

Dreidimensionale Vermessung von Höhlen mit Photogrammetrie und Laserscanning am Beispiel der Kolbinger Höhle (Katasternummer 7919/13, westliche Schwäbische Alb)

Elias Pantle, Großbottwar

Mit 18 Abbildungen

1 Einleitung

Höhlen zeichnen sich durch ihren großen, natürlich entstandenen geometrischen Formenreichtum aus. Ihre Wände sind durchsetzt von Vor- und Rücksprüngen, ihre Gangprofile ändern sich von Stelle zu Stelle, und Tropfsteine sowie andere Sinterbildungen bestimmen häufig das Aussehen der Höhle. In der klassischen Höhlenvermessung mit Messband und Neigungsmesser kann auf die vielen Details kaum Rücksicht genommen werden. In der Regel werden nur ein Grundriss und einige charakteristische Schnitte vermessen. Wobei auch hier, vom Polygonzug ausgehend, vieles geschätzt werden muss. In der Vermessungstechnik gibt es allerdings zwei Verfahren, mit denen Objekte flächendeckend dreidimensional erfasst werden können: die Photogrammetrie und das Laserscanning. Mit diesen Techniken können wesentlich realistischere und detailliertere Bilder einer Höhle entstehen.

In einer gemeinsamen Bachelor-Arbeit an der Hochschule für Technik (HfT) Stuttgart haben Jonas Marquart und ich diese Verfahren in einer schwierigen Höhlenumgebung eingesetzt und miteinander verglichen. Unser Ziel war es, Photogrammetrie und Laserscanning im Blick auf Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit zu untersuchen und die jeweiligen Vor- und Nachteile herauszuarbeiten.



Abb. 1: Jonas Marquart und Elias Pantle (links) mit dem Laserscanner am Eingang der Kolbinger Höhle.

Bei der Höhle, die wir vergleichend vermessen haben, handelt es sich um die Kolbinger Höhle, auf der Schwäbischen Alb in der Nähe von Tuttlingen gelegen (RATHGEBER 1999). Die 330 m lange und 40 m tiefe Höhle ist eine Schauhöhle (Abb. 1), die von der Kolbinger Ortsgruppe des Schwäbischen Albvereins betreut wird. An den Wochenenden im Sommer kann die ansonsten verschlossene Höhle besichtigt werden. Der Schauhöhlenteil ist etwa 100 Meter lang, elektrisch beleuchtet und mit einem Führungsweg ausgestattet.

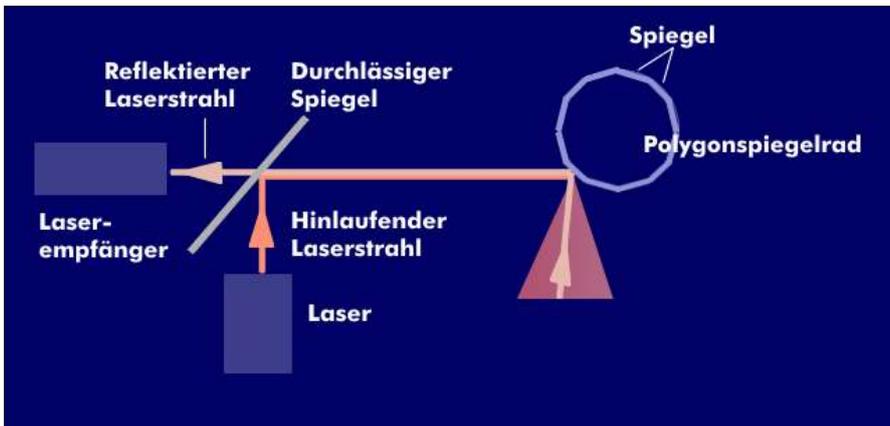


Abb. 2 (links): Funktionsprinzip eines Laserscanners. – Abb. 3 (rechts): Der in der Kolbinger Höhle verwendete Laserscanner Trimble SX10.

2 Funktionsprinzip von Laserscanning und Photogrammetrie

Ein Laserscanner ist ein Instrument, welches – vereinfacht gesagt – einen Laserimpuls aussendet und die Zeit misst, bis der Impuls, nachdem er von einem Objekt reflektiert wurde, wieder vom Scanner empfangen wird. Zudem werden ein Horizontal- und ein Vertikalwinkel erfasst. Dies geschieht mehrere tausend Mal pro Sekunde. Während einer Messung lenkt ein Spiegel das Signal in Vertikalrichtung ab, und das Instrument dreht sich einmal im Kreis (Abb. 2). Dadurch entsteht ein gleichmäßiges, sehr dichtes Punktraster. Die Gesamtheit der so entstandenen Punkte bildet eine „Punktwolke“. Abb. 3 zeigt den verwendeten Laserscanner. Das Gerät wird fest auf einem Stativ aufgebaut und bleibt solange an einer Stelle stehen, bis es rundherum einmal alles abgescannt hat. Dann wird der Scanner an anderer Stelle wieder neu aufgebaut. Da in unserem Fall die einzelnen Standpunkte eingemessen waren, konnten die Scans der einzelnen Standpunkte durch deren Koordinaten zu einem Gesamtscan zusammengeführt werden.

Bei der Photogrammetrie wird von einem Objekt eine Vielzahl von digitalen Fotos aufgenommen. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Bilder sehr stark überlappen. Eine Software kann dann aufgrund der Farbverläufe und Helligkeitsunterschiede einzelne Merkmalspunkte in den Bildern identifizieren. Diese werden anschließend bildübergreifend miteinander verglichen, um identische Punkte zu finden. Mit diesen Punkten und den festen Kameraparametern, wie Sensorgröße, Pixelanzahl und Brennweite, kann in einer mathematischen Ausgleichung die Kameraposition und die Position der Punkte in einem beliebigen, lokalen Koordinatensystem bestimmt werden. Das zugrunde liegende Prinzip funktioniert folgendermaßen: Pro Bild wird für jeden abgebildeten Merkmalspunkt ein geradliniger Strahl definiert, der von seiner Bildposition durch den Brennpunkt in den Objektraum führt. Die Kamerapositionen müssen dann so angeordnet werden, dass sich für jeden

