Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Hochschule Neubrandenburg

Studiengang Geodäsie und Messtechnik

Photogrammetrische Vermessung eines historischen Motorblocks

Bachelorarbeit

vorgelegt von: *Sebastian Trampisch*

Zum Erlangen des akademischen Grades

„Bachelor of Engineering" (B.Eng.)

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Sven Brämer

Zweitprüfer: Master of Eng. Martin Kiskemper

Eingereicht am 10.06.2020

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2020-0117-4

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Professor Brämer für die Bereitstellung eines Themas und der inhaltlichen Betreuung meiner Bachelorarbeit. Zudem bedanke ich mich bei Herrn Kiskemper für die Betreuung der Messungen mit dem Messarm. Ein weiterer Dank gebührt Sophie O. für die Unterstützung während der Arbeit.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein historischer Motorblock photogrammetrisch aufgenommen und mit zwei Programmen dreidimensional rekonstruiert. Hierbei werden die Programme Meshroom und Agisoft Photoscan verwendet. Während das Programm Meshroom eine kostenlose und frei zugängliche Software ist, muss bei Agisoft Photoscan eine Lizenz erworben werden. Zur Aufnahme dienten eine Digitalkamera und ein Mobiltelefon. Die Modelle wurden mit zwei Programmen bearbeitet und verglichen; GOM Inspect und MeshLab.

Zur Vorbereitung auf die Messungen und die Bearbeitung werden anfangs verschiedene Grundlagen erklärt, sodass die einzelnen Berechnungsschritte der Programme nachvollzogen werden können. In den Grundlagen werden die Bündelblockausgleichung und das Structure-from-motion-Verfahren erläutert.

In den nächsten Kapiteln werden die Durchführungen und Ergebnisse der jeweiligen Messungen und Aufnahmen gezeigt. Im letzten Teil des Hauptteils „Vergleich der Ergebnisse“ werden die drei entstandenen Modelle nach Ebenheit, Aussehen und Punktabstand gegenübergestellt.

Letztendlich werden einige Fehlerquellen genannt und eine abschließende Zusammenfassung gegeben. Danach wird noch ein Ausblick auf weitere Möglichkeiten der Weiterarbeit am Motorblock aufgezeigt.

Inhalt

1 Einleitung 4
2 Geschichtliche Entwicklung der (Nahbereichs-)Photogrammetrie 5
3 Grundlagen 8
3.1 Photogrammetrie 8
3.2 Bündelblockausgleichung 9
3.3 Structure-from-motion-Verfahren 17
4 Aufnahme mit einer Kamera 22
4.1 Verfahrensbeschreibung 22
4.2 Durchführung 24
4.3 Ergebnisse 27
5 Aufnahme mit einem FARO-Messarm 30
5.1 Verfahrensbeschreibung 30
5.2 Durchführung 31
5.3 Ergebnis 33
6 Vergleich der Ergebnisse 35
7 Fehlerquellen 39
8 Vorstellung anderer Verfahren 40
9 Zusammenfassung und Ausblick 41
10 Literaturangaben 42
11 Tabellenverzeichnis 42
12 Formelverzeichnis 42
13 Abbildungsverzeichnis 43
14 Anhang 43
15 Eidesstattliche Erklärung 44

1 Einleitung

Das Thema ,,Photogrammetrische Vermessung eines historischen Motorblocks“ verbindet verschiedene Fachgebiete des Studiums. Es werden verschiedene Aspekte der Photogrammetrie und der Industriemesstechnik aufgezeigt, verwendet und erklärt. Das Thema lässt einen großen Freiraum für die Ausführung. Speziell in dieser Arbeit wird ein historischer Motorblock mit zwei Programmvarianten photogrammetrisch vermessen. Der Motorblock befindet sich im Haus II Raum 318 in der Hochschule Neubrandenburg.

Die erste Variante ist die Aufnahme mit einer Digitalkamera inklusive der Auswertung mit Agisoft Photoscan. Wirtschaftlich gesehen, ist diese Konstellation mit Kosten für die Kamera (falls eine Photogrammetrie-Kamera benutzt wird) und für die Software hoch. Deshalb wurde zusätzlich zu dieser Variante eine zweite, kostengünstigere Variante durchgeführt. In dieser Variante wird ebenfalls eine Digitalkamera benutzt. Da in der heutigen Zeit jede Person ein Mobiltelefon (Handy) besitzt und diese meist mit einer Kamera ausgestattet sind, wurde der Motorblock ebenfalls mit der Kamera eines Samsung Galaxy S9 mit 12 Megapixeln aufgenommen. Nachdem die Aufnahmen der Digitalkamera und des Mobiltelefons verglichen wurden, stellte sich heraus, dass die Bilder der Digitalkamera optisch besser waren. Als Softwarevariante wird nicht Agisoft Photoscan, da dies nicht kostenlos ist, sondern die Software Meshroom von aliceVision verwendet. Diese Software ist kostenlos und verwendet photogrammetrische Verfahren zur Auswertung. Meshroom verwendet aufgenommene Bilder und vernetzt diese zu einem Netz (Mesh) und zu einem 3D Modell, das exportiert werden kann. Um dieses Modell zu bearbeiten, muss eine zusätzliche Software verwendet werden. Hier kam das Programm MeshLab zum Einsatz. Dies ermöglicht die Bearbeitung und Verbesserung des Netzes. Da diese beiden Programme kostenlos sind und fast jeder ein Smartphone oder eine Digitalkamera besitzt, ist dies die ,,low-cost“ Variante der Arbeit.

Als Ergebnis werden die zwei Varianten verglichen und dargestellt. Zudem wird ein Koordinatenmessarm der Firma FARO hinzugezogen. Mit diesem wird der Motorblock ebenfalls aufgenommen. Hierbei werden ebenfalls zwei Varianten verwendet. In der ersten Variante wird mit dem Sensorkopf des Messarmes gearbeitet. Da die Hochschule einen Scanaufsatz für diesen Messarm besitzt, wird dies als Variante zwei genutzt. Infolge dessen werden im späteren Verlauf ebenfalls wichtige Qualitätssicherungsaufgaben durchgeführt. Hierzu gehört beispielsweise (bspw.) ein 3D-Vergleich.

Die Leitfrage dieser Arbeit ist, ob es möglich ist, mit der ,,low-cost“ Variante ein ebenso gutes Ergebnis zu erzielen wie mit der professionellen Variante. Daraus ergeben sich dann ebenfalls Fragen, wie zum Beispiel worin die Probleme liegen oder welche Schritte in der professionellen Version besser verarbeitet werden. Zudem stehen bei der Nahbereichsphotogrammetrie andere Probleme an, die in den nachfolgenden Kapiteln aufgezeigt und bearbeitet werden.

Im Folgenden wird auf die Geschichte der Photogrammetrie und dem Teilgebiet der Nahbereichsphotogrammetrie eingegangen und als Vorbereitung auf den Hauptteil werden in Kapitel 3 verschiedene Grundlagen erklärt.

2 Geschichtliche Entwicklung der (Nahbereichs-)Photogrammetrie

Die Geschichte der Photogrammetrie startet mit der Erfindung der Fotographie zwischen 1830 und 1840. Nur ein paar Jahre später wurden die ersten messtechnischen Einsätze durch den französischen Offizier Laussedat und den deutschen Architekten Meydenbauer durchgeführt. Laussedat prägte 1849 den Begriff Métrophotographie, indem er erste photographische Aufnahmeapparate benutzte, die im entfernten Sinn dem Prinzip der Messkamera mit festem Aufbau entsprachen. Er testete dies in seinen Einsätzen auf dem Feld. Durch diese ersten Entwicklungen begann die photogrammetrische Messtechnik. Im Gegensatz dazu hat Meydenbauer 1858 erste Messbildverfahren entwickelt, die ihm seine damalige Gebäudevermessung deutlich erleichterte. Diese Messbildverfahren waren die ersten photogrammetrischen Auswertungsverfahren, die ebenfalls den Grundstein der Photogrammetrie gelegt haben [Ackermann 2013: 11 ff.] [Luhmann 2017: 39 ff.].

In den darauffolgenden Jahrzehnten zwischen 1865 und 1896 wurden die ersten Bildmesstheodoliten entwickelt. Diese ermöglichten eine direkte Messung von Bildwinkeln. Diese Messungen dienen zur einfachen Lösung der photogrammetrischen Orientierungsaufgabe. Während die Bildmesstheodoliten zur Messung im Gelände entwickelt worden sind, wurden um 1900 die nächsten Schritte in der Auswertetechnik geschafft. In dieser Zeit wurden die ersten stereoskopischen Auswertegeräte gebaut. Franz Stolze, ein Freund von Albrecht Meydenbauer, entwickelte das Prinzip der räumlichen Messmarke 1893. Ein Jahr später entwarf Hauck ein erstes Stereokartiergerät.

Nach der Jahrhundertwende erbaute Carl Pulfrich im Jahre 1901 den ersten Stereokomparator, der die Photogrammetrie auf eine nächste Stufe brachte und viele Jahre genutzt und verbessert wird. Durch eine stereoskopische Betrachtung können durch den Stereokomparator Bildkoordinaten gemessen werden. Durch dieses Gerät steigt die Qualität der Zuordnung der identischen Bildpunkte. Zwischen den Weltkriegen wurde der Begriff der Analogphotographie geprägt. Zu dieser Zeit werden verschiedene neue Systeme erfunden. Neben Geräten zur Bildentzerrung werden Systeme mit optischer Projektion, Systeme mit optisch-mechanischem Prinzip und mechanische Raumlenker entwickelt. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden Messkammern für die Nahbereichsphotogrammetrie gebaut, die bis zum Ende der 1970er Jahren genutzt wurden. Neben der normalen Messkammer wurden Stereomesskammern errichtet. Eine Stereomesskammer besteht aus zwei gleichen Messkammern, die in einem festen Abstand angeordnet sind. Die Stereomesskammer arbeitet somit nach dem Prinzip des Stereonormalfalls [Luhmann 2017: 39 ff.].

Ein wichtiger Schritt war die Erfindung der elektronischen Rechner in den 1950er Jahren. In dieser Zeit beginnt die analytische Photogrammetrie. Während neue analytische Stereoauswertegeräte, wie zum Beispiel der Planicomp von ZEISS, entstehen, entwickeln mehrere Firmen neue Mono- und Stereokomparatoren, die eine hochgenaue Bestimmung der Bildkoordinaten ermöglichen. Diese Messungen werden als Beobachtungen für diverse Triangulationsprogramme genutzt. Die Anwendungsmöglichkeiten der Stereoauswertegeräte sind in vielen Bereichen der Photogrammetrie nutzbar. Diese werden auch in der Nahbereichsphotogrammetrie verwendet. Ab den 1960er Jahren werden vermehrt Modell- und Bündelblockausgleichungsprogramme entwickelt. Zwei Jahrzehnte später werden für die Nahbereichsphotogrammetrie auch spezielle Anforderungen an die Orientierung verankert. In dieser Zeit werden professionelle Fotosystemkameras gebaut, die die vorhandenen Messkammern ablösen. Der Einsatz in der Photogrammetrie ist jedoch nur durch den Einbau eines Réseaus (Glasgitterplatte) gelungen [Luhmann 2017: 40 ff.].

Der nächste Meilenstein in der Geschichte der Photogrammetrie vollzog sich in den 1980er Jahren. Durch die Nutzung neuer optoelektronischer Bildsensoren und der voranschreitenden Rechnertechnologie begann die Zeit der digitalen Photogrammetrie. Die neuauftretende Rechnertechnologie ermöglicht es, digitalisierte Bilder schneller als in der Vergangenheit zu verarbeiten. Zudem können Bildpunkte automatisch vom System erkannt und gemessen werden.

Zusätzlich zur schnelleren Verarbeitung gibt es die Möglichkeit Objektivmuster für die Oberflächenmessung zu korrelieren. In der Industrie werden zu dieser Zeit ebenfalls Korrelatorsysteme zur Karosserievermessung genutzt. Diese bestehen aus einem analytischen Plotter, der mit Videokameras gekoppelt wurde. Da Videokameras in diesem Arbeitsfeld beschränkt nutzbar waren, wurden wenige Jahre später Scanning-Kameras mit einer hohen Auflösung entwickelt. Neben den Scanning-Kameras wurden elektronische Theodolite mit eingebauten CCD-Kameras gebaut. Diese nahmen vollautomatisch die Richtungen zu signalisierten Punkten auf. Ein Beispiel für einen Theodoliten dieser Art ist der in dieser Zeit entstandene „SPACE“ („**S**ystem for **P**ositioning and **A**utomated **C**oordinate **E**valuation“) von der Firma Kern [Kennie 2014: 37]. Da Anfang der 90er Jahre Digitalkameras, die sofort ein digitales Bild zeigten, mit einer hohen Auflösung auf den Markt kamen, schritt die photogrammetrische Messtechnik in der Industrie deutlich voran. Während bei vielen Systemen die Auswertung nach der Aufnahme aller Bilder erfolgt (bezeichnet als Offline-Photogrammetrie), werden zu dieser Zeit ebenfalls Online-Photogrammetriesysteme (synchrone Aufnahme der Bilder mit unmittelbarer automatischer Auswertung) entwickelt und genutzt. Etwa im Jahre 1988 werden interaktive digitale Stereoauswertesysteme gebaut, die die analytischen Plotter fast ersetzen. Zudem werden grafisch-interaktive Mehrbildauswertesysteme, die eine Auswertung in einer CAD-Umgebung ermöglichen, immer beliebter [Luhmann 2017: 45 ff.].

In den nächsten Jahren werden die gegebenen Systeme und Auswertungen verbessert und weiterhin genutzt. Ein wichtiger Schritt wurde 2010 mit einer Software, die mit dem Structure-from-motion-Verfahren arbeitet, getan. In diesem Verfahren können beliebig viele zugehörige Bilder orientiert und kalibriert werden. Als Auswertungsergebnisse werden dichte Punktwolken, mit denen dann weitergearbeitet werden kann, und True-Orthophotos erhalten. Diese Software wird in den meisten Programmen, wie beispielsweise im Programm Photoscan der Firma AgiSoft, verwendet. Agisoft Photoscan wird in dieser Arbeit benutzt, um die Punktwolken zu erstellen. Als Vergleich dazu wird als „low-cost“-Variante die Software MeshLab verwendet. Da beide Programme mit dem Structure-from-motion-Verfahren arbeiten, wird dieses Verfahren im nächsten Kapitel „Grundlagen“ erläutert und beschrieben. Heutzutage ist der Technologiewandel vom Analogen zum Digitalen hinreichend abgeschlossen. Die Nahbereichsphotogrammetrie ist ein wichtiger Teil der Photogrammetrie und aus vielen Anwendungen nicht mehr wegzudenken.

Photogrammetrische Komponenten werden immer wieder in anwendungsspezifische, hybride Systeme miteinbezogen. Dazu gehören beispielsweise Qualitätsanalysesysteme oder das Verbinden mit CAD-Systemen. Demnach ist die Nahbereichsphotogrammetrie ein universelles Messverfahren, das ein großes Anwendungsspektrum besitzt und ebenfalls zukunftsorientiert ist [Luhmann 2017: 46 ff.].

3 Grundlagen

Bevor mit dem Hauptteil begonnen werden kann, müssen die gesamten Grundlagen geklärt sein. Zu den Grundlagen gehören verschiedene Definitionen und Verfahren in den Gebieten der Photogrammetrie und der Industriemesstechnik.

3.1 Photogrammetrie

Es gibt viele Definitionen der Photogrammetrie, jedoch gibt es nur wenige Unterschiede in der Wortwahl. Im Buch ,,Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen“ von Bertold Witte und Peter Sparla wird die Photogrammetrie als ein berührungsloses Messverfahren beschrieben, bei dem die Form und die räumliche Lage von Objekten mittels der Auswertung photogrammetrischer Bilder bestimmt wird. Somit ist das primäre Ziel die Bestimmung von geometrischen Eigenschaften. Als Ergebnisse liegen in der Photogrammetrie beispielsweise dreidimensionale Koordinaten, Oberflächenmodelle oder Orthophotos vor [Witte/Sparla 2015: 339].

Für dieses Projekt wird der Nahbereich spezialisiert. Die Nahbereichsphotogrammetrie ist ein Teilgebiet der Photogrammetrie und unterscheidet sich von der damaligen Standardluftbildphotogrammetrie im Aufnahmeort, in der Objektgröße und in der Aufnahmedistanz. Die Aufnahmedistanz beträgt nicht mehr als 300 Meter und wird meist vom Boden aus durchgeführt. Aufgrund dessen wird die Nahbereichsphotogrammetrie auch als terrestrische Photogrammetrie bezeichnet. Zudem werden hierbei keine speziellen Luftbildkameras verwendet, sondern es können sogar Amateurkameras verwendet werden. Die erzielten Genauigkeiten im Nahbereich liegen bei etwa 0,1 Millimeter bis 3 Zentimeter.

Neben den Anwendungen in der Geodäsie und in der Messtechnik wird die Nahbereichsphotogrammetrie in vielen verschiedenen Bereichen angewendet. Zum Beispiel werden die Verfahren in der Beweissicherung, bei forensischen Anwendungen oder auch in der Denkmalpflege genutzt [Witte/Sparla 2015: 340 f.].

3.2 Bündelblockausgleichung

Die wichtigste Grundlage bei Photogrammetrieprogrammen ist die Bündelblockausgleichung. Thomas Luhmann definiert in seinem Buch „Nahbereichsphotogrammetrie“ die Bündelblockausgleichung als ein Verfahren zur gleichzeitigen rechnerischen Einpassung beliebig vieler im Raum angeordneter Bilder (Strahlenbündel) unter Berücksichtigung photogrammetrisch gemessener Bildpunkte und geodätischer Beobachtungen sowie eines übergeordneten Koordinatensystems [Luhmann 2017: 340].

In dem Fall dieser Arbeit wird meist auf den Nahbereich eingegangen. Im Nahbereich gibt es grundlegend keine Notwendigkeit für ein übergeordnetes Koordinatensystem und für die Einführung geodätischer Beobachtungen. Mithilfe der Ausgleichsrechnung werden hierbei die Fehler der beobachteten Bildkoordinaten minimiert. Bei der Bündelblockausgleichung werden die Bilder durch gleiche Punkte zu einem Gesamtmodell vernetzt. Dieses Gesamtmodell bietet eine dreidimensionale Darstellung des zu untersuchenden Objektes. In diesem Fall ist es ein historischer Motorblock.

Während der Bündelblockausgleichung werden alle beobachteten, gemessenen Größen und alle unbekannten Parameter simultan berechnet. Dies geschieht bis der Strahlenschnitt optimal berechnet wurde. Nach der optimalen Berechnung bilden die Strahlenbündel ein dichtes dreidimensionales Netz mit einer hohen Genauigkeit. Durch diese Strahlenbündelkonstellation ist die Bündelblockausgleichung seit der Zeit der digitalen Photogrammetrie das genauste und leistungsfähigste Verfahren zur Bildorientierung und Punktbestimmung in allen Bereichen der Photogrammetrie. In der Nahbereichsphotogrammetrie wird dieses Verfahren ebenfalls verwendet, da es eine unregelmäßige und beliebige Aufnahmekonfiguration erlaubt. Zudem ist dieses Verfahren auch für komplexere Strukturen der Normalgleichungssysteme stabil. Die Anforderungen an den Nahbereich unterscheiden sich zum Normalfall. Hierbei müssen die Näherungswerte aufwändig beschafft werden.

Zudem sind die Objektkoordinatensysteme beliebig im Raum gelagert, da das Objekt aus verschiedenen Perspektiven fotografiert wird. Während der Ausgleichung können zusätzliche Beobachtungen und Bedingungen miteingebracht werden. Im Normalfall der Photogrammetrie wird meist mit nur einer Kamera aufgenommen. Im Nahbereich kann es zum Gebrauch von mehreren Kameras kommen, die während der Bündelblockausgleichung simultan kalibriert werden müssen [Luhmann 2017: 341 ff.].

