

LiDAR – Funktionsweise und Anwendungsgebiete in der VFX-Industrie
Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

vorgelegt von Lars Schnell
(Matrikel-Nr.: 25741, Kürzel: ls059)
an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 04.06.2016

Erstprüfer: Prof. Katja Schmid
Zweitprüfer: Peter Ruhrmann

Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit versichere ich, Lars Schnell, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „*LiDAR – Funktionsweise und Anwendungsgebiete in der VFX-Industrie*“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.“

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung auf Deutsch

Datenerfassungen am Set sind wichtiger Bestandteil einer jeden VFX-Produktion. Distanzmessungen helfen den kreativen Angestellten verschiedener Postproduktionsabteilungen bei der Durchführung komplexer Aufgaben und der Verwirklichung der Vision des Regisseurs in einem einheitlichen virtuellen Koordinatensystem. Der *LiDAR*-Scanner erstellt innerhalb weniger Minuten eine akkurate digitale Repräsentation einer Szene oder eines Objektes und hat sich damit als Ersatz für manuelle Messungen etabliert.

Diese Arbeit befasst sich mit den grundlegenden Prinzipien von LiDAR-Scannern. Auf einen Überblick über die technischen und physikalischen Hintergründe folgt eine Betrachtung der verschiedenen Einsatzgebiete innerhalb der VFX-Industrie.

Abstract in English

On set data acquisition is a key element to all visual effects productions. Distance measurements help artists from different postproduction departments to accomplish difficult tasks and recreate the director's vision in a uniform virtual environment. The LiDAR-Scanner acquires an accurate digital representation of a scene or an object in a short amount of time and has established itself as a replacement for manual measurement methods.

This thesis covers the basic principles of LiDAR-systems. A general overview on the technical and physical background is given and followed by an essay about the different areas of application in the visual effects industry.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	ii
Kurzfassung auf Deutsch	iii
Abstract in English.....	iii
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
1.1 Die Bedeutung von Tiefe für die VFX-Industrie	6
1.2 Der LiDAR-Scanner als eine von vielen Lösungen	6
1.3 Fragestellung und Zielsetzung	6
Teil A – Funktionsweise	7
2 Physikalische und technische Grundlagen.....	7
2.1 Elektromagnetische Strahlung und Entfernungsmessung	7
2.1.1 Messverfahren	7
2.1.2 Anforderungen	9
2.1.3 Laser	9
2.2 Elektromagnetische Sensoren.....	9
2.2.1 Transmitter & Receiver	10
2.2.2 Scanner & Scanparameter.....	10
2.3 Zusätzliche Sensoren	11
2.3.1 GPS	11
2.3.2 Altimeter.....	11
2.3.3 Kompass	12
2.3.4 Zweiachskompensator	12
2.4 Fehlerbudget und Messunsicherheiten	12
3 Systeme.....	13
3.1 TLS Scanner	13
3.2 Handheld Scanner	14
3.3 Farb- und Helligkeitswerte	14
4 Hersteller und Modelle.....	15

4.1.1	Leica	15
4.1.2	FARO	16
4.1.3	Velodyne	16
5	Bedienung	18
5.1	Setup	18
5.1.1	Set-Scan	18
5.1.2	Objekt-Scan	19
5.1.3	Targets	19
5.1.4	Positionsabhängige Auflösung	21
5.1.5	Positionsabhängige Genauigkeit	22
5.1.6	Scanfilter	22
5.2	Scanvorgang	23
5.2.1	Scandauer	23
5.2.2	Probleme am Set	24
5.2.3	Bewegungsartefakte	25
5.2.4	„Scan-Kulisse“ versus „echtes 3D“	25
Teil B – Digitale Weiterverarbeitung		26
6	Daten & Dateisystem	26
6.1	Dateiformate	26
6.2	Punktwolke	28
6.3	Octree	29
7	Workflow	30
7.1	Software	30
7.1.1	CloudCompare	30
7.1.2	FARO Scene	31
7.1.3	MeshLab	31
7.1.4	Geomagic Wrap	31
7.2	Registrierung	32
7.2.1	Zielmarkenbasiert (FARO Scene)	32
7.2.2	Top View und Cloud to Cloud (FARO Scene)	33
7.2.3	Bewertung	33

7.2.4	Relokalisierung.....	34
7.3	Clean Up.....	35
7.3.1	Scanartefakte	35
7.3.2	Filter	36
7.4	Meshing.....	40
7.4.1	Normalen	40
7.4.2	Ball Pivoting Algorithmus.....	41
7.4.3	Retopology und Remodelling.....	42
8	Anwendungsgebiete	44
8.1	Matchmove	44
8.1.1	3D Camera Track.....	44
8.1.2	Nodaler Schwenk	46
8.1.3	Object Track.....	47
8.1.4	Geometry Track.....	47
8.1.5	Layout.....	48
8.2	Rotoskopie	49
8.2.1	Rotoskopie unbewegter Objekte	49
8.2.2	Rotoskopie bewegter Objekte	49
8.2.3	3D Stabilisierung	49
8.3	Retusche	50
8.4	Set Extension.....	51
8.4.1	3D Set Extensions.....	51
8.4.2	2,5D Matte Painting.....	51
8.5	3D Assets.....	52
8.6	Image Based Lighting.....	53
8.7	Prävisualisierung.....	54
8.8	Stilmittel & Virtual Reality.....	55
9	Anwendungsbeispiel Studioproduktion „Shattered“.....	56
10	Fazit.....	60
11	Ausblick	61

Anhang	iv
A Glossar*.....	iv
B Abbildungsverzeichnis	v
C Tabellenverzeichnis.....	vii
D Literatur- und Quellenverzeichnis	viii
E Lebenslauf.....	xii
F Hinweise zur CD	xiv

* Die im Glossar aufgeführten Begriffe sind bei Erstnennung kursiv gedruckt.

Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laser Scanning
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BPA	Ball Pivoting Algorithm
CC	CloudCompare
CG	Computer Graphics
CGI	Computer Generated Imagery
CMOS	Complimentary metal-oxide-semiconductor
DFT	Department for Transport
GPS	Global Positioning System
HDR	High Dynamic Range
IBL	Image Based Lighting
kpps	kilo points per second
LDR	Low Dynamic Range
LiDAR	Light Detection and Ranging
PS	Phase Shift
Radar	Radio Detection and Ranging
SOR	Statistical Outlier Removal
TLS	Terrestrial Laser Scanning
TOF	Time of Flight
VFX	Visual Effects
VR	Virtual Reality
Latlong	Latitude and Longitude

1 Einleitung

1.1 Die Bedeutung von Tiefe für die VFX-Industrie

Kameras geben die dreidimensionale Drehrealität, ähnlich dem menschlichen Auge, aus nur einem Blickwinkel als zweidimensionales Bild wieder. Auch bei stereoskopischen Aufnahmen bildet jeder Sensor die Realität nur auf einer Fläche ab. Dadurch gehen Tiefeninformationen verloren, die für eine Filmbetrachtung nicht notwendig sind.

Werden jedoch im Rahmen einer *Visual Effects* (VFX) Produktion mehrere Bildelemente miteinander kombiniert oder Teile eines Bildes verändert, so muss deren Perspektive und Beleuchtung mit der Gesamtszene übereinstimmen. Nur ein detailliertes Tiefenwissen lässt Rückschlüsse auf die genaue Form und Position sowie eine Rekonstruktion der Beleuchtungssituation zu. Diese Informationen können durch einen *VFX Supervisor* am Set oder durch den *Matchmove* in der Postproduktion gewonnen werden. Sie sind seit jeher nötig und heutzutage, wo Szenen vieler Spielfilme zum Großteil aus computergenerierten Elementen bestehen, unerlässlich, um dem Zuschauer ein glaubhaftes Kinoerlebnis zu vermitteln.

1.2 Der LiDAR-Scanner als eine von vielen Lösungen

Ein LiDAR-Scanner, der mithilfe von Licht Entfernungen misst, ist ein Instrument zur Bewältigung dieser Aufgabe. In Hollywood ist er seit einigen Jahren fester Bestandteil des Arbeitsalltags und steht innerhalb der Datenaquise am Set in direkter Konkurrenz zur Photogrammetrie, bei der Tiefe anhand von Bildern berechnet wird.¹ Diese Grundlagenarbeit konzentriert sich auf die Verwendung von LiDAR-Scannern als eine von vielen Möglichkeiten zur Berechnung von Tiefe.

1.3 Fragestellung und Zielsetzung

Im Zentrum der folgenden Abhandlung steht dabei die Frage, wie die gewonnenen Daten die Arbeit von *VFX Artists* erleichtern können.

Teil A geht auf die Funktionsweise von LiDAR-Geräten ein. Es werden sowohl die physikalisch-technischen Hintergründe wie auch die generelle Bedienung betrachtet. Neueinsteigern soll die erste Hälfte ein grobes Verständnis für die Arbeit mit Laserscannern und einen Eindruck von den Aufgaben eines LiDAR-Operators am Set einer VFX-Produktion vermitteln.

Teil B widmet sich anschließend den Anwendungsgebieten. Hier steht der Umgang mit LiDAR-Daten während der Postproduktion im Vordergrund. Es sollen Möglichkeiten und Grenzen im Zusammenspiel mit Visuellen Effekten aufgezeigt und ein etwaiger Mehrwert anhand der Studioproduktion „Shattered“ konkretisiert werden.

¹ Vgl. Ralla, M., Re, 2015

Teil A – Funktionsweise

2 Physikalische und technische Grundlagen

Der Begriff LiDAR leitet sich von dem Wort Radar (Radio Detection and Ranging) ab und gilt als Abkürzung für Light Detection and Ranging.² Bei beiden Systemen handelt es sich um sogenannte Remote Sensing³ bzw. Fernerkundungsverfahren⁴, die ohne direkten Kontakt und mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen Informationen über ein Zielobjekt sammeln.⁵ Während Radar-Geräte mit Hilfe von Antennen die Ausbreitung von Mikrowellen betrachten⁶, sind LiDAR-Scanner optische Präzisionsinstrumente, die aufgrund der Eigenschaften des Lasers kleinste Distanzen bis auf wenige Millimeter genau bestimmen können.

Um die Funktionsweise zu verstehen, ist es erforderlich, ein paar technische Bestandteile des LiDAR-Scanners zu erläutern.

2.1 Elektromagnetische Strahlung und Entfernungsmessung

„Elektromagnetische Strahlung entsteht durch Umwandlung anderer Formen von Energie“⁷ und breitet sich in Form von Wellen aus. Diese lassen sich in Teilen mit der Gleichung

$$\lambda \cdot \nu = c$$

mathematisch aufschlüsseln, wobei λ die Wellenlänge, ν die Frequenz und c die Geschwindigkeit ist.⁸ Im elektromagnetischen Spektrum werden sie nach Wellenlänge geordnet. Der Bereich zwischen 100 nm und 1 mm wird dabei als Licht bezeichnet⁹ und kann in Verbindung mit optischen Sensoren zur Entfernungsmessung genutzt werden. Hierzu gibt es zwei unterschiedliche Ansätze.

2.1.1 Messverfahren

Beim **Time Of Flight** (TOF)¹⁰ bzw. **Laufzeitverfahren**¹¹ werden kurze, voneinander getrennte Lichtimpulse entsandt. Dabei dient die Laufzeit des von einem Objekt reflektierten Anteils der ausgesandten Strahlung als Anhaltspunkt für die Entfernung. Dieser Ansatz lässt sich durch die Formel

$$\Delta x \geq \frac{c}{2} \Delta t$$

beschreiben. Δx ist die resultierende Distanz zum reflektierenden Objekt, c die Geschwindigkeit des Lichts und Δt die verstrichene Zeit zwischen Sende- und Empfangssignal. Da das Licht vor dem Eintreffen auf dem Sensor die gleiche Strecke zweimal zurücklegt, wird der hintere Teil des

² Vgl. *Weitkamp, C., Lidar, 2005, S. vii*

³ Vgl. *Cracknell, A. P./Hayes, L., Introduction, 2007, S. 1*

⁴ Vgl. *Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 293*

⁵ Vgl. *Cracknell, A. P./Hayes, L., Introduction, 2007, S. 1*

⁶ Vgl. *Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 293*

⁷ *Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 68*

⁸ Vgl. *Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 68*

⁹ Vgl. vgl. *Dobrinski, P./Krakau, G./Vogel, A., Physik, 2010, S. 339*

¹⁰ *San José Alonso, J. I./Martínez Rubio, J./et al., COMPARING, 2011, S. 1*

¹¹ *Ostenrieder, M./Schulz, S.-U., Terrestrial, o.J., S. 3*

Terms entsprechend halbiert. In diesem sehr einfachen Rechenmodell finden die physikalischen Eigenschaften des Mediums, durch das sich der Lichtstrahl bewegt, keine Beachtung.^{12,13} Das Laufzeitverfahren eignet sich für Messungen von „bis zu mehreren Kilometern“¹⁴.

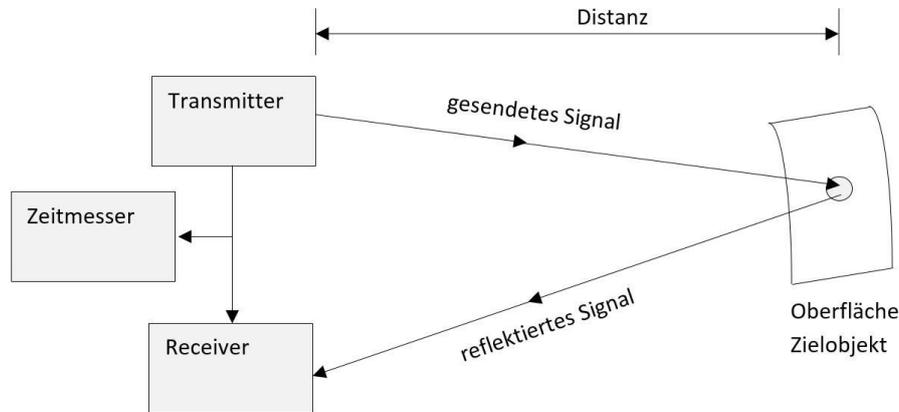


Abbildung 1: Laufzeitverfahren¹⁵

Beim **Phase Shift (PS)**¹⁶ bzw. **Phasendifferenzverfahren**¹⁷ werden kontinuierliche Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge entsandt. Anstatt die Laufzeit eines Signals als Anhaltspunkt für die Entfernung zu nehmen, wird aus dem Phasenversatz $\Delta\varphi$ zwischen Sende- und Empfangssignal die Entfernung berechnet. Da sich die Phasen nach einiger Zeit wiederholen, soll eine Modulation unterschiedlicher Wellenlängen einer Doppeldeutigkeit bei der Interpretation des Signals entgegenwirken. Diese Methode ist genauer als das Laufzeitverfahren, eignet sich aufgrund des hohen Energiebedarfs und der Dopplungsgefahr jedoch nur für kurze Strecken von bis zu mehreren hundert Metern.¹⁸

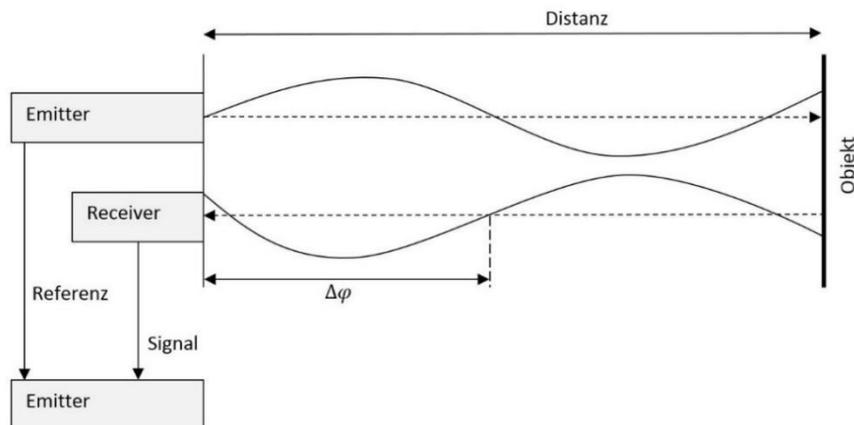


Abbildung 2: Phasendifferenzverfahren¹⁹

¹² Vgl. Fujii, T./Fukuchi, T., Laser, 2005, S. 8 f.

¹³ Vgl. Bhurtha, R./Held, C., Introduction, 2007, S. 15–17

¹⁴ Ostenrieder, M./Schulz, S.-U., Terrestrial, o.J., S. 3

¹⁵ In Anlehnung an János, T., Precision, 2008

¹⁶ San José Alonso, J. I./Martínez Rubio, J./et al., COMPARING, 2011, S. 1

¹⁷ Ostenrieder, M./Schulz, S.-U., Terrestrial, o.J., S. 3

¹⁸ Vgl. Ostenrieder, M./Schulz, S.-U., Terrestrial, o.J., S. 3

¹⁹ In Anlehnung an János, T., Precision, 2008

2.1.2 Anforderungen

Bedingung für eine erfolgreiche Messung ist in beiden Fällen ein ausreichend starkes und präzises Eintreffen der zurückfallenden Strahlung auf einen Sensor. Das Licht darf sich nicht auffächern, sondern muss über große Distanzen auf einen Punkt fokussiert bleiben. Zugleich setzt das Phase Shift Verfahren eine eindeutige Identifizierbarkeit der Phasenlage und damit eine einheitliche Strahlenmodulation voraus. Mit regulären Lichtquellen sind diese Anforderungen nur schwer zu erfüllen, weshalb sich LIDAR-Systeme auf die besonderen Eigenschaften des Lasers stützen.^{20,21}

2.1.3 Laser

Der Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)²² ist eine stark gebündelte Form elektromagnetischer Wellen. Im Gegensatz zu regulären Lichtquellen wie Glühlampen, die Lichtstrahlen gleicher oder unterschiedlicher Wellenlängen ungeordnet aussenden, sind die einzelnen Wellenzüge beim Laser kohärent, d.h. sie schwingen im Gleichtakt zueinander und decken nur ein Frequenzband ab.²³ Das ermöglicht dem Differenzverfahren eine eindeutige Zuordnung der Phasenlage und lässt den Laser auch auf große Distanzen präzise arbeiten. Je nach zu vermessender Oberfläche wird dabei ein anderes Frequenzband abgedeckt. Grüner Laser durchdringt Wasser und wird bei der Aufzeichnung von Meeresböden (Bathymetrie) verwendet, während bei trockenem Land (Topographie) infrarotes Licht zum Einsatz kommt.²⁴

Seine Aussagekraft wird maßgeblich durch die Reflexionseigenschaften eines zu vermessenden Objekts bestimmt. Spiegelnde Oberflächen leiten den Strahl im Eingangswinkel weiter und verursachen damit diverse Scanartefakte (siehe Kapitel 6.3.1 Scanartefakte). Diffuse Oberflächen hingegen werfen das Licht gleich auch in Richtung Scanner zurück und sind damit weit besser für optische Entfernungsmessungen geeignet. Bei ihnen spielt der Albedo eine entscheidende Rolle. Er bildet das Verhältnis von ausfallender zu einfallender Strahlung und definiert so das Rückstrahlvermögen eines Objektes.²⁵ Je kleiner der Wert, desto mehr Licht wird vom Messobjekt absorbiert und desto kleiner ist die messbare Rückstrahlung. Je nach Stärke des Ausgangssignals führt dies zu einer Einschränkung der Reichweite eines LiDAR-Scanners (siehe Kapitel 3.4 Hersteller und Modelle).

2.2 Elektromagnetische Sensoren

Ein Sensor lässt sich laut Jörg Albertz und Manfred Wiggenhagen als „ein technisches System [beschreiben], das elektromagnetische Strahlung so erfasst und speichert, dass Informationen über die Umwelt gewonnen werden können.“²⁶ Je nach Quelle der elektromagnetischen Strahlung wird zwischen aktiven und passiven Sensoren unterschieden. Ein aktiver Sensor sendet selbst

²⁰ Vgl. Fujii, T./Fukuchi, T., *Laser*, 2005, S. 5 f.

²¹ Vgl. Suter, D., *Physik*, 2001, S. 423 f.

²² Bauer, H., *Lasertechnik*, 1991, S. 11

²³ Vgl. Suter, D., *Physik*, 2001, S. 423

²⁴ Vgl. *National Oceanic and Atmospheric Administration - National Ocean Service*, What, 2012, S. 1

²⁵ Vgl. Albertz, J./Wiggenhagen, M., *Taschenbuch*, 2009, S. 77

²⁶ Albertz, J./Wiggenhagen, M., *Taschenbuch*, 2009, S. 108

elektromagnetische Wellen aus, während ein passiver allein die von der Umwelt abgegebene Strahlung nutzt. Sensoren sind nur für Teile des elektromagnetischen Spektrums empfänglich und können, um eine größere Bandbreite abzudecken, zu Multispektral-Sensoren kombiniert werden.²⁷

2.2.1 Transmitter & Receiver

Ein aktiver LiDAR-Sensor lässt sich dabei immer in zwei Baugruppen unterteilen. Einem Transmitter, der das Signal in Form eines Laserstrahls aussendet, sowie einem Receiver, der die reflektierte Strahlung über einen optischen Detektor in Form einer Photodiode aufnimmt und als elektrisches Signal in einem Computerchip analysiert.^{28, 29}

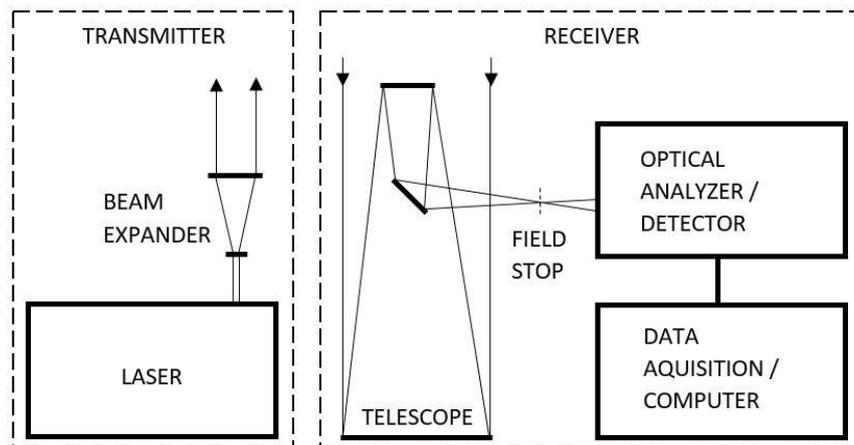


Abbildung 3: Aufbau eines LiDAR-Sensors³⁰

2.2.2 Scanner & Scanparameter

Als Scanner wird ein „[Sensor-]System zum Abtasten eines Untersuchungsobjektes“³¹ bezeichnet. Da eine Sensorfläche selten groß genug ist, um ein Zielobjekt vollständig zu erfassen, setzt dies voraus, dass sich entweder die Sensorfläche um das Objekt oder das Objekt um die Sensorfläche bewegt. Am Flughafen wird zum Beispiel das Gepäck durch eine Röntgenschanke transportiert, während bei einem Flachbrettscanner eine Zeile von Fotodioden entlang einer Scanebene gleitet. Je nach System und Scanbewegung ergeben sich daraus unterschiedliche Scannmuster (siehe Kapitel 3 Systeme).

Zu den wichtigsten Scanparametern von LiDAR-Geräten zählen Auflösung und Qualität. Sie haben Einfluss auf Messdichte und Genauigkeit eines Scanvorgangs. Je höher die Auflösung, desto geringer ist der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten und desto mehr Details werden vom Scanner erfasst. Die Qualität wiederum definiert, wie viele Messungen der Scanner pro Punkt vornimmt. So weicht der Laserstrahl aufgrund innerer und äußerer Einflüsse immer leicht vom vorherigen Auftreffpunkt ab. Die Bildung eines Durchschnittswerts wirkt Ungenauigkeit entgegen

²⁷ Vgl. Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 108

²⁸ Vgl. Weitkamp, C., Lidar, 2005, S. 3

²⁹ Vgl. Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 129

³⁰ In Anlehnung an Weitkamp, C., Lidar, 2005, S. 3

³¹ Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 123

und kann das Rauschverhalten eines Scans verbessern. Mit einer Erhöhung der Parameter geht eine längere Scandauer einher.^{32,33}

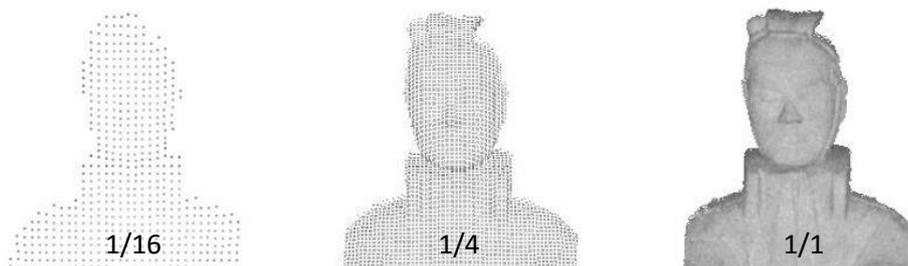


Abbildung 4: Punktdichte bei unterschiedlicher Auflösung

2.3 Zusätzliche Sensoren

Neben der Technik zur Entfernungsmessung verfügen LiDAR-Scanner über einige weitere Sensoren. Diese helfen dabei, erfasste Daten in einem dreidimensionalen Koordinatensystem einzuordnen und zueinander auszurichten (siehe Kapitel 6.2 Registrierung). Im Folgenden ein Überblick über die wichtigsten Geräte und ihre Einschränkungen.