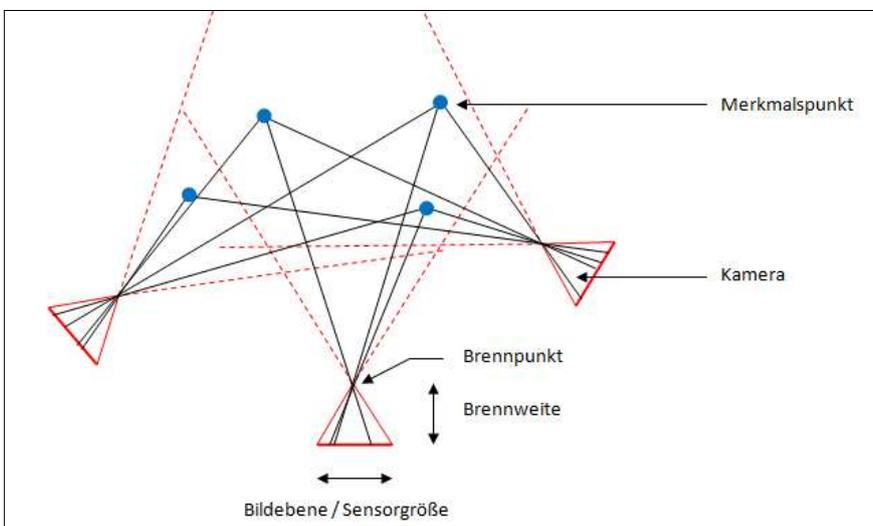


Abb. 4: Prinzip der Berechnung der Kamerapositionen und der identischen Merkmalspunkte der Photogrammetrie.

identischen Merkmalspunkt die zugehörigen Strahlen an einem Ort schneiden (siehe Abb. 4). Mit Hilfe der berechneten Kamerastandpunkte wird anschließend eine Vielzahl von weiteren Punkten bestimmt, was ebenfalls zu einer Punktwolke führt.

Wenn nun mindestens drei Punkte in einem metrischen Koordinatensystem bekannt sind und so markiert werden, dass sie in den Bildern erkennbar sind, kann das Modell in die richtige Größe und Ausrichtung transformiert werden.

3 Aufnahme der Höhle

Beide Verfahren sind abhängig von einigen koordinierten Vermessungspunkten. Neun Punkte wurden dementsprechend im Vorfeld in einem Polygonzug mit einem Tachymeter vermessen. Das Tachymeter ist ein Vermessungsinstrument, welches Strecken und Winkel misst. Für die Photogrammetrie wurden zusätzlich weitere sogenannte Passpunkte bestimmt. Bei diesen handelte es sich um reflektierende Klebmarken, die in der Schauhöhle am Geländer angebracht wurden oder, wie in Abb. 5 zu sehen, auf in Ritzen gelegte weiße Plastiknägel.

Bei der photogrammetrischen Aufnahme wurden die Bilder mit einer handelsüblichen digitalen Spiegelreflexkamera aufgenommen. Begonnen wurde am Höhleneingang. Es war darauf zu achten, dass jeder Bereich der Höhlenoberfläche auf mindestens zwei Bildern erfasst wurde und die Bildüberlappung sehr hoch war. Denn nur dann gelingt es, ein einziges umfangreiches Modell zu generieren. Zusätzlich mussten die Bilder scharf sein. Das größte Problem war, wie erwartet, die Belichtung. Da die Kolbinger Höhle eine Schauhöhle ist, existiert eine künstliche Beleuchtung, die allerdings naturgemäß sehr unregelmäßig ist. Es stellte sich heraus, dass die besten Ergebnisse mit einer langen Belichtungszeit erfolgten. Um zu gewährleisten, dass die Aufnahmen nicht verwackeln, wurde die Kamera auf einem Stativ befestigt. Das Stativ konnte nur auf dem Führungsweg problemlos aufgebaut werden, und die Aufnahmehöhe war durch das Stativ eingeschränkt. Deshalb wurden zusätzlich Aufnahmen ohne Stativ gemacht, so dass auch weniger gut einsehbare Bereiche, zum Beispiel hinter Tropfsteinen, erfasst werden konnten. Da dabei nicht so lange belichtet werden konnte, wurde häufig auf das Blitzlicht zurückgegriffen. Es wurden etwa 2.000 Bilder in der Höhle aufgenommen.



Abb. 5 (links): Ein Plastiknagel mit aufgeklebten Reflexpunkt steckt in einer Ritze der Höhlenwand und dient als Passpunkt. – Abb. 6 (rechts): Der Laserscanner im Einsatz, rechts hinten steht ein Reflektor auf einem bekannten, zuvor eingemessenen Punkt.

Der verwendete Laserscanner kann zusätzlich als Tachymeter betrieben werden. Deshalb war es möglich, den Standpunkt des Instrumentes über mindestens zwei bekannte Punkte zu bestimmen. Ein Scan dauerte etwa 15 Minuten, was zu längeren Wartezeiten führte. Es war darauf zu achten, dass die Anschlusspunkte vom Standort eingesehen werden können und die Standorte sinnvoll gewählt waren. Es sollte ja – bei einer möglichst geringen Anzahl der Standpunkte – ein möglichst großer Teil der Höhlenoberfläche abgedeckt werden. Als schwierig erwies sich das Aufstellen des Gerätes aufgrund des unebenen Bodens und der beengten Platzverhältnisse (Abb. 6). Die Höhle wurde mit etwa 50 Scans vermessen.

4 Auswertung

Die Auswertung wurde an der HfT-Stuttgart durchgeführt, da die Programme sehr hohe Rechenleistung benötigen. Zur photogrammetrischen Auswertung diente die Software Agisoft Metashape, für die Auswertung der Scandateien sowie den Vergleich wurde die Software CloudCompare verwendet. Nachdem die unbrauchbaren Fotos aussortiert worden waren, berechnete Agisoft die Bildzuordnung. Es wurden hier die Merkmalspunkte erstellt und nach gleichen Punkten in unterschiedlichen Bildern gesucht. Dabei entstand eine sogenannte dünne Punktwolke.



Abb. 7: Dichte Punktwolke aus der Photogrammetrie mit Passpunkten.

