

Jade Hochschule Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth

Fachbereich: Bauwesen Geoinformation und
Gesundheitstechnologie

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing.
habil. Dr. h.c. Thomas Luhmann

Landesamt für Geoinformation und
Landesvermessung Niedersachsen (LGLN);
Landesvermessung und Geobasisinformation –
Landesbetrieb

Fachgebiet: Fachgebiet 242- Photogrammetrie,
Geländemodelle

Zweitprüfer: Dr. Birgit Elias



Bachelorarbeit

–

Untersuchung zum Einsatz von UAV-Photogrammetrie für die amtliche Gebäudevermessung

Name: Dawid Jendrejek
Matrik.Nr.: 6012836
Studiengang: Angewandte Geodäsie
Semester: 7; WS 2018/2019
Adresse: Cloppenburger Str. 40 26135 Oldenburg
Email: dawid.jendrejek@student.jade-hs.de
Abgabe: 28.01.2019
Abgabetermin: 30.01.2019

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	1
Tabellenverzeichnis	2
Formelverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	3
1 Einleitung.....	5
1.1 Ziel der Arbeit.....	6
1.2 Inhalt des Themas	7
2 Theoretische Grundlage	8
2.1 Liegenschaftskataster.....	8
2.2 Photogrammetrie	9
2.2.1 Fernerkundung – Luftbildaufnahmen	10
2.2.2 Aufnahmetechnik einer Digitalkamera und Einfluss auf Bilderfassung.....	11
2.2.3 Innere Orientierung und Kalibrierung.....	13
2.2.4 Äußere Orientierung	14
2.2.5 Orientierungsverfahren	14
2.2.6 Funktionaler Ansatz zur Bestimmung von Objektkoordinaten XYZ.....	15
2.2.7 Bündeltriangulation.....	15
2.2.8 Image Matching - Structure from motion	16
2.2.9 Genauigkeit einer Aufnahme	18
2.2.10 Planung einer Aufnahme (Flugaufnahme) und Restriktionen.....	19
2.3 UAV, UAS, Drohne.....	21
2.3.1 Unbemannte Fluggeräte in der Geodäsie.....	22
2.3.2 UAS - Technik	23
3 Rahmenbedingungen und Aufbau der Untersuchung.....	25
3.1 Rechtliche Aspekte	25
3.2 Gebäudeerfassung	26
3.3 Durchführung der Befliegung	26
3.4 Auswahl des Befliegungsgebietes	27
3.5 Software.....	29
3.5.1 Bildorientierung.....	29
3.5.2 Flugplanung und Überwachung	29
3.5.3 Datenverarbeitung & Koordinatenmessung.....	30
3.6 Hardware	30

3.6.1	GNSS-Rover	30
3.6.2	Drohne	31
3.6.3	Kamera.....	31
3.6.4	Rechner	32
4	Auftrags- und Flugplanung, Flugdurchführung	33
4.1	Aufnahmeplanung	33
4.2	Passpunktnetz.....	35
4.3	Durchführung der Befliegung	36
5	Auswertung	40
5.1	Relative Orientierung.....	41
5.2	Die Absolute Orientierung	44
5.2.1	Targetsverkennung.....	44
5.2.2	Passpunktconstellation.....	45
5.3	Bewertung der Kalibrierung und der absoluten Orientierung	49
5.3.1	Kamerakalibrierung.....	49
5.3.2	Absolute Orientierung	55
5.4	Dense Image Matching & Punktwolkenverarbeitung	57
5.5	Schrägluftbild und Fehlerquelle	59
5.6	Bestimmung von Gebäudekoordinaten.....	62
5.6.1	Messung in Punktwolken.....	62
5.6.2	Messung an Dreiecksvermaschung	66
5.6.3	Bildmessungen - Monoplotting.....	67
5.6.4	Punktbestimmung mit räumlicher Messmarke.....	68
5.7	Katasterangaben zum Gebäude.....	69
6	Ergebnisse und Bewertung	71
6.1	Vergleich der Koordinaten, der Verfahren und der Passpunktconstellationen.....	71
6.2	Zeitaufwand UAV – gestütztes Messverfahren	73
6.3	Wirtschaftlichkeit.....	74
7	Fazit.....	77
8	Ausblick	78
9	Anlagen.....	85

Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
Beidou	Satellitennavigationssystem von China
BMVI	Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
DSLM	Digital Single Lens Mirrorless - Systemkamera
DSLR	Digital Single Lens Reflex – Spiegelreflexkamera
Galileo	Satellitennavigationssystem von Europa
GIONASS	Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema – Satellitennavigationssystem von Russland
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System (Umfasst alle Navigationssysteme)
GPS	Global Positioning System – Satellitennavigationssystem von USA
GSD	Ground Sample Distance – Bodenauflösung (Pixelgröße auf dem Boden)
IO	Innere Orientierung – Interior Orientation
LiegVermErlass	Verwaltungsvorschrift zur Erhebung von Geodaten durch Liegenschaftsvermessungen
LGLN	Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen
LuftVO	Luftverkehrsordnung
MI	Ministerium für Inneres und Sport
NVermG	Niedersächsisches Gesetz über das amtlichen Vermessungswesen
Pix	Pixel
RANSAC	Random Sample Consensus
RMS	Root Mean Square – Standardabweichung
RTK	Real Time Kinematic – Echtzeit Kinematisch
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der AdV
Stabw.	Standardabweichung
UAS	Unmanned Aerial System (Unbemanntes Flugsystem)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Unbemanntes Luftfahrzeug)
UTM	Universale Transversale Mercatorprojektion
VKV	Vermessungs- und Katasterverwaltung

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Passpunktabweichung Quelle: Eigene.....	37
Tabelle 2	Kameraparameter Quelle: Eigene.....	40
Tabelle 3	Probleme bei Bildzuordnung der 30m Aufnahmen Quelle: Eigene.....	42
Tabelle 4	Güte der Bildorientierung Quelle: Eigene.....	43
Tabelle 5	Passpunktkonstellationen Quelle: Eigene.....	48
Tabelle 6	Absolute Orientierung Bezugsprojekte Quelle: Eigene.....	49
Tabelle 7	Parameter der inneren Orientierung 50m Aufnahmen Quelle: Eigene.....	51
Tabelle 8	Parameter der inneren Orientierung 30m Lang Quelle: Eigene.....	52
Tabelle 9	Parameter der inneren Orientierung 30m Quer Quelle: Eigene.....	52
Tabelle 10	Bestimmung der Freiheitgerde Quelle: Eigene.....	54
Tabelle 11	Absolute Orientierung Bezugsdaten Quelle: Eigene.....	55
Tabelle 12	Absolute Orientierung Zusammengeführte Aufnahmen Quelle: Eigene.....	56
Tabelle 13	Absolute Orientierung Zusammengeführte Aufnahmen Lang und Quer Quelle: Eigene.....	56
Tabelle 14	Absolute Orientierung Mittelwerte Quelle: Eigene.....	57
Tabelle 15	Soll-Ist Bildüberlappung Quelle: Eigene.....	60
Tabelle 16	Ergebnisse Gebäudekoordinaten 50m Quelle: Eigene.....	71
Tabelle 17	Ergebnisse Gebäudekoordinaten 30 m Nicht optimiert Quelle: Eigene.....	72
Tabelle 18	Ergebnisse Gebäudekoordinaten 30m optimiert Quelle: Eigene.....	72
Tabelle 19	Ergebnisse Gebäudekoordinaten 30_50m Quelle: Eigene.....	72
Tabelle 20	Ergebnisse Gebäudekoordinaten 30_50m optimiert Quelle: Eigene.....	72
Tabelle 21	Zeitaufwand Quelle: Eigene.....	73
Tabelle 22	Wirtschaftlichkeit Quelle: Eigene.....	74
Tabelle 23	Anzahl Gebäudeecken Quelle: Eigene.....	75
Tabelle 24	Kostenaufwand Quelle: Eigene.....	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Datenfluss der Bündelausgleichung (Eigene Darstellung) Quelle: Luhmann 2010, S. 305.....	16
Abbildung 2 Structure-from-motion (Eigene Darstellung) Quelle: Luhmann 2018, S. 491.....	17
Abbildung 3 Starrflügel-UAS „Vela“ des IFB Quelle: DVW 2018, S.32	22
Abbildung 4 DJI Inspire 1 Quelle: https://www.dji.com/de/inspire-1/aircraft#sub-feature ...	23
Abbildung 5: Gimballkamera Quelle: www.dji.com/de/inspire-1	24
Abbildung 6 Detailauflösung amKanaldeckel Quele: Eigene	26
Abbildung 7: Übersicht über Vegetation im Befliegungsgebiet Quelle: Google Maps	28
Abbildung 8 Objektpunktgenauigkeit Quelle: LGLN_Viewer_Gebaeudegenauigkeit	28
Abbildung 9: Mission - Flugplanung (Eigene Darstellung) Quelle: Pix4D Capture	30
Abbildung 10 Flugparameter (Eigene Darstellung) Quelle: Pix4D Capture	30
Abbildung 11 UAV DJI Inspire 1 Quelle: https://www.dji.com/de/inspire-1/aircraft#sub-feature	31
Abbildung 12: DJI Zenmuse X5 Quelle: www.dji.com/de/inspire-1/camera#sub-feature	31
Abbildung 13 Workflow - von Auftragsplanung bis Datenausgabe (Eigene Darstellung).....	33
Abbildung 14 Lienienhafte Marke Quelle: Eigene	35
Abbildung 15 Codierste Messmarke Agisoft Quelle: Eigene	35
Abbildung 16 Netzpunkt (Nagel) Quelle: Eigene.....	35
Abbildung 17 Netzpunkt (Rohr mit Kappe) Quelle: Eigene	35
Abbildung 18 Messgebiet -Passpunktverteilung - Befliegungsfläche Quelle: Eigene	37
Abbildung 19 Bildqualität in Höhe 30 m Oben, 50 m unten Quelle: Eigene	38
Abbildung 20 Passpunktüberbelichtung Quelle: Eigene.....	39
Abbildung 21 Unschärfe und Überbelichtung im Befliegungsgebiet Quelle: Eigene	40
Abbildung 22 Projektionen bei Bildzuordnung Quelle: Eigene.....	43
Abbildung 23 Unterschied der überbelichtung zwischen Targets Quelle: Eigene.....	44
Abbildung 24 Passpunktkonstellation Quelle: Eigene	47
Abbildung 25 Umrechnung innere Orientierung CV Quelle: Hastedt 2017	50
Abbildung 26 Vergleich dichte Punktvole vs Bilder Quelle: Eigene	57
Abbildung 27 Dichtepunktvolke der Fassade Quelle: Eigene.....	58
Abbildung 28 Aussparung in der Fassade Quelle: Eigene.....	58
Abbildung 29 Bildüberlappung.....	58
Abbildung 30 Bildüberlappung 30m	59
Abbildung 31 Flugroute Quelle: Eigene	60
Abbildung 32 Verdeckung durch Objekte Quelle: Eigene	61
Abbildung 33 Punktrauschen Quelle: Eigene.....	63
Abbildung 34 Doppelte Fassade Quelle: Eigene	63
Abbildung 35 Doppelte Abbildung Quelle: Eigene.....	64
Abbildung 36 Erkennung von Ecken Quelle: Eigene.....	64
Abbildung 37 Fallrohr Quelle: Eigene	64
Abbildung 38 Schnittgerade Quelle: Eigene	65
Abbildung 39 Messung in Vermaschung CC Quelle: Eigene.....	66
Abbildung 41 Messung Kekacheltes Modell Quelle: Eigene	66
Abbildung 40 Messung in Vermaschung Agisoft Quelle: Eigene.....	66
Abbildung 42 Monoplotting in Agisoft Quelle: Eigene	67

Abbildung 43 Aufsetzten räumlichen Messmarke Quelle: Eigene	68
Abbildung 44 Aufsetzten räumlichen Messmarke 2 Quelle: Eigene	69

Formelverzeichnis

Formel 1 Maximale Belichtungszeit Quelle: Luhmann 2018, S. 598	12
Formel 2 Bildmaßstab Quelle: Luhmann 2010, S. 134	13
Formel 3 Kollinearitätsgleichungen Quelle: Luhmann 2010, S. 240.....	15
Formel 4 Objektmessgenauigkeit Quelle: Luhmann 2010, S. 137	18
Formel 5 Objektgenauigkeit parallel zur Ebene Quelle: Luhmann 2010, S. 296	18
Formel 6 Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung Quelle: Luhmann 2010, S. 296.....	19
Formel 7 Paralaxenmessgenauigkeit Quelle: Luhmann 2010, S. 296	19
Formel 8 Basis Quelle: Luhmann 2018, S.612.....	20
Formel 9 Objektgenauigkeit Quelle: Luhmann 2010, S. 535.....	34
Formel 10 Pixelgröße für Targetserkennung Quelle: Eigene.....	36
Formel 11 Einfache Fehlerfortpflanzung Quelle: Eigene.....	36
Formel 12 Testgröße der Fischer-Verteilung Quelle: Möser 2012,S.53	54
Formel 13 Anzahl Unbekannten Quelle: Luhman 2010, S.347	54

1 Einleitung

Digitalisierung, ständig brandneue Technik, neue Ideen und rasante Fortentwicklung zeichnen das 21. Jahrhundert aus. Eine gewaltige Herausforderung für jeden Menschen aktuell zu sein und sich mit dem "Know How" auseinanderzusetzen. Auch die Wirtschaftsakteure bleiben nicht davon verschont. Vielmehr um Wettbewerbsfähigkeit zu behalten, müssen die Akteure auf dem neuesten Stand bleiben. Das zwingt zu einem Wandel von diversen Strukturen im täglichen Betrieb, beim Einsatz und Schulung von Personal sowie der Wahl der eingesetzten Technik. Anpassung an die Maßstäbe von Heute ist gefordert (Brühl 2015, S. 10–12). Einer von vielen Akteuren ist der Sektor der Geoinformation. Zweidimensionale Geodaten über die Liegenschaften mit dem Messband und Winkelprisma zu erfassen, sowie weiterhin Wiedergabe dieser Daten in einer Form von analogen Karten ist nicht mehr zeitgemäß. Diese Erkenntnis ist bereits bekannt. Hingegen eine Liegenschaftsvermessung statt mithilfe eines Tachymeters und GNSS-Rovers zu bewerkstelligen, jetzt mit einer Drohne durchzuführen! Das mag bald die Realität sein, da UAV-Technik immer mehr in die Vermessung eindringt und nicht amtliche Vermessungsaufgaben bereits mittels Einsatz von Drohnen erledigt werden. Vielmehr geht der Trend in Richtung Erfassung von Höhe, Textur, Dachformen und etlichen anderen Merkmalen von Objekten, die als Geodaten zur Verfügung gestellt werden. Schließlich begrenzen sich die Geoinformationen nicht nur auf einen grafischen und beschreibenden Nachweis des Eigentums. Sie beschreiben alles, was mit Raumbezug zu tun hat, sie sind heutzutage unverzichtbare Grundlage für diverse Disziplinen, sowohl im privaten Leben, als auch in der Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung. Das sorgt für Konkurrenz und ein breites Angebot an Daten durch verschiedene Anbieter (Kehle 2018). Einer davon ist die Vermessungs- und Katasterverwaltung (VKV). Sie stellt nicht nur Geodaten bereit, sondern bietet auch Dienstleistungen, z.B. amtliche Vermessungen an. Mit Blick auf die gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen sind die VKV und die gesamte Landesverwaltung Niedersachsens gleichermaßen betroffen. Dennoch, um weiterhin einen guten Beitrag in der Volkswirtschaft zu leisten, wird bestrebt, ein Angebot gemäß den Anforderungen der Privat- Wirtschaftskunden bereitzustellen. Dafür hat die Projektgruppe VKV 2025 ein fachliches Zukunftskonzept mit Ausrichtung auf das Jahr 2025 erarbeitet. Das Konzept enthält etwa 30 Thesen, zu denen konkrete Handlungsfelder benannt worden sind, die zur Erreichung der beschriebenen Ziele umgesetzt werden müssen. Eine Zielsetzung lautet, dass die amtlichen Vermessungen (Gebäudevermessungen) wirtschaftlich mit zeitgemäßen Verfahren erfolgen sollen. Hierfür ergeben sich neue Potentiale aus den Disziplinen der Photogrammetrie, der Bildverarbeitung sowie der Fernerkundung (VKV

(2018): Projektgruppe VKV 2025, S. 3). Die Verknüpfung der bekannten Algorithmen aus den Fachdisziplinen mit unbemannten Flugsystemen, die als Trägerplattform für Kamera oder andere Sensoren eingesetzt werden, bietet neue Perspektiven zum Bewerkstelligen der geodätischen Aufgaben. Daten wie Bilder können in großer Menge semi-automatisch und effizient erfasst werden (Kersten et al. 2018). Außerdem bietet der Markt Softwareprodukte, die kostenlos oder relativ preiswert (im Gegensatz zu den bisherigen photogrammetrischen Spezialprodukten) zu erwerben sind, was unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten interessant ist. All die Überlegungen führten zur der Entstehung dieser Bachelorarbeit.

1.1 Ziel der Arbeit

Ziel für die Landesvermessung ist es, die Nutzbarkeit eines Drohnenflugs für eine amtliche Gebäudevermessung zu untersuchen. Dabei soll auch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens betrachtet werden. Da diese vermutlich vor allem vom erforderlichen Außendienstaufwand (Personalkosten) für das Verfahren abhängt, entstand die Idee zu untersuchen, inwieweit sich die Anzahl der Passpunkte auf die zu erreichende geometrische Genauigkeit auswirkt. Daher ist die fachlich notwendige Minimalkonfiguration von Passpunkten zu bestimmen; die erforderlich ist, um die geometrischen Genauigkeitsanforderungen für eine amtliche Gebäudevermessung zu erreichen. Außerdem sollen geeignete Planungsparameter für die Befliegung von Gebäuden evaluiert werden. Dazu gehören die Flughöhe, Überlappung der aufgenommenen Bilder als auch die Qualitätseigenschaften der Kamera. Im Weiteren sollen die Möglichkeiten zur Messung von Gebäudekoordinaten in den erzeugten Bildern, 3D-Mesh und Punktwolken beurteilt werden. Der bisherige Indikator zur Beurteilung der geometrischen Genauigkeit an den Gebäuden ist die Standardabweichung gemäß der Verwaltungsvorschrift zur Erhebung von Geodaten durch Liegenschaftsvermessungen (LiegVermErläss vom 07.2015). Diese Genauigkeitsvorgaben werden als Kriterium herangezogen, anhand dessen die Eignung und Wirtschaftlichkeit des eingesetzten Verfahrens evaluiert wird. Ein Blick wird noch auf die Verdeckungsproblematik durch Vegetation und andere Objekte im Bild gerichtet und deren Einfluss auf die Vermessung bewertet.

1.2 Inhalt des Themas

In der Arbeit wird die Eignung von einem Low Cost UAV-gestützten Messverfahren zur Erfassung von Gebäuden und Bauwerken zwecks der Fortführung des Liegenschaftskatasters analysiert. Mit Low Cost ist sowohl Soft- als auch Hardware gemeint, die für kommerzielle Zwecke geeignet ist, aber im günstigen Preissegment (wenige Tausend Euro) oder bezüglich der Software sogar als Open Source-Anwendung zur Verfügung steht. Das gesamte Thema unterteilt sich in mehrere Schritte, ausgehend von Rahmenbedingungen der Untersuchung, über Planung und Befliegung eines Gebietes, die Auswertung mit verschiedenen Ansätzen, Anzahl und Art der Passpunkte, bis hin zu der Messung und dem Vergleich der Gebäudekoordinaten. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und Bewertung der einzelnen Ergebnisse ab. Es wird ein Ausblick gegeben, welche fachlichen Aspekte weiter zu betrachten sind.

2 Theoretische Grundlage

In dieser Abschnitt wird ein Einblick über die wesentlichen Begriffe und Definitionen in die Thematik: Gebäudeerfassung, Photogrammetrie bzw. UAV-Photogrammetrie und Datenauswertung verschafft. Die Erläuterung dieser Ausdrücke soll Aufschluss über die theoretischen Aspekte, sowie deren Zusammenhang mit der Projektdurchführung geben.

2.1 Liegenschaftskataster

Nach dem Vermessungsgesetz (Niedersächsisches Gesetz über das amtliche Vermessungswesen (NVerMG)) hat das amtliche Vermessungswesen Angaben zu Landesbezugssystem, Topografie, Liegenschaften und Hinweise auf öffentlich-rechtliche Festlegungen in ihren Lagen auf der Erdoberfläche zu bestimmen und in ihren bedeutsamen Merkmalen zu beschreiben. Die Liegenschaften sind unter anderem Flurstücke und Gebäude, die im Liegenschaftskataster nachgewiesen werden. Diese sind im raumbezogenen Informationssystem zu führen, dem das Landesbezugssystem als einheitliches, geodätisches System zugrunde liegt. Die Lage und Geometrie der Liegenschaften muss eindeutig bestimmt sein, was durch Vermessungszahlen und Objektpunkte z.B. Punktkoordinaten festgesetzt wird (Ministerium für Inneres und Sport (MI) 12.12.2002, S. 1–2). Die größte zulässige Abweichung beträgt für neu bestimmte Punkte in allen Vermessungsverfahren bei Mehrfachbestimmungen 4 cm. Die Gewinnung der Daten findet mit verschiedenen Messmethoden sowie deren Kombination statt. Dafür dürfen nur zulässige Vermessungsverfahren eingesetzt werden, die im LiegVermErlass (s. Anlage 5 LiegVermErlass) aufgeführt wurden. Desweiteren müssen die Ergebnisse hinreichend genau und vertrauenswürdig bestimmt werden (s. Anlage 6 LiegVermErlass), sodass sie unabhängig reproduziert werden können. Bei der Wahrnehmung von Messaufgaben ist stets das Nachbarschaftsprinzip, das die Nachbarschaftstreue als allgemeine vermessungstechnische Forderung bezeichnet, zu wahren, indem die am nächsten gelegenen Punkte des Liegenschaftskataster in die Vermessung einbezogen werden. Im Zusammenhang mit Liegenschaftsvermessungen sind weitere Angaben des Amtlichen Vermessungswesens zu erfassen, sowie unrichtige Angaben zu berichtigen (Vermessungs- und Katasterverwaltung, S. 5–10).

Für diese Untersuchung sind insbesondere die Gebäude von Bedeutung, daher werden im Folgendem Grundsätze nur für Gebäudeerfassung aufgeführt: "Die Lage und der Grundriss von Gebäuden mit dazugehöriger Gebäude- oder Bauwerksfunktion, die Lagebezeichnung einschließlich der Hausnummer sowie ggf. weitere Attribute nach den Geobasisdaten

Niedersachsen, wie z. B. der Eigenname des Gebäudes, die Bauweise oder die Objekthöhe sind zu erheben. Der Grundriss wird durch prägende Elemente, in der Regel durch die aufsteigende Außenwand im Erdgeschoss, gebildet. Die Vermessungsreife des Gebäudes liegt vor, wenn die äußeren Begrenzungen der erhebungswürdigen Außenwände erstellt sind. Ein Bezug zur Flurstücksgrenze ist herzustellen, wenn dies — besonders beantragt wird oder — vermessungstechnisch zweckmäßig ist. Vorgelegte Unterlagen zum Nachweis von Gebäuden in geschlossenen Werks- und Nutzungsbereichen können berücksichtigt werden, wenn sie zur sachgerechten Führung des Liegenschaftskatasters geeignet sind und der Verwaltungsaufwand dadurch reduziert wird. Die Entscheidung über die Eignung der vorgelegten Unterlagen trifft die Vermessungsstelle im Rahmen der Erhebung." (Vermessungs- und Katasterverwaltung, S. 9). Die Erhebung von Gebäuden erfordert nicht die Bestimmung jeder Gebäudeecke mit Koordinaten, sondern sämtliche Längen der Gebäudeseiten und mindestens drei Koordinaten zu ermitteln. Mit Hilfe dieser Größen kann das Bauwerk in seiner Geometrie berechnet sowie in seiner Lage georeferenziert werden. Eine umfassende Erklärung zur Erhebung von Gebäuden ist in der Gebäudebeispielsammlung zu finden, was vom LGLN zur Verfügung gestellt wird.

2.2 Photogrammetrie

Da Bildaufnahme, Auswertung und Rekonstruktion vom Objekt vollkommen in digitaler Form erfolgt, spricht der Autor K. Kraus sogar über digitale Photogrammetrie, die heutzutage meist zur Anwendung kommt, bei der auch das menschliche Sehen und Erkennen durch maschinelles Sehen (Computer-Vision) nachgeahmt wird (Kraus 2004, S. 2). "Unter Photogrammetrie versteht man allgemein Methoden, aus einem oder mehreren Bildern eines beliebigen Objektes indirekt dessen Form und Lage durch Bildmessungen sowie dessen inhaltliche Beschreibung durch Bildinterpretation zu gewinnen. Photogrammetrische Verfahren können also grundsätzlich in allen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, in denen ein Messobjekt fotografisch abgebildet und ausgewertet werden kann. Primäres Ziel einer photogrammetrischen Messung ist die exakte dreidimensionale geometrische Rekonstruktion des Objektes, wobei das Objekt in digitaler (Koordinaten, abgeleitete geometrische Elemente) oder grafischer Form (Bilder, Pläne, Karten) modelliert wird. Daneben stellt das Bild einen Informationsspeicher dar, auf den zu jedem Zeitpunkt, auch für eine inhaltliche Interpretation, zurückgegriffen werden kann." (Luhmann 2010, S. 2). Für die Durchführung des photogrammetrischen Prozesses werden instrumentale Komponenten und methodische Aspekte benötigt. Zu den Aspekten gehören neben Auswertungsalgorithmen,

Erfahrung und Handeln des Bearbeiters, die schließlich bestimmen, inwieweit das rekonstruiertes Objekt dem Aufgenommenen entspricht (Luhmann 2010, S. 4).

2.2.1 Fernerkundung – Luftbildaufnahmen

Die Gesamtheit aller Verfahren zur berührungslosen Informationsgewinnung über die Erdoberfläche wird als Fernerkundung bezeichnet (Kraus 2004, S. 2). Für die Fernerkundung sind hauptsächlich die Erdoberfläche und darauf ablaufende Prozesse von Interesse, welche unter anderem aus dem Bild entnommen werden können. Hierfür wird die Fernerkundung oft mit anderen Geowissenschaften und Disziplinen verzahnt, die genauso aus Bildauswertung semantische oder geometrische Informationen gewinnen. Eine von den Wissenschaften ist die Photogrammetrie und kann sogar als Teil der Fernerkundung angesehen werden. Die Bilder können mit klassischen Plattformen (Flugzeug, Satellit) erfasst werden, wobei in den letzten Jahren sich Drohnen als zusätzliche Trägerplattformen für die Sensorik zur Bilderfassung etabliert haben (Heipke 2017, S. 4–5). Diese von einer Kamera aufgenommene Bilder, die in einem Flugkörper installiert ist, werden als Luftbilder bezeichnet (Huss 1984, S. 2). Die Luftbildaufnahme unterteilt Huss in Bezug auf Gierloff-Emdenen et al. 1970 hinsichtlich der Aufnahmerichtung weiter in: Senkrecht-, Schräg- und Horizontluftbilder. Die Senkrechtaufnahmen werden auch als Nadiraufnahmen bezeichnet und sie zeichnen die lotrecht gerichtete Aufnahmeachse aus, die trotz Stabilisierungshilfsmittel nur im Idealfall der Lotrichtung entspricht. Meist weisen die Bilder eine Abweichung $<3^\circ$ von der Nadirrichtung auf. Hingegen verläuft bei den Horizontbildern die optische Achse der Bilder nahezu parallel zum Horizont. Die Neigung der optischen Achse der Schrägluftbilder liegt zwischen $15-75^\circ$. Huss schreibt weiter, dass diese Aufnahmen durch die Schrägansicht sich zur Detailauswertung von Objekten gut eignen. Durch die Kameraneigung treten im Bild dennoch perspektivische Verzerrungen und Maßstabsänderungen auf, welche Messungen und Interpretationen des Bildes erschweren. Darüber hinaus entstehen sichttote Räume durch die Höhe der im Vordergrund stehenden Objekte (Huss 1984, S. 84–85).

