

„Structure from Motion“ in der Praxis

3D-Visualisierung mittels Digitalfotos

Lukas Fischer

<http://www.landesarchaeologen.de>

(20.11.2015)

Vorliegende Publikation enthält eine Anleitung mit vielen nützlichen Tipps. Jedem Ausgräber ist es möglich, Fotos für Structure from Motion (SfM) zu erstellen, um archäologische Objekte mittels einer Photogrammetrie-Software dreidimensional darzustellen. Da die ersten Schritte oft schwer sind, ist es hilfreich zu wissen, welche Regeln bei der Aufnahme der Fotos eingehalten werden sollten. Dabei geht es weniger um den Umgang mit spezieller Software, vielmehr sollte die grundsätzliche Funktionsweise dieser Methode bekannt sein, um eine gute Datengrundlage zu schaffen.

Einleitung

Structure from Motion hat das Potenzial, eine archäologische Dokumentation effizienter, aussagekräftiger und anschaulicher zu machen. Mit diesem Verfahren werden Digitalfotos durch die SfM-Software automatisch nach markanten Punkten abgescannt und miteinander verknüpft. Dazu werden Bildreihen von einem Objekt mit leicht versetzten Aufnahmewinkeln benötigt. Als primäres Ergebnis erhält man dreidimensionale Punktwolken, die in weiteren Arbeitsschritten zu einem vollwertigen 3D-Modell ausgebaut werden können.

Die vorliegende Anleitung soll einen schnellen Einstieg in das Thema ermöglichen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf praktischen Hinweisen für die Erstellung der Fotoserien, die die Grundlage für die SfM-Auswertung bilden. Es ist nicht ganz leicht, allgemeingültige Aussagen zur Vorgehensweise zu treffen, da die aufzunehmenden Objekte ganz unterschiedlich beschaffen sein und die Anforderungen an die Qualität der Modelle je nach angestrebtem Nutzungszweck stark variieren können.

Bei SfM gibt es mehrere Stadien eines Modells, die voneinander unterschieden werden müssen:

- Die Punktwolke
- Die verdichtete Punktwolke
- Das Drahtmodell¹
- Die Textur²

¹ Es handelt sich hierbei um einen sehr rechenintensiven Arbeitsschritt, in dem die Punkte nach einem bestimmten Auswahlverfahren mit Linien zu Dreiecken verbunden werden. Diese Dreiecksvermaschung kann, je nach Programm, bereits als farbige oder als solide Fläche angezeigt werden.

² Die Textur funktioniert wie eine Fototapete aus einer Rasterdatei, die über das Drahtmodell gezogen wird.

Jeder dieser Arbeitsschritte rundet die originale Punktwolke anteilig, doch wird das Modell dadurch erst richtig anschaulich.

Die Arbeitsgrundlage für SfM sind Bilddaten. Es gehört ein wenig Erfahrung und theoretisches Grundlagenwissen dazu, um herauszufinden, wie die Aufnahmen beschaffen sein müssen. Dabei spielt die Qualität der Aufnahme eine geringere Rolle als der Aufnahmewinkel und die Bildanzahl. Darüber hinaus sind nur Grundkenntnisse in der Fotografie notwendig, um SfM auszuprobieren.

Die Belichtung

Der Kontrastumfang muss möglichst gering gehalten werden. Das lässt sich vor allem durch gleichmäßiges Abschatten oder Ausleuchten des Objektes umsetzen. In dunklen oder weiß scheinenden Bereichen können schließlich auch mit bloßem Auge keine markanten Punkte erkannt werden. Hier fehlt die Bildinformation, die von SfM ausgewertet werden kann. Aus diesem Grund sollte versucht werden, mit zusätzlichen Lichtquellen den Körper deutlicher herauszuarbeiten, z.B. mittels Streiflicht. Es lohnt sich auch mit HDR³ oder Belichtungsreihen zu experimentieren. Wenn ein und dasselbe Objekt in verschiedenen Bildern unterschiedlich ausgeleuchtet sein sollte, funktioniert SfM trotzdem, da sich Pixelwerte nur relativ zueinander unterscheiden müssen.

Auch wenn Bilder durch einen stärkeren Kontrast lebendiger wirken, sind die weißen und schwarzen Stellen im Bild für SfM ungünstig. In diesen Bereichen weisen die Pixel nur sehr wenige Unterschiede zueinander auf. Bilder mit weniger Kontrast wirken zwar weniger anschaulich, enthalten dafür aber mehr Pixelinformationen.

Der Weißabgleich

Der Weißabgleich spielt für die Qualität der 3D-Punktwolke keine Rolle. Soll das Objekt mit einer Fototextur angezeigt werden, werden jedoch blaustichige Fotos auch in blaustichige Oberflächen umgewandelt. Wird ein Objekt mit unterschiedlichen Lichtquellen aufgenommen, ohne den Weißabgleich anzupassen, bleibt das Ergebnis ebenso bunt. Die Geometrie selbst wird dennoch korrekt berechnet.