2.3.1 GPS

Beim NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System), dem bisher „einzige[n] globale[n] in allen Details voll funktionsfähige[n] Satellitennavigationssystem“³⁴, erfolgt die Positionsbestimmung per Satellitentrilateration³⁵. Hierbei wird Lage eines Sensors anhand der bekannten Entfernung zu verschiedenen Satelliten ermittelt.³⁶ Eine Ortung ist nur im Freien möglich.

GPS-Daten unterstützen in einer Software wie FARO Scene die grobe Vorabpositionierung einzelner Scans und dienen damit in erster Linie einer Zusammenführung der aus den Scans gewonnenen Punktwolken. Darüber hinaus ermöglichen sie einen Übertrag lokaler Koordinaten in geografische Längen- und Breitengrade (Geo-Referencing). Eine solche Zuordnung ist für Landvermessungen oder Architekturprojekte elementar, in der VFX-industrie jedoch nicht weiter notwendig.³⁷

2.3.2 Altimeter

Das Altimeter ist ein *barometrischer* Höhensensor. Es misst den Abstand zum Meeresspiegel anhand des Luftdrucks. Damit ist er besonders anfällig für Wetterveränderungen und sollte vor jedem Drehtag neu kalibriert werden. In der Software dienen die Daten als Referenz für die Höhenlage einzelner Scans und werden in der Regel für eine automatische Vorpositionierung

³² Vgl. David Salamon, FARO, 2016, S. 1

³³ Vgl. FARO Technologies Inc., FARO, 2014, S. 42

³⁴ Schlütter, T., Satellitennavigation, 2014, S. 6

³⁵ Vgl. TOMTOM, How, o.J.

³⁶ Vgl. Schlütter, T., Satellitennavigation, 2014, S. 53

³⁷ Vgl. Schuhmacher, S./Böhm, J., Georeferencing, 2005, S. 1

verwendet.³⁸ Der Ursprung der LiDAR-Daten liegt damit nicht im Nullpunkt des Softwarekoordinatensystems, sondern um einen entsprechenden Betrag nach oben oder unten verschoben.

2.3.3 Kompass

Im Gegensatz zu GPS und Altimeter erfassen Kompass und Zweiachskompensator nicht die Position, sondern die Orientierung eines Objektes. Der Kompass reagiert auf das Magnetfeld der Erde und bestimmt daraus die Himmelsrichtungen. Er funktioniert sowohl im Freien wie auch in überdachten und geschlossenen Räumen. Alles, was das Magnetfeld manipuliert, hat dabei direkten Einfluss auf die Qualität der erfassten Kompass-Daten.³⁹

2.3.4 Zweiachskompensator

Der Zweiachskompensator bzw. das Inklinometer ist ein Neigungssensor, der die Schräglage eines LiDAR-Scanners anhand der Gravitation bestimmt. Damit können LiDAR-Scans nachträglich nivelliert, also parallel zu einer Bodenfläche ausgerichtet werden. Bei Geräten wie dem FARO Focus3D kann eine Abweichung von bis zu 5° gemessen werden.⁴⁰

2.4 Fehlerbudget und Messunsicherheiten

Ein Fehlerbudget beschreibt die Summe der Messunsicherheiten eines Scans. Diese können durch innere und äußere Faktoren variieren. Zu den äußeren Faktoren zählen:

- Umweltbedingungen:
 - Regen; Nebel; haben Einfluss auf den Strahlenverlauf des Lasers
 - Feuchtigkeit; hat Einfluss auf das Reflexionsverhalten einer Oberfläche
 - Wind und Erdbewegungen; führen zu Positionsschwankungen von Scanner und Objekten
- Zielobjektbezogene Fehler:
 - Materialeigenschaft einer Oberfläche; definiert Reflexions- und Absorptionsverhalten
 - Position zum Messgerät; hat Einfluss auf die objektbezogene Messdichte und Messgenauigkeit (siehe Kapitel 4.1.4 Positionsabhängige Auflösung und Kapitel 4.1.5 Positionsabhängige Genauigkeit)

Zu den inneren, geräteeigenen Messunsicherheiten zählen Ungenauigkeiten und Fehlertoleranzen der verbauten Messinstrumente und Materialien. Diese Messunsicherheiten lassen sich erfassen und in Form eines Fehlerbudgets darstellen, dem mathematische Algorithmen entgegenwirken.⁴¹ Eine Besprechung der Methoden sprengt jedoch den Rahmen dieser Arbeit. Messunsicherheiten äußern sich in diversen Artefakten (siehe Kapitel 6.3 Scanartefakte).

³⁸ Vgl. *FARO Technologies Inc.*, FARO, 2014, S. 95 f.

³⁹ Vgl. *Schlütter, T.*, Satellitennavigation, 2014, S. 10 f.

⁴⁰ Vgl. *FARO Technologies Inc.*, FARO, 2014, S. 93

⁴¹ Vgl. *Paffenholz, J.-A.*, Direct, 2012, S. 41–46

3 Systeme

Bei LiDAR-Systemen lässt sich zwischen luftgesteuerten bzw. Airborne Laser Scanning (ALS), bodengesteuerten bzw. Terrestrial Laser Scanning (TLS) und handheld Systemen unterscheiden.⁴² Für eine Filmproduktion sind jene Systeme interessant, die Filmsets und Objekte möglichst schnell von mehreren Seiten erfassen, mit geringem (Kosten-)Aufwand verbunden sind und sich spontan einsetzen lassen. Luftgesteuerte Systeme werden an Flugzeugen angebracht und bedürfen einer umfangreichen technischen Planung. Sie lassen sich somit weder kurzfristig noch kostengünstig einsetzen und erfassen Landstriche nur aus der Vogelperspektive, was zu ungünstigen Verdeckungen führt (siehe Kapitel 4.2.4 „Scan-Kulisse“ versus „echtes 3D“). In der VFX-Industrie kommen daher hauptsächlich bodengesteuerte und handheld Scanner zum Einsatz, die im Folgenden besprochen werden.

3.1 TLS Scanner

Der Terrestrische LiDAR-Scanner zählt zu den aktiven, optischen Sensoren.⁴³ Über ein System aus Ablenkspiegeln schickt er einen Laser aus und misst mit Hilfe von Photodioden die zurückfallende Strahlung. Die Bildfläche wird dabei je nach Hersteller und Gerät zeilen- oder spaltenweise im Zickzack erfasst.^{44,45}

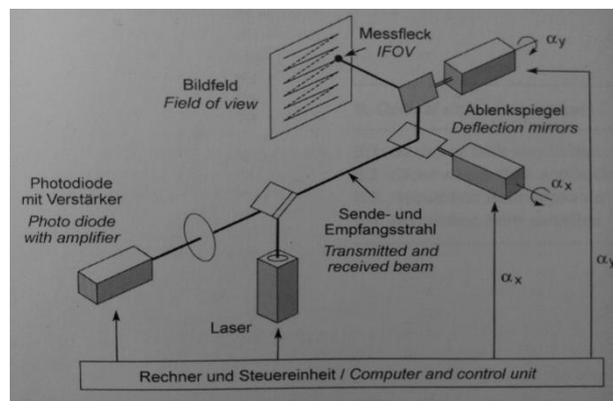
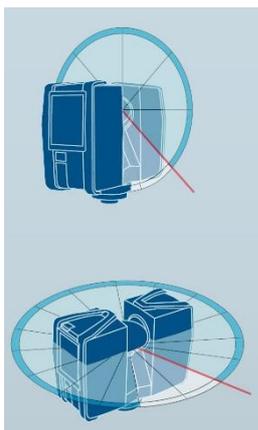


Abbildung 5: Innenaufbau eines TLS Scanners⁴⁶



Bodengesteuerte Panorama-Scanner drehen sich horizontal und vertikal um die eigene Achse und erfassen so von einem festen Standpunkt aus die Umgebung.⁴⁷ Die vertikale Bewegung wird durch einen rotierenden Spiegel ermöglicht, dessen Sichtbereich durch Stativ und Aufhängung eingeschränkt wird und damit nicht ganz 360° beträgt. Je nach Ausführung erreichen die Messungen Distanzen von mehreren hundert Metern (siehe Kapitel 4.3 Hersteller und Modelle). Durch einen Wechsel des Standorts und eine virtuelle Aneinanderreihung mehrerer Scans lassen sich größere Areale von unterschiedlichen Seiten vermessen und in einem gemeinsamen Koordinatensystem darstellen.

Abbildung 6: Rotationsprinzip⁴⁸

⁴² Vgl. Young, J., LiDAR, 2011, S. 4

⁴³ Vgl. Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 108

⁴⁴ Vgl. Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 129

⁴⁵ Vgl. David Saloman, FARO, 2016, S. 2

⁴⁶ Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 129

⁴⁷ Vgl. Albertz, J./Wiggenhagen, M., Taschenbuch, 2009, S. 129

⁴⁸ FARO Europe GmbH & Co. KG, FARO, 2014

3.2 Handheld Scanner

Handheld-Systeme arbeiten auf deutlich kürzeren Distanzen von wenigen Metern und sind zur Erfassung einzelner Objekte gedacht. Als mobile Systeme liegt ihr Vorteil in der Bewegungsfreiheit des Nutzers. Sie lassen sich während des Scanvorgangs auch an schwer erreichbare Stellen führen. Eine vollständige Erfassung verwinklelter Objekte ist damit einfacher als mit TLS-Systemen.^{49,50}



Abbildung 7: FARO Freestyle3D X⁵¹



Abbildung 8: CREAFORM HandySCAN 700⁵²

3.3 Farb- und Helligkeitswerte

LiDAR-Geräte speichern die Rückstrahlintensitäten von Messpunkten als Helligkeitswerte ab. Diese können später dazu genutzt werden, eine Punktwolke nach der Qualität der Einzelmessungen zu filtern. Helle Messpunkte mit hoher Rückstrahlung sind genauer als dunkle Messpunkte mit niedriger Rückstrahlung.⁵³

Viele TLS-Geräte besitzen zudem eine integrierte Farbkamera, die aus mehreren Spiegelpositionen Fotos aufnimmt und in einem Panorama zusammenführt. Mit entsprechender Software können diese ebenfalls den Messpunkten zugeordnet oder als Einzelbilder exportiert werden. Das vereinfacht die Navigation innerhalb der Daten und ermöglicht den VFX Artists je nach Qualität der Bilder eine separate Erstellung von *Low Dynamic Range* (LDR) oder *High Dynamic Range* (HDR) Panoramen (7.4 Image Based Lighting). Hierbei ist zu beachten, dass die exportierten Bilder nur den freien Sichtbereich eines Scanners wiedergeben und keine 360°-Repräsentation der Szene sind. Um eine *Latlong-Map* im Format 2:1 zu erhalten, müssen sie nachträglich um einen schwarzen Bereich ergänzt werden.



Abbildung 9 (links): Original Latlong-Map

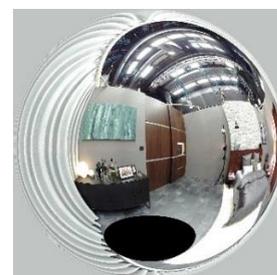


Abbildung 10 (rechts): Kugelpanorama aus überarbeiteter 2:1 Latlong-Map

⁴⁹ Vgl. FARO Europe GmbH & Co. KG, FARO, o.J.

⁵⁰ Vgl. CREAFORM, Tragbare, o.J.

⁵¹ FARO Technologies Inc., FARO, 2015

⁵² CREAFORM, Creaform, 2014

⁵³ Vgl. David Salamon, FARO, 2016, S. 3

4 Hersteller und Modelle

Im Folgenden ein Überblick über zwei bekannte Firmen und einige ihrer für die VFX-Industrie interessanten TLS-Modelle.

4.1.1 Leica

Die Leica Geosystems AG ist ein Schweizer Unternehmen, das sich seit 1819 auf die Herstellung und den Vertrieb von Messsystemen konzentriert.⁵⁴ Sie ist eine Schwesterfirma der Leica Microsystems GmbH, der Leica Biosystems GmbH und der Leica Camera AG, die zum Großteil ebenfalls optische Präzisionsinstrumente herstellen.⁵⁵ Bei der Geosystems AG liegt das Augenmerk auf Vermessungstechnik.⁵⁷ Neben



Abbildung 11: ScanStation-Modelle⁵⁶

Produkten zur Photogrammetrie und Laser-losen Distanzmessung bietet sie auch TLS-Systeme an.⁵⁸ Darunter die Leica Scan Station C10, die von der Firma 4DMax bei den Dreharbeiten zum Film „Lucy“ eingesetzt wurde.⁵⁹

	ScanStation C10 ⁶⁰	ScanStation P16 ⁶¹	ScanStation P40 ⁶²
Reichweite	0,1-300m bei 90% Albedo, 0,1-134m bei 18% Albedo	0,4-40m bei 18% Albedo	0,4-270m bei 34% Albedo 0,4-180m bei 18% ALbedo
Messrate	bis zu 50.000 Punkte pro Sekunde	bis zu 1.000.000 Punkte pro Sekunde	bis zu 1.000.000 Punkte pro Sekunde
Systematischer Distanzfehler	± 4 mm	± 1,2 mm	± 1,2 mm
Integrierte Farbkamera	4 Megapixel pro 17° x 17° Bild	4 Megapixel pro 17° x 17° Bild, Pixelgröße von 2.2 µm	4 Megapixel pro 17° x 17° Bild, Pixelgröße von 2.2 µm
Laserklasse	3R	1	1
Gewicht	13 kg	12,25 kg	12,25 kg
Sensoren	Zweiachskompensator	Zweiachskompensator	Zweiachskompensator
Messverfahren	Time of flight	Time of flight	Time of flight
Abmessungen	395 x 358 x 238 mm	395 x 358 x 238 mm	395 x 358 x 238 mm
Bedienung und Anschlüsse	Touchscreen, WLAN (über externes Adapter), Gigabit Ethernet	Touchscreen, WLAN, Gigabit Ethernet, USB 2.0	Touchscreen, WLAN, Gigabit Ethernet, USB 2.0

Tabelle 1: Leica TLS-Modelle

⁵⁴ Vgl. Leica Geosystems AG, History, o.J.

⁵⁵ Vgl. Leica Microsystems IR GmbH, Four, o.J.

⁵⁶ Leica Geosystems AG, Leica, o.J.

⁵⁷ Vgl. Leica Geosystems AG, Who, o.J.

⁵⁸ Vgl. Leica Geosystems AG, Products, o.J.

⁵⁹ Vgl. Fürst, M., Wenn, 2014, S. 35

⁶⁰ Vgl. Leica Geosystems AG, Leica, 2011, S. 2

⁶¹ Vgl. Leica Geosystems AG, Leica, 2015, S. 2

⁶² Vgl. Leica Geosystems AG, Leica, 2015, S. 2

4.1.2 FARO

Mit den TLS Phasendifferenz-Geräten der Focus3D-Klasse steht die Firma FARO in direkter Konkurrenz zu Leica. Ihre Modellnummern geben dabei die maximale Messdistanz an.⁶³ Während sich der FARO Focus3D X 30 aufgrund der geringen Reichweite von 30 m am ehesten zum Scannen einzelner Objekte und weniger zur Aufzeichnung komplexer Außensets eignet, genügt die Reichweite von 130 m beim mittleren Modell für die meisten Anwendungen innerhalb der VFX-Industrie.



Abbildung 12: Focus3D Modelle⁶⁴

	Focus3D X 30	Focus3D X 130	Focus3D X 330
Reichweite	0,6 m bis 30 m	0,6 m bis 130 m	0,6 m bis 330 m
Messrate	bis zu 976.000 Punkte pro Sekunde	bis zu 976.000 Punkte pro Sekunde	bis zu 976.000 Punkte pro Sekunde
Systematischer Distanzfehler	± 2 mm	± 2 mm	± 2 mm
Integrierte Farbkamera	-	bis zu 70 Megapixel	bis zu 70 Megapixel
Laserklasse	1	1	1
Gewicht	5,2 kg	5,2 kg	5,2 kg
Multi-Sensor	Kompass, Höhengsensor, Zweiachskompensator	GPS, Kompass, Höhengsensor, Zweiachskompensator	GPS, Kompass, Höhengsensor, Zweiachskompensator
Abmessungen	240 x 200 x 100 mm	240 x 200 x 100 mm	240 x 200 x 100 mm
Scanner-Steuerung	Mittels Touchscreen und WLAN	Mittels Touchscreen und WLAN	Mittels Touchscreen und WLAN

Tabelle 2: FARO TLS-Modelle⁶⁵

4.1.3 Velodyne

Alle bisher genannten Systeme bieten nur Momentaufnahmen eines zu vermessenden Bereiches. LiDAR-Geräte der Firma Velodyne hingegen arbeiten mit bis zu 20 Hertz⁶⁶ und können so auch bewegte Objekte erfassen. Für die Autoindustrie ist das von großem Nutzen. Mit ihrer Hilfe können selbstfahrende Autos auf Hindernisse im Straßenverkehr reagieren. In der Filmindustrie müssten diese Daten jedoch zwangsweise mit Bildraten von 24, 25 oder 48 Hertz synchronisiert werden. Hinzu kommen Laufzeitunterschiede zwischen den Sensoren und diverse, verfahrensbedingte Eigenheiten (Verzerrungen, Unschärfe).⁶⁷ Inwiefern höher frequentierte Laserscanner damit eine praktikable Alternative zu anderen Echtzeitverfahren wie z.B. Lichtfeld darstellen, bei dem Tiefeninformationen und Bilddaten synchron in der Kamera erfasst werden,

⁶³ Vgl. FARO Technologies Inc., FARO, 2016, S. 2

⁶⁴ FARO Europe GmbH & Co. KG, Laserscanner, o.J.

⁶⁵ Vgl. FARO Europe GmbH & Co. KG, Produktmerkmale

⁶⁶ Vgl. Velodyne LiDAR, Inc., Velodyne, o.J., S. 1

⁶⁷ Vgl. Ralla, M., Re, 2015

bleibt abzuwarten. In der Kreativbranche findet diese Technologie zumindest als visuelles Stilmittel bereits Verwendung. So wurden bei dem Musikvideo „House of Cards“ der Band Radiohead Velodyne-Scanner dazu eingesetzt, menschliche Bewegungen aufzuzeichnen und wiederzugeben (vgl. Abbildung 13).⁶⁸ Im regulären VFX-Betrieb kommen sie aber, bis auf wenige Tests, bisher nicht zum Einsatz und sind damit auch nicht weiter Bestandteil dieser Arbeit.⁶⁹

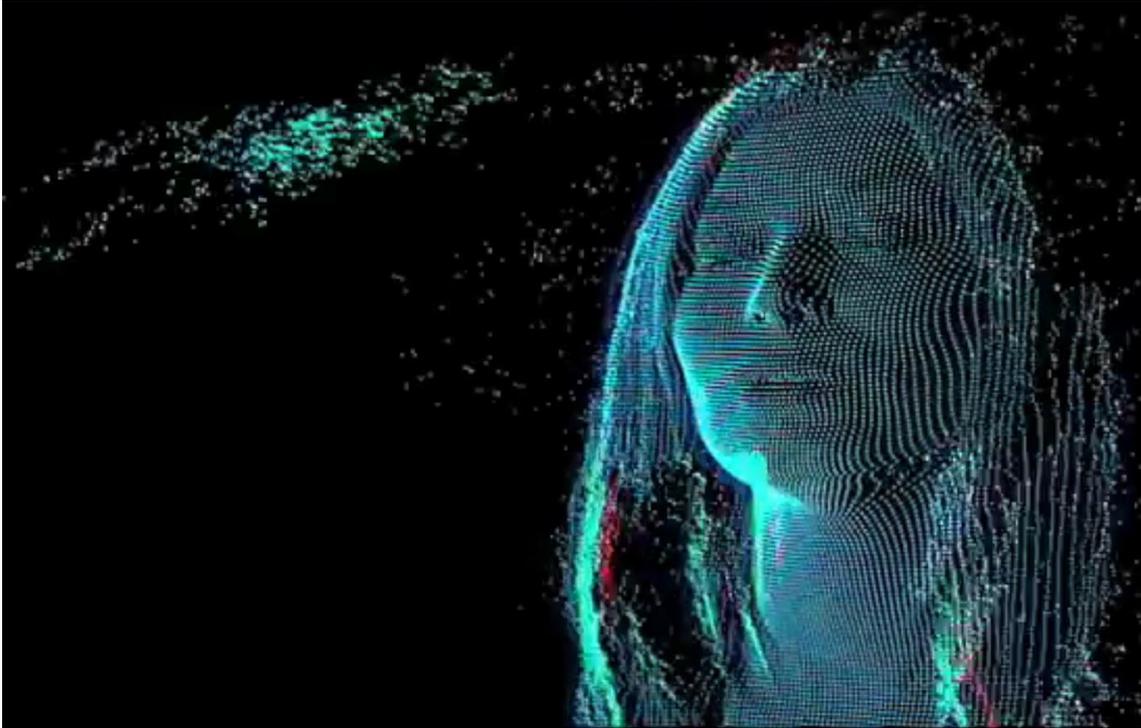


Abbildung 13: Still Frame aus "House of Cards" von Radiohead⁷⁰

⁶⁸ Vgl. *Nackashi, T./Lopez, A., Making*, 2008

⁶⁹ Vgl. *Ralla, M., Re*, 2015

⁷⁰ *James Frost, House*, 2008

5 Bedienung

Anhand des FARO Focus3D X 330 wird im Folgenden die Datenerfassung mit einem terrestrischen LiDAR-Scanner verdeutlicht. Während das allgemeine Vorgehen immer das gleiche ist, kann die Bedienung je nach Hersteller und Modell abweichen.

5.1 Setup

Was ist das Ziel? Diese Überlegung steht zu Beginn eines jeden Scanvorhabens. Soll eine Punktwolke (siehe Kapitel 6.2 Punktwolke) später dabei helfen, das in den Filmaufnahmen enthaltene Set zu bearbeiten, zum Beispiel mit Set Extensions (siehe Kapitel 8.4 Set Extension) oder Retusche-Aufgaben (siehe Kapitel 8.3 Retusche)? Oder soll ein bestimmtes Objekt als Vorlage zur Erstellung eines 3D Assets (siehe Kapitel 8.5 3D Assets) dienen? Aus dieser Fragestellung ergeben sich zwei mögliche Scanszenarien:

- Set-Scan
- Objekt-Scan

5.1.1 Set-Scan

Bei einem Set-Scan werden mehrere Messungen über das Set verteilt. Die optimale Distanz zwischen zwei Scanpositionen hängt von der Registrierungsmethode (siehe Kapitel 7.2 Registrierung) und der Komplexität des zu scannenden Bereiches ab. Eine targetlose Stationierung erfordert mehr Überlappungen zwischen den Scandaten als eine zielmarkenbasierte; an verwinkelten Sets werden mehr Scans zur Beseitigung von Scanschatten benötigt als an einfach strukturierten. Bei den FARO Focus3D X Modellen liegt ein möglicher Richtwert für eine zielmarkenbasierte Stationierung bei 15 m.⁷¹ Dadurch wird sichergestellt, dass genügend Überlappungen zwischen den Aufnahmen existieren, die für ein späteres Ausrichten der 3D-Szene notwendig sind. Der Scanner wird auf Augenhöhe eingerichtet, da sich hier in der Regel die meisten Einstellungen einer Szene abspielen.