Für die Berechnung einer Bündelblockausgleichung werden photogrammetrische Bildkoordinaten benötigt. Diese werden gemessen und in einer Datei, in der Bildnummer, Punktnummer, der jeweilige x'-Wert und y'-Wert und die dazugehörige Standardabweichung enthalten sind, abgespeichert. Bevor die Ausgleichung begonnen werden kann, müssen für die Linearisierung Näherungswerte bereitgestellt werden. Die Bereitstellung kann bei einer einfachen Aufnahmeanordnung durch Messungen vor Ort erfolgen oder in den Planungsdaten schon vorhanden sein. Wie vorher erwähnt, wird im Nahbereich meist mit einer unregelmäßig angeordneten Aufnahmekonfiguration gearbeitet. In diesem Fall werden die Näherungswerte durch iterative Berechnungsverfahren bereitgestellt. In der digitalen Photogrammetrie werden drei Verfahren zur automatischen Berechnung der Näherungswerte verwendet:

- ➔ Kombination aus Vorwärtsschnitt und Rückwärtsschnitt
- ➔ Sukzessive Modellbildung
- ➔ Transformation unabhängiger Modelle

Für jedes Verfahren müssen vorerst Dateien mit den Kameradaten (=innere Orientierung) und mit den gemessenen Bildkoordinaten zur Verfügung gestellt werden. Zudem können Dateien mit Passpunkten oder Dateien mit Informationen zum Objekt (beispielsweise äußere Orientierung als Näherungswerte) integriert werden. Mit diesen Informationen werden iterativ die Bildverknüpfung und die näherungsweise Orientierung bestimmt. Zusätzlich werden somit alle gemessenen Verknüpfungspunkte näherungsweise am Objektraum bestimmt. Zu Beginn wird als Startmodell ein Bildpaar benötigt, das nach speziellen Gütekriterien ausgewählt wird. Die Kriterien, die meistens gewählt werden, sind die Anzahl der Verknüpfungspunkte des Bildpaares und der mittlere Schnittwinkel der Punkte. Ein weiteres mögliches Kriterium ist die Genauigkeit der relativen Orientierung. Hierbei sollte die Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 der relativen Orientierung minimal bleiben. Der durchschnittliche Abstand zweier homologen Bildstrahlen kann ebenfalls genutzt werden. Je geringer diese Restklaffen sind, desto genauer ist die Punktbestimmung.

Zusätzlich können Ausreißer genutzt werden. Falls es Ausreißer in den getesteten Modellen gibt, sollten diese Modelle nicht verwendet werden [Luhmann 2017: 365 ff.].

Die erste Variante, die meist verwendet wird, ist die Kombination aus dem Vorwärtsschnitt und dem Rückwärtsschnitt.

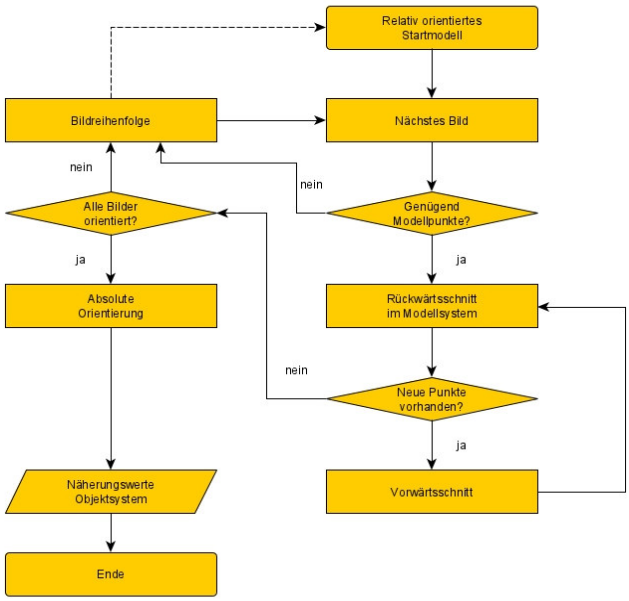


Abbildung 1: Quelle: Luhmann 2017: 369. Kombination Vorwärts- und Rückwärtsschnitt

Hierbei wird ein Startmodell, wie oben beschrieben, gewählt und relativ orientiert. Zu diesem Startmodell werden dann die restlichen Bilder nacheinander hinzugenommen. In jedem Bild werden mindestens drei im Raum verteilte Verknüpfungspunkte gesucht. Diese werden danach durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt in das Modellkoordinatensystem integriert. Die neuen Objektpunkte werden zunächst durch einen räumlichen Vorwärtsschnitt bestimmt. Danach wird erneut ein räumlicher Rückwärtsschnitt gerechnet. Dies trägt zur Verbesserung der äußeren Orientierung bei. Diese Schritte werden für jedes Bild im Bildverband durchgeführt, sodass der Bildverband iterativ stabilisiert wird. Falls alle Bilder orientiert worden sind, wird eine abschließende absolute Orientierung mittels Ähnlichkeitstransformation durchgeführt. Als Ergebnis werden Näherungswerte für die äußeren Orientierungen aller benutzten Bilder und Näherungswerte für die 3D-Objektkoordinaten erhalten [Luhmann 2017: 369].

Die zweite Variante ist die Näherungswertbestimmung mittels sukzessive Modellbildungen.

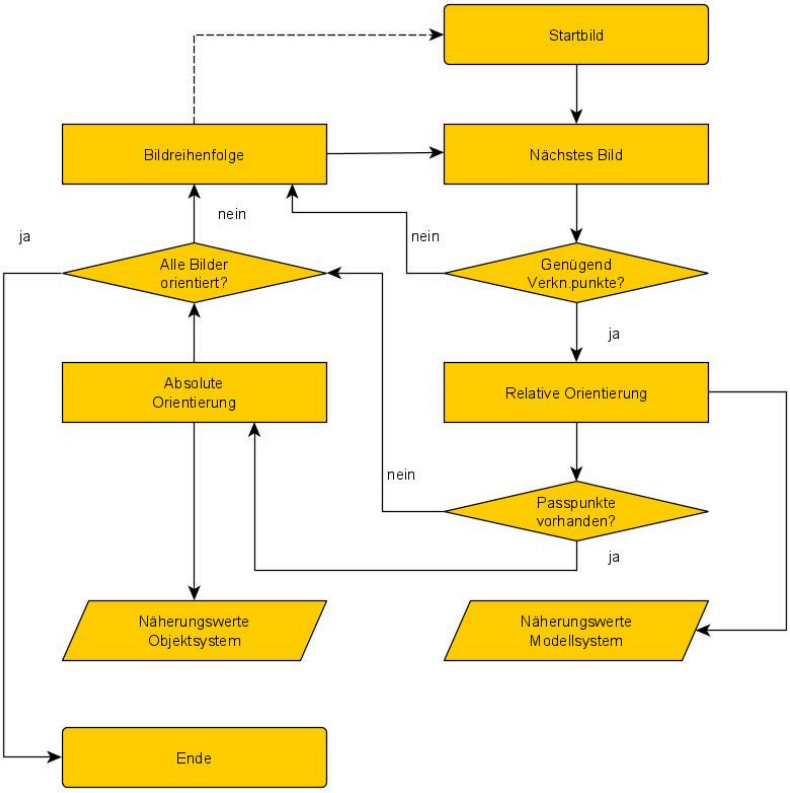


Abbildung 2: Quelle: Luhmann 2017: 370. Sukzessive Modellbildung

Anfangs wird das vorher als geeignet empfundene Startmodell relativ orientiert. Falls es bei dem Startmodell genügend Verknüpfungspunkte gibt, kann schon am Anfang eine absolute Orientierung erfolgen. Falls dies nicht der Fall ist, werden nacheinander Bilder mit ausreichend gemeinsamen Punkten an das beste Modell relativ orientiert. Wenn zu einem Zeitpunkt genug Passpunkte vorhanden sind, wird der Modellverband absolut orientiert. Als Ergebnis werden bei diesem Verfahren Näherungswerte für die gemessenen unbekannten Objektpunkte erlangt und zusätzlich lassen sich aus den Parametern der relativen und absoluten Orientierung die äußeren Orientierungen ableiten [Luhmann 2017: 370].

Nach dem Abschluss der iterativen Berechnungen kann schließlich mit der Bündelblockausgleichung begonnen werden. Als Grundlage der Bündelblockausgleichung dienen die Kollinearitätsgleichungen. Die Grundlage dieser Gleichungen bildet das Modell der Zentralprojektion im Raum.

Formel 1: Kollinearitätsgleichungen + Zeichenerklärung

$$x_i = x_h - c_k * \frac{r_{11} * (X_i - X_0) + r_{21}(Y_i - Y_0) + r_{31}(Z_i - Z_0)}{r_{13} * (X_i - X_0) + r_{23}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)} + dx$$

$$y_i = y_h - c_k * \frac{r_{12} * (X_i - X_0) + r_{22}(Y_i - Y_0) + r_{32}(Z_i - Z_0)}{r_{13} * (X_i - X_0) + r_{23}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)} + dy$$

X_i,Y_i,Z_i	- Objektkoordinaten	
X_i,Y_i	- Bildkoordinaten	
X_0,Y_0,Z_0	- Projektionszentrum 0	Äußere Orientierung
$r_{i,j}$	- Komponenten der Rotationsmatrix R	
c_k	- Kamerakonstante (=-z‘)	Innere Orien-tierung
x_h,y_h	- Koordinaten des Bildhauptpunktes H in S_B	
dx,dy	- Bildfehler	

Die Struktur dieser Gleichungen ermöglicht es, sämtliche gemessene Bildkoordinaten als Funktion jeglicher beteiligten Parameter (Unbekannte) darzustellen. Somit können diese Gleichungen nach der Linearisierung bei einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten ihren Einsatz als Verbesserungsgleichungen finden. Die Bestimmung der Unbekannten erfolgt bei der Bündelblockausgleichung iterativ als Funktion der beobachteten Bildkoordinaten. Die Anzahl der Unbekannten setzt sich aus den Objektkoordinaten, der äußeren Orientierung und der inneren Orientierung zusammen. Jeder Neupunkt benötigt dreidimensionale Objektkoordinaten, deshalb stellt jeder Neupunkt drei Unbekannte. Jedes verwendete Bild stellt sechs Unbekannte durch die äußere Orientierung und jede Kamera benötigt für die jeweilige innere Orientierung mindestens drei Parameter. Die Bündelblockausgleichung ist ein erweiterter Ansatz des räumlichen Rückwärtsschnittes und wird nach Taylor mithilfe der Näherungswerte linearisiert [Heipke 2017: 135 f.] [Luhmann 2017: 345 ff.].

Zur Vereinfachung werden in den Kollinearitätsgleichungen die Zähler mit k_x beziehungsweise (bzw.) k_y und die Nenner mit N subtrahiert. Zusätzlich wird die Kamerakonstante c_k mit $-z'$ ersetzt.

Formel 2: Vereinfachte Kollinearitätsgleichungen

$$x_i = x_h + z' * \frac{k_X}{N} + \mathrm{dx} \qquad y_i = y_h + z' * \frac{k_Y}{N} + \mathrm{dy}$$

Für die Ausgleichung ist es essenziell die Designmatrix aufzustellen. Somit müssen die Gleichungen nach den Unbekannten differenziert werden.

Formel 3: Differentialquotienten in Bezug auf den räumlichen Rückwärtsschnitt

$$\frac{\partial x_i}{\partial X_0} = \frac{z'}{N^2}(r_{13}k_X - r_{11}N) \qquad \frac{\partial y_i}{\partial X_0} = \frac{z'}{N^2}(r_{13}k_Y - r_{12}N)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial Y_0} = \frac{z'}{N^2}(r_{23}k_X - r_{21}N) \qquad \frac{\partial y_i}{\partial Y_0} = \frac{z'}{N^2}(r_{23}k_Y - r_{22}N)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial Z_0} = \frac{z'}{N^2}(r_{33}k_X - r_{31}N) \qquad \frac{\partial y_i}{\partial Z_0} = \frac{z'}{N^2}(r_{33}k_Y - r_{32}N)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial \kappa} = \frac{z'}{N}k_Y \qquad \frac{\partial y'}{\partial \kappa} = \frac{z'}{N}k_X$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial \omega} = \frac{z'}{N}\left\{\frac{k_X}{N}[r_{33}(Y_i - Y_0) - r_{23}(Z_i - Z_0)] - r_{31}(Y_i - Y_0) + r_{21}(Z_i - Z_0)\right\}$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial \varphi} = \frac{z'}{N}\left\{\frac{k_X}{N}[k_Y \sin\kappa - k_X \cos\kappa] - N\cos\kappa\right\}$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial \omega} = \frac{z'}{N}\left\{\frac{k_Y}{N}[r_{33}(Y_i - Y_0) - r_{23}(Z_i - Z_0)] - r_{32}(Y_i - Y_0) + r_{22}(Z_i - Z_0)\right\}$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial \varphi} = \frac{z'}{N}\left\{\frac{k_Y}{N}[k_Y \sin\kappa - k_X \cos\kappa] + N\sin\kappa\right\}$$

Zu den Differentialquotienten, die aus dem erweiterten Ansatz des räumlichen Rückwärtsschnittes stammen, müssen noch die Ableitungen der Objektkoordinaten folgen.

Formel 4: Differentialquotienten der Objektkoordinaten

$$\frac{\partial x_i}{\partial X_i} = -\frac{z'}{N^2}(r_{13}k_X - r_{11}N) \qquad \frac{\partial y_i}{\partial X_i} = -\frac{z'}{N^2}(r_{13}k_Y - r_{12}N)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial Y_i} = -\frac{z'}{N^2}(r_{23}k_X - r_{21}N) \qquad \frac{\partial y_i}{\partial Y_i} = -\frac{z'}{N^2}(r_{23}k_Y - r_{22}N)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial Z_i} = -\frac{z'}{N^2}(r_{33}k_X - r_{31}N) \qquad \frac{\partial y_i}{\partial Z_i} = -\frac{z'}{N^2}(r_{33}k_Y - r_{32}N)$$

Da in manchen Fällen die innere Orientierung unbekannt ist, wird sie ebenfalls als ein zu bestimmender Parameter eingeführt. Deshalb müssen die Gleichungen auch nach den Paramtern der inneren Orientierung differentiert werden [Luhmann 2017: 279 ff.: 346].

Formel 5: Differentialquotienten für die innere Orientierung

$$\frac{\partial x_i}{\partial x_h} = 1 \qquad \frac{\partial x_i}{\partial z'} = \frac{k_X}{N}$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial y_h} = 1 \qquad \frac{\partial y_i}{\partial z'} = \frac{k_Y}{N}$$

Wenn die Paramater der inneren Orientierung während der Bündelblockauslgeichung mitbestimmt werden, wird eine Simultankalibrierung durchgeführt. Werden nur photogrammetrische Beobachtungen verwendet, wird von einer Selbstkalibrierung gesprochen. Bei einer Simultankalibrierung muss das linearisierte funktionale Modell um diese Quotienten erweitert werden. Als Näherungswerte werden im Normalfall mit folgenden Werten gearbeitet [Heipke 2017: 192 f.] [Luhmann 2017: 355].

Kamerakonstante	c ≈ -f (Brennweite)
Bildhauptpunkt	$x_0^{'} \approx y_0^{'} \approx 0$
Radial-symmetrische Verzeichnung	$A_1 \approx A_2 \approx A_3 \approx 0$
Tangentiale und asymmetrische Verzeichnung	$B_1 \approx B_2 \approx 0$
Affinität und Scherung	$C_1 \approx C_2 \approx 0$

Zudem ist die Aufnahmekonfiguration und die Anordnung der Objektpunkte wichtig. Falls keine Rücksicht darauf genommen wird, können die Parameter der inneren Orientierung nicht signifikant und zuverlässig bestimmt werden. Zusätzlich können geodätische Beobachtungen miteingebunden werden. Falls diese verwendet werden, muss die Designmatrix mit den Differentialquotienten der jeweiligen Gleichungen angepasst werden. Die Gesamtzahl der Unbekannten kann durch folgende Formel bestimmt werden:

Formel 6: Anzahl der Unbekannten

$$u = u_P n_{Punkte} + u_B n_{Bilder} + u_k n_{kameras} (+u_{Datum})$$

Diese Formel enthält die Parameter der äußeren Orientierungen (6 Unbekannte pro Bild; u_B), die dreidimensionalen Koordinaten der Neupunkte (3 Unbekannte pro Neupunkt; u_P) und die Parameter der inneren Orientierung (0 oder mindestens 3 Unbekannte pro Kamera; u_k) [Luhmann 2017: 347].

Nachdem die Differentialquotienten für die Designmatrix aufgestellt worden sind, kann die Ausgleichung beginnen. Anfangs wird das linearisierte funktionale Modell aufgestellt.

Formel 7: Linearisiertes funktionales Modell

$$\underset{n,1}{\boldsymbol{l}} + \underset{n,1}{\boldsymbol{v}} = \underset{n,u}{A} * \underset{u,1}{\hat{x}}$$

Das Normalgleichungssystem mit der Normalgleichungsmatrix und dem Absolutgliedvektor wird folgend aufgestellt:

Formel 8: Normalgleichungssystem

$$\underset{u,u}{\boldsymbol{N}} * \underset{u,1}{\hat{x}} - \underset{u,1}{n} = \underset{u,1}{O} \qquad \text{Normalgleichung}$$

$$\underset{u,u}{\boldsymbol{N}} = \underset{u,n}{A^T} * \underset{n,n}{P} * \underset{n,u}{A} \qquad \text{Normalgleichungsmatrix}$$

$$\underset{u,1}{\boldsymbol{n}} = \underset{u,n}{A^T} * \underset{n,n}{P} * \underset{n,1}{I} \qquad \text{Absolutgliedvektor}$$

Mittels einer iterativen Ausgleichung werden die ausgeglichenen gekürzten Unbekannten bestimmt. Zu diesen Unbekannten erhält man ebenfalls die Kofaktormatrix und die Varianz-Kovarianz-Matrix [Foppe, 2009].

Formel 9: Ausgleichungsergebnisse

$$\underset{u,1}{\hat{x}} = \underset{u,u}{Q_{\hat{x}\hat{x}}} * \underset{u,1}{n} = \left(\underset{u,n}{A^T} * \underset{n,n}{P} * \underset{n,u}{A}\right)^{-1} * \underset{u,n}{A^T} * \underset{n,n}{P} * \underset{n,1}{I}$$

Ausgeglichene gekürzte Unbekannte

$$\underset{u,u}{Q_{\hat{x}\hat{x}}} = \underset{u,u}{\boldsymbol{N}}^{-1}$$

Inversion der Normalgleichungsmatrix

$$\underset{u,u}{\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{x}\hat{x}}} = {s_0}^2 * \underset{u,u}{Q_{\hat{x}\hat{x}}}$$

Varianz-Kovarianz-Matrix

Als Ergebnis einer Bündelblockausgleichung erhält man somit ausgeglichene 3D-Koordinaten der Objektpunkte und die Parameter der äußeren Orientierungen. Wurde während der Bündelblockausgleichung eine Simultankalibrierung durchgeführt, sind die Parameter der inneren Orientierungen ebenfalls im Ergebnis enthalten [Foppe, 2009] [Luhmann 2017: 346].

3.3 Structure-from-motion-Verfahren

Das Structure-from-motion-Verfahren ist, wie im zweiten Kapitel erwähnt, ein Verfahren, das eine beliebige Anzahl zugehöriger Bilder orientieren und kalibrieren kann. Dieses Verfahren ist die Grundlage für viele Programme, die aus Bildern eine Punktwolke und somit später ein Modell entwickeln. In der Nahbereichsphotogrammetrie hat dies zu einem Schub in den Anwendungsbereichen geführt, da dies viele neue Möglichkeiten gebracht hat.

Verwendet wird dieses Verfahren bei nicht signalisierten und nicht orientierten Bildern. Die Voraussetzungen des Verfahrens sind im Gegensatz zu früheren Verfahren relativ gering. Wichtig ist, dass das Objekt eine erkennbare Oberflächenstruktur besitzt, die Bildüberdeckung hoch angesetzt wird und die Kamera während der Aufnahmen in sich stabil bleibt.