Der **Zeitraum für die Luftbildaufnahme** wird in Abhängigkeit vom Aufnahmезweck (z.B. Gelände, Vegetation, Beweissicherung) geplant. Neben Wetterbedingungen, die sich auf die Stabilität des Fluges auswirken, spielt die Geländeausleuchtung eine wichtige Rolle, da diese für die Informationserkennung im Bild von Bedeutung ist. Das wird durch die folgenden Faktoren bestimmt: Sonnenhöhe, Bewölkungsgrad und Lufttrübung. Der Sonnenstand und damit verbundene Schattenlänge ist Jahres- und Tagesabhängig. In Bezug auf DOM (digitales Oberflächenmodell) darf einerseits die Vegetation nicht aufgeblüht sein, andererseits darf der Schnee den Boden nicht bedecken. Der Zustand wird im frühen

Frühling oder im späten Herbst erreicht. Gleichzeitig ist diese Zeit für den Sonnenstand geeignet. Die Bewölkung vermindert die Helligkeit und verursacht Schatten. Die Lufttrübung hat Einfluss auf die Geländerückstrahlung und Streuung des Lichtes. Dadurch wird der Kontrast und Bildqualität vermindert. (Huss 1984, S. 88–90).

2.2.2 Aufnahmetechnik einer Digitalkamera und Einfluss auf Bilderfassung

Die Differenzierung zwischen Digitalkameras kann unter den Kriterien wie Sucher, Objektiv, Format oder Einsatz erfolgen, woraus unterschiedliche Kameratypen (z.B. Spiegelreflex-, Kompakt- oder Hochfrequenzkamera) hervorgehen. Dabei wird die Aufmerksamkeit hier auf die System- und Spiegelreflexkamera gerichtet. Die Systemkamera wird auch mit der Abkürzung DSLM (Digital Single Lense Mirrorless) bezeichnet (Przybilla 2017, S. 61) und im Grunde besteht der Unterschied zur Spiegelreflexkamera (DSLR – Digital Single Lense Reflex) nur in dem Sucher, der der Anvisierung des aufzunehmenden Objektes dient. Bei der Systemkamera wird das aufzunehmende Bild vom Sensor erfasst und über ein kleines Display an der Kamera oder im Okular wiedergegeben. Die DSLR-Kameras besitzen einen planen Spiegel, der den Strahlengang des Objektiv in ein Okular umleitet, gleichwohl die Möglichkeit die Bildbetrachtung über einen LCD Display besteht. Dieser genannte Spiegel wird während einer Sensorbelichtung hochgeklappt (Luhmann 2018, S. 218). Das besondere an den Kameras macht das Wechselobjektiv aus, da im Gegensatz zu einem festen Objektiv die Brennweite und Qualität des Objektivs den Bedürfnissen angepasst werden kann. Ein weiteres wichtiges Element einer Kamera bildet der Bildsensor. In einer Digitalkamera werden Bildinformationen mithilfe von einem optoelektronischen Sensor erfasst, was den Unterschied zur analogen Bildaufnahme darstellt, bei der die Informationen auf einem Film mit lichtempfindlicher Emulsion festgehalten werden (Kraus 2004, S. 1–2). Anfang der siebziger Jahre wurden CCD-Sensoren (charge coupled devices) zur digitalen Aufnahmetechnik erfunden. Zur weiteren Entwicklung gehört ein „Complementary Metal Oxide Semicinductor“ CMOS-Sensor, der derzeit vorrangig in Digitalkameras eingesetzt wird. Zu den Vorteilen von CMOS- gegenüber CCD-Sensoren zählen unter anderem geringere Herstellungskosten, bis 1/3 des Energieverbrauchs und Bildfrequenzen mit mehr als 2000 Bildern pro Sekunde. Im Allgemeinen enthält ein Bildsensor eine Vielzahl von lichtempfindlichen Detektorelementen, die aus einfallenden Photonen eine elektrische Ladung erzeugen. Im Fall von CMOS-Sensoren wird diese Ladung direkt in jedem Pixel verarbeitet, wodurch eine geringere Störanfälligkeit gegenüber Blooming und Transportverlusten erreicht wird. Jedoch weisen aufgrund der geringeren Lichtempfindlichkeit und kleineren Pixel diese Sensoren ein erhöhtes Rauschen gegenüber CCD-Sensoren auf (Luhmann 2010, 165, 171-172). Die Pixelgröße wird durch Format und

Auflösung eines Sensors bestimmt. Das Format bestimmt sich nach Breite sowie Höhe des Sensors und kann eine beliebige Größe annehmen. Die Auflösung wird in Megapixel ausgedrückt und ist ein Produkt aus Anzahl der Pixel pro Reihe und pro Zeile. Das Format und die Auflösung eines Sensors sind die wesentlichen Parameter für die Qualität des zu erfassenden Bildes (Przybilla 2017, S. 54).

Darüber hinaus sind auch Komponenten wie: Blende, Verschluss und Objektivbrennweite zu erwähnen, da diese sich über ihre Konfiguration auf die Güte einer Aufnahme auswirken.

Der Verschluss ist eine mechanische Öffnungsvorrichtung, die über kurze Zeit den Strahlengang zur Belichtung eines Sensors öffnet. Die Zeitdauer der Öffnung wird über die Verschlusszeit geregelt. Es wird zwischen mechanischem Zentral- und Schlitzverschluss unterschieden. Hingegen sind Digitalkameras mit einem elektronischen Verschluss (Shutter) ausgestattet. CMOS-Sensoren arbeiten nach dem Prinzip Rolling-Shutter, bei dem jede Zeile zu einem anderen Zeitpunkt belichtet wird. Das führt bei einer relativen Bewegung zwischen Kamera und Objekt zur Bildverzerrung. Der Effekt kann entweder mit einer Kombination von Rolling-Shutter und einem mechanischen Verschluss verhindert werden, oder mathematisch modelliert und in der Bündelausgleichung kompensiert werden (Luhmann 2018, S. 219–221). In der Praxis ermöglicht eine lange Belichtungszeit bei schlechten Lichtverhältnissen hellere Aufnahmen, aber gleichzeitig steigt das Bildrauschen. Im Weiteren kann eine Bewegungsunschärfe (Bildwanderung) im Bild bei räumlichen Bewegung der Kamera während der Belichtung auftreten. Die **Bildwanderung** hängt von der Geschwindigkeit der Kamerabewegung, Belichtungszeit und Bildmaßstab ab. Die maximale Belichtungszeit Δt_{max} lässt sich bei bekannter geometrischer Auflösung AV des Sensors, Bewegungsgeschwindigkeit v und Maßstab m_b bestimmen (Luhmann 2018, S. 597–598).

$$\Delta t_{max} = \frac{\Delta s'_{max}}{v} * m_b$$

mit:

$$\Delta s'_{max} = 1,5 * AV^{-1}$$

Formel 1 Maximale Belichtungszeit *Quelle: Luhmann 2018, S. 598*

Die Blende regelt durch ihre relative Öffnung die Lichtstärke eines Objektivs und wird mit der Blendenzahl k ausgedrückt. Je größer die Blendenzahl, desto kleiner ist die Öffnung und desto weniger Licht tritt auf den Bildsensor auf. Trifft zu wenig Licht auf die Detektorelemente auf, werden die Bildpixel zu dunkel. Im umgekehrten Fall verursacht eine zu große Lichtmenge eine Überbelichtung und damit ist die Erkennung von Details erschwert

oder gar nicht möglich. Somit ist die Blendeneinstellung so zu wählen, dass alle Details im Bild gut ausgeleuchtet werden. Gleichwohl wirkt sich die Blendenöffnung auf die Scharfabbildung aus. Eine ausführliche Beschreibung dazu gibt Luhmann 2010; S. 111-113. Hauptsächlich ist dabei zu beachten, dass das zu erfassende Objekt innerhalb der Schärfentiefe liegt, um dieses scharf abzubilden (Luhmann 2010, S. 183–184).

Brennweite f bzw. kalibrierte Kamerakonstante c beschreibt den Abstand von dem Projektionszentrum bis zum Bildsensor. Dabei ist das Projektionszentrum der Punkt, durch den alle Lichtstrahlen gradlinig verlaufen. Dieser Abstand kennzeichnet Objektive und wird zu Berechnung des Bildmaßstabs M_b und der Bildmaßstabszahl m_b benötigt. Diese wird durch den Quotienten aus Aufnahmeentfernung h der Kamera zum Objekt und der Brennweite gebildet oder Objektgröße im Objektraum und Dinggröße auf dem Bildsensor (auch Pixel kann als Dinggröße angenommen werden):

$$m_b = \frac{h}{c} = \frac{X}{x} = \frac{1}{M_b}$$

Formel 2 Bildmaßstab *Quelle: Luhmann 2010, S. 134*

Der Maßstab wird zum einen für die Genauigkeitsbetrachtung und zum anderen für die Detailauflösung benötigt. Die Detailauflösung ist ein Produkt aus dem Maßstab und der Pixelgröße und gibt Aufschluss über das kleinste Objektmerkmal, das im Bild zu erkennen ist (Luhmann 2010, S. 134).

2.2.3 Innere Orientierung und Kalibrierung

Die innere Orientierung besteht aus Parametern, die die Lage des Projektionszentrums O' im kamerafesten Koordinatensystem (Sensorkoordinatensystem), Abweichungen von der Zentralperspektive und Bildfehler beschreiben. Zu den Parametern gehören: Bildhauptpunkt H' mit (x', y') , Kamerakonstante c und Verzeichnung $(\Delta x', \Delta y')$ (Luhmann 2010, S. 143–144). Zur genauen Erläuterung der Parameter siehe Luhmann 2010; S. 138-153.

Unter Kalibrierung ist die Bestimmung der inneren Orientierung einer Kamera zu verstehen. Dafür werden überwiegend rechnerische Verfahren eingesetzt, welche Parameter der inneren Orientierung der gewählten Kamera indirekt aus Bildkoordinaten bestimmen. Dieses erfolgt in der Regel mithilfe der Bündelausgleichung (Luhmann 2010, S. 146).

Die Kamerakalibrierung des Aufnahmesystems ist in photogrammetrischen Anwendungen von besonderer Bedeutung, wenn erhaltene Ergebnisse hinsichtlich ihrer Genauigkeit zu beurteilen sind. Je nach verwendeter Aufnahmetechnik und zu erreichender Messgenauigkeit ist die innere Orientierung zu berücksichtigen (Luhmann 2010, 529, 554).

Im Standardfall wird angenommen, dass die Parameter der inneren Orientierung innerhalb einer Aufnahme konstant bleiben, sofern keine Änderung an Kamerageometrie vorgenommen wird. Jede Umfokussierung, Blendenänderung und jeder Objektivwechsel führen zu Veränderungen in der Geometrie der Kamera und müssen in der Auswertung mitberücksichtigt werden (Luhmann 2018, S. 179).

Die Parameter der inneren Orientierung können mithilfe von Testfeldkalibrierung oder Simultankalibrierung (On-the-job-Kalibrierung) bestimmt werden. Die Simultankalibrierung nutzt die Aufnahmen eines Messobjektes und erfolgt während der Objektauswertung in der Bündelausgleichung. Der Vorteil dieser Kalibrierung ist die Bestimmung der inneren Orientierung exakt für den Zeitpunkt der Aufnahme. Und somit können höchste Genauigkeiten bei der Objektauswertung erreicht werden (Luhmann 2018, S. 651).

2.2.4 Äußere Orientierung

Die Äußere Orientierung beschreibt durch 6 Parameter die Ausrichtung (Drehwinkel: ω, φ, κ um die Koordinatenachsen X, Y, Z) und die Lage (X_0, Y_0, Z_0) des Bildkoordinatensystems zum Projektionszentrum O' im übergeordneten Objektkoordinatensystem (Luhmann 2010, S. 206–207).

2.2.5 Orientierungsverfahren

Die Orientierung eines Stereobildpaares stellt die Bestimmung der äußeren Orientierung für beide Bilder dar. Lösung hierzu kann über ein einstufiges Verfahren mithilfe von einer Bündeltriangulation oder eines zweistufigen Verfahrens der relativen und absoluten Orientierung erreicht werden. Hierzu ist zu erwähnen, dass ein typisches Stereobildpaar eine Überlappung von mindestens 50% aufweist und stellt eine Minimalkonfiguration zur Erfassung von dreidimensionalen Objektinformationen dar (Luhmann 2010, 132, 272).

Relative Orientierung

„Relative Orientierung eines Stereobildpaares beschreibt räumliche Translation und Rotation eines Bildes relativ zum Stereopartner in einem gemeinsamen lokalen Modelkoordinatensystem“, das durch das dreidimensionale xyz „[...] Bildkoordinatensystem des ersten (linken) Bildes mit Ursprung im Projektionszentrum O' festlegt.“ (Luhmann 2010, S. 275).

Absolute Orientierung

"Die absolute Orientierung hat die Aufgabe, das bei der relativen Orientierung mit beliebiger Lage, Orientierung und Maßstab bestimmte Modellkoordinatensystem xyz mithilfe von Passpunkten in ein übergeordnetes Objektkoordinatensystem XYZ zu transformieren." (Luhmann 2010, S. 289).

2.2.6 Funktionaler Ansatz zur Bestimmung von Objektkoordinaten XYZ

Der rechnerischen Bestimmung von XYZ-Koordinaten von Objekten wird der funktionale Ansatz zugrunde gelegt, der über die Kollinearitätsgleichungen beschrieben wird. Diese lauten wie folgt:

$$x' = x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x'$$
$$y' = y'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y'$$

Formel 3 Kollinearitätsgleichungen *Quelle: Luhmann 2010, S. 240*

Diese Gleichungen beschreiben eine Transformation von Objektkoordinaten (X, Y, Z) in (x', y') entsprechende Bildkoordinaten eines Bildes. Dabei müssen die Parameter der inneren Orientierung $(x'_0, y'_0, c, \Delta x', \Delta y')$ und äußeren Orientierung $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa)$ dieses Bildes bekannt sein (Luhmann 2010, S. 240). Mit gemessenen Bildkoordinaten (x', y') und nach der Umstellung der Gleichungen nach (X, Y, Z) werden die Objektkoordinaten schließlich berechnet. Die innere und äußere Orientierung wird im Fall der Mehrbildauswertung über die Bündeltriangulation ermittelt.

2.2.7 Bündeltriangulation

Bündelblockausgleichung ist ein rechnerisches Verfahren zur Optimierung eines Mehrbildverbandes und Rekonstruktion des in dem Bildverband erfassten Objektes. In einem Ausgleichungssystem werden über identische Punkte (Homologe Punkte) verknüpfte Bilder (Strahlenbündel) durch Ausgleichung aneinander angepasst. Zugleich werden die Unbekannten 3D-Koordinaten, innere Orientierung jeder beteiligter Kamera, äußere Orientierung jedes Bildes sowie dazugehörige statistische Angaben zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit berechnet. Sowohl alle bekannten Parameter und Messwerte, als auch unbekanntes Größen werden in einem simultanen Ausgleichungsvorgang berücksichtigt und optimiert, so dass die wichtigste geometrische Bedingung erfüllt wird, indem sich alle homologe Bildstrahlen an Objektpunkten bestmöglich schneiden (Luhmann 2010, S. 301–

302). Kraus beschreibt zur Bündelausgleichung zusätzlich folgende Kriterien „Die einzelnen Objektpunkte müssen mindestens auf zwei Bildern - besser auf mindestens drei Bildern (Kontrolle!) - abgebildet sein, und die Strahlen in den Objektpunkten dürfen keine schleifenden Schnitte bilden.“ (Kraus 1997, S. 281–282).

Der grundlegende Ansatz für das Gleichungssystem der Bündeltriangulation basiert auf den Kollinearitätsgleichungen (Luhmann 2010, S. 307). Die Abbildung 1 stellt den Datenfluss der Bündelausgleichung von den Eingangs- bis zu den Ausgangsdaten dar.

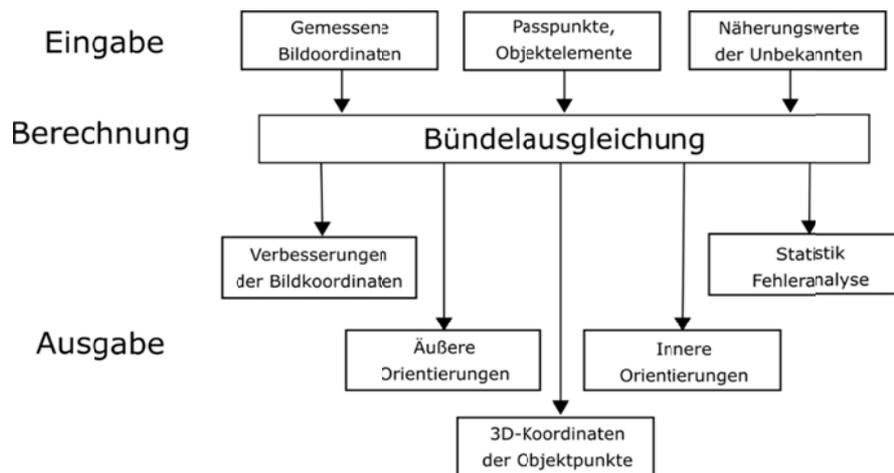


Abbildung 1 Datenfluss der Bündelausgleichung (Eigene Darstellung) *Quelle: Luhmann 2010, S. 305*

2.2.8 Image Matching - Structure from motion

Für Lösung der Bündeltriangulation müssen die Bilder eines Mehrbildverbandes über korrespondierende Bildmerkmale einander eindeutig zugeordnet und orientiert werden, was unter dem Begriff: Matching oder Bildzuordnung zu verstehen ist. Die für die Bildzuordnung erforderlichen identischen Punkte einer geeignet strukturierten Objektszene können automatisch mithilfe des Verfahrens Bildzuordnung (Image Matching) in den Bildern identifiziert werden (Luhmann 2018, S. 487). Hingegen für die Bildzuordnung einer beliebigen Objektszene ohne Signalisierung mit codierten Messmarken eignet sich das jüngst etablierte Verfahren „Structure-from-Motion“. Unter diesem Begriff ist ein Verfahren zur Rekonstruktion eines Objektes (Structure) aus Bildern gemeint, das fotografisch aus verschiedenen Kamerapositionen (Motion) erfasst wurde. Dieses Verfahren ist ein Arbeitsfluss aus verschiedenen Algorithmen, die einen Gesamtprozess zur Gewinnung von 3D-Daten bilden. Der Arbeitsfluss kombiniert Bildverarbeitungsverfahren, robusten Orientierungsmethoden, Bündelausgleichung mit Simultankalibrierung, Stereobildmessung und Punktwolkenverarbeitung. Beim Bildverarbeitungsverfahren werden unter anderem Bildpyramiden berechnet, was zur Steigerung der Rechenperformance beiträgt. Dann durchlaufen Interestoperatoren alle Bilder und berechnen dabei Merkmalswerte, die zu

Interestpunkten werden (Interestoperatoren, siehe Luhmann 2010; S. 455-461). Diese Punkte werden untereinander auf Gleichheit der Merkmalswerte überprüft und bei Übereinstimmung werden sie zu korrespondierenden Punkten für die Bildzuordnung. Dann erfolgt eine RANSAC-basierte relative Orientierung der Bilder. Dabei wird ein Bild benötigt, das kleine Basis und ähnlichen Orientierungswerte aufweist. Schließlich werden diesem Bildpaar weitere Bilder sukzessiv hinzuorientiert. (RANSAC, Siehe Luhmann 2018; S. 131-132). Anschließend werden alle Bilder in einer gemeinsamen Bündelausgleichung orientiert. Hierzu können Datumspunkte (Passpunkte) für gleichzeitige Berechnung der absoluten Orientierung hinzugefügt werden. Aus den Merkmalspunkten werden in der Ausgleichung Objektkoordinaten ermittelt, die eine dünne Punktwolke bilden. Ein Oberflächenmodell wird erreicht nach der Fusionierung von dichten Punktwolken (Multi-View-Stereo, siehe Luhmann 2018; S. 502), die mithilfe der Stereobildzuordnung prozessiert werden (Luhmann 2018, S. 491-492).

Der Workflow ausgehend von Start bis zu dem Ziel (Oberflächenmodell) wird schematisch mit der Abbildung 2 wiedergegeben.

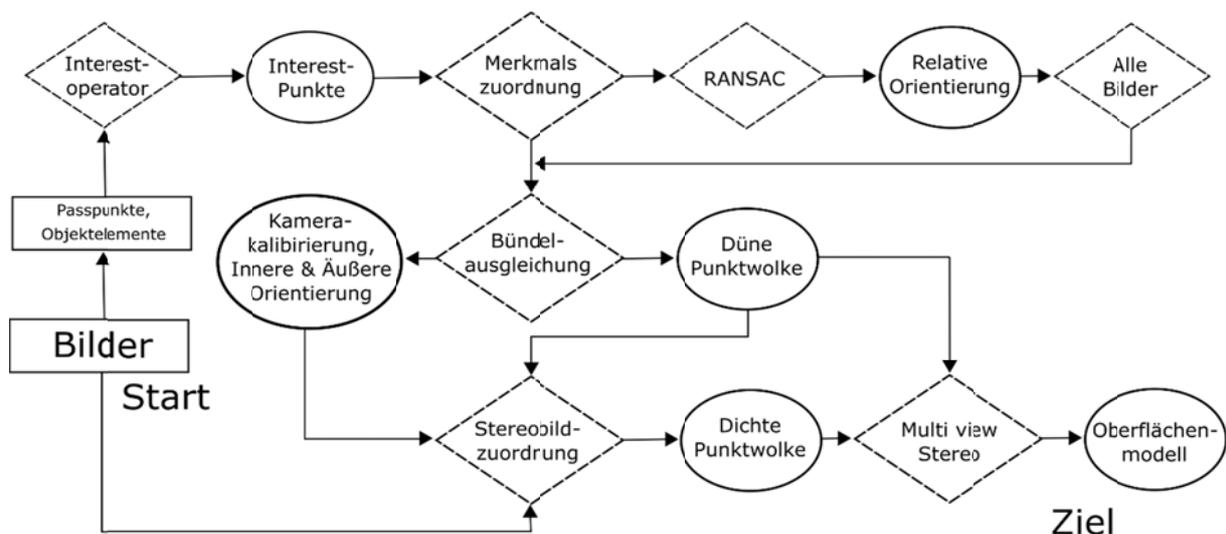


Abbildung 2 Structure-from-motion (Eigene Darstellung) Quelle: Luhmann 2018, S. 491

"Structure-from-motion gelingt generell dann, wenn eine ausreichende Oberflächenstruktur vorliegt, eine dichte Bildüberdeckung erzielt wird und die verwendete Kamera entweder vorab kalibriert oder zumindest während der Bildaufnahme mechanisch stabil bleibt. Die erreichbare Genauigkeit liegt bei ca. 0.5-2 Pixel, bedingt durch Art der Merkmalsextraktion und das verwendete Maß zur Berechnung der Ähnlichkeit zwischen den Bildern. Der Rechenaufwand liegt vor allem in der Bestimmung der Merkmalspunkte begründet, d.h., mit hoch aufgelösten und vielen Bildern kann die Verarbeitungszeit nach heutigem Stand mehrere Stunden bis zu Tagen betragen." (Luhmann 2018, S. 492).

2.2.9 Genauigkeit einer Aufnahme

Die Genauigkeit der photogrammetrischen Produkte ist von der Bildmessung und diese wiederum von der Leistungsfähigkeit der Kamera abhängig. Bildmessgenauigkeiten von ca. 0,5 – 2 Pixel werden mit Merkmalerkennungsmethoden und Zuordnungsverfahren, die auf natürlichen Bildmerkmalen basieren, erreicht. Die Leistung einer Kamera wird über radiometrische Qualität und über eine stabile innere Orientierung erzielt (Luhmann 2018, 334, 613–615, 629-630). Die radiometrischen Eigenschaften (Verzeichnung, Signalverarbeitung, Beugung, Bewegungsunschärfe) bewirken die Qualität der Bilder (Unschärfe, Verschmierung). Auf die Stabilität der IO wirkt sich die mechanische Beständigkeit der Kamera gegen Erschütterung und gegen Kameraverdrehung aus. Das setzt ein stabiles Objektiv, keine bewegliche Teile in der Optik oder am Sensor, sowie kein Sensorreinigungssystem voraus (Cramer und Leinss, S. 100).

Zwecks Planung kann die erreichbare Objektgenauigkeit S_X einer photogrammetrischen Auswertung näherungsweise in Anlehnung an die Stereobildauswertung geschätzt werden. Dafür müssen die Bildmessgenauigkeiten $S_{x'}$ und Maßstab mb bekannt sein. Die Zusammensetzung ist wie folgt:

$$S_X = m_b S_{x'}$$

Formel 4 Objektmessgenauigkeit *Quelle: Luhmann 2010, S. 137*

Für die S_Y Genauigkeit reicht in der Regel die Abschätzung parallel zur Bildebene mit:

$$S_X = S_Y = m_b S_{xy'}$$

Formel 5 Objektgenauigkeit parallel zur Ebene *Quelle: Luhmann 2010, S. 296*

Für die Bildmessgenauigkeit $S_{x'}$ wird üblich der Wert \square Pixel für automatische Punktmessung und $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{3}$ für manuelle Messung angenommen. Dabei spielt die Erkennbarkeit der zu messenden Strukturen eine wichtige Rolle. Im Bild müssen die Objektstrukturen für visuelle digitale Auswertung in 3-6 Pixel abgebildet werden. Für automatische Messung liegt der Wert bei 6-10 Pixel. Die Genauigkeitsabschätzung der Objektkoordinaten in die Aufnahme-Richtung hängt von der Parallaxenmessgenauigkeit $S_{x'}$, vom Bildmaßstab mb und dem Abstand-Basis-Verhältnis mb ab, der dem Design-Faktor q entspricht. Dieser Faktor beschreibt die Schnittgeometrie der Punktbestimmung aus Stereoauswertung (Luhmann 2010, 136-138, 296, 532).

$$S_Z = \frac{h}{b} * \frac{h}{c} * S_{px'} = qm_b S_{px'}$$

Formel 6 Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung *Quelle: Luhmann 2010, S. 296*

mit:

$$S_{px'} = \frac{S_{x'}}{\sqrt{2}}$$

Formel 7 Paralaxenmessgenauigkeit *Quelle: Luhmann 2010, S. 296*

2.2.10 Planung einer Aufnahme (Flugaufnahme) und Restriktionen

Die Planung einer Aufnahme ist ein wichtiger Teil eines gesamten Projektes und ist ein komplexer Prozess; insbesondere wenn eine bestimmte Genauigkeit am Messobjekt zu erreichen ist, da diese sich unmittelbar auf die Aufnahme­konfiguration auswirkt. Durch eine sorgfältige Vorbereitung bleiben unnötige Fehler erspart, die während oder erst nach der Aufnahme erkannt werden und dann nur schwer oder sogar gar nicht zu korrigieren sind. Im Allgemeinen erfordert die Planung die Auseinandersetzung mit folgenden Fragestellungen:

- zu erreichende Genauigkeit;
- Realisierung eines Objektkoordinatensystems;
- Maßstabs- oder Passpunktbestimmung;
- Auswertesoftware;
- Genauigkeitsnachweis;
- verfügbare Zeiten für die Aufnahme vor Ort;
- Ergebnisausgabe.

