 Vergleich der Handheldscanner mit Structure from Motion

Die Messungen mit dem "Structure from Motion"-Verfahren haben bei der Testmessung ein genaueres Resultat ergeben, als die beiden professionellen Handheld Scanner. Doch dieses genauere Ergebnis kommt auch mit mehr Aufwand. Bei den herkömmlichen Messverfahren können schlechte Lichtverhältnisse eine negative Auswirkung auf das Resultat zur Folge haben, diese spielen bei den Handheldscannern keine grosse Rolle. Ein weiterer Vorteil der Handheldscanner ist die sofortige Rückmeldung und Liveverfolgung der Messung. In den meisten Fällen hat man bei fotogrammetrischen Berechnungen die daraus resultierende Punktwolke erst am Tag nach der Messung. Falls ein Fehler unterlaufen ist oder ein Bereich fehlt muss man erneut zu der Aufnahmestelle fahren. Dabei besteht die Gefahr, dass sich die Lichtverhältnisse zu den vorherigen Aufnahmen unterscheiden können.

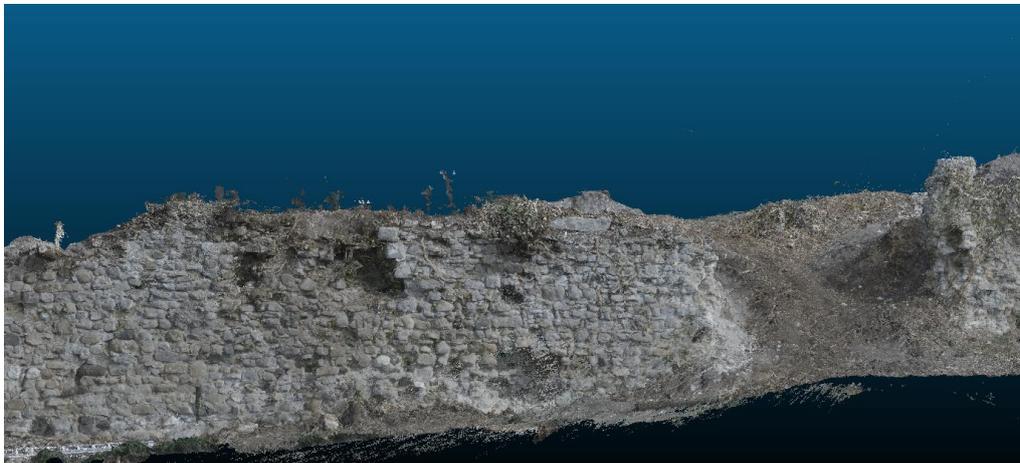


Abbildung 4 Structure from Motion



Abbildung 5 Leica BLK2GO



Abbildung 6 GeoSLAM ZEB Revo-RT



Abbildung 7 iPad Pro – Scaniverse

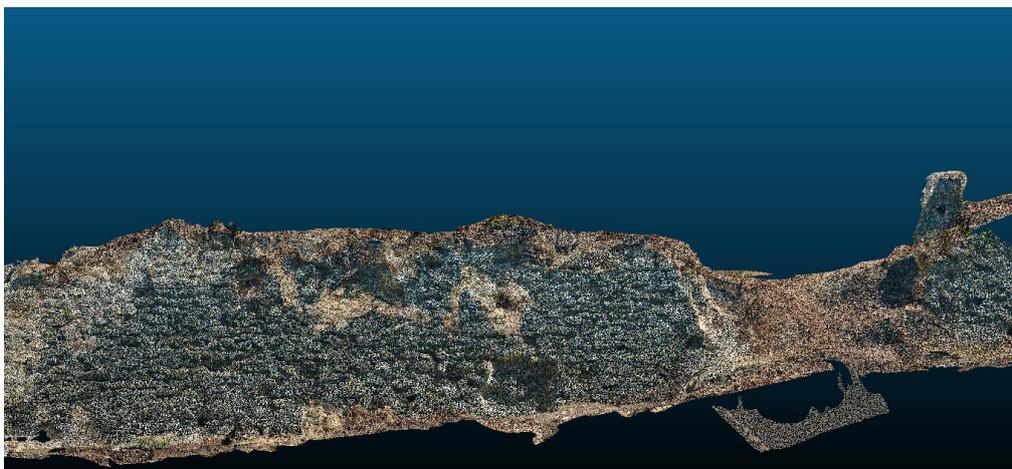


Abbildung 8 iPad Pro – Polycam



Abbildung 9 IPad Pro - 3D Scannerapp

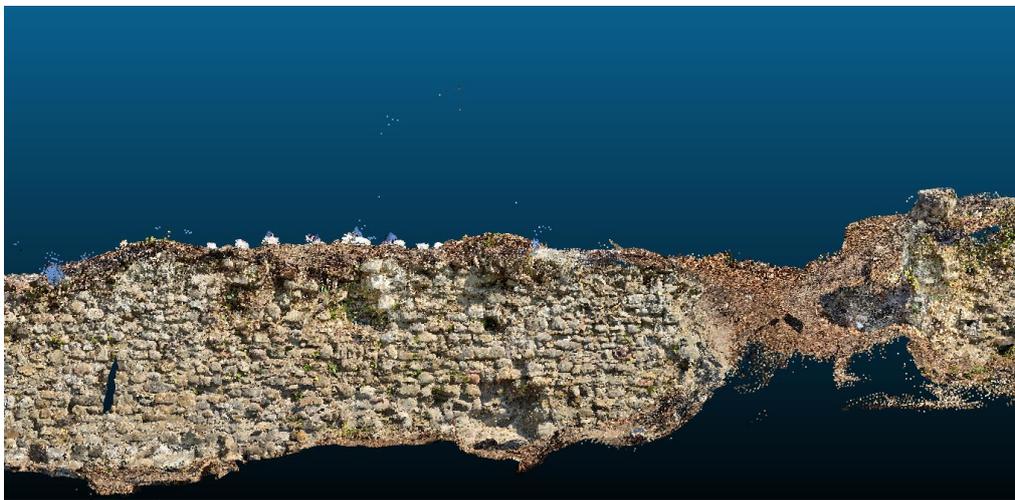


Abbildung 10 IPad Pro – SiteScape

3. Anwendungsfälle

Messungen mit dem "Structure from Motion"-Verfahren werden an mehreren Orten eingesetzt. Jedoch gibt es Bereiche, die stark von der Nutzung eines Handheldscanners profitieren können. Sei es durch die schnellere Messdurchführung oder auch dem billigeren Anschaffungspreis.