Das Verfahren hat viele interne Schritte bis das gesuchte Ergebnis vorhanden ist. Es besteht aus einer Kombination von Bildbearbeitungsverfahren, robusten Orientierungsmethoden, Bündelblockausgleichung mit Simultankalibrierung, Stereobildmessung und Punktwolkenverarbeitung. Die einzelnen Schritte werden nachfolgend erklärt. Dazu dient als Anhalt die Darstellung.

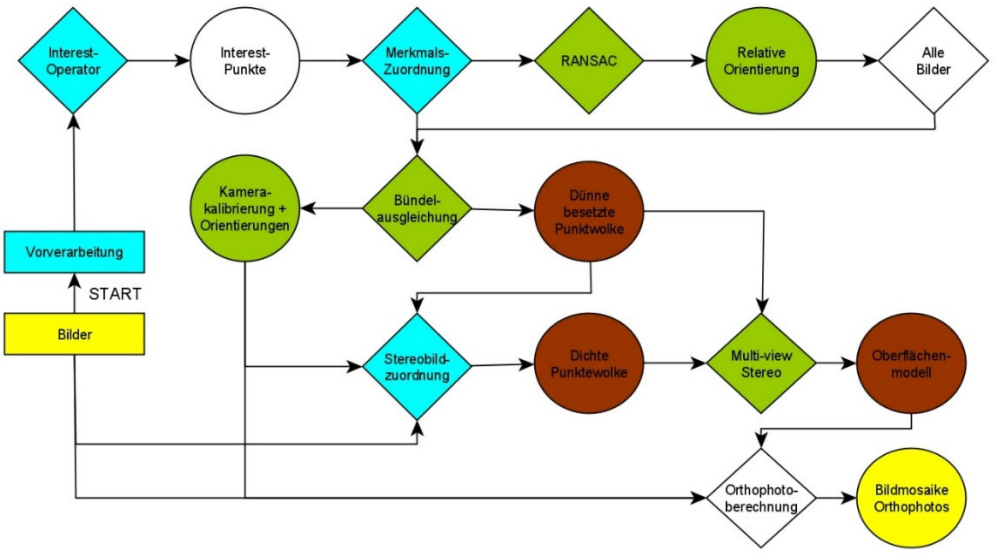


Abbildung 3: Quelle: Luhmann 2017: 491. Schema des Structure-from-motion-Verfahrens

Nachdem die Bilder in das Programm geladen werden, startet die Software mit der Vorverarbeitung der Bilder. Hierbei werden die Bilder verbessert und die Auflösung wird reduziert. Dies geschieht durch Bildpyramiden [Luhmann 2017: 491].

Bildpyramiden sind Bildfolgen, bei denen der Nachfolger eines Bildes verkleinert ist. Meist wird hierbei um den Faktor 2 verkleinert. Bevor dies durchgeführt wird, muss das Bild durch einen Filter geglättet werden. Durch diese Schritte nehmen die Informationen des Bildes ab und kleinere Bildstrukturen werden eliminiert. Die gesamte Datengröße der Bildpyramide beträgt etwa 30 Prozent mehr als das Originalbild. Bildpyramiden werden zur hierarchischen Mustererkennung benutzt und starten bei der geringsten Auflösung. Hier werden grobe Bildmerkmale gesucht. Diese groben Bildmerkmale werden dann in der nächsthöheren Auflösung erneut untersucht und verfeinert [Luhmann 2017: 414 f.].

In der Vorverarbeitung werden die Bilder mit einem Interest-Operator durchlaufen. In dieser Arbeit wurden in den Programmen SIFT-Operatoren verwendet. Dieser SIFT-Operator wird nach der allgemeinen Erklärung der Interest-Operatoren im Einzelnen erläutert. Interest-Operatoren sind Algorithmen zur Erkennung markanter Bildstellen. Diese markanten Bildstellen sind Anwärter für mögliche Bild-zu-Bild-Zuordnungen. Untersucht werden hierbei Grauwertmuster, die in einem Bereich einzigartig sind und auch im nächsten Bild etwa gleich auffindbar sind. Für jede Bildposition berechnen diese Operatoren eine oder mehrere Kenngrößen, die später für die Zuordnung verwendet werden. Es gibt verschiedene Kriterien für die Anwärter und Anforderungen an einen optimalen Interest-Operator.

Wichtig ist, dass der Operator die Anwärter vom Hintergrund unterscheiden kann und dass der Anwärter lokal gesehen einzigartig ist, sodass es keine falsche Verknüpfung der Bilder gibt. Zudem sollte der Operator invariant gegenüber Verzerrungen sein. Demnach sollte der Interest-Operator keine Probleme bei der Zuordnung haben, falls eine Rotation passiert ist. Eine weitere Anforderung ist die Robustheit. Hierbei sollte der Operator unempfindlich gegen Rauschen reagieren. Die herausgefundenen Anwärter sollten ebenfalls unterscheidbar zu den anderen Anwärtern sein, da sonst falsche Verknüpfungen stattfinden könnten. Die letzte Anforderung ist die Eignung zur weiteren Bildanalyse. Demnach müssen die Interest-Werte interpretierbar sein [Luhmann 2017: 478].

Es gibt verschiedene Kenngrößen für das Bestehen einer gut erkennbaren Struktur. In Verbindung dazu werden die verschiedenen Operatoren genannt. Eine Möglichkeit für eine Kenngröße wäre das Berechnen der Autokorrelationsfunktion beziehungsweise Autokovarianzfunktion eines Bildfensters auf die Umgebung. Diese Berechnung enthält ein Maß für die lokale Eindeutigkeit der untersuchten Struktur.

Hierbei zeigt sich eine markante Bildstruktur durch ein signifikantes Punktmaximum. Diese Bildstruktur darf sich in der unmittelbaren Umgebung nicht wiederholen.

Eine weitere Kenngröße ist die lokale Einzigartigkeit. Diese wird durch eine verschobene Kopie eines Bildfensters berechnet. Diese Kopie wird durch Kleinste-Quadrate-Schätzung auf sich selbst abgebildet. Wie präzise das Grauwertfenster dann verschoben wurde, ist aus der Kovarianzmatrix zu entnehmen. Falls eine markante Struktur vorhanden ist, wird die Fehlerellipse klein und kreisförmig. Mit dieser Kenngröße arbeiten der Förstner-Operator und der Harris-Operator.

Mit der nächsten Kenngröße arbeiten der Moravec-Operator, der SURF-Operator und der SIFT-Operator. Der SIFT-Operator wird im nächsten Teil näher erläutert. Diese Operatoren arbeiten mit den Gradientensummen und den Gradientenhistogrammen. Treten große Gradientensummen in allen Richtungen auf, gibt dies Aufschluss auf markante punktförmige Merkmale. Durch dieses Verfahren werden einzelne Kanten ohne Strukturveränderung im Verlauf gelöscht.

Durch lokale Grauwertvergleiche gibt es bei dem SUSAN-Operator und dem FAST-Operator eine weitere Kenngröße. Hierbei werden die Grauwerte innerhalb eines Bildfensters untersucht. Wenn sich die Anzahl der ähnlichen Werte unter einem Schwellenwert befindet, handelt es sich um eine markante punktförmige Bildstruktur [Luhmann 2017: 478 f.].

Speziell bei den genutzten Programmen wird der SIFT-Operator verwendet. SIFT steht für „**S**cale **I**nvariant **F**eature **T**ransform“ und bedeutet übersetzt skaleninvariante Merkmalstransformation. Dieser Operator detektiert markante Punkte inklusive einem zugehörigen Merkmalsvektor, der als Deskriptor beschrieben wird. Er arbeitet mit einem vierstufigen Verfahren. In der ersten Stufe werden die Kanten und deren Extrema in Bildpyramiden bestimmt. Hierbei wird das Bild vorverarbeitet, also in eine Bildpyramide gebracht und in jeder Stufe der Bildpyramide werden verschiedene Gaußfilter zur Glättung verwendet. Durch diesen Schritt entsteht ein sogenannter Multiskalenraum [Luhmann 2017: 483]. Durch DoG-Filter („Difference-of-Gaussian“) werden Kanten (Gradienten) entnommen. Ein DoG-Filter beinhaltet die Subtraktion zweier Stufen aus dem Multiskalenraum. In den benachbarten DoG-Bildern werden nach lokalen Extrema gesucht. Dies geschieht durch die Bestimmung der minimalen und maximalen DoG-Werte aus den Nachbarn. Hierzu zählen die unmittelbaren acht Nachbarn in der gleichen Stufe (N8-Nachbar) und die 3x3 Nachbarn aus der vom DoG-Bild aus gesehen oberen und unteren Stufe.

Diese lokalen Extrema sind Punkte, die als initiale Merkmale gelten (Keypoints) und in den nächsten Schritt übernommen werden [Luhmann 2017: 445].

Im zweiten Schritt werden Merkmalspunkte lokalisiert. Die übernommenen Anwärter werden in der Anzahl verringert. Wenn ein zu geringer Kontrast oder die Anwärter an Grauwertkanten bestehen, werden diese gelöscht. Dies geschieht durch die Analyse des Gradientenbetrags und der Krümmung der Grauwertoberfläche aus der Hesse-Matrix.

Stufe drei des SIFT-Operators ist die Bestimmung der Hauptrichtungen der Gradienten. In dieser Stufe wird eine Umgebung der zuvor gewählten Merkmale definiert. In dieser Umgebung wird für jedes Pixel die Gradientenrichtung und der Gradientenbetrag berechnet. Als nächstes wird ein Histogramm angefertigt, in dem die Gradientenrichtungen und -beträge in 10° Schritten eingetragen werden. Im Histogramm werden alle Richtungen bis 360° eingetragen. Um mit diesem Histogramm weiterzuarbeiten werden die Gradienten gewichtet und in das Histogramm aufaddiert. Die Gewichtung erfolgt umgekehrt proportional mit der Distanz zum Zentrumspixel. Ziel des Schrittes ist es, die Hauptrichtung des Gradienten zu bestimmen. Deshalb wird der Hauptorientierungswinkel des Merkmals aus der Histogrammklasse mit der größten Anzahl entnommen.

Zuletzt wird im vierten Schritt der Deskriptor (der zugehörige Merkmalsvektor) abgeleitet. Hierzu wird ein Bereich von 16x16 Pixeln bestimmt. Dieser Bereich wird in 4x4 Blöcke geteilt. In diesen Blöcken werden erneut die Gradientenbeträge und Gradientenrichtungen berechnet. Die berechnete Richtung wird auf den vorher ermittelten Hauptorientierungswinkel bezogen. Dies ist wichtig, da es sonst möglich ist, dass keine Invarianz gegenüber einer Rotation entsteht. Die Gewichtung der Gradientenrichtungen geschieht auf derselben Weise wie in Schritt drei. Diese Richtungen werden erneut in ein Histogramm gegeben. In diesem Histogramm werden sie in 8 Klassen eingeteilt, die einen 45° Abstand zueinander besitzen. Aus diesem letzten Histogramm entstehen 128 Merkmale (16 Blöcke á 8 Klassen), die im SIFT-Operator als normierter SIFT-Merkmalsvektor bezeichnet werden [Luhmann 2017: 484].

Allgemein lässt sich sagen, dass im SIFT-Operator Grauwertecken meist nicht gut erkannt werden. Es werden eher fleckenartige Merkmale, die im nächsten Bild in ähnlicher Weise vorkommen, erkannt. Der SIFT-Operator wird meist in Structure-from-motion-Programmen verwendet, da er sich gut für die Zuordnung von Bildern mit einem verschiedenen Maßstab, einer unterschiedlichen Rotation oder eine andere Perspektive eignet.

Nachdem durch den Operator die Merkmalswerte berechnet wurden, werden die Merkmale im nächsten Schritt zugeordnet. Hierbei gibt es verschiedene Möglichkeiten. Das Programm Meshroom verwendet die Methode ANN („**A**pproximate **N**earest **N**eighbor matching“). Anfangs wird mit einem Bildpaar gestartet, das durch einen RANSAC-Algorithmus relativ orientiert wird. RANSAC bedeutet „**ran**dom **sa**mple **c**onsensus“ und ist ein zufallsbasierter Such- und Optimierungsprozess, der außerordentlich beständig gegenüber Ausreißern ist. Der Datensatz kann auch bis zu 80% aus Ausreißern bestehen, dennoch ist es möglich diesen Prozess erfolgreich durchzuführen. RANSAC beruht auf einer iterativen Berechnung der Funktion mit der kleinsten benötigten Anzahl an Beobachtungen. Es wird zufällig ausgewählt, welche Beobachtungen verwendet werden. Vor der Berechnung muss eine Toleranz angegeben werden. Falls die Berechnung innerhalb dieser Toleranz liegt, wird diese in eine Konsensgruppe eingeteilt. Die Berechnungen mit der Mindestanzahl an Beobachtungen werden dann in jeder Kombination durchgeführt und entweder der bestehenden Konsensgruppe oder einer neuen Konsensgruppe zugeteilt. Nachdem alle Möglichkeiten berechnet wurden, wird die Konsensgruppe mit den meisten Kombinationen als beste Lösung anerkannt. Die Beobachtungen, die sich in den anderen Konsensgruppen befinden, werden als Ausreißer angenommen und gelöscht. Wichtig bei dem RANSAC-Verfahren ist die Wahl des Toleranzbereiches. Ist dieser zu groß gewählt, gibt es zu viele Punkte und Lösungen, die das Ergebnis ungenauer werden lassen. Zudem sollte ein Abbruchkriterium für die Maximalanzahl in einer Konsensgruppe vergeben werden, da sonst die Zeit für die Berechnung hoch sein kann. Das RANSAC-Verfahren wird in der Photogrammetrie und in Computer Vision häufig für die relative Orientierung, die Zuordnung von Bildpunkten, zur Merkmalserkennung in Punktwolken und zur Berechnung von geometrischen Ausgleichselementen verwendet [Luhmann 2017: 131 f.] [Heipke 2017: 205 f.].

Nachdem die relative Orientierung mittels RANSAC bestimmt wurde, werden alle Bilder nacheinander in das Modell orientiert und schließlich mit einer Bündelblockausgleichung, wie oben erklärt, ausgeglichen. Die ausgeglichenen Objektkoordinaten ergeben eine dünne Punktwolke. Da ein dichteres Modell erzeugt werden soll, müssen Stereobildzuordnungen erfolgen. Hierzu verwenden viele Programme ein Verfahren namens semi-globales Matching. Hierbei ist das Ziel, für jedes Pixel in einem Bild einen homologen Punkt im Nachbarbild zu erkennen. Das semi-globale Matching besteht aus dem Addieren und aus dem Vergleich von bestimmten Werten.

Die Operationen werden durchgängig gleich durchgeführt, ohne dass für jedes Pixel einzeln entschieden werden muss. Aus diesem Matching wird für jedes Stereopaar eine dichte Punktwolke gebildet [Heipke 2017: 250 ff.]. Diese Punktwolken werden zu einem gesamten Oberflächenmodell verschmolzen. Die Verschmelzung erfolgt durch Multi-View Stereo (MVS). MVS ist ein Verfahren, indem Stereobildkombinationen in einem orientierten Bildverband gebildet werden und diese eine Bildzuordnung erhalten. Die entstehenden Punktwolken liegen somit in einem gemeinsamen Koordinatensystem vor und können dann leicht verschmolzen werden. Nach der Verschmelzung liegt ein Oberflächenmodell des gesamten Objekts vor. Somit wird aus einem großen Bildverband letztlich ein 3D-Modell. Zudem kann, nachdem die Bilder orientiert worden sind, auch aus den einzelnen Bildern Orthophotos erstellt werden [Luhmann 2017: 492: 502].

4 Aufnahme mit einer Kamera

4.1 Verfahrensbeschreibung

Bevor die photogrammetrische Aufnahme begann, wurden verschiedene Aufnahmegeräte mit unterschiedlichen aufzunehmenden Gegenständen getestet. Getestet wurden ein Mobiltelefon (Samsung Galaxy S9 mit 12 Megapixeln) und eine Digitalkamera (Panasonic Lumix DC-FZ72). Die Gegenstände, die aufgenommen wurden, waren in ihrer Beschaffenheit verschieden. Als ersten Test wurde ein leicht glänzendes Spielzeug genommen, sodass erkannt werden konnte, inwiefern die Aufnahme verwertbar ist und wie das Programm Verknüpfungspunkte auf dem glänzenden Material finden konnte. Als zweiter Gegenstand wurde ein neuer Turnschuh in schwarz-weiß verwendet. Dieser Test sollte zeigen wie das Programm und die Kamera mit dem Material und den eventuell fehlenden Verknüpfungspunkten zurechtkommt. Als letzter Gegenstand wurde eine Motorradbatterie verwendet. Dies war ebenfalls ein schwieriger Test, da die Batterie einen Quader darstellt, bei dem Rück- und Vorderseite relativ gleich aussehen.

Abbildung 4: aufgenommene Motorradbatterie

Abbildung 5: Vorder- und Rückseite des Batteriemodells

Anhand des Modells ist erkennbar, dass die Kanten nicht gut rekonstruiert werden konnten und die Rückseite ein zweites Mal abgebildet ist. Das Problem an diesem Gegenstand war die einfache Geometrie und die Oberflächenbeschaffenheit des Gegenstandes. Nach mehreren Tests und etlichen Aufnahmen kam das Ergebnis zustande, dass die Bilder der Digitalkamera ein besseres Modell abgeben als die Bilder des Mobiltelefons. Somit wurde entschieden, dass der Motorblock primär mit der Digitalkamera, zudem aber auch zur Sicherheit und zum Vergleich noch mit dem Smartphone, aufgenommen wird.

Die photogrammetrische Aufnahme des Motorblocks wurde mit einer Digitalkamera durchgeführt. Die Digitalkamera ist eine Panasonic Lumix DMC-FZ72 mit 16,1 Megapixeln. Demnach bietet sie ein Bildformat mit 4608x3456 Pixeln.

Der gesamte Bildverband wurde mit den gleichen Einstellungen aufgenommen. Während der Aufnahmen wurde ebenfalls kein Blitz verwendet.

Kamera	
Kamerahersteller	Panasonic
Kameramodell	DMC-FZ72
Blendenzahl	F/2.8
Belichtungszeit	1/25 Sek.
ISO-Filmempfindlichkeit	ISO-400
Lichtwert	+0.7 Schritt(e)
Brennweite	4 mm
Maximale Blende	2.96875
Messmodus	Mehrfeld
Abstand	
Blitzlichtmodus	Kein Blitz, obligatorisch
Blitzlichtenergie	
35mm Brennweite	20

Abbildung 6: Kameraeinstellungen

Die Aufnahmekonfiguration wurde im Vorfeld an den Testgegenständen erprobt. Hierbei ist wichtig, dass die Bilder viel Überlagerung bieten und die Programme diese somit besser und mit weniger Zeit verknüpfen können.

4.2 Durchführung

Vor dem Start der Aufnahme wurde der Motorblock auf dem Tisch des Messarms im Raum 318 Haus 2 platziert. Um Reflexionen am Motorblock zu minimieren, wurden die Vorhänge leicht zugezogen. Da ein Programm ein optimales Startmodell zur Berechnung benötigt, wurde anfangs darauf geachtet, dass die ersten zwei Bilder eine starke Überlappung vorweisen und zudem auch eine große Fläche des Objekts einnehmen. Um eine Vorstellung des Motorblocks zu bekommen, ist in der nächsten Darstellung der Motorblock gezeigt.