Diese Kriterien können anschließend verfeinert und dem Auftrag angepasst werden. Hierzu ist der Bezug auf die Verfügbarkeit der einzusetzenden Gerätschaften und des Personals zu nehmen, da davon die weiteren Schritte der Planung (Auflösung, Genauigkeit) abhängig sind (Luhmann 2018, S. 613–614). In Bezug auf die Flugaufnahme mit einer Drohne gehören dazu folgende Kriterien:

- Pixelgröße am Boden;
- Wahl von Kamera und Objektiv;
- Flughöhe;
- Bildmaßstab;
- Längs- und Querabdeckung;
- Höhen-Basis-Verhältnis;
- Bildfolgezeit;
- Belichtungszeit und Bildwanderung;
- Lage und Genauigkeit der Passpunkte.

Die **Pixelgröße** spiegelt das kleinste erkennbare Objektmerkmal am Boden wieder und wird oft mit der Bezeichnung GSD (Ground sample distance) ausgedrückt. Sie berechnet sich aus der physikalischen Pixelgröße des Bildsensors und des Bildmaßstabs. Die üblichen Systeme von heute erreichen ein GSD im Bereich 5-20 mm. Dabei liegen die Messgenauigkeiten im Objektraum bei 0,5-1 pix in der Lage und 2-3 Pixel in der Höhe.

Kamera und Objektiv bestimmen sich nach dem zulässigen Abfluggewicht (MTOW maximal takeoff weight) der Trägerplattform und mit der Aufstiegs Genehmigung stehenden rechtlichen Aspekten (Siehe 3.1). Daneben sind noch Parameter wie Empfindlichkeit des Sensors (ISO) und Blendeneinstellungsmöglichkeit zu beachten. Ein grundsätzlicher Faktor bei der Wahl stellt der Maßstab dar.

Die Flughöhe hängt von zu erreichbarem GSD und Objektivbrennweite ab. Ein weiteres Kriterium hierzu stellen die rechtlichen Regelungen (Siehe 3.1).

Der Bildmaßstab hängt von oben genannten Parametern ab, dessen Zusammenhang unter 2.2.2 Maßstab erklärt wird.

Die Längs- und Querabdeckung bei UAV Flügen werden üblich mit Längsabdeckung $p=80\%$ und Querabdeckung $q=60\%$ durchgeführt. Dieses ist meist in der Auswertung mit Structure-from-motion begründet, wo eine möglichst dichte Abdeckung des Geländes bzw. dichte Bildüberdeckung gefordert wird. Manche Hersteller geben diese Angaben zu ihrer Software dazu. Zur Unterstützung der Auswertung und besseren Genauigkeit werden zusätzliche Kreuzbefliegungen empfohlen (Luhmann 2018, S. 610–612). Dabei bringt die Durchführung der Kreuzbefliegung in einer anderen Höhe zusätzliche Vorteile für Qualität der Aerotriangulation (Przybila 2016, S. 91).

Das Höhen-Basis-Verhältnis h/b nimmt Einfluss auf die erreichbare Höhengenaugigkeit. Die Basis ergibt sich aus:

$$b = (1 - p) * S = (1 - p) * m_b * s'$$

Formel 8 Basis Quelle: Luhmann 2018, S.612

mit:

S: Abgebildete Geländeseite in Flugrichtung,

s': Sensorgröße in Flugrichtung

m_b : Bildmaßstabszahl.

Analog zu dieser Berechnung ergibt sich der Abstand zu dem Nachbarbild in der Querabdeckung.

Belichtung und Bildwanderung sind insbesondere bei Aufnahmen mit bewegter Kamera zu beachten, wie das im Fall der UAV-Aufnahme ist. Hier ist die Wahl der möglichst kurzen Belichtungszeit eine Lösung gegen die Bildwanderung sein. (Zusätzlich dazu 2.2.2 Verschlusszeit und Bildwanderung).

Lage und Genauigkeit der Passpunkte richten sich nach zu erreichender Genauigkeit in der Lage und Höhe, Qualität der Kamera sowie der Längs- und Querüberlappung. Eine geringere Anzahl an Passpunkten insbesondere nur in den Ecken des Befliegungsgebietes führen zur Deformationen in der 3D-Rekonstruktion (Luhmann 2018, S. 610–612).

Diese oben genannten Parameter dürfen jeder Planung der geometrischen Konfiguration einer photogrammetrischen Aufnahmeordnung nicht entbehrt werden. Es gibt keine pauschale Lösung, da diese Konfiguration von Objekt- und Aufgabespezifikation abhängig ist. Daher muss ein Kompromiss zur Wahl der Parameter unter verschiedenen Restriktionen gefunden werden, die sich auch teilweise widersprechen. Dennoch die Aufnahmeordnung kann durch eine fest eingebaute Kamera (Z.B bei manchen Drohnen) stark eingegrenzt werden, infolge dessen muss die Planung an die gegebenen Parameter (z.B. feste Brennweite) angepasst werden (Luhmann 2010, S. 529).

2.3 UAV, UAS, Drohne...

Drohne, Unbemannte Fluggeräte (UAV - Unmanned aerial vehicles), RPAS (Remotely piloted aircraft systems) und viele andere Bezeichnungen beschreiben kleine ferngesteuerte Fluggeräte. Bestimmte Bezeichnungen können eventuell auf besondere Eigenschaften (Starrflügler) oder einen bestimmten Zweck (ULS-Unmanned Laser Scanning) hinweisen. In der Geodäsie wird meist die Bezeichnung UAV benutzt, wobei in Blick auf die Realisierung der geodätischen Aufgaben und Kombination eines UAVs mit weiterer Hardware auch von einem UAS geredet wird. Dabei handelt sich um das komplette System aus der Bodenanwendung, der entsprechende Software und der Fernsteuerung (Eling et al. 2016). Im Jahr 2018 konnte wieder eine Vielzahl an Ausstellern bei der INTERGO beobachtet werden, die Drohnen in verschiedener Größe, Bauweise und unterschiedlichem Preissegment präsentiert haben. Für den Bereich der Fernerkundung sind sie überwiegend klein und bis 25 Kilo schwer (Heipke 2017, S. 42) und vielmehr als Trägerplattform für verschiedene Sensoren (z.B. Kamera) zu betrachten (Kersten et al. 2018, S. 11). Das Interesse an Forschung und Anwendung mit UAS ist in letzten Jahren stark gestiegen (Toth und Jutzi 2017, S. 42) und inzwischen sind auch Publikationen zu diversen UAV-Anwendungen zahlreich erschienen. Halla, N gibt eine umfangreiche Beschreibung der Einsatzmöglichkeiten

und erreichbarer Ergebnisse auf dem Vermessungsgebiet wieder (Halla, N; Schwieger, V 2017: UAV-Anforderungen und Möglichkeiten s 9-26 in der Schriftenreihe des DVW Band 86/2017). Daher wird in diesem Abschnitt nur kurze Übersicht über die UAV-Technik verschafft.

2.3.1 Unbemannte Fluggeräte in der Geodäsie

Die unbemannten Fluggeräte können bezüglich ihrer Start- und Flugeigenschaften, Abfluggewichte, Geometrie und anderen Faktoren unterschieden werden, die Strohmayer recht umfangreich im DVW-Bericht 2017 beschreibt. Die Start, Landung und Flugeigenschaften sind ein wichtiges Kriterium für den Verwendungszweck eines solchen Gerätes. Während Hubschrauber, Multikopter, Luftschiffe senkrecht sowohl gestartet als auch gelandet werden können, brauchen Flächenflugzeuge dafür wesentlich mehr Platz und manchmal sogar zusätzliche Starthilfen (z.B. Startrampe). Dennoch besitzen die Flächenflugzeuge im Vergleich zu Drehflüglern eine höhere Zuladungskapazität und können durch höhere Fluggeschwindigkeiten größere Reichweiten bzw. Flugzeiten erreichen (Strohmayer 2017, S. 31). Zusätzlich wirkt sich die höhere Fluggeschwindigkeit und Horizontalfluglage positiv auf die Flugstabilität aus, sodass eine nahezu konstante Fluglage beibehalten wird. Im Gegensatz dazu sind die Flügel sehr manövrierfähig, können sowohl Horizontal- als auch Vertikalflug ausführen und im Schwebeflug eine feste Position beibehalten, dabei ist die Flugdauer und Reichweite kürzer. Das Abfluggewicht ist wichtig, einerseits aus gesetzlichen Gründen (siehe 3.1) und andererseits beinhaltet das Abfluggewicht die maximale Nutzlast, was z.B. für die Auswahl von zusätzlichen Sensoren (Kamera, Laserscanner) ausschlaggebend ist (Strohmayer 2017, S. 32–34). In der Geodäsie haben sich die insbesondere die Flächenflügler (Abb. 3) und rotorbetriebene UAVs (Abb. 4) durchgesetzt und sind die meist genutzten Systeme (Eling et al. 2016, S. 11).



Abbildung 3 Starrflügel-UAS „Vela“ des IFB *Quelle: DVW 2018, S.32*



Abbildung 4 DJI Inspire 1 Quelle: <https://www.dji.com/de/inspire-1/aircraft#sub-feature>

2.3.2 UAS - Technik

Die UAS-Technik wird auf die Thematiken der Steuerungs-, Positionierungs- und Aufnahmesysteme eingeschränkt. Der Flug wird durch eine Fernbedienung gesteuert und kann manuell, semi-automatisch sowie voll automatisch durchgeführt werden (Eling et al. 2016, S. 10). Dabei wird die Steuerung von einer Reihe verschiedener Sensoren unterstützt. Gyroskopen und IMU-Beschleunigungssensoren (IMU- Inertial Measurement Unit) dienen der Kontrolle und der Lagestabilisierung sowohl des UAVs, als auch der Sensoren (Kamera und Gimbal). Der Gimbal ist eine kardanisch gelagerte Aufhängung für Sensoren am UAV, die dreidimensionale Bewegung mithilfe von Elektromotoren ermöglicht.

Mithilfe von GNSS, Barometern und Magnetometern wird die Positionsbestimmung erreicht, die für die Navigation genutzt wird. In der Regel werden Ein- und Zweifrequenz-GPS-RTK-Empfänger eingesetzt (Bäumker et al. 2013). Zugleich werden die Positions- mit den Lagedaten des UAVs kombiniert und zur Bestimmung der äußeren Orientierung der Bilder genutzt (Kraft et al. 2016). Das bildet einen wesentlichen Schritt für geodätische Flugaufnahmen bezüglich der direkten Georeferenzierung (ohne Passpunkte), die wesentlich effizienter ist. Voraussetzung hierfür ist die Verwendung von geodätischen Sensoren. Doch die meisten UAVs nutzen low-cost Sensoren. Diese liefern die Position mit Genauigkeiten von mehr als 2 Meter (Eling et al. 2016, S. 16), welche für eine direkte Georeferenzierung von Bildern unzureichend sind und daher auf klassisch signalisierte Passpunkte zurückgegriffen werden muss (Remondio et al. 2011).

Die Aufnahmetechnik bezieht sich auf Gimballkameras (Abb. 5), mit der viele Drohnen ausgestattet werden. Dafür werden vorrangig leichtgewichtige Kameras aus dem Consumer-Bereich verwendet, die sich einfach in das Gesamtsystem integrieren lassen (Przybila 2016, S. 89). Das Gewicht und die Größe der Kamera sind für den Schwerpunkt und Nutzlast



Abbildung 5: Gimballkamera
Quelle: www.dji.com/de/inspire-1

wichtige Aspekte, die sich auf die Flugfähigkeit eines UAVs auswirken. Daher werden häufig Kameras oder Sensoren in einem Gimbal installiert. Damit kann die Kamera auf ein bestimmtes Ziel ausgerichtet werden ohne dabei die Schwerpunktlage zu verändern, die sich negativ auf die Flugeigenschaften auswirkt (Strohmayer 2017, S. 36). Somit ermöglicht der Gimbal nicht nur Senkrecht-, sondern auch Schräg- oder Horizontalaufnahmen. Darüber hinaus wird die Lage der Kamera korrigiert. Auf dem Markt stehen meist Drohnen mit Gimballkameras zur Auswahl, die eine feste Brennweite besitzen. Teurere UAS' wie z.B. die DJI Inspire 1 werden mit Gimballkameras ausgestattet, die Wechselobjektive und bessere Kameraeigenschaften besitzen.

3 Rahmenbedingungen und Aufbau der Untersuchung

Die bei einer UAV-Aufnahme und der Datenauswertung zu beachtenden Planungskriterien wurden im Kapitel 2.2.10 beschrieben. Eine Bedingung (Low Cost) wurde bereits unter dem Punkt 1.2 erwähnt. In diesem Abschnitt werden dann weitere dieser Kriterien umgesetzt, indem sowohl rechtliche Prämisse und zur Verfügung stehende oder ausgewählte Hard und Software beschrieben wird.

3.1 Rechtliche Aspekte

Die hochmoderne UAV-Technik bietet ohne Zweifel ein großes Potenzial für eine schnelle und berührungslose Datenerfassung z.B. anhand von Digitalkamera und das sowohl für private, als auch gewerbliche Nutzer. Eine Drohne ist in wenigen Minuten einsatzbereit und kann in mehrere Hundert Meter Höhe steigen. Hingegen kann sie auch in wenige Meter Höhe über den Boden betrieben werden; Währenddessen können Bilder von Objekten mit einer hohen Auflösung aufgenommen werden, die eine sehr detaillierte Objektdarstellung ermöglichen. Die Sachverhalte können zum einen zu Gefahren von Sachen und Personen und zum anderen zum Datenmissbrauch führen, daher sind zwei wichtige rechtliche Aspekte, die diese Sachverhalte regeln, an der Stelle zu nennen: Betriebsreglung von Drohnen und Datenschutz.

Zu dem ersten Aspekt gibt es Festlegungen in der neuen „Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), die Änderungen in der Luftverkehrs-Zulassung-Ordnung sowie Luftverkehrs-Ordnung vornimmt. Aus der Verordnung geht eine Pflicht zur Kennzeichnung von Luftfahrtgeräten mit dem Startgewicht über 0,25 Kilogramm durch die Eigentümer hervor. Eine sichtbare Plakette mit dem Namen und Adresse des Besitzers ist anzubringen. Eine weitere Regelung erfordert den Nachweis von besonderen Kenntnissen zur Theorie und Praxis über die Luftfahrtgeräte mit Masse über 2 kg, der durch vom Luftfahrtbundesamt anerkannten Stellen ausgestellt wird. In und unter 100 m Höhe, außer Sichtweite des Operateurs oder Abfluggewicht von 5 kg dürfen Drohnen ohne Erlaubnis der zuständigen Landesluftfahrtbehörde betrieben werden. Hingegen gilt ein grundsätzliches Verbot für Aufstiege über Betriebslagen, Personenansammlungen, Unglücksstellen und Objekten oder Anstalten, die unter besonderem rechtlichem Schutz stehen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 30.03.2017). Ein schneller und übersichtlicher Einblick über die wichtigen Pflichten und Kriterien wird durch den Flyer "Die neue Drohnen Verordnung" Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur ermöglicht (BMVI 2017).

Zum anderen muss ein Blick auf die Problematik des Schutzrechtes von Intimsphäre gerichtet werden, unter dieser Personen und deren Lebensbereich zu verstehen sind. Es ist ein sehr umfangreiches Thema, daher wird nur kurz auf die Rechte verwiesen. Das Recht wird unter anderem in dem Bürgerlichen Gesetzbuch (BGB) §1004, Strafgesetzbuch (StGB) §201a und Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) niedergeschrieben. Der Schwerpunkt fällt insbesondere auf unerlaubte Bilderfassung von unzugänglichem Eigentum (Gebäuden) oder Personen, die sich zufällig im Bild befinden. Dadurch kann der höchstpersönliche Lebensbereich verletzt werden (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 25.01.2015).

Die Abbildung 6 der UAV-Befliegung stellt mit einer Bodenauflösung von ca. 1cm dar, dass jede Fuge zwischen Pflastersteinen oder Einkerbung der Hydranteneinfassung genau zu erkennen ist. In der Hinsicht auf die Erfassung von Privatgebäuden und deren Umgebung könnten solche Aufnahmen zum erheblichen Eingriff in die Privatsphäre von Eigentümern führen.



Abbildung 6 Detailauflösung am Kanaldeckel
Quelle: Eigene

In Folge der angesprochenen Beschränkungen wäre eine Gebäudeerfassung kaum oder gar nicht möglich. Dennoch, durch §21a des LuftVO und DSGVO wird den Behörden eine Billigung gegeben, die zur Erfüllung von behördlichen Aufgaben keiner Erlaubnis bedürfen. Im Hinblick auf den Datenschutz werden die Bilder öffentlich nicht verbreitet, sondern dienen der Gewinnung von Koordinateninformationen. Damit wird die Privatsphäre nicht verletzt.

3.2 Gebäudeerfassung

Die Informationen zur Erhebung von Gebäuden wurden bereits unter 2.1 aufgeführt. Dennoch erwähnenswert ist der Fakt, dass verschiedene Kombinationen aus den zulässigen Verfahren für die Gebäudevermessung üblich sind. Hingegen setzt diese Untersuchung zur Gewinnung von Koordinaten der Bauwerksecken nur auf UAV-Photogrammetrische Messverfahren.

3.3 Durchführung der Befliegung

Zur Durchführung einer Befliegung wird ein UAV benötigt. Das LGLN erwägt derzeit die Anschaffung eines geeigneten UAV-Systems. Die Entscheidung richtet sich unter anderem nach dem zukünftigen und möglichen Aufgabenspektrum, sowie Preis und Wirtschaftlichkeit

des Systems. Diese Aspekte sind noch nicht geklärt worden. Außerdem ist zum Steuern von UAV-Systemen Erfahrung erforderlich, die beim LGLN auch nicht vorhanden ist. Im Gegensatz dazu ist der Fachbereich Geodaten und Verkehrsanlagen der Stadt Osnabrück bereits seit ein paar Jahren im Besitz einer Drohne. Darüber hinaus verfügt der Messtrupp über die erforderliche Erfahrung in der Durchführung von Flügen sowohl außerhalb des Stadtgebietes als auch Innerorts und über Objekten, deren Überfliegen nur zwecks Erfüllung der Behördenaufgaben erlaubt ist. Die Erkenntnis führte zu dem Entschluss über die Kooperation der Stadt Osnabrück mit LGLN. Somit kann das LGLN auf eine kurzfristige Anschaffung einer Drohne vorübergehend verzichten und dank der Erfahrung, seitens der Stadt Osnabrück kann eine sichere Durchführung der Aufnahmen gewährleistet werden.

3.4 Auswahl des Befliegungsgebietes

Die Wahl des Gebietes wurde unter verschiedenen Gesichtspunkten erörtert. Das Erste ist ein Aufnahmeort. Hierzu wurde die Umgebung oder direkt die Stadt Osnabrück als Zielort angenommen. Damit kann der Behördengang der rechtlichen Angelegenheiten, der der Stadtvermessung vor Ort bekannt ist, einfacher abgewickelt werden.

Da das Ziel ist, Gebäudekoordinaten hinsichtlich der zu erreichenden oder einzuhaltenden Genauigkeit zu prüfen, sind Vergleichsdaten hierzu erforderlich. Dafür wird ein Bereich mit Gebäuden gesucht, in dem nahezu alle Ecken mit der höchsten Genauigkeit, die für Bauwerke zu erreichen ist, koordiniert sind. Darüber hinaus sollen in dem Gebiet mehrere Gebäude für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit enthalten sein.

Zur weiteren Bedingung zählt der Alltagseinsatz. Insbesondere geht es um Witterung, Jahreszeit und Lichtverhältnisse. Als Richtwert wird die jetzige Durchführung der amtlichen Gebäudevermessung angenommen. Die für die Gebäudevermessung zuständigen Messtrupps gehen dem Geschäft bei jedem Wetter und zu jeder Jahreszeit nach.

Die Witterung grenzt den UAV-Einsatz bereits ein. Bei starken und böigen Windverhältnissen, sowie Niederschlägen ist ein Einsatz, je nach Typ der Drohne, erschwert oder gar nicht möglich. Die Folge könnten zu einem die Absturzgefahr einer Drohne und zu anderem verwackelte sowie unscharfe Bilder sein. Der Einfluss einer Jahreszeit und Lichtverhältnisse auf Luftbild, das aus dem Flugzeug erfasst wird, wurden unter 2.2.1 (**Luftbildaufnahme**) beschrieben.

Insofern soll die UAV-Messtechnik unter Ausschluss der Witterung zur jeder Zeit eingesetzt werden. Das führt zur Auswahl eines Gebietes, in dem Vegetation nicht nur vorhanden ist, sondern auch unterschiedlich ausgeprägt ist, das heißt, Bewuchs nah oder direkt an Gebäuden vorkommt. Damit soll die Verdeckungsproblematik veranschaulicht werden. Die

Abbildungen 7 und 8 stellen das ausgewählte Gebiet und dessen Eigenschaften dar. Aus den Bildern lässt sich erkennen, dass Vegetation im Befliegungsgebiet vorhanden ist (Abb. 7), sowie Gebäudeecken mit Koordinaten von guter Genauigkeit (Blaue Punkte) versehen sind (Abb. 8). Eine gute Genauigkeit ist gemäß dem LiegVermErlass gegeben, wenn die Standardabweichung eines Objektpunktes 4 cm beträgt.



Abbildung 7: Übersicht über Vegetation im Befliegungsgebiet *Quelle: Google Maps*



Abbildung 8 Objektpunktgenauigkeit *Quelle: LGLN_Viewer_Gebaeudegenauigkeit*

3.5 Software

Zum einen ist die Auseinandersetzung mit neuer Software meist zeitintensiv. Das Kennenlernen benötigter Funktionen und des Workflows erfordert Arbeit mit Bedienungsanleitung, Foren oder Unterstützung von anderen Benutzern. Daher wurde bei der Softwarewahl auf eventuell vorliegende erste Erfahrungen des Auswerters geachtet. Zum anderen ist einige und vor allem neue Software fehleranfällig, da sie noch nicht vollständig entwickelt und erprobt wurde, oder liefert keine Genauigkeitsangaben, die für die Beurteilung von Ergebnissen ausschlaggebend sind.

3.5.1 Bildorientierung

Für die Bildorientierung fällt die Wahl auf eine kommerzielle Software, die bereits seit einigen Jahren am Markt zur Verfügung steht und von Benutzern positiv bewertet wird. Das erfüllt die Software „PhotoScan“ des Softwareherstellers „Agisoft“, zu der erste Erfahrungen bei dem Bearbeiter vorhanden sind.

PhotoScan ist eine Software, die im Bereich der Computer Vision entwickelt wurde und in die photogrammetrischen Algorithmen und Techniken implementiert wurden. Sie ermöglicht die Verarbeitung von Digitalen Bildern und Erzeugung von 3D-Daten sowohl vom Neuling, als auch von einem Spezialisten aus den Gebieten der Photogrammetrie und digitaler Bildverarbeitung (Agisoft LLC). Basierend auf der neuesten Multi-View-3D-Rekonstruktionstechnologie arbeitet die Software mit beliebigen Bildern; Fotos können von jeder Position aus aufgenommen werden, vorausgesetzt das zu rekonstruierende Objekt ist mindestens in zwei Fotos sichtbar. Sowohl die Bildausrichtung als auch die 3D-Modellrekonstruktion sind vollständig automatisiert (Agisoft LLC).

3.5.2 Flugplanung und Überwachung

Pix4Dcapture und DJI Control sind kostenfreie Applikationen für die Durchführung einer Befliegung. Diese können vom Smartphone oder vom Tablet bedient werden. Die beiden Applikationen werden gewöhnlich durch den Messtrupp der Stadt Osnabrück benutzt, womit sicheres Handling gewährt wird. Pix4Dcapture ermöglicht Flugplanung, Kontrolle einer Drohne sowie Datenerfassung. Der Planung stehen Missions nach Auftragsbedarf zur Auswahl (Abb.9). Als nächstes können das Befliegungsgebiet angepasst, sowie Flughöhe, Bildüberlappung, Fluggeschwindigkeit und Neigung der Kamera zur Erdoberfläche eingestellt werden (Siehe Abb. 10). Die Bodenauflösung wird Oben links in Abb. 10 angezeigt und resultiert aus den zuvor beschriebenen Parameter. Darüber hinaus kann der Flug überwacht und zum Schluss erfasste Daten gesichtet werden (Pix4D S.A. 2018).



Abbildung 9: Mission - Flugplanung (Eigene Darstellung) *Quelle: Pix4D Capture*

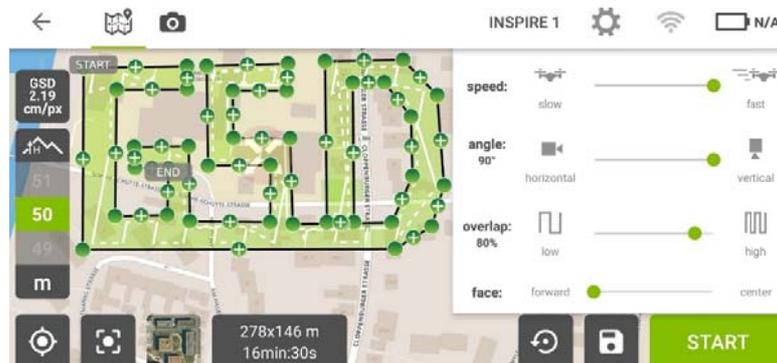


Abbildung 10 Flugparameter (Eigene Darstellung) *Quelle: Pix4D Capture*

Die Software DJI Control bietet unterschiedliche Funktionen zur Überwachung von Drohne und Kamera. Diese Applikation wird lediglich für die Einstellung der Kameraparameter und Sichtung der während eines Fluges erfassten Bilder eingesetzt.

3.5.3 Datenverarbeitung & Koordinatenmessung

CloudCompare ist eine Verarbeitungssoftware für 3D-Punktwolken und Vermaschung. Sie bietet sowohl einfache Funktionen für einen Vergleich zwischen zwei dichten 3D-Punktwolken oder zwischen einer Punktwolke und einer Vermaschung, als auch viele fortgeschrittene Algorithmen z.B. für: Registrierung, Resampling, Statistikberechnung und interaktive oder automatische Segmentierung (CloudCompare). Diese Anwendung ist kostenfrei und wird für Punktwolkenbearbeitung sowie Koordinatenmessung eingesetzt.

3.6 Hardware

Die wesentliche Hardware wird nachfolgend genannt, die entweder auf die Genauigkeit, Wirtschaftlichkeit oder Befliegung Einfluss nehmen. Diese sind: GNSS-Rover, Drohne, Kamera und Rechner.

3.6.1 GNSS-Rover

Ein GNSS-Rover Trimble R10 wird für die Bestimmung der Passpunkte eingesetzt. Dieser Rover ermöglicht zentimetergenaue Positionierung und kann Satellitensignale simultan auf den L1 bis L5 Frequenzen der nachfolgenden Satelliten verfolgen: GPS, GLONASS, SBASS,

Galileo und BeiDou. Dabei können Satellitendaten mit der Auflösung bis 20 Hz aufgezeichnet werden. Bei einer RTK-Messung kann eine Genauigkeit mit der Standardabweichung von 8mm+1ppm für Lage und 15mm+1ppm Höhe erreicht werden (Trimble Inc.).