Da die Datenmenge zu groß war, schaffte die Software die Bildzuordnung für die gesamte Höhle nicht. Deshalb erfolgte eine Untergliederung in sechs Teile, die dann einzeln berechnet wurden. Danach musste die dünne Punktwolke in einem zweiten Schritt verdichtet werden. Anschließend wurde die Punktwolke in das richtige Koordinatensystem transformiert. Hierfür mussten die mit dem Tachymeter bestimmten Passpunkte importiert und den entsprechenden markierten Stellen in den Bildern zugeordnet werden. Abb. 7 zeigt das Ergebnis samt der Verteilung der Passpunkte. Bei der Auswertung der Laserscandaten konnte auf diese Schritte verzichtet werden, da die Punktwolke direkt durch die Messung entsteht. Diese musste nur auf den PC überspielt werden. Nun waren beide Punktwolken zu bereinigen, denn es gab jeweils Punkte, die sich außerhalb der Höhle befanden. Das liegt an der automatischen Mitaufnahme der Umgebung des Höhleneingangs (siehe Abb. 8), aber auch an verschiedenen Fehlereinflüssen. Die unbrauchbaren Punkte wurden herausgefiltert und gelöscht.

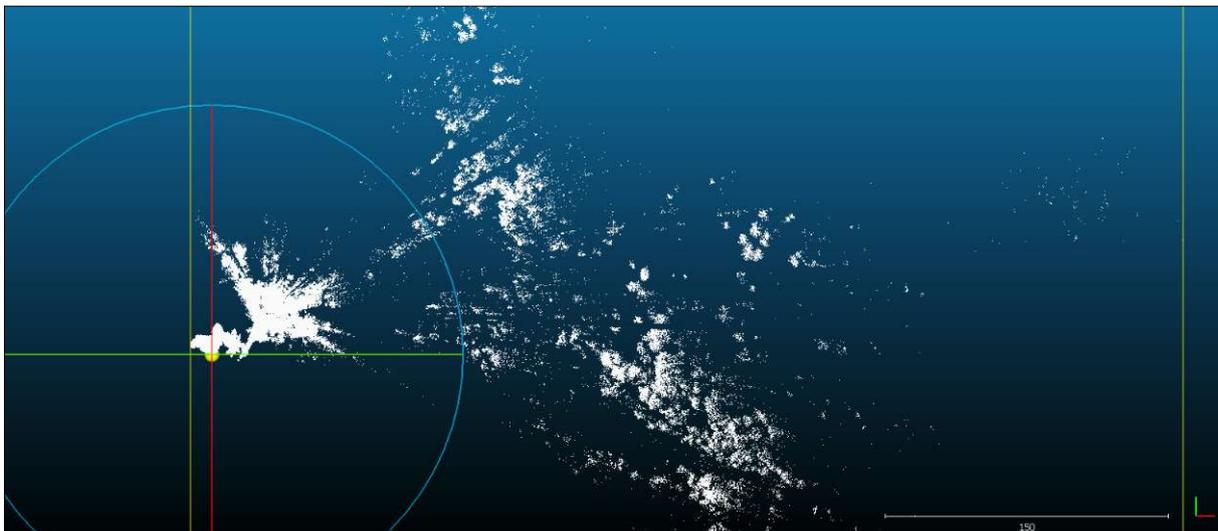


Abb. 8: Vom Laserscanner erzeugte Punktwolke – nur der schlangenförmige Teil ganz links betrifft die Höhle.

Als nächstes wurden aus beiden Punktwolken 3D-Modelle berechnet. Die Funktionsweise besteht darin, dass die Wolke durch viele aneinandergereihte Dreiecke angenähert wird. Hierbei waren beim Laserscanning viele verschiedene Versuche notwendig, um das beste Modell zu erhalten. Denn als problematisch erwies sich die unregelmäßige, verwinkelte Form der Höhle, wodurch dem Programm nicht immer klar war, auf welcher Seite der Punkte sich der Hohlraum befindet. Die 3D-Modelle stellen nun in Form, Größe und Orientierung recht genaue digitale Nachbauten der Kolbinger Höhle dar. Auf das photogrammetrische Modell konnten anschließend die Bilder projiziert werden, wodurch auch die Farbe annähernd dem Original entspricht. Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die beiden Modelle.

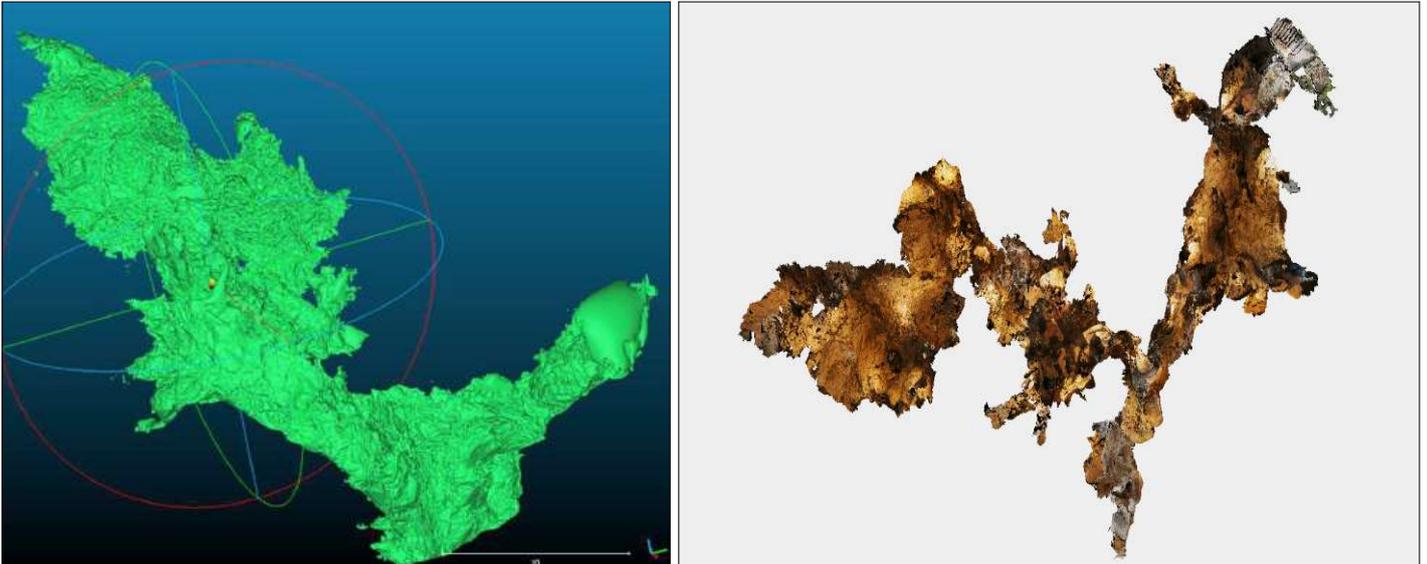


Abb. 9 (links): Mit dem Laserscanner aufgenommenes Modell der Kolbinger Höhle in Schrägansicht. –
Abb. 10 (rechts): Photogrammetrisches Modell der Kolbinger Höhle in der Draufsicht.