In diesem Kapitel werden ein paar mögliche Anwendungsfälle genauer beschrieben. Es gibt weitere Anwendungsfälle, die auch einen Vorteil daraus ziehen können.

3.1 Archäologie

Bei Baustellen ist es immer möglich, dass es zu einer archäologischen Notgrabung kommt. Dabei muss die Baustelle gestoppt werden und die Archäologen müssen Messungen durchführen. Dies kann zu einem grossen Verzug der Baustelle führen und dadurch können hohe Kosten entstehen.

Aus Sicht der Archäologie müssen die Messungen sehr genau durchgeführt werden, denn was ausgegraben wird, das wird zerstört. Es ist auch möglich, dass Details auf den Strukturen in der erfassten Punktwolke auffallen, die bei der Grabung selber übersehen worden sind. Damit dies möglich ist, müssen die Punktwolken eine möglichst grosse Punktedichte haben.

Falls nach der Messung festgestellt wird, dass etwas nicht richtig erfasst wurde, ist es zum Teil nicht mehr möglich die Messung zu wiederholen oder ergänzen an einem anderen Tag.

Darum ist es wichtig, dass die Messungen schnell und sehr genau durchgeführt werden.

3.2 Denkmalschutz

Die Scanner erlauben ohne Probleme Aufnahmen von komplexen räumlichen Strukturen, Skulpturen, Gebäuden und anderen Kulturgütern. Das erfasste 3D Modell kann genutzt werden, um unter anderem die Oberfläche von Gewölben für die Restaurationsberechnung zu bestimmen. In einer Katastrophensituation, wenn das Denkmal zerstört wird, kann es durch die erfasste Punktwolke wieder neu und originalgetreu aufgebaut werden.

Das Erfassen dieses Modells erfolgt berührungslos und bei genauen Messungen kann man diese auch nutzen, um Oberflächenmaterial, Oberflächenbeschaffenheit und Verformungen zu dokumentieren.