3.6.2 Drohne

Die Drohne Inspire 1 T600 ist ein Modell des Herstellers DJI, der ein Marktführer mit vergleichsfähigem Sortiment gegenüber anderen Anbieter im Bereich der UAV ist. Die



Abbildung 11 UAV DJI Inspire 1 *Quelle:*
<https://www.dji.com/de/inspire-1/aircraft#sub-feature>

Die Baureihe Inspire ist mit fest verbauten Kameras in Kombination mit einem Gimbal ausgerüstet (Przybilla 2017, S. 56). Die Drohne kennzeichnen folgende technische Daten: Das Abfluggewicht des Gerätes liegt bei 3 Kg und bietet eine maximale Flugdauer von 18 Minuten. Gemäß den Herstellerangaben wird die Position mithilfe von GPS und GLONASS mit der Genauigkeit von 2,5 m horizontal und 0,5 m vertikal bestimmt. Für Stabilität während des Fluges sorgt ein IMU (Inertial measuring unit), das mithilfe von 6-Achsen-Gyroskop und Beschleunigungsmesser minimale Neigung und Bewegungsänderungen korrigiert. Ein Betrieb dieses UAVs ist bis zur maximalen Windgeschwindigkeit von 10m/s zulässig. (SZ DJI Technology Co.).

3.6.3 Kamera

An Bord der Inspire 1 befindet sich eine feste Gimbal-Kamera Zenmuse X5, die Nutzung hochwertiger Fremdobjektive ermöglicht (Przybilla 2017, S. 58) , was durch den Micro-Four-Third-Standard (MFT) ermöglicht wird, auf dem die Kamera basiert (Schönmann 2015).



Abbildung 12: DJI Zenmuse X5
Quelle:
www.dji.com/de/inspire-1/camera#sub-feature

Dieser Standard regelt die Anforderungen an bildgebendes System und Objektiv, sodass Wechselobjektive in einer Kompaktkamera eingesetzt werden können. Darüber hinaus wird durch kleineren Objektivdurchmesser und kürzeren Brennweitenbereich sowie eine Spiegellose Kamera eine Größen- und Gewichtsreduzierung gegenüber einer Spiegelreflexkamera, bei gleichbleibender Bildqualität, erreicht (Walkenhorst 2016). Das vorhandene Wechselobjektiv der Zenmuse X5 Kamera hat eine Brennweite von 15mm. Ein CMOS Sensor mit 17,3 x 13 mm und bis zu 16 Megapixel Auflösung zeichnet die Kamera aus, dabei entspricht ein Pixel auf dem Sensor einer Größe von 3,76µm. Die Belichtungszeit kann zwischen 8~1/8000 Sek

gewählt werden. Der Fokus der Kamera liegt im Bereich von 20cm bis unendlich und kann in einem automatischen oder in einem manuellen Einstellungsmodus betrieben werden. Die Blende hat 13 Einstellungsstufen und kann zwischen 1,7 und 16 gewählt werden (SZ DJI Technology Co.).

3.6.4 Rechner

Zur Bildorientierung benötigt ein Rechner eine große Rechenleistung, um die anfallenden Berechnungen der Orientierung in überschaubaren Zeiträumen durchführen zu können (Oliver Schmechtig 2017), was sich auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt. Entscheidend hierfür sind: Arbeitsspeicher, Grafikkarte und Prozessor. Agisoft gibt Empfehlungen an die Rechnerkonfiguration für PhotoScan an, die von Basis- bis Extremausstattung reichen. Die für die Auswertung gewählte Station platziert sich mit 32 GB Arbeitsspeicher, i7-4790 3,6 GHz Prozessor und NVIDIA Quadro N4200 Grafikkarte in dem Feld der Basisrechnerkonfiguration (Agisoft LLC).

4 Auftrags- und Flugplanung, Flugdurchführung

Der Ablauf des Auftrages wird von der Planung aus bis hin zum Endergebnis mit dem Workflow (Abb. 13) dargestellt. Das Schema wird in Anlehnung an den Arbeitsablauf von Kersten 2016 entworfen. Dabei wird der Entwurf auf die eigene Auswertung angepasst.

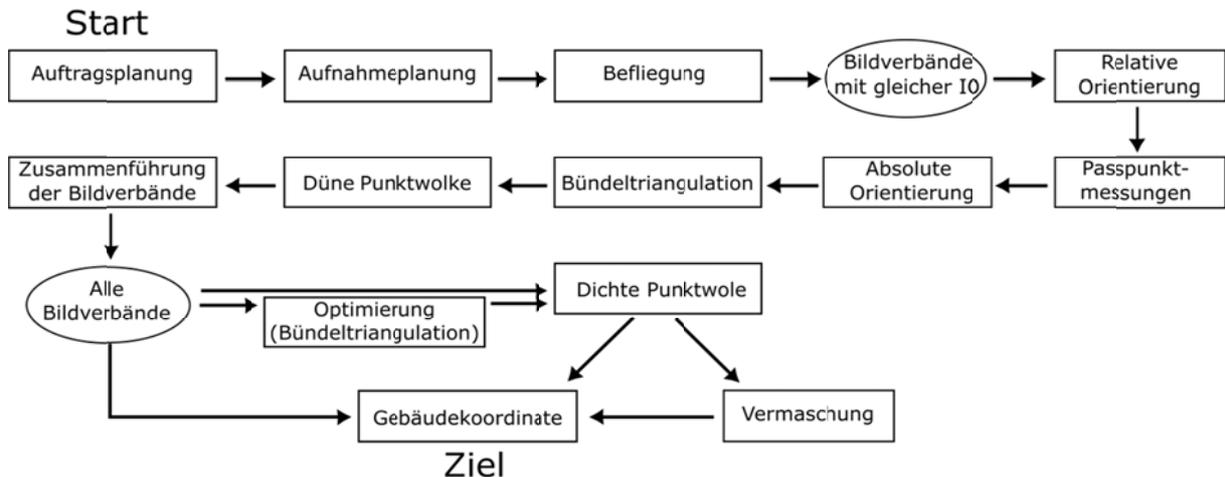


Abbildung 13 Workflow - von Auftragsplanung bis Datenausgabe (Eigene Darstellung)

Quelle: DVW; Kersten 2016, S. 22

Da bereits unter (1.2) das Ziel dieses Auftrages beschrieben ist, wird hier nicht weiter darauf eingegangen, sondern direkt mit der Planung fortgefahren.

4.1 Aufnahmeplanung

Der Raumbezug dieses Projektes wird über das Bezugssystem ETRS89 UTM U32 für die Lage hergestellt, der als Raumbezugssystem für amtliche Vermessungen dient. Die Höhe wird im ellipsoidischen System ETRS89_h gemessen. Als Vorgabe bzw. Ziel wird die Lagegenauigkeit mit ± 40 mm Standardabweichung der Objektpunkte im Kataster angenommen. Obwohl das GSD in der Planungssoftware angezeigt wird, muss zunächst das erforderliche GSD zur Einhaltung der Vorgabe abgeschätzt werden. Dafür werden die Formeln aus 2.2.9 (Planung der Objektgenauigkeit) in die Berechnung einbezogen. Zuerst werden als Messgenauigkeit die üblich erreichbaren Werte angenommen, wobei von dem *Worst Case* ausgegangen und der Wert 1 pix für Lage und 3 pix für Höhe festgelegt wird. Damit wird die Standardabweichung für ein Pixel und gleichzeitig GSD berechnet. Basierend auf diesen Werten werden schließlich die Flughöhe und der Maßstab ermittelt. Mit der Objektmessgenauigkeit ± 1 pix für die Lage kann ohne Berechnung festgestellt werden, dass ein GSD von 4 cm die einzuhaltende Genauigkeit erfüllt. Dabei müssen noch weitere Kriterien wie Messverfahren sowie Messgenauigkeit von Gebäudeecken, Erkennbarkeit des Objektes (Passpunkte, Verknüpfungspunkte, Gebäudepunkte) und Passpunktgenauigkeit der

Genauigkeitsabschätzung herangezogen werden. Zudem ist es bekannt, dass Photoscan zu einem die Genauigkeitsangaben sowohl zur Höhe als auch zur Lage für die Ausgleichung benötigt und zum anderen die erreichte Objektmessgenauigkeit mit S_{XYZ} wiedergegeben wird, aber aus dem Wert ist leider nicht ersichtlich, welche Lagegenauigkeit schließlich erreicht wurde. Ein weiteres Problem stellt der fehlende Maßstab bzw. die Flughöhe dar. Demnach ist die Anwendung der Formel für die Stereoauswertung nicht möglich. Um näherungsweise diese Vorgaben zu erfüllen und eine Schätzung zu bekommen, wird wie folgt die Genauigkeit abgeschätzt:

$$S_{XY} = \sqrt{S_X^2 + S_Y^2}$$

Formel 9 Objektgenauigkeit Quelle: *Luhmann 2010, S. 535*

$$S_{XYZ} = \sqrt{S_{XY}^2 + S_Z^2} = \sqrt{(1pix * S_{XY})^2 + (3pix * S_{XY})^2}$$

$$\sqrt{(1pix)^2 + (3pix)^2} * 0 \leq 40mm \Rightarrow 1pix \leq 12,6mm$$

$$h = \frac{X}{x} * c = \frac{12,6mm}{0,00376mm} * 15mm * \frac{1m}{1000mm} \triangleq 50,3m$$

$$mb = \frac{X}{x} = \frac{h}{c} = \frac{12,6mm}{0,00376mm} = \frac{50,3m * 1000mm}{15mm} \triangleq 3400$$

Im Betracht auf die Image Matching mit Structure-from-motion beträgt die Bildmessgenauigkeit 0,5-2 pix. Es wird wieder vom *Worst Case* ausgegangen und die Genauigkeit geschätzt, wobei die Höhe wieder als drei Mal schlechter angenommen wird.

$$\sqrt{(2pix)^2 + (3 * 2pix)^2} * 0 \leq 40mm \Rightarrow 1pix \leq 6,3mm$$

$$h = \frac{X}{x} * c = \frac{6,3mm}{0,00376mm} * 15mm * \frac{1m}{1000mm} \triangleq 25,2m$$

$$mb = \frac{X}{x} = \frac{h}{c} = \frac{6,3mm}{0,00376mm} = \frac{25,2m * 1000mm}{15mm} \triangleq 1800$$

Die Flugplanung wird mit der Software Pix4D-Capture (3.5.2) vorgenommen. Um das komplette Messgebiet vollständig zu erfassen, wird die Flugroute weit über das Messgebiet hinaus ausgedehnt. Die Bildfolge richtet sich nach der Bildüberlappung. Für die Auswertung der Luftbildaufnahmen mit Photoscan wird eine Überlappung von 80% entlang der Flugrichtung und 60% quer dazu empfohlen. Zur Erzielung von höchster Qualität der

Georeferenzierung wird eine Mindestzahl von 10 Passpunkten gefordert, die gut räumlich über das Aufnahmegebiet verteilt sind (Agisoft LLC).

Bei klassischer Befliegung mit Senkrechtaufnahmen werden meist offene Bereiche gut abgebildet. Doch für die Auswertung stehen die Gebäudefassaden im Mittelpunkt. Um diese Elemente mit hoher Auflösung und nahezu vollständig zu erfassen, vor allem in Hinsicht auf Verdeckungen und dichte Siedlungsbebauung, werden Schrägaufnahmen geplant, die mit UAV effektiv umgesetzt werden können (Haala und Schwieger 2017, S. 16). Dafür wird der Gimbal um 20° von der Nadirrichtung aus in Flugrichtung verschwenkt. Um alle Gebäudefassaden bzw. aus jeder Richtung zu erfassen, muss in jede Richtung geflogen werden. Dafür eignet sich, genauso wie für die Genauigkeitserhöhung, die Kreuzbefliegung.

4.2 Passpunktnetz

Da keine hoch präzise RTK-Positionierung (Differenzielles Messverfahren), sondern nur absolute Positionsbestimmung auf Basis der Codebeobachtungen (Möser 2012, 411, 415) mit der Drohne möglich ist, wird das Objektkoordinatensystem über Passpunkte realisiert. Dafür werden linienhafte Targets, Marken mit codierter Punktnummer und natürliche Merkmale (Kanaldeckel, Aufnahme- und Sicherungspunkte) benutzt.



Abbildung 14
Linienhafte Marke
Quelle: Eigene

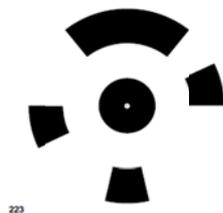


Abbildung 15
Codierste Messmarke
Agisoft Quelle: Eigene



Abbildung 16
Netzpunkt (Nagel)
Quelle: Eigene



Abbildung 17
Netzpunkt (Rohr mit
Kappe) Quelle: Eigene

Die erste Art der Zielmarken charakterisiert die direkte Definition des Zentrums in dem Schnittpunkt zweier Geraden. Die codierten Zielmarken kennzeichnen die automatisierte Punktmessung und Punktnummernvergabe, die durch ein Muster um den Messpunkt auf dem Target festgelegt wird (Abb. 14) (Luhmann 2018, S. 260). Bei der Verwendung dieser codierten Zielmarken soll zusätzlich untersucht werden, ob eine automatische Erkennung der Agisoft-Photoscan Codierten-Messmarken möglich ist, wenn diese 300 x 300 mm groß sind. Hierbei ist zu beachten, dass die minimale Abbildungsgröße des Punktes im Bild von 5 - 10 pix (Durchmesser) beträgt (Luhmann 2010, 436, 532). Zur Überprüfung dieses Kriteriums wird die maximale Pixelgröße für den Durchmesser 5-10 pix berechnet. Dabei beträgt der tatsächliche Durchmesser des inneren Kreises 85mm.

$$pix = \frac{\emptyset}{GSD} = \frac{85mm}{12,6mm} = 6,7pix$$

$$pix = \frac{\emptyset}{GSD} = \frac{85mm}{6,3mm} = 13,5pix$$

Formel 10 Pixelgröße für Targetserkennung *Quelle: Eigene*

Die erforderliche Mindestzahl an Pixel wird erreicht, was durch die Zahlen bestätigt wird.

Die Lage und Höhe der Passpunkte wird nach Möglichkeit nur mit einem Messverfahren bestimmt, um Fehlerfortpflanzung zu vermeiden; da einzelne Messwerte (auch Koordinaten) durch Ungenauigkeit der Messverfahren mit zufälligen Abweichungen behaftet sind, wirken sich diese Abweichungen auf die weiteren Berechnungen aus (Möser 2012, S. 41). Daher werden die dreidimensionalen Koordinaten nur mit dem GNSS-Verfahren bestimmt, wofür der Trimble Rover eingesetzt wird. Eine präzise Punktbestimmung erfolgt mithilfe von SAPOS-HEPS (Satelitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung) in Anlehnung an HEPS "Hochpräziser Echtzeit Positionierungs-Service mit einer Lagegenauigkeit von 1 bis 2 cm und einer Höhengenaugigkeit von 2-3 cm" (AdV 2017). Mit den Genauigkeitsangaben bestimmte Passpunktkoordinaten sind nicht von Übergeordneter Genauigkeit (Faktor 5-10 besser als Photogrammetrische Punktmessgenauigkeit, hingegen ist diese Genauigkeit sogar schlechter), daher werden sie nicht als fehlerfrei in die Ausgleichung einfließen und können sogar als Fehler interpretiert werden (Luhmann 2018, S. 359). Die zu erreichende Objektgenauigkeit in der Lage wird mit Anwendung der Varianzfortpflanzung unter Berücksichtigung der Bildmess- und Passpunktgenauigkeit abgeschätzt:

$$s_{XY} = \sqrt{1,26_{mm}^2 + 20_{mm}^2} = \pm 24mm$$

$$s_{XY} = \sqrt{6,3_{mm}^2 + 20_{mm}^2} = \pm 21mm$$

Formel 11 Einfache Fehlerfortpflanzung *Quelle: Eigene*

Damit wird die Vorgabe ± 4 cm Lagegenauigkeit eingehalten.

4.3 Durchführung der Befliegung

Zuerst wird das Messgebiet hinsichtlich der Passpunktplatzierung erkundet. Die Targets werden über das Gebiet räumlich so verteilt (Abb. 18 Rote Punkte), dass jede Passpunktconstellation (Anzahl der Passpunkte für Georeferenzierung) keine Deformationen zulässt. Die Targets werden paarweise (codierte und linienhafte Messmarke) platziert und mit einem Vermarkungsnagel zur Stabilität fixiert. Die Vermessungspunkte des Katasters

(Abb. 18) werden mit einer Farbe eingesprüht, damit sie besser erkennbar sind. Alle Passpunktkoordinaten werden zur Kontrolle und Mittelbildung in zwei Jobs mit Abstand von mindestens 15 Minuten gemessen. In einem Job werden alle Passpunkte 5-mal mit je 30 Epochen bestimmt. Zur Kontrolle der SAPOS-Messung werden vorab 2 Kontrollpunkte (Netzkpunkte) gemessen, deren Differenzen zwischen den Bestimmungs- und Netzkoordinaten gemäß LiegVermErlaß 20 mm nicht überschreiten dürfen.

Tabelle 1 Passpunktabweichung *Quelle: Eigene*

[mm]	Lageabweichung			Höhenabweichung		
	Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert
Objektpunkte	2	17	9	2	17	9
Kontrollpunkte	1	11	8	2	19	11

Die Abweichungen der Objektpunkte für die Lage und für die Höhe stimmen mit den Daten von SAPOS (1-2 cm Lage und 2-3 Höhengenaugigkeit) überein. Sogar kann festgestellt werden, dass die Abweichungen den unteren Wert von SAPOS-Angaben annehmen. Die Flüge werden mit der Funktion „Double Grid“ (3.5.2) für die Kreuzbefliegung geplant. Die Abbildung 18 stellt die Größe des erfassten Gebietes dar, was etwa der Flugroute entspricht. Die zu erfassenden Gebäude befinden sich innerhalb der gelben Umrandung.



Abbildung 18 Messgebiet -Passpunktverteilung - Befliegungsfläche *Quelle: Eigene*

Im Gegensatz zur Planung werden die Flughöhen 50 m und 30 m gewählt, um ein Sicherheitsabstand zu Bäumen zu behalten, die in diesem Befliegungsgebiet sich befinden. Die Bildüberlappung wird gemäß der Vorgabe von Agisfot auf 80% gesetzt. Dieser Wert gilt

sowohl für Quer- als auch Längsüberlappung. Eine differenzierte Werteinstellung für die Überlappung quer oder entlang der Flugrichtung ist in Planungssoftware Pix4D Capture nicht möglich. Schließlich wird das UAV gestartet und auf die gewünschte Flughöhe geflogen, in der die Kameraparameter (Blende, Fokus und ISO) mit Autofokus eingestellt werden. Diese Parameter werden für den Flug beibehalten, indem auf manuellem Fokus mit der DJI-Control Software umgeschaltet wird. Dann wird die Befliegung gestartet, die automatisch anhand der festgelegten Flugroute gesteuert wird. Die Dauer der Aufnahme in 50 m Höhe beträgt ca. 13 min. und wird mit einem Flug abgedeckt. Bei der 30 m Höhe ist die zu erfassende Fläche wegen des großen Maßstabes zu groß und die zulässige Flugzeit wird überschritten. Daher werden zwei getrennte Flüge (Längst und Quer) in 30 m Höhe durchgeführt. Bei dem Batteriewechsel wird die Stromquelle unterbrochen. In der Folge muss die Kamera neu initialisiert werden. Die Kameraparameter müssen dann für jeden Flug neu eingestellt werden, was zur Veränderung in der IO führt. Abschließend werden die Bilddaten gesichtet und gesichert. Auf den ersten Blick sind die Überlappungen und die Bildqualität (Schärfe) gut, wobei festgestellt wird, dass die weißen Targets wegen der starken Reflexion der Sonneneinstrahlung überbelichtet sind. Die Abbildung 19 stellt ein paar Ausschnitte aus den Bildern des 30 m Fluges (oben) und des 50 m Fluges (unten) dar. Daraus ist ersichtlich, dass die radiometrische Auflösung nahezu gleich ist.



Abbildung 19 Bildqualität in Höhe 30 m Oben, 50 m unten *Quelle: Eigene*

Aus den nebenstehenden Bildern kann entnommen werden, dass die klassischen Zielmarken trotz der Überbelichtung deutlich besser zu erkennen sind, sowie der Mittelpunkt nicht verändert ist. Im Schrägluftbild wird der mittlere Kreis je nach Schräglage der Kamera ellipsenförmig



Abbildung 20 Passpunktüberbelichtung *Quelle: Eigene*

abgebildet, was die Genauigkeit der absoluten Orientierung hat beeinflusst, da eine korrekte Punktmitte ist schwer oder nur Kaum möglich zu ermitteln..

5 Auswertung

Bei der weiteren Sichtung der Bilddaten wird festgestellt, dass neben den Targets auch manche Fassaden und helle Flächen stark überbelichtet sind, was zu fehlenden Oberflächenstrukturen führt, die für die Bildzuordnung mit Structure-from-motion benötigt wird. Dieser Sachverhalt wirkt sich auf die Bildzuordnung aus, da an den Stellen, an denen keine Struktur vorhanden ist, keine homologe Bildpunkte (Featurepoint) mit Structure-from-motion extrahiert werden können. Die Abbildung 21 stellt eine extrem überbelichtete Gebäudefassade und helle Rasenfläche dar. Die Vergrößerung der Rasenfläche zeigt, dass diese Stelle unscharf ist und eine schlechte Oberflächenstruktur aufweist.



Abbildung 21 Unschärfe und Überbelichtung im Befliegungsgebiet *Quelle: Eigene*

Außerdem werden die während der Aufnahmen eingestellten Kameraparameter aus den Bilddaten entnommen und in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

Tabelle 2 Kameraparameter *Quelle: Eigene*

Flug	50m	30 m Lang	30 m Quer
ISO	100-196	100-198	100-197
Blende f	2,2	2,2	2,2
Belichtungszeit	1/999 – 1/3846	1/480 – 1/3846	1/959-3846

Aus diesen Daten ist zu entnehmen, dass einerseits die Blendenöffnung gleich bleibend ist, aber andererseits die Belichtungszeit und die Sensorempfindlichkeit trotz des manuellen Kameraeinstellungsmodus sich geändert haben. Die Veränderung der radiometrischen

Eigenschaften kann zur veränderten Bildqualität führen, die sich auf die Bildmessgenauigkeit auswirken (Cramer und Leinss, S. 100). Besonders bewirkt die lange Belichtungszeit von 1/480 s die Bewegungsunschärfe bei den UAV-Aufnahmen, da die Kamera in Bewegung ist.

Die weiteren Bearbeitungsschritte der Auswertung (Orientierung, Punktwolkenerstellung) entsprechen dem unter Punkt 4 aufgeführten Workflow und können dem Arbeitsablauf der Software Photoscan gleichgesetzt werden.

5.1 Relative Orientierung

Gemäß dem Agisoft Photoscan Workflow werden alle Bilder zuerst in ein Chunk importiert. Unter Chunk ist ein Bearbeitungsordner zu verstehen, innerhalb dessen Bearbeitung, Auswertung und sämtliche Berechnungen an den vorliegenden Bildern, Punktwolken etc. durchgeführt werden können. In der Baumstruktur eines Agisoft Projektes können mehrere Chunks enthalten sein, doch gleichzeitig kann die Bearbeitung nur in einem Chunk erfolgen. Dafür muss dieser aktiv geschaltet werden. Die Aufgenommene Bildverbände werden in einen solchen angelegten Chunk importiert und in getrennten Ordnern je Kamerakonfiguration eingruppiert, um die drei Bildverbände mit verschiedenen Kameraeinstellungen zu trennen, sowie dazu die Parameter der IO jeweils zu berechnen. Für die Trennung der verschiedenen Bildverbände werden die Aufnahmen mit den Nomenklaturen **50m**, **30m_lang** und **30m_quer** versehen. Alle vorgegebenen (empfohlenen) Einstellungen von Photoscan außer der Berechnungsgenauigkeit mit Stufe hoch (Accuracy: High) werden beibehalten. Die erste Berechnung der IO wird falsch berechnet, da für alle Bilder dieselbe IO ermittelt wird. Dieses Ergebnis ist falsch, da bekannt ist, dass während der Initialisierung der Kamera Umfokussierung stattgefunden hat, was zur Veränderung der IO-Parameter geführt hat. Daraus wird auch die Erkenntnis gewonnen, dass eine Auswertung von Bildern mit verschiedenen IO-Parametern nicht gemeinsam ausgewertet werden können. Gemeinsame Auswertung funktioniert nur dann, wenn die Veränderte IO-Parameter aus einem anderem Kameratyp resultieren. Folglich wird jeder Bildflugverband in getrennten Chunk orientiert. Dieser Vorgang kann der relativen Orientierung angeglichen werden, wobei nur bedingt, da sobald Exif-Daten (UAV-Trajektorien in Bildern eingeschrieben) in die Orientierung einbezogen werden, gleichzeitig die absolute Orientierung hergestellt wird; wenngleich nur mit der schlechten Positionsbestimmungsgenauigkeit des UAVs (2,5m Lagegenauigkeit). Aus den Exif-Daten wird automatisch eine Positionsgenauigkeit von 10 m übernommen und auch beibehalten. Die Bilder der 50 m Aufnahmehöhe werden erfolgreich orientiert. Das Ergebnis ist eine dünne Punktwolke. Die Orientierungen der 30 m Aufnahmen werden ebenso berechnet, aber

nur ca. 60% aller Bilder werden orientiert. Außerdem werden Unterschiede von etwa 400 pix (1,5 mm) in den Kamerakonstanten der 30m Aufnahmen und im Vergleich zum Ergebnis 50m festgestellt. Diese Unterschiede erscheinen übermäßig hoch und unglaublich. Daraufhin wird dieser Schritt etwa 5-mal für die Quer- und Längsaufnahmen wiederholt. Insgesamt vier der sechs Wiederholungen je 30 m Aufnahme ergeben Orientierungsparameter, die nur um 5-10 pix sowohl voneinander als auch zu den 50 m abweichen. Die nachfolgende Tabelle gibt den Erfolg und Misserfolg der Berechnung wieder.

Tabelle 3 Probleme bei Bildzuordnung der 30m Aufnahmen *Quelle: Eigene*

Berechnung	1	2	3	4	5	6
Lang	Misserfolg	Erfolg	Erfolg	Erfolg	Misserfolg	Erfolg
Quer	Misserfolg	Erfolg	Erfolg	Erfolg	Erfolg	Misserfolg

Dieses Ergebnis wird als richtig angenommen, weil mehrmals hintereinander ein positives Ergebnis erreicht wird. Damit lässt sich Zufälligkeit ausschließen. Die kleinen Unterschiede werden auf die Umfokussierung der Kamera zurückgeführt.

Anhand der Betrachtung der Bildzuordnung wird festgestellt, dass zum einem wenige Verknüpfungspunkte in sämtlichen Bildern gefunden werden und zum anderen, dass einem Bild nur direkt benachbarte Bilder (ein Bild davor und eines danach) gut zugeordnet werden. Die folgende Abbildung stellt die Zuordnung der Bilder 205-206 und 205-207 dar. Das direkte benachbarte Bild wird mit über 1000 flächenhaft verteilten Verknüpfungspunkten (Blaue Linien) zugeordnet und eine gute Bildzuordnung wird geliefert. Hingegen wird das Folgebild 207 nur über 111 am Bildrand verteilten Featurepoint verknüpft und eine schlechte Bildzuordnung dargestellt. Daher wird vermutet, dass keine 80% Überlappung erreicht wurde. Eine schlechte Überlappung nimmt Einfluss auf die Kamerakalibrierung, wodurch ungenaue Kamerakalibrierung erzielt wird. In Folge dessen wird eine schlechte Genauigkeit der Objektpunktbestimmung erreicht.