Die Situation an Filmsets kann oft unübersichtlich und chaotisch sein kann, weshalb jede Scanposition vorübergehend markiert werden sollte. Das ermöglicht eine bessere Orientierung beim Aufstellen von Referenzobjekten (Targets) und eine Platzierung von Panorama-Aufnahmen. Diese werden u.a. beim Image Based Lightings dazu verwendet, eine realistische Beleuchtungsumgebung für digitale Objekte zu erschaffen (siehe Kapitel 8.6 Image Based Lighting). Da jedoch nur wenige LiDAR-Scanner die Erfassung von HDR Bildinhalten unterstützen, müssen diese nachträglich mit einem speziellen Panoramakopf oder einer DSLR Kamera aufgenommen werden. Dies kann im Anschluss an einen Scan auch direkt vom LiDAR-Stativ aus geschehen, was eine spätere Projektion der Daten einfacher macht.⁷²

⁷¹ Vgl. *David Salamon*, FARO, 2016, S. 2

⁷² Vgl. *Schroeder, R.*, Flexible, 2013, S. 110–113

5.1.2 Objekt-Scan

Bei einem Objekt-Scan wird der Scanner an verschiedenen Positionen um ein Objekt platziert. Es kommt nicht darauf an, möglichst viel Fläche, sondern möglichst viele Details zu erfassen. Dazu kann der Scanner näher an ein Objekt gestellt (siehe Kapitel 4.1.4 Positionsabhängige Auflösung) oder die Auflösung unter Duldung einer längeren Scandauer erhöht werden. Um Zeit zu sparen, kann der Aufnahmewinkel eingeschränkt werden. Wichtig ist, dass von jeder Scanposition aus genügend Targets zu sehen sind.

5.1.3 Targets

Targets dienen einer späteren Ausrichtung der Scans. Die Software, in der die Daten weiterverarbeitet werden, kann sich bei der Verknüpfung mehrerer Scans zu einem gemeinsamen Datensatz nur auf das lokale Koordinatensystem des Scanners und die vorhandenen Sensordaten verlassen. Targets vereinfachen diese Zuordnung. Die Software erkennt anhand ihrer Rückstrahlintensität automatisch ihre Position und kann sie so paarweise scanübergreifend zuweisen. Planare Targets werden in Verbindung mit der FARO-eigenen Software *FARO Scene* verwendet. Sie lassen sich sehr leicht an ebenen Flächen befestigen und bieten gegenüber sphärischen Targets den Vorteil, dass sie je nach Scansituation auch über mehrere Tage an einem Ort bleiben können, ohne zu sehr aufzufallen. Damit sie von der Software erkannt werden, muss der Scanner mindestens in einem 45° Winkel zu der entsprechenden Fläche stehen.⁷³ Bei sphärischen Targets ist die Blickrichtung egal. Sie werden mit Standfüßen auf dem Boden aufgestellt oder mit Hilfe von Magnetadaptern an metallischen Oberflächen befestigt.

Targets müssen immer so zwischen zwei Scanpositionen verteilt werden, dass sie mindestens zwei Raumachsen abdecken und von beiden Positionen aus erfasst werden. Daraus ergibt sich ein Minimum von drei Referenzobjekten pro Scan. Zur Sicherheit sollten vier verwendet werden. Ändert sich durch äußere Einflüsse die Position eines Referenzobjektes, so reichen die verblieben drei für eine Registrierung aus.⁷⁴



Abbildung 14:
Sphärischer Marker
mit Magnetadapter

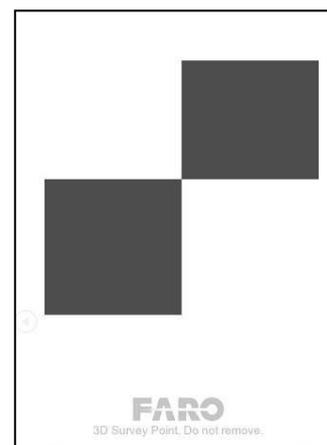


Abbildung 15:
Schachbrettmarker⁷⁵

⁷³ Vgl. *FARO Technologies Inc.*, FARO, 2014, S. 52

⁷⁴ Vgl. *David Salamon*, FARO, 2016, S. 2

⁷⁵ *Stefan Hug*, AW, 2016

Durch Umplatzieren der Targets zwischen den Scans entsteht eine Kette aus Referenzbeziehungen. Sind zum Beispiel vier Scanpositionen um eine Hausecke verteilt, lässt sich mit fünf Targets wie folgt vorgehen:

- Für den ersten Scan werden drei Targets zwischen den Scanpositionen S1 und S2 verteilt. Eines dieser Targets muss vom Standpunkt S3 aus zu sein. (vgl. Abbildung 16a)
- Für den zweiten Scan werden zwei neue Targets zwischen S2 und S3 platziert. Es werden nun erstmals alle fünf Targets erfasst. (vgl. Abbildung 16b)
- Vor dem dritten Scan werden zwei der Targets zwischen S1 und S2 weggenommen und stattdessen zwischen S3 und S4 aufgestellt. (vgl. Abbildung 16c)
- Der vierte Scan bedarf keiner weiteren Veränderungen an den Referenzobjekten. In der Software können die Scandaten anschließend von der ersten Scanposition ausgehend registriert werden. (vgl. Abbildung 16d)

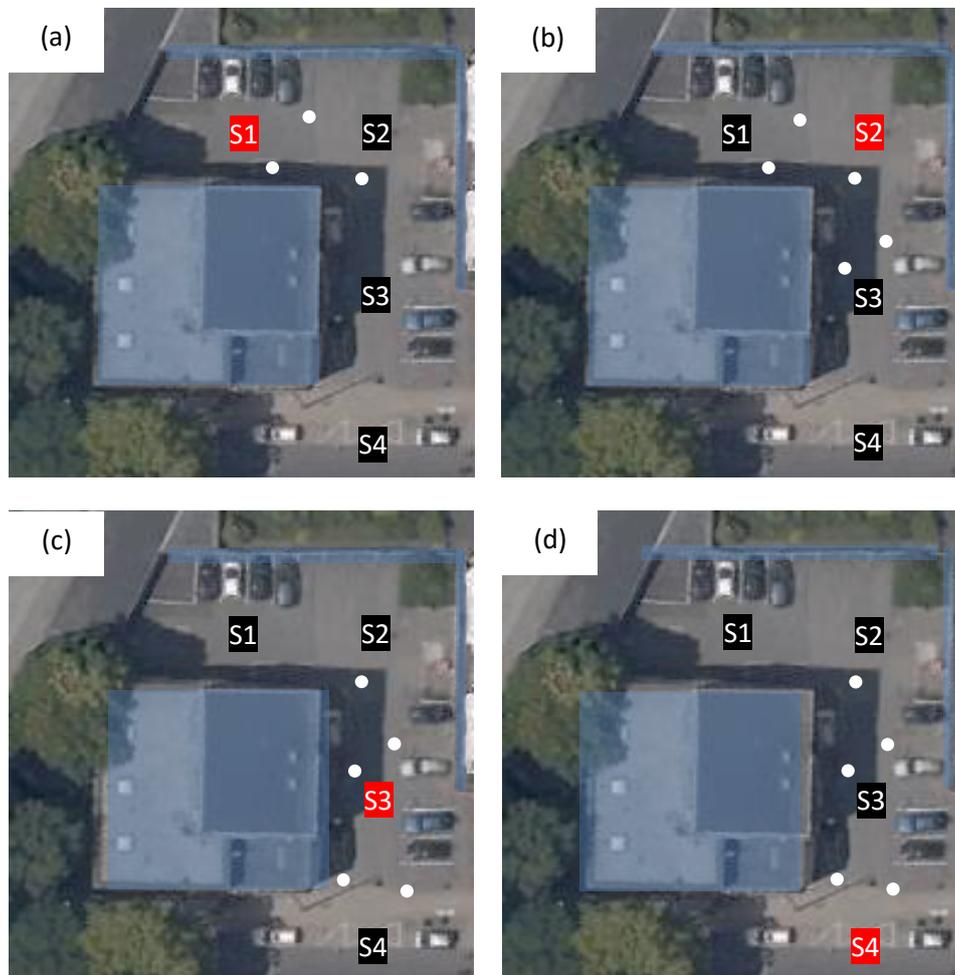


Abbildung 16: Targetplatzierung am Beispiel eines Set-Scans⁷⁶

⁷⁶ Satellitenbilder entnommen aus Google Inc., Maps

Bei Objekt-Scans ist das Target-Handling einfacher. Da hier die Aufnahmen auf deutlich kleinerem Raum stattfinden, reicht es in der Regel, einmal alle fünf Targets aufzustellen, sodass von jeder LiDAR-Position aus drei von ihnen zu sehen sind. Dabei ist es egal, ob zwischen zwei Scans je ein, zwei oder drei Referenzobjekte übereinstimmen. Entscheidend ist, dass mindestens drei Targets aus einem Scan von mindestens einem weiteren Scan erfasst werden.



Abbildung 17: Beispielanordnung von sphärischen Targets bei einem Objekt-Scan

5.1.4 Positionsabhängige Auflösung

Je weiter eine zu vermessende Fläche von einem Panorama-Scanner entfernt liegt, desto größer sind die Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten auf dieser Fläche. Im Umkehrschluss ist die objektbezogene Punktdichte also umso größer, je näher ein Objekt am Scanner steht. Diese distanzabhängige Streuung ergibt sich aus der Punktrotation von Lichtquelle und Sensor und der damit einhergehenden Auffächerung der Strahlen. Sie kann bei Objekt-Scans genutzt werden, um die Auflösung herabzusetzen und so die Dauer eines Scanvorhabens zu verkürzen. Steht der Scanner jedoch zu nah, relativiert sich diese Rechnung aufgrund einer höheren Anzahl benötigter Scanpositionen. Ähnlich verhält es sich bei einer Winkeländerung. Je kleiner der Winkel zwischen Scanner und Objekt, desto weniger Laserstrahlen treffen auf die gleiche Oberfläche. Die optimale Position liegt damit in ausreichender Distanz im Lot zu einer Fläche.

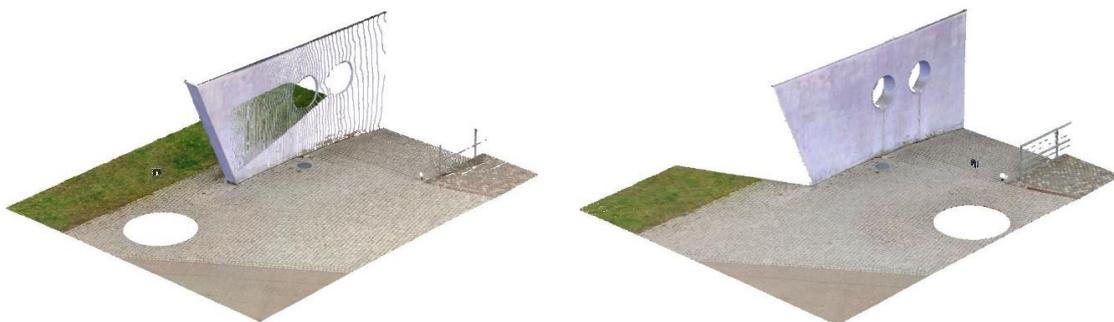


Abbildung 18: Messpunktdichte einer Mauer bei unterschiedlichen Scannerpositionen.

5.1.5 Positionsabhängige Genauigkeit

Distanz- und Winkeländerungen haben auch Einfluss auf die Genauigkeit von Messdaten. Sie nimmt bei größerer Entfernung sowie kleineren Winkeln ab und liegt in der Divergenz des Laserstrahls begründet. So erhöht sich bei steigender Distanz oder kleinerem Winkel die Kontaktfläche zwischen Strahl und Objekt, was bei unebenen Flächen zu einer stärkeren Abweichung der Daten führen kann. Dieser Effekt ist dank der Kohärenz des Lasers minimal.

5.1.6 Scanfilter

Neben Auflösung und Qualität lassen sich bei dem vorliegenden FARO Scanner zwei Hardwarefilter einstellen: Der Clear Contour Filter erkennt und entfernt beim Scannen einen Teil der sogenannten Strays (siehe Kapitel 5.4.1 Scanartefakte). Diese Fehlmessungen entstehen an Kanten und müssen ansonsten in der Nachbearbeitung gelöscht werden. Eine Gefahr, dass dadurch Kanten nach innen weggefressen werden und die Daten später nicht mehr deckungsgleich mit dem Bildmaterial sind, besteht nicht. Gleiches gilt für den Clear Sky Filter. Dieser erkennt und entfernt Fehlmessungen im Himmel und kann in der Regel eingeschaltet bleiben.⁷⁷

⁷⁷ Vgl. *FARO Technologies Inc., FARO, 2014, S. 56 f.*

5.2 Scanvorgang

Der Bewegungszyklus des vorliegenden FARO Modells lässt sich in drei Phasen unterteilen:

-
- Entfernungsmessung
- Belichtungsmessung
- Farbaufnahme

Da eine Spiegelrotation alle Messpunkte entlang der vertikalen Achse abgedeckt, bedarf ein 360° Panorama-Scan lediglich einer 180°-Drehung des LiDAR-Kopfes. Im Rahmen dieser Halbkreisbewegung führt der Scanner alle Phasendifferenzmessungen entsprechend der eingestellten Parameter durch. Anschließend rotiert er in die Ausgangslage zurück. Ist die Farberfassung eingeschaltet, geht der Kopf zunächst in die 180°-Drehung über. Von dort ausgehend wird die Belichtungsmessung schrittweise für jede Aufnahmeposition des Spiegels durchgeführt. Dieser Vorgang endet bei circa 360° mit einer Rückrotation des Kopfes zur Halbkreisposition. In einer letzten 180°-Bewegung erfasst der Sensor-Chip schließlich die Bilddaten im .jpg-Format als Grundlage für eine spätere Zuordnung der RGB-Werte. Das Ende eines Scanvorgangs ist von einem Aufblinken der verbauten Lichter und einem kurzen Ton gekennzeichnet.

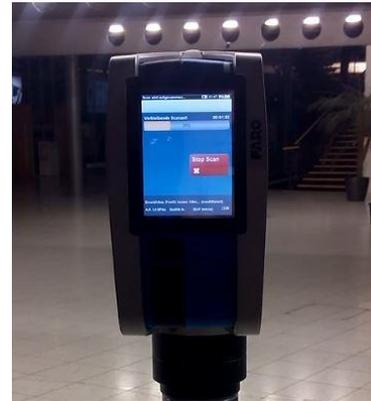


Abbildung 19:
Aktiver Scanvorgang

5.2.1 Scandauer

Die Scandauer hängt von den Parametereinstellungen eines Gerätes ab. Der Signalaustausch zwischen Sensor und Objekt erfolgt in Lichtgeschwindigkeit und ist somit nicht der limitierende Faktor. Jedoch sind der Leistung von Sensor und Rechenchip sowie der Bewegung der mechanischen Elemente physikalische Grenzen gesetzt.⁷⁸ Da bei höherer Auflösung mehr Scanpunkte erfasst und bei höherer Qualität mehr Einzelmessungen durchgeführt werden, benötigen Sensor- und Rechenchip eine längere Verarbeitungszeit. Der Spiegel dreht sich entsprechend langsamer.

Beim FARO Focus3D X330 schafft dieser eine Drehzahl von bis zu 97 s⁻¹. Zusammen mit der Rechenleistung ergibt sich daraus eine maximale Messrate von 976 kpps, was bei höchster Parametereinstellung zu einer Gesamtscandauer von circa 14 Minuten führt. Dieser Zusammenhang wird in der folgenden Tabelle deutlich:

⁷⁸ Vgl. David Salamon, FARO, 2016, S. 1

Auflösung		Qualität	Messrate (kpt/sec)	Rausch- kompression	Netto- Scanzeit (voller Bereich)	pt/360°
Mio. Pkte (voller Bereich)						
710.7	1/1	1x	976	-	0:14:19	40,960
710.7	1/1	2x	488	-	0:28:38	40,960
710.7	1/1	3x	244	-	0:57:16	40,960
710.7	1/1	4x	122	-	1:54:32	40,960
177.7	1/2	1x	976	-	0:03:35	20,480
177.7	1/2	2x	488	-	0:07:09	20,480
177.7	1/2	3x	244	-	0:14:19	20,480
177.7	1/2	4x	122	-	0:28:38	20,480
177.7	1/2	6x	122	2x	1:54:32	20,480
44.4	1/4	1x	976	-	0:00:54	10,240
44.4	1/4	2x	488	-	0:01:47	10,240
44.4	1/4	3x	244	-	0:03:35	10,240
44.4	1/4	4x	122	-	0:07:09	10,240
44.4	1/4	6x	122	2x	0:28:38	10,240
44.4	1/4	8x	122	4x	1:54:32	10,240
28.4	1/5	2x	488	-	0:01:09	8,192

Abbildung 20: Auflösung und Qualität⁷⁹

5.2.2 Probleme am Set

Zwischen und während der Scanvorgänge können verschiedene Probleme auftreten. Zu den kalkulierbaren Störungen zählen örtliche Wetterbedingungen (vor allem Wind und Regen) und zeitliche Konflikte. So arbeitet ein LiDAR-Operator in der Regel zwischen den Einstellungen, in den Pausen oder während der Abbauphase eines Drehtages. Hier sollte sich im Vorhinein mit der Produktionsleitung abgestimmt und auf mögliche Engpässe eingestellt werden.⁸⁰

Wird ein öffentlicher Raum abseits der Dreharbeiten gescannt, führt dies häufig zum Auftreten interessierter Passanten. Solche Begegnungen können von einfachen Gesprächen über hartnäckige Nachfragen bis hin zu hitzigen Diskussionen reichen und zu einer bewussten oder unbewussten Manipulation der Referenzobjekte sowie einem Betreten des Messbereichs führen. Mit einer kurzen und gezielten Ansprache lassen sich derartige Situationen oft verkürzen oder ganz vermeiden. An echten Filmsets geht das nicht. Hier lässt sich selten verhindern, dass andere Personen im Zuge ihrer Arbeit (Setbau/Kamera/Lichthelfer/VFX Supervisor) durch einen Scanvorgang laufen.⁸¹

Eine Scansituation ist damit selten optimal. Die auftretenden Konflikte so gering wie möglich zu halten und das Beste aus den gegebenen Bedienungen herauszuholen ist das oberste Ziel eines LiDAR-Operators.

⁷⁹ FARO Technologies Inc., FARO, 2014, S. 49

⁸⁰ Vgl. David Salamon, FARO, 2016, S. 2

⁸¹ Vgl. David Salamon, FARO, 2016, S. 2

5.2.3 Bewegungsartefakte

Wie bereits angeführt, eignen sich die VFX-gängigen LiDAR-Systeme nur zur Vermessung statischer Strukturen. Bewegt sich eine Person oder ein Objekt durch einen laufenden Scanvorgang, so sorgt der Zeitversatz zwischen den Messungen im Zusammenspiel mit der Geschwindigkeit der Bewegung für eine entsprechend große Verzerrung in der resultierenden Punktwolke. Dieser Effekt ist vergleichbar mit dem *Rolling Shutter Effekt* eines CMOS-Sensors bei einer Fotokamera, nur, dass die Auslese nicht zeilen- sondern punktweise erfolgt und der Scanvorgang sich über einen deutlich längeren Zeitraum erstreckt und damit weit anfälliger für kleine und langsame Bewegungen ist. Je nach Bewegungsgrad treten bei diesem Effekt unterschiedliche Scanartefakte auf (siehe Kapitel 6.3.1 Scanartefakte):

- Große, langsame Bewegungen führen zu einer Deformation des Objektes.
- Kleine, schnelle Bewegungen (Vibrationen, Erderschütterungen, Wind) äußern sich in einem Rauschen oder einer erhöhten Rauheit von Flächen und Kanten.
- Große, sehr schnelle Bewegungen (Vorbeiflug eines Vogels) erzeugen Outlier; Punkte, die weit abseits anderer Punkte liegen.



Abbildung 21:
Deformation menschlicher Beine

5.2.4 „Scan-Kulisse“ versus „echtes 3D“

Die Daten eines LiDAR-Scans lassen sich mit einer Filmkulisse vergleichen. Sie bilden in jedem Messpunkt nur den zum Scanner gerichteten Teil eines Objektes ab. Jegliche Verdeckungen innerhalb einer Szene sorgen dafür, dass dahinterliegende Flächen nicht erfasst werden. Das Fehlen dieser Informationen bezeichnet man als Scanschatten. Es resultiert beim späteren Meshing-Vorgang (siehe Kapitel 7.4 Meshing) in einem offenen Polygonnetz.

LiDAR-Geometrie unterscheidet sich damit grundlegend von einem „echten“ 3D-Modell, bei dem ein Körper über eine geschlossene Außenhülle verfügt. Erst die Aneinanderreihung mehrerer Scans beseitigt Scanschatten und ermöglicht Meshing-Algorithmen die Erstellung geschlossener Polygonnetze.

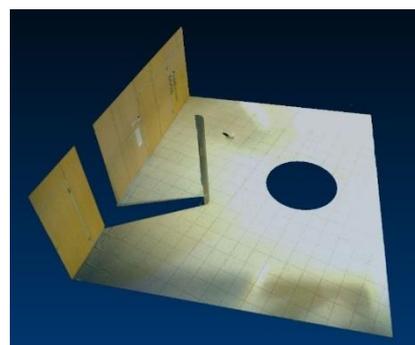


Abbildung 22: Scankulisse mit
Scanschatten einer Säule

Teil B – Digitale Weiterverarbeitung

6 Daten & Dateisystem

Auf die Arbeit am Set folgt das Datenhandling. Das vorliegende FARO System speichert die Messungen auf einer SD-Karte. Über die Ordner „Scans“ und „Previews“ lässt sich auf alle getätigten Aufnahmen und Vorschaubilder zugreifen. Zusätzlich erfasste Farbwerte können in der Software FARO Scene (siehe Kapitel 7.1 Software) abgerufen und exportiert werden.

6.1 Dateiformate

Die Scandaten werden je nach Hersteller in einem firmeneigenen Dateiformat ausgegeben. Bei FARO als .fls-Dateien. Mit proprietärer Software lassen sie sich zum Beispiel in eine Textdatei der Endung .xyz umwandeln. Diese listet alle Messpunkte zeilenweise auf. Die Spalten geben die zugehörigen Koordinaten und Helligkeitswerte an. Je nach Exporteinstellungen kann dieses Format zusätzliche Informationen wie RGB-Werte oder die Ausrichtung von Punktnormalen enthalten. Die Reihenfolge der Punkte ist dabei von der Scanrichtung des Gerätes abhängig. Die oberste Zeile entspricht dem zuerst, die unterste dem zuletzt vermessenen Punkt.⁸²

```
105.27900000 54.95720000 545.56360000 180 180 180
105.30000000 54.94390000 545.59450000 171 171 171
105.28260000 54.97370000 545.55010000 190 190 190
```

Abbildung 23: Koordinaten und Helligkeitswerte in einer .xyz-Datei

Eine solche Textdatei ist in der Regel nur wenige hundert Megabyte groß. Die Darstellung als Punktwolke und ihre Bearbeitung innerhalb der entsprechenden Software erfordert jedoch ein Vielfaches des eigentlichen Speicherbedarfs. In Kombination mit weiteren Scans werden schnell mehrere Gigabyte an Arbeitsspeicher belegt.

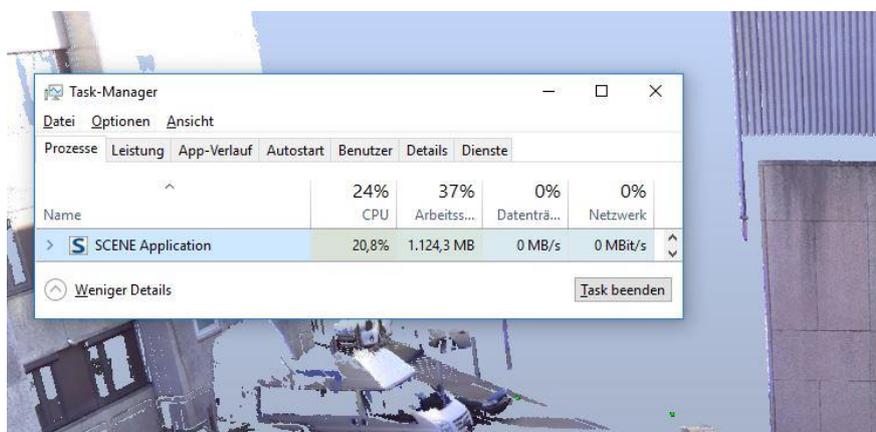


Abbildung 24: Auslastung durch FARO Scene bei einer in den Arbeitsspeicher geladenen Punktwolke

⁸² Vgl. David Salamon, FARO, 2016, S. 3

Hier eine Übersicht der verschiedenen Punktwolkenformate:

Typ	Endung	Beschreibung	binär/ASCII	Punktwolke(n)	Mesh(es)	Besonderheiten
ASCII	.asc .txt .xyz	ASCII Punktwolkendatei	ASCII	1	-	Normalen Farbwerte (RGB) Scalar Fields (>1)
FARO	.fls .fws	FARO Dateiformat	binär	>1	-	Scalar Field (Reflektionswert)
PTX	.ptx	LEICA Punktwolkendatei	ASCII		-	
E57	.e57	ASTM E57 Dateiformat	beides	>1	-	Normalen Farbwerte (RGB oder I) Scalar Field (intensity)
PLY	.ply	Stanford Dateiformat	beides	1	1	Normalen Farbwerte Scalar Fields (all)
OBJ	.obj	Wavefront Dateiformat	ASCII	1	>1	Normalen Materialien und Texturen
FBX	.fbx	Autodesk (Filmbox) Dateiformat	ASCII oder binary	>1	>1	Normalen Farbwerte (RGB) Materialien und Texturen

Tabelle 3: Dateiformate⁸³

⁸³ In Anlehnung an Girardeau-Montaut, D., CloudCompare, 2015, S. 18 f.