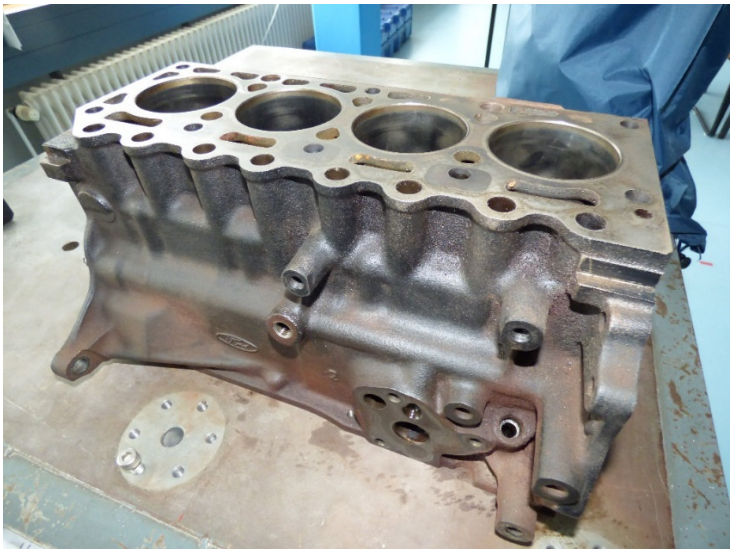


Abbildung 7: Motorblock

Die Bilder wurden annähernd in verschiedenen Ebenen aufgenommen. Das heißt, dass der Motorblock als Erstes aus einer gleichbleibenden Höhe vollumfassend (360°) fotografiert wurde. Danach wurde dieser wieder komplett aus einer erhöhten Position aufgenommen. Dies wurde wiederholt bis die letzten Fotos eine Draufsicht bieten. Nach der Draufsicht wurden nochmal wichtige kleine Details aufgenommen, sodass diese später besser dargestellt werden können. Die Gesamtzahl der Bilder beträgt 127, wovon später alle 127 in den Programmen Meshroom und Agisoft Photoscan verwendet worden sind.

Die aufgenommenen Bilder werden, wie schon erwähnt, mit Meshroom und Agisoft Photoscan ausgewertet. In beiden Programmen wird das Structure-from-motion-Verfahren angewendet. Der Unterschied der Programme liegt in der Preisklasse und an der interaktiven Benutzung. Meshroom ist kostenlos, aber bietet nicht den gleichen Bearbeitungsraum wie Agisoft Photoscan. Die Modelle wurden mit beiden Programmen berechnet und werden im nächsten Kapitel „Ergebnisse“ dargestellt und im Kapitel „Vergleich der Ergebnisse“ mit dem Scanmodell verglichen.

Nachdem die Bilder aufgenommen wurden, wird der gesamte Bildverband in das jeweilige Programm geladen. Das Structure-from-motion-Verfahren wurde im Vorhinein schon erklärt, deshalb werden die einzelnen Schritte zwar nochmals angerissen, aber nicht vollständig beschrieben. Die Schritte werden im Folgenden anhand des Programms Meshroom gezeigt.

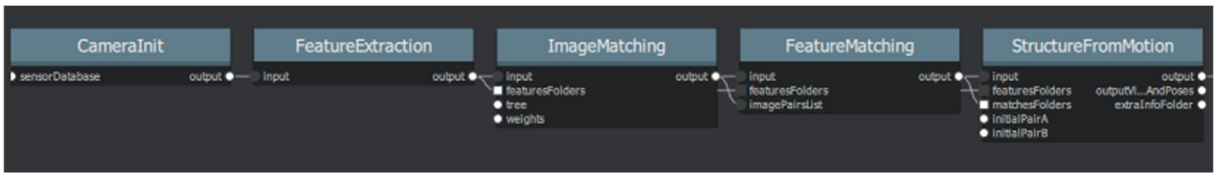


Abbildung 8: Berechnungsschritte Meshroom Teil 1

Im ersten Schritt werden die Kameras anhand der einzelnen Bilder initialisiert. Danach beginnt die Merkmalserkennung. Hierbei wird der Interest-Operator festgelegt. In diesem Fall ist es der SIFT-Operator. Als nächstes erfolgt die Bildzuordnung, in der die Maximalanzahl an Deskriptoren einstellbar sind. Im nächsten Schritt wird der RANSAC-Algorithmus angewandt und die relative Orientierung bestimmt. Darauf folgt die Bündelblockausgleichung im Structure-from-motion-Verfahren. Hieraus werden die Kamera-Kalibrierungen, Orientierungen und eine Punktwolke erhalten.

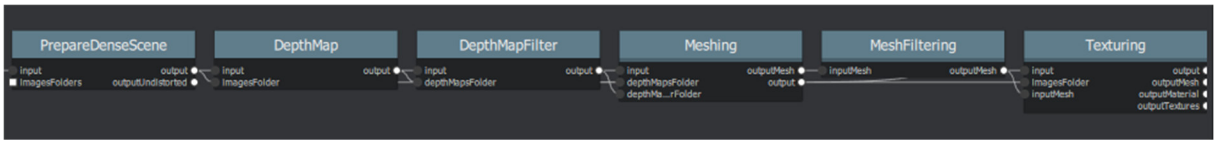


Abbildung 9: Berechnungsschritte Meshroom Teil 2

Der zweite Teil der Berechnungsschritte richtet sich auf das Erschaffen eines Oberflächenmodells. Anfangs wird eine Rasterdatei erstellt, die zur Grundlage der Erstellung der sogenannten „depthmap“ (Tiefenkarte) dient. Nach der Tiefenkarte erfolgt die Vernetzung der Punkte und das Texturieren des entstandenen Netzes.

Nachdem das Programm Meshroom die Berechnungsschritte durchgeführt hat, wurde das entstandene Modell als STL-Datei exportiert und per Drag & Drop in das Programm MeshLab geladen. Hier wurden falsche Punkte, die beispielsweise durch Reflexionen entstehen, gelöscht und das Modell wurde geglättet und bereinigt. Nach dem Bearbeiten des Modells wurde das Objekt mit dem Programm netfabb Basic skaliert. Hierzu wird das Modell in das Programm geladen. Am Objekt wird eine Vergleichsstrecke definiert. Die Vergleichsstrecke wird aus dem Abstand zweier Ebenen am Motorblock gebildet. In diesem Fall beträgt diese Strecke etwa 37,8 Zentimeter. Die Strecke aus dem photogrammetrischen bestimmten Modell mit Meshroom beträgt in den Daten 2,27 Zentimeter und muss somit um den Faktor 166,68 skaliert werden. Nach der Skalierung wird das Modell exportiert und kann zum Vergleich freigegeben werden.

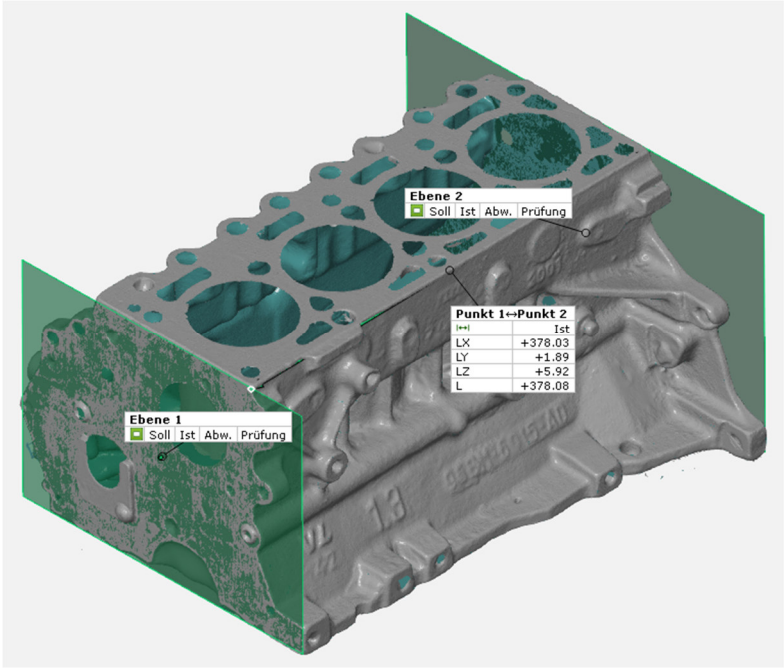


Abbildung 10: Abstand der Ebenen als Skalierungsgrundlage

4.3 Ergebnisse

Das Ergebnis besteht aus zwei Modellen und deren Vergleich. Die ersten Abbildungen des Motorblocks sind die Modelle des Programms Meshroom. Die Gesamtansicht des Modells zeigt, dass das Modell dem Original ähnlich sieht. Abbildung 13 zeigt eine detaillierte Ansicht des Motorblocks. Dort ist erkennbar, dass die tiefen Details am Motorblock schlechter berechnet und dargestellt sind.

Abbildung 11: Modellansichten – Meshroom

In den nächsten Abbildungen werden die Ergebnisse des Programms Agisoft Photoscan dargestellt. Im Vergleich mit dem anderen Modell ist hier sichtbar, dass die Kanten besser geglättet wurden.

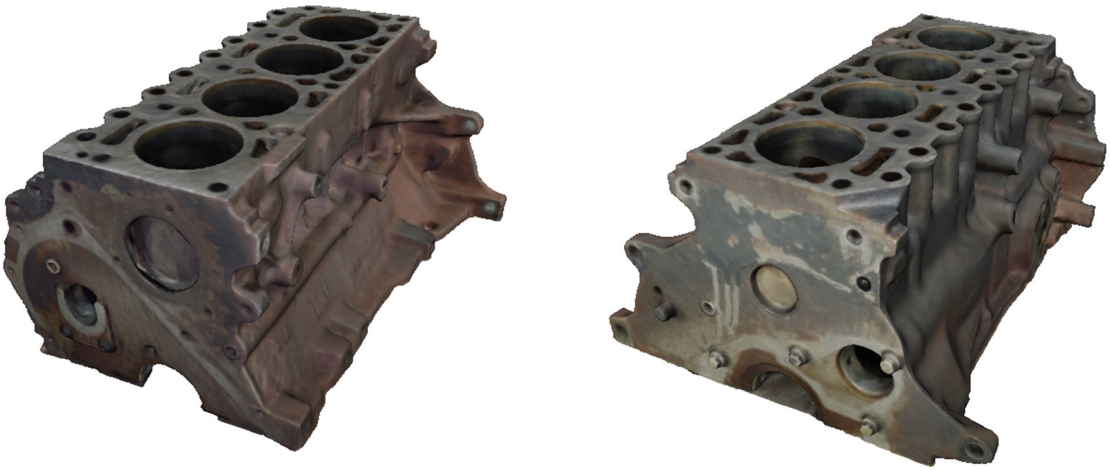


Abbildung 12: Modellansichten – Agisoft Photoscan

Im Vergleich der beiden Detailansichten sind deutliche Unterschiede an den Details des Motorblocks zu erkennen. Zudem ist die Texturierung bei Agisoft besser umgesetzt worden. Insgesamt sind beide Modelle gut gelungen, wobei Agisoft Photoscan als kostenpflichtige Software in der Handhabung und Berechnung das bessere Programm ist. Meshroom bietet jedoch ein Structure-from-motion-Programm, das für alle kostenlos zugänglich ist.

Abbildung 13: Detailansicht Meshroom (links) ---- Agisoft Photoscan (rechts)

Um die einzelnen Modelle in sich zu untersuchen, wurde die Ebenheit von drei ausgewählten Ebenen in GOM Inspect berechnet und in den nächsten Abbildungen dargestellt. Hierbei ist erkennbar, dass die angezeigte Ebenheit bei dem Modell, das in Meshroom erzeugt wurde, besser ist, als die des anderen Modells. Dies könnte an der Punktauswahl während der Best-Fit-Ausgleichung im Programm liegen. In den Abbildungen ist zu erkennen, dass sich in der rechten Abbildung viel mehr Punkte oberhalb der Ebene befinden. Alle Abbildungen sind im Anhang vergrößert dargestellt, sodass die Bezeichnungen und Werte gelesen werden können.

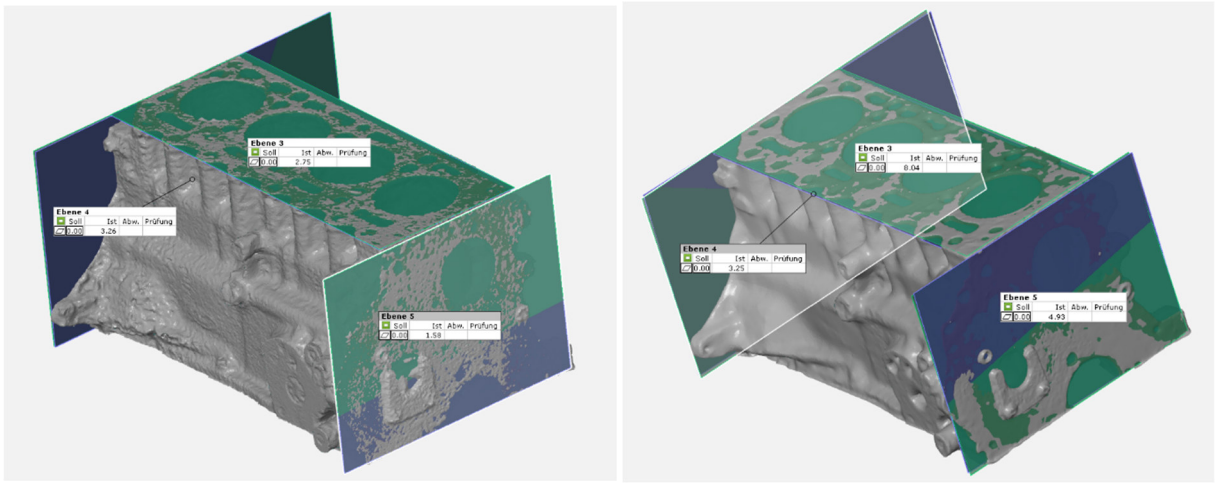


Abbildung 14: Ebenheitsüberprüfung in GOM Inspect (links: Meshroom; rechts: Agisoft Photoscan)

Zuletzt werden diese beiden Modelle überlagert, sodass daraus die Abweichungen untereinander sichtbar werden. Hierbei werden die Modelle in MeshLab geladen und über die „Align“-Funktion überlagert. Aus dieser Vernetzung werden dann die Abstände berechnet und als Qualität abgespeichert. Diese Qualität kann dann auf dem Modell angezeigt werden. Das Programm zeigt keine Legende. Diese wird erst aus den Einstellungen der Farben klar, da dort die Grenzen der Abweichungen geändert werden können. In diesem Fall sind sie auf fünf Millimeter eingestellt. Demnach bedeuten rote und blaue Stellen, dass die Modelle mindestens fünf Millimeter zueinander abweichen. In diesem Fall zeigt die rote Farbe, eine positive Differenz und die blaue Farbe eine negative Differenz. Grüne Stellen zeigen, dass sich die Modelle nur in wenigen Millimetern unterscheiden. Erkennbar ist, dass sich die Modelle in den Ebenen an vielen Stellen gleichen. An den herausstehenden Details zeigen die Modelle im Vergleich einen deutlichen Unterschied. Zudem werden die unteren Kanten rot dargestellt, da an diesen Stellen die Modelle per Hand bereinigt worden sind und somit an manchen Stellen keine Übereinstimmungen auffindbar waren.

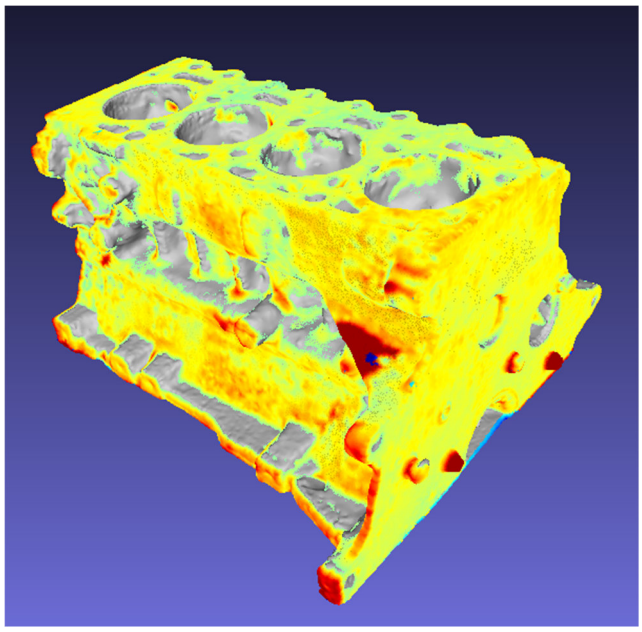


Abbildung 15: Vergleich Meshroom - Agisoft Photoscan

5 Aufnahme mit einem FARO-Messarm

5.1 Verfahrensbeschreibung

Nachdem der Motorblock in zwei Varianten photogrammetrisch aufgenommen wurde, konnte der Motorblock mit dem in der Hochschule vorhandenen Messarm der Firma Faro als Scan gemessen werden. Der Koordinatenmessarm besteht aus einem Sensorkopf und zwei langen Armen. Die drei Bestandteile werden jeweils durch zwei Gelenke verknüpft, sodass der Messarm sechs Freiheitsgrade abdeckt. Bei diesen Messungen wurden zwei Sensorköpfe verwendet. Für den Scan wurde ein Laserlichtschnittsensor der Firma Faro verwendet. Ein Laserlichtschnittsensor ist der einfachste Fall der Streifenlichtprojektion. Die Orientierung des Scanneraufsatzes erfolgt durch die mechanische Vorrichtung des Messarms [Heipke 2017: 130]. Nach dem Scan wurden verschiedene geometrische Elemente mit einem taktilen Taster (Kugel) aufgenommen. Die Aufnahme und die spätere Bearbeitung wurden mit dem Programm GeomagicControl 2014 durchgeführt.

Abbildung 16: Faro Messarm inklusive Scanaufsatz

5.2 Durchführung

Anfangs muss der Messarm kalibriert werden, indem die Armlängen und die Offsets der Winkelencoder neu bestimmt werden. Hierzu werden zwei Kompensationen durchgeführt; die Kugelkompensation für den taktilen Taster und die Ebenenkompensation für den Scanaufsatz.

Name	X	Y	Z	A	B	C	2 Sigma	Max. Fehler
Lasermes...	-34,611821	1,0478372	175,15307	99,495857	-100,47672	100,02501	0,075299722	0,17662744

Abbildung 17: Kalibrierung des Messarmes + Ergebnis

Nach der Kompensation wurde die Scan-Aufnahme gestartet. Hierzu muss der Scanaufsatz immer in einem bestimmten Abstand vom Objekt gehalten werden. Der Motorblock wurde in mehreren Schritten aufgenommen. Von jeder Seite wurde ein Scan durchgeführt und an den Scan der jeweils letzten Seite angehangen. Nachdem alle Seiten aufgenommen wurden, muss das Modell betrachtet werden, sodass erkennbar ist, an welchen Stellen erneute Scans durchgeführt werden müssen.

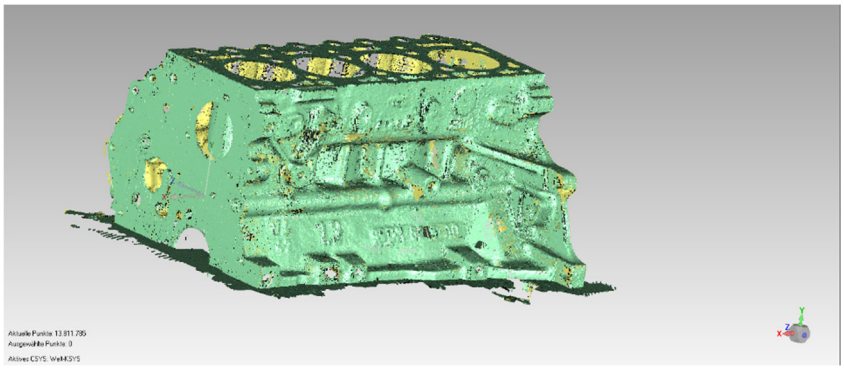


Abbildung 18: Erste Daten des Motorblockscans

Nachdem der gesamte Motorblock gescannt wurde, beginnt die Bearbeitung des Scans in dem Programm Geomagic Control 2014. Zum Start werden die Punkte gleichmäßig reduziert und das Rauschen wird verringert. Hierbei wird zudem beispielsweise das Objekt geglättet und Löcher werden geschlossen. In der nächsten Abbildung ist die Aktion „Löcher schließen“ abgebildet. Sichtbar sind die Kanten, die das Programm gefunden hat (grün). Alle Löcher wurden durchgesehen und falls nötig geschlossen.