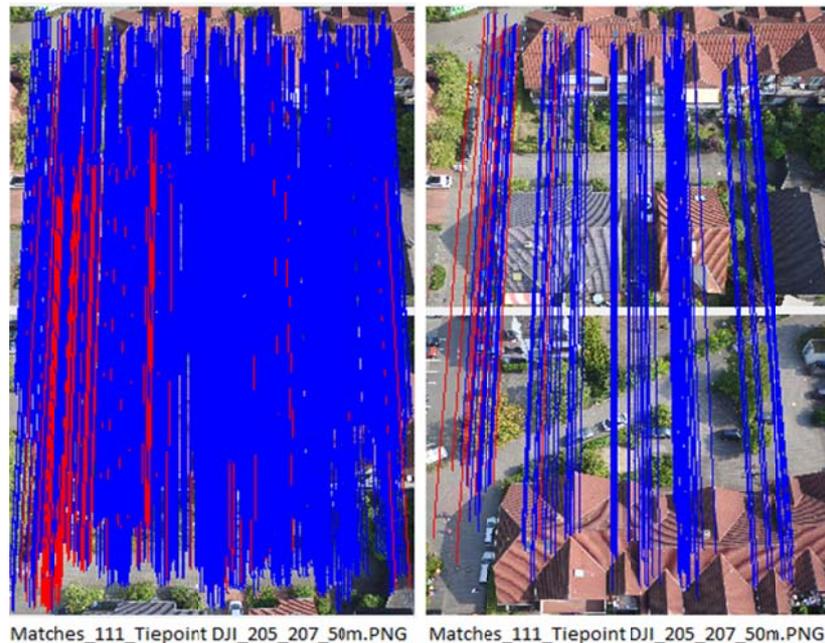


Abbildung 22 Projektionen bei Bildzuordnung *Quelle: Eigene*

Weitere Informationen zur Auswertung werden aus der Agisoft-Protokollen entnommen, die die Güte der Bildzuordnung und Bündelblockausgleichung wiedergeben.

Tabelle 4 Güte der Bildorientierung *Quelle: Eigene*

	50m	30m Lang	30m Quer
Cameras	158	171	140
Aligned cameras	149	114	123
RMS reprojection error	0,75pix	0,48pix	0,45pix
Average tie point multiplicity	2,9	2,2	2,2

- **Cameras** ist die Anzahl aller Bilder einer Aufnahme;
- **Aligned cameras** ist die Anzahl der Bilder die orientiert wurden;
- **RMS reprojection error** ist die mittlere Standardabweichung aller Verknüpfungspunkte aus allen Bildern; Der Reproduktionsfehler ist die Abweichung zwischen dem Punkt im Bild, an dem ein rekonstruierter 3D-Punkt erwartet werden kann, und der ursprünglichen Projektion dieses 3D-Punktes, der auf dem Foto erfasst und als Grundlage für das 3D-Punktrekonstruktionsverfahren verwendet wird;
- **Average tie point multiplicity** ist die durchschnittliche Anzahl von Bildstrahlen pro Verknüpfungspunkt (Agisoft LLC).

Aus diesen Daten werden folgende Schlüsse gezogen: Nur 66% aller Bilder der 30 m Lang-Aufnahme wurden orientiert, was wenig ist und deutlicher Unterschiede zu den anderen Werten aufweist. Hingegen liegt die Standardabweichung der Verknüpfungspunkte bei ca.

0,5-0,75 pix, was für die Bildflugaufnahme zu erwarten ist. Bei 80% Quer- und Längsüberlappung wird eine deutlich höhere Anzahl an Bildstrahlen pro Punkt erwartet. Es wird in Bezug auf Stereoauswertung die Annahme getroffen, dass bei 80% Überlappung in eine Richtung ein Wert zwischen 4 zu erwarten wäre.

Die gesamte Einschätzung der bisher geschilderten Probleme lässt den Schluss zu, dass eine schwache Bildzuordnung und Orientierung erreicht wurde. Die Ursachen dazu liegen im Mangel der Bildqualität (Unschärfe, Überbelichtung, fehlende Oberflächenstruktur) und schlechter Überlappung, was für eine präzise Auswertung nachteilig und sogar unzureichend ist. Daher muss höhere Überlappung gewählt werden und ggf. größere Gebiete in mehrere kleinere unterteilen, sodass eine vollständige Kreuzbefliegung für jeden kleinen Abschnitt von der Flugzeit erzielt wird.

Trotz der Probleme wird entschieden, die Auswertung fortzuführen, um zu überprüfen, was für ein Ergebnis in diesem Fall zu erreichen ist. Somit wird auf eine neue Befliegung verzichtet.

5.2 Die Absolute Orientierung

5.2.1 Targetsverkennung

Die Codierte Messmarken lassen sich nicht automatisch finden. Die Ursache kann an der Überbelichtung liegen. Hingegen werden die linienhaften Targets automatisch erkannt, deren Mittelpunkt näherungsweise bestimmt und mit einem „Marker“ (Icon in Form von Fähnchen) gekennzeichnet. Falls die Mitte eines Targets nicht genau bestimmt wurde, muss ggf. manuell die Position des Markers korrigiert werden.

Die Abbildung 23 stellen die Unterschiede an den Marker zwischen stark überbelichtet (links) und weniger überbelichtet (rechts) dar.



Abbildung 23 Unterschied der überbelichtung zwischen Targets *Quelle: Eigene*

Dabei lässt sich der Mittelpunkt der linienhaften Targets trotz der Überbelichtung einfacher als bei codierten Messmarken bestimmen. Der Grund dafür ist der durch die

Schräganordnung der Kamera verursachte Aufnahmewinkel, der zur Exzentrizität des Mittelpunktes kreisförmiger Zielmarken und Kontrastabnahme führt (Luhmann 2010, S. 532). Der Kontrast wird ebenso bei der Bildaufnahme in Richtung Sonne vermindert. Die linienhafte Marke rechts ist in Richtung Sonne aufgenommen und die Marke links daneben in der entgegengesetzte Richtung.

Die Präzision der Targetsmessung wird durch die Abweichung (Pixel Error) wiedergegeben. Dieser Wert ist eine Standardabweichung eines Markers, der aus allen seinen Positionen in Bildern, wo dieser vertreten ist, berechnet wird (Agisoft LLC).

Eine Abweichung von unter einem Pixel wird nach der Korrektur erzielt, zuvor lagen die Abweichungen im Bereich 1-8 Pixel. Dabei handelt sich um die Bildmessgenauigkeit, die Einfluss auf die Objektgenauigkeit nimmt. Doch die Messabweichung ist kein zuverlässiger Wert für die Platzierung der Marker, die als Passpunkte dienen. Eine kleine Abweichung kann auch dann erreicht werden, wenn die Differenzen der Positionen sehr klein werden. Ein falsch in der Lage bestimmter Passpunkt würde im Bild als grober Fehler die Absolute Orientierung verfälschen, wenn dieser aus der Transformation oder Ausgleichung nach den Koordinaten nicht ausgeschlossen wurde. Die Kanaldeckel und Katasternetzpunkte werden ebenso gesucht und mit Marker versehen. Dabei ergeben sich weitere Schwierigkeiten; Der Kanaldeckelmittelpunkt lässt sich händisch nicht präzise zentrisch bestimmen und die Software verfügt über keine Funktion zur Erkennung von Kreismittelpunkt an natürlichen kreisförmigen Merkmalen. Ebenfalls lässt sich der Mittelpunkt der Katasterpasspunkte wegen schlechter Auflösung und Unschärfe nicht hochpräzise bestimmen. Im Anschluss werden die Passpunktkoordinaten importiert und das Modellkoordinatensystem auf die Punkte transformiert. Dabei lässt sich sofort erkennen, dass manche Punkte eine Abweichung von mehr als 4 cm aufweisen.

Diese angesprochenen Problematiken führen zur Entscheidung, die absolute Orientierung ausschließlich über Passpunkte der Targets herzustellen.

5.2.2 Passpunktconstellation

Zuerst wird nur in dem Projekt 50 m gearbeitet. "Zur Berechnung der absoluten Orientierungen werden mindestens sieben geeignete Punktinformationen benötigt, die z.B. aus drei räumlich verteilten XYZ-Passpunkte entnommen werden können." (Luhmann 2010, S. 290). Auf das Minimum wird jedoch verzichtet, um eine flächenhafte Abdeckung des Gebietes zu erzielen. Es wird der Wert von 4 cm für maximale Abweichung der Datumpunkte angesetzt. Für die Datumsbestimmung werden sechs Punkte gewählt, auf den das Modellkoordinatensystem gelagert wird. Bei Punkten mit großen Abweichungen werden

grobe Fehler in der Passpunktbestimmung oder Bildmessung vermutet. Restliche Punkte dienen als korrespondierende Bildpunkte. Dann wird die Bündelausgleichung wiederholt. Dieser Prozess wird von Agisoft als Optimierung bezeichnet (Camera Optimize) und liefert ausgeglichene Parameter aller in die Ausgleichung eingehenden Größen. Das Ergebnis der Ausgleichung wird in 5.2.3 evaluiert. Für die Datumsbestimmung werden sowohl gewählte Passpunkte als auch Exif-Daten mitberücksichtigt, wobei von Agisoft empfohlen wird, auf die Exif-Daten zu verzichten, da sie das Ergebnis verschlechtern könnten. Doch die Optimierung ohne Exif-Daten ergibt Passpunktabweichungen um weniger Millimeter schlechter. Das bessere Ergebnis wird übernommen, da die Exif-Daten trotz der 10 m Genauigkeit das Ergebnis verbessern und zusätzlich die Annahme getroffen wird, dass die Positionsdaten der Drohne für zusätzliche, obwohl nur sehr schwache, Kontrolle sorgen. Aus dem Ausgleichungsbericht wird entnommen, dass die Abweichungen sämtlicher Punkte wesentlich kleiner geworden und nur wenige schlechter als 10 cm sind (Siehe Anlage1) Im nächsten Schritt wird die bestehende Lagerung des Modelkoordinatensystems um zusätzliche Punkte erweitert und mit 10 Punkten sowie maximal 19 Passpunkten optimiert. Die maximale Anzahl ergibt sich aus dem 4 cm Grenzwert für die Abweichung. Die Abbildung 24 stellt die Lage der Passpunkte in jeweiliger Konstellation dar, wobei an einer Stelle mehrere Passpunkte vorliegen können. Nach der gleichen Verfahrensweise werden die 30 m Aufnahmen orientiert. Dabei ergeben sich Abweichungen über 5 cm bereits bei der ersten Konstellation mit 6 Passpunkten. Dieses trifft auf die beiden 30 m Aufnahmen zu. Abweichungen der Konstellation werden auf die Bildzuordnung zurückgeführt. Mit einer veränderten Passpunktgruppe von 6 Passpunkten wird die Abweichung unter 4 cm erreicht. Die Unterscheidung der Passpunktgruppierung wird mit dem Termin PP für 30m- und XPP für die 50 m erreicht. Die Einführung der PP-Gruppierung in dem 50 m Bildverband bringt ein Ergebnis über 5 cm Abweichung, das ähnlich dem Ergebnis der 30m mit XPP Gruppierung ist. Weitere Konstellationen werden mit 10PP und 23PP aufgestellt. (Wegen großer Anzahl an Protokollen zu diesen Optimierungsergebnissen, sind sämtliche Photoscan - Projekberichte unter Anlagen/Reports auf der beigefügten CD zu finden).



Abbildung 24 Passpunktconstellation *Quelle: Eigene*

Diese Passpunktgruppierungen PP und XPP werden sowohl in den 50 m- als auch 30 m-Aufnahmen angesetzt, obwohl die Abweichungen über 4 cm hinausgehen. Während der Betrachtung der Passpunktabweichungen wird die Erfahrung gemacht, dass die Abweichungen in der Lage nur $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{3}$ der 4 cm Grenze betragen und die meisten Abweichungen aus der Höhe resultieren. Anschließend wird für jeden Chunk eine dichte Punktwolke berechnet (5.3 Dense Image Matching).

Im weiteren Schritt werden die drei getrennten Bildverbände (Chunks) zu einem gesamten Chunk zusammengeführt. Damit können Objektbereiche reprojiziert werden, die nicht in jedem Bildverband erfasst wurden und eine bessere Objektabbildung erreicht werden. Für die Zusammenführung müssen die Chunks aufeinander ausgerichtet werden (Align Chunk). Dafür stellt Agisoft die Punktbasierte, Passpunktbasierte und Kamerabasierte Methode zur Verfügung. Die punktbasierte Ausrichtung erfolgt über Abgleich der Bilder aller Chunks. Die Passpunktbasierte legt die Projekte über die Passpunkte zusammen. In dem kamerabasierten Verfahren werden Blöcke auf die geschätzten Kamerapositionen ausgerichtet (Agisoft LLC). Die Entscheidung fällt auf die Passpunktbasierte Methode und wird darin begründet, dass die Passpunkte eine absolute mit GNSS bestimmte Koordinate mit fester Lagegenauigkeit besitzen. Mit der punktbasierten Fusion könnten weitere Fehler in der Ausrichtung der Bilder auftreten, vor allem in der Hinsicht auf die Bildzuordnungs- und Datumsbestimmungsprobleme. Dann werden die Projekte mit der Funktion „Merge Chunks“ zusammengeführt. Da verschiedene Passpunktconstellationen und Passpunktgruppierungen vorliegen, werden jeweils Chunks mit gleichen Passpunkten fusioniert. Daraus ergeben sich folgende Projekte:

Tabelle 5 Passpunktkonstellationen *Quelle: Eigene*

		Passpunktanzahl		
		Konstellation		
Konstellation	Gruppierung	6	10	19
	XPP			
	XPP	30_50	30_50	30_50
		6	10	23
	PP	50	50	50
	PP	30_50	30_50	30_50
	PP	30_Lang_Quer	30_Lang_Quer	30_Lang_Quer

Da die einzelnen Punktwolken der 30m–Lang und –Quer große Aussparungen in den dichten Punktwolken liefern, wird auf ihre einzelne Auswertung verzichtet.

Für die Betrachtung der Ergebnisse und Protokolle wird die Bezeichnung aus Aufnahmehöhe, Passpunktkonstellation und Passpunktgruppierung gebildet: Exemplarisch sieht diese Bezeichnung für die fusionierten Aufnahmen aus 30 m und 50 m, XPP-Gruppierung und 6 Passpunkten wie folgt aus: 30_50_6XPP

Bei der Betrachtung des Agisoft-Protokolls der zusammengeführten Projekte ist auffällig geworden, dass während der Fusion die Kalibrierungsparameter jeder Kamera um wenige Pixel verändert wurden. Da in jedem Projekt die Passpunkte andere Abweichungen aufweisen, wird vermutet, dass durch die Zwanganpassung der Projekte über die Passpunkte zur Spannungen gekommen ist, die sich weiter auf die äußere Orientierung und Kalibrierung übertragen haben. Obwohl zwischen Orientierung des Bildes und Lage des Projektionszentrums in der Kamera kein expliziter Zusammenhang besteht. Die Differenzen der Parameter werden in 5.2.3 gegenübergestellt.

Nach diesem Schritt besteht die Möglichkeit, die vereinigten Projekte zusätzlich zu optimieren. In der Softwareanleitung gibt Agisoft keine Informationen zum solchen Vorgehen. Dabei wäre die Auswirkung dieser Optimierung auf die Projekte und Ergebnisse interessant. Der Schritt wird begründet wie folgt; Zum einem werden alle Parameter ausgeglichen, was vielleicht zur noch besseren Ausrichtung der drei Bildverbände und Minimierung der Abweichungen führen. Dafür werden alle in der Tabelle genannten Projekte kopiert und neu ausgeglichen. Um diese doppelte Anzahl an Projekten unterscheiden zu

können, wird zu der bisherigen Projektbezeichnung das Präfix Opt-Optimiert und Not_Opt für nicht optimiert hinzugefügt.

5.3 Bewertung der Kalibrierung und der absoluten Orientierung

In der folgenden Tabelle werden Bildflugparameter zusammengestellt, die aus dem Ausgleichungsberichte jeweiliger Aufnahme entnommen wurden.

Tabelle 6 Absolute Orientierung Bezugsprojekte *Quelle: Eigene*

	50m			Lang			Quer		
	6_XPP	10_XPP	19_XPP	6_PP	10_PP	23_PP	6_PP	10_PP	23_PP
Anzahl PP									
Anzahl Bilder	158			171			140		
Flughöhe	53,8			32,6			32,1		
GSD [mm]	12,4			7,3			7,3		
Maßstabszahl	3505			2193	2192	2190	2164	2164	2163

Aus der Anzahl der Bilder wird es deutlich, dass die Datenmenge der 30m Aufnahmen das Vierfache der 50m beträgt. Die Flüge für die Aufnahmen Lang und Quer haben in nahezu der gleichen Höhe stattgefunden, woraus auch dasselbe GSD mit 7,3 mm resultiert. Der Wert für GSD der 50 m Höhe stimmt etwa mit dem in der Planung geschätzten Wert. Für die 50m Höhe lässt sich auch feststellen, dass die Drohne um ca. 4m höher als geplant geflogen ist.

5.3.1 Kamerakalibrierung

Ein korrekter Vergleich und Bewertung der Kalibrierung kann erst nach der Umrechnung der Parameter der inneren Orientierung gemäß dem Vorgehen von Hastedt: 2017 erfolgen. Das ist der in Computer Vision verwendeten Algorithmen geschuldet und führt zu folgendem Sachverhalt, dass „[...] die Parameter der inneren Orientierung bei gleichen Verzeichnungsfunktionen unterschiedliche Ergebnisse liefern, die auf ersten Blick als nicht vergleichbar wirken. Sie müssen jedoch entsprechend umgerechnet werden.“ (Hastedt 19.05.2017). Im Hinblick auf diese Aussage, könnte diese eine Erklärung für die entstandenen Differenzen in den zusammengeführten Chunks sein. Die IO-Parameter werden in eine Excel-Table kopiert und umgerechnet. Dafür werden folgende Formeln benutzt:

$-f_{CV} \cdot \text{Pixelgröße}_{mm}$	mm	Kamerakonstante (erfordert quadr. Pixel)
$c_x \cdot \text{Pixelgröße}_{mm}$	mm	Bildhauptpunkt
$-c_y \cdot \text{Pixelgröße}_{mm}$	mm	
K_1 / f_{mm}^2	1/mm ²	Radial-symmetrische Verzeichnung
K_2 / f_{mm}^4	1/mm ⁴	
K_3 / f_{mm}^6	1/mm ⁶	
P_1 / f_{mm}	1/mm	Radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung
$-P_2 / f_{mm}$	1/mm	
P_3 / f_{mm}	Nicht geprüft*	
P_4 / f_{mm}^3	Nicht geprüft*	
B_1 / f_{CV}		Affinität
$-B_2 / f_{CV}$		Scherung

Abbildung 25 Umrechnung innere Orientierung CV Quelle: Hastedt 2017

Zuerst werden die Parameter der simultanen Kalibrierung der primären Projekte (30m_Lang, 30m_Quer und 50m) bewertet, die nicht zusammengeführt wurden, sondern zur Orientierung einzeln ausgeglichen wurden.

Während der Bewertung ist auf die Korrelationen zwischen den Parameter der inneren Orientierung zu achten. Unvermeidlich sind Korrelationen unter den Parametern der tangentialen Verzeichnung, sowie Bildhauptpunkt x'_0 und tangentialer Verzeichnung P1, bzw. y'_0 und P2 (Agisoft) auf. Im Gegensatz dazu sollen Bildhauptpunkt x'_0, y'_0 und die kalibrierte Kamerakonstante c untereinander nicht korrelieren, das gleiche trifft für c mit den Parametern der radialsymmetrischen K_1 - K_3 und tangentialer P_1, P_2 Verzeichnung. Grundsätzlich sind niedrige Korrelationen ein Zeichen für zuverlässige Bestimmung der Kameraparameter. Die niedrigen Werte werden erreicht, wenn die Kalibrierung mit Aufnahmen über räumlichen Punktfeld durchgeführt wird. Eine Besonderheit tritt bei einseitig aufgenommenen Bildverbänden auf (z.B. Befliegung über ebener Fläche), indem die Korrelationen zwischen innerer und äußerer Orientierung höher sind und treten einseitig zwischen einzelnen Parameter auf. Diese Korrelationen spielen eine untergeordnete Rolle, wenn die Kalibrierung und Objektkonstruktion in einer gemeinsamen Bündeltriangulation erfolgt (Luhmann 2018, 659-660). Ein weiterer Parameter, der Aufschluss über die Qualität der Ausgleichung gibt, ist die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 . Dieser Wert

soll im Rahmen von der erwarteten Bildmessgenauigkeit liegen und beschreibt den mittleren Fehler nach der Rückprojektion der ausgeglichenen Unbekannten in der Bildebene (Luhmann 2018, S. 375). Der Wert für Kamerakonstante soll in guter Näherung der fokussierten Brennweite entsprechen. Die Werte für Hauptpunktlage spielen für Qualitätsmaße keine Rolle, aber deren Standardabweichung soll etwa der Bildmessgenauigkeit entsprechen, genauso wie für Kamerakonstante. Die Standardabweichung der radialsymmetrischen Verzeichnung soll deutlich niedriger als die Parameter selbst ausfallen. Die tangentialasymmetrische Verzeichnung gibt Aufschluss auf die optische Qualität des Objektivs, diese Werte sind meistens kaum nachweisbar (Luhmann 2018, S. 377–378).

Tabelle 7 Parameter der inneren Orientierung 50m Aufnahmen *Quelle: Eigene*

Kalibrierung 50m												
	Value [mm]	Error [mm]	c	x' ₀	y' ₀	B ₁	B ₂	K ₁	K ₂	K ₃	P ₁	P ₂
c	-15,35	-0,003	1	0,29	-0,99	0,9	-0	0,1	0,03	-0	0,1	-0,3
x' ₀	0,21	0,000		1	-0,28	0,28	0,54	0,01	0,01	-0	0,78	-0,1
y' ₀	-0,08	-0,003			1	-0,9	0,4	-0,1	0	0	-0,1	0,25
B ₁	1,62	-0,008				1	0,2	-0,1	0,01	0,01	0,07	0,1
B ₂	-0,02	0,001					1	-0,1	0,01	0	0,09	0,18
K ₁	2,2E-05	3,9E-07						1	-0,9	0,82	0,04	-0,4
K ₂	-2,5E-07	7,0E-09							1	-1	0,01	0
K ₃	1,3E-09	4,3E-11								1	-0	0,03
P ₁	2,2E-04	3,6E-07									1	-0,1
P ₂	7,9E-04	1,1E-06										1
RMS	0,22											
RMS [pix]	0,75											

Tabelle 8 Parameter der inneren Orientierung 30m Lang *Quelle: Eigene*

Kalibrierung 30m Lang												
	Value [mm]	Error [mm]	c	x'_0	y'_0	B_1	B_2	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
c	-14,87	-0,015	1	0,48	0,99	0,97	0,15	-0,1	0,1	-0,1	0,11	0,4
x'_0	0,22	0,001		1	-0,5	0,49	0,61	-0,1	0,03	-0	0,34	0,24
y'_0	-0,47	-0,012			1	-1	-0,2	0,13	-0,1	0,08	-0,1	-0,4
B_1	2,58	-0,040				1	0,17	-0,2	0,09	-0,1	0,1	0,45
B_2	-8,9E-02	8,1E-03					1	-0,1	0,03	-0	-0	0,11
K_1	-1,4E-05	4,3E-07						1	-0,9	0,82	0,14	-0,3
K_2	1,6E-07	8,2E-09							1	-1	-0,1	-0
K_3	-5,6E-10	5,1E-11								1	0,07	0,03
P_1	2,3E-04	4,9E-07									1	0
P_2	0,00	1,3E-06										1
RMS	0,13											
RMS [pix]	0,48											

Tabelle 9 Parameter der inneren Orientierung 30m Quer *Quelle: Eigene*

Kalibrierung 30m Quer												
	Value [mm]	Error [mm]	c	x'_0	y'_0	B_1	B_2	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
c	-14,83	-0,015	1	0,21	0,99	0,96	-0,2	-0,1	0,16	-0,2	0,19	0,14
x'_0	0,17	0,001		1	0,14	0,1	0,58	-0,1	0,09	-0,1	0,38	-0
y'_0	-0,48	-0,012			1	-1	0,28	0,06	-0,2	0,19	-0,2	-0,1
B_1	2,72	-0,040				1	-0,3	-0,1	0,15	-0,2	0,17	0,21
B_2	-4,1E-01	8,1E-03					1	-0	0,01	0	-0	-0
K_1	-1,3E-05	5,5E-07						1	0,89	0,83	-0	-0,4
K_2	2,2E-07	9,5E-09							1	-1	0,08	0,09
K_3	-1,1E-09	5,7E-11								1	-0,1	-0,1
P_1	1,9E-04	6,5E-07									1	-0,1
P_2	0,00	1,4E-06										1
RMS	0,13											
RMS [pix]	0,50											

Aus dem Vergleich sämtlicher Parameter aller drei Kamerakonfigurationen lassen sich sehr ähnliche Werte feststellen. Daher werden alle Ergebnisse in der Gesamtheit bewertet. Die Standardabweichung der Kamerakonstanten c und der Bildhauptpunktlagen x'_0, y'_0 liegen deutlich unter der mittleren Standardabweichung RMS, was bedeutet, dass diese Werte gut bestimmt wurden. Die Werte für die kalibrierten Kamerakonstanten der 30m Aufnahmen sind sich ähnlich, was den Aufschluss auf die korrekte Kalibrierung und auf die richtige

Vorgehensweise bei den aufgetretenen Schwierigkeiten der Bildzuordnung gibt. Die Abweichungen der Verzeichnungsparameter sollen um etwa Faktor 10 kleiner als die Parameter selbst sein, was allgemein bekannt ist. Dieser Wert halten alle Verzeichnungsparameter ein. Der Faktor liegt sogar deutlich höher als 10. Die Korrelationen spiegeln die Theorie wieder, also treten keine unerlaubten Korrelationen auf. Jedoch ein Wert ist sehr auffällig und zwar die Korrelation zwischen y'_0 und der Kamerakonstante c . Dieser Sachverhalt ist aus der klassischen Luftbildaufnahme bekannt. Da streifenförmige UAV-Befliegung ähnlich der Luftbildbefliegung ist, tritt der gleiche Effekt auf. Die Ursache liegt in der bereits beschriebenen einseitigen Bildaufnahme. Da die y-Ache des Bildkoordinatensystems genau der Flugrichtung entspricht. Der Wert für Reprojektionsfehler liegt zwischen 0,48-0,75 und stimmt mit der Erwartung an Bild- und Objektmessgenauigkeit überein. Abschließend lässt sich feststellen, dass die Kalibrierung gut ausgefallen ist, obwohl in einer Untersuchung mit der Kamera DJI Zenmuse X5 Indizien auf Instabilität des Kamerasystems festgestellt werden. Trotz dieser Erkenntnis ist eine a priori Laborkalibrierung nicht notwendig (Cramer et al. 2017, 81, 83).

Im Weiteren werden die Differenzen zwischen den oben genannten Kalibrierungswerten und den Kalibrierungsparameter nach der Zusammenführung verglichen. Bei der Sichtung von allen Ausgleichungsprotokollen wurden weitere Änderungen der IO-Parameter zwischen den oben genannten Werten und den Werten aus anderen Passpunktconstellationen festgestellt (z.B. 6XPP und 10XPP). Eine mögliche Erklärung dazu, könnten schlechte Bildzuordnung und schlechte Näherungswerte für die Ausgleichung sein. Die bei der Orientierung der Bilder aufgetretenen Schwierigkeiten, könnten ein Indizes dazu sein.