Die Brennweite

Es sollte eine möglichst geringe Verzeichnung angestrebt werden. Verzeichnung tritt vor allem im Weitwinkelbereich als tonnenförmige und im Telebereich als kissenförmige Verschiebung auf⁴. Es ist also vorteilhafter, eine mittlere Brennweite zu wählen. Zur Veranschaulichung sind hier zwei Aufnahmen derselben Diskette wiedergegeben (Abb. 1). Links wurde die Diskette mit einer mittleren Brennweite bei einem größeren Abstand fotografiert, rechts mit einer sehr geringen Brennweite (Weitwinkel), nur wenige Zentimeter vor dem Objekt. Hier ist die Verzeichnung sehr stark.

Diese Ungenauigkeit wird zwar bei den meisten SFM-Programmen herausgerechnet, dennoch kann ein solcher Unsicherheitsfaktor bereits im Vorfeld durch die Wahl einer mittleren Brennweite minimiert werden. In manchen Fällen, beispielsweise wenn das SfM-Programm die Aufnahmedaten der Kamera nicht auslesen kann, sind die Bilder vorher zu entzerren.

³ HDR (High Dynamic Range Image) ist ein Hochkontrastbild, das aus einer Belichtungsreihe definiert wird.

⁴ ISO 9039:2008: Optik und Photonik - Qualitätsbewertung optischer Systeme - Bestimmung der Verzeichnung.

Nahaufnahmen haben den weiteren Nachteil, dass die Tiefenschärfe eines Bildes sehr gering sein kann. Im Makrobereich liegen oft nur wenige Millimeter in der Tiefe eines Objektes im Schärfbereich. Unschärfe bedeutet, dass Pixelanordnungen von der SfM-Software schlechter oder gar nicht zu finden sind.



Abb. 1 Diskette, aufgenommen mit mittlerer (links) und kurzer Brennweite (rechts) (L. Fischer).

Objekt-/Bildgröße und Aufnahmeanzahl

Welches Bildmaterial ist notwendig, um ein bestimmtes Objekt ausreichend genau abzubilden? Diese Frage lässt sich nicht mit einer einfachen Faustregel beantworten. Soll das 3D-Modell später zum Beispiel stark vergrößert werden, ist eine entsprechend höhere Auflösung wichtig und für eine repräsentative Darstellung eine „schöne“ Textur mit gut ausgeleuchteten Farben.

Die Textur des Modells, welche aus den ursprünglichen Aufnahmen übernommen wird, wird wie eine Haut über das Drahtmodell gespannt. An diesem Punkt kommt es sehr auf die Auflösung der Aufnahmen an bzw. auf die Leistungsfähigkeit der Kamera und insbesondere auf die Chipgröße des Aufnahmesensors.

Falls die Bilddatei bereits einen detailreichen Zoom ermöglicht, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass an das fertige 3D-Modell auch herangezoomt werden kann, ohne dass es schlecht aufgelöst erscheint. Dennoch funktioniert SfM sogar mit Fotos, die mit einer einfachen Handkamera aufgenommen worden sind. Wenn die Auflösung der Kamera an ihre Grenzen stößt, kann das Objekt auch in mehreren Abschnitten fotografiert werden (Abb. 2). Das erhöht die Bildanzahl enorm, ist aber vor allem bei großen Objekten kaum zu vermeiden.

Welche Genauigkeit ist erforderlich? Grundsätzlich steigt die Präzision mit der Bildanzahl. Es ist dabei jedoch zwischen der Punktwolke- und dem Netz-Modell zu unterscheiden. Die Punktwolke ist in Relation zum ursprünglichen Foto sehr genau. Die einzelnen Punkte stehen in einem vermessenen Verhältnis zueinander. Wird das Verfahren richtig angewendet, sind selbst bei meterhohen Objekten die einzelnen Punkte millimetergenau lokalisiert. So genau, wie es die Pixelgrößen des Fotos hergeben können.

Steht eine gute Hardwareausrüstung zur Verfügung, dann ist ein Pixelbündel immer das Maximum an Genauigkeit, das ein SfM-Programm zu erreichen vermag. Bei Bedarf können so alle Punkte zu einem Drahtmodell vernetzt werden.



Abb. 2 Rheine (Lkr. Steinfurt). Objektaufnahme mit einem oder mit mehreren Fotos (L. Fischer, LWL).

In der Praxis der archäologischen Denkmalpflege ist diese Genauigkeit meist gar nicht erforderlich. Die Genauigkeit ist also immer nur ein relativer Wert, der von vielen Variablen abhängig ist. Sie lässt sich durch die Auflösung, die Bildanzahl und vor allem die jeweilige SfM-Software steuern. Von Tele- bis zu Makroaufnahmen hängt die Genauigkeit von den individuellen Voraussetzungen ab. Im Gegensatz dazu steht beispielsweise der Laserscanner, der eine große Anzahl Punkte gezielt vermisst.

Der Aufnahmewinkel

Der Aufnahmewinkel bzw. der Kamerastandpunkt muss rund um das aufzunehmende Objekt stetig variieren, allerdings nur allmählich! Oft wird eine 60-80% ige Bildüberlappung in 20°-Schritten vorgeschlagen, in der die Kameraneigung verändert werden sollte⁵. Das sind jedoch nur Annäherungswerte, die je nach Objekt auch nicht ausreichend sein könnten. Wird versucht, diese Werte einzuhalten, um die Anzahl von Fotos zu reduzieren, so weisen z.B. stark verwinkelte Objekte oft Lücken auf.