5 Vergleich

Im nächsten Schritt wurden die Ergebnisse miteinander verglichen. Der augenscheinlichste Unterschied und gleichzeitig auch der größte Vorteil der Photogrammetrie ist eine recht realistische Einfärbung. Zwar kann der Scanner auch Bilder aufnehmen und damit Punktwolken einfärben, es fehlen jedoch die Einstellmöglichkeiten einer Kamera. Die aufgenommenen Bilder des Laserscanners waren sehr dunkel und brachten kaum einen Mehrwert, weshalb in der Auswertung von vorn herein darauf verzichtet wurde. Das farbige photogrammetrische Modell vermittelt ein wesentlich anschaulicheres Bild der Höhle, und Strukturen der Höhlenoberfläche sind besser erkennbar.

Für einen Genauigkeitsvergleich wurden die jeweiligen Punktwolken und 3D-Modelle übereinander gelegt und abhängig vom Abstand zueinander in verschiedenen Farben eingefärbt. In Abb. 11 ist der Vergleich der Modelle zu sehen. Der größte Teil ist in grün oder gelb eingefärbt, und besitzt damit eine Genauigkeit von unter 20 cm. In Rot sind die Bereiche eingefärbt, die nur durch die Photogrammetrie erfasst wurden. Denn sie erfasste mehr Bereiche, was an der flexibleren Aufnahmemöglichkeit liegt. Beim Laserscanner benötigt jede Aufnahme 15 Minuten Zeit, während ein Bild im Nu fotografiert ist. Zudem ist die Kamera viel handlicher, so dass auch kleine Seitengänge noch krabbelnd aufgenommen werden konnten. In diesen Bereichen ist ein Scanner nicht mehr einsatzfähig. Allerdings kam es bei der photogrammetrischen Aufnahme gelegentlich zu kleinen Lücken, da in einigen Bereichen zu wenige Fotos gemacht wurden oder die Bildüberlappung zu gering war. Die unvollständige Abdeckung ist das größte Problem in beiden Verfahren.

Um die Genauigkeit der Verfahren zu vergleichen, wurden diejenigen Flächen, die nur eines der Verfahren aufgenommen hatte, entfernt. Dies geschah, indem alle Punkte, bei denen die Differenz mehr als 20 cm beträgt, gelöscht wurden. So entstand das in Abb. 12 gezeigte Modell. Daraus lässt sich erkennen, dass beide Modelle bzw. Punktwolken gut übereinstimmen. Die Standardabweichung betrug beim Punktwolkenvergleich 3 cm und beim Vergleich der Vermaschungen 5 cm. Das bedeutet: 69% der Punkte weichen weniger als 3 cm, respektive 5 cm voneinander ab. Da bei

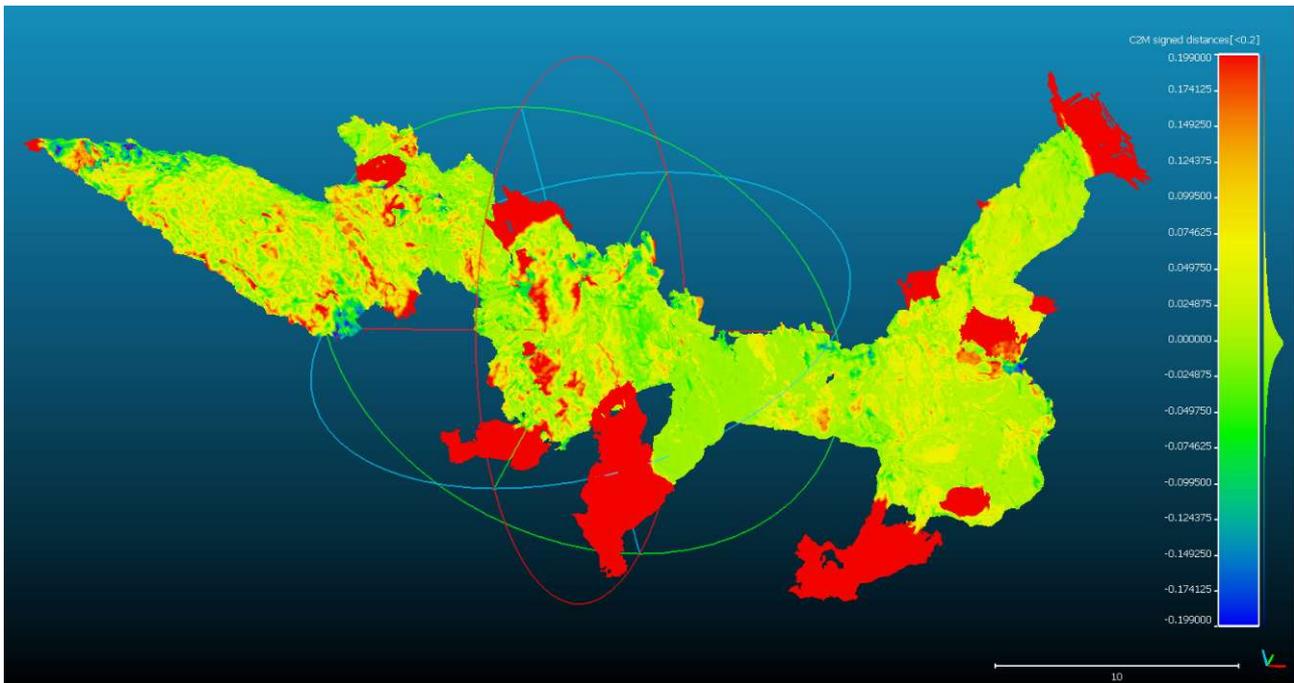


Abb. 11: Vergleich der Vermaschungen.