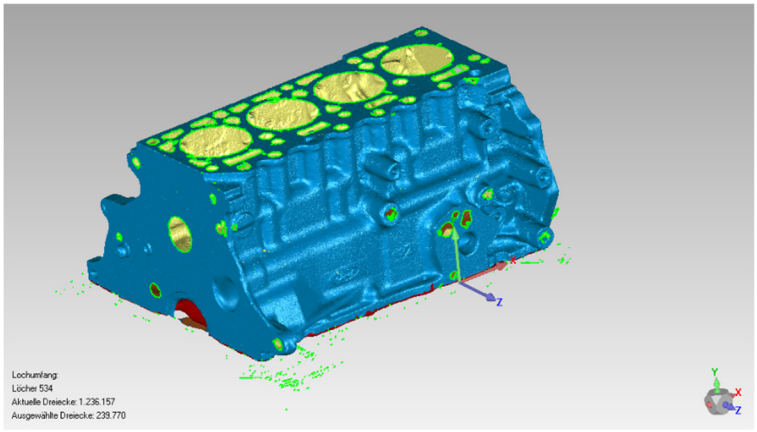


Abbildung 19: Schließen der Löcher

Nachdem der Scan vollständig bereinigt wurde, wurden verschiedene geometrische Elemente mit dem taktilen Taster bestimmt. Diese werden dann mit dem Scan verglichen und später auch als Grundlage für einen Vergleich mit den photogrammetrisch bestimmten Modellen. Es wurden vier Ebenen und acht Kreise angetastet.

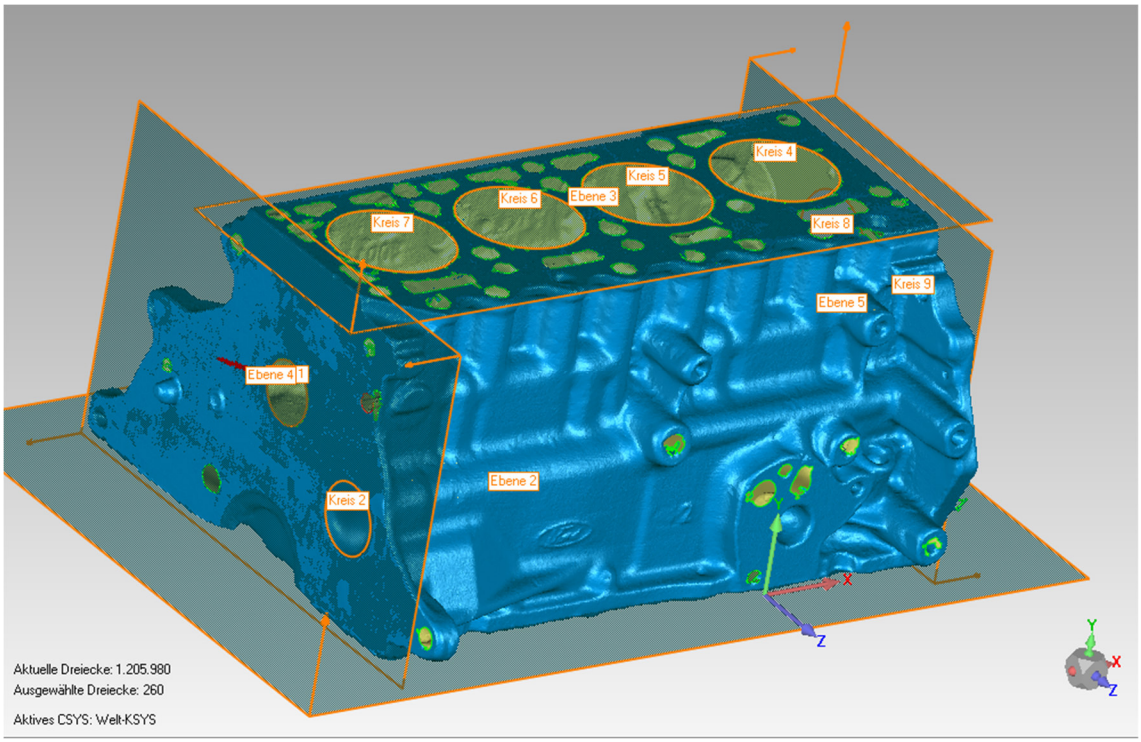


Abbildung 20: Geometrische Elemente im Scanmodell

5.3 Ergebnis

Als Ergebnis werden einige geometrische Elemente mit dem Scan verglichen und das Gesamtmodell wird ebenfalls dargestellt. Die einzelnen Parameter der Kreise und Ebenen werden im Anhang aufgezeigt. Um das Modell besser sichtbar zu machen, wurde die Innenseite anders als die Außenseite eingefärbt.

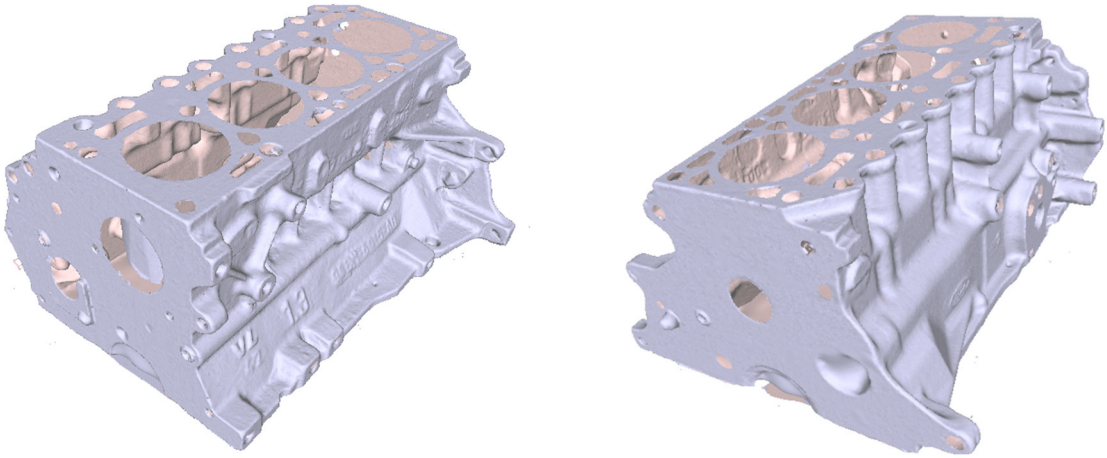


Abbildung 21: Modellansicht Scan

In den nächsten Abbildungen werden die Ebenen inklusive der Ebenheit des Scans und die Feature-Übersicht mit den geometrischen Elementen (Kreise) dargestellt. Hierbei werden die Kreismittelpunkte und die Durchmesser unter den Bezeichnungen aufgezeigt. Mit den Kreisdurchmessern kann der spätere Vergleich durchgeführt werden.

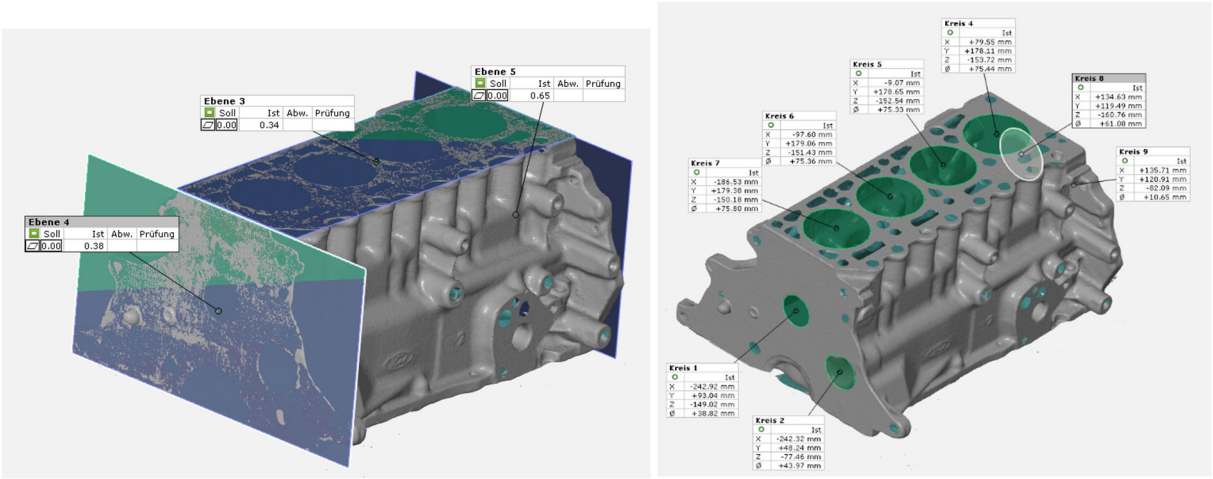


Abbildung 22: Ebenheitsüberprüfung des Scanmodells mit GOM Inspect (links) + Erstellung der geometrischen Elemente (rechts)

Um zu erkennen, ob der Scan gute Ergebnisse geliefert hat, werden die zuvor bestimmten Kreise mit dem Modell verglichen. Dazu werden als nächstes die Soll-Durchmesser der Kreise am Motorblock benötigt. Diese wurden im Vorhinein mit dem Taster bestimmt und angezeigt. Die gesamten Parameter der Ebenen und Kreise, die durch das taktile Aufnehmen entstanden sind, werden mitangehangen. In der nachfolgenden Tabelle werden die Kreisdurchmesser verglichen.

	Durchmesser bestimmt durch		
	taktiler Taster	**Scan**	**Differenz**
Kreis	[mm]	[mm]	[mm]
1	38,28	38,82	-0,54
2	42,89	43,97	-1,08
4	73,95	75,44	-1,49
5	73,93	75,33	-1,40
6	73,93	75,36	-1,43
7	73,93	75,80	-1,87
8	60,94	61,08	-0,14
9	10,57	10,65	-0,08

Tabelle 1: Vergleich der geometrischen Elemente Taktil – Scan

Erkennbar ist, dass die Differenz immer das gleiche Vorzeichen aufweist. Die Kreise des Scans sind in jedem Fall größer als die Kreise, die durch das taktile Antasten entstanden sind. Die Durchmesser der angetasteten Kreise sind genauer als die des Scans, da der Scanaufsatz ungenauer als das taktile Tasten ist und die Kreise des Scans durch bestimmte Punkte in den Scandaten entstanden sind.

6 Vergleich der Ergebnisse

In diesem Teil der Arbeit werden die photogrammetrisch aufgenommenen Modelle mit dem ausgeführten Scan verglichen. Um nochmals einen Gesamteindruck zu vermitteln werden in der nächsten Abbildung alle Modelle mit einem Originalbild gezeigt.

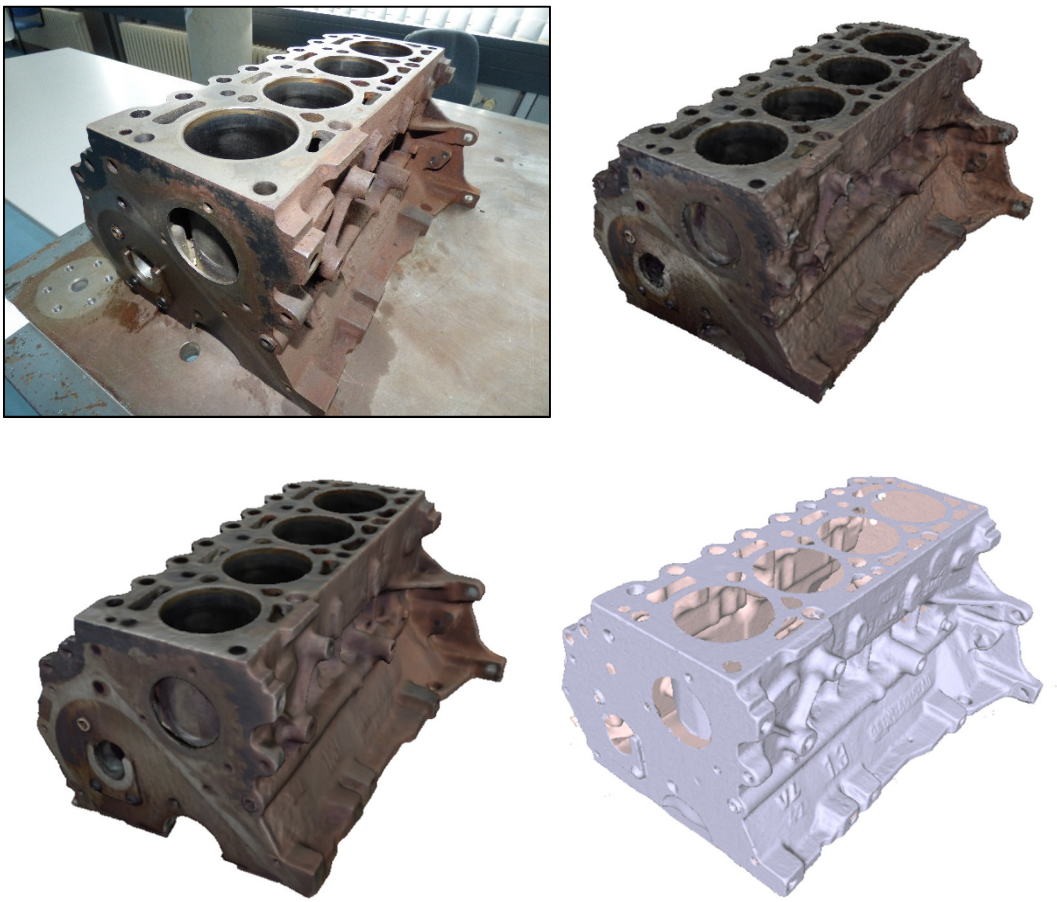


Abbildung 23: Original (o.l.); Meshroom (o.r.); Agisoft Photoscan (u.l.); Scan (u.r.)

Um alle Modelle vergleichen zu können, wurde das Programm MeshLab verwendet. Hierbei werden die Modelle in das Programm geladen, wie in Abschnitt 4.3 aligniert und die Abstände der Punkte als Qualität gespeichert. Zum Vergleich wurden drei Vergleichsmodelle erstellt. Alle Modelle werden im Anhang vergrößert dargestellt.

- Vergleich Meshroom – Agisoft Photoscan (aus Kapitel 4.3)
- Vergleich Scan mit Geomagic Control 2014 – Meshroom
- Vergleich Agisoft Photoscan – Scan mit Geomagic Control 2014

Als erstes wird erneut der Vergleich zwischen den beiden photogrammetrisch bestimmten Modellen gezeigt, sodass der Überblick zwischen den drei Analysen gegeben ist.

Die Beschreibung zum Vergleich erfolgte bereits in 4.3 und wird deshalb nur leicht angeschnitten. Die Farbgrenzen der Analyse sind bei allen Modellen auf -5 Millimeter und +5 Millimeter eingestellt, sodass ein Vergleich der gesamten Modelle erleichtert werden kann. Als Referenznetz wurde in diesem Fall das Meshroom-Modell verwendet. Die Analyse zeigt, dass das Netz aus Agisoft Photoscan in den meisten Teilen größer ist als das Modell aus Meshroom.

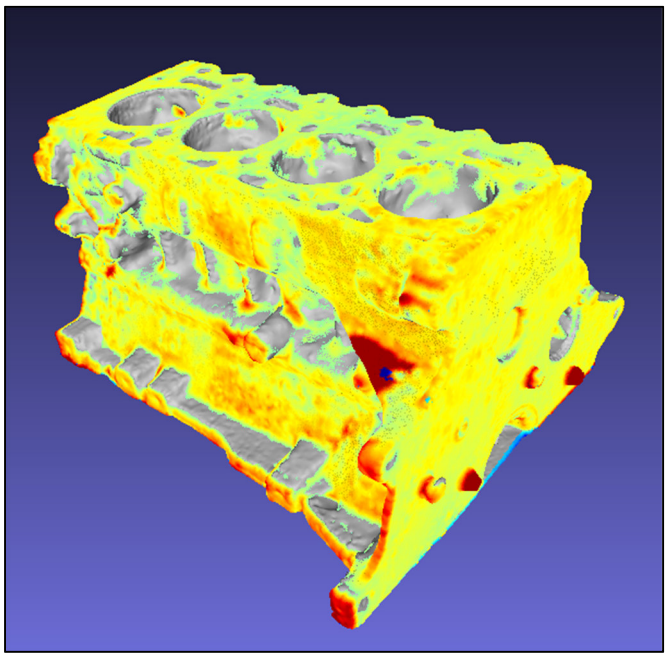


Abbildung 24: Vergleich [1] Meshroom - Agisoft Photoscan

Der nächste Vergleich besteht aus dem Modell aus Meshroom und dem Scan mit dem Messarm und der Software Geomagic Control 2014. In dieser Abbildung wurde der Scan als Referenznetz gewählt und die Abstände zum Meshroom-Modell wurden berechnet. Vergleichbar ist nur die Außengeometrie, da der Scan keine Punkte innerhalb der Zylinder besitzt. Erfolgt die Betrachtung der Überlagerung, wird deutlich, dass sich die Modelle in den Details unterscheiden. Jedoch sind die Punktabstände in den Ebenen konstant und besitzen deshalb die gleiche Farbe. In der Ebene 2 (obere Ebene mit vier Kreisen) befinden sich alle Abstände, außer an den Löchern, innerhalb eines Millimeters. Größere Abstände (3 bis 4 Millimeter) zeigen sich beispielsweise an den Kreisen des Motorblocks und an den tiefen Details, die sich an den Seiten befinden.

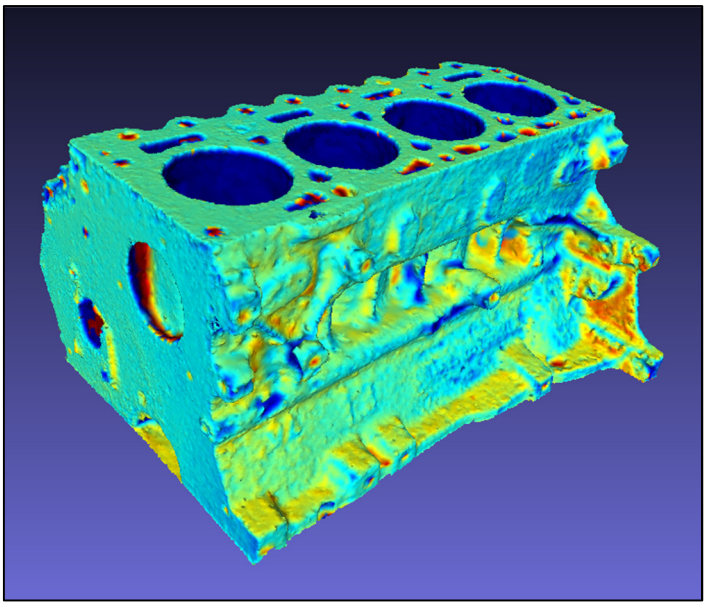


Abbildung 25: Vergleich [2] Scan Geomagic Control 2014 - Meshroom

Die letzte Analyse wird zwischen dem Agisoft Photoscan-Modell und dem Scan-Modell durchgeführt. Als Referenznetz wurde hierbei das Modell von Agisoft Photoscan verwendet. Das Vergleichsmodell sieht im Gegensatz zu den beiden anderen Modellen glatter aus. Somit ist der Vergleich besser sichtbar. Die zwei kleineren Außenebenen befinden sich meist in einem Abstand von maximal einem Millimeter. Das Gleiche gilt für die obere Ebene. In den langen Seiten sind mehrere Abweichungen erkennbar. Beispielsweise ist der Abstand oberhalb des Ford-Zeichens in einem Bereich von 1,5 bis 3 Millimeter. In den tiefen Rundungen knapp unter der oberen Ebene zeigen sich blaue Stellen. Dies zeigt, dass das Modell von Agisoft Photoscan an diesen Stellen kleiner als das Scan-Modell ist.