Je nach Software ist das Ergebnis mit den gleichen Bildern aber sehr unterschiedlich. Beim Errechnen des Modells werden in den meisten Programmen die Standorte der Kamera angezeigt. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Kamerapositionen eine dichte Strecke bilden. Grundsätzlich muss die Position der Kamera bei jedem Bild eine andere sein. Auf einer Stelle stehen bleiben und in verschiedene Richtungen zu fotografieren, funktioniert nicht.

⁵ Image Capture Tips: Equipments and Shooting Scenarios, Agisoft LLC, <www.agisoft.ru>

Geometrische Formen aufnehmen

Auf archäologischen Ausgrabungen müssen viele Flächen dokumentiert werden, die eine stark strukturierte Textur aufweisen (z.B. Profile oder Maueransichten). Das sind gute Voraussetzungen für SfM. Um diese aufzunehmen, sollten einige Grundregeln befolgt werden:

Gerade Flächen können mitunter schon durch das Berechnen von zwei Aufnahmen dreidimensional dargestellt werden. Je nach Oberflächenbeschaffenheit der Objekte kann es jedoch passieren, dass durch ähnliche Pixelstrukturen auf homogenen Flächen eine zu geringe Punktdichte aufgenommen wird oder schlimmer, durch das Programm eine fehlerhafte Triangulation berechnet wird. Um diese Messfehler zu vermeiden ist es wichtig, eine Fläche mit zusätzlichen Schrägaufnahmen aufzunehmen (Abb. 3). Hierdurch entsteht eine flachwinklige Messkorrektur der Punktwolke.

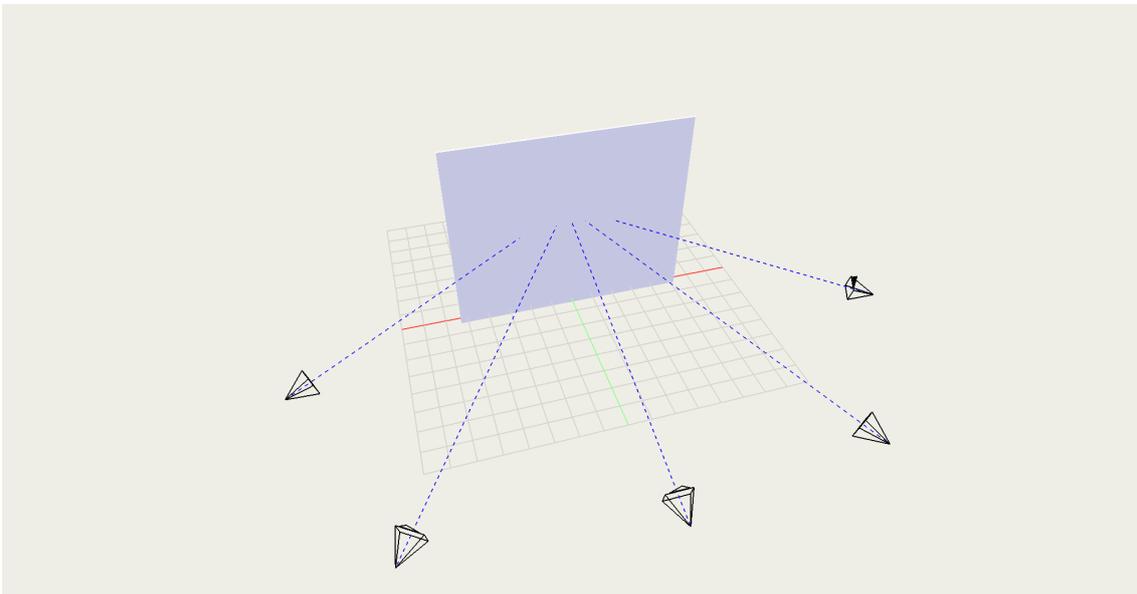


Abb. 3 Aufnahme einer ebenen Fläche mit fünf Bildern (L. Fischer).

Besteht die Fläche aus einer hügeligen Oberfläche, z.B. aus einem Geländere relief, sollten zunächst einige möglichst orthogonale Bilder aufgenommen und diese durch kreisförmige, schräg einfallende Bildreihen ergänzt werden (Abb. 4).

Neben Flächen sind es oft winklige Formen wie Mauerzüge, abknickende Profilstege, Kellerinnenwände oder ähnliches, die es aufzunehmen gilt. Wichtig bei der Aufnahme solcher Objekte ist, dass die hier vorhandenen Winkel (meist 90°) nur allmählich, schrittweise mit mehreren aufeinander folgenden Fotos dokumentiert werden (Abb. 5, 6). Für die Dokumentation eines einzelnen 90° -Winkels könnten bereits fünf bis sieben Bilder ausreichen.

Die Reihenaufnahme einer Rauminnenkante ist etwas problematischer, vor allem, wenn man nicht mehr den Kamerastandpunkt, sondern nur noch die Aufnahmerichtung verändert. Das Problem solcher Aufnahmereihen liegt in der fehlenden Epipolargeometrie⁶. Die Epipolarebene kann nur durch leicht zueinander geneigte Aufnahmewinkel berechnet werden⁷.