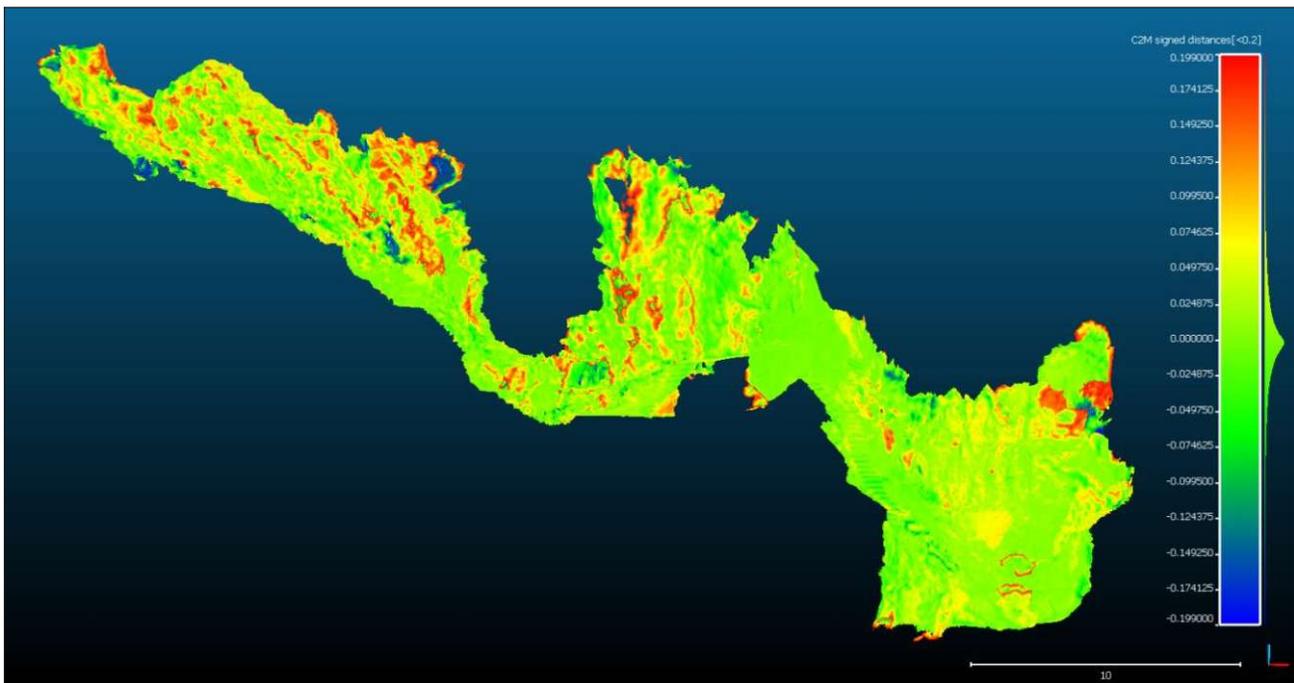


Abb. 12: Vergleich der Vermaschungen nach Selektion der roten Flächen.

der Erstellung der Dreiecksvermaschung geglättet wird, ist hier die Abweichung höher. Die genaue Verteilung der Abweichung kann dem Histogramm aus Abb. 13 entnommen werden. Damit ist gezeigt, dass beide Verfahren in der Lage sind, eine Höhle in sehr zufriedenstellender Genauigkeit zu erfassen. Trotzdem kann dem Laserscanning eine leicht höhere Genauigkeit bescheinigt werden, da die gemessenen Punkte, wie Abb. 14 zeigt, hier weniger streuen. Die Streuung beschreibt, dass bei einem Schnitt durch eine ebene Fläche, z. B. den Führungsweg, die Punkte dichter an dieser gedachten Ausgleichsgeraden liegen, die der Höhe des Führungsweges entspricht.

Die wirtschaftliche Betrachtung ergab, dass beide Messungen in der Höhle etwa gleich lang gedauert haben. Jedoch benötigte das Laserscanning weniger Zeit bei der Auswertung, da die Punktwolke – anders als bei der Photogrammetrie – schon existierte. Die Anschaffungskosten sind beim Laserscanning deutlich höher. Mehrere 10.000 Euro kostet beispielsweise der verwendete Scanner. Eine Digitalkamera dagegen ist meist vorhanden. Allerdings ist die Photogrammetrie-Software etwas teurer.

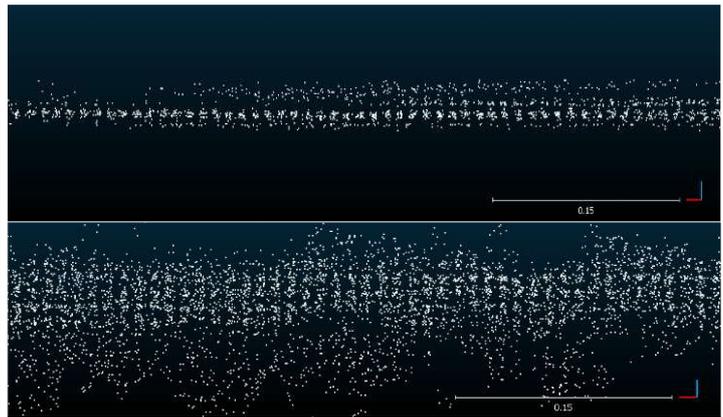
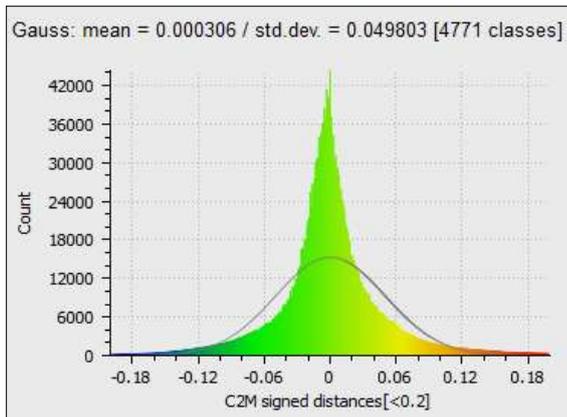


Abb. 13 (links): Verteilung der Abweichungen zwischen den beiden Modellen in Metern. – Abb. 14 (rechts): Streuung der Punktwolke (oben beim Laserscanning, unten bei der Photogrammetrie).