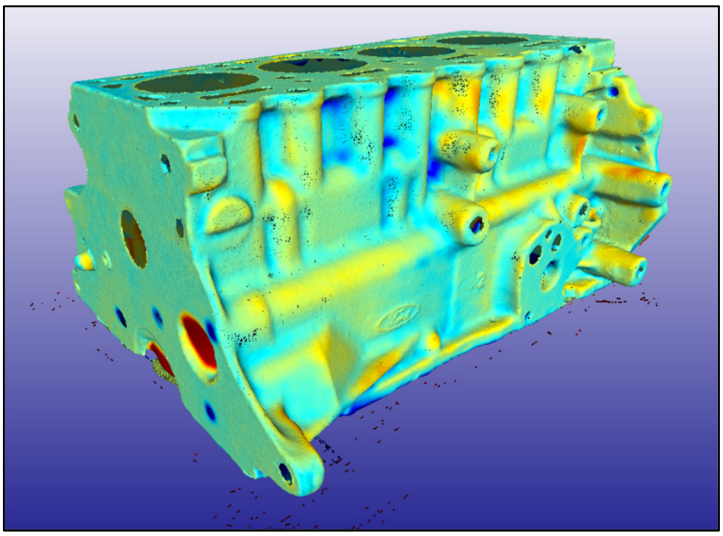


Abbildung 26: Vergleich [3] Agisoft Photoscan - Scan Geomagic Control 2014

Im vierten Kapitel wurden zwei Detailansichten des Modells gezeigt. Aus dem Scan wurde eine gleichwertige Abbildung erstellt. Hierbei sind die glatten Kanten und die glatte Oberfläche auffallend.

Abbildung 27: Vergleich der detaillierten Ansicht

Um noch weitere Vergleichsmöglichkeiten aufzuzeigen, wurden in allen Scans die acht Kreise bestimmt. Hierzu werden in der folgenden Tabelle alle Durchmesser und die jeweilige Differenz zum taktilen Taster aufgeführt. Die Differenz wird zum taktilen Taster gebildet, da dies die genaueste Möglichkeit ist, den Motorblock aufzunehmen. In der Tabelle wird sichtbar, dass sich die geometrischen Elemente in den Modellen nur um einige Millimeter abweichen. Kreis 9 konnte bei den Modellen aus Meshroom und Agisoft Photoscan nicht erstellt werden, da das Loch in der Realität klein war und das Programm dieses Loch geschlossen hat.

	Durchmesser bestimmt durch			
	taktiler Taster	**Scan**	**Meshroom**	**Agisoft PS**
Kreis	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	38,28	38,82	38,91	37,90
	Differenz	**-0,54**	**-0,63**	**0,38**
2	42,89	43,97	44,64	46,46
		-1,08	**-1,75**	**-3,57**
4	73,95	75,44	73,42	75,63
		-1,49	**0,53**	**-1,68**
5	73,93	75,33	74,58	74,00
		-1,40	**-0,65**	**-0,07**
6	73,93	75,36	73,11	74,33
		-1,43	**0,82**	**-0,40**
7	73,93	75,80	74,01	73,59
		-1,87	**-0,08**	**0,34**
8	60,94	61,08	60,62	60,27
		-0,14	**0,32**	**0,67**
9	10,57	10,65	-	-
		-0,08	**-**	**-**

Tabelle 2: Vergleich der geometrischen Elemente (Gesamt)

Zuletzt werden noch einmal alle Modellansichten als Abbildung dargestellt. Erkennbar ist, dass der Unterschied zwischen den photogrammetrisch aufgenommenen Netzen größer ist als in den anderen Modellen. Ausschlaggebend hierfür könnte sein, dass das Programm Meshroom generell keine Glättung oder Punktausdünnung vornehmen kann. Dies muss mit einem gesonderten Programm geschehen. Ein weiterer Punkt für den Unterschied könnte die manuelle Skalierung sein.

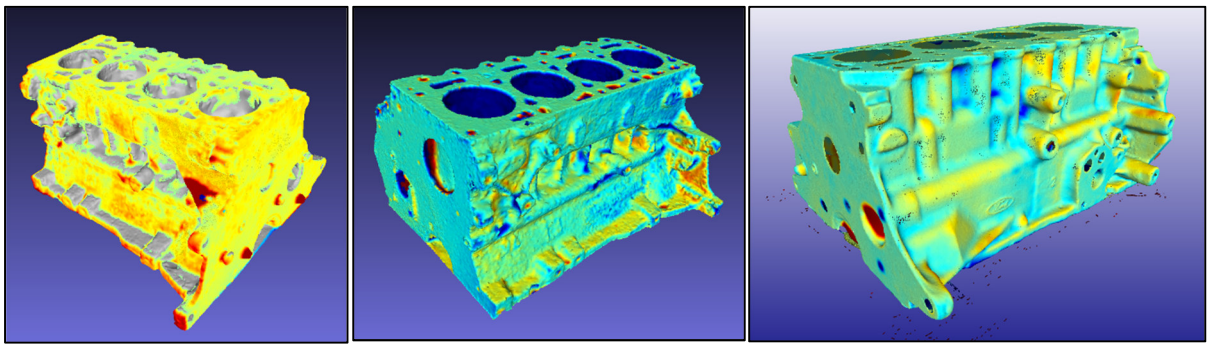


Abbildung 28: Übersicht der Modellanalyse (links: [1]; Mitte: [2]; rechts: [3])

7 Fehlerquellen

In diesem Teil werden mögliche Fehlerquellen in den Messungen aufgezeigt und eventuelle Lösungsmöglichkeiten gefunden. Einer der größten Fehlerquellen sind entstehende Reflexionen. Diese können bei den photogrammetrisch bestimmten Daten Fehler verursachen, da das Programm an solchen Stellen keine Punkte erkennen kann. Gelöst werden, kann dies beispielsweise durch das Ändern der Lichtquelle, sodass das Objekt diffus angestrahlt wird. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz eines Sprays, das Reflexionen abschwächt oder sogar komplett verhindert. Neben den Reflexionen werden die Programme auch transparente oder reinschwarze Flächen nicht oder nur zum Teil bestimmen können. Zudem können Fehler bei der photogrammetrischen Aufnahme entstehen, wenn der Bildverband an verschiedenen Stellen eine fehlende Bildüberlappung aufweist. Bei den Aufnahmen ist es auch wichtig, dass die Bilder scharf sind, sodass das Programm das Objekt bestmöglich darstellen kann. Daneben sollten wenig zusätzliche unbenutzbare Punkte im Raum liegen. Somit ist ein einfarbiger neutraler Hintergrund und eine diffuse Lichtquelle am besten geeignet [Weltenwunderbar 2020].

Fehlerquellen bei dem taktilen Antasten mit dem Messarm könnten bei den geometrischen Elementen auftreten. Um die Ebenen aufzunehmen, wurden zweimal sechs und einmal acht Punkte verwendet. Da eine Ebene durch drei Punkte definiert wird, erfolgt bei sechs bzw. acht Punkten eine Überbestimmung. Das Programm berechnet eine Ebene durch Ausgleichung. Falls die ausgewählten Punkte nicht der Ebene entsprechen, unterscheidet sich die Soll-Ebene von der Ist-Ebene signifikant.

Neben Abweichungen, die in der Messung stattfinden, gibt es auch entsprechende Fehlerquellen bei der Bearbeitung und Auswertung. Ein Beispiel dafür wäre die Skalierung. Durch Rundungen während der Skalierung könnten die Modelle einen Größenunterschied aufweisen. Diese Unterschiede bewegen sich jedoch in einem kleinen Bereich. Eine weitere Fehlerquelle könnte während der Glättung des Modells, der Rauschverringerung der Punkte oder im Schließen der Löcher entstanden sein. Falls hierbei wichtige Kanten und Punkte geändert oder sogar gelöscht werden, verändert sich die Geometrie des Motorblocks.

8 Vorstellung anderer Verfahren

Die Aufnahme des Motorblocks erfolgte photogrammetrisch durch eine Digitalkamera und taktil mittels Koordinatenmessarm. Neben diesen Verfahren gibt es andere Möglichkeiten dieses Objekt aufzunehmen. Beispielsweise wäre es möglich alle geometrischen Elemente des Objekts mittels Messschieber zu bestimmen. Dies wäre eine andere Möglichkeit gewesen, die Soll-Werte der Kreise zu messen.

Der Messarm ist eine mobile Koordinatenmessmaschine. Neben den mobilen gibt es die klassische Variante der Koordinatenmessgeräte. Hierbei bewegt sich der Taster nicht frei im Raum, sondern immer parallel entlang der Achsen des Geräts. Jedoch wäre die Durchführung schwieriger, da der Motorblock viele Konturen besitzt.

Eine andere Möglichkeit bieten Tachymeter. Entweder werden viele Punkte am Objekt gemessen oder das Tachymeter besitzt eine Scanfunktion, sodass das Objekt aufgenommen werden kann. Die Scanfunktion ist in Laserscannern stärker ausgereift. Daher ist es ebenfalls möglich, diesen Motorblock mit einem Laserscanner aufzunehmen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Das letzte Kapitel der Arbeit befasst sich mit der Zusammenfassung der Gesamtarbeit, der Antwort auf die Leitfrage, ob ein low-cost Scan mit ausreichender Genauigkeit durchführbar ist und inwiefern diese Arbeit erweitert werden kann. Als erstes wird auf die Zusammenfassung eingegangen. Die Aufnahme und die Bearbeitung haben bei allen Programmen gut funktioniert. Geomagic Control 2014 und Agisoft Photoscan bieten im Gegensatz zu Meshroom mehr Möglichkeiten das Objekt aufzunehmen und zu bearbeiten. Persönlich gesehen ist das Programm Meshroom leicht überladen, trotzdem bietet es ein gutes Ergebnis der Aufnahme. Die Details und geometrischen Elemente des Motorblocks wurden bei den zwei Programmen besser aufgenommen als bei Meshroom.

Die Bearbeitung erfolgte mit dem Programm MeshLab. Dieses Programm bietet viele Funktionen mit dem die Punktwolken gut bearbeitet werden konnten. Neben den benutzten Funktionen kann das Programm noch mehr Möglichkeiten bringen. Diese Software ist, obwohl sie kostenlos ist, gut und kann mit kostenpflichtigen Programmen mithalten. Der Vergleich der geometrischen Elemente wurde mit der Software GOM Inspect durchgeführt. Diese Software ist übersichtlich und bietet Vorteile in der Funktion und der Bedienung. In der kostenlosen Version sind viele Funktionen eingeschränkt. Beispielsweise das Vergleichen zweier Punktwolken. Die Funktion der Elementerstellung ist in der kostenlosen Version integriert und wurde hier benutzt.

Die Aufnahme mit Agisoft Photoscan ist genauer und ansehnlicher als die Aufnahme mit Meshroom. Falls die benötigten Daten in einer geringeren Genauigkeit vorliegen müssen, lohnt sich das Verwenden der kostenlosen Programme. Optimal sind die Programme für Personen, die in ihrem Alltag Gegenstände aufnehmen und als Modell darstellen wollen. Die Kombination der Programme zeichnet sich aus der freien Zugänglichkeit und den verwendbaren Funktionen aus. Benötigt eine Firma genauere photogrammetrische Aufnahmen und weniger Programme, wird Agisoft Photoscan empfohlen.

Für die ersten Kapitel wurden Literaturen verwendet, da dies eine theoretische Einführung in die Arbeit ist. Zum praktischen Teil wurden unter anderem Videos der Plattform Youtube, Bücher und die Internetseiten der Programmersteller verwendet. Zudem wurden für die Bearbeitung Erfahrungen aus Foren der Programme genutzt.

Die Nahbereichsphotogrammetrie wird in der heutigen Zeit immer wichtiger und ist in vielen Bereichen vertreten. Zudem vereinen die Berechnungswege viele Fachgebiete miteinander. Neben den vorgestellten Bestimmungsmöglichkeiten könnte der Motorblock in einer anderen Arbeit beispielsweise mit einem Laserscanner aufgenommen werden. Dies könnte dann mit einem anderen Verfahren verglichen werden.

10 Literaturangaben

Ackermann, Friedrich und Schwidefsky, Kurt. 2013. *Photogrammetrie: Grundlagen, Verfahren, Anwendungen.* Stuttgart: Springer-Verlag.

Foppe, Karl. 2009: *Repetitorium zur Fehlerlehre und Statistik und Ausgleichungsrechnung.* Neubrandenburg.

Heipke, Christian. 2017: *Photogrammetrie und Fernerkundung.* 1.Auflage, Berlin: Springer Spektrum.

Kennie, T. J. M. 2014. *Engineering Surveying Technology*. Boca Raton: CRC Press.

Luhmann, Thomas. 2017: *Nahbereichsphotogrammetrie.* 4.Auflage, Berlin: Wichmann.

Witte, Berthold und Sparla, Peter. 8. Auflage, 2015. *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen.* 8. Auflage, Berlin: Wichmann.

AliceVision. *Meshroom*. [Online] https://alicevision.org/#meshroom

GOM GmbH. *GOM Inspect.* [Online] https://www.gom.com/de/3d-software/gom-inspect.html

Meshroom Community. *Meshroom Manual*. [Online] https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/about/manual/manual.html

Visual Computing Lab, ISTI-CNR. *MeshLab*. [Online] https://www.meshlab.net/?fbclid=IwAR0MV7-YQbYtda9klHHFVumtpVIV0Uj0Z5bnX3qxNZV2OLJuJzLGlKNHwrc#

Weltwunderbar GmbH. *3D-Apparat.* [Online] https://3d-apparat.com/produkte/photogrammetrie/

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der geometrischen Elemente Taktil – Scan 34
Tabelle 2: Vergleich der geometrischen Elemente (Gesamt)..... 38

12 Formelverzeichnis

Formel 1: Kollinearitätsgleichungen + Zeichenerklärung..... 13
Formel 2: Vereinfachte Kollinearitätsgleichungen..... 14
Formel 3: Differentialquotienten in Bezug auf den räumlichen Rückwärtsschnitt..... 14
Formel 4: Differentialquotienten der Objektkoordinaten 14

Formel 5: Differentialquotienten für die innere Orientierung 15
Formel 6: Anzahl der Unbekannten 15
Formel 7: Linearisiertes funktionales Modell 16
Formel 8: Normalgleichungssystem 16
Formel 9: Ausgleichungsergebnisse 16

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Quelle: Luhmann 2017: 369. Kombination Vorwärts- und Rückwärtsschnitt 11
Abbildung 2: Quelle: Luhmann 2017: 370. Sukzessive Modellbildung 12
Abbildung 3: Quelle: Luhmann 2017: 491. Schema des Structure-from-motion-Verfahrens 17
Abbildung 4: aufgenommene Motorradbatterie 23
Abbildung 5: Vorder- und Rückseite des Batteriemodells 23
Abbildung 6: Kameraeinstellungen 24
Abbildung 7: Motorblock 24
Abbildung 8: Berechnungsschritte Meshroom Teil 1 25
Abbildung 9: Berechnungsschritte Meshroom Teil 2 26
Abbildung 10: Abstand der Ebenen als Skalierungsgrundlage 26
Abbildung 11: Modellansichten – Meshroom 27
Abbildung 12: Modellansichten – Agisoft Photoscan 27
Abbildung 13: Detailansicht Meshroom (links) ---- Agisoft Photoscan (rechts) 28
Abbildung 14: Ebenheitsüberprüfung in GOM Inspect (links: Meshroom; rechts: Agisoft Photoscan) 28
Abbildung 15: Vergleich Meshroom - Agisoft Photoscan 29
Abbildung 16: Faro Messarm inklusive Scanaufsatz 30
Abbildung 17: Kalibrierung des Messarmes + Ergebnis 31
Abbildung 18: Erste Daten des Motorblockscans 31
Abbildung 19: Schließen der Löcher 32
Abbildung 20: Geometrische Elemente im Scanmodell 32
Abbildung 21: Modellansicht Scan 33
Abbildung 22: Ebenheitsüberprüfung des Scanmodells mit GOM Inspect (links) + Erstellung der geometrischen Elemente (rechts) 33
Abbildung 23: Original (o.l.); Meshroom (o.r.); Agisoft Photoscan (u.l.); Scan (u.r.) 35
Abbildung 24: Vergleich [1] Meshroom - Agisoft Photoscan 36
Abbildung 25: Vergleich [2] Scan Geomagic Control 2014 - Meshroom 37
Abbildung 26: Vergleich [3] Agisoft Photoscan - Scan Geomagic Control 2014 37
Abbildung 27: Vergleich der detaillierten Ansicht 38
Abbildung 28: Übersicht der Modellanalyse (links: [1]; Mitte: [2]; rechts: [3]) 39

14 Anhang

Im Anhang befinden sich größere Bilder der einzelnen Modelle, der Merkmalserstellung, der Parameter der abgetasteten geometrischen Elemente und eine größere Ansicht der Vergleichsüberlagerungen.