⁶ Epipolargeometrie ist die Geometrie zwischen zwei Bildebenen und einem gemeinsam aufgenommenen Objekt.

⁷ O. Scheer, Stereoanalyse und Bildsynthese (Berlin, 2005).

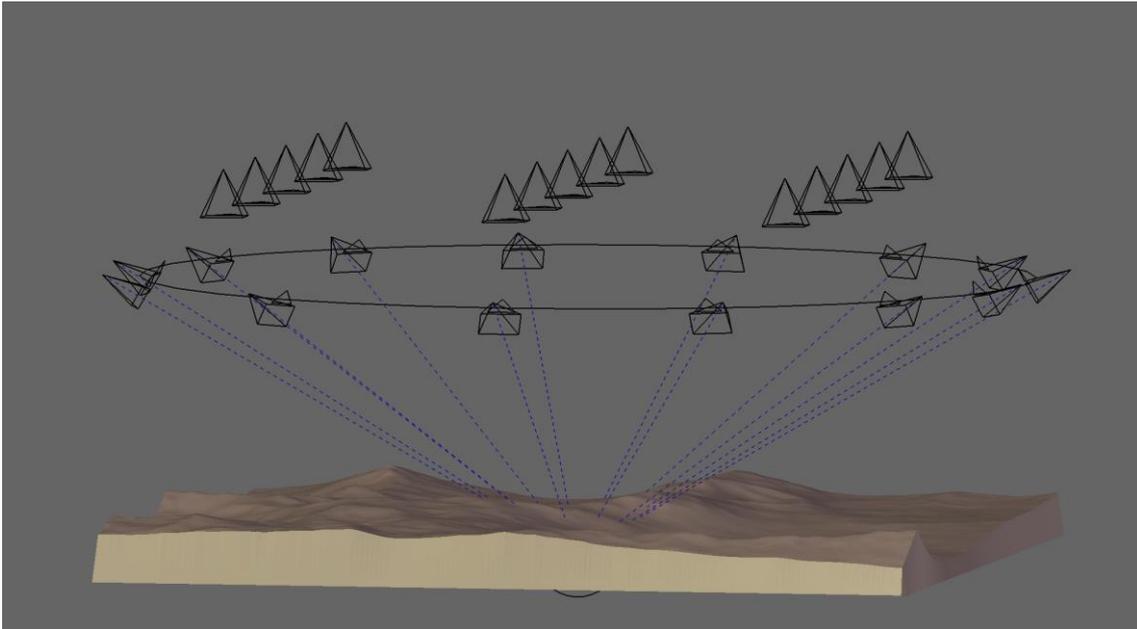


Abb. 4 Aufnahme einer reliefartigen Oberfläche (L. Fischer).

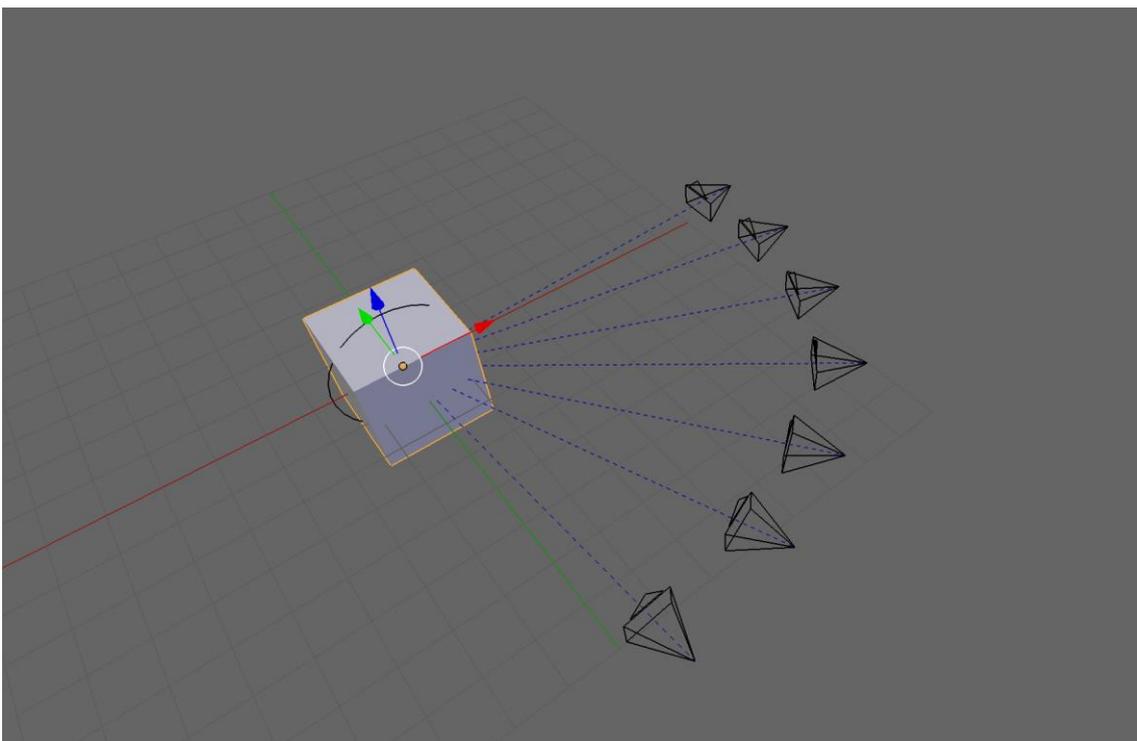


Abb. 5 Aufnahme einer Objektecke mit sieben Bildern (L. Fischer).