6.2 Punktwolke

Eine Punktwolke ist eine räumliche Visualisierung von Scandaten, bei der jede Messung als Punkt in einem dreidimensionalen Koordinatensystem dargestellt wird. Die Position der Messpunkte entspricht dabei ihrer Lage zum Messursprung. Diese Darstellung ermöglicht einen intuitiven Umgang mit den Scandaten und ist für eine effiziente Weiterverarbeitung unentbehrlich.

Punktwolken werden innerhalb der Software (FARO Scene) auf verschiedene Weisen angezeigt. In der räumlichen Ansicht kann der Nutzer frei durch das Koordinatensystem navigieren und einen oder mehrere Scans miteinander vergleichen. Dabei werden die Tiefenlage der Punkte und ein möglicher Scanschatten ersichtlich. Bei der planaren Ansicht werden die Punkte eines einzelnen Scans als Latlong-Map dargestellt. Auf diese Weise lassen sich problematische Bereiche wie größere Glasfronten zweidimensional rotoskopieren und aus der Punktwolke entfernen. Die dritte Möglichkeit ist eine Darstellung aus Scannersicht. Dabei wird die Kamera des Viewports auf die Position des Scannerkopfes fixiert. Die Navigation erfolgt der Aufnahmesituation entsprechend allein durch Rotation um den Nodalpunkt. Aus dieser Perspektive erscheinen die Punkte eines einzelnen Scans als lückenlose, sphärische Anordnung.



Abbildung 25: Räumliche Darstellung



Abbildung 26: Planare Darstellung als Latlong-Map mit selektiertem Bereich



Abbildung 27: Darstellung aus Scannersicht mit selektiertem Bereich

6.3 Octree

Um mehrere Punktwolken schnell zu verarbeiten, kommt es auf eine geschickte Ordnung der Daten an. Punktwolken-Bearbeitungsprogramme sortieren die Daten aller Scans in einer räumlichen Datenstruktur, einem sogenannten Octree. Dabei werden Informationen über die Scanpunkte in die Blätter eines Datenbaums geschrieben, bei dem jeder Knotenpunkt acht Nachfolger besitzt. Die einzelnen Knotenpunkte repräsentieren den dreidimensionalen Raum eines Würfels (Voxel). Dieser wird je nach Octree-Level rekursiv in acht weitere Würfel unterteilt.⁸⁴ Eine solche Datenstruktur ermöglicht das gleichzeitige Bearbeiten mehrerer Punktwolken und eine schnelle, blickrichtungsabhängige Darstellung der Daten.

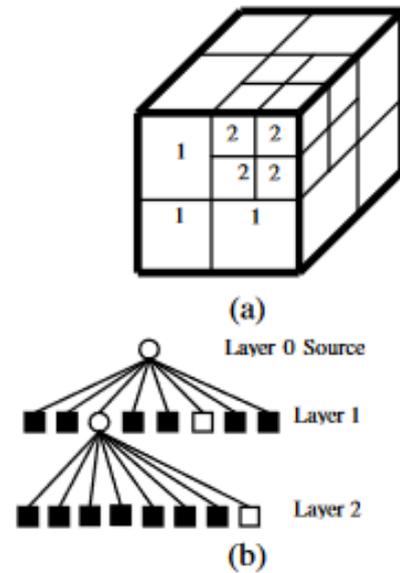


Abbildung 28: Octree Datenbaum⁸⁵

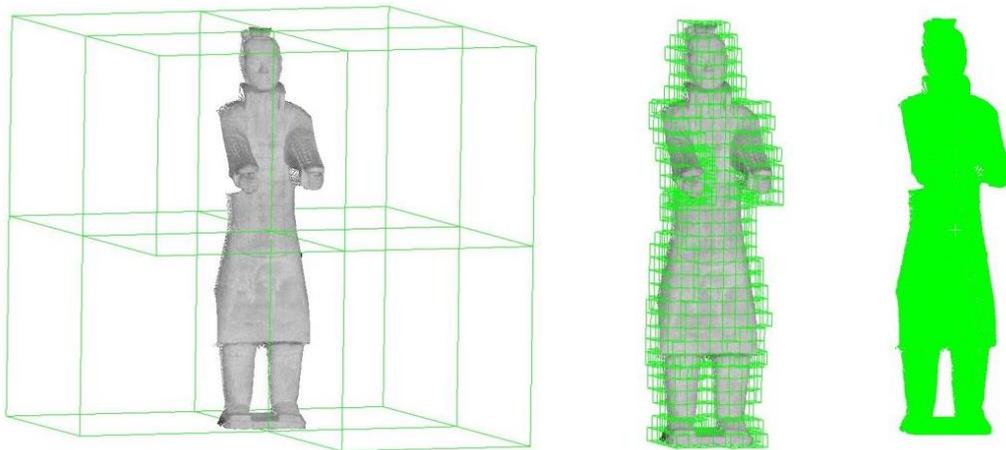


Abbildung 29: Subdivision-Level einer Octree-Struktur

⁸⁴ Vgl. Hornung, A. u. a., OctoMap, 2013, S. 192

⁸⁵ Wang, M./Tseng, Y.-H., LiDAR, o.J., S. 1

7 Workflow

Die aus Scans gewonnenen Daten sind in ihrer Rohform für einen VFX Artist uninteressant. So sind die meisten 3D und *Compositing*-Programme nicht für derart große und fehlerbehaftete Punktwolken ausgelegt. Um sie in der Postproduktion zu verwenden, müssen sie zuerst geordnet (siehe Kapitel 7.2 Registrierung), die Datenmengen je nach Anwendungszweck reduziert (siehe Kapitel 7.3 Clean Up) und die Punkte schließlich in Geometrie umgewandelt werden (siehe Kapitel 7.4 Meshing). Dies geschieht mit Hilfe von 3D-Point-Cloud-Processing- und Mesh-Processing-Software, die im Folgenden vorgestellt werden.

7.1 Software

Dieses Kapitel befasst sich exemplarisch mit je zwei kommerziellen und zwei frei verfügbaren Programmen aus beiden Bereichen. Darüber hinaus gibt es weitere Produkte wie Recap oder Polyworks, die nicht näher behandelt werden.

7.1.1 CloudCompare

CloudCompare (CC) ist ein Hybrid aus vielen 3D Point Cloud Processing und ein paar 3D-Mesh-Processing-Tools. Anfangs ausschließlich zum Vergleich zweier Punktwolken oder Meshes gedacht, bietet es mittlerweile alle Standard-Tools zur Registrierung und Säuberung von Punktwolken. Als Open Source Project unterstützt es dabei viele Dateiformate proprietärer Software und kann vom Anwender über Plugins und Programmierarbeit an eigene Bedürfnisse angepasst werden. Änderungen am Code müssen jedoch zwingend mit der am Projekt beteiligten Community um Daniel Girardeau-Montaut geteilt werden.⁸⁶

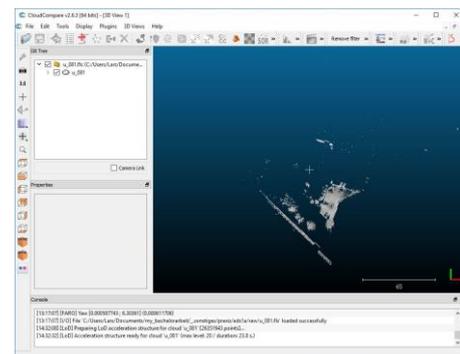


Abbildung 30: CloudCompare GUI

Innerhalb von CloudCompare lassen sich Punktwolken immer nur paarweise registrieren. Bei umfangreichen Scanszenarien steigt damit der Zeitaufwand enorm. Andererseits bietet die Software mit sogenannten Scalar Fields, die bei der Anwendung von Filtern eine Gewichtung der Punkte nach lokaler Lage ermöglichen (siehe Kapitel 7.3.2 Filter), eine einfache und nutzerfreundliche Möglichkeit zur Säuberung der Daten.

⁸⁶ Vgl. Girardeau-Montaut, D., CloudCompare, 2015, S. 7–9

7.2 Registrierung

Ziel der Registrierung ist die Zusammenfassung mehrerer Scans zu einer gemeinsamen Punktwolke.⁹¹ Ihr lokales Koordinatensystem muss dazu in ein globales System übertragen werden, bei dem Ausrichtung und Position aller Punktwolken entsprechend der Ausgangsszene übereinstimmt (relative Orientierung).^{92,93} Dabei helfen die in Kapitel 5.1.1 Set-Scan angesprochenen Überlappungen zwischen den Aufnahmen. Zumeist halbautomatische Registrierungsmethoden erkennen Gemeinsamkeiten und erstellen Transformationsmatrizen, die angewandt zu einer Kongruenz besagter Teilstücke führen. Es wird nur eine Wolke bewegt, während die andere als Referenz dient.

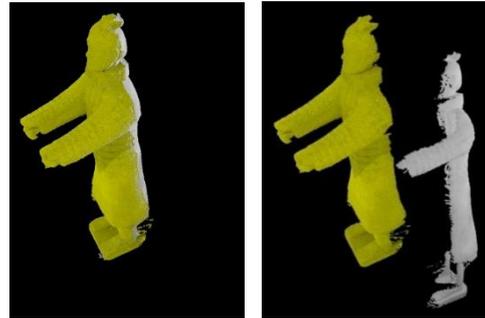


Abbildung 33 (links) und 34 (rechts):
Registrierung zweier Punktwolken

7.2.1 Zielmarkenbasiert (FARO Scene)

Bei der zielmarkenbasierten Registrierung werden die Punktwolken anhand künstlicher oder natürlicher Targets ausgerichtet. Künstliche Targets wie Sphären oder Schachbrettmarker werden über ihre Reflexionsintensität automatisch erkannt und zugeordnet. Alternativ kann eine Funktion die lokalen Eigenschaften der Scanpunkte untersuchen und daraus geometrische Formen wie Kugeln oder Flächen ableiten. Diese können auch manuell durch den Anwender festgelegt werden. Dabei müssen die einzelnen Instanzen der Paare jeweils gleiche Namen tragen. Eine Registrierung über Sphären oder Schachbrettmarker ist in der Regel genauer als andere Vorgehensweisen.⁹⁴

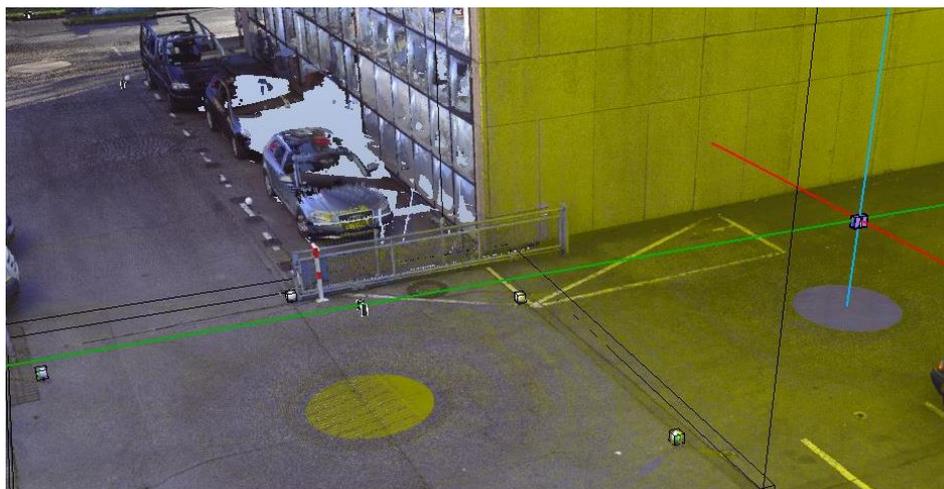


Abbildung 35: Erfolgreiche Registrierung anhand sphärischer Targets

⁹¹ Vgl. Schroeder, R., Scannen, 2014, S. 11

⁹² Vgl. Paffenholz, J.-A., Direct, 2012, S. 25

⁹³ Vgl. FARO Technologies Inc., FARO, 2015, S. 75–77

⁹⁴ Vgl. FARO Technologies Inc., FARO, 2015, S. 105

7.2.2 Top View und Cloud to Cloud (FARO Scene)

Sind für eine zielmarkenbasierte Stationierung nicht genügend Referenzobjekte vorhanden, können die Scans auch ohne Zuordnung geometrischer Paare registriert werden. Der Top View Algorithmus vergleicht dazu die horizontalen Strukturen zweier Punktwolken aus der Aufsicht. Da er Scans nur aus dieser Perspektive betrachtet, ist im Anschluss eine zweite Registrierung erforderlich.⁹⁵ Dabei handelt es sich um den sogenannte Cloud to Cloud oder Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus, der in einer Schleifenfunktion annähernd gleiche Punktpaare aus zwei Wolken erkennt, miteinander vergleicht und ihre Abstände zueinander unter Beachtung einer Fehlertoleranz oder einer vordefinierten Anzahl an Iterationen reduziert.⁹⁶

7.2.3 Bewertung

Bei einer guten Registrierung liegen gleiche Strukturen passgenau aufeinander. Eine schlechte Registrierung äußert sich in verstärktem Oberflächengeräuschen und führt im Extremfall zu doppelten Wänden. Fehlerhafte Registrierungen stören Meshing-Algorithmen und erschweren eine ordentliche Triangulation der Daten. (siehe Kapitel 7.4 Meshing).

⁹⁵ Vgl. *David Salamon*, FARO, 2016, S. 3

⁹⁶ Vgl. *Paffenholz, J.-A.*, Direct, 2012, S. 32

7.2.4 Relokalisierung

Nachdem alle Scans zueinander ausgerichtet wurden, liegt die gemeinsame Punktwolke in der Regel weitab vom Ursprung. Programme wie FARO Scene oder Maya stützen sich zudem bei der Interpretation von Daten auf unterschiedliche Koordinatenachsen und Maßeinheiten. Bei einem Import der Daten in Maya würde dies zu einer Fehlorientierung und Fehlskalierung führen.

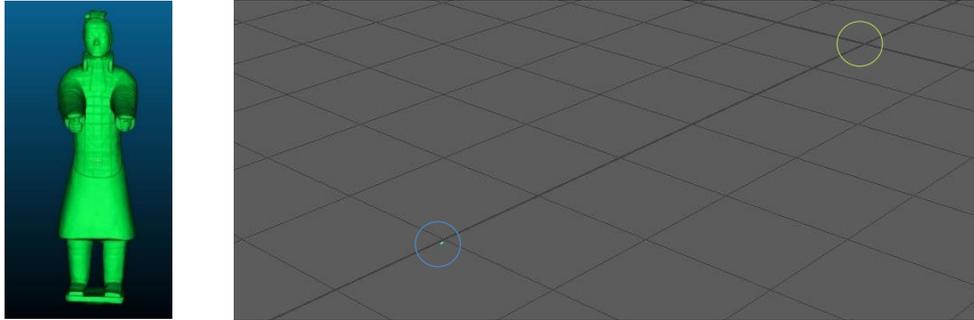


Abbildung 36: Scan Abbildung 37: Skalierung und Orientierung der Daten in Maya

Am Ende einer Registrierung sollte die Szene deshalb anhand eines Referenzobjektes global neu ausgerichtet werden. Referenzobjekt bezieht sich in diesem Fall auf einen Marker, der in einem 3D Programm erstellt wurde und dessen Ursprung mitsamt der drei Koordinatenachsen widerspiegelt.

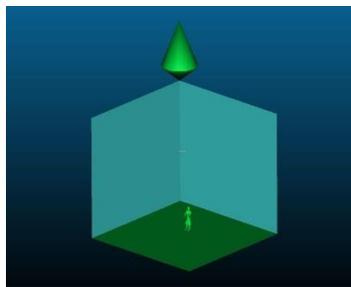


Abbildung 38: Referenzobjekt in CC

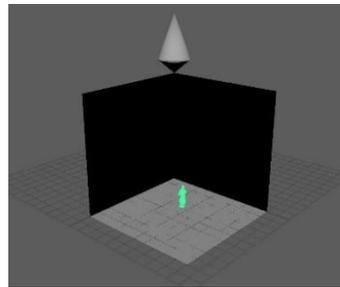


Abbildung 39: Referenzobjekt in Maya

Nach einer solchen Relokalisierung sollte an der Orientierung und Positionierung der LiDAR-Daten nichts mehr geändert werden. Zur besseren Bedienung bieten viele Tools über ihren Import- und Export-Dialog auch eine temporäre Anpassung der Daten an das softwareeigene Koordinatensystem an.

7.3 Clean Up

Sobald die Registrierung abgeschlossen ist können die Punktwolken gesäubert werden. Ziel eines solchen Clean Ups ist die Entfernung aller Scanartefakte und störender Elemente. Zudem werden die Punkte je nach Anwendungszweck auf eine arbeitsfähige Zahl reduziert. Die genaue Vorgehensweise hängt dabei stark vom Ausgangsmaterial und dem zu erzielenden Ergebnis ab.

7.3.1 Scanartefakte

Zu den Scanartefakten zählen alle Punkte, die von der erwarteten Form eines Objektes abweichen. Diese Abweichungen lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- Outliers
- Noise
- Strays

Outliers sind „Messungen, die die lokale Oberflächenbeschaffenheit nicht beachten und nicht zur Topographie des interessanten Bereichs gehören“. ⁹⁷ Sie entstehen durch und an Elementen, die den Strahlengang eines Lasers ungünstig beeinflussen und einen Messpunkt weit von seinen Nachbarn abweichen lassen. ⁹⁸ Dazu zählen stark durchlässige und reflexive Oberflächen (Glas, Autolacke) ebenso wie destruktive Umweltelemente (Tiere, Regentropfen, Personen). Positive Outliers sind Fehlmessungen, die vor der zu vermessenden Oberfläche liegen. Sie kommen zum Beispiel zustande, wenn eine Person während dem Scanvorgang durch die Szene läuft. Negative Outliers sind dementsprechend Fehlmessungen, die hinter der Oberfläche liegen. Sie entstehen in der Regel durch Mehrfachreflexionen. ⁹⁹ Outliers sind umgebungsbedingt und lassen sich geräteseitig nicht beheben.

Noise umfasst kleinere Abweichungen, die durch leichte Positionsabweichungen von Scanner oder Objekt während des Scanvorgangs zustande kommen. Die Schwankungen zwischen den einzelnen Messungen spiegeln sich dann in der Punktwolke als Rauschen wider. Bei der Kombination mehrerer Punktwolken kann ein solches Rauschen durch fehlerhafte Registrierung oder an Oberflächen entstehen, die durch Scans unterschiedlicher Qualitätsstufen repräsentiert werden (siehe Kapitel 2.4 Fehlerbudget und Messunsicherheiten).

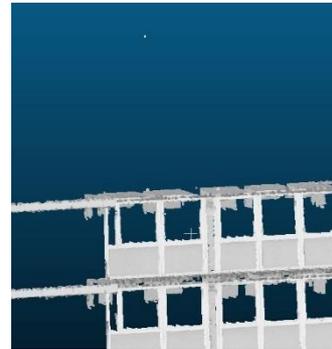


Abbildung 40:
*Einzelner Outlier
abseits der
Punktwolke*

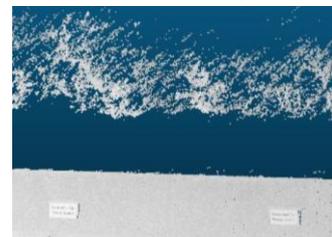


Abbildung 41:
*Rauschen organischer
Strukturen (Sträucher)
durch Windbewegung*

⁹⁷ Vgl. Matkan, A. A. u. a., Spatial, 2014, S. 187 (Übersetzung v. Verf.)

⁹⁸ Vgl. Leslar, M./Wang, J. G./Hu, B., Comparison, 2010, S. 1

⁹⁹ Vgl. Matkan, A. A. u. a., Spatial, 2014, S. 187

Als **Strays**¹⁰⁰ (Streupunkte) bzw. **Edge Effect**¹⁰¹ werden systembedingte Kantenfehler bezeichnet. Sie entstehen durch Aufspaltung des Laserstrahls an den Übergängen verschiedener Tiefenebenen. Ein Teil des Lichts trifft dann auf die hinterlegende Oberfläche und fällt in einer anderen Phasenlage zurück als der Rest. Die Algorithmen ordnen den Messpunkt daraufhin von der Originalposition abweichend zwischen Vorder- und Hintergrund ein.¹⁰²

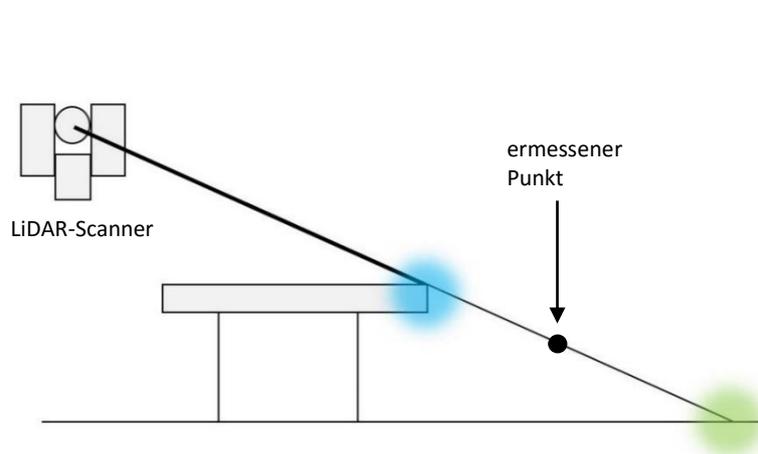


Abbildung 42: Systembedingte Kantenfehler¹⁰³

7.3.2 Filter

Zum Löschen von Punkten gibt es zwei Möglichkeiten: Die Anwendung von Filtern oder manuelles Ausschneiden. Beide Methoden lassen sich auf eine oder mehrere Punktwolken anwenden. Ein generelles Problem bei der Säuberung von Daten in Software wie CloudCompare oder FARO Scene ist, dass einmal gelöschte Messpunkte im Rahmen des Projektes endgültig gelöscht sind. Anders als bei *Nuke* oder *Maya* gibt es keine Möglichkeit, vorgenommene Änderungen innerhalb der Software zu widerrufen.

Filter reduzieren eine Menge von Elementen auf Basis ihrer Eigenschaften. Es gibt einfache globale Filter. Dazu zählt die zufällige Reduktion von Punkten bis zu einem bestimmten Grenzwert oder ihre Eingrenzung auf Basis eines Radius (maximale Entfernung zum Scanner). Mit solchen globalen Filtern lassen sich Punktwolken einheitlich und schnell reduzieren. Hilfreich ist das bei einer sehr hohen Punktdichte (Auflösung), die mehr als genug Detail bietet. Schwierig wird es bei mittleren und kleinen Auflösungen, da globale Filter vergleichsweise unkontrolliert arbeiten und Kanten schnell „wegfressen“. Details gehen verloren. Weit differenzierter arbeiten sie mit der Unterstützung lokaler Filter. Diese orientieren sich an der lokalen Lage, also dem Verhältnis eines Punktes zu seinen Nachbarn. Zu diesen lokalen Eigenschaften gehören Krümmung (Curvature), Punktdichte (Density) und Rauheit (Roughness). Je nach Programm fließen sie direkt in entsprechende Filter ein oder können separat ausgewählt und nach Bedürfnissen gewichtet werden (vgl. Abbildung 45).