3.3 Energieversorgung

In der Planung und Berechnung von Photovoltaikanlagen spielen sowohl die Orientierung als auch die Verschattungen des PV-Feldes eine wesentliche Rolle. Dabei sind zwei Aspekte zu beachten. Erstens muss die Einstrahlung auf die Panels im zeitlichen Verlauf auf Grund des Sonnenstandes und der Orientierung der Panels berechnet werden. Zweitens muss Rücksicht auf die Verschattung genommen werden, besonders in Hinsicht zu der Teilverschattung. Diese sollte während der Planung bereits bekannt sein, denn Panels werden idealerweise am gleichen "String" verschaltet, wenn der Schatten diese gleichzeitig trifft. Bei einer suboptimalen String-Schaltung reduziert dies den Ertrag und kann auch negative Auswirkungen auf die Alterung der Anlage haben.

Die Verschattungen, die aus geografischen Gründen, wie Berge und Hügel, entstehen, sind leicht berechenbar. Jedoch ist es schwierig bis unmöglich die lokalen und kleinräumigeren Einflüsse der vorhandenen Baustrukturen oder Bepflanzungen zu berechnen. Grund dafür ist, dass diese in den Geodaten

sehr ungenau oder gar nicht vorhanden sind. Durch die kürzere Distanz zu dem Solarfeld führen die kleinräumigen Strukturen oft zu einer Veränderung des Schattenwurfs und damit zur Teilverschattung.

Durch die 3D Punktwolke des Gebäudes und seiner Umgebung ist es möglich den Schattenwurf und die Teilverschattung zu berechnen und daraus eine Optimale String-Verschaltung, sowie den richtigen Ertrag berechnen.

3.4 Städteplanung

Die Daten von lokalen und kleinräumigen Baustrukturen und Bepflanzungen helfen nicht nur bei der Berechnung der Photovoltaikanlagen. Die Städteplaner können diese Daten und Berechnungsalgorithmen nutzen, um die Eignung von verschiedenen Fassaden- und Dachflächen relativ früh im Planungsprozess zu ermitteln und darin einfließen lassen.

4. Messkampagnen

Für den Vergleich der Handheldscanner wurden drei verschiedene Messobjekte verwendet. Diese sind optimal dafür geeignet, da sie alle beschriebenen Anwendungsfälle abdecken.

4.1 Eisenplastik, Rapperswil



Abbildung 11 Eisenplastik, Rapperswil

Die Eisenplastikskulptur befindet sich auf dem Gelände der Fachhochschule Ost in Rapperswil. Sie eignet sich sehr gut für das Testen der Denkmalpflege, sowie der Archäologie. Durch die komplizierte Form und die vielen Öffnungen der Skulptur ist diese ein gutes Beispiel für den Anwendungsfall der Handheldscanner.

Vergleichspunkte	Leica BLK2GO	GeoSLAM Revo RT	Site-Scape	Scaniverse	3D Scanner App	Polycam
Messdauer	2 min	4 min	15 min	15 min	15 min	10 min
Anzahl Punkte	11718645	131176	2870169	1215852	686211	1351140
Punkteabstand	0.023	0.055	0.047	0.020	0.030	0.062
Outliers	Sehr wenige	Wenige fast immer nur weit aussen	Viele	Viele Bereiche verschoben und Löcher	Einige Bereiche verschoben und Löcher	Viele Bereiche verschoben und Löcher
Höhe ermittelbar	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
3D Completion	100%	100%	90%	80%	75%	75%

Tabelle 3 Vergleich Eisenplastik, Rapperswil

4.2 Villa Aurum, Rapperswil



Abbildung 12 Villa Aurum, Rapperswil

Ein zweites Objekt, das gemessen wurde ist die Villa Aurum, die sich in Rapperswil befindet. Dieses Objekt fällt unter Beispiele für mehrere Anwendungsfälle. So kann das Messen eines Gebäudes wichtig sein für den Denkmalschutz, sowie für das Messen der Verschattung für Photovoltaikanlagen oder auch für Städteplaner.

Vergleichspunkte	Leica BLK2GO	GeoSLAM Revo RT	Site-Scape	Scaniverse	3D Scanner App	Polycam
Messdauer	6 min	11 min	20 min	25 min	15 min	15 min
Anzahl Punkte	37186415	1285745	37807598	6357459	1223093	932700
Punkteabstand	0.023	0.055	0.047	0.020	0.030	0.062
Outliers	Wenige	Ja	Ja	Viele Verschiebungen bei Boden und Fassaden zueinander	Viele Verschiebungen beim Eingang	Viele Verschiebungen beim Eingang
Fassaden Höhe ermittelbar	Ja	Ja	Nein (Scanbereich zu klein)	Nein (Shifts und nicht alles im Scanbereich)	Nein (Scanbereich zu klein)	Nein (Scanbereich zu klein)
3D Completion	99%	99%	95%	95%	90%	90%

Tabelle 4 Vergleich Villa Aurum, Rapperswil

4.3 Mauer der Burgruine Neuenburg, Weinfelden



Abbildung 13 Mauer der Burgruine Neuenburg, Weinfelden

Die Mauer der Burgruine Neuenburg in Weinfelden ist die praktische Anwendung für den Anwendungsfall der Archäologie und Denkmalschutz.