Bei der Aufnahme verwinklelter Objekte in gleichmäßigen Strecken kommt eine erhebliche Anzahl von Bildern zusammen. Meist muss bei einem Umschreiten eines Objekts, etwa bei der Aufnahme eines verwinkelten Mauerzuges, nach jedem oder jedem zweiten Schritt eine Aufnahme gemacht werden (Abb. 7).

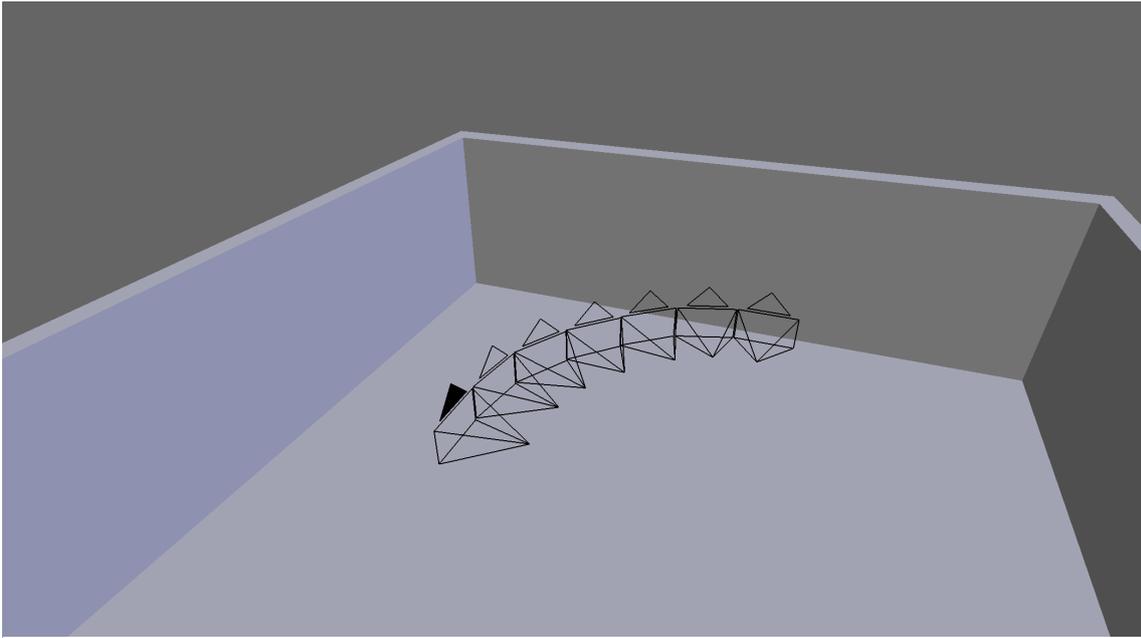


Abb. 6 Aufnahme einer Innenraumecke mit sieben Bildern (L. Fischer).

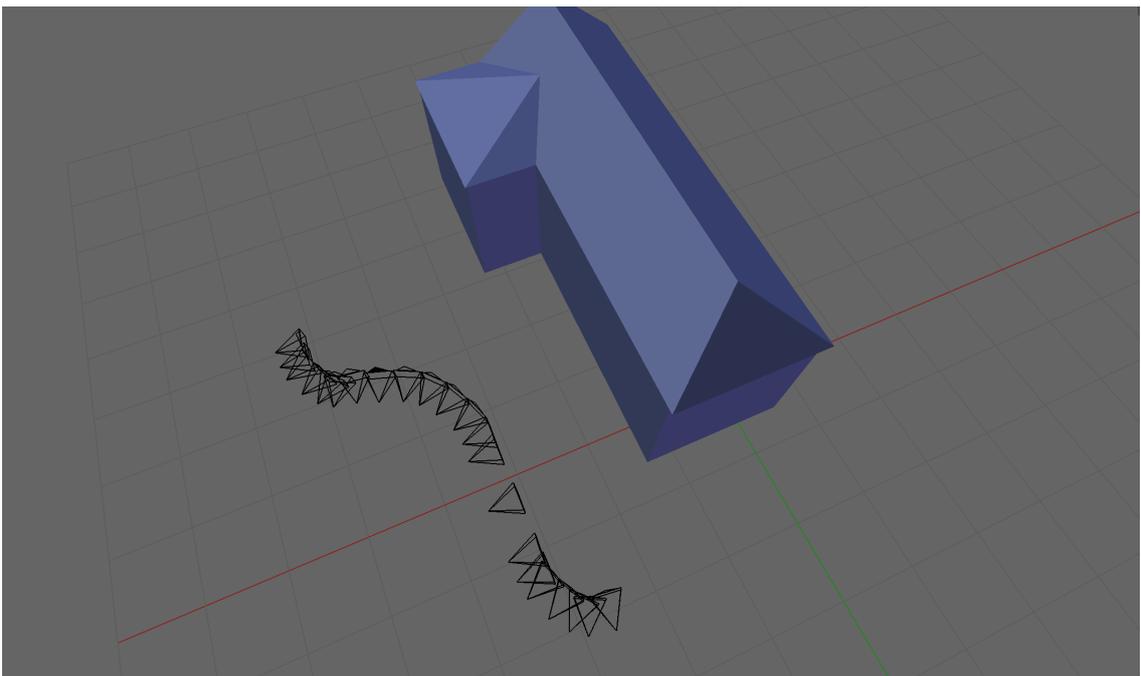


Abb. 7 Bildstrecke zur Aufnahme einer verwinkelten Gebäudeansicht (L. Fischer).