¹⁰⁰ David Salamon, FARO, 2016, S. 3

¹⁰¹ FARO Technologies UK Ltd, SCENE, 2012

¹⁰² Vgl. FARO Technologies UK Ltd, SCENE, 2012

¹⁰³ In Anlehnung an FARO Technologies UK Ltd, SCENE, 2012

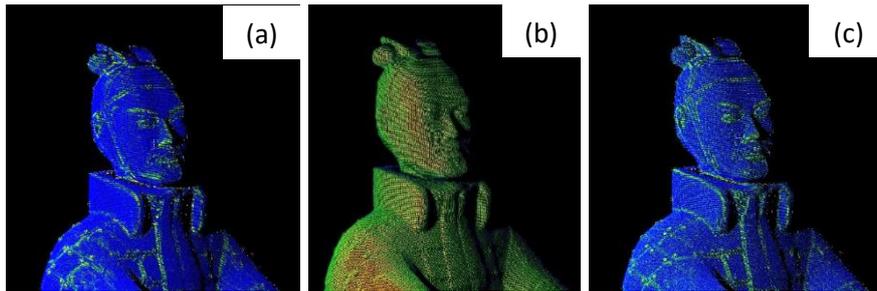


Abbildung 43: Farblich gekennzeichnete Gewichtung der Punkte -
Curvature (a), Density (b) und Roughness (c)

Im Folgenden eine Beschreibung von Filtern, die im Rahmen eines Clean Ups häufig zum Einsatz kommen:

Der **Stray-Filter** (FARO Scene) eignet sich zur Entfernung gleichnamiger Kantenartefakte. Die Software vergleicht dazu die Lage eines Scanpunktes zur Lage seiner Nachbarn innerhalb eines vordefinierten Rasters. Je nach eingestelltem Grenzwert wird er bei zu hoher Abweichung zu den umliegenden Punkten unter Beachtung einer Toleranzgrenze entfernt.¹⁰⁴

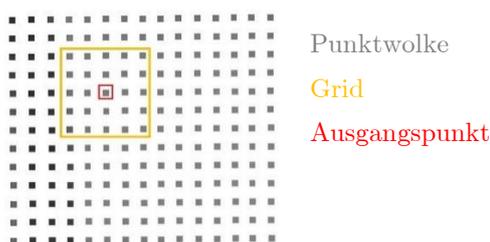


Abbildung 44: Stray-Filter-Grid¹⁰⁵

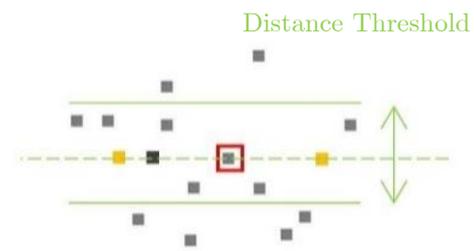


Abbildung 45: Tiefenansicht der Punktwolke¹⁰⁶

Abbildung 46 zeigt die Punktwolke aus Scannersicht. Das Raster wird entsprechend der Parametereinstellung aus dieser Perspektive über einen Ausgangspunkt und seine Nachbarn gelegt. Anschließend wird die Tiefenstaffelung der Punkte betrachtet (vgl. Abbildung 47) und anhand eines zweiten, frei wählbaren Parameters (Distance Threshold) eingegrenzt. Liegt eine bestimmte Anzahl Punkte (Allocation Threshold) innerhalb dieser Distanz, so bleibt der Ausgangspunkt erhalten. Andernfalls wird er gelöscht.¹⁰⁷

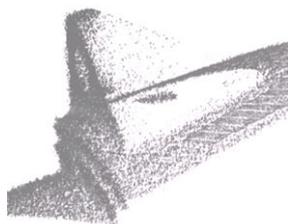


Abbildung 46: Vor Stray-Filter¹⁰⁸

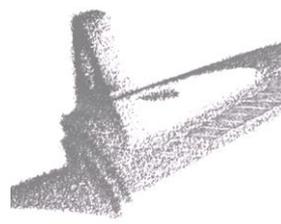


Abbildung 47: Nach Stray-Filter¹⁰⁹

¹⁰⁴ Vgl. FARO Technologies UK Ltd, SCENE, 2012

¹⁰⁵ In Anlehnung an FARO Technologies UK Ltd, SCENE, 2012

¹⁰⁶ In Anlehnung an FARO Technologies UK Ltd, SCENE, 2012

¹⁰⁷ Vgl. FARO Technologies UK Ltd, SCENE, 2012

¹⁰⁸ FARO Technologies UK Ltd, SCENE, 2012

¹⁰⁹ FARO Technologies UK Ltd, SCENE, 2012

Der **Noise Filter** (CloudCompare) nähert mehreren Punkten innerhalb eines vordefinierten Radius eine Fläche an. Punkte, die zu stark von dieser Fläche abweichen, werden unter Beachtung einer Toleranzgrenze entfernt. Damit eignet sich dieser Algorithmus sehr gut zum Bereinigen von Ebenen und weniger für die Säuberung von Kanten.¹¹⁰

Mehrfachreflexionen und Rauschverhalten lassen sich auf Basis von Helligkeitswerten filtern. Diese geben die Rückstrahlintensität an und sind damit ein direktes Indiz für die Qualität eines Messpunktes. **Dunkle Scanpunkte** sind ungenauer und besitzen ein schlechteres Rauschverhalten als helle Scanpunkte.¹¹²

Mit einem **SOR-Filter** (CloudCompare) lassen sich Outlier entfernen. Der Static Outlier Removal Algorithmus berechnet dazu die durchschnittliche Distanz eines jeden Scanpunktes zu seinen Nachbarn. Diese Werte werden auf Scanebene gemittelt. Anschließend werden alle Messungen, die weiter als die gemittelte Durchschnittsentfernung der Entfernungen aller Scanpunkte zu ihren Nachbarn entfernt liegen, aus der Punktwolke entfernt.¹¹³

Am Ende eines Clean Ups wird die Punktdichte über einen Subsample-Algorithmus je nach Anwendungszweck noch einmal reduziert und homogenisiert. Gerade bei der Erstellung von 3D Assets ist eine gleichmäßige Punktdichte wichtig, da entsprechende Meshing-Algorithmen variierende Abstände womöglich falsch interpretieren.

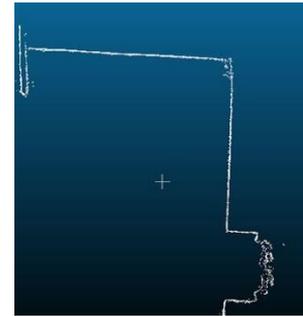


Abbildung 48:
Vor Noise Filter¹¹¹

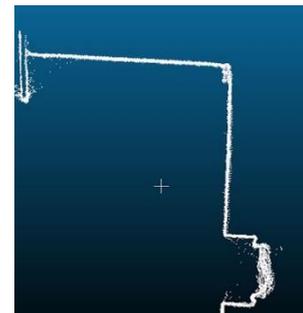


Abbildung 49:
Nach Noise Filter¹¹⁴

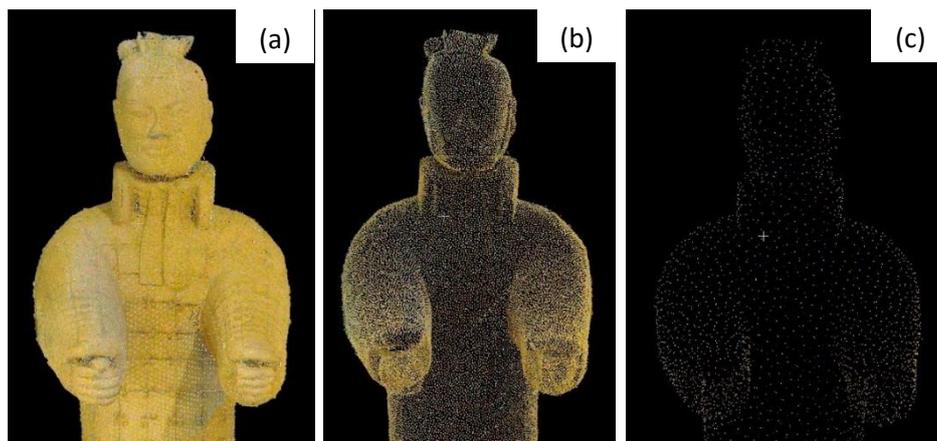


Abbildung 50: Verschiedene Subsampling-Stufen -
(a) Ausgangspunktwolke, (b) mind. 5 mm Abstand, (c) mind. 20 mm Abstand

¹¹⁰ Vgl. Girardeau-Montaut, D., CloudCompare, 2015, S. 91 f.

¹¹¹ Girardeau-Montaut, D., CloudCompare, 2015, S. 91

¹¹² Vgl. FARO Technologies Inc., FARO, 2015, S. 159

¹¹³ Vgl. PointClouds.org, Removing, o.J.

¹¹⁴ Girardeau-Montaut, D., CloudCompare, 2015, S. 91

Die erzielte Punktwolkengröße hängt dabei stark von den weiterverarbeitenden Programmen und der Leistungsfähigkeit des Rechners ab. Geben Softwarespezifikationen keinen Aufschluss, so läuft es letztlich auf ein „Trial & Error“ hinaus.

Im Test (siehe Kapitel 9 Anwendungsbeispiel Studioproduktion „Shattered“) hat sich gezeigt, dass eine Aufteilung der Daten in kleinere Punktwolken sinnvoll, bei größeren Sets sogar zwingend notwendig sein kann. So kommt das Tracking-Programm SynthEyes laut Hersteller mit einem Volumen von bis zu zehn Millionen Punkten gut zurecht,¹¹⁵ verlangsamt sich dabei aber spürbar. Ein Import einzelner Teilstücke brachte schließlich den gewünschten Geschwindigkeitsschub.

¹¹⁵ Vgl. *Andersson Technologies LLC, SynthEyesTM, 2016*

7.4 Meshing

Beim Meshing werden die Scanpunkte in ein Polygonnetz (Mesh) überführt. Als Polygon wird in der Computergrafik der Zusammenschluss mehrerer Eckpunkte (Vertices) über Kanten (Edges) zu einer gemeinsamen Fläche (Face) bezeichnet. Als Standard haben sich Triangles und Quads etabliert, die entsprechend über drei oder vier Vertices verfügen. Quads ermöglichen eine ansprechende Deformation von Oberflächen. Triangles sind häufig das Resultat automatischer Meshing-Algorithmen.

Dieses Kapitel liefert eine Beschreibung von zwei Meshing-Algorithmen und eine Definition von Punkt- und Flächennormalen als Grundvoraussetzung für ihre Arbeit.

7.4.1 Normalen

Im dreidimensionalen Raum definiert sich die Ausrichtung eines Punktes oder einer Fläche über die Normale. Sie entscheidet über Vorder- und Rückseite eines Polygons und legt damit die lichtsensible Seite fest. Wird ein Polygon von der falschen Seite beleuchtet, bleibt die Fläche schwarz. Digital erzeugte Modelle in Filmen und Computerspielen sind geschlossene Polygonnetze mit nach außen gerichteten Normalen, die so von allen Seiten auf virtuelles Licht reagieren.



Abbildung 51: Punktwolke

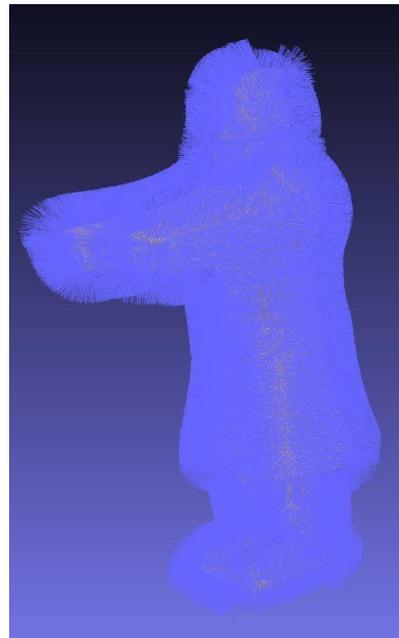


Abbildung 52: Punktnormalen

Um automatisierte Meshing-Algorithmen zu verwenden, müssen zuerst Punktnormalen erzeugt werden. Eine entsprechende Methode analysiert dazu die Lage der Messpunkte zueinander und leitet daraus die Orientierung ihrer Normalen ab. Wird nur ein einzelner Scan verarbeitet, kann die bekannte Position des LiDAR-Systems zu dieser Berechnung beitragen. Werden mehrere Scans gleichzeitig verarbeitet, so entfällt diese Möglichkeit.

7.4.2 Ball Pivoting Algorithmus

Der Ball Pivoting Algorithmus (BPA) verbindet bestehende Messpunkte direkt miteinander. Anhand eines vordefinierten Radius sucht er das Umfeld eines Ausgangspunktes nach weiteren Punkten ab und verbindet diese zu Triplets (vgl. Abbildung 55a).¹¹⁶ Da weder Vertices hinzugefügt, noch Oberflächen geglättet werden, spiegelt das zustande kommende Mesh alle Unebenheiten der Punktwolke wider. Harte Kanten und Rauschen werden beibehalten. Gleichzeitig werden Punkte, die weiter entfernt liegen als der eingestellte Radius, nicht verbunden (vgl. Abbildung 55b). Das kann zu Löchern oder fehlenden Teilstücken im Polygonnetz führen. Gleiches gilt für zu starke Krümmungen. Auch hier kann der Algorithmus manche Punkte nicht erreichen (vgl. Abbildung 55c).¹¹⁷

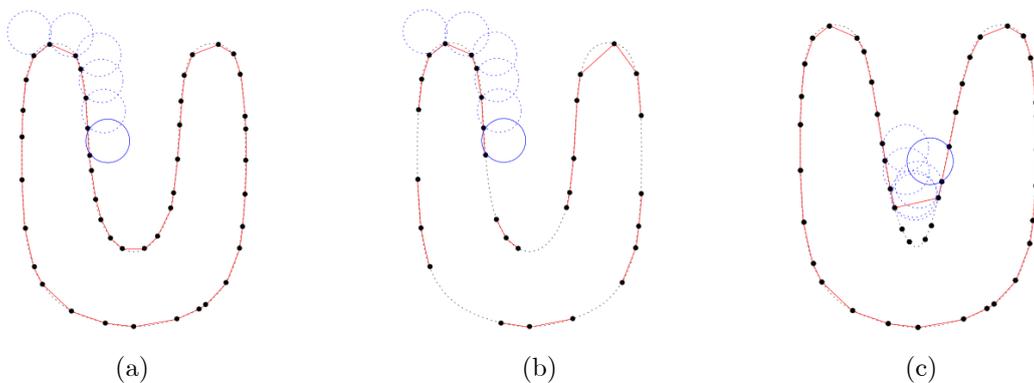


Abbildung 53: Ball Pivoting Algorithmus aus der 2D-Ansicht.¹¹⁸

Durch die Wahl verschiedener Radien oder den Einsatz zusätzlicher Algorithmen lassen sich solche Lücken schließen. Unverbundene Teilstücke sollten von vorne herein als separate Punktwolke behandelt werden. Dieser Algorithmus ist anfällig auf Veränderungen in der Punktdichte und resultiert häufig in verdrehten Flächennormalen.



Abbildung 54: Saubere Triangulation (BPA)



Abbildung 55: Fehlerhafte Triangulation (BPA)

¹¹⁶ Vgl. Bernadini, F. u. a., Ball, 1999, S. 2 f.

¹¹⁷ Vgl. Bernadini, F. u. a., Ball, 1999, S. 3

¹¹⁸ Bernadini, F. u. a., Ball, 1999, S. 3

Poisson Surface Reconstruction

Bei der Poisson Surface Reconstruction (PSR) wird ein komplett neues Polygonnetz erzeugt und einer vorhandenen Punktwolke auf Basis eines Octrees angenähert. Die Punktwolke dient dabei nur als Referenz, was je nach Parametereinstellungen zu Weichzeichnungen hartkantiger Features und Ungenauigkeiten in der nachgebildeten Oberfläche führt.¹¹⁹ Im Gegensatz zum BPA-Verfahren entsteht ein in sich geschlossenes, watertight¹²⁰ Mesh mit vielen überflüssigen und teils störenden Faces. Diese können nachträglich mit Hilfe von Selektionsfiltern entfernt werden. Lücken im Mesh führen auch hier zu teils „abenteuerlichen“ Ergebnissen (vgl. Abbildung 60).

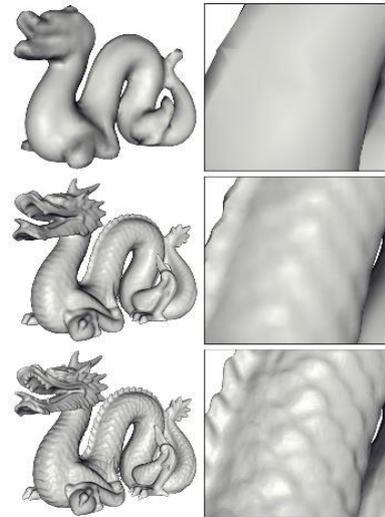


Abbildung 56: PSR mit unterschiedlichen Octree-Tiefen¹²¹



Abbildung 57: Saubere PSR



Abbildung 58: Fehlerhafte PSR

7.4.3 Retopology und Remodelling

Triangulierte LiDAR-Daten können auf zwei Weisen weiterverarbeitet werden. Retopology bezeichnet die Überarbeitung einzelner Polygonstrukturen unter Beachtung ihrer Gesamtintegrität, Remodelling hingegen den vollständigen Neuaufbau eines Meshs. Die Ausgangsgeometrie dient dann nur noch als Referenz. Im Laufe eines LiDAR Preps kommen in der Regel beide Varianten zum Einsatz. Retopology eignet sich sehr gut, um kleinere Fehler wie verdrehte Normalen oder Löcher im Mesh zu beseitigen und vorhandene Details auszuarbeiten. Mit einem Remodelling geht oft auch eine Vereinfachung der Daten einher. Komplexe Strukturen werden detailreicher, einfache Strukturen detailärmer nachgebildet.

¹¹⁹ Vgl. Kazhdan, M./Bolitho, M./Hoppe, H., Poisson, 2006, S. 6

¹²⁰ Vgl. Kazhdan, M./Bolitho, M./Hoppe, H., Poisson, 2006, S. 3

¹²¹ Kazhdan, M./Bolitho, M./Hoppe, H., Poisson, 2006, S. 6



Abbildung 59: Scandaten

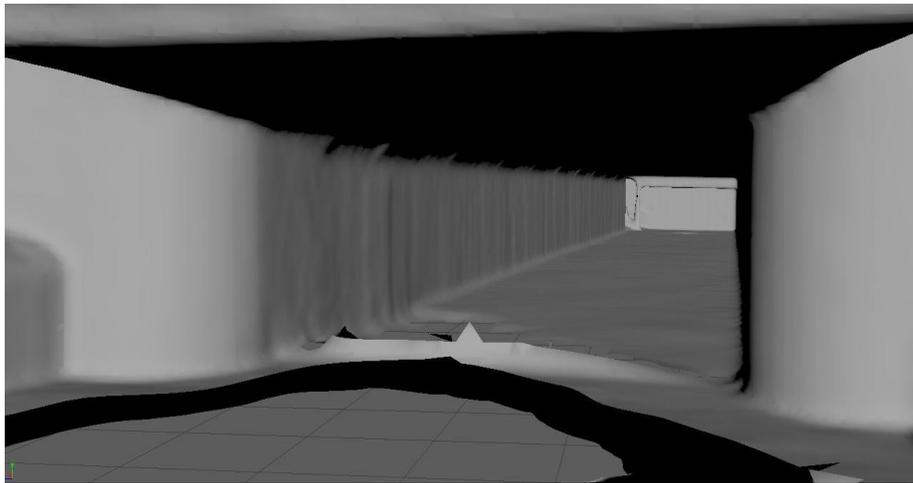


Abbildung 60: Triangulierte Scandaten

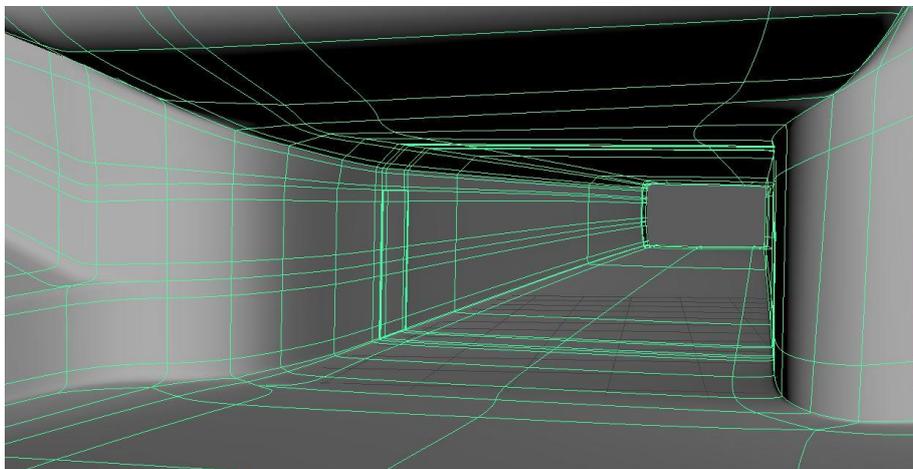


Abbildung 61: Remodellierte Scandaten

8 Anwendungsgebiete

LiDAR-Daten dienen als Referenz für die Position, Kontur und Geometrie von Objekten. Damit bieten sie Unterstützung für viele elementare Vorgänge der *Computer Generated Imagery* (CGI) und Compositing-Arbeit. Um die registrierten, gesäuberten und gemeshen Scandaten verwenden zu können, ist bei bewegten Einstellungen grundsätzlich ein guter 3D Camera Track erforderlich. Nur so gelingt eine passgenaue Zuordnung der Tiefendaten. Die folgenden Kapitel bieten eine Zusammenfassung verschiedener VFX-Prozesse und legen dar, wie LiDAR-Daten diese unterstützen können.

8.1 Matchmove

Ein guter 3D Camera Track ist bei bewegten Einstellungen meist die Vorbedingung für ein gutes Compositing. Die Aufgabe eines Matchmovers besteht dabei in der Erstellung einer virtuellen Kamera, deren Position und Ausrichtung mit der am Set verwendeten Kamera übereinstimmt. Kombiniert mit groben Geometrien ist das Resultat eine virtuelle Abbildung der Dreh-Realität, die genutzt werden kann, um Manipulationen an Bildinhalten durchzuführen und neue Objekte in die Szene zu integrieren.

8.1.1 3D Camera Track

Spezialisierte Software wie 3D Equalizer, PF Track oder SynthEyes, aber auch Compositing-Programme wie Nuke, verfügen über Algorithmen, die markante Punkte und vordefinierte Tracking Marker innerhalb einer Bildsequenz verfolgen. Anhand drehspezifischer Kameradaten (Brennweite, Sensorgröße, Kamerahöhe und -neigung) lässt sich so die Position der verfolgten Punkte in Relation zum Bildsensor bestimmen und unter Einfluss durchgeführter Distanzmessungen in einer entsprechend skalierten 3D-Szene auflösen.

Ein 3D Camera Track lässt sich damit in drei Schritte unterteilen:

1. den 2D-Track, bei dem Bildpunkte über mehrere Frames hinweg verfolgt werden
2. den *Solve*-Vorgang, bei dem die virtuelle Kamera anhand des 2D Tracks und der eingegeben Survey-Daten berechnet wird
3. die abschließende Skalierung, bei der die Szene gleichmäßig auf ein praktikables Maß vergrößert oder verkleinert wird

Der erste Schritt erfolgt ohne die Zuhilfenahme von LiDAR-Daten und muss sehr präzise durchgeführt werden, da er direkten Einfluss auf die virtuelle Kamera hat. Die verfolgten Punkte müssen statisch zueinander sein und dürfen keine Eigenbewegung besitzen.¹²² Je schlechter der 2D-Track, desto schlechter deckt sich hinterher die gewonnene Szene mit dem Ausgangsmaterial. Im zweiten Schritt lassen sich den 2D-Koordinaten der Tracker die entsprechenden 3D Koordinaten der Scans als *Constraints* zuordnen. Damit kennt der Solve-Algorithmus die reale

¹²² Vgl. Dobbert, T., Matchmoving, 2013, S. 216

Position einiger verfolgter Punkte im dreidimensionalen Raum und kann die Ausrichtung der virtuellen Kamera entsprechend verfeinern. Eine realitätsgetreue Skalierung findet dabei automatisch statt. Wird einem ungenauen, schwimmenden Tracker eine 3D Koordinate zugeteilt, so verschlechtert dies das Ergebnis häufig noch mehr als dass es hilft. Selbst äußerst komplizierte Kamerabewegungen wie Schwenks nahe dem Nodalpunkt lassen sich auf diese Weise nachvollziehen (siehe Kapitel 8.1.2 Nodaler Schwenk).