Vergleichs- punkte	Leica BLK2GO	GeoSLAM Revo RT	Site- Scape	Scaniverse	3D Scanner App	Polycam
Messdauer	5 min	5 min	20 min	20 min	20 min	20 min
Anzahl Punkte	23346161	2634453	18471492	2234417	103846	815460
Punkte- abstand	0.014	0.040	0.029	0.014	0.018	0.025
Outliers	Ja aber sehr wenige	Ja aber sehr wenige	Ja aber sehr wenige	Kaum	Kaum	Ja und verschieb- ungen
Höhe bei jedem Mauer- abschnitt ermittelbar	Fast	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein wegen den Verschieb- ungen
3D Completion	95%	95%	90%	70%	85%	85%

Tabelle 5 Vergleich Mauer der Burgruine Neuenburg, Weinfelden

5. Zusätzliche Eigenschaften

Eigenschaften, wie die Anzahl Punkte in einer Punktwolke, sowie Outliers sind hilfreich bei dem Vergleichen von Handheldscannern. Jedoch nicht immer die aussagekräftigsten Aspekte bei einem Vergleich. Um eine genauere Aussage treffen zu können werden weitere Eigenschaften der Punktwolke gebraucht, die für verschiedene Anwendungsfälle von Bedeutung sein können.

5.1 Punktedichte

Bei Anwendungsfällen wie Archäologie und Denkmalschutz ist es essential, dass die Punktwolke sehr genau und detailgetreu abgebildet ist. Dadurch können bei der Analyse genauere Zustände oder Merkmale, wie zum Beispiel einzelne Risse oder Zeichnungen, festgestellt werden. Die Punktedichte ist eine

Eigenschaft, die man verwenden kann um mehr über die Genauigkeit der Punktwolke festzustellen. Die Punktedichte sagt aus, wie viele Punkte sich in einem bestimmten Volumen befinden.

Bei dem Vergleich der Punktedichte bei den verschiedenen Handheldscannern muss beachtet werden, dass dieser Wert sehr relativ ist, da mehrere Aufnahmen desselben Messobjekts eine andere Punktwolke ergeben. Ausserdem kann man die Punktedichte mit einer längeren Messzeit vergrössern. Eine weitere Möglichkeit ist es die Reichweite bei der Messung niedriger zu halten.

Um die Punktedichte der Handheldscanner zu vergleichen wurde mit CloudCompare der gleiche Abschnitt ausgeschnitten. Von dem neuen Objekt wurden die Punkte gezählt und das Volumen berechnet. Dies wurde für mehrere Messungen gemacht für einen genaueren Vergleich.

Handheldscanner	Punktedichte(Punkte in einem Kubikmeter)
BLK2GO	40'000
GeoSLAM	2'060
3D Scanner App	2'500
Polycam	1'400
Scaniverse	1'800
SiteScape	36'000

Tabelle 6 Vergleich der Punktedichte

5.2 Duplizierte Punkte

Bei einer Messung passiert es schnell, dass man mit einem Handheldscanner an demselben Ort zweimal durchläuft. Dabei kann es vorkommen, dass ein Punkt mehrfach erfasst wird. Diese duplizierten Punkte verfälschen dabei den Wert der Anzahl Punkte und dadurch auch die Punktedichte.

In Punktwolken werden duplizierte erkannt, indem man sagt, wenn Punkte so nahe bei einander sind, dann ist es ein duplizierter Punkt. Auf diese Weise findet man nicht alle duplizierten Punkte und es ist auch möglich, dass Punkte gelöscht werden die gar kein Duplikat sind. Die Distanz, die die Punkte zu einander haben, das diese als Duplikat erkannt werden ist nicht immer dieselbe. Grundsätzlich gilt die Regel, dass je mehr Punkt es in der Punktwolke gibt desto kleiner die Distanz.