Je weniger räumliche Tiefe ein Objekt aufweist (z. B. ein dünnes Holzbrett oder – noch ungünstiger – ein dünnes Blech), desto schwieriger gelingt die Aufnahme. Der Grund dafür ist, dass an einer schmalen Seite weniger Punkte miteinander vernetzt werden können.

Auch kommt es beim Fotografieren von Gegenständen (z.B. Keramik), die vor einem gleichbleibenden Hintergrund gedreht werden, häufig zu Fehlern. Das liegt daran, dass der Hintergrund (auch der Schlagschatten) komplett in die Berechnung mit einbezogen wird. Die einzige Möglichkeit ein solches Projekt umzusetzen ist, vor einem homogenen, einfarbigen und schattenlosen Hintergrund zu fotografieren oder das Objekt auf den Fotos in der Nachbearbeitung freizustellen.

Dennoch sind markante Stellen im Hintergrund als Referenz zum Hauptobjekt vorteilhaft, sie können im Nachhinein leicht aus der Punktwolke entfernt werden. Soll auch die Unterseite eines Objekts aufgenommen werden, sollte mit Nylonschnüren eine Aufhängung für das Objekt eingerichtet werden. Ohne Sonnenlicht ist das Licht für viele Materialoberflächen (z.B. reduzierend gebrannte Keramik oder dunkle Bronzeobjekte) häufig zu schwach. Das Objekt sollte daher heller ausgeleuchtet werden, als es für ein Publikationsfoto erforderlich wäre.

Oftmals sind die Oberseiten sehr großer Objekte, wie z.B. Mauerkronen oder Dächer zum Fotografieren schlecht zu erreichen. Zwar wäre es hier am besten von oben, in einem fließenden 180°-Bogen zu fotografieren, doch wird diese Technik nur in den seltensten Fällen anwendbar sein (Abb. 8).

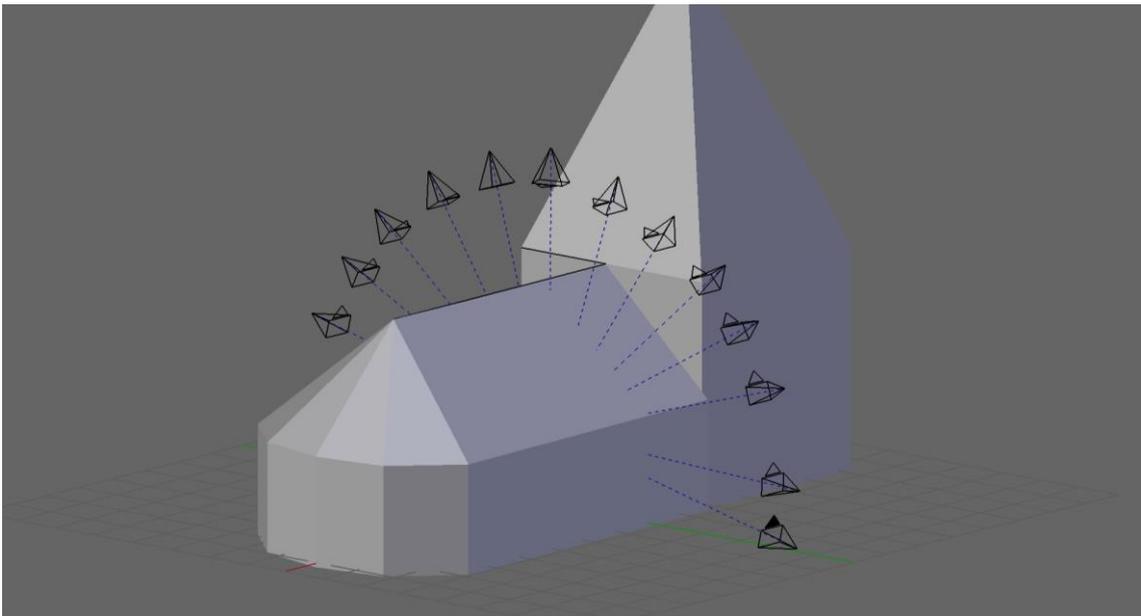


Abb. 8 Aufnahme eines Kirchendachs von oben als optimale Grundlage für SfM (L. Fischer).