LiDAR-Daten können wahlweise direkt als Punktwolke in das Tracking-System importiert oder als einzelne Koordinaten und Distanzen in der Punktwolkenbearbeitungssoftware ausgelesen werden. Wichtig ist, dass ausreichend künstliche oder natürliche Trackingpunkte des Filmmaterials auch innerhalb der Punktwolke differenzierbar sind.

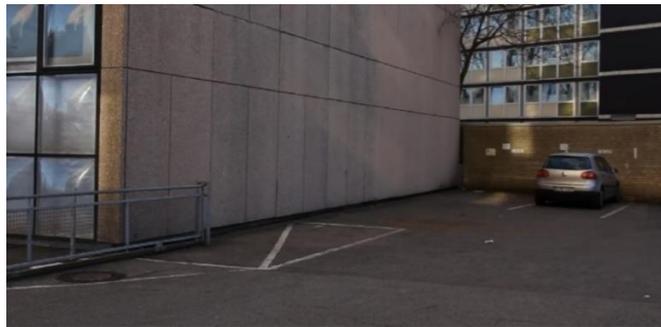


Abbildung 62: Ausgangsfootage (Main Plate)



Abbildung 63: LiDAR-Punktwolke

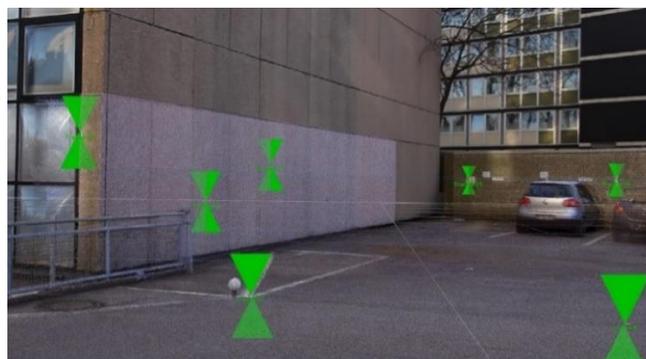


Abbildung 64: Mit 3D Koordinaten verknüpfte und gelöste Tracker (SynthEyes)

8.1.2 Nodaler Schwenk

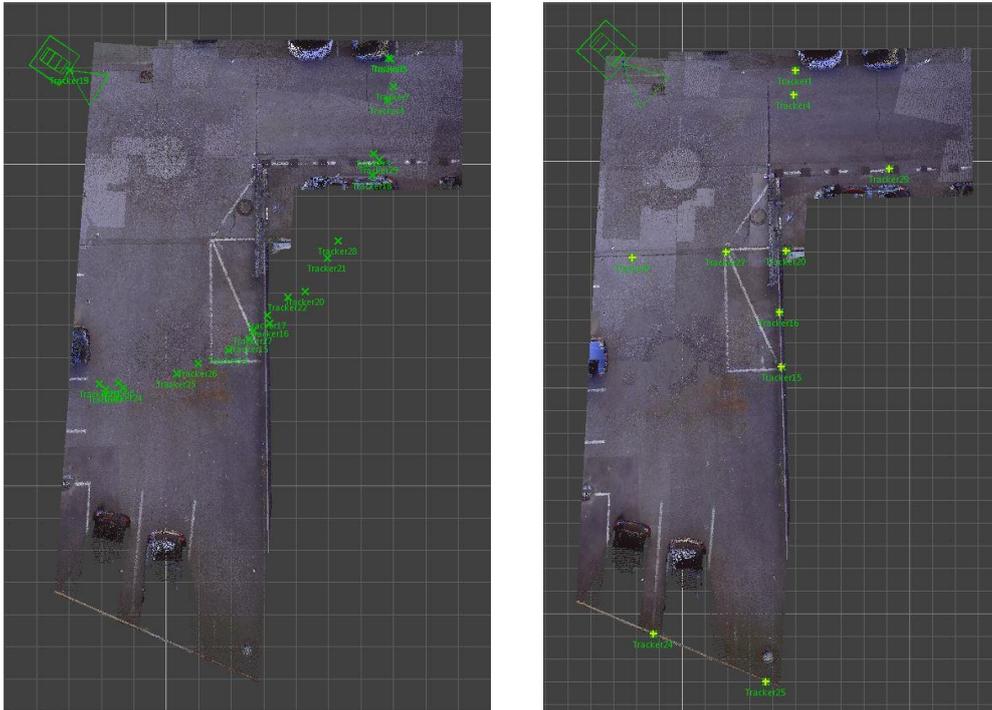


Abbildung 65: Solve eines nodalen Schwenks mit LiDAR-Daten

Bei einem nodalen Schwenk dreht sich die Kamera um ihren Nodalpunkt, also dem Punkt im Objektiv, an dem sich die eintreffenden Strahlen kreuzen und gespiegelt auf die Sensorfläche fallen. Bei solchen Schwenks fehlt die Parallaxe zwischen den Bildelementen. Reguläre Solve-Algorithmen können keine Tiefenstaffelung berechnen. Stattdessen verfügen Matchmove-Programme wie SynthEyes über spezielle Solve-Methoden, die Punkte anhand ihrer zweidimensionalen Bildabstände automatisch im Halbkreis vor der digitalen Kamera anordnen. Ein solches Punktpanorama deckt sich zwar mit den Bildinhalten, gibt jedoch nicht die Drehrealität wieder.

Unter Zuhilfenahme von LiDAR-Daten können allerdings auch solche Einstellungen zufriedenstellend in einer digitalen Szene aufgelöst werden. Hierzu werden die Trackingpunkte mit den 3D Koordinaten der LIDAR-Daten verknüpft. Die Software kennt so ihre Tiefenlage im Raum und kann ihre Entfernung zum Nodalpunkt über den regulären Solve-Algorithmus anpassen. Das Resultat ist eine präzise Positionierung zur Geometrie und eine passende Ausrichtung der digitalen Kamera. Jeder nicht 3D-referenzierte 2D Punkt liegt dabei weiterhin an undefinierter Stelle auf der entsprechenden Sichtlinie der Kamera.

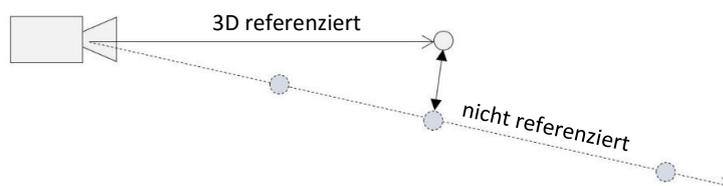


Abbildung 66: Mögliche Tiefenstaffelung getrackter Punkte bei einem nodalen Schwenk

8.1.3 Object Track

Ein Object Track bestimmt die Bewegung eines Objektes in Relation zur Kamera. Dazu werden mit den Algorithmen des 3D Camera Tracks einzelne Punkte auf der Oberfläche eines Bildelements verfolgt. Der Solve-Prozess interpretiert dann jegliche Eigenbewegung der Punkte als Kameradynamik und löst die Szene entsprechend auf. Diese Beziehung lässt sich nachträglich umkehren, sodass die Kamera fixiert bleibt während sich die Punktwolke bewegt. Bei statischen Einstellungen reicht diese Invertierung aus. Kamerafahrten bedürfen jedoch eines zusätzlichen Kameratracks, der die Bewegung der Kamera klar von der Bewegung des Objektes trennt. In sich gefestigte Dinge wie Autos sind in der Regel einfacher zu verfolgen als sich deformierende Oberflächen organischer Bildelemente. Wie beim 3D Camera Track helfen auch hier die Punktwolken statischer Strukturen dabei, Punkte innerhalb einer Einstellung zu verfolgen und den Solve-Vorgang zu verfeinern.

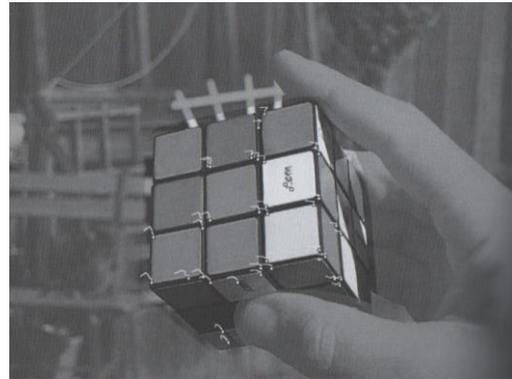


Abbildung 67: Ausgangssituation eines Object Tracks¹²³

8.1.4 Geometry Track

Der Geometry Track ist eine polygon-basierte Alternative zum regulären Object Track. Anstatt auf die Tools des 3D Camera Tracks zurückzugreifen, wird die Bewegung eines Objektes anhand seiner Geometrie nachvollzogen. Dazu muss das Element als Mesh vorliegen und in einem Frame deckungsgleich zum Bildinhalt ausgerichtet werden. Software-Algorithmen stellen aus dieser Referenzanordnung eine Beziehung von Bildinhalt zu Polygonen her und passen das Mesh über die restliche Sequenz hinweg entsprechend an.¹²⁴ Eine genauere Geometrie resultiert dabei in einer besseren Übereinstimmung, weshalb sauber triangulierte und retopologisierte LiDAR-Daten zu einer Verbesserung der Objektverfolgung beitragen können.¹²⁶

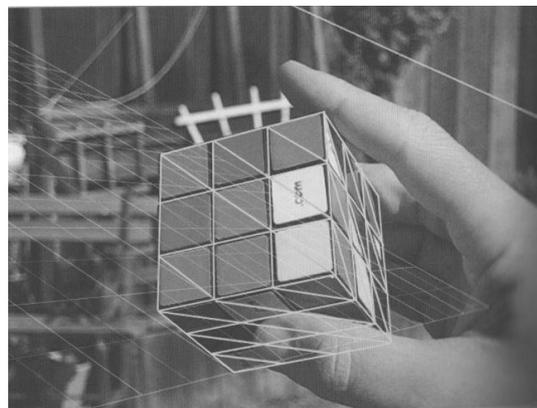


Abbildung 68: Ausgangssituation eines Geometry Tracks¹²⁵

¹²³ Dobbert, T., Matchmoving, 2013, S. 224

¹²⁴ Vgl. Dobbert, T., Matchmoving, 2013, S. 233

¹²⁵ Dobbert, T., Matchmoving, 2013, S. 236

¹²⁶ Vgl. Dobbert, T., Matchmoving, 2013, S. 237

8.1.5 Layout

An 3D Camera Track und Object Track schließt sich beim Matchmove das Layout einer Szene an. Hier werden grobe Geometrien erstellt, die sich, virtuell abgefilmt, mit den Bildinhalten des Ausgangsmaterials decken. Sie helfen 3D Artists dabei, Objekte innerhalb der Szene zu platzieren, zu animieren und auszuleuchten. Den Compositing Artists dienen sie darüber hinaus als direkte Projektionsfläche oder Referenz zur Erstellung entsprechender *Dummies*. Einmal orientierte LiDAR-Daten machen das Setzen dieser Primitive überflüssig, da eine entsprechende Geometrie bereits vorliegt.

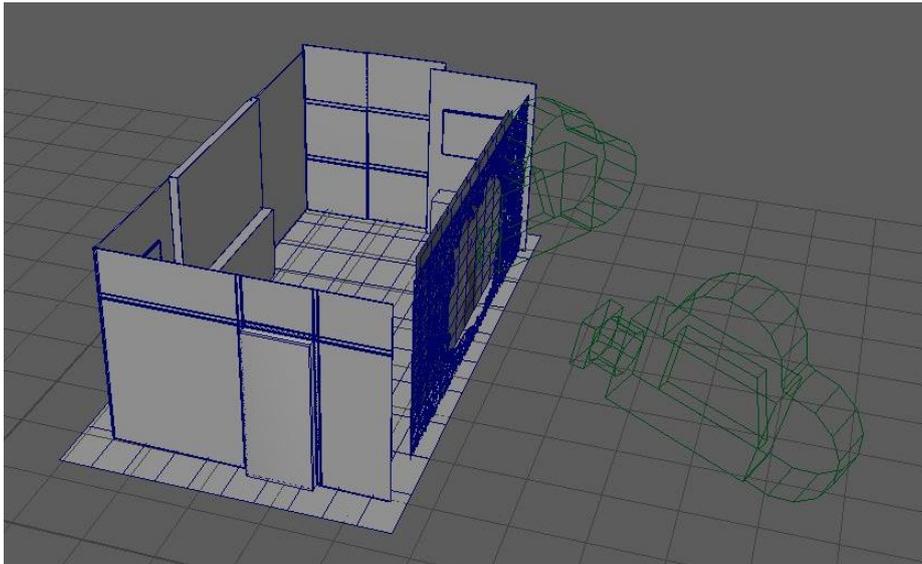


Abbildung 69: Layout von zwei 3D Camera Tracks auf Basis remodellierter LiDAR-Daten

8.2 Rotoskopie

Rotoskopie kann als digitales Ausschneiden von Bildinhalten verstanden werden und ist eine der gängigsten Compositing-Aufgaben. Sie bezeichnet die halbautomatische Erzeugung einer *Matte* (Graustufenbild) mit Hilfe mathematischer Kurven. Dabei wird eine Rotoshape über mehrere Keyframes hinweg manuell angepasst und an den Zwischenframes automatisch interpoliert. Steht die Kamera still und hält das auszuschneidende Objekt seine Form und Position, so reicht es, die Rotoshape einmal anzupassen und keine weiteren Keyframes zu setzen. Verändert sich aber eines von beiden, so muss auch die Rotoshape entsprechend animiert werden.

8.2.1 Rotoskopie unbewegter Objekte

Objekte, die innerhalb eines sauber gemeshen Scans als separate Geometrie vorliegen, können in einem 3D Programm wie Maya als schwarz-weiß Pass über die im Matchmove gewonnene virtuelle Kamera herausgerendert werden. Damit ist die Matte bereits passgenau animiert – ganz ohne aufwendige Rotoskopie. Kleinere Kantenfehler können mit einer Kombination von Filtern wie Edge Blur oder Erode korrigiert werden, bevor sie schließlich als *Maske* oder *Alpha-Kanal* zum Einsatz kommt.

8.2.2 Rotoskopie bewegter Objekte

Bei bewegten Objekten sind LiDAR-Daten nicht direkt hilfreich, da jeder Messpunkt nur eine statische Momentaufnahme ist. Laufzeitbedingte Bewegungsartefakte lassen solche Elemente stets verzerrt erscheinen. Damit fehlt es an formgetreuen Kanteninformationen und eine Rekonstruktion der ursprünglichen Umrisse ist nicht oder nur mit erheblichem Mehraufwand möglich. Eine Weiterentwicklung von Echtzeitgeräten wie den Velodyne-Scannern könnte ein Lösungsansatz sein. Bis die Technik soweit ist, können LiDAR-Geometrien das Ausschneiden bewegter Elemente zumindest über eine 3D Stabilisierung unterstützen.

8.2.3 3D Stabilisierung

Mit Hilfe von LiDAR-Daten können Bildausschnitte stabilisiert und damit eine Rotoskopie bewegter und unbewegter Elemente erleichtert werden. Hierzu wird das Ausgangsmaterial über die im Matchmove berechnete Kamera auf eine gemeshte 3D-Szene projiziert. Bei ausreichend exakter Geometrie wirft sie einzelne Bildelemente auf die immer gleichen Oberflächen und invertiert damit den Aufnahmeprozess der realen Kamera. Das Ergebnis ist eine virtuelle Szene, in der die Bildinformationen der Situation am Set entsprechend als Textur auf ihren digitalen, geometrischen Pendants haften. Nur jene Bildelemente, die durch komplexe Eigenbewegungen nicht vom Scan erfasst wurden, liegen auf einer falschen Oberfläche. Mit einer weiteren Kamera kann dieser zu rotoskopierende Teil der Szene abgefilmt und nach erfolgreicher Bearbeitung wieder auf die Geometrie zurückprojiziert werden. Mit der Originalbewegung der digitalen Setkamera kann das retuschierte Teilstück dann als zusätzlicher Layer oder schwarz-weiß Matte über das Ausgangsmaterial gelegt werden.

8.3 Retusche

Ähnlich dem Rotoskopieren sind LiDAR-Daten nur bei Retuschen an statischen Objekten hilfreich. Hierzu wird das zu bearbeitende Objekt aus dem Frame extrahiert, der es in höchstmöglicher Qualität (Auflösung und Schärfe) zeigt. Der so erhaltene *Patch* wird nach Belieben retuschiert und anschließend auf die Scangeometrie projiziert. Die Projektion erfolgt im dreidimensionalen Raum über eine, auf die Frameposition des Patches fixierte Kopie der im Matchmove gewonnenen Kamera. Dadurch liegt die Retusche an der perspektivisch richtigen Stelle im Set und kann nach erfolgreicher Bearbeitung aus Sicht der bewegten Kamera gerendert werden. Das Ergebnis ist ein gesäuberter Teilausschnitt mit einer Alpha Matte, der entsprechende Bereiche auf der Main Plate verdeckt.

Diese Methode wird u.a. dazu genutzt, um größere Elemente aus längeren Sequenzen zu entfernen und eine Clean Plate zu erstellen. Die Firma The Mill hat während ihrer Arbeit an dem Projekt „Wide-Open“ ein Tool geschrieben, das Main Plates mit Hilfe präziser 3D Camera Tracks und passender Geometrien weitgehend automatisch von störenden Bildinhalten säubert.¹²⁷

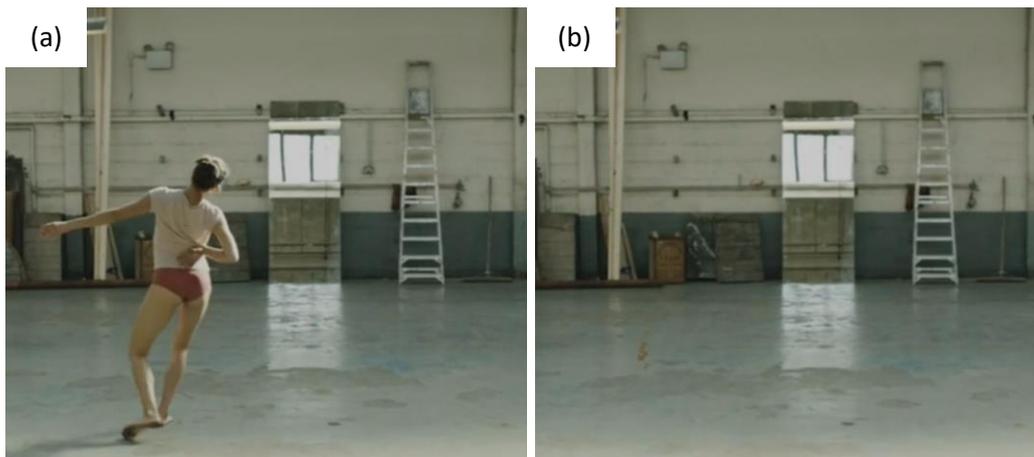


Abbildung 70: Main Plate (a) und Clean Plate (b) -
Still Frames aus dem Making Of Video zu „Wide-Open“¹²⁸

¹²⁷ Vgl. *The Mill*, Behind, 2016

¹²⁸ *The Mill*, Behind, 2016

8.4 Set Extension

Als Set Extension wird die Erweiterung einer vorhandenen Szene durch digitale Bildinhalte bezeichnet. Dabei geht es weniger um das Einfügen kleinerer 3D Assets (siehe Kapitel 8.5 3D Assets), als vielmehr um den Ausbau größerer Strukturen wie Gebäudefassaden. Grundvoraussetzung ist auch hier ein solider 3D Camera Track.

8.4.1 3D Set Extensions

3D Set Extensions wie die Erweiterung vorhandener Räume durch zusätzliche Wände können mit LiDAR-Daten sehr einfach realisiert werden. So lässt sich die gemessene Geometrie als Basis-Setup verwenden, das nach Belieben in einem 3D Programm wie Maya erweitert werden kann. Vorgenommene Änderungen räumlicher Strukturen können dann mit der virtuellen Setkamera abgefilmt und nach einem entsprechenden Texturing und Shading über das Ausgangsmaterial gelegt werden. Überlappende Teilausschnitte werden mit Rotoskopie- oder Keying-Tools korrigiert und vorhandenes Sensorrauschen mit einer entsprechenden Noise-Anpassung übernommen. Der große Vorteil in der Verwendung von LiDAR-Geometrie liegt hier in der Präzision und dem Umfang der Daten. Ohne einen solchen Scan müsste der Matchmover neben der eigentlichen Kamera zusätzliche Geometrien für die räumliche Positionierung von Objekten erstellen (siehe Kapitel 7.1.5 Layout).



Abbildung 71: Main Plate



Abbildung 72: 3D Set Extension

8.4.2 2,5D Matte Painting

Eine weitere Form von Set Extensions sind Matte Paintings, die mit einer Mischung aus 2D und 3D Layern größere Landstriche widerspiegeln und im Gegensatz zu 3D Set Extensions eher im Hintergrund stattfinden. Grob gemessene Punktwolken können je nach Situation direkt als Projektionsfläche für Texturen oder als Referenz für die Positionierung von Geometrien dienen.

8.5 3D Assets

Bei den bisherigen Anwendungsgebieten flossen die LiDAR-Daten nur indirekt als Referenz in die Gestaltung der visuellen Effekte ein. Anders bei der Erstellung von 3D Assets. Hier dienen sie als direkte Grundlage für die Erstellung von Bildinhalten. Dabei bestimmt das nachzubildende Objekt, inwiefern die triangulierten Scandaten umgehend für ein Shading, *Lighting* oder *Rendering* genutzt werden können. Hochreflektive und glatte Oberflächen wie Autolacke bedürfen eines ebenso glatten und aufgeräumten Meshs und sind daher, ohne aufwendige Retopology oder komplettes Remodelling, mit LiDAR-Daten nur schwer zu bewerkstelligen. Eine eher raue Oberfläche, die Licht diffus reflektiert, lässt sich deutlich einfacher umsetzen.



*Abbildung 73 (links) und 74 (rechts):
Triangulierte und geshadete LiDAR-Daten einer Tonfigur*

Schwierig wird es bei Detailaufnahmen verwinklelter Objekte. Hier muss beim Scanvorgang darauf geachtet werden, dass keine Scanschatten entstehen. Zu große Abstände zwischen den Scanpunkten können Software-Algorithmen überfordern und zu Löchern im resultierenden Mesh führen. Bei komplexen Objekten bedarf es daher häufig einer teilweisen oder vollständigen Rekonstruktion der Geometrie. LiDAR-Daten dienen dann, wie bei den anderen Anwendungsgebieten auch, nur noch als Referenz.

8.6 Image Based Lighting

Beim Image Based Lighting (IBL) wird eine CGI-Szene oder ein CGI-Objekt mit Hilfe von Bildern ausgeleuchtet. Auf diese Weise lassen sich photorealistische Renderergebnisse auch ohne komplexe virtuelle Lichtsetups erzielen. Am Set aufgenommene 360° HDR Panoramen enthalten dabei alle Informationen über die Lichtsituation in einem Nodalpunkt. Sie werden auf eine Kugel oder einen Würfel projiziert und einer innenliegenden Geometrie als Strahlungsquelle zugeteilt. Da die



Abbildung 75: Beleuchtung einer Spiegelkugel mit IBL aus sphärischer Projektion

Perspektive des Panoramas auf einen Punkt fixiert ist, wirken ihre Reflektionen in einem bewegten Objekt oder bei bewegter Renderkamera schnell unrealistisch. Damit eignet sich dieses Vorgehen für statische Szenarien oder weitläufige Schauplätze mit äußerst wenig Parallaxe und positionskonstanter Beleuchtung. Für alle anderen Fälle bildet es lediglich eine Grundlage.

Um dem reflektierten Panorama auch bei kleineren Bewegungen Parallaxe zu verleihen, können zusätzliche Tiefenebenen in Form von Planes eingebracht werden. Diese Variante stößt an ihre Grenzen, sobald mit der Positionsveränderung des einzuleuchtenden Objekts ein starker Perspektiv- bzw. Beleuchtungswechsel in den Reflexionen einhergehen müsste. Eine diffuse Oberfläche kaschiert in dem Fall zwar Fehler, sticht bei falschem Licht- und Schattenspiel aber ebenso heraus wie eine spiegelnde. Es bedarf also einer weit detaillierteren Reflexionsgeometrie.