Mit einem F-Test kann die Hypothese getestet werden, ob Unterschied zwischen zwei Messreihen nur zufällig ist oder ob eine genauer als die andere ist. Aus zwei Stichproben, welche in diesem Projekt die IO-Parameter der verschiedenen Konstellationen der Passpunkte, verschiedenen Passpunktgruppierungen und Zusammengeführten Projekte sind, werden Varianzen s_x^2, s_y^2 aus den Standardabweichungen s_x, s_y berechnet.

Zur Überprüfung der Hypothese wird die Testgröße

$$T = \frac{S_x^2}{S_y^2} \text{ mit } S_x^2 \geq S_y^2$$

mit den Quantilen der F-Verteilung verglichen werden.

- $C = (1 - \alpha)$ Quantile der Fischer Verteilung
- α Irrtumswahrscheinlichkeit
- $T < C$ Die Hypothese kann verworfen werden.

Formel 12 Testgröße der Fischer-Verteilung *Quelle: Möser 2012, S.53*

Diese Testfunktion ist Fisher-verteilt mit $(n - 1, m - 1)$ Freiheitsgraden (Möser 2012, S. 52), die aus der bekannter Anzahl von Bildern n_{Bilder} , Verknüpfungspunkte n_{Punkte} und unbekanntem u berechnet werden. Die Berechnung erfolgt an der nach dem Vorgehen zur Bestimmung der Anzahl von Unbekannten mit folgenden Formeln:

$$u = u_B * n_b + u_P * n_{Punkte} + u_K * n_{Kmaeras} * (+u_{Datum})$$

Formel 13 Anzahl Unbekannten *Quelle: Luhman 2010, S.347*

mit

$u_B = 6$: Parameter der äußeren Orientierung pro Bild

$u_P = 3$: XYZ-Koordinaten von Neupunkten

$u_K = 0 \geq 3$ Parameter der inneren Orientierung pro Kamera

Das Datum wird über Passpunkte festgelegt, daher werden die Datumparameter eliminiert (Luhmann 2018, S. 347). Die Anzahl der Verknüpfungspunkte kann aus dem Agisoft-Protokol entnommen werden.

Für jeden Bildverband wird eine Kamera benutzt und die Anzahl der Bilder ist ebenso bekannt. Aus der Berechnung ergibt sich:

Tabelle 10 Bestimmung der Freiheitsgerde *Quelle: Eigene*

Freiheitsgerade									
	50m			30m Lange			30m Quer		
n_bilder	158	6	948	114	6	684	123	6	738
n_punkte	184439	3	553317	171924	3	515772	168322	3	504966
n_passpunkte	50	0	0	50	0	0	50	0	0
n_kameras	1	10	10	1	10	10	1	10	10
u_datum	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_gesamt			554275			516466			505714
n_beob	496853	2	993706	385390	2	770780	360444	2	720888
Freiheitsgerade: r=n-u			439431			254314			215174

Diese Freiheitsgerade und die Varianzen der Kalibrierung werden in die Testfunktion jeweils eingesetzt und getestet. Sämtliche Ergebnisse dazu und die IO-Parameter sind in der Anlage Orientierung (auf beigefügter CD) aufgeführt.

Für die Standardabweichungen der Kalibrierungsparameter zwischen den verschiedenen Konstellationen der Ausgangswerte wird Hypothese angenommen, daraus folgt, zwischen diesen Werten keine Signifikante Änderung aufgetreten ist. Hingegen für die Parameter der zusammengeführten Projekte wird die Hypothese verworfen. Damit wird festgestellt, dass diese Änderungen nicht zufällig aufgetreten sind. Das Annehmen der Hypothese ist die Voraussetzung für das weitere Testverfahren zur direkten Vergleich der Erwartungswerte (Möser 2012, S. 52).

Die Vermutung über die unzuverlässigen Simultankalibrierung lässt sich nicht genau bestätigen, da kein Testfeld bzw. keine Laborkalibrierung vorliegen, um die Werte zuverlässig vergleichen zu können. Auch sind die aufgetretenen Änderungen der Kalibrierungsparameter während der Zusammenführung von Projekten nicht nachvollziehbar, da die in dieser Software ausgeführte Algorithmen unbekannt sind. Damit wird versucht, die Güte der Projekte anhand der absoluten Orientierung und schließlich Gebäudekoordinaten zu beurteilen.

5.3.2 Absolute Orientierung

Die Absolute Orientierung wird mit der Standardabweichung XY in der Lage und XYZ-im Raum wiedergegeben.

Tabelle 11 Absolute Orientierung Bezugsdaten *Quelle: Eigene*

	50m			30m Lang			30m Quer		
Anzahl PP	6_XPP	10_XPP	19_XPP	6_PP	10_PP	23_PP	6_PP	10_PP	23_PP
XY [cm]	1,8	2,4	1,4	1,8	1,7	1,7	1,7	1,8	2,1
XYZ [cm]	3,4	4,6	3,8	3,9	3,2	2,4	2,1	2,5	2,5

Diese Tabelle stellt die mittleren Standardabweichungen der Ausgangsdaten dar. Dabei werden nur die Konstellationen mit verschiedener Passpunktanzahl 6, 10 und 19 bzw. 23 wiedergegeben. Außerdem werden nur die Passpunktgruppierung 50_XPP und 30_PP abgebildet, die für die jeweilige Aufnahme besser passte wie im 5.2.2 beschrieben wurde. Die Entwicklung der Standardabweichungen ist für jede Konstellation unterschiedlich und damit lässt weder Vergleich, noch bestimmten Trend erkennen. Insofern kann keine Aussage zu besseren Konfiguration oder Passpunktanzahl getroffen werden.

Tabelle 12 Absolute Orientierung Zusammengeführte Aufnahmen *Quelle: Eigene*

		Optimiert_30_50					
Anzahl PP		6_PP	6_XPP	10_PP	10_XPP	19_XXP	23_PP
XY [cm]		0,6	0,8	0,9	0,7	0,9	0,8
XYZ [cm]		4,7	1,8	4,3	1,8	1,8	3,3

		Nicht Optimiert_Opt_30_50					
Anzahl PP		6_PP	6_XPP	10_PP	10_XPP	19_XXP	23_PP
XY [cm]		1,2	1,5	1,1	1,9	1,2	1,0
XYZ [cm]		3,6	2,3	3,0	2,9	2,2	1,7

Für die absolute Orientierung der allen drei zusammengeführten Projekte wird sowohl die Passpunktgruppierung XPP, als auch PP ausprobiert. Die Standardabweichung in der Lage ist um etwa 0,5 cm besser bei den optimierten Projekten. Hingegen kann für die Höhe keine Aussage getroffen werden, weil die Werte sehr unterschiedlich ausfallen. Da keine signifikanten Unterschiede in der Genauigkeit der absoluten Orientierung mit der Änderung der Passpunktanzahl zu beobachten sind, kann kein Schluss zur Passpunktanzahl gezogen werden.

Tabelle 13 Absolute Orientierung Zusammengeführte Aufnahmen Lang und Quer *Quelle: Eigene*

		Optimiert_30m_Lang_Quer			
Anzahl PP		6_PP	10_PP	23_PP	Mittel
XY [cm]		0,8	1,0	0,9	0,9
XYZ [cm]		1,9	2,0	1,2	1,7

		Nicht Optimiert_30m_Lang_quer			
Anzahl PP		6_PP	10_PP	23_PP	Mittel
XY [cm]		1,1	1,2	1,2	1,2
XYZ [cm]		2,5	2,2	1,5	2,1

Die zusammengeführten Projekte Lang und Quer der 30m Höhe wurden nur mit der Konfiguration PP durchgeführt, da diese zu diesen Aufnahmen besser passte. Aus diesen Daten folgt die Erkenntnis, dass Abweichung in der Lage der zusätzlich optimierten Projekte um 0,3 cm besser als bei den nicht optimierten ist. Eine ähnliche Aussage kann zur Höhe getroffen werden, die um etwa 0,5cm besser ausfällt. Ein Vorzug einem bestimmten Vorgehen kann nicht gegeben werden, weil hier, genauso wie in den anderen Tabellen, kein Unterschied der Standardabweichungen in der Abhängigkeit von Anzahl der Passpunkte zu erkennen ist.

Tabelle 14 Absolute Orientierung Mittelwerte *Quelle: Eigene*

	Mittelwert	
	XY	XYZ
Einzel	1,8	3,1
Nicht Optimiert	0,8	2,5
Optimiert	1,3	2,4

Schlussendlich wird ein Mittelwert für Lage und Höhe aus den nicht zusammengeführten Projekte (Einzel), aus den nur fusionierten Projekte (Nicht Optimiert) und schließlich aus den vereinigten und zusätzlich ausgeglichenen Projekten berechnet. Die Entscheidung zur Mittelwertbildung wird darin begründet, dass die Werte weder in den Passpunktgruppierungen (PP und XPP), noch in den Konstellationen mit verschiedener Anzahl von Passpunkten konstant sind. Hingegen sind die Werte sehr zerstreut.

5.4 Dense Image Matching & Punktwolkenverarbeitung

Mit Dense image matching wird jede Fassade mit dichter Punktabdeckung rekonstruiert. Dabei wird die weitere Auswirkung der schlechten Überlappung und der fehlenden Oberflächenstruktur an überbelichteten Fassaden erkannt, da Aussparungen an diesen Fassaden zu erkennen sind. Der zweite Einfluss auf die Aussparungsflächen wird durch Verdeckungen wie Dach, Bewuchs und sonstige Gegenstände verursacht.



Abbildung 26 Vergleich dichte Punktwolke vs Bilder *Quelle: Eigene*

In dem linken Bild wurde die Gebäudefassade nahezu vollständig rekonstruiert und nur unter dem Dach fehlen Punkte. Hingegen sind im mittleren und rechten Bild große weiße Bereiche zu sehen, in denen das Objekt nicht rekonstruiert wurde. In dem mittleren Bild sind die Folgen der Überbelichtung zu erkennen. An diesen Stellen ist nicht nur weiße Aussparung zu verzeichnen, vielmehr werden Fehlkonstruktionen (Dachfläche an der weißen Fassade) festgestellt. Die Problematik der Verdeckungen wird in dem rechten Bild verdeutlicht. Die weit über die Fassade herausragende Dachfläche, Bäume und Balkonumrandung verdecken die Fassade, wodurch keine Rekonstruktion möglich ist.



Abbildung 27 Dichtepunktwolke der Fassade
Quelle: Eigene



Abbildung 28 Aussparung in der Fassade
Quelle: Eigene

Beim Betrachten der 50 m und 30 m Lang-Quer Punktwolken wird klargestellt, dass die Fassade der 50 m Aufnahmen trotz der größeren Bodenauflösung wesentlich besser rekonstruiert wurde. Die Fassade der vereinigten 30_50m Aufnahmen ist vergleichbar mit der 50 m Punktwolke, jedoch ist die Punktdichte höher.

Im weiteren Verlauf der Auswertung werden aus den Punktwolken nur die Gebäudefassaden ausgeschnitten, um die Datenmenge für die weitere Bearbeitung zu reduzieren. Diese Ausschnitte werden einerseits exportiert und andererseits wird eine Dreiecksvermaschung berechnet. Die Vermaschung muss wegen fehlender Rechenleistung nur in niedriger Stufe berechnet werden. In dieser Stufe wird die Vermaschung grob berechnet, da die Dreiecke größer werden.

5.5 Schrägluftbild und Fehlerquelle

Hin und wieder wird von verschiedenen Problematiken gesprochen, die diese Auswertung begleiten. Um der Ursache näher zu kommen, wird nach Indizien und Zusammenhängen zwischen den Fehlern gesucht. Bisher wurde festgestellt, dass schlechte Qualität von Bildern durch Unschärfe und Überbelichtung verursacht wurde. Unklar bleibt bereits angesprochene schlechte Überlappung von Bildern und schlechte Bildzuordnung.

Zu dem ersten werden die Bildaufnahmen noch mal gesichtet. Durch die Kameraneigung, die während der Befliegung 20° beträgt, werden Schrägluftbilder aufgenommen. Diese Bilder werden damit charakterisiert, dass Verdeckungen von Objekten deutlich prominenter auftreten als bei Nadir aufnahmen. Außerdem variiert der Bildmaßstab von Vorder- zu Hintergrund (Gerke und Vosselman 2017, S. 324–325).

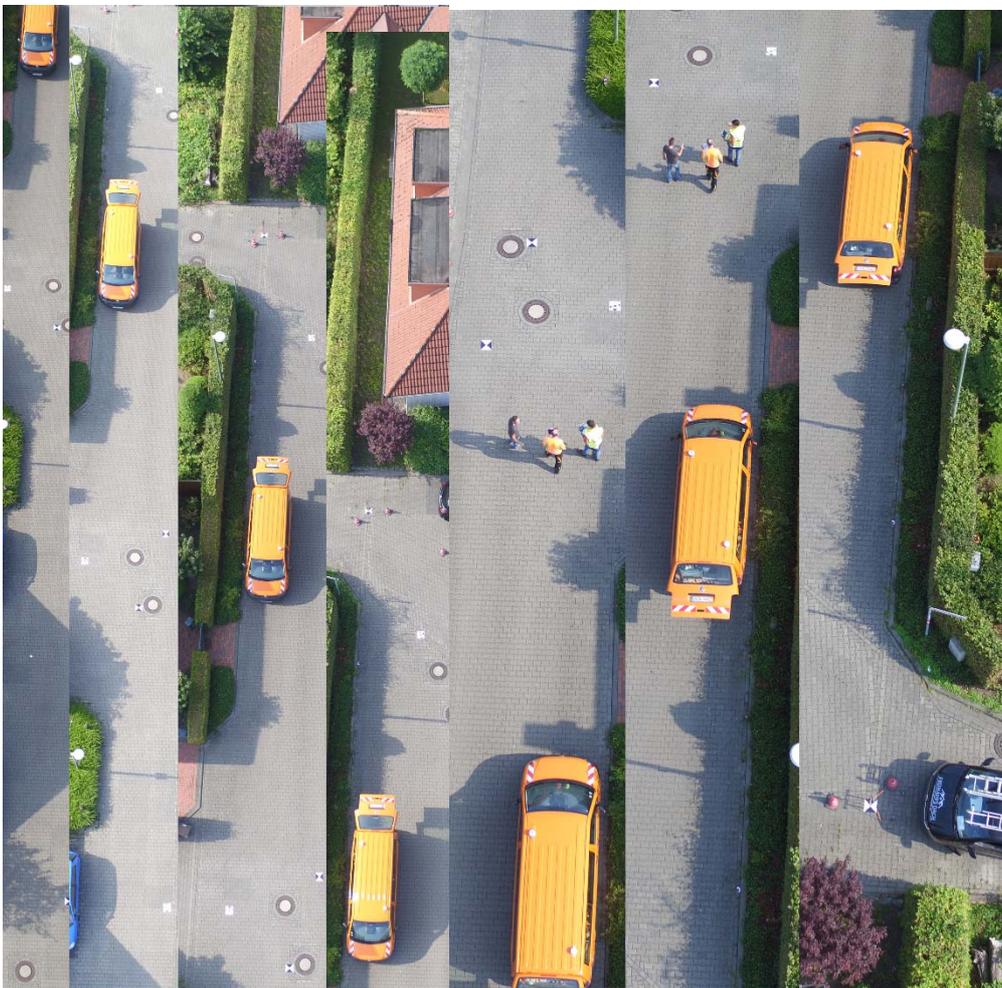


Abbildung 29 Bildüberlappung

50m Quelle: Eigene

Abbildung 30 Bildüberlappung 30m

Quelle: Eigene

In den Abbildungen 29 und 30 lässt sich die Maßstabsänderung an dem orangenen Wagen gut beobachten. Gleichzeitig kann festgestellt werden, dass der Wagen sowohl in den 50 m

als auch in dem 30 m Aufnahmen nur drei Mal jeweils abgebildet wird. Damit wird Bestätigt, dass die Überlappung in der Flugrichtung weniger als 80% beträgt. Die These wird mit den Zahlen in der Tabelle 15 bestätigt. Dafür werden für fünf Bildpaaren pro Flugaufnahme jeweils die Abstände zwischen den Projektionszentren zweier benachbarten Bildern mit dem Satz des Pythagoras berechnet. Die Prozentzahlen geben direkt die Überlappung wieder, woraus ersichtlich ist, dass nur ca. 50% erreicht wurde.

Tabelle 15 Soll-Ist Bildüberlappung *Quelle: Eigene*

	Ist	Soll	%
50m	14,2	8,7	61
Quer/Lang	10,4	5,5	53



Abbildung 31 Flugroute *Quelle: Eigene*

Die Überlappung quer zur Flugrichtung wird mit der Abbildung 31 dargestellt, aus der eine Überlappung von weniger als 80% ersichtlich ist. Vielmehr ist die Objektausrichtung zur Kamera wichtig, um diesen Objekt (Fassade) vollständig von jeder Seite zu erfassen. Am Beispiel von der Front dieses Kraftwagens, kann festgestellt werden, dass die Front nur in jeder zweiten Aufnahme erfasst wird. Daraus Resultiert eine Überlappung von deutlich weniger als 50% quer zur Flugrichtung. Ein weiteres Problem der Überlappung tritt bei Hohen Objekten auf, da während eines Fluges in einer niedrigen Höhe eine starke Verdeckung der Hintergrundobjekte durch die im Vordergrund stehenden Objekte auftritt. Außerdem durch die Höhe der Objekte ändert sich die Entfernung zwischen der Kamera und

Oberkante eines Objektes, wodurch der Maßstab vergrößert wird und damit kleine Fläche im Bild abgebildet wird. Dieses Phänomen ist in dem Bild darunter zu beobachten.



Abbildung 32 Verdeckung durch Objekte *Quelle: Eigene*

Eine weitere Erkenntnis ergibt sich zur Kameraneigung. Während der Luftbildaufnahme führt die gewählte 20° Kameraneigung zum einem zu einer besseren Schnittgeometrie zwischen Kamera und Objekt gewählt und zum anderem zur besseren bzw. vollständigen Erfassung von Fassaden. Zu dem Erstem ist am Beispiel der roten Gebäudefassade in dem linken Teil der Abbildung 32 eine gute Schnittgeometrie sehen. Es ist keine senkrechte Aufnahme, die eine bestmögliche Schnittgeometrie wäre, dennoch ist die Oberfläche der Fassade gut zur Kamera gerichtet. Hingegen in dem Mittlerem Teil der Abb. 23 schneidet sich die Fassade mit der optischen Achse unter sehr flachem Winkel und damit ist die Fassadenoberfläche nur sehr klein, sowie ist im Vergleich zur Fassade links in einer anderen Perspektive abgebildet. In der Abbildung 32 rechts ist die rote Fassade nicht mehr zu sehen. Somit tritt diese Fassade nur in 2 Bildern und in anderen Perspektiven auf, was zur schlechten Reproduzierung dieser Gebäudefassade führt.

Gerke, M und Vosselman G wissen auf weitere Schwierigkeiten bei der Bildzuordnung von konvergenten Aufnahmen hin. Da in einem Schrägluftbild sich der Maßstab zwischen dem Vorder- und Hintergrund sowie sich die Ausrichtung des Bildausschnittes ändert, muss die Feature-Suche mit Operatoren erfolgen, die Affine-Transformation modellieren können. Diese Forderung erfüllt der ASIFT Operator und damit eignet sich gut für die Korrespondenzanalyse von Schrägluftbildern. Verfahren wie SIFT sind in der Lage nur bei kleinen perspektivischen Verzerrungen Korrespondenzen zu liefern (Gerke und Vosselman 2017, S. 333–334). "Eine weiteres Konzept zur Mehrbildzuordnung wird mit der "RayCloud" (Teil des Pix4Dmapper, Pix4D) realisiert." (Gerke und Vosselman 2017).

Abschließend geben die Aussagen aus diesem Abschnitt Aufschluss auf die Probleme der Bildzuordnung, Ungenauigkeiten der inneren und absoluten Orientierung, da Agisoft Photoscan mit SIFT-Operator arbeitet. Da nur wenige Bildbeobachtungen gefunden wurden, konnte die Kalibrierung nicht zuverlässig durchgeführt werden. Verstärkt wurde dieser Effekt, durch die unzureichende Überlappung von Bildern.

5.6 Bestimmung von Gebäudekoordinaten

Bei der Gebäudekoordinatenbestimmung soll herausgefunden werden, welche Methoden dafür geeignet und zielführend sind. In Frage kommen die Messung an der Dreiecksvermaschung und in der Punktwolke, Monoplotting sowie räumliche Messmarken. Bei den letzten beiden Messmethoden handelt sich um Messungen in den orientierten Bildern. Insbesondere wird die Lösung über den Schnitt zweier Ausgleichsebenen zur Bestimmung der Koordinaten aus der Punktwolke nahegelegt. Diese Methode wird darin begründet, weil jeder Messwert zufällige Abweichungen gegenüber dem wahren Wert aufweist und sich die gesuchte Größe nicht sofort eindeutig bestimmen lässt. Durch die Ausgleichsrechnung werden die Messabweichungen der Messwerte als Verbesserungen verteilt, sodass plausible und am nächsten dem wahren Wert kommende Messergebnisse erreicht werden (Möser 2012, S. 73). In diesem Fall ist die gesuchte Größe die Koordinate der Gebäudeecke, die von Abweichungen wie Rauschen der Punktwolke betroffen ist.

An jedem Gebäude werden ca. 2-3 Koordinaten gemessen. Die Wahl der Ecken richtet sich nach folgenden Voraussetzungen:

- Es müssen Soll-Koordinaten vorliegen;
- Die Ecken sind in den Bildern sichtbar;
- Die Ecken sind rekonstruiert und liegen sowohl in der Punktwolke als auch in der Dreiecksvermaschung.

Grundsätzlich wird in allen Punktwolken gemessen, um feststellen zu können, welche Vorgehensweise für die Bestimmung der Punktwolken eventuell zum besseren Ergebnis führt.

5.6.1 Messung in Punktwolken

Zuerst wird die Methode der Messung in der Punktwolke ausprobiert. Dazu wird eine geeignete Software benötigt, die Ausgleichsebenen aus den Punktwolken rekonstruieren kann. In Photoscan liegt eine solche Funktion nicht vor. Suche nach anderer Low-Cost Software und anderen Plugins für CloudCompare ergeben ein negatives Ergebnis. CloudCompare bietet noch die RANSAC-Funktion, mit der Ebenen berechnet werden können.

Trotz verschiedener Kombinationen von Steuerparametern dieser Funktion werden die Ebenen nur zufällig berechnet. Mehrmalige Berechnungen mit gleichen Parametern an gleichen Fassadenausschnitten liefern eine andere Ausrichtung der Ebene zur Fassade. Dabei repräsentiert jeder Fassadenausschnitt nur eine Gebäudeseite, die aus einer Punktwolke besteht. Aus der Punktwolke wurden nicht alle Fassadenelemente (z.B. Bewuchs, Dach) visuell entfernt.

Ein weiteres Vorgehen zur Koordinatenbestimmung in der Punktwolke wird über visuelle Messung fortgeführt. Dazu werden aus der Punktwolke alle Fassaden visuell soweit ausgeschnitten, dass in der Draufsicht nur die Gebäudeseiten zu sehen sind. Dabei werden folgende Sachverhalte festgestellt: In den Punktwolken ist das Punktrauschen zu erkennen, die in der Größenordnung zwischen 1-15cm beträgt, was exemplarisch in der Abbildung 34 dargestellt wird. In dieser Abbildung kann wegen des Maßstabes weniger das Rauschen erkannt werden, als die Tatsache, dass rechts die Punktwolke der Fassade ungleichmäßigen Verlauf aufweist.

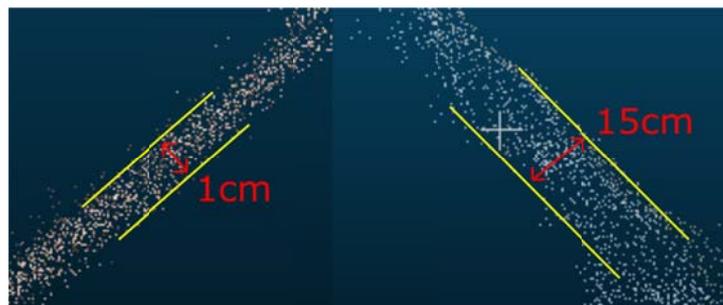


Abbildung 33 Punktrauschen *Quelle: Eigene*



Abbildung 34 Doppelte Fassade *Quelle: Eigene*

Doppelte Fassadenabbildung tritt in den fusionierten Punktwolken 30_50m_Not_Opt auf (Abbildung 33 und 35). Eine Messung direkt an der Ecke ist nicht möglich, da wenige Punkte oder Ausrundungen an Ecken auftreten (Abbildung 33). Zumal können die Ecken nur mühsam präzise identifiziert werden (Abb. 36).

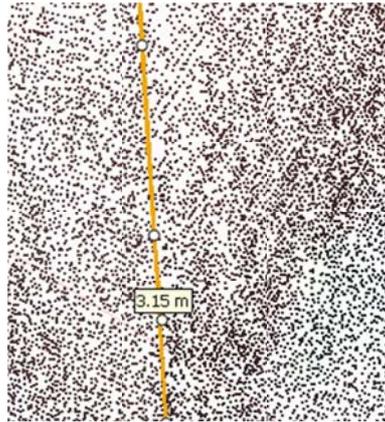


Abbildung 35 Doppelte Abbildung *Quelle: Eigene*

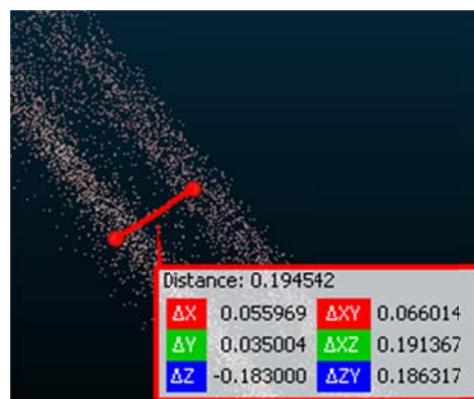


Abbildung 36 Erkennung von Ecken *Quelle: Eigene*

Das Rauschen kann die Ursachen in der Bildqualität, Bildmessung und Orientierung haben. Die doppelte Abbildung ist wahrscheinlich durch die Vereinigung der Bildverbände und die Qualität der Orientierung hervorgerufen. Dieser Effekt tritt in den optimierten Punktwolken 30_50_m_Opt nach der Vereinigung nicht mehr auf. Die schlechte Kantenrekonstruktion (Diskontinuität) kann der Methode structure-from-motion zugeschrieben werden und wird durch Glättungseffekte (Tiefpassfilter) verursacht (Luhmann 2018, S. 498). Die Beugung der Ecken ist besonders an Kanten zu beobachten, die sich durch kurze Gebäudeseiten bilden. Zusätzlich wird dieser Effekt durch Rinnen verstärkt, was an roten Fassaden mit silberfarbigen Fallrohren sehr gut zu erkennen ist (Abb. 37).