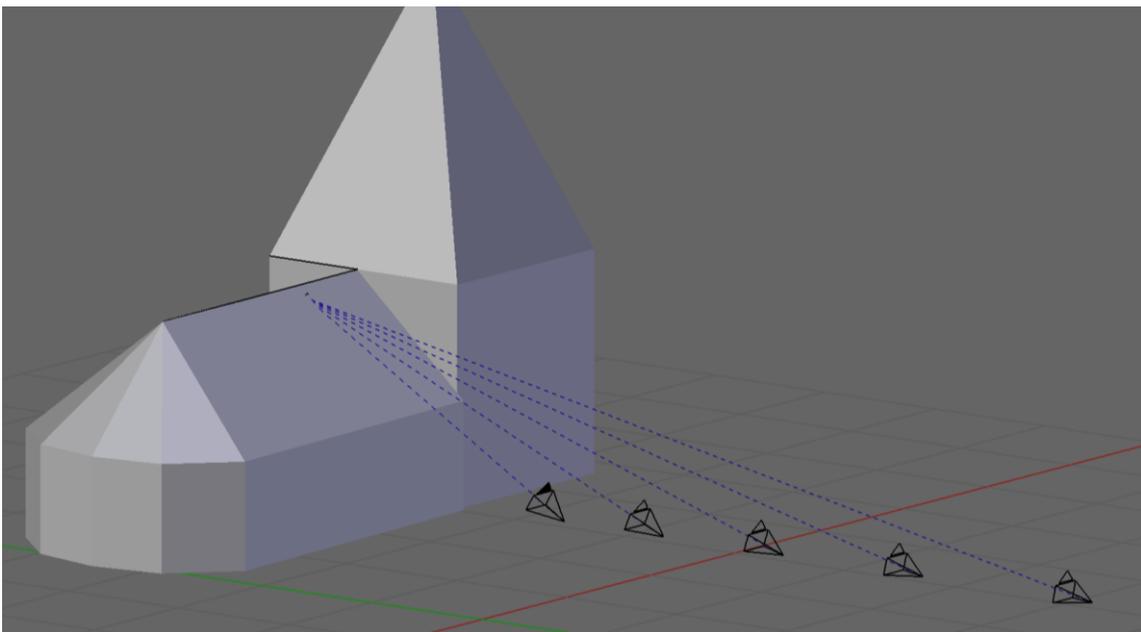


Abb. 9 Aufnahme eines Kirchendachs aus großer Entfernung als alternative Methode (L. Fischer).

Für die Aufnahme solcher Objekte kann jedoch eine Annäherung erreicht werden. In diesem Fall sollte versucht werden, das Dach in einem möglichst flachen Winkel zur Dachkante zu fotografieren, indem in einer Fotostrecke der Abstand zum Objekt allmählich deutlich vergrößert wird (Abb. 9). Hierbei ist es grundsätzlich vorteilhaft, die Aufnahmeposition zu erhöhen.

Bei Einhaltung der oben beschriebenen Vorgehensweisen kann für jedes Objekt eine individuelle Aufnahmestrategie entwickelt werden.

Ein gutes Beispiel dafür ist die Aufnahme eines Großsteingrabs bei Lengerich-Wechte (Abb. 10). Damit jeder Stein der Grabanlage in einer ausreichenden Auflösung von allen Seiten deutlich sichtbar wird, sind hier drei Steingruppen in großen, kreisförmigen Fotostrecken aufgenommen worden. Anschließend wurden zur Verbesserung der Darstellungsschärfe entlang der Steininnenseiten zwei zusätzliche Fotostrecken aufgenommen. Es ist wichtig, dass solche im Detail aufgenommenen Teilbereiche mit Fotostrecken verbunden werden.

In den angeführten Beispielen (Abb. 3-10) ist die Kameraanordnung nur idealisiert dargestellt. In der praktischen Durchführung werden die Objekte mit der Kamera jedoch nicht so genau zentriert und auch der eigene Standpunkt variiert im Gelände stärker, was für SfM sogar vorteilhafter ist. Je mehr der Standpunkt des Fotografen variiert, desto mehr Punkte kann das Programm finden und miteinander verknüpfen.