Mit CloudCompare kann man sehr einfach mit einer Distanzangabe die Punktwolke verdünnen.

Handheldscanner	Totale Anzahl Punkte	Entfernte Punkte					
		0.0001		0.00001		0.000001	
BLK2GO	37'186'415	81'000	0.21%	34'000	0.09%	30'000	0.08%
GeoSLAM	1'285'745	0	0%	0	0%	0	0%
3D Scanner App	6'357'459	1'000	0.015%	15	0.0002%	10	0.0001%
Polycam	932'700	29	0.003%	0	0%	0	0%
Scaniverse	1'223'093	2'300	0.18%	250	0.02%	15	0.001%
SiteScape	37'807'598	750	0.002%	0	0%	0	0%

Tabelle 7 Vergleich der duplizierten Punkte

6. Verarbeitung der Point Cloud

Nach einer Messdurchführung muss die daraus entstandene Punktwolke noch verarbeitet werden. Für die Verarbeitung gibt es mehrere Open Source Tools, die man dazu verwenden kann.

6.1 CloudCompare

CloudCompare ist ein Open Source Verarbeitungs- und Visualisierungstool für Punktwolken. Das Tool kann genutzt werden sowohl für die Verarbeitung einer Punktwolke, sowie auch zu der Auswertung und Berechnung der Daten. In dieser Arbeit wurde CloudCompare zuerst für die Georeferenzierung genutzt und anschliessend für die Auswertung der Punktwolken. So wurden alle Daten für den Vergleich der Handheldscanner mit CloudCompare ausgelesen und berechnet. Dies betrifft auch die Berechnung der Punktedichte und der Ausdünnung der Punktwolke indem man duplizierte Punkte löscht.

CloudCompare unterstützt auch weitere Operationen, sowie das Zusammenfügen von Punktwolken über Referenzpunkte.

6.2 QGIS

Ab Version 3.18 unterstützt QGIS das visualisieren von Punktwolken. Das Projekt wurde über Crowdfunding finanziert. QGIS kann genutzt werden, um Distanzmessungen und Animationen mit Punktwolken zu erstellen.

6.3 WebODM

WebODM ist eine Open Source Applikation von OpenDroneMap um georeferenzierte Karten, Punktwolken, Höhenmodelle und 3D Modelle mit Texturen aus Drohnen-Bilder zu erstellen.

Für die Visualisierung der Punktwolken wird Potree verwendet. Das Tool kann genutzt werden, um Messungen durchzuführen, Punktwolken zu exportieren oder auch Online zu Teilen. Jedoch sind die Datenformate, in die exportiert werden kann beschränkt.

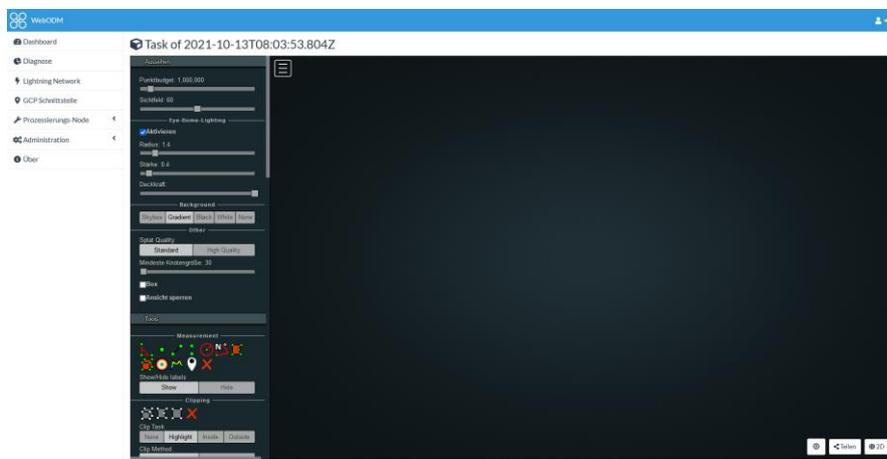


Abbildung 14 WebODM

6.4 Webapplikation Point Cloud Browser

Der Point Cloud Browser ist eine im Rahmen der Bachelorarbeit erstellten Webapplikation. Diese hat das Ziel, dass Punktwolken Hochgeladen, in 3D und 2D visualisiert und geteilt werden können. Dabei können die hochgeladenen Punktwolken sowohl öffentlich, als auch privat sein und nur für bestimmte Personen freigegeben werden. Mit der Exportfunktion kann man die Wolke in das LAZ- oder TIFF-Format exportieren.