6 Fazit und Anwendungsmöglichkeiten

Unser Fazit ist, dass sich beide Verfahren eignen, um Höhlen dreidimensional zu erfassen. Die Genauigkeiten sind hoch, wobei das Laserscanning etwas besser abschneidet. Vorteile der Photogrammetrie sind die Einfärbung, die Möglichkeit, enge Gangpassagen zu erfassen, sowie allgemein die größere Flexibilität in der Aufnahme.

Als handfeste Ergebnisse über unsere Bachelor-Arbeit hinaus können sowohl ein gedrucktes 3D-Modell der Höhle als auch ein Video gewertet werden, das einen „Durchflug“ durch die Höhle zeigt.



Abb. 15: Im 3D-Drucker erzeugtes Model der Kolbinger Höhle.

Das Modell (Abb. 15) gibt einen ganz neuen, ungewöhnlichen Blick auf die Höhle, nämlich als Gesamtheit von außen. Da in einer Höhle schnell das Gefühl für die Orientierung abhanden kommt, kann die Ausdehnung der Höhlenräume so erst richtig eingeschätzt werden. Gerade auch für die Höhlenbesucher kann das interessant sein. Das Video gibt durch die hohe Auflösung und seine Farbqualität einen guten Vorgeschmack auf die Höhle, wie der Screenshot in Abb. 16 zeigen soll. Es eignet sich sehr gut, um auch gehbehinderten Menschen, die die steilen Treppen der Schauhöhle nicht bewältigen können, die Pracht der Kolbinger Höhle zu zeigen. Beide Ergebnisse – das 3D-Modell und das Video – wurden den Schauhöhlenbetreibern für Werbezwecke ausgehändigt. Zudem wurde aus der Punktwolke ein Höhlenplan erstellt. Dieser wurde mit einem Höhlenplan von Thomas Haas, welcher 1996 aus tachymetrischer Messung entstand, und einem mit konventionellen Methoden der Höhlenvermessung aufgenommenen Plan von Thomas Rathgeber verglichen.

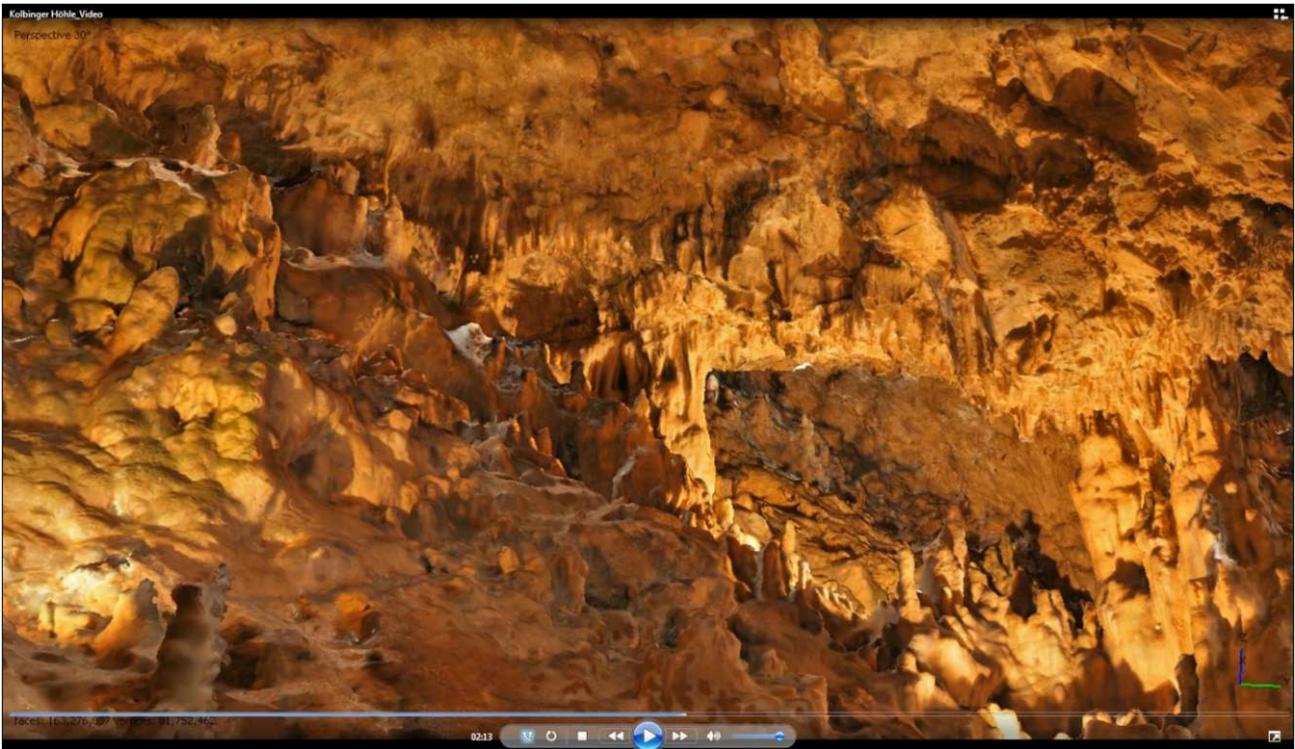


Abb. 16: Ausschnitt aus dem Durchflug-Video durch die Kolbinger Höhle.

Unser Plan stimmt sehr gut mit dem von Haas überein, ist aber deutlich detaillierter (Abb. 17). Der Plan von Rathgeber weicht verständlicherweise stärker davon ab (Abb. 18), doch liegen auch hier – abgesehen vom Eingangsbereich, in dem aufgrund eiserner Einbauten das Messen mit dem Kompass besonders schwierig war – keine groben Fehler vor. Daraus ergibt sich, dass durch Laserscanning und Photogrammetrie deutlich detailliertere und genauere Pläne erzeugt werden können, als mit den Mitteln der klassischen Höhlenvermessung.

Allerdings muss gesagt werden, dass sich bei einer Höhlenvermessung Photogrammetrie und Laserscanning wirtschaftlich in den wenigsten Fällen lohnen. Dies gilt besonders für die ehrenamtlich tätigen Höhlenvereine. Laserscanning ist hier aufgrund der hohen Kosten und der erforderlichen professionellen Vermessungsexpertise kaum geeignet. Bei der Planung einer Schauhöhle oder deren Renovierung wäre der Einsatz eines solchen Scanners denkbar. Außerdem zur Modellierung und Visualisierung von großräumigen Höhlen oder Höhlenabschnitten, zum Beispiel zu Werbezwecken oder auch zur Volumenbestimmung. Jedoch macht das nur Sinn in Höhlen, die in besonderem Interesse stehen.