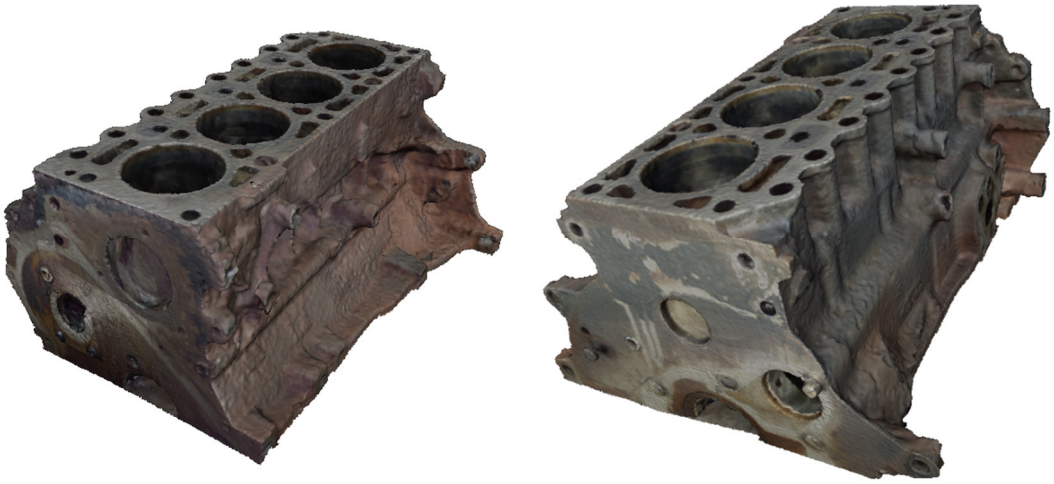
15 Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

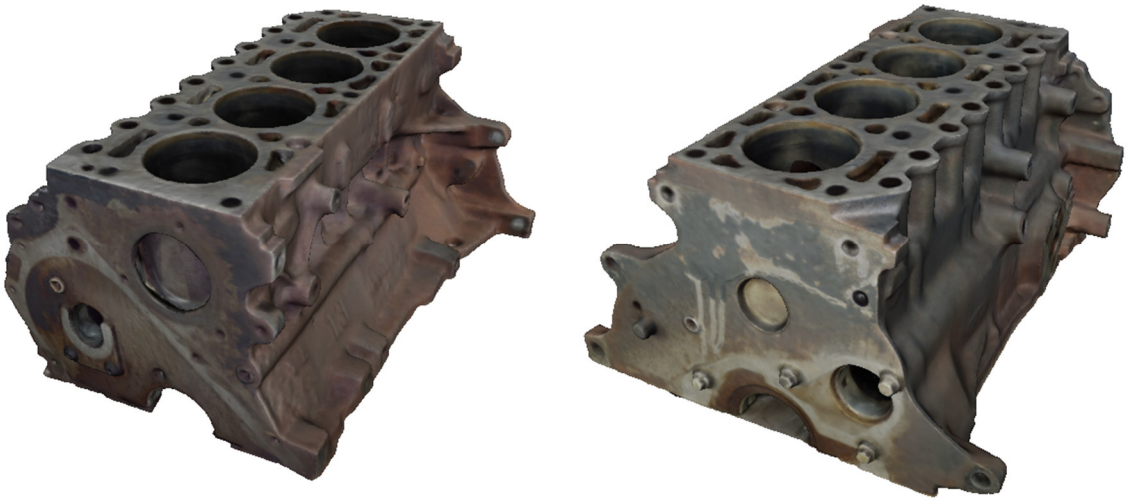
Ort, Datum Unterschrift

Anhang

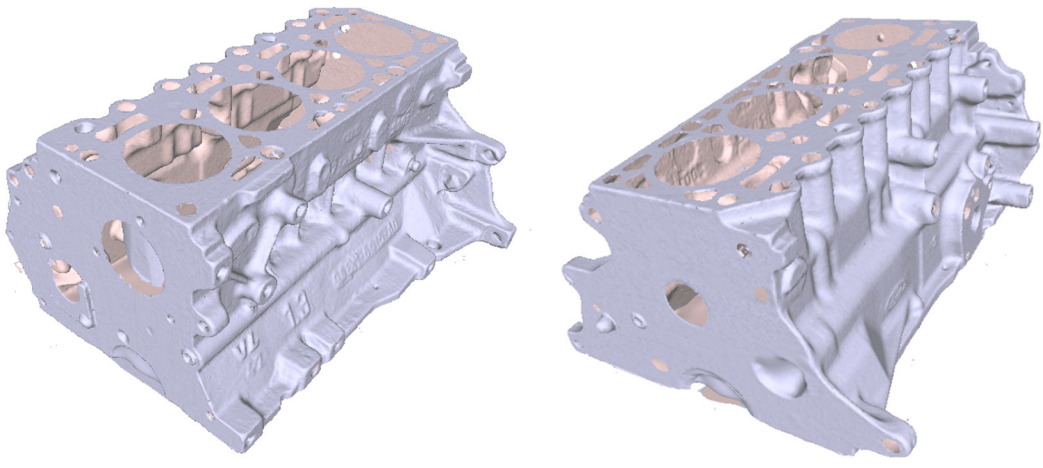
Meshroom (Abbildung 11)



Agisoft Photoscan (Abbildung 12)



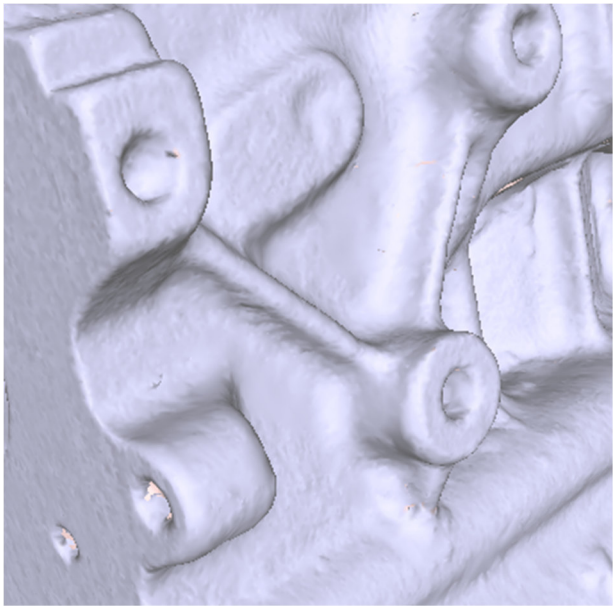
Scan mit Geomagic Control 2014 (Abbildung 21)



Detailansichten

Meshroom (Abbildung 13 & 27)

Agisoft Photoscan (Abbildung 13 & 27)



Scan mit Geomagic Control 2014 (Abbildung 27)

Meshroom

Abbildung zu Tabelle 2

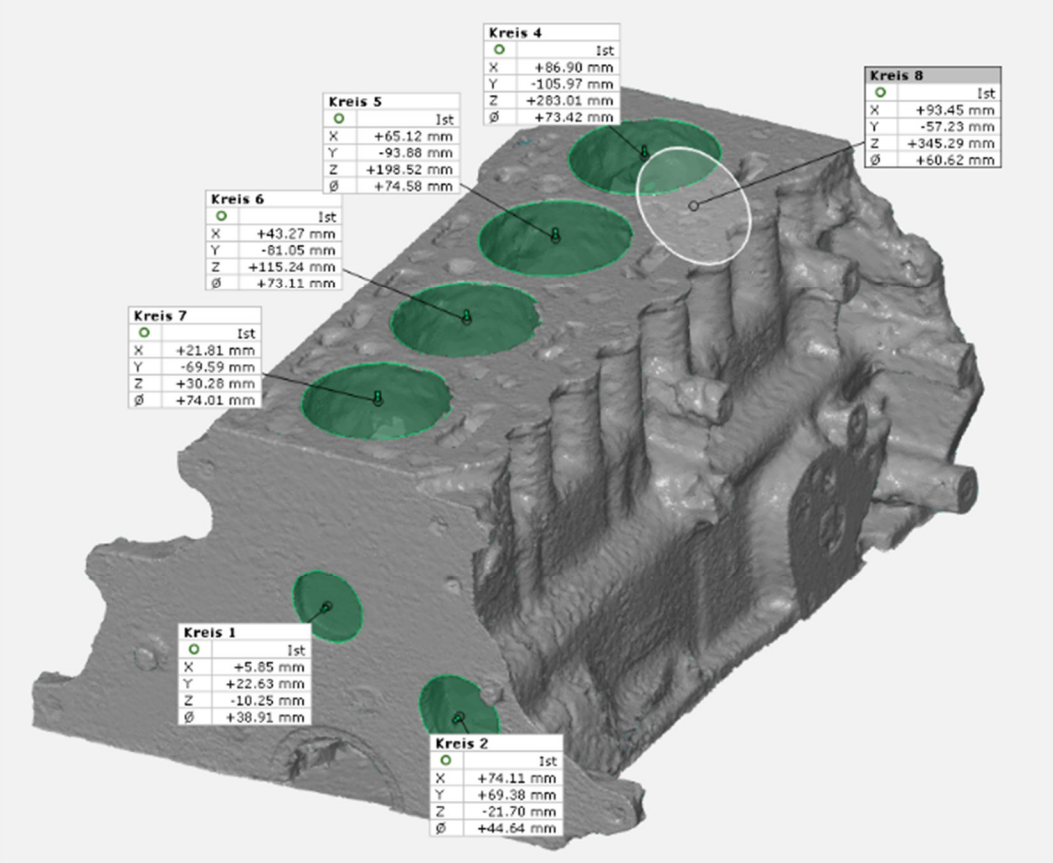
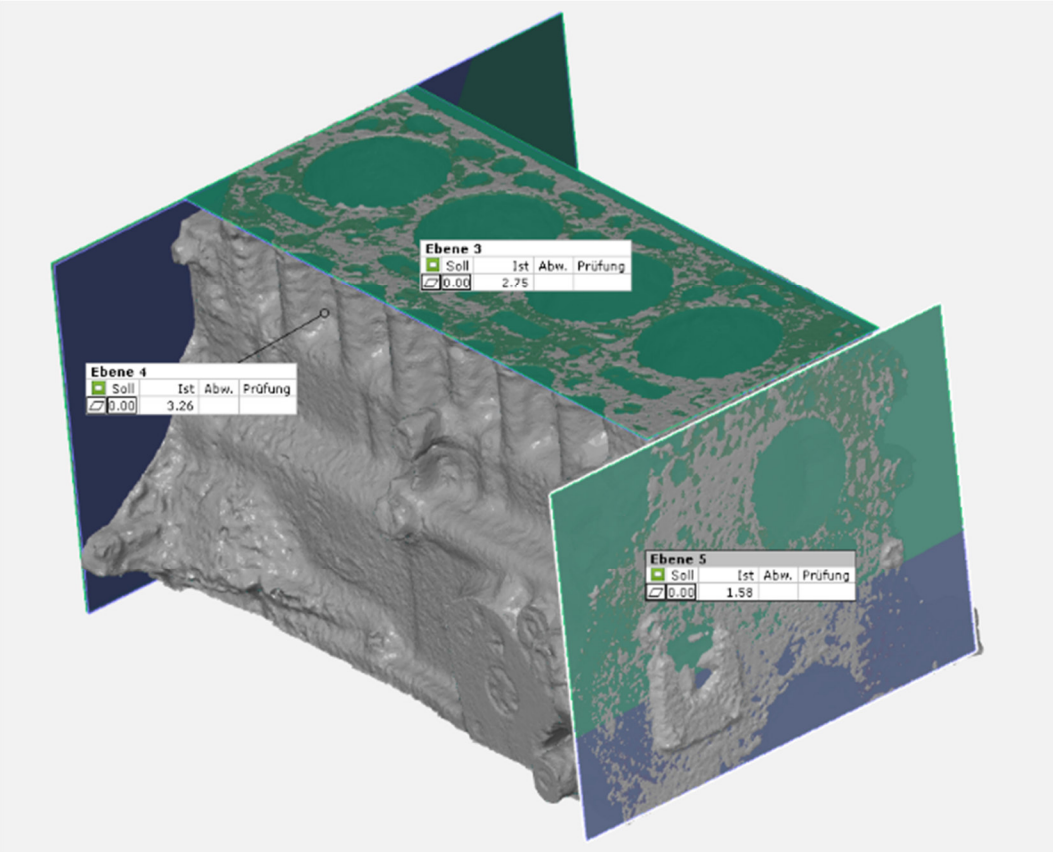


Abbildung 14 (links)



Agisoft Photoscan

Abbildung zu Tabelle 2

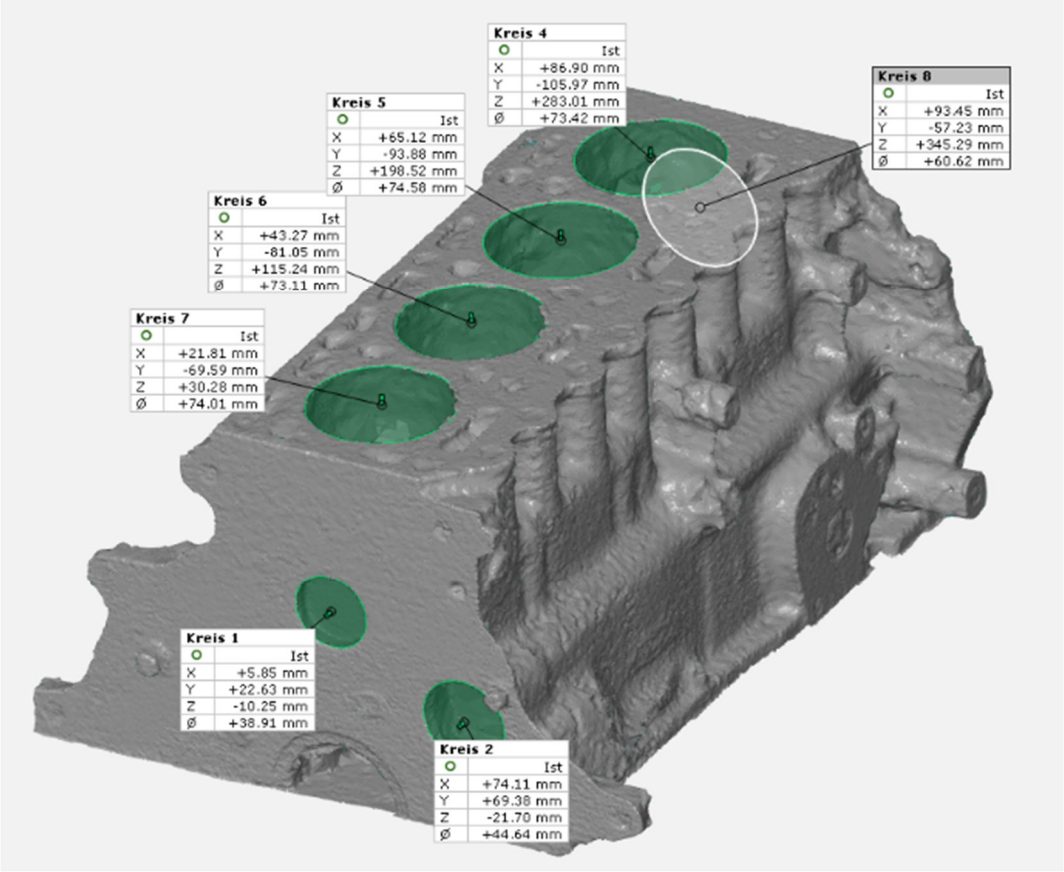
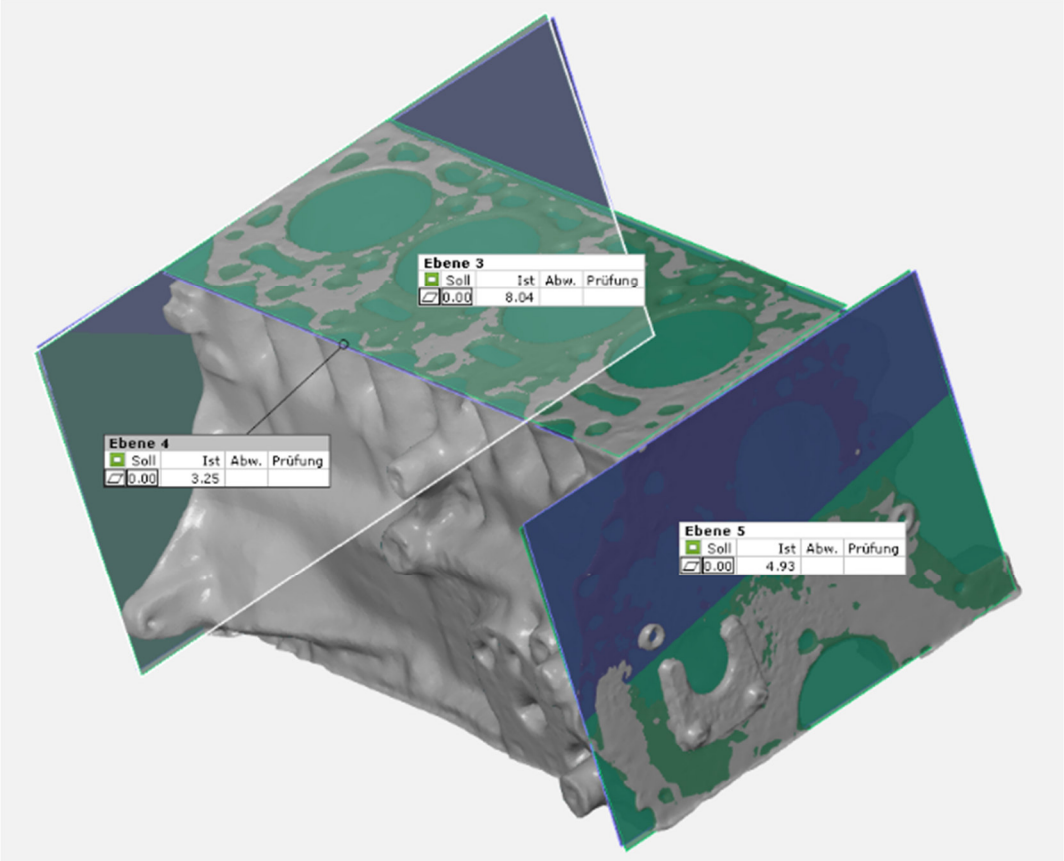


Abbildung 14 (rechts)



Scan mit Geomagic Control 2014

Abbildung 22 (rechts)

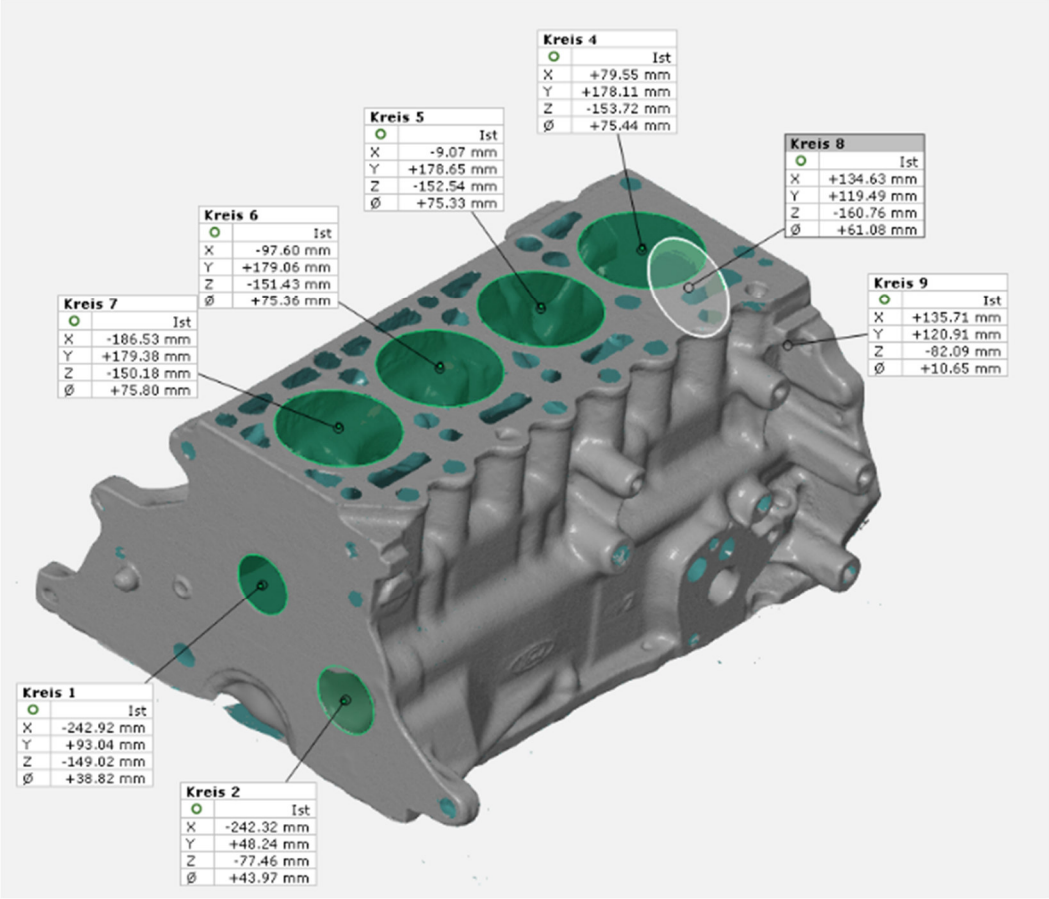
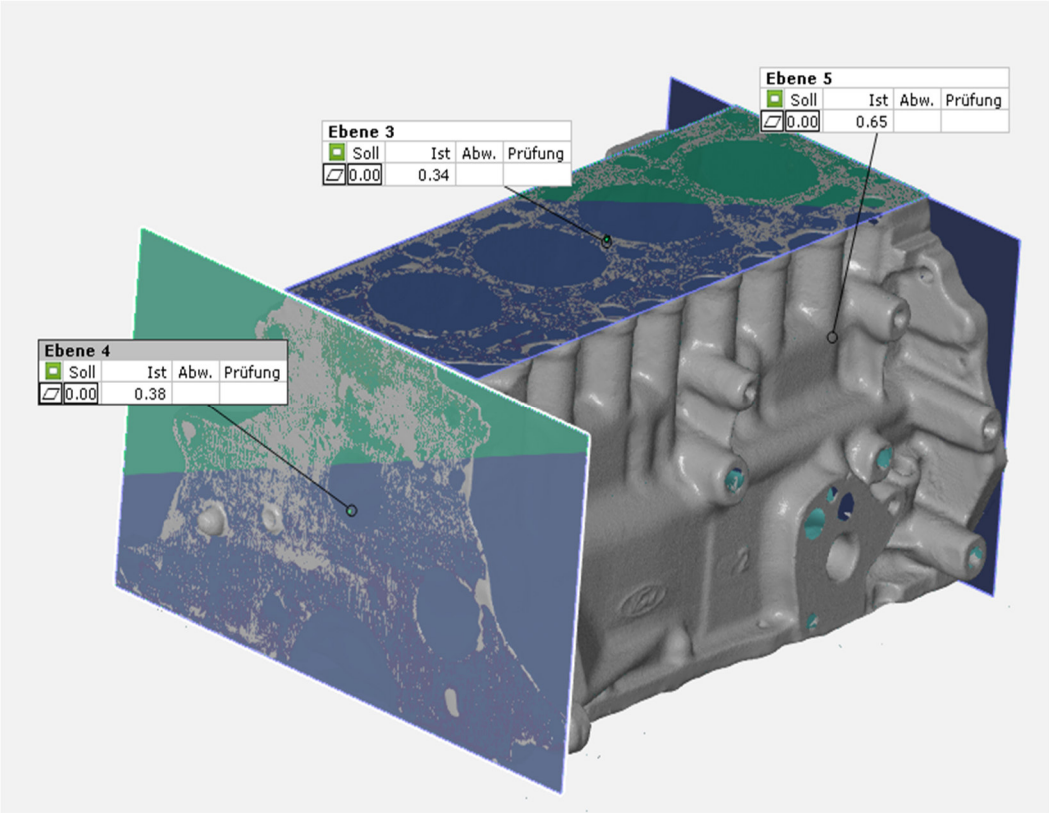
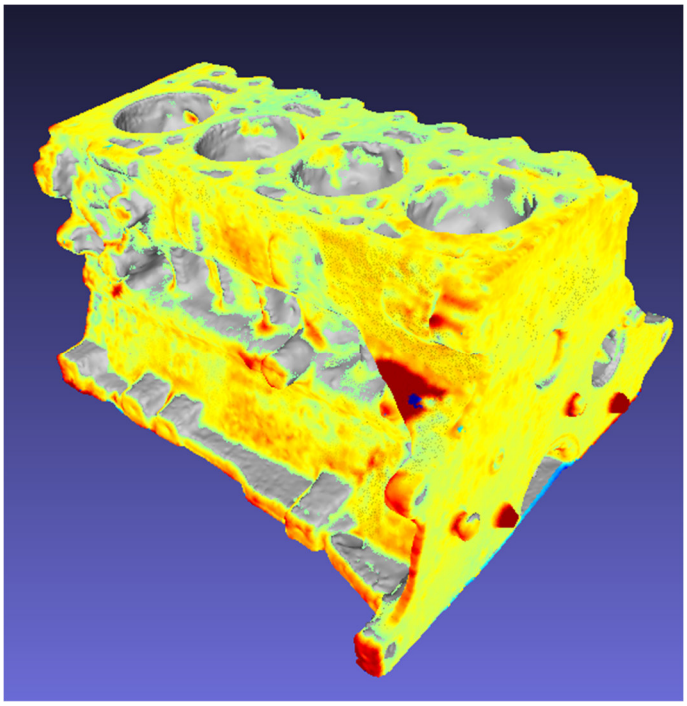
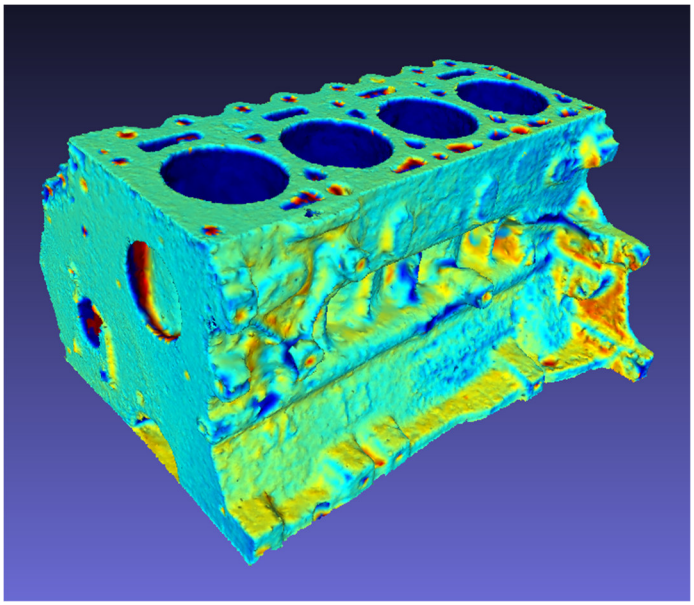