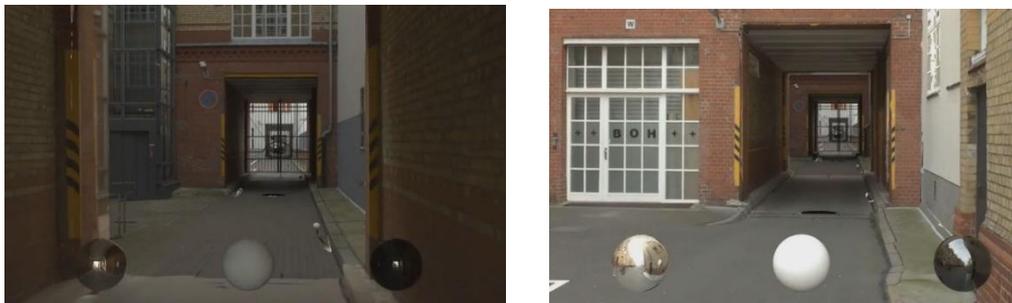


Abbildung 76 (links) und 77 (rechts): Beleuchtung von Kugeln durch Projektion von HDR Panoramen auf LiDAR-Geometrie - Still Frames aus HDR Texturing Video von Pointcloud9¹²⁹

Diese ließe sich aus den in Footage ersichtlichen Strukturen ableiten. Jedoch liegt ein Großteil der für die Reflexionen interessanten Elemente einer Szene hinter der Kamera. Hier kann man sich entweder am Panorama orientieren, bei der Datenaquise am Set aussagekräftige Fotos schießen, manuelle Vermessungen vornehmen oder aber auf die Daten des LiDAR-Scanners zurückgreifen. In Kombination mit mehreren 360° Panoramen kann der Scan eines Sets zu einer entsprechenden Beleuchtung genutzt werden. Durch die Projektion der gestitchten Bilder auf eine saubere Scangeometrie kann ein 3D Panorama erstellt werden, bei dem sich Perspektive und Parallaxe sowie Licht und Schatten in den Reflexionen eines Objektes stets stimmig verhalten.

¹²⁹ Pointcloud9, Pointcloud9, 2013

8.7 Prävisualisierung

Prävisualisierungen sind kostengünstige, visuelle Vorschauen einer Idee und Teil einer jeden Medienproduktion. Sie ermöglichen die kreative wie auch technische Planung und Erarbeitung eines Projektes und vereinfachen durch Schaffung einer gemeinsamen Vision die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Gewerken.¹³⁰ Aus der Vielzahl von Produktionsschritten und Abteilungen ergeben sich laut dem Joint Technology Committee, einem Zusammenschluss verschiedener Arbeitsgemeinschaften aus der Filmindustrie, verschiedene „Subgenres“¹³¹ der Prävisualisierung:

- Pitchvis
- Technical Previs
- On-Set Previs
- Postvis
- D-vis¹³²

Prävisualisierungen finden innerhalb dieser Bereiche in verschiedenen Formen statt. Gängige Formate sind Storyboards und CG-Sequenzen.¹³³ Das Ziel ist dabei immer eine Diskussion zwischen den verschiedenen Abteilungen, eine Aufwandseinschätzung sowie ein Nachdenken über alternative Herangehensweisen. LiDAR-Daten sind vor allem bei der Technical Previs und der Postvis hilfreich, in denen Bildgestaltung und visuelle Effekte erarbeitet werden. „Always use real-world scale“¹³⁴ lautet einer der wichtigsten Grundsätze des Joint Technology Committees. LiDAR-Daten liefern Informationen über die Skalierung ganzer Schauplätze. Damit ermöglichen sie den verschiedensten Personengruppen eine Einschätzung der Produktionsbedingungen und eine einheitliche Vorschau ihrer Arbeit:

- das Setdesign kann aus gescannten Strukturen Rückschlüsse auf die Maße benötigter Bauelemente ziehen
- der Director of Photography kann attraktive Einstellungen mit einer digitalen Kamera ermitteln
- die Regie kann unter Zuhilfenahme digitaler Stand-ins eine Szene vorab dirigieren
- Planung von VFX Shots; CG und Matte Painting Artists können die Ausmaße ihrer Arbeit besser einschätzen

Zudem lassen sich mehrere Drehorte digital vergleichen, was eine große Zeitersparnis gegenüber realen Set-Begehungen sein kann. Als Beispiel sei der Film „Captain America: Civil War“ erwähnt. RISE FX scannte den Leipziger Flughafen bereits ein Jahr vor den eigentlichen Dreharbeiten und ermöglichte damit der tausend Kilometer entfernten Crew eine detaillierte Planung ihrer Shots.¹³⁵

¹³⁰ Vgl. Okun, J. A./Zwerman, S., VES, 2010, S. 53 f.

¹³¹ Okun, J. A./Zwerman, S., VES, 2010, S. 54

¹³² Vgl. Okun, J. A./Zwerman, S., VES, 2010, S. 54 f.

¹³³ Vgl. Okun, J. A./Zwerman, S., VES, 2010, S. 57

¹³⁴ Okun, J. A./Zwerman, S., VES, 2010, S. 71

¹³⁵ Vgl. Frej, V., Captain, 2016

8.8 Stilmittel & Virtual Reality

Alle bisher genannten Anwendungsgebiete sind eher die Regel als die Ausnahme. Deshalb soll ein Blick auf zwei weitere Bereiche nicht fehlen.

Für die Fahrsicherheits-Kampagne „Transparent“ des UK Department for Transport (DFT) setzte The Mill halbdurchsichtige LiDAR-Daten als visuelles Stilmittel ein. Ein Research and Development Department entwickelte dazu einen Workflow, bei dem die Punktwolken als RGB-Bilder mit Tiefenmaps kombiniert wurden.¹³⁶ In FARO Scene ist eine solche Darstellung mit dem Clear View Modus möglich. Je nach Dichte werden die Punkte dabei heller oder transparenter angezeigt.¹³⁷ Über das FARO Video Plug-in lässt sich eine Kamerafahrt rendern und mit weiteren Layern kombinieren. Ein schwarzer Hintergrund wird beim Zusammenlegen über Merge-Operationen wie „Add“ oder „Screen“ ignoriert.

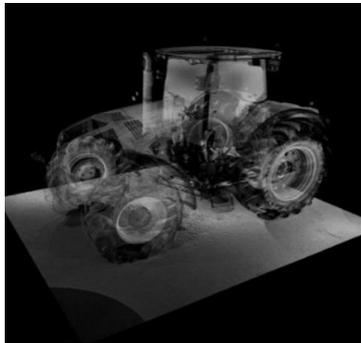


Abbildung 78: Traktor aus "Transparent"¹³⁸

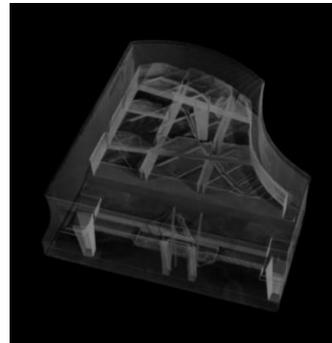


Abbildung 79: Clear View in FARO Scene

Bei den Google ATAP Spotlight Stories wurden Scans im Rahmen der Produktion „Help!“ dazu verwendet, das Bildmaterial von vier Kameras miteinander zu verknüpfen um ein nahtloses Virtual Reality (VR) Erlebnis zu erstellen. Dazu wurden die Bilder nicht zweidimensional, sondern dreidimensional mit Hilfe von LiDAR-Daten gesticht und retuschiert. Im finalen Film ist damit nicht die reale Umgebung, sondern eine projizierte digitale Version zu sehen.^{139,140}

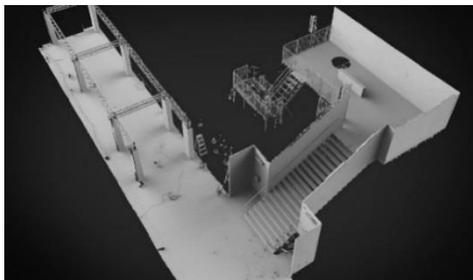


Abbildung 80: LiDAR-Punktwolke aus „Help“¹⁴¹



Abbildung 81: Geometry aus "Help"¹⁴²

¹³⁶ Vgl. Gros Desir, J., Transparent, o.J.

¹³⁷ Vgl. FARO Technologies Inc., FARO, 2015, S. 60

¹³⁸ The Mill, Using, 2014

¹³⁹ Vgl. SCANable, Behind, 2015

¹⁴⁰ Vgl. Heinen, P., Re, 2015

¹⁴¹ SCANable, 3D, o.J.

¹⁴² SCANable, Behind, 2015

9 Anwendungsbeispiel Studioproduktion „Shattered“

Die VFX Studioproduktion „Shattered“ stellte zwei Anforderungen an die LiDAR-Daten. Zum einen sollten sie dabei helfen, bewegte Shots zu tracken und in einem einheitlichen Koordinatensystem aufzulösen. Zum anderen waren sie der Notfallplan zum Rendern fehlender Reflexionen. Daraus ergaben sich die zwei Anwendungsgebiete Matchmove und Image Based Lighting. Für den Matchmove war es enorm wichtig, dass künstliche und natürliche Trackingpunkte zwischen Filmaufnahmen und Scans übereinstimmten. Da die Marker jedoch erst kurz vor einer Einstellung platziert und Wandelemente immer wieder verschoben wurden, wäre ein zeitlich isolierter LiDAR-Dreh kaum ausreichend gewesen. Gleichzeitig erforderte das Image Based Lighting eine Kombination mehrerer Scans mit möglichst wenig Scanschatten. Aus diesen Überlegungen ergab sich die folgende Planung:

- Eine Hauptpunktwolke aus drei Scans, Messung abseits der Dreharbeiten
- Zusätzliche Einzelscans für bewegte Shots, Messung während der Dreharbeiten

Doch wie sollten die Scans mehrerer Drehtage im Nachhinein registriert werden? Eine dauerhafte Platzierung von Referenzkugeln im Set war keine Option. Stattdessen wurden zweidimensionale Schachbrettmarker an den Studiowänden über der Kulisse verteilt. Diese sollten später dabei helfen, die Einzelscans zur Hauptpunktwolke auszurichten. Die Hauptpunktwolke wiederum sollte separat mit Hilfe von sphärischen Targets registriert werden.

Im Endeffekt kam es anders. FARO lieferte zwar den Scanner, aber nicht die sphärischen Targets. Und auch die Schachbrettzielmarken wurden wider Erwarten vom Lichtequipment verdeckt oder schlichtweg nicht erkannt. Glücklicherweise griffen die automatischen Registrierungsalgorithmen und machten eine Ausrichtung dennoch möglich.

Die Ausrichtung war dabei etwas komplizierter als erwartet. So wurden während den Dreharbeiten immer wieder Elemente im Set verschoben. Zudem war der Vorhang bei manchen Scans offen, bei anderen geschlossen. Diese Variablen führten dazu, dass die Scans trotz örtlicher Überlappungen leicht versetzt zueinander positioniert wurden und doppelte Wände entstanden. Hier half es, die Daten vorab in Cluster einzuteilen. Damit wurde zumindest die Hauptpunktwolke rauschfrei registriert. Ein kleiner Versatz zwischen den Einzelscans blieb bestehen, machte sich im späteren Workflow aber nicht mehr bemerkbar. Am Ende der Registrierung wurden die Punktwolken in kleine Baugruppen unterteilt und als separate .xyz-Dateien exportiert.

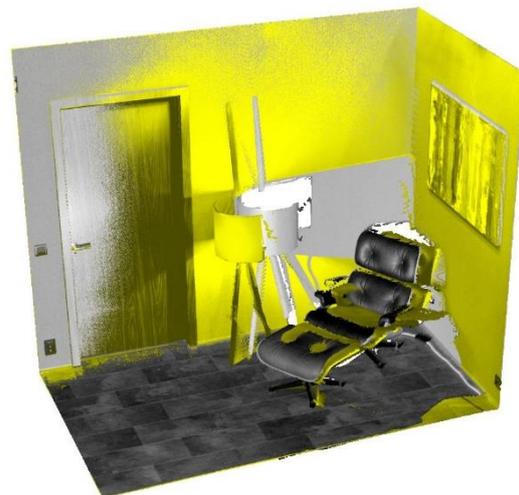


Abbildung 82:
Ordentlich registrierte Scandaten - Versatz zwischen verschobenen Objekten statt zwischen den Wänden



Abbildung 83: Unterteilung der registrierten Scandaten

Am Ende des LiDAR-Workflows sollten die Daten in drei unterschiedlichen Formaten vorliegen, als Punktwolke für den 3D Camera Track in SynthEyes, als triangulierte Meshes zur Reflexionsprojektion in Nuke sowie als grobe Geometrie, anhand derer eine Glasscheibe innerhalb Mayas platziert werden sollte. Die Ordnerstruktur für alle Resultate und Zwischenschritte wurde wie folgt angelegt:

- referenceGeo
 - geometry
 - mesh
 - pointcloud
- trackingGeo
 - pointcloud
- projectionGeo
 - mesh
 - pointcloud

Auf die Registrierung in FARO Scene folgte ein Clean Up und eine Relokalisierung der Punktwolken in CloudCompare. Da die Hauptpunktwolke später als Referenzgeometrie für alle Shots dienen sollte, wurden Elemente, die sich zwischen den Einstellungen verschoben (Bettdecke, Lampe, Kissen, Vorhang, Sessel), aus den drei Scans entfernt. Nach der Entfernung kleinerer Scanartefakte wurden diese Daten als .txt-Datei mit der Endung „_rG_cleaned“ exportiert und in Meshlab weiterverarbeitet. Die Einzelscans wurden ebenfalls gesäubert und als Punktwolken von maximal zehn Millionen Punkten für den 3D Camera Track freigegeben („_tG_cleaned“). Da die Projektionsgeometrie nur ein Notfallplan war, wurde diese vorerst vernachlässigt.



Abbildung 84: Main Plate mit constrainten und gelösten Punkten



Abbildung 85: Überlagerung der verknüpften Punkt wolke

Abbildung 86 zeigt, welche Probleme die automatische Farberfassung eines LiDAR-Scanners mit sich bringt. Die geringe Kontrolle über Belichtungswerte hat in diesem Fall zu einer Überbelichtung des Greenscreens geführt. Eine Differenzierung der Tracking Marker innerhalb der Punkt wolke ist kaum noch möglich. Um diese Features wieder sichtbar zu machen, können anstatt der Farbwerte die Rückstrahlintensitäten des Lasers in die .xyz-Dateien aufgenommen werden. Alternativ ist eine Manipulation vorhandener Farbwerte oder eine Projektion separat erfasster Bilddaten denkbar.



Abbildung 86: Über die Rückstrahlintensitäten werden Tracking Marker wieder sichtbar

Für die Referenzgeometrie wurde die gesäuberten Daten mit Hilfe des Ball Pivoting Algorithmus trianguliert. Das Resultat wies einige Löcher und verdrehte Normalen auf, sollte in Maya aber nur als Referenz für ein Remodelling dienen. Hier wurde es dann mit Hilfe von Primitiven nachgebaut und als finale Geometrie exportiert.

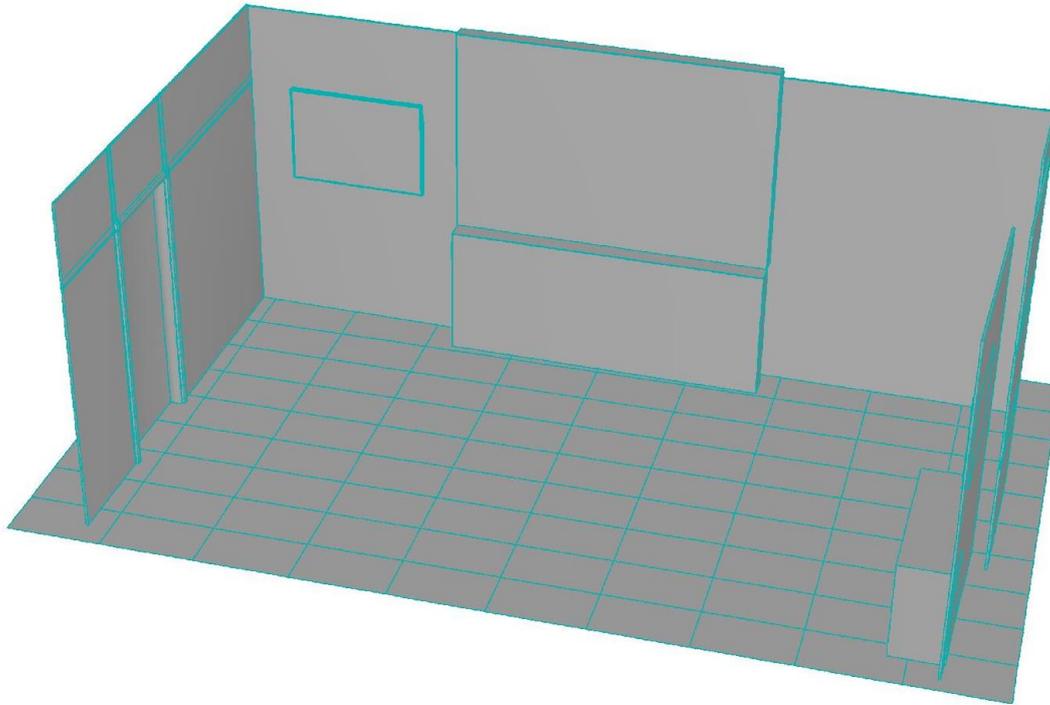


Abbildung 87: Remodelling der LiDAR-Daten

Um den einzelnen Departments einen intuitiven Umgang mit LiDAR-Daten zu ermöglichen, können diese in unterschiedlicher Skalierung ausgegeben werden. So fallen die gleichen Daten in Maya deutlich kleiner aus als in SynthEyes. Für Maya ist eine 100-fache Skalierung optimal, da so ein Meter am realen Set auch einem Meter am digitalen Set entspricht. In SynthEyes wiederum ist eine Navigation innerhalb dieser Daten schwierig. Hier ist eine 10-fache Skalierung deutlich bedienfreundlicher. Solange eine Norm eingehalten wird und die Skalierung der Daten nachvollziehbar bleibt, kann ein solches Vorgehen die Arbeit von VFX Artists erleichtern. Bei „Shattered“ haben letztlich alle Departments mit einer LiDAR-Skalierung von 100 gearbeitet.

10 Fazit

Am Beispiel „Shattered“ hat sich gezeigt, wie LiDAR-Daten die Arbeit studentischer Produktionen vereinfachen können. Anders als bei der VFX-Studioproduktion „Update“, die ein Jahr zuvor ähnliche Compositing-Aufgaben bewältigen musste, liegen alle 3D Camera Tracks von Beginn an in einem einheitlichen Koordinatensystem. Ein schlechter Track fällt bei der Überlagerung von Bilddaten und Punktwolken direkt auf und ein aufwendiges Ausrichten anhand manueller Set-Messungen ist nicht mehr nötig. Matte Painting Artists haben von Beginn an eine klare Referenz zur Erstellung ihres Layouts, Reflexionen können nachträglich gerendert und fehlende Elemente wie Wände oder Zimmerdecken jederzeit anhand der Referenzgeometrie erstellt werden.

Bei Kurzfilmprojekten mit vielen VFX-Shots an einer Location und wiederkehrenden 3D Elementen lässt sich damit viel Zeit sparen. Eine gute Planung vorausgesetzt, können die gleichen Ergebnisse aber auch ohne LiDAR-Daten erzielt werden. So lassen sich alle Compositing und CG-Aufgaben auch mit manuellen Messungen ausreichend exakt umsetzen. Zwar sind diese mit größeren Ungenauigkeiten behaftet und können je nach Anwendungsgebiet im Umfang die zeitlichen Möglichkeiten übersteigen. Jedoch ist der VFX-Bereich immer auch ein Spiel mit der visuellen Wahrnehmung des Zuschauers. Kleinere Fehler lassen sich in der Regel verbergen und sind auf der Kinoleinwand dann kaum noch wahrnehmbar.

Die Arbeit mit dem Scanner und das Handling seiner Daten setzen ein ausgiebiges Wissen in den Bereichen Materialkunde und Punktwolkenbearbeitungstools voraus.¹⁴³ Produktionsfirmen weichen deshalb gerne auf externe Auftragnehmer aus. Am Beispiel von Pointcloud9 zeigt sich, dass ein entsprechender Markt auch in Deutschland existiert und die Kosten für die Anschaffung eines Gerätes über die Gründung spezialisierter Tochterfirmen gewinnbringend investiert werden können.

LiDAR-Systeme sind aus der VFX-Industrie nicht mehr wegzudenken. Die Bedienung ist einfach, die Funktionsweise klar und die Anwendungsgebiete vielfältig.

¹⁴³ Vgl. David Salamon, FARO, 2016, S. 1

11 Ausblick

Dieses Kapitel bildet eine Zusammenfassung von Themen, die aufgrund inhaltlicher Einschränkungen verworfen oder nur oberflächlich behandelt wurden.

So beruht das Geschriebene im Wesentlichen auf den eigenen Erfahrungen im Umgang mit FAROs terrestrischem Laserscanner Focus3D X 330. Ein Vergleich mit anderen Herstellern und Modellen wurde bewusst ausgeklammert. Gerade handheld Geräte und Velodyne-Scanner hätten eine ausführliche, separate Behandlung erfordert, die den Umfang dieser Arbeit übersteigt. Gleiches gilt für Techniken wie Lichtfeld, Photogrammetrie oder Structured Light.

Auch auf Softwareebene wurden viele Aspekte nur allgemein behandelt. So profitiert das Image Based Lighting sehr stark von LiDAR-Daten. Mit einem guten Workflow ließen sich innerhalb kürzester Zeit akkurate Beleuchtungsszenarien erstellen. In Maya fällt es jedoch schwer, mehrere Bilder auf die gleiche Oberfläche zu projizieren. RISE FX hat hierzu einen Workflow entwickelt, bei dem einzelne Projektionen als Textur auf die Geometrie *gebacken* und anschließend als *UV-Maps* in Photoshop zusammengeführt werden. Mit einer 3D Painting Software wie Mari ist das einfacher. Hier können mehrere Bilder gleichzeitig projiziert und Übergänge direkt auf dem Mesh retuschiert werden. Eine tiefere Auseinandersetzung mit beiden Programmen ist nötig, um einen funktionierenden IBL Workflow zu entwickeln.

Da LiDAR-Daten eine Ansammlung von Messpartikeln sind, ist zudem eine Verwendung in Simulationssoftware wie Houdini denkbar. Hier könnten sie eine Verformung fester Strukturen einleiten, wie sie im Musikvideo „House of Cards“ von Radiohead zu sehen ist.

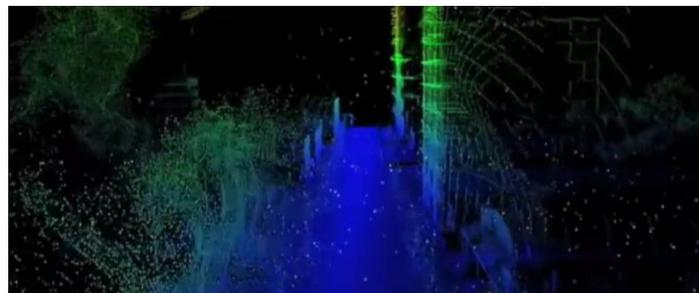


Abbildung 88: Partikelsimulation einer vom Winde verwehten Stadt -
Still Frame aus Radioheads "House of Cards"¹⁴⁴

Darüber hinaus wurde das Zusammenspiel mit VR-Aufnahmen zwar behandelt, ist aber deutlich komplexer als dargestellt. In einer eigenständigen Arbeit könnte der Frage nachgegangen werden, welche Probleme das Stitching von mehreren Filmaufnahmen mit sich bringt und wie die Entwicklung eines entsprechenden Tools aussieht. Mit Programmierkenntnissen ließen sich zudem Programme wie CloudCompare an eigene Bedürfnisse anpassen. Funktionen könnten ergänzt und bestehende Säuberungs- und Meshingprozesse über Scripte automatisiert werden. So hat Pointcloud9 bereits einen Workflow geschaffen, bei dem der Mensch häufig nur noch als Kontrollinstanz dient.¹⁴⁵

¹⁴⁴ James Frost, House, 2008

¹⁴⁵ Vgl. David Salamon, FARO, 2016, S. 3

Anhang

A Glossar

Barometrisch

Die Luftdruckmessung betreffend.¹⁴⁶

Compositing

Die manipulierte Kombination von mindestens zwei Bildern zu einem ganzheitlichen Werk.¹⁴⁷

Constrains

Erzwungene 3D Koordinaten.

Dummies

Geometrisch einfache, zumeist auf Primitiven basierende Platzhalter- und Projektionsgeometrien.

High Dynamic Range Imaging

Technik zum Erfassen des erweiterten Dynamikumfangs einer Szene durch Aufnahme und Kombination mehrerer Belichtungsreihen. Resultiert in einem einzelnen Bild, das einen höheren Dynamikumfang aufweist als mit regulären Bildaufnahmetechnologien möglich ist.¹⁴⁸

Latlong-Map

Darstellung sphärischer 360° Aufnahmen als Platkarte.