Photogrammetrie ist durch die vorhandene Farbgebung noch besser für die Visualisierung geeignet, beispielsweise als Video oder sogar als Virtual-Reality-Animation. Zudem sind auch enge Höhlen und Höhlenabschnitte erfassbar. Aber es gilt auch in diesen Fällen, dass der große Aufwand wohlüberlegt sein muss. Sinnvoller als die Aufnahme einer ganzen Höhle ist die Aufnahme von kleineren und sehr charakteristischen Höhlenabschnitten, wie eine Gangpassage oder eine besonders eindrucksvolle Halle. Denn dann sind die Aufnahmen mit sinnvollem Zeitaufwand machbar, und die Anzahl der Bilder ist klein genug für eine zügige Auswertung.

Der große Vorteil beider Verfahren ist die dreidimensionale Erfassung der Höhle. Auch die Höhlenforschung kann davon profitieren, denn die präzisen 3D-Modelle helfen bei der Beantwortung von Forschungsfragen. Beispielsweise kann man aus dem Volumen einer Halle oder aus der Fläche eines Gangprofils Rückschlüsse auf den Prozess der Höhlenentstehung ziehen. Flächen- und Rauminhalte können im Modell problemlos abgeleitet werden, während speziell Volumina ansonsten nur sehr grob geschätzt werden können. Auch Oberflächenstrukturen können analysiert werden. Durch die Einfärbung des photogrammetrischen Modells wird das noch aufschlussreicher. Als weiterer Pluspunkt können nach einer dreidimensionalen Erfassung Experten zu Rate gezogen werden, ohne dass diese den manchmal mühsamen Weg durch die Höhle angehen müssen.

Zur eigentlichen Höhlenvermessung bietet sich die Photogrammetrie nur bei kurzen, schlauchartigen Höhlen an, die sich nicht verzweigen. Nur in solchen Fällen dürfte der Zeitaufwand mit dem einer klassischen Höhlenvermessung vergleichbar sein. Denn mit jedem aufgenommenen Bild

steigt die Auswertezeit exponentiell an. Außerdem führen Verzweigungen, wie sie in vielen Höhlen vorkommen, dazu, dass einzelne Bilder nicht zugeordnet werden können.

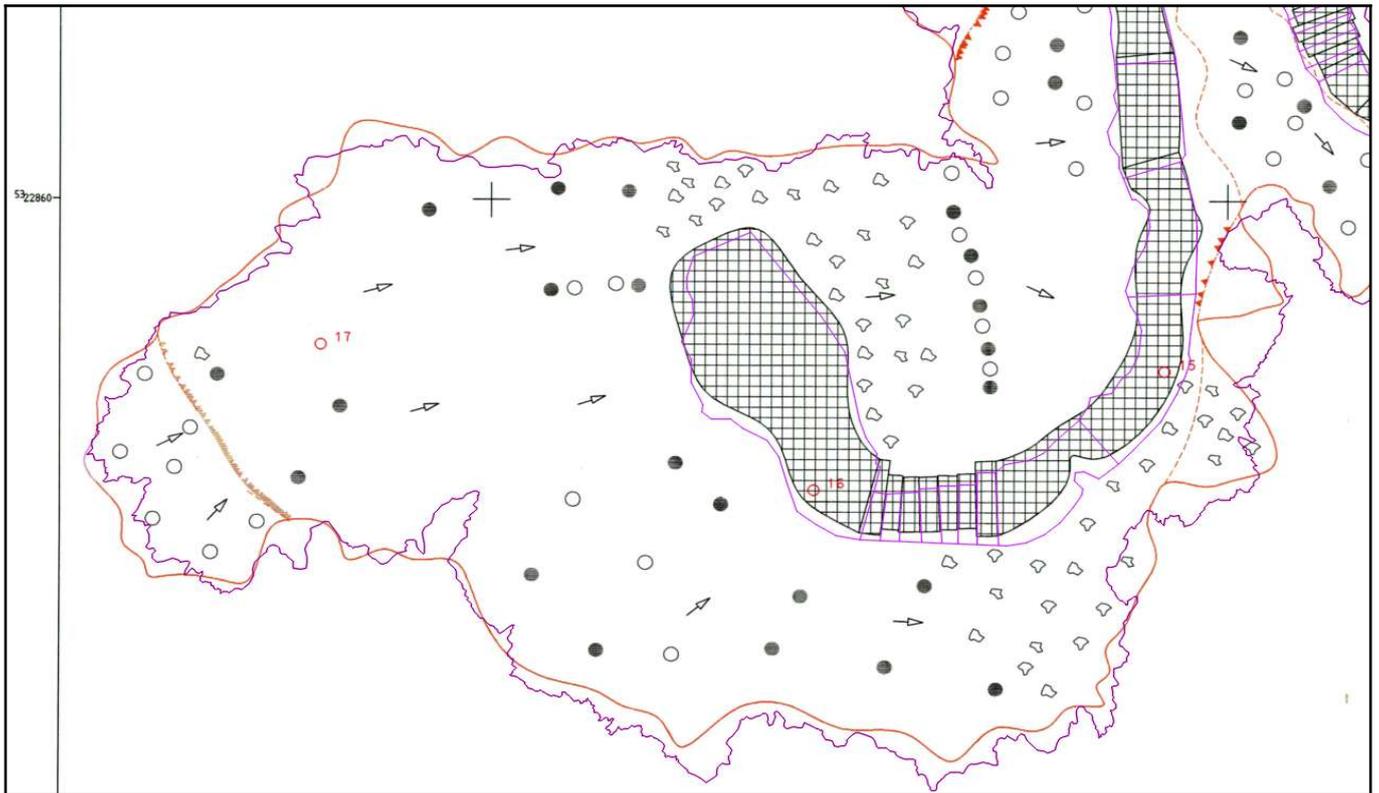


Abb. 17: Vergleich des eigenen Höhlenplans (violette Linien) mit einem Ausschnitt aus dem Grundrissplan in HAAS (1997).