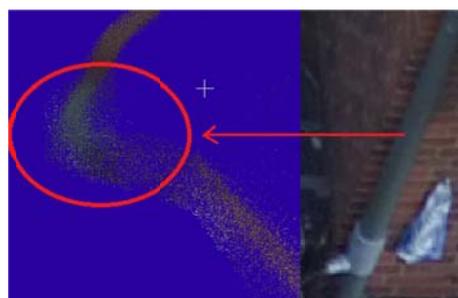


Abbildung 37 Fallrohr *Quelle: Eigene*

Durch diese Problematik können die Koordinaten nicht direkt über die Messung an den Ecken bestimmt werden. Hingegen über einen Schnitt zweier durch die Mitte der Gebäudefassaden gelegter Geraden können die Ecken gut rekonstruiert und die Koordinaten bestimmt werden. Mithilfe einer Ausgleichsgeraden könnte ein der Ausgleichsebene ähnliches Ergebnis erreicht werden. Jedoch steht keine Funktion zur Ausgleichsgerade zur Verfügung. Es wird auf eine visuelle Bestimmung der Geraden zurückgegriffen. Die Gerade wird durch vier Punkte bestimmt, die links und rechts jeweils am Anfang und Ende jeder Fassade in einer Draufsicht gemessen werden. Die Messungen werden an den Stellen durchgeführt, wo die Fassade gut erkennbar und ein geradliniger Verlauf zu erkennen ist (Abb. 35). Eine andere Möglichkeit der Geradenbestimmung könnte durch Punktmessungen in der Mitte der Fassade erfolgen. Die Formeln für den Geradenschnitt werden aus der Formelsammlung von Gruber.F 2012 entnommen. Dann werden Differenzen zwischen den Soll-Koordinaten des Katasters und aus dem Geradenschnitt berechneten Ist-Koordinaten ermittelt. Die aus den Differenzen berechnete resultierende Strecke darf die 4 cm nicht überschreiten.

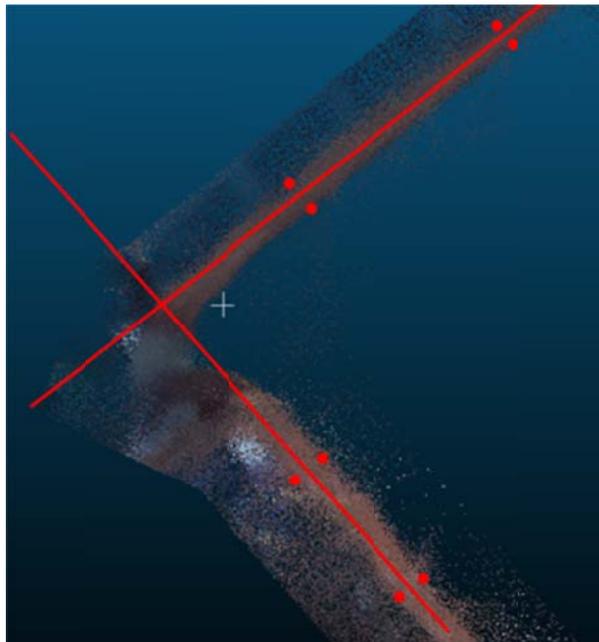


Abbildung 38 Schnittgerade *Quelle: Eigene*

Dieses Verfahren ist wegen der Bestimmung von vielen Punkten sehr aufwändig und bei kurzen Gebäudeseiten fehlerträchtig. Dennoch ergeben sich positive Ergebnisse, die unter Punkt 6 bewertet werden.

5.6.2 Messung an Dreiecksvermaschung

In der Dreiecksvermaschung werden an jeder Ecke mehrere Koordinaten zur Mittelbildung gemessen und genauso wie beim Geradenschnitt Soll - Ist Differenzen gebildet. Jedoch sind die Messungen an den Ecken nicht eindeutig. In CloudCompare lassen sich die Koordinaten nur an den Knotenpunkten der Vermaschungsdreiecke abgreifen (Abb. 39). Zur besseren Darstellung wurden die Knotenpunkte vergrößert. Ebenso ist zu erkennen, dass die Gebäudeecke nicht geradlinig verläuft, sondern Sprünge aufweist. In den Abbildungen 40 und 41 ist die Messung in Agisoft dargestellt. Hierbei ist die

Schwierigkeit die Ecke präzise zu vermessen, da diese sich nur mühsam erkennen lässt. Eine bessere Übersicht wird durch das gekachelte Modell erreicht. In diesem Modell ist zu erkennen, dass die Gebäudeecke rund ist.

Die Koordinaten werden sowohl an verschiedenen Gebäudeecken, als auch in verschiedenen Punktwolken gemessen. Bereits bei ersten Ergebnissen dieser Messungen werden Differenzen weit über 4 cm



Abbildung 40 Messung
Kekacheltes Modell Quelle:
Eigene

verzeichnet. Auf weitere Messungen in allen Punktwolken wird verzichtet, da diese Methode nicht zielführend ist. Eine Kontrolle dieser Methode wird anhand der Punktwolken durchgeführt,

deren Geradenschnittmessungen erfolgreich waren. Diese Kontrolle ist nicht als zuverlässige Überprüfung zu betrachten, aber Entscheidungshilfe für den Abbruch der weiteren Messungen.

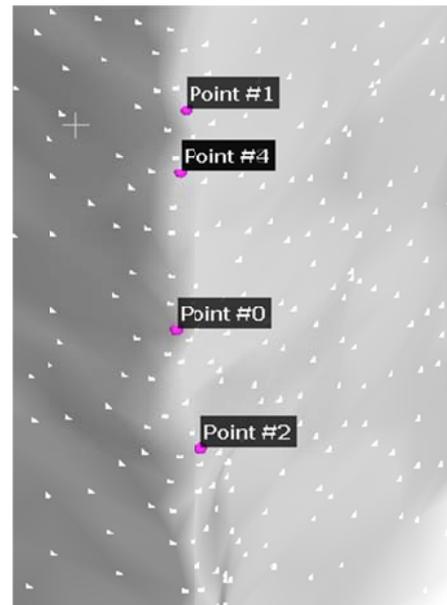


Abbildung 39 Messung in
Vermaschung CC Quelle:
Eigene



Abbildung 41 Messung in
Vermaschung Agisoft Quelle:
Eigene

Die schlechten Ergebnisse sind zum einem auf die Möglichkeit der Messung nur an den Knotenpunkten und zum anderen auf die Vermaschung zurückzuführen. Da Algorithmen für die Berechnung der Vermaschung unbekannt sind, wird vermutet, dass die schlechte Rekonstruktion der Gebäudeecken durch das bereits angesprochene Punktrauschen hervorgerufen wird.

5.6.3 Bildmessungen - Monoplotting

Monoplotting ermöglicht die Bestimmung der dreidimensionalen Objektkoordinaten eines im Bild gemessenen Punktes, indem durch den Bildpunkt und das Projektionszentrum des Bildes definierter Raumstrahl mit Objektfläche zum Schnitt gebracht wird. Der Schnittpunkt ergibt die 3D-Koordinate. Dafür muss die innere und äußere Orientierung des Bildes bekannt sein und ein 3D-Oberflächenmodell vorliegen (Luhmann 2018; s. 297).

Die Messung der Koordinaten direkt im Bild in der Software Photoscan scheitert direkt bei den ersten Versuchen. Aus der Abbildung 42 ist ersichtlich, dass die Y-Koordinaten nur auf 0,5 m genau wiedergegeben werden. Außerdem ändert sich der Y-Wert nicht, trotz der Messung an der höchsten und tiefsten Stelle der Gebäudeecke. Trotz mehrfacher Versuche an anderen Gebäudeecken wird keine plausible und präzise Bestimmung der Y-Koordinate erzielt. Wegen der unpräzisen Messung wird auf weitere Koordinatenbestimmungen verzichtet.

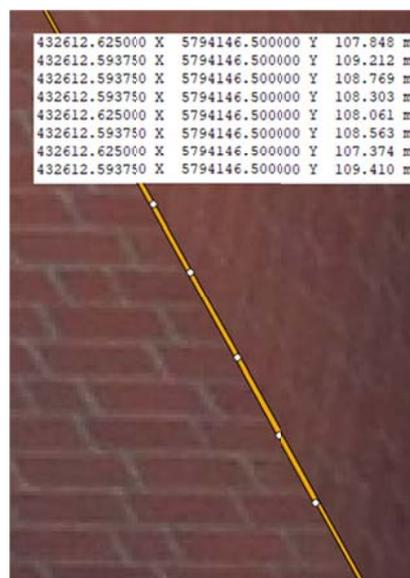


Abbildung 42 Monoplotting in Agisoft *Quelle: Eigene*

Das Verfahren müsste noch in Verbindung mit anderer Software ausprobiert werden, die eine korrekte Messung ermöglicht. Gleichzeitig wird nicht ausgeschlossen, dass eine weitere Auseinandersetzung mit Photoscan zu korrekten Messergebnissen führen kann.

5.6.4 Punktbestimmung mit räumlicher Messmarke

Das Aufsetzen einer räumlichen Messmarke basiert auf dem Prinzip der visuellen Stereobildauswertung. Der Punkt wird bestimmt, indem eine digital erzeugte stereoskopische Einstellmarke in virtuellen 3D-Raum eines Stereomodells bewegt und auf eine abgebildete Objektoberfläche aufgesetzt wird. Wenn diese Marke korrekt auf der Oberfläche aufsitzt, werden die homologen Raumstrahlen der Stereobilder rekonstruiert und mit bekannter Basis (Parallaxe) die XYZ-Koordinaten berechnet. Dieses Verfahren wird in digitalen Stereoauswertegeräten realisiert (Luhmann 2010, S. 300).

Die Auswertung wird mit der Software Trimble Inpho Application DT-Master an einer digitalen Auswertestation durchgeführt. Die mit UAV erfassten Bilder sind keine Stereobilder, sondern, wegen der 20° Auslenkung der Kamera von Nadirrichtung, wurden Schrägluftbilder aufgenommen. Dadurch weisen die Gebäudefassaden unterschiedliche Perspektiven auf. In jedem Bild ist die gleiche Gebäudeecke anders zur Bildebene geneigt. Während der stereoskopischen Betrachtung und Verstellung der Bildparallaxe zum Aufsetzen der Messmarke müssen zwei Gebäudeecken übereinandergelegt werden. Erst dann ist eine korrekte Koordinatenbestimmung möglich. Die Abbildungen 43-44 stellen die tatsächliche Lage der Gebäudeecken und die Neigung dieser Ecken zueinander. Aus den Abbildungen lässt sich erkennen, dass die Gebäudeecken (Rote Linien) sich aufgrund der unterschiedlichen Neigung nicht übereinanderlegen lassen. Damit lassen sich keine Gebäudekoordinaten bestimmen und eine Auswertung ist nicht möglich.

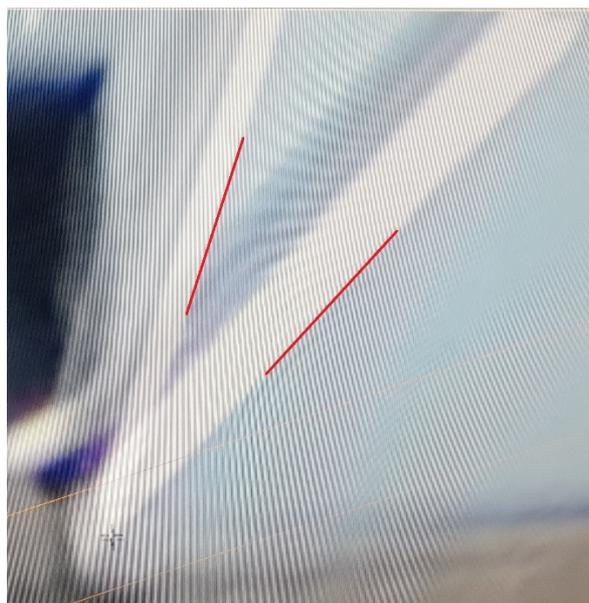


Abbildung 43 Aufsetzen räumlichen Messmarke *Quelle: Eigene*

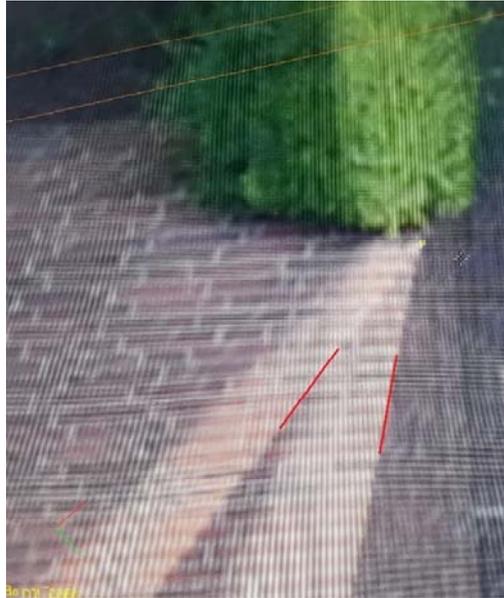


Abbildung 44 Aufsetzten räumlichen Messmarke 2 *Quelle: Eigene*

5.7 Katasterangaben zum Gebäude

Im Zusammenhang mit Gebäudevermessungen sind neben der Geometrie noch weitere Angaben zum Gebäude und Topografie zu erheben (LGLN 02.04.2014). Diese Angaben richten sich nach dem AAA-Objektartenkatalog der GIS-Hersteller (Jacquemotte WS 2017/2018). Für das Befliegungsgebiet gilt das Katalog des Landes Niedersachsen. Exemplarisch können das die folgenden Angaben sein:

- Gebädefunktion (z.B. Wohngebäude, Kirche, Gebäude zur Ent- oder Versorgung);
- Bauart (Arkade, Schornstein oder Durchfahrt im Gebäude);
- Tatsächliche Nutzung des Grundstücks (z.B. Wohnbaufläche, Siedlung, landwirtschaftliche Fläche) (LGLN).

Informationen die aus der äußeren Gestaltung von Objekt wie z.B. „Kirche“ hervorgehen, können direkt aus dem Bild entnommen werden. Hingegen die Gebädefunktion „Versorgung“, abgesehen von Schildern und Informationstafel am Objekt, die im Bild zu erkennen sind, lässt sich nicht unbedingt aus dem Bild abzuleiten. Gleichwohl kann ein Sachverhalt zu Bauteilen festgestellt werden. Bauteile sind charakteristische Merkmale eines Gebäudes und liegen innerhalb von Gebäuden (LGLN 02.04.2014). Geometrische Informationen sind zum Bauteil genauso wie zum Gebäude zu erfassen. Da ein Bauteil in dem Gebäudeinnern liegt, können aus dem Bild keine oder kaum Informationen zu Geometrie hergeleitet werden. Ein Beispiel dazu könnte eine Arkade darstellen. Obwohl sie im Bild vielleicht zu erkennen ist, trotzdem können keine im Gebäudeinnern Liegende Maße zu dieser Arkade bestimmt werden. Da in diesem Befliegungsgebiet ausschließlich

Wohngebäuden und Gebäuden für Wirtschaft oder Gewerbe vorliegen, ist eine genaue Untersuchung zu Erkennbarkeit der Gebäude-, Bauwerk oder sonstigen nach Objektartenkatalog Angaben im Bild nicht möglich. Zum anderem ist die Erfassung von dieser Angaben an die derzeitige Messmethoden, was aber nicht direkt für das UAV-Messverfahren gelten muss. Dazu müssen zuerst Regelungen bestimmt werden.

6 Ergebnisse und Bewertung

6.1 Vergleich der Koordinaten, der Verfahren und der Passpunktkonstellationen

Schließlich konnten die Gebäudekoordinaten nur mit der Messmethode (Geradenschnitt) bestimmt werden. Daher kann die Qualität der Ergebnisse nur anhand dieses Verfahrens beurteilt werden. Da sowohl die Punktwolkenbearbeitung als auch die Messung nur visuell durchgeführt wurden, stehen keine qualitativen Angaben zur Präzision und Genauigkeit parat. Eine exemplarische Abschätzung könnte mit der Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes auf den funktionalen Zusammenhang der Koordinatenbestimmung erfolgen, indem, unter Annahme der Worst Case, die Standardabweichung der Datumpunkte auf den Geradenschnitt übertragen wird. Doch unter Betrachtung der sämtlichen aufgetretenen Fehlerquellen wird darauf verzichtet und nur eine quantitative Beurteilung getroffen.

Die folgenden Tabellen stellen prozentual die Häufigkeit der positiven Ergebnisse aller gemessenen Ecken für jedes jeweilige Projekt dar. Das Ergebnis wird als positiv angesehen, wenn die Differenz zwischen Soll- und Ist-Koordinate kleiner 4 cm beträgt. Die Gesamtanzahl der gemessenen Ecken beträgt 26. Somit trägt jede Ecke ca. 4% zum Ergebnis bei.

Tabelle 16 Ergebnisse Gebäudekoordinaten 50m *Quelle: Eigene*

Flughöhe Anzahl PP Anordnung	50m		
	6	10	19
Anzahl Ecken %	XPP	XPP	XPP
	58	58	50

In dieser Tabelle ist ein kleiner Unterschied zwischen der Lagerung mit 19 und den beiden übrigen zu erkennen. Der Unterschied von 8% (2 Ecken) wird als unwesentlich angesehen oder vielmehr als zufällig.

Tabelle 17 Ergebnisse Gebäudekoordinaten 30 m Nicht optimiert *Quelle: Eigene*

Flughöhe	Nicht optimierte Fussionprojekte 30m lang & quer		
	Anzahl PP	6	10
Anordnung	PP	PP	PP
Anzahl Ecken %	69	77	58

Tabelle 18 Ergebnisse Gebäudekoordinaten 30m optimiert *Quelle: Eigene*

Flughöhe	Zusätzlich optimierte Fussionprojekte 30m lang & quer		
	Anzahl PP	6	10
Anordnung	PP	PP	PP
Anzahl Ecken %	88	81	85

Der Vergleich zwischen den zwei Projekten vor und nach der Optimierung lässt erkennen, dass nach der zusätzlichen Ausgleichung bessere Ergebnisse erzielt werden. Die Ergebnisschwankungen zwischen den Passpunkt Konstellationen verhalten sich ähnlich den Resultaten in 50m Projekten.

Tabelle 19 Ergebnisse Gebäudekoordinaten 30_50m *Quelle: Eigene*

Flughöhe	Nicht optimierte vereinigte Projekte 30m & 50m					
	Anzahl PP	6		10		19
Anordnung	PP	XPP	PP	XPP	PP	XPP
Anzahl Ecken %	81	65	65	46	81	69

Tabelle 20 Ergebnisse Gebäudekoordinaten 30_50m optimiert *Quelle: Eigene*

Flughöhe	Zusätzlich optimierte Fussionprojekte 30m & 50m					
	Anzahl PP	6		10		19
Anordnung	PP	XPP	PP	XPP	PP	XPP
Anzahl Ecken %	92	77	92	96	96	92

Auf den ersten Blick dieser letzten zwei Tabellen kann der gleiche Trend wie bei den 30_Lang_Quer Ergebnissen festgestellt werden, dass die Koordinatenbestimmung besser in den zusätzlich ausgeglichenen Punktwolken ausgefallen ist. Bei diesen Tabellen ist zum ersten Mal möglich Unterschiede nicht nur zwischen den Konstellationen mit verschiedener Passpunktanzahl dem Vergleich zu unterziehen, sondern auch die zwei Passpunktgruppierungen PP und XPP gegenüberstellen. Auffällig ist, dass große Disproportionalitäten zwischen den vereinigten Punktwolken auftraten. Im Gegensatz dazu gestalten sich die Differenzen zwischen den optimierten Fusionsprojekten bis auf eine

Ausnahme sehr konstant und zwar nur mit dem Unterschied von 4%, was einer Gebäudeecke entspricht. Grundsätzlich kann direkt keine Vorgehensweise vorgezogen werden. Gleichwohl fallen die fusionierten Aufnahmen der 30m Projekte sowohl ohne, als auch mit Optimierung im Vergleich zu den 50m Aufnahmen besser aus. Gleichzeitig ist zu bedenken, dass sich der Zeitaufwand für die Marker-Suche in den 30m-Flughöhen erhöht. Eine genaue Zahl zu dem Zeitaufwand bleibt unbekannt. Unter Betrachtung der vereinigten Aufnahmen kann der Schluss gezogen werden, dass eine höhere Anzahl an Bildern zu einer positiven Ergebnissteigerung führt.

6.2 Zeitaufwand UAV – gestütztes Messverfahren

Zur Beantwortung der Wirtschaftlichkeitsfrage wird die Dauer dieses UAV-gestützten Messverfahrens benötigt. Dafür wird mithilfe dieses Projektes ein Arbeitsablauf erstellt, in dem alle während der Projektbearbeitung durchgeführten Arbeiten mit durchschnittlicher Zeitdauer pro Einheit aufgeführt wurden. Diese Tätigkeiten sind aus der Tabelle darunter zu entnehmen. Unter einer Einheit ist ein Arbeitsvorgang zu verstehen z.B. Bestimmung von einem Passpunkt.

Tabelle 21 Zeitaufwand *Quelle: Eigene*

Workflow & Zeitaufwand UAV-Aufnahme mit PP

		Beispiel_1		Beispiel_2	
	a-				
	t-Einheit	Anzahl	txa		txa
Anzahl Gebäude		8		8	
Anzahl Gebäudeecken		26		26	
Anzahl Passpunkte:		6		23	
Anfahrt	1:00	1	1:00	1	1:00
Erkundung von PP	0:20	1	0:20	1	0:20
Signalisierung von PP	0:05	6	0:30	23	1:55
Kontrollpunkt	0:15	2	0:30	2	0:30
Aufmessung PP	0:05	6	1:00	23	3:50
Befliegung 30&50m => 3XPrj.	0:20	3	1:00	3	1:00
Datensichtung & Sicherung	1:00	1	1:00	1	1:00
1_Alignment	0:15	1	0:45	1	0:45
2_Alignment	0:30	1	1:30	1	1:30
PP_Auswahl	0:10	6	3:00	23	11:30
Optimierung	0:05	1	0:15	1	0:15
Densecloud matching	4:00	1	12:00	3	12:00
Export_Punktvolke LAS	0:30	1	0:30	1	0:30
Zuschnitt_Punktvolke	0:10	8	1:20	8	1:20
Punktmessung	0:05	26	2:10	26	2:10
	Gesamtzeit		26,83		63,58
	Pro Gebäude		3,35		7,95

Die zwei in der Tabelle aufgeführten Beispiele stellen den gleichen Auftrag, jedoch mit unterschiedlicher Anzahl an Passpunkten dar. Daraus lässt sich erkennen, dass die Passpunkte bzw. die Anzahl zu einer deutlichen Erhöhung des Zeitaufwandes führt und sich dadurch stark auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt (Dworak 2016; s. 67). Diese Zeitunterschiede sind zum einem durch die Bestimmung der Passpunkte im Gelände und zum anderen durch die mehrfache Passpunktmessung in den Bildern bedingt. Ein weiterer Kostenfaktor ist die Anzahl der zu bestimmenden Gebäudeecken. An diesem Beispiel ist die Auswirkung nicht ersichtlich, weil dieselbe Anzahl an Ecken angenommen wurde. Umstritten bleibt die Zeit für die Berechnung der dichten Punktwolke, da solche Berechnungen in der Nacht ausgeführt werden könnten und dies, mithilfe eines Batch-Prozesses (Stapelberechnung), sogar für mehrere Projekte gleichzeitig. Infolgedessen würde sich die tatsächliche Bearbeitungszeit, in der eine Arbeitskraft am Projekt arbeitet, verkürzen. Wobei, auch dieser Sachverhalt umstritten bleibt, da zum einem zur Erledigung mancher Aufgaben (UAV-Befliegung: Pilot und Begleiter) mehrere Arbeitskräfte benötigt werden und zum anderen manche Tätigkeiten wie z.B. Passpunktmessungen durch Personen bewältigt werden können, die keine UAV- und Photogrammetrie Erfahrung haben.

6.3 Wirtschaftlichkeit

Das UAV-Messverfahren wird den derzeit verwendeten Messverfahren nicht direkt gegenübergestellt, da diese Messtechniken sehr verschieden sind und zu viele Faktoren zu berücksichtigen sind. Daher erfolgt nur eine Übersicht, wie sich die Zeitwirtschaft der beiden Verfahren gestaltet.

Tabelle 22 Wirtschaftlichkeit *Quelle: Eigene*

Durchschnittlicher Aufwand Standard Gebäudeerhebung		
Produktbezeichnung.	Zeit	Kosten
KLR-004*	7,4	Unbekannt

Zeitaufwand UAV mit PP		
Anzahl PP	6	23
Gesamtzeit	26,8	63,6
Zeit pro Gebäude	3,35	7,95

*Auftragsannahme, Ausführung,
Auswertung eigener Gebäudevermessungen

In der ersten Tabelle wird der landesweit durchschnittliche Aufwand pro Auftrag von 7,4 Stunden abgebildet. Darin enthalten sind der vermessungstechnische Aufwand im Außendienst und die Auswertung im Innendienst. Die Kosten für eine Gebäudevermessung richten sich nach dem Herstellungswert und sind in der Kostenordnung für das amtliche Vermessungswesen (KOVerm) festgelegt. Der Herstellungswert ist in verschiedene Stufen

unterteilt, woraus sich die Gebührenhöhe ergibt. Der Umfang einer Gebäudevermessung ist unterschiedlich und trotzdem bleiben die Gebühren gleich. Doch durch die verschiedenen Gebühren der Anträge und den unterschiedlichen Umfang der Vermessung lässt sich kein absoluter Kostenaufwand pro Auftrag bestimmen. Daher bleibt diese Angabe unbekannt. Außerdem bezieht sich der Aufwand auf einzelnen Gebäuden, die nicht unbedingt in demselben Gebiet liegen müssen. Zwar wird versucht, verschiedene Gebäudevermessungsaufträge in vergleichbarer Lage oder an nicht weit voneinander entfernten Stellen zu planen, dennoch kommt es selten vor, dass mehrere Aufträge, wie in diesem Projekt direkt aneinander liegen. Außerdem ist unklar, wie viele Gebäude tatsächlich zusammen liegen müssen, um mit UAV wirtschaftlich zu arbeiten. In der rechten Tabelle sind durchschnittliche Zeiten pro Gebäude dargestellt. Dabei muss beachtet werden, dass nur etwa 2-3 Ecken an jedem Gebäude bestimmt wurden. In 6.2 wird die Zeit zur Erfassung einer Gebäudeecke geschätzt. Mit diesem Wert könnte für ein viereckiges Haus die zusätzliche Zeit der Messung dazu addiert werden. So könnte etwa für jedes Bauwerk mit beliebiger Anzahl an Ecken der Zeitaufwand geschätzt werden. Aber eine wichtige Frage bleibt noch offen, ob sich überhaupt alle Ecken an Gebäuden bestimmen lassen. Die Frage wird mithilfe von folgender Tabelle beantwortet.

Tabelle 23 Anzahl Gebäudeecken Quelle: Eigene

Übersicht Gebäudeecken pro Gebäude:

	Anzahl:			
	gemessen	messbar-m	gesamt-g	m/g [%]
Haus_33-37	3	17	36	47,22
Haus_39-41	2	11	18	61,11
Garage	1	2	4	50,00
Haus_43	3	7	10	70,00
Haus_45	5	6	18	33,33
Haus_49	6	14	16	87,50
Haus_51	2	2	9	22,22
Haus_53	3	5	12	41,67
			Mittel:	51,63

In der Tabelle wurden alle acht Gebäude des Befliegungsgebietes mit Anzahl ihrer Ecken aufgelistet und wie viele bestimmt wurden. Die Spalte „messbar“ stellt die Anzahl an Ecken dar, die aus den vorliegenden Punktwolken bestimmt werden können. Mit dem Quotient aus „messbar“ und „gesamt“ wird prozentual wiedergegeben, wie sich das Ergebnis gestaltet. Aus diesem Projekt lässt sich kein Gebäude vollständig rekonstruieren. Ein Durchschnitt von 52% weist darauf hin, dass etwa nur die Hälfte der Ecken bestimmbar sind. Damit wird die gestellte Rahmenbedingung, Gebäuden nur mit UAV zu erfassen, nicht erfüllt.