Low Dynamic Range

Einfacher Dynamikumfang, der nicht über gängige Bildaufnahmetechnologien hinausgeht.

Matchmove

Prozess bei dem die Bewegung einer Kamera aus dem Filmmaterial gewonnen und in einer digitalen Szene rekonstruiert wird.¹⁴⁹

Matte: Graustufenbildm, **Maske:** Matte zur Einschränkung von Ebeneneffekten, **Alpha-Kanal:** Matte, die beim Zusammenführen von Bildern Informationen über die Transparenz von Bildinhalten liefert.

Rolling Shutter Effect

Verzerrung bewegter Objekte durch versetzte Belichtung von Bildzeilen.

VFX Artists

Allgemeine Berufsbezeichnung für gestalterisch tätige Personen in der VFX-Industrie

Visual Effects / Visuelle Effekte

Begriff, der beinahe alles umfasst was sich nicht mit regulärer Fototechnik aufnehmen lässt. Visuelle Effekte können am Set oder mit verschiedenen optischen und digitalen Prozessen erzielt werden.¹⁵⁰

Visual Effects Supervisor

Die für die kreative und technische Seite einer VFX-Produktion verantwortliche Einzelperson.¹⁵¹

¹⁴⁶ *Bibliographisches Institut GmbH*, Duden, 2016

¹⁴⁷ *Okun, J. A./Zwerman, S.*, VES, 2010, S. 848

(eigene Übersetzung)

¹⁴⁸ *Okun, J. A./Zwerman, S.*, VES, 2010, S. 862

(eigene Übersetzung)

¹⁴⁹ *Okun, J. A./Zwerman, S.*, VES, 2010, S. 867

(eigene Übersetzung)

¹⁵⁰ *Okun, J. A./Zwerman, S.*, VES, 2010, S. 891

(eigene Übersetzung)

¹⁵¹ *Okun, J. A./Zwerman, S.*, VES, 2010, S. 891

(eigene Übersetzung)

B Abbildungsverzeichnis

1	Laufzeitverfahren	7
2	Phasendifferenzverfahren	7
3	Aufbau eines LiDAR-Sensors	9
4	Punktdichte bei unterschiedlicher Auflösung	10
5	Innenaufbau eines TLS Scanners	12
6	Rotationsprinzip	12
7	FARO Freestyle3D X	13
8	CREAFORM HandySCAN 700	13
9	Original Latlong-Map	13
10	Kugelpanorama aus überarbeiteter 2:1 Latlong-Map	13
11	ScanStation-Modelle	14
12	Focus3D Modelle	15
13	Still Frame aus "House of Cards" von Radiohead	16
14	Sphärischer Marker mit Magnetadapter	18
15	Schachbrettmarker	18
16	Targetplatzierung am Beispiel eines Set-Scans	19
17	Beispielanordnung von sphärischen Targets bei einem Objekt-Scan	20
18	Messpunktdichte einer Mauer bei unterschiedlichen Scannerpositionen	20
19	Aktiver Scanvorgang	22
20	Auflösung und Qualität	23
21	Deformation menschlicher Beine	24
22	Scankulisse mit Scanschatten einer Säule	24
23	Koordinaten und Helligkeitswerte einer .xyz-Datei	25
24	Auslastung durch FARO Scene bei einer in den Arbeitsspeicher geladenen Punktwolke	25
25	Räumliche Darstellung	27
26	Planare Darstellung als Latlong-Map mit selektiertem Bereich	27
27	Darstellung aus Scannersicht mit selektiertem Bereich	27
28	Octree Datenbaum	28
29	Subdivision-Level einer Octree-Struktur	28
30	CloudCompare GUI	29
31	FARO Scene GUI	30
32	MeshLab GUI	30
33	Registrierung zweier Punktwolken	31
34	Registrierung zweier Punktwolken	31
35	Erfolgreiche Registrierung anhand sphärischer Targets	31
36	Scan	33
37	Skalierung und Orientierung der Daten in Maya	33
38	Referenzobjekt in CC	33
39	Referenzobjekt in Maya	33
40	Einzelner Outlier abseits der Punktwolke	34

41	Rauschen organischer Strukturen (Sträucher) durch Windbewegung	34
42	Systembedingte Kantenfehler	35
43	Farblich gekennzeichnete Gewichtung der Punkte	36
44	Stray-Filter-Grid	36
45	Tiefenansicht der Punktwolke	36
46	Vor Stray-Filter	36
47	Nach Stray-Filter	36
48	Vor Noise Filter	37
49	Nach Noise Filter	37
50	Verschiedene Subsampling-Stufen	37
51	Punktwolke	39
52	Punktnormalen	39
53	Ball Pivoting Algorithmus aus der 2D-Ansicht	40
54	Saubere Triangulation (BPA)	40
55	Fehlerhafte Triangulation (BPA)	40
56	PSR mit unterschiedlichen Octree-Tiefen	41
57	Saubere PSR	41
58	Fehlerhafte PSR	41
59	Scandaten	42
60	Triangulierte Scandaten	42
61	Remodellierte Scandaten	42
62	Ausgangsfootage (Main Plate)	44
63	LiDAR-Punktwolke	44
64	Mit 3D Koordinaten verknüpfte und gelöste Tracker (SynthEyes)	44
65	Solve eines Nodalen Schwenks mit LiDAR-Daten	45
66	Mögliche Tiefenstaffelung getrackter Punkte bei einem nodalen Schwenk	45
67	Ausgangssituation eines Object Tracks	46
68	Ausgangssituation eines Geometry Tracks	46
69	Layout von zwei 3D Camera Tracks auf Basis remodellierter LiDAR-Daten	47
70	Main Plate und Clean Plate	49
71	Main Plate und Clean Plate	50
72	3D Set Extension	50
73	Triangulierte und geshadete LiDAR-Daten einer Tonfigur	51
74	Triangulierte und geshadete LiDAR-Daten einer Tonfigur	51
75	Beleuchtung einer Spiegelkugel mit IBL aus sphärischer Projektion	52
76	Beleuchtung von Kugeln durch Projektion von HDR Panoramen auf LIDAR-Geometrie	52
77	Beleuchtung von Kugeln durch Projektion von HDR Panoramen auf LIDAR-Geometrie	52
78	Traktor aus "Transparent"	54
79	Clear View in FARO Scene	54
80	LiDAR-Punktwolke aus "Help"	54
81	Geometry aus "Help"	54
82	Ordentlich registrierte Scandaten	55

83	Unterteilung der registrierten Scandaten	56
84	Main Plate mit constrainten und gelösten Punkten	57
85	Überlagerung der verknüpften Punktwolke	57
86	Über die Rückstrahlintensitäten werden Tracking Marker wieder sichtbar	57
87	Remodelling der LiDAR-Daten	58
88	Partikelsimulation einer vom Winde verwehten Stadt	60

C Tabellenverzeichnis

1	Leica TLS-Modelle	14
2	FARO TLS-Modelle	15
3	Dateiformate	26

D Literatur- und Quellenverzeichnis

- 3D Systems, Inc.* (Hrsg.) [Geomagic, o.J.]: Geomagic Wrap (o.J.),
<http://www.geomagic.com/de/products/wrap/overview> (Zugriff: 2016-05-29)
- Albertz, Jörg/Wiggenhagen, Manfred* [Taschenbuch, 2009]: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung, 5., völlig neu bearb. und erw. Aufl., Heidelberg: Wichmann, 2009
- SynthEyesTM 1605 User Manual: Lidar Meshes* [SynthEyesTM, 2016] (2016),
https://www.ssontech.com/docs/SynthEyesUM/Lidar_Meshes.html (Zugriff: 2016-05-30)
- Bauer, Helmbrecht* [Lasertechnik, 1991]: Lasertechnik, Würzburg: Vogel, 1991
- Bernadini, Fausto* u. a. [Ball, 1999]: The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction (1999), http://www.research.ibm.com/vistechnology/pdf/bpa_tvsg.pdf (Zugriff: 2016-05-27)
- Bhurtha, Roshan/Held, Christoph* [Introduction, 2007]: Introduction to terrestrial laser scanning: African Cultural Heritage and Landscapes Project, http://tsden.aluka.org/fsi/img/misc/pdf/CHWorkshop/RoshanBurtha_Laser_Scanning.pdf (Zugriff: 2016-02-22)
- Bibliographisches Institut GmbH* (Hrsg.) [Duden, 2016]: Duden: barometrisch (2016),
<http://www.duden.de/rechtschreibung/barometrisch> (Zugriff: 2016-05-30)
- Cracknell, Arthur P./Hayes, Ladson* [Introduction, 2007]: Introduction to remote sensing, 2. ed., Boca Raton, FL: CRC Press, 2007
- CREAFORM* (Hrsg.) [Tragbare, o.J.]: Tragbare 3D-Scanner: HandySCAN 3D: Genauigkeit und Tragbarkeit: Die neuen HandySCAN 3D Laserscanner (o.J.),
<http://www.creaform3d.com/de/messtechnik/tragbare-3d-scanner-handyscan-3d> (Zugriff: 2016-05-29)
- (Hrsg.) [Creaform, 2014]: Creaform bringt komplett überarbeitete tragbare HandySCAN 3D-Scanner auf den Markt (2014), <http://www.creaform3d.com/de/ueber-creaform/neuigkeiten/pressemitteilungen/creaform-bringt-komplett-ueberarbeitete-tragbare> (Zugriff: 2016-05-11)
- David Salamon* [FARO, 2016]: FARO Focus3D S 120 - vom Scan zur Geo vom 18.01.2016, Köln (Protokoll)
- Dobbert, Tim* [Matchmoving, 2013]: Matchmoving: The invisible art of camera tracking, 2. ed., Indianapolis, Ind.: Wiley, 2013
- Dobrinski, Paul/Krakau, Gunter/Vogel, Anselm* [Physik, 2010]: Physik für Ingenieure, 12., aktualisierte Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010
- FARO Europe GmbH & Co. KG* (Hrsg.) [FARO, o.J.]: FARO Scanner Freestyle3D: Der FARO Scanner Freestyle3D - der smarte handgeführte 3D-Scanner für den professionellen Einsatz (o.J.), <http://www.faro.com/de-de/produkte/3d-dokumentation/faro-freestyle-3d/uebersicht> (Zugriff: 2016-05-29)
- (Hrsg.) [Laserscanner, o.J.]: Laserscanner FARO Focus: X-Serie Laserscanner - Die perfekten Werkzeuge für 3D-Dokumentation und Landvermessung (o.J.), <http://www.faro.com/de-de/produkte/3d-vermessung/laserscanner-faro-focus-3d/ueberblick> (Zugriff: 2016-05-26)

-
- (Hrsg.) [Produktmerkmale]: Produktmerkmale des Laserscanners FARO Focus3D, <http://www.faro.com/de-de/produkte/3d-vermessung/laserscanner-faro-focus-3d/funktionen#main> (Zugriff: 2016-01-24)
- (Hrsg.) [FARO, 2014]: FARO® Laser Scanner Focus 3D: Das perfekte Werkzeug für 3D-Dokumentation und Landvermessung (2014), <http://www.faro.com/de-de/download-centre/search-results/search-item?document=a0df3fd9-fe11-60f4-9d6c-ff000085c7a7> (Zugriff: 2016-05-18)
- FARO Technologies Inc.* (Hrsg.) [FARO, 2014]: FARO® LASER SCANNER FOCUS3D X 130 Manual Februar 2014 (2014), e-mail: stefan.hug@faro-europe.com (2016-03-09)
- (Hrsg.) [FARO, 2015]: FARO SCENE: SCENE 5.5.3 Bedienanleitung November 2015 (2015), <http://www.faro.com/de-de/download-centre/search-results/search-item?document=e4979136-b818-4b18-8828-ffe5fd02facf> (Zugriff: 2016-01-26)
- (Hrsg.) [FARO, 2015]: FARO SCENE: SCENE 5.5.3 User Manual November 2015 (2015), <http://www.faro.com/en-GB/download-centre/search-results/search-item?document=9587e877-690a-4735-906a-85e4dca2c01b> (Zugriff: 2016-01-26)
- (Hrsg.) [FARO, 2015]: FARO® Releases New Handheld 3D Laser Scanner Freestyle3D X with Enhanced Accuracy (2015), <http://www.faro.com/news-events/news/2015/09/15/faro-releases-new-handheld-3d-laser-scanner-freestyle3d-x-with-enhanced-accuracy> (Zugriff: 2016-05-11)
- (Hrsg.) [FARO, 2016]: FARO Produkte - Portable Mess- und Imagingsysteme, <http://www.faro.com/de-de/download-centre/search-results/search-item?document=e79a6532-3916-4484-a91e-e3d8538105fa> (Zugriff: 2016-01-27)
- FARO Technologies UK Ltd* (Hrsg.) [SCENE, 2012]: SCENE 5.0 - Filtering - Overview (2012), <https://www.youtube.com/watch?v=fJYuTdA0pEU> (Zugriff: 2016-05-17)
- Frei, Vincent* [Captain, 2016]: Captain America - Civil War: Florian Gellinger - VFX Supervisor - Rise fx, Interview (2016), <http://www.artofvfx.com/captain-america-civil-war-florian-gellinger-vfx-supervisor-rise-fx/> (Zugriff: 2016-05-17)
- Frost, James* [House, 2008]: House of Cards (2008), <https://www.youtube.com/watch?v=8nTFjVm9sTQ> (Zugriff: 26.05.2016)
- Fujii, Takashi/Fukuchi, Tetsuo* [Laser, 2005]: Laser Remote Sensing, Boca Raton: CRC Press, 2005
- Fürst, Mirja* [Wenn, 2014]: Wenn die Lucy mit dem LIDAR ..., in: Digital Production | Magazin für digitale Medienproduktion 18 (2014), Heft 7, S. 30–36
- Girardeau-Montaut, Daniel* [CloudCompare, 2015]: CloudCompare v2.6.1 - User manual (2015), <http://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf> (Zugriff: 2015-12-12)
- Google Inc.* (Hrsg.) [Maps]: Google Maps, <https://www.google.de/maps/place/RISE+|+Visual+Effects+Studios/@50.9611185,6.9813353,569a,20y,285.19h/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x47bf2368689f2347:0x305c4a7543bc9bab!8m2!3d50.96135!4d6.98145> (Zugriff: 2016-05-29)

- Gros Desir, Justin* [Transparent, o.J.]: Transparent (o.J.), <http://justin-vfx.com/projects/dft/dft.php> (Zugriff: 2016-05-27)
- Heinen, Patrick* [Re, 2015]: Re: Bachelor-Arbeit Lidar | HdM (2015), e-mail: mail@patrickheinen.com (2015-11-02)
- Hornung, Armin* u. a. [OctoMap, 2013]: OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees, in: *Autonomous Robots* 34 (2013), Heft 3, S. 189–206
- János, Tamás* [Precision, 2008]: Precision Agriculture: Land surveying and data management (2008), http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0032_precizios_mezogazdasag/ch02s04.html (Zugriff: 2016-05-11)
- Kazhdan, Michael/Bolitho, Matthew/Hoppe, Hugues* [Poisson, 2006]: Poisson Surface Reconstruction (2006), <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/hoppe/poissonrecon.pdf> (Zugriff: 2016-05-27)
- Leica Geosystems AG* (Hrsg.) [History, o.J.]: History: A Historical Perspective (o.J.), <http://leica-geosystems.com/about-us/summary/history> (Zugriff: 2016-05-11)
- (Hrsg.) [Leica, o.J.]: Leica ScanStation: Because every detail matters (o.J.), <http://scanstation.leica-geosystems.com/en/home/> (Zugriff: 2016-05-25)
- (Hrsg.) [Products, o.J.]: Products (o.J.), <http://leica-geosystems.com/products> (Zugriff: 2016-05-11)
- Who We Are: A global company supporting measurement professionals worldwide [Who, o.J.] (o.J.), <http://leica-geosystems.com/about-us/summary/who-we-are> (Zugriff: 2016-05-11)
- Leica Geosystems AG* (Hrsg.) [Leica, 2011]: Leica ScanStation C10: The All-in-One Laser Scanner for Any Application (2011), http://leica-geosystems.com/-/media/files/products/datasheets/leica_scanstation_c10_ds_en.ashx?la=en (Zugriff: 2016-05-18)
- (Hrsg.) [Leica, 2015]: Leica ScanStation P16: Because every detail matters (2015), http://leica-geosystems.com/-/media/files/products/datasheets/leica_scanstation_p16_ds_en.ashx?la=en (Zugriff: 2016-05-18)
- (Hrsg.) [Leica, 2015]: Leica ScanStation P30/P40: Because every detail matters (2015), http://leica-geosystems.com/-/media/files/products/datasheets/leica_scanstation_p30-p40_heritage_ds_en.ashx?la=en (Zugriff: 2016-05-18)
- Leica Microsystems IR GmbH* (Hrsg.) [Four, o.J.]: Four Independent Companies Share the Leica Brand (o.J.), <http://www.leica.com/> (Zugriff: 2016-05-11)
- Leslar, M./Wang, J. G./Hu, B.* [Comparison, 2010]: A Comparison of two new Methods of Outlier Detection for Mobile Terrestrial Lidar Data (2010), http://www.isprs.org/proceedings/Xxxviii/part1/09/09_02_Paper_78.pdf (Zugriff: 2016-05-27)
- Matkan, A. A.* u. a. [Spatial, 2014]: Spatial Analysis for Outlier Removal from LiDAR Data (2014), <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-2-W3/187/2014/isprsarchives-XL-2-W3-187-2014.pdf> (Zugriff: 2016-05-27)

- Nackashi, Tim/Lopez, Andre* [Making, 2008]: The Making-of "House of Cards" video (2008),
<https://www.youtube.com/watch?v=cyQoTGdQyWY> (Zugriff: 26.05.2016)
- National Oceanic and Atmospheric Administration - National Ocean Service* (Hrsg.) [What, 2012]: What is LIDAR?: LIDAR—Light Detection and Ranging—is a remote sensing method used to examine the surface of the Earth. (2012),
<http://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html> (Zugriff: 2016-01-11)
- Okun, Jeffrey A./Zwerman, Susan* (Hrsg.) [VES, 2010]: The VES Handbook of Visual Effects: Industry Standard VFX Practices and Procedures, Oxford: Focal Press, 2010
- Ostenrieder, M./Schulz, S.-U.* [Terrestrial, o.J.]: Terrestrial Laser Scanning for Applications in Surface Mining / Terrestrisches Laserscannen für Anwendungen im Tagebau (o.J.),
<http://www.ostenrieder.de/media/file/Articles/Terrestrial%20Laser%20Scanning%20for%20Applications%20in%20Surface%20Mining%20.pdf> (Zugriff: 2016-03-28)
- Paffenholz, Jens-André* [Direct, 2012]: Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 14.06.2012
- Pointcloud9* (Hrsg.) [Pointcloud9, 2013]: Pointcloud9 LiDAR with HDR texturing (2013),
<https://vimeo.com/57673452> (Zugriff: 2016-05-30)
- PointClouds.org* (Hrsg.) [Removing, o.J.]: Removing outliers using a StatisticalOutlierRemoval filter (o.J.), http://pointclouds.org/documentation/tutorials/statistical_outlier.php (Zugriff: 2016-05-29)
- Ralla, Michael* [Re, 2015]: Re: Bachelor-Arbeit LiDAR | HdM (2015), e-mail:
michaelisbackfromhell@gmail.com (15-02-11)
- San José Alonso, J. I./Martínez Rubio, J./et al.* [COMPARING, 2011]: COMPARING TIME-OF-FLIGHT AND PHASE-SHIFT. THE SURVEY OF THE ROYAL PANTHEON IN THE BASILICA OF SAN ISIDORO (LEÓN) (2011), <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-5-W16/377/2011/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-377-2011.pdf> (Zugriff: 2016-02-22)
- SCANable* (Hrsg.) [3D, o.J.]: 3D Scanning Google ATAP Spotlight Story 'Help' (o.J.),
<http://scanable.com/portfolio-item/3d-scanning-google-atap-spotlight-story-help-by-justin-lin/> (Zugriff: 2015-05-16)
- (Hrsg.) [Behind, 2015]: Behind The Scenes - Google ATAP Spotlight Stories 'HELP' (2015),
<https://www.youtube.com/watch?v=XVx53Ur0bb0> (Zugriff: 2015-05-16)
- Schlütter, Tobias* [Satellitennavigation, 2014]: Satellitennavigation: Wie sie funktioniert und wie sie unseren Alltag beeinflusst: Springer Vieweg, 2014
- Schroeder, Rayk* [Flexible, 2013]: Flexible Beleuchtung, in: Digital Production | Magazin für digitale Medienproduktion 17 (2013), Heft 3, S. 110–113
- [Scannen, 2014]: Scannen für die Borgia - LIDAR geil, in: Digital Production | Magazin für digitale Medienproduktion 18 (2014), Heft 7, S. 10–15
- Schuhmacher, Sara/Böhm, Jan* [Georeferencing, 2005]: Georeferencing of Terrestrial Laserscanner Data for Applications in Architectural Modelling (2005),
<http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/5-w17/pdf/15.unlocked.pdf> (Zugriff: 2016-05-28)
- Stefan Hug* [AW, 2016]: AW: Bachelorarbeit LiDAR (2016), email: Stefan.Hug@faroeurope.com

- Suter, Dieter* [Physik, 2001]: Physik B2, SS01: 6.7_Laser (2001), https://e3.physik.uni-dortmund.de/~suter/Vorlesung/Physik_B2_SS_01/6.7_Laser.pdf (Zugriff: 2016-05-11)
- The Mill* (Hrsg.) [Using, 2014]: Using Lidar to Make DFT's 'Transparent' (2014), <http://www.themill.com/millchannel/220/using-lidar-to-make-dft-s-%E2%80%98transparent%E2%80%99> (Zugriff: 2016-05-16)
- (Hrsg.) [Behind, 2016]: Behind The Project: How The Mill Brought The Chemical Brothers' 'Wide Open' To Life (2016), <http://www.themill.com/millchannel/642/behind-the-project-how-the-mill-brought-the-chemical-brothers-'wide-open'-to-life> (Zugriff: 2016-05-16)
- TOMTOM* (Hrsg.) [How, o.J.]: How does GPS work? (o.J.), <http://www.tomtom.com/howdoesitwork/page.php?ID=8&CID=2&Language=1> (Zugriff: 2016-05-28)
- Velodyne LiDAR, Inc.* (Hrsg.) [Velodyne, o.J.]: Velodyne LiDAR: Product Guide (o.J.) (Zugriff: 2016-05-26)
- Wang, Miao/Tseng, Yi-Hsing* [LiDAR, o.J.]: LiDAR Data Segmentation and Classification Based on Octree Structure (o.J.), <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/286.pdf> (Zugriff: 2016-05-30)
- Weitkamp, Claus* [Lidar, 2005]: Lidar: Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere, Bd. 102, New York: Springer, 2005
- Young, James* [LiDAR, 2011]: LiDAR For Dummies (2011), https://bloglidar.files.wordpress.com/2014/11/lfd_book.pdf (Zugriff: 2015-12-12)

E Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Lars Schnell
Geburtsdatum: 17. Juni 1992

Werdegang

1998-2012 Grundschule, Abitur am Städtischen Gymnasium Herzogenrath,
Freiwilliges Soziales Jahr bei den Johannitern

Seit März 2012 Audiovisuellen Medien an der Hochschule der Medien in Stuttgart,
Vertiefung im Bereich Visuelle Effekte, Mitarbeit bei verschiedenen
Kurzfilmproduktionen

Januar 2014 - Auslandssemester an der Nanyang Technological University in
Mai 2014 Singapore, Besuch der Vorlesungen „Digital Compositing“, „Visual
Effects II“, „3D Production“, Mitarbeit bei dem Kurzfilmprojekt
„Dystopia“

Juli 2014 – Praktikum bei der Mackevision Medien Design GmbH in
Januar 2015 Hamburg in den Bereichen Compositing und VFX Editing

März 2015 – VFX Set-Supervision bei der Studioproduktion „Update“,
Mai 2016 Bachelorarbeit zum Thema „LiDAR – Funktionsweise und
Anwendungsgebiete in der VFX-Industrie“

Credits

- Stuffed Friend (Rig Removal)
- I Walk Alone (Matchmove)
- Another World (Compositing)
- Dystopia (Compositing)
- Skoda Fabia Fahrfilm (Editing, Compositing)
- Update (VFX Supervision)
- Shattered (LiDAR Supervision)

F Hinweise zur CD

- PDF-Version dieser Arbeit
- Protokoll zum LiDAR-Tutorium
- Textdatei mit weiterführenden Links
- Scandaten der Studioproduktion „Shattered“