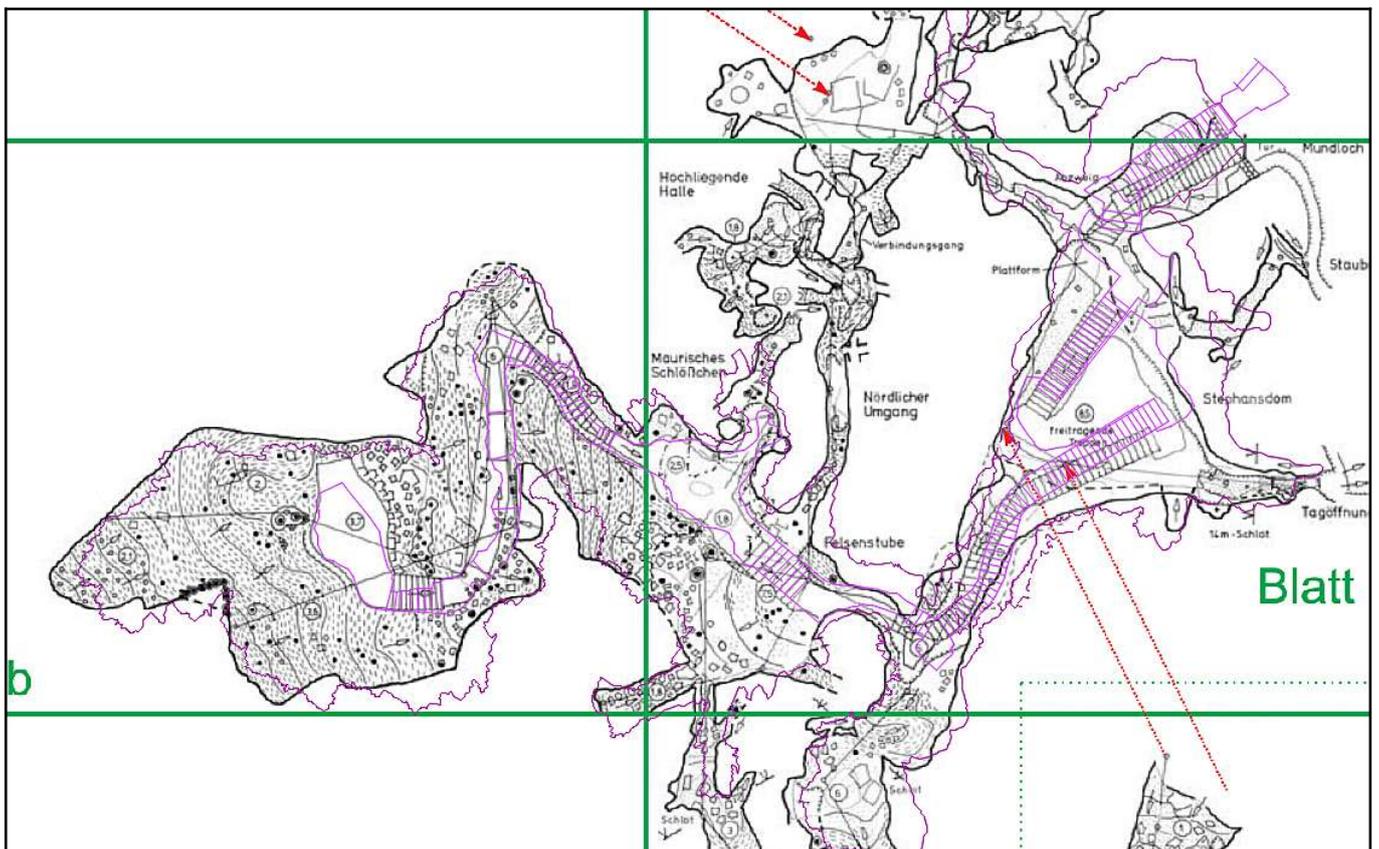


Abb. 18: Vergleich des eigenen Höhlenplans (violette Linien) mit dem Grundrissplan von RATHGEBER (2013), der mehrere Nebengänge zeigt und einige Beschriftungen enthält.

Photogrammetrie und Laserscanning werden die Höhlenvermessung nicht revolutionieren, jedenfalls noch nicht, aber es kann durch die quasi komplette 3D-Erfassung ein ganz neues Licht auf eine Höhle geworfen werden. In oben genannten Anwendungen ist es denkbar, diese Verfahren einzusetzen. Lohnenswert wäre vor allem, die Einsatzmöglichkeiten der Photogrammetrie in Höhlen weiter zu erforschen und zu konkretisieren. Durch die Entwicklung der Computertechnik wird ihr Potenzial in Zukunft noch steigen. Ein Vergleich zwischen der klassischen Vermessung und der Photogrammetrie bei der Vermessung von Kleinhöhlen wäre auf jeden Fall sehr spannend.

7 Schriften

- HAAS, THOMAS (1997): Vermessung der Kolbinger Höhle. – 20 Seiten, 2 Abb., 5 Tab., 7 Faltbeilagen; Stuttgart. (Diplomarbeit im Fachbereich Vermessungswesen an der Fachhochschule Stuttgart, Hochschule für Technik zum Wintersemester 1996/1997)
- MARQUART, JONAS, & PANTLE, ELIAS (2020): Vergleich von Photogrammetrie und Laserscanning in der Höhlenvermessung. – 111 Seiten, 92 Abb., 8 Tab.; Stuttgart. (Bachelor-Arbeit im Studiengang Vermessung und Geoinformatik an der Hochschule für Technik Stuttgart zum Wintersemester 2019/2020) <Dazu ein digitaler Anhang, unter anderem mit einer Videoanimation>
- RATHGEBER, THOMAS (1999): Notizen aus der Höhlenwelt rings um Kolbingen. – In BLESSING, ELMAR: Kolbingen und die Herrschaft Werenwag. S. 819-848, 19 Abb.; Horb am Neckar.
- (2013): 7919/13 Kolbinger Höhle (Aufnahmemaßstab 1:100), Darstellung der oberen Stockwerke auf 4 (6) Blättern mit Kantenlängen von 30 m in Ost/West- und 20 m in Nord/Süd-Richtung. – 1 Blatt. <Unpubliziert>

Anschrift des Verfassers

Elias Pantle, Bachstraße 38, 71723 Großbottwar

E-Mail: elias.pantle@web.de