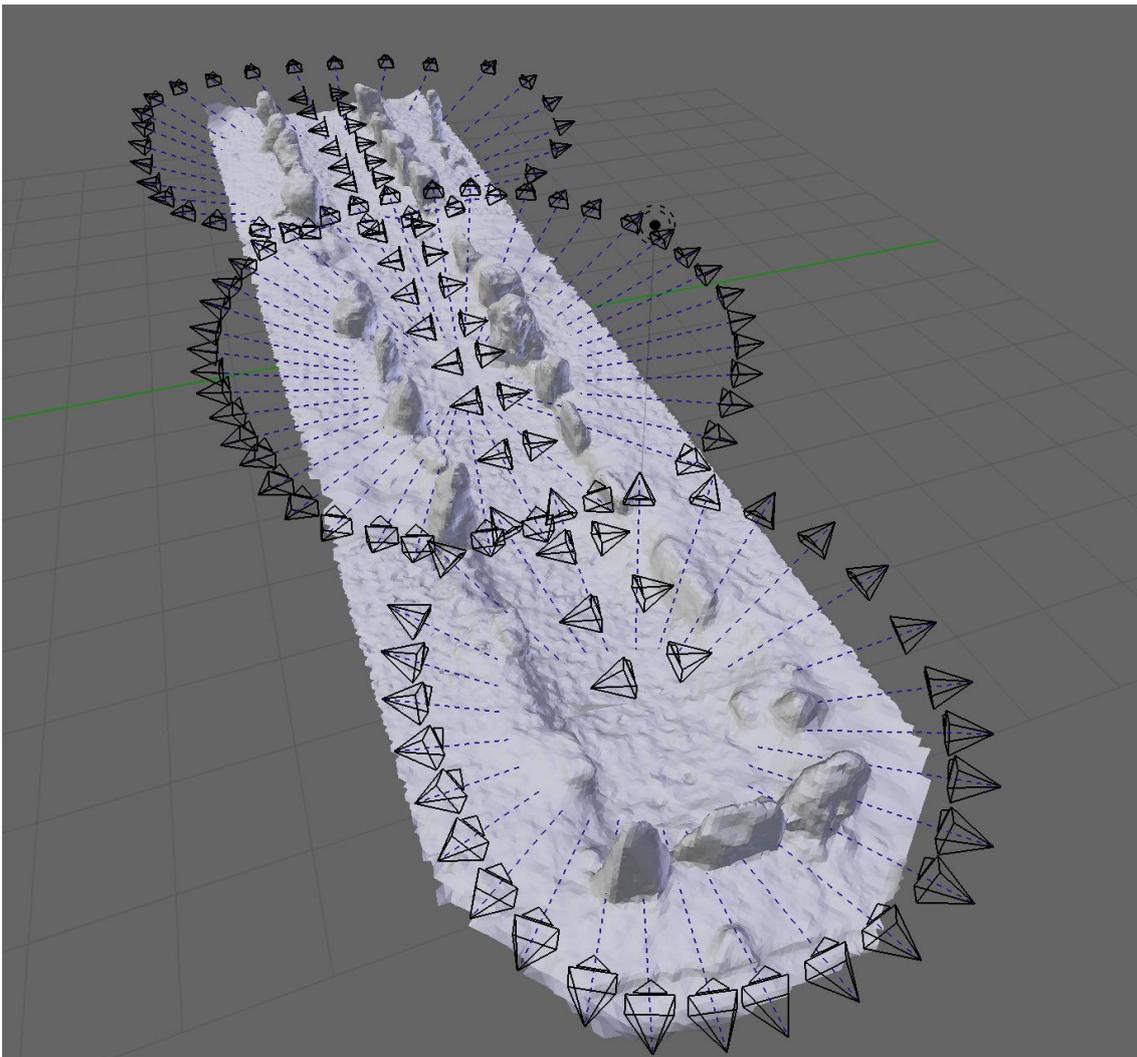


Abb. 10 Lengerich-Wechte (Lkr. Steinfurt). Großsteingrab als Beispiel für die planmäßige Aufnahme von Objektgruppen (L. Fischer).

Die Berechnung

SfM läuft auch bei Anwendung unterschiedlicher Programme meist nach dem gleichen Schema ab.

Die grundsätzliche Berechnung der Punktwolke ist immer der erste Schritt. Hier sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass die Verzeichnung durch das Objektiv heraus gerechnet wird. Im nächsten Schritt wird eine weitere Verdichtung der Punktwolke vorgenommen.

Die Berechnungen der ersten beiden Schritte können mit den Programmen *Bundler* oder *Visual SfM* vorgenommen werden. Diese Programme geben eine PLY-Datei aus, die anschließend mit den ebenfalls kostenlosen Programmen *Meshlab* und *Blender* weiterverarbeitet werden kann.

Andere Programme wie *Photoscan* und *aSPECT 3D* bieten die Berechnung und Nachbereitung in einem Paket an. Die Vernetzung der Punkte läuft jedoch bei allen Programmen entweder über ein Höhenfeld- oder eine freie „ball pivoting“-Vernetzung ab. Es werden immer Dreiecksflächen erstellt. Die Texturierung der Fläche, die bestenfalls ihre Punktfarbe übernommen hat, kann mit *Meshlab* recht kompliziert sein. *Photoscan* dagegen macht alle Arbeitsschritte mit relativ intuitiver Bedienung möglich.

Für die Weiterverarbeitung zu Videos, Erstellung von Rekonstruktionen und vielen weiteren Informationen ist *Blender* die professionellste und beste Open Source Lösung. Exportiert man ein fertiges Objekt im OBJ-Format, lässt es sich in *Blender* mit Fototextur importieren.



Abb. 11 Lengerich–Wechte (Lkr. Steinfurt). Fertiges 3D-Modell des Großsteingrabs mit fotorealistischer Textur (L. Fischer).

Anschrift des Verfassers

Lukas Fischer
Carl von Ossietzky Straße 27
06114 Halle

Links zu Programmen und Tutorials

Visual SFM: <<http://ccwu.me/vsfm/>> (17.11.2015)
Bundler: <<https://github.com/qwesda/BundlerTools>> (17.11.2015)
Meshlab: <<http://meshlab.sourceforge.net>> (17.11.2015)
Agisoft, Photoscan: <<http://www.agisoft.ru>> (17.11.2015)
aSPECT 3D: <http://www.arctron.de/en/products/software/aspect_3d/> (17.11.2015)
Blender: <<http://www.blender.org>> (17.11.2015)
Blender Tutorials: <<http://www.youtube.com/playlist?list=PL666B5C87C5BFC3E0>>
(17.11.2015)

Abbildungsnachweis

Abb. 1 Lukas Fischer, Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL)
Abb. 2-11 Lukas Fischer