Durch der Dockerisierung des Point Cloud Browser ist die Installation des Tools sehr einfach gehalten.

Die Applikation verwendet im Hintergrund das dazu entwickelte Commandline-Tool PointCloudPipeline. Diese Pipeline ermöglicht dem Nutzer mehrere Funktionalitäten für die Verarbeitung von Punkte Wolken. Dazu gehört die Konvertierung von 3D Daten in 2D-GeoTIFF, Daten aus e57, PLY und LAS in LAZ und auch zurück, sowie LAZ Daten in EPT-LAZ.

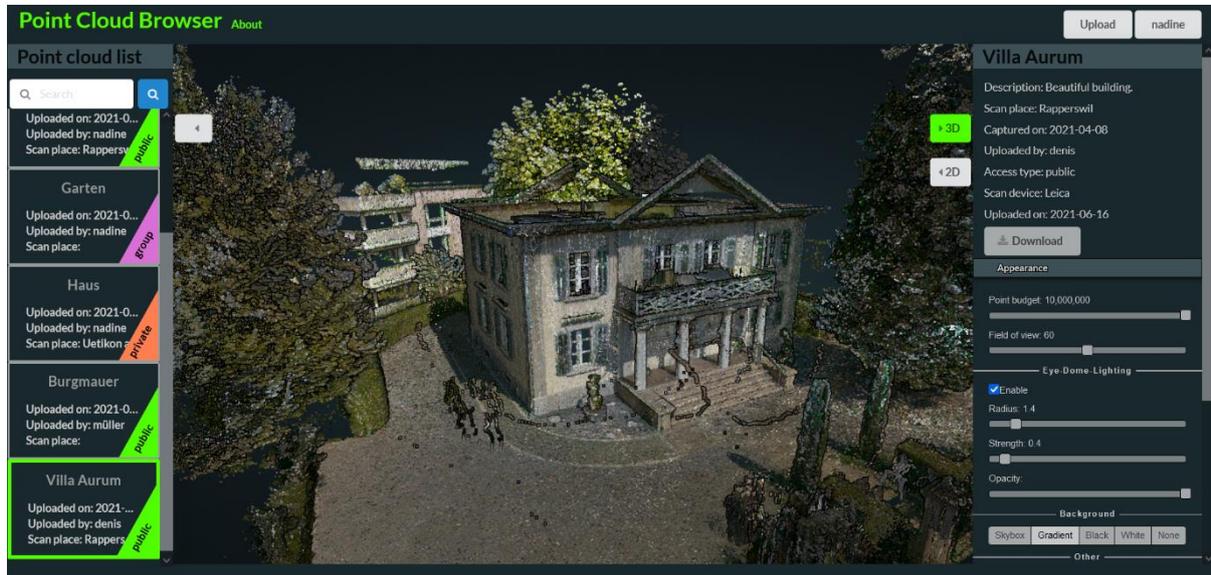


Abbildung 15 Pointcloud Browser

7. Abschluss und Ausblick

7.1 Abschluss

Für den Vergleich der verschiedenen Handheldscanner zu dem "Structure from Motion"-Verfahren standen drei Punkte im Vordergrund. Messdauer, Verarbeitungszeit und Messgenauigkeit.

Die Messdauer der Professionellen Handheldscanner war in den drei Messungen ca. drei Mal schneller als die Messungen mit dem iPad Pro. Bei dem iPad Pro hat es zwischen den getesteten Apps keine grossen Zeitunterschiede bei den Messungen gegeben.

Für den Vergleich mit dem "Structure from Motion"-Verfahren gibt es nur einen Vergleich. Für das iPad Pro dauerte die Messung gleich lange, wie für SofM. Die professionellen Scanner waren jedoch ca. vier Mal so schnell.

Ein zeitaufwändiger Teil vom SofM-Verfahren ist die Punktwolke verarbeiten bzw. sie auf einen Computer laden und zu georeferenzieren. Dieser Aufwand ist bei den Handheldscannern ca. drei Mal schneller durchgeführt. In diesem Schritt waren die iPad Pro Apps sogar noch schneller als der Leica BLK2Go und GEOSlam ZED Revo RT.