Abbildung 22 (links)

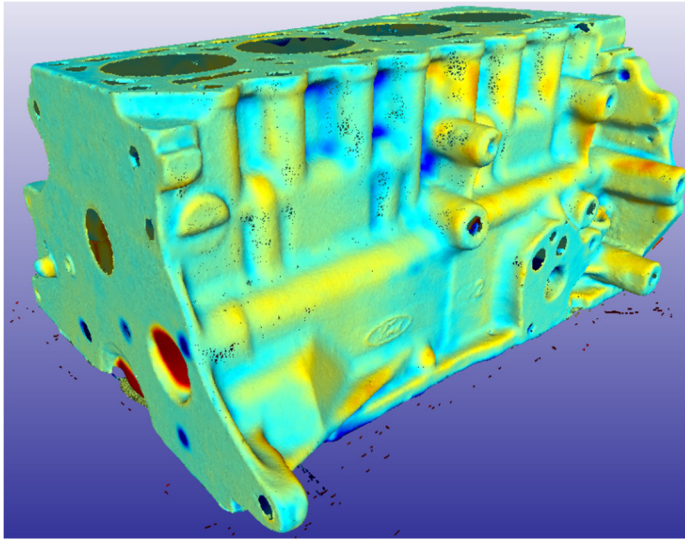




Agisoft Photoscan – Meshroom (Abbildung 15, 24 & 28)



Scan mit Geomagic Control 2014 – Meshroom (Abbildung 25 & 28)

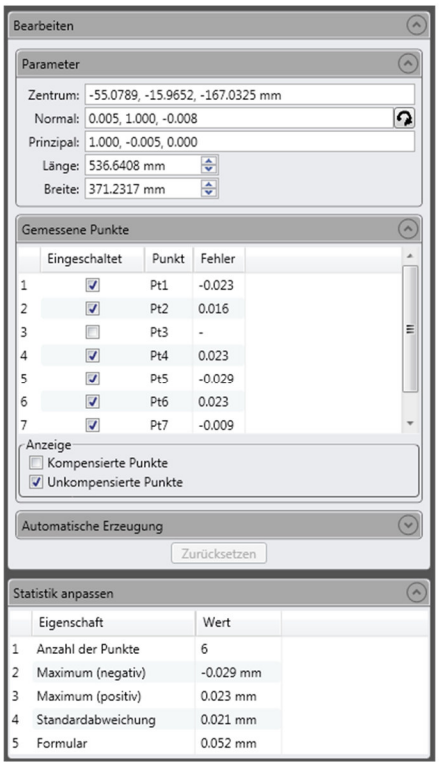


Agisoft Photoscan – Scan mit Geomagic Control 2014 (Abbildung 26 & 28)

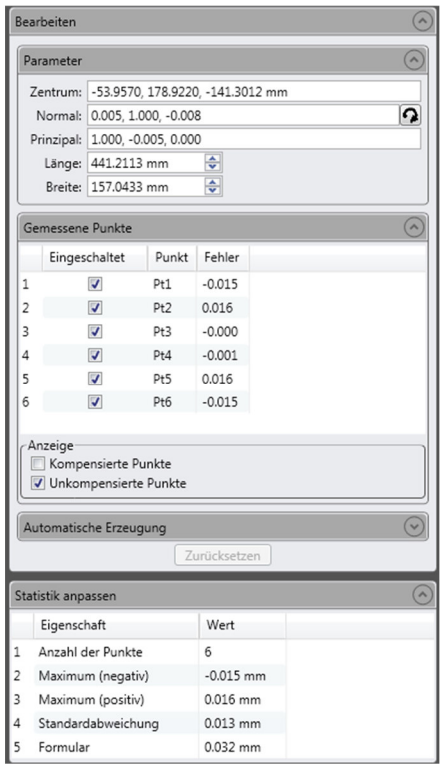
Abgetastete geometrische Elemente

Ebenen + Kreise

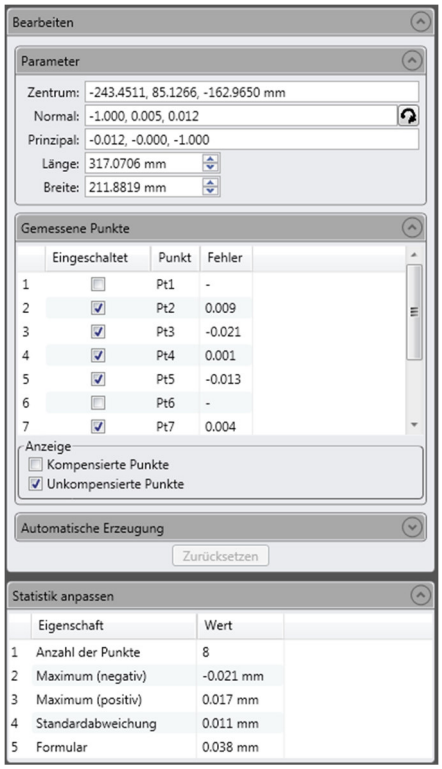
Ebene 2



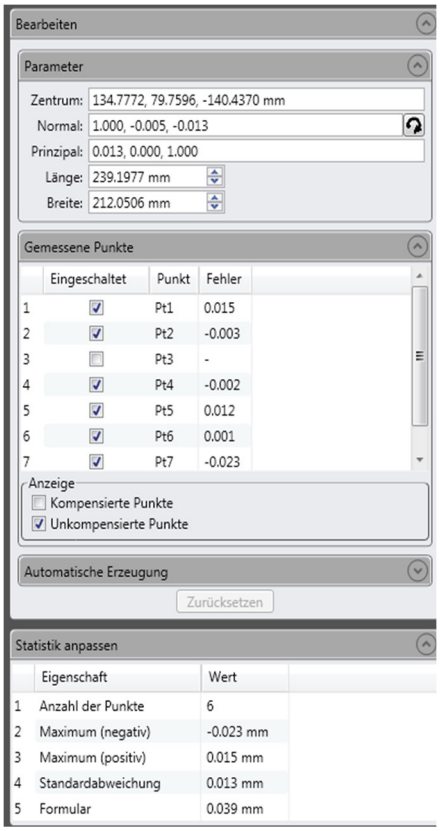
Ebene 3



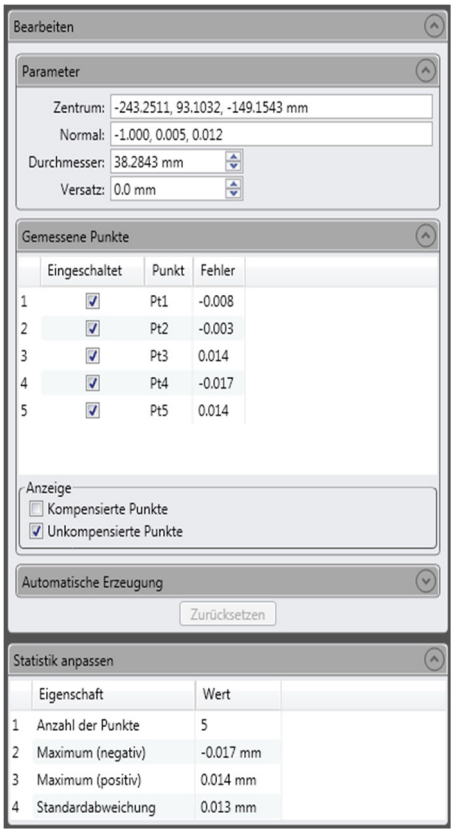
Ebene 4



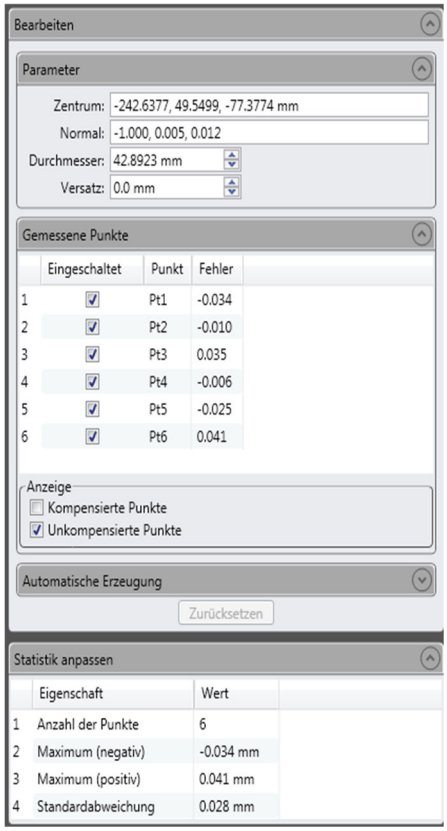
Ebene 5



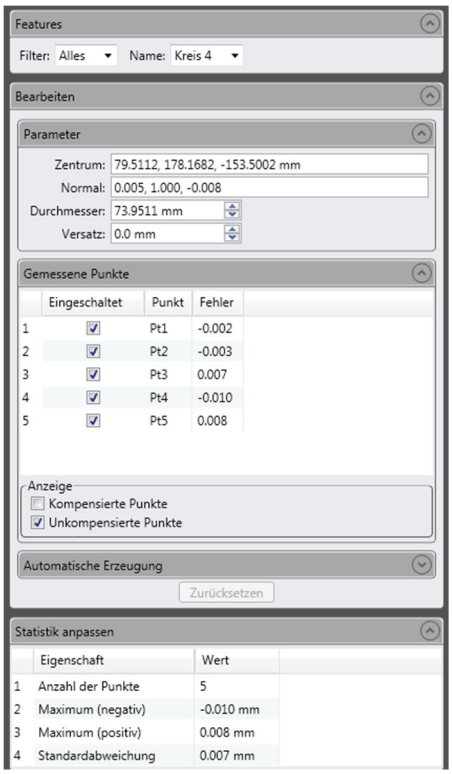
Kreis 1



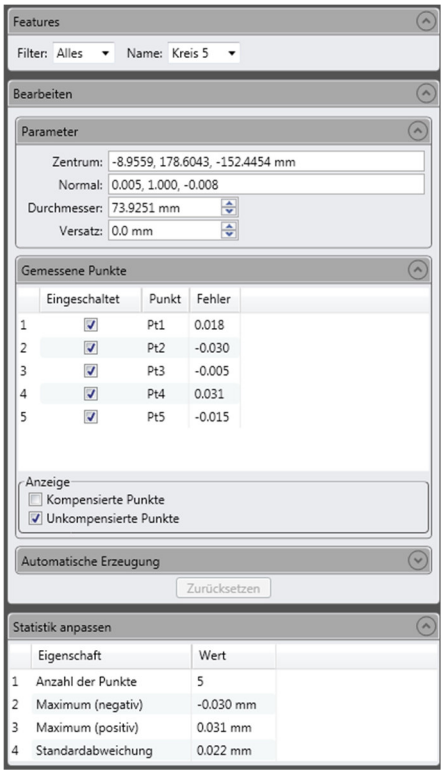
Kreis 2



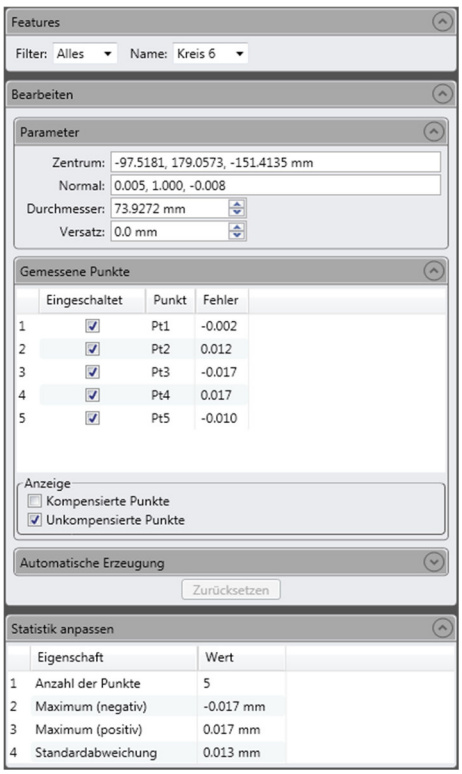
Kreis 4



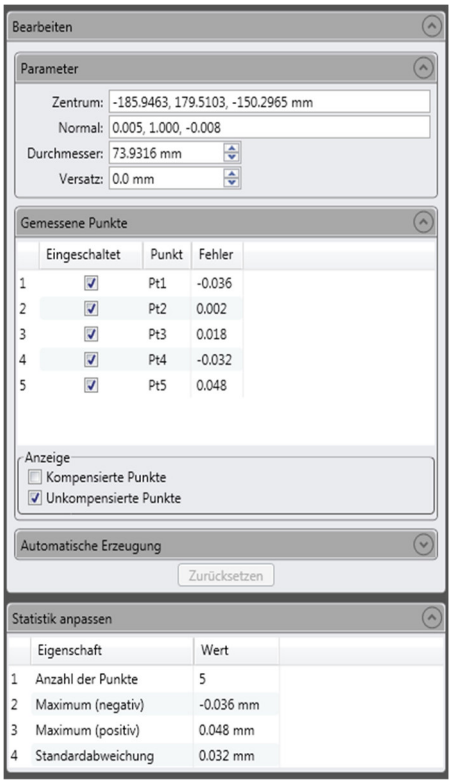
Kreis 5



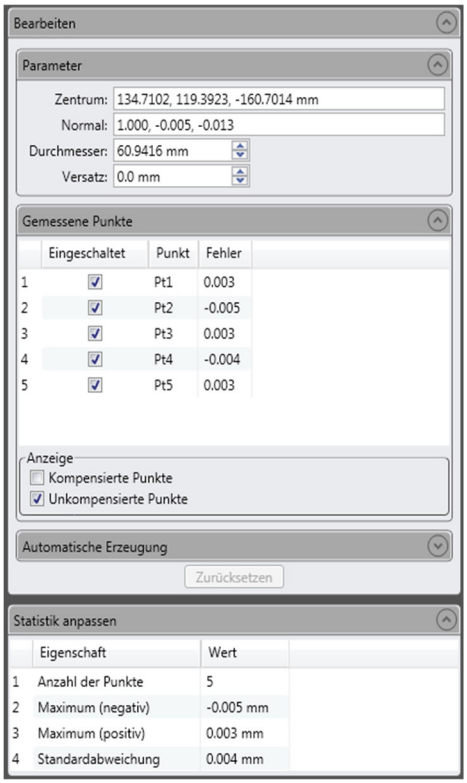
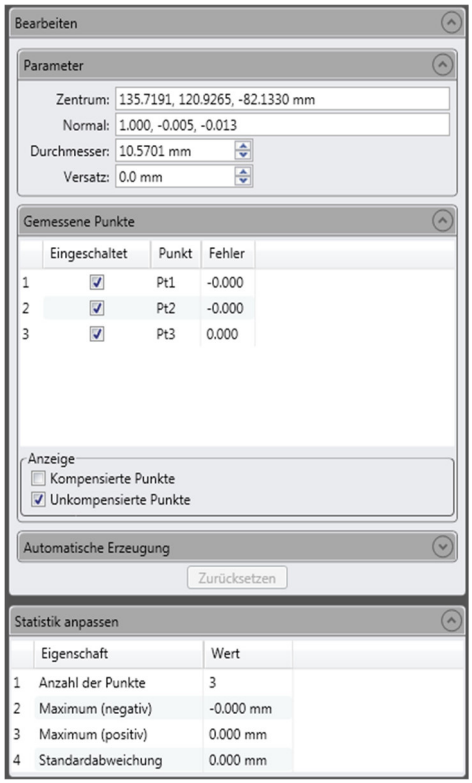
Kreis 6



Kreis 7



Kreis 8



Kreis 9