Daraus kann man schliessen, dass die Handheldscanner viel weniger Zeit in Anspruch nehmen im Vergleich zu dem SofM-Verfahren. Wobei die professionellen Geräte noch besser abschneiden, als das iPad Pro. Die grosse Frage ist jedoch noch die Genauigkeit.

Die Punktwolke aus dem SofM-Verfahren war nach Eigenschaften wie Totale Anzahl Punkte, Punktedichte, Durchschnittlicher Punkteabstand und 3D Completion am besten. Wie zu erwarten waren die professionellen Scanner am zweit besten und das iPad Pro am schlechtesten. Durch die geringe Reichweite zeigt sich auch, dass Für das Messen von höheren Objekten ist das iPad Pro nicht gut geeignet.

Der Vorteil der die Handheldscanner auch noch haben gegenüber SofM ist, dass sie bei jedem Lichtverhältnis genutzt werden können. In einer Sitzung hat Daniel Mayer erwähnt, dass die Punktwolken von den Handheldscannern nicht genau genug sind für die Archäologie, jedoch diese genutzt werden können um die Punktwolke des SofM-Verfahren zu ergänzen. So können allfällige Lücken oder Fehler, die zum Beispiel durch Lichtverhältnisse entstanden sind, gefüllt und verbessert werden. So ist die Wahrscheinlichkeit auch sehr viel geringer, dass eine zweite Messung durchgeführt werden muss.

7.2 Ausblick

Es gibt bereits mehrere Open Source Tools für die Verarbeitung und Auswertung von Punktwolken. CloudCompare ermöglicht bereits viele Möglichkeiten um Punktwolken zu Verarbeiten und Berechnungen durchzuführen. Jedoch hat es den Nachteil, dass man Punktwolken nicht Teilen kann. Optimal wäre eine Applikation, die sowohl die Funktionalitäten von CloudCompare hat, sowie der Pointcloud Browser zusammen. Dadurch müssen Punktwolken nicht runtergeladen, dann bearbeitet und am Schluss neu hochgeladen werden, sondern alles kann am selben Ort geschehen.

8. APPENDIX

8.1 Bibliographie

1. Geoprocessing mit Handheld-Laser-Scanner erfassten Point Cloud-Daten, 2021, Bachelorarbeit Denis Nauli, Nadine Sennhauser, Adresse: <https://eprints.ost.ch/id/eprint/939/> (besucht 31.08.2021)
2. "Cloud Compare", danielgm, Adresse: <https://www.danielgm.net/cc/> (besucht 31.08.2021)
3. "WebODM", OpenDroneMap, Adresse: <https://www.opendronemap.org/webodm/> (besucht 12.09.2021)
4. "QGIS Point Cloud", North Road, Adresse: <https://north-road.com/2020/08/24/announcing-the-point-cloud-data-in-qgis-crowdfunding-campaign/> (besucht 12.09.2021)

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich der Handheldscanner	6
Tabelle 2 Vergleich der Handheldscanner mit Structure from Motion	7
Tabelle 3 Vergleich Eisenplastik, Rapperswil.....	12
Tabelle 4 Vergleich Villa Aurum, Rapperswil	13
Tabelle 5 Vergleich Mauer der Burgruine Neuenburg, Weinfelden	14
Tabelle 6 Vergleich der Punktedichte.....	15
Tabelle 7 Vergleich der duplizierten Punkte.....	15

8.3 Abbildungsverzeichnis

Die Abbildungen wurden von der Bachelorarbeit "Geoprocessing mit Handheld-Laser-Scanner erfassten Point Cloud-Daten" wiederverwendet.

Abbildung 1 Leica BLK2GO.....	3
Abbildung 2 GeoSLAM ZED Revo-RT	4
Abbildung 3 iPad	5
Abbildung 4 Structure from Motion	7
Abbildung 5 Leica BLK2GO.....	7
Abbildung 6 GeoSLAM ZEB Revo-RT	8
Abbildung 7 iPad Pro – Scaniverse.....	8
Abbildung 8 iPad Pro – Polycam.....	8
Abbildung 9 iPad Pro - 3D Scannerapp	9
Abbildung 10 iPad Pro – SiteScape	9
Abbildung 11 Eisenplastik, Rapperswil	12
Abbildung 12 Villa Aurum, Rapperswil	13
Abbildung 13 Mauer der Burgruine Neuenburg, Weinfelden	14
Abbildung 14 WebODM.....	16
Abbildung 15 Pointcloud Browser	17