Der Wirtschaftlichkeit können noch Beschaffungskosten hinzugezogen werden. Auf eine Kostendarstellung dieses Verfahren mit dem UAV DJI Inspire 1 wird verzichtet, da dieses Modell veraltet ist. Eine unverbindliche Kostenschätzung könnte wie folgt aussehen:

Tabelle 24 Kostenaufwand *Quelle: Eigene*

Ausrüstung UAV	
Drohne	5000,0
Software	3500,0
Hardware	7000,0
Summe	15500

Da schließlich nicht nur die Drohne, sondern auch die Sensoren (GNSS, Kamera, IMU) eine wichtige Rolle spielen, kann der tatsächliche Preis stark abweichen. Die Kosten für Hardware richten sich nach Leistungsstarken Rechnerkonfiguration, die von Agisoft empfohlen werden. Sämtliche Aufwendungen für Soft- und Hardware, die sowohl für Standardmessverfahren als auch UAV-Messungen benötigt werden, werden nicht dargestellt.

7 Fazit

Aufgrund der während der Aufnahme und Auswertung aufgetretenen Probleme sind nicht alle Zielvorgaben abschließend zu bewertenden Fragestellungen können nur bedingt zuverlässig beantwortet werden, da sich viele Ungereimtheiten in dem Projekt kumuliert haben. Dennoch wird deutlich, dass den automatisiert berechneten Werten und Softwareangaben kein blindes Vertrauen geschenkt werden darf. Vielmehr ist ein kritisches Umgehen mit Ergebnissen wichtig. Dafür ist das sachkundige Wissen aus dem Feld der Photogrammetrie und Bildbearbeitung nach wie vor gefordert.

Die Nutzbarkeit des UAV-geschützten Messverfahrens zur Bestimmung von Gebäudekoordinaten eignet sich nicht für die Landesvermessung, wenn alle Gebäudeecken ausschließlich mit diesem Verfahren bestimmt werden sollen. Durch dichte Bebauung, Dachkonstruktion, Überdachungen, Vegetation und weitere verschiedene Gegenstände, die sich in unmittelbarer Nähe des Gebäudes befinden, werden die Bildaufnahmen der Fassaden beeinträchtigt und damit wird keine Koordinatenbestimmung möglich.

Die Annahme, dass die Anzahl von Passpunkten sich auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt, wird bestätigt, da Passpunkte sowohl im Objektraum als auch im Bildraum gemessen werden müssen. Die geometrische Lagegenauigkeitsanforderung von 4 cm für Gebäude wird trotz der subjektiven Koordinatenmessmethode eingehalten. Der Einfluss der Passpunktanzahl auf die Genauigkeit der absoluten Orientierung bleibt wegen der schlechten Bildaufnahmen und der somit ungenauen Messverfahren ungeklärt. Genauso wird die Frage zur Messung an einer 3D-Vermaschung aufgrund von schlechten Aufnahmen und Punktrauschen, auf dem die Vermaschung basiert, nicht beantwortet. Koordinatenmessung in Bildern kann aufgrund von Softwareproblemen nicht untersucht werden. Die Koordinatenmessung in Schrägluftbildern kann nicht mit dem Aufsetzten der räumlichen Messmarke wegen nicht stereoskopischen Bildanordnungen zuverlässig durchgeführt werden. Die direkte Messung einer Gebäudeecke in einer Punktwolke bringt wegen Punktrauschens und mühsamer Erkennung der Ecke negative Ergebnisse, die Koordinatenbestimmung über den Geradenschnitt führt zu positiven Resultaten, obgleich ohne jegliche Zuverlässigkeit.

Insbesondere ist auf die Flugparameter zu achten, um verwertbare und qualitativ gute Bilddaten zu bekommen. In einer UAV-Befliegung gestalten sich die Flugparameter anders als bei einer klassischen Luftbildaufnahme. Starke Sonneneinstrahlung ist zu meiden und/oder die relative Blendenöffnung klein einzustellen (große Blendenzahl). Insbesondere bei Schrägbildaufnahmen ist nach Möglichkeit nicht in Richtung gegen Sonne zu fliegen. Einstellungen, die auf radiometrische Signalübertragung Einfluss nehmen z.B. ISO-Zahl, sind konstant zu halten. Kurze Belichtungszeit und/oder Fluggeschwindigkeit reduzieren auf

mögliches Minimum. Die Flughöhe ist von der Objektivbrennweite abhängig. Daher kann kein Wert genannt werden, aber GSD von ca. 1 cm kann als Zielgröße angenommen werden. Dennoch darf die Flughöhe insbesondere bei Schrägluftbildaufnahmen nicht zu niedrig ausfallen, da hohe Objekte, die sich näher als die Erdoberfläche der Kamera befinden, beschränken das Sichtfeld und Abbildungsfläche der Kamera. Viel wichtiger ist eine hohe Bildüberlappung, wenn die Auswertung mit Structure-from-motion erfolgt. Allerdings ist Structure .from.motion für Schrägaufnahmen, wegen Maßstabsänderung und Ausrichtung des Bildausschnittes, wenig geeignet (Gerke und Vosselman 2017, S. 333–334).

8 Ausblick

Der Einsatz der UAV-Luftbildbefliegungen ist für die Aufgabenbereiche des Liegenschaftskatasters bzw. des LGLNs eingehender zu untersuchen. Dazu sind die folgenden Aspekte hinzuziehen; Zum einem begrenzt sich die UAV-Befliegung nicht nur auf die Vermessung und Bestimmung von geometrischen Größen, sondern auch können die nicht orientierte Bilder für weitere Zwecke verwendet werden wie den Vergleich zwischen der Liegenschaftskarte und des Bildes auf Veränderungen der Abbildung. Von Gebäudefassaden abgesehen sind für andere Aufgaben (z.B. DGM) Senkrechtaufnahmen (Nadir) ausreichend. Diese sind einfacher zu bewältigen und bessere Orientierungsergebnisse liefern. Ein Mehrwert aus den Punktwolken kann für Erstellung von LOD (Level of detail) oder Geländemodelle erzielt werden. Somit muss so ein UAV-Einsatz in der Gesamtheit und in Teilaufgaben des LGLN evaluiert werden. Erst dann kann die Frage der Wirtschaftlichkeit aussagekräftig beantwortet werden. Aus diesem Grund wurde bereits am 26.11.2018 eine Projektgruppe "Erhebung von Geobasisdaten mit Drohnen" im LGLN eingerichtet. Diese Projektgruppe hat neben der Klärung von rechtlichen Fragestellungen und technischen Voraussetzungen für UAVs auch die weiteren Anwendungen mit Drohnen zu er testen und zu bewerten. Daraus soll eine entsprechende Handlungsempfehlung mit Vorschlägen zur erforderlichen Änderung von Verwaltungsvorschriften erarbeitet werden.

In Bezug auf Schrägluftaufnahmen und Gebäudeerfassung könnten bessere Ergebnisse und höhere Genauigkeit der absoluten Orientierung mithilfe der Kombination einer Senkrechtaufnahme (Nadir) mit dem Schrägluftbild erzielt werden. Die Untersuchung dieser Kombination hat an einem Modellaufbau Ergebnisverbesserung ergeben (Penczek 2016, S. 62).

Weitere Suche nach anderen Softwareprodukte und Untersuchung deren Leistung könnte zur besseren Gesamtergebnis der Gebäudevermessung führen, indem die Objektkoordinaten

einfacher und schneller bestimmen würden und die Orientierung der Schrägluftbilder zuverlässiger durchgeführt wird. Dazu möge die Wahl einer teureren Software eine Alternative sein, indem sämtliche Auswertungsschritte in dieser Software zu bewältigen sind. Die UAV-Technik unterliegt ständigen Neuerungen. Inzwischen stehen Drohnen nicht nur mit präzisen GNSS-Positionsbestimmung im Postprocessing zur Verfügung, sondern auch mit einer hochpräzisen RTK-Positionierung. Durch die Herstellung des Bezugssystems über die Position von UAV kann gleichwertige oder sogar bessere Objektgenauigkeit als mit Passpunkten erreicht werden, sodass und auf Passpunktmessung weitgehend verzichtet werden kann (Dworak 2017).

Literaturverzeichnis

AdV (2017): SAPOS Präzise Positionierung in Lage und Höhe. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). Online verfügbar unter <https://www.zentrale-stelle-sapos.de/files/SAPOS-Broschuere-2017-deutsch.pdf>, zuletzt aktualisiert am 08.2017, zuletzt geprüft am 03.01.2019.

Agisoft LLC: "About Photoscan". Hg. v. Agisoft LLC. Agisoft LLC. Online verfügbar unter www.agisoft.com, zuletzt geprüft am 21.12.2018.

Agisoft LLC: PhotoScan Professional. Contents. Overview. St. Petersburg.

Agisoft LLC: System requirements. Unter Mitarbeit von Agisoft LLC. Hg. v. Agisoft LLC. Online verfügbar unter <https://www.agisoft.com/downloads/system-requirements/>, zuletzt geprüft am 22.01.2019.

Bäumker, Manfred; Przybila, Hans-Jürgen; Zurhorst, Alexander (2013): Enhancement in UAV Flight control and sensor orientation. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Rostock. Online verfügbar unter www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W2/33/2013/inspr/archives-XL-1-W2-33-2013.pdf, zuletzt geprüft am 17.01.2019.

BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017): Die neue Drohnenverordnung. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/LF/flyer-die-neue-drohnen-verordnung.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 17.12.2018.

Brühl, Volker (2015): Wirtschaft des 21. Jahrhunderts. Herausforderungen in der Hightech-Ökonomie. 1. Aufl. 2015. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04883-9>, zuletzt geprüft am 05.12.2018.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (25.01.2015): Verletzung des höchstpersönlichen Lebensbereiches durch Bildaufnahmen. In: Bundesgesetzblatt Teil I Jahrgang 2015 Teil I Nr. 2. Online verfügbar unter https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl115002.pdf%27%5D__1545224930518, zuletzt geprüft am 19.12.2018.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (30.03.2017): Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten. In: Bundesanzeiger Verlag GmbH (Hg.): Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 17. Bonn: Bundesanzeiger Verlag GmbH. Online verfügbar unter

https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl117s0683.pdf%27%5D__1544590118987, zuletzt geprüft am 17.12.2018.

CloudCOmpare: CloudCompare. Presentation. Introduction.

Cramer, Michael; Leinss, Benedikt: Welche ist am besten? - Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie, S. 97–118.

Cramer, Michael; Przybila, Heinz-Jürgen; Meißner, Henry; Stebner, Kartsen (2017): Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme. In: Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). Beiträge zum 156. DVW-Seminar am 9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart. Unter Mitarbeit von Aiham Hassan. Augsburg: Wißner-Verlag (Schriftenreihe des DVW, Band 86), S. 69–86.

Dworak, Eike (2017): Untersuchungen zur Genauigkeit von PPK GNSS basierten UAV-Luftbildbefliegungen im Insel- und Küstenschutz. Bachelorarbeit. Jade Hochschule, Oldenburg.

Eling, Christian; Klingbeil, Lasse; Kuhlmann, Heinder (2016): Warum UAVs und warum jetzt? In: UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar in Bonn. Unter Mitarbeit von Christian Eling und Lasse Klingbeil. Augsburg: Wißner-Verlag (Schriftenreihe des DVW, Band 82), zuletzt geprüft am 18.01.2019.

Gerke, Markus; Vosselman, George (2017): Auswertung von Schrägaufnahmen. In: Christian Heipke (Hg.): Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Naturwissenschaften), S. 321–341, zuletzt geprüft am 20.01.2019.

Haala, Norbert; Schwieger, Volker (2017): UAV-Anforderungen und Möglichkeiten. In: Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). Beiträge zum 156. DVW-Seminar am 9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart. Unter Mitarbeit von Aiham Hassan. Augsburg: Wißner-Verlag (Schriftenreihe des DVW, Band 86), S. 11–26.

Hastedt, Heidi (19.05.2017): Abbildungsmodell in Computer Vision. Definition der Inneren Orientierung in Computer Vision. Oldenburg.

Heipke, Christian (Hg.) (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Naturwissenschaften). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47094-7>.

- Huss, Jürgen (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Hg. v. Jürgen Huss. Karlsruhe: Wichmann.
- Jacquemotte, Ingrid (WS 2017/2018): AAA-Modellierung und ALKIS. Das AAA-Anwendungsschema. PDF-Präsentation.
- Kehle, Christian (2018): AG Geoinformations-wirtschaft | Initiative D21. Initiative D21. Online verfügbar unter <https://initiated21.de/arbeitsgruppen/geoinformationswirtschaft/>, zuletzt geprüft am 04.12.2018.
- Kersten, Thomas; Sternberg, Harald; Schwieger, Volker; Haala, Norbert; Schneider, Danilo; Fritzensmeier, Klaus (2018): Vorwort. In: UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. Beiträge zum 169. DVW-Seminar am 19. und 20. Februar 2018 in Hamburg. 1. Auflage. Augsburg: Wißner-Verlag (Schriftenreihe des DVW, 89).
- Kraft, T; Geßner, M; Meißner, H; Przybila, Hans-Jürgen; Gerke, M (2016): Introduction of a photogrammetric camera system for RPAS with highly accurate GNSS/IMU information for standardized workflow. Lausanne, (Switzerland). Online verfügbar unter www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-3-W4/71/2016/insprarchives-XL-3-W4-71-2016.pdf, zuletzt geprüft am 17.01.2019.
- Kraus, Dr.-Ing. Karl (1997): Photogrammetrie. Grundlagen und Standardverfahren. Unter Mitarbeit von Peter Waldhäusl. 6. Aufl. 3 Bände. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag (1).
- Kraus, Karl (2004): Photogrammetrie: Band 1: Photogrammetrie. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. vollst. bearb. und erw. Aufl. Berlin: De Gruyter (De Gruyter Lehrbuch). Online verfügbar unter http://www.degruyter.com/search?f_0=isbnissn&q_0=9783110908039&searchTitles=true.
- LGLN: ALKIS-Objektartenbereiche. PDF-Dokument.
- LGLN (02.04.2014): Erhebung von Gebäuden für den Nachweis im Liegenschaftskataster.
- Luhmann, Thomas (2010): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Wichmann VDE-Verlag.
- Luhmann, Thomas (2018): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen - Methoden -Beispiele. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Offenbach: Wichmann.
- Ministerium für Inneres und Sport (MI) (12.12.2002): Niedersächsisches gesetz über das amtliche Vermessungswesen, NVerMG, vom Zum 19.12.2018 aktuellste verfügbare Fassung der Gesamtausgabe. In: Nds. GVBl. 2003, 5, zuletzt geprüft am 19.12.2018.

Möser, Michael (Hg.) (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie. 4., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Wichmann.

Oliver Schmechtig (2017): UAV in der Ingenieurvermessung – Anwendungen, Möglichkeiten und Erfahrungswerte aus der Praxis gesehen. Zusammenfassung. In: Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). Beiträge zum 156. DVW-Seminar am 9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart. Unter Mitarbeit von Aiham Hassan. Augsburg: Wißner-Verlag (Schriftenreihe des DVW, Band 86), S. 111.

Penczek, Jannik (2016): UNtersuchungen zur Objektgenauigkeit und Kamerakalibrierung bei unterschiedlich konfigurierten UAV-Flügen unter Einsatz von Agisoft Photoscan. Bachelorarbeit. Jade Hochschule, Oldenburg.

Pix4D S.A. (2018): Pix4Dcapture. Disclaimer. Hg. v. Pix4D S.A. Pix4D S.A. Lausanne, (Switzerland). Online verfügbar unter <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>, zuletzt geprüft am 22.12.2018.

Przybilla, Hans-Jürgen (2016): Unmanned Aerial System im Messeinsatz: Über die Systemkonfiguration zur Qualität des geodätischen Endprodukts. In: UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar in Bonn. Unter Mitarbeit von Christian Eling und Lasse Klingbeil. Augsburg: Wißner-Verlag (Schriftenreihe des DVW, Band 82), S. 85–94.

Przybilla, Hans-Jürgen (2017): Kameras für UAS - Marktübersicht. In: Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). Beiträge zum 156. DVW-Seminar am 9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart. Unter Mitarbeit von Aiham Hassan. Augsburg: Wißner-Verlag (Schriftenreihe des DVW, Band 86), S. 53–68, zuletzt geprüft am 30.12.1028.

Remondio, Franex; Barazetti, Luigi; Nex, F; Scaioni, Marco; Sarazzi, Daniele (2011): UAV Photogrammetry for mapping and 3D modeling - current status and future prespectives. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciances. Zurich. Online verfügbar unter <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/25/2011/isprsrarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011.pdf>, zuletzt geprüft am 18.01.2019.

Schönmann, Dieter (2015): Das Digitalkamera-Magazin. DJI stellt die MFT-Copterkameras Zenmuse X5r und X5 vor. Hg. v. dkamera DAS DIGITALKAMERA-MAGAZIN. Schönmann IT Services & CONsulting. Online verfügbar unter www.dkamera.de/news/dji-stellt-sie-mft-copterkameras-zenmuse-x5r-und-x5-vor/, zuletzt geprüft am 15.01.2019.

Strohmayr, Andreas (2017): Unmanned Aerial Systems - AUSlegung, Einsatzbereiche und operative Rahmenbedingungen. In: Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). Beiträge zum 156. DVW-Seminar am 9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart. Unter Mitarbeit von Aiham Hassan. Augsburg: Wißner-Verlag (Schriftenreihe des DVW, Band 86), S. 29–44.

SZ DJI Technology Co.: Inspire 1. TECHN. DATEN. Unter Mitarbeit von Tao Wang. Hg. v. SZ DJI Technology Co. Shenzhen, China,. Online verfügbar unter <https://www.dji.com/de/inspire-1/info#specs>, zuletzt geprüft am 23.12.2018.

Toth, Charles; Jutzi, Boris (2017): Plattformen und Sensoren für die Fernerkundung und deren Geopositionierung. In: Christian Heipke (Hg.): Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Naturwissenschaften), S. 29–66.

Trimble Inc.: Datasheet - Trimble R10 German - Screen.pdf. Hg. v. Trimble Inc. Online verfügbar unter https://drive.google.com/file/d/1jx_rmD2mGxTWft-LSyjo4PuQCbVxQKad/view, zuletzt geprüft am 22.12.2018.

Vermessungs- und Katasterverwaltung: Erhebung von Geobasisdaten durch Liegenschaftsvermessungen. LiegVermErlaß, zuletzt geprüft am Juli 2015.

VKV (2018): Projektgruppe VKV 2025: Fachliches Zukunftskonzept für die Vermessungs- und Katasterverwaltung - Zieljahr 2025. Unter Mitarbeit von Karl-Heinz Bertram, Christina Brandt, Florian Brauer, Anja Diers, Dr. Birgit Elias, Norbert Hösl, Elko Münstedt, Sandra Rausch, Thomas Schaefer, Detlef Wehrmann, Katrin Weke, Dr. Marcel Ziems, zuletzt geprüft am Stand: August 2017, internes Dokument.

Walkenhorst, Peter (2016): Glossary of MFT Terms. Hg. v. Apotelyt.com - Photography & Imaging Resources. Apotelyt.com - Photography & Imaging Resources. Online verfügbar unter www.apotelyt.com/photo-terms/mft-glossary, zuletzt geprüft am 15.01.2019.

9 Anlagen

Anlage 1: Processing Report Agisoft Photoscan

Der Auswertungsbericht enthält sämtliche Informationen zur der Bündeltriangulation, Passpunkten, Genauigkeitskriterien und Zeitaufwand.

Unter dem Punkt Messdaten (Survey Data) befindet sich das Bild 1, das die Positionen der Kamera Stellt, aus der die Bilder erstellt wurden. Darunter befinden sich Daten zur Anzahl der Bilder (Number of Images), Mittlere Flughöhe (Flying Altitude), Bodenauflösung (Ground resolution), Größe des Auswertungsgebiets (Coverage area), Anzahl orientierten Bilder, deren Lage berechnet werden konnte, Anzahl der Verknüpfungspunkte (Tie points) und Anzahl der Bildpunkte (Projektions), die identifiziert wurden und schließlich die Standardabweichung Sigma null der Bildreproduzierung (Reprojection error).

In dem Abschnitt Kamerakalibrierung (Camera calibration) sind Informationen zu den ausgeglichenen Parametern der inneren Orientierung samt ihren Standardabweichungen und die Korrelationen zwischen den Parameter aufgeführt. Die Abbildung 2 stellt die radialsymmetrische Verzeichnung des Objektivs mit den Abweichungsvektoren.

Die nächsten zwei Kapitel Lagegenauigkeit der Kamera (Camera Locations) und Kameraorientierung (Camera orientations) werden nur dann aufgeführt, wenn die Exif-Daten in der Ausgleichung teilgenommen haben. Dann wird bildhaft mit Standardellipsen die Standardabweichung der einzelnen Kamerapositionen dargestellt. Die Abweichung in Z-Richtung wird farblich ausgedrückt. Außerdem werden mittlere Standardabweichungen für jeweilige Koordinatenrichtung und Gesamtabweichung wiedergegeben. Unter dem Punkt Kameraorientierung sind Standardabweichungen um die Flugachsen bzw. Koordinatenachsen aufgeführt.

Unter dem Punkt Passpunkte (Ground control points) werden Genauigkeitsinformationen zu Passpunkten und Kontrollpunkten aufgezählt. Dabei sind Passpunkte, diejenigen Punkte über die die absolute Orientierung (Georeferenzierung) bestimmt wird. Alle übrigen Punkte werden als Kontrollpunkte verwendet und dienen der Kontrolle, die über Abweichung zwischen der Soll- und Ist-Koordinatenwerten. Ähnlich wie die Kamera Positionen werden die Genauigkeit der Passpunkte bildhaft mit Standardellipsen abgebildet.

Digitales Oberflächenmodell (Digital elevation model) stellt die Höhen der Objekte anhand einer farbigen Bildskala zwischen den tiefsten und höchsten Punkt im Projekt.

Die letzten Kapitel enthält Prozessierungsparameter für das vorliegende Projekt. In den Ersten Absatz werden noch einmal Anzahl aller und dann orientierten Bildern. Markes ist die Anzahl aller Punkte im Projekt, die in Bildern aufgesucht und markiert wurden. Es entspricht der Summer aus Kontroll- und Passpunkte. Mit dem EPSG-Code wird das verwendete Koordinatensystem belegt. Punkte (Points) stellt die Anzahl aller Bildverknüpfungspunkte am 3D-Objekt. Die dahinterstehende Zahl zeigt Anzahl aller Verknüpfungspunkte, dessen Teil als grober Fehler oder aus anderen Gründen ausgeschlossen wurden. Mit dem Projektionsfehler wird die Güte der Bildverknüpfung mit der minimalen, mittleren und größten Standartabweichung ausgedrückt. Die Mittlere Punktgröße (Mean Key point size) ist die mittlere Punktgröße bzw. Abweichung aus allen Verknüpfungspunkte. Dafür wird ein Raumstrahl aus dem Verknüpfungspunkt durch Projektionszentrum projiziert und mit dem Bild verschnitten und ist schließlich die Differenz aus der Schnittpunktcoordinate und der tatsächlichen Bildpunktcoordinate. Die durchschnittliche Anzahl der Bildstrahlen pro Verknüpfungspunkt (Average tie point multiplicity) drückt mit der Überbestimmung ebenso die Güte der Auswertung in der Hinsicht auf die Punktsuche und Punktbestimmung aus den Bildern aus. Die weiteren Metadaten beschreiben die Bedingungen und Eigenschaften und zu bestimmende Parameter in diesem Projekt. Schließlich werden Informationen zur Dauer der Berechnungen angeben.

50m_High_6_XPP_alle_pix_GR

Processing Report
03 November 2018



Survey Data

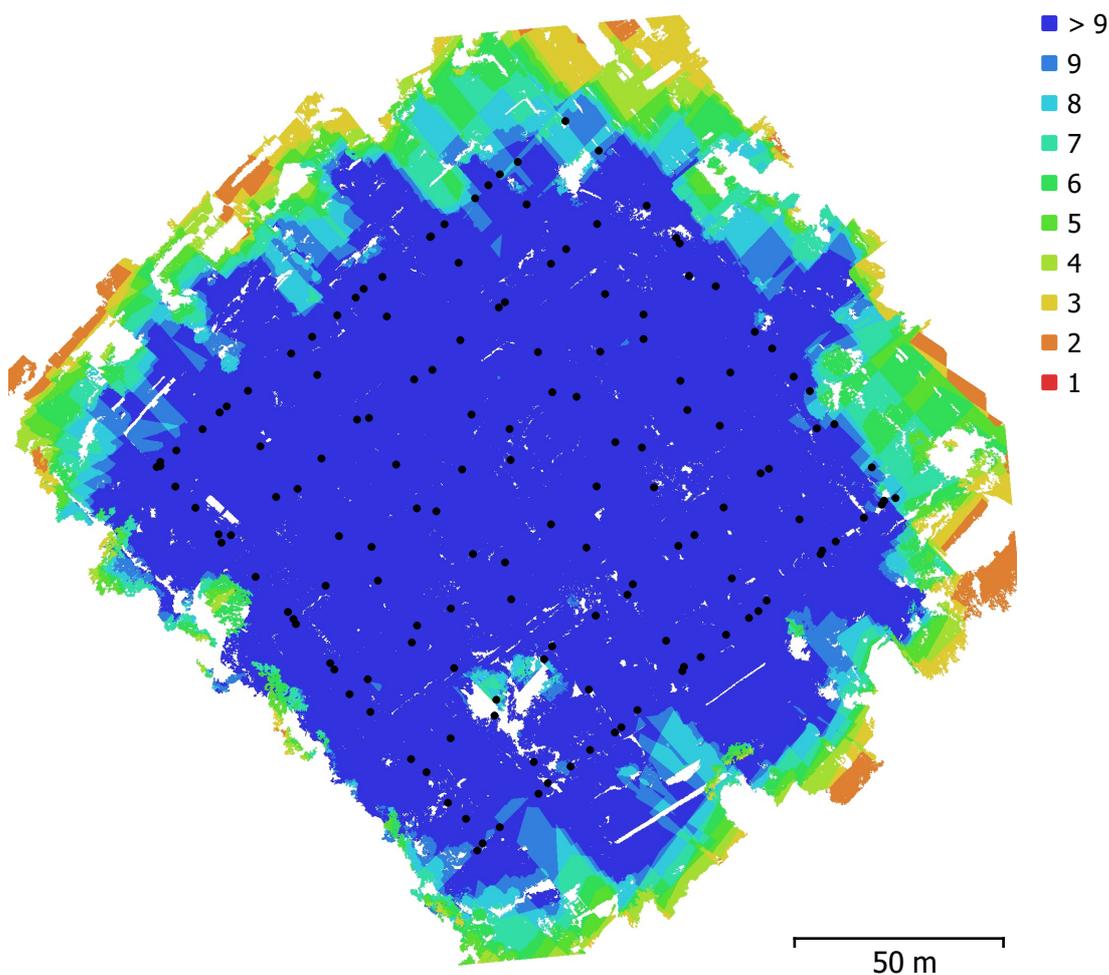


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	158	Camera stations:	149
Flying altitude:	53.8 m	Tie points:	184,439
Ground resolution:	1.24 cm/pix	Projections:	496,854
Coverage area:	0.0318 km ²	Reprojection error:	0.751 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC550 (15mm)	4608 x 3456	15 mm	3.76 x 3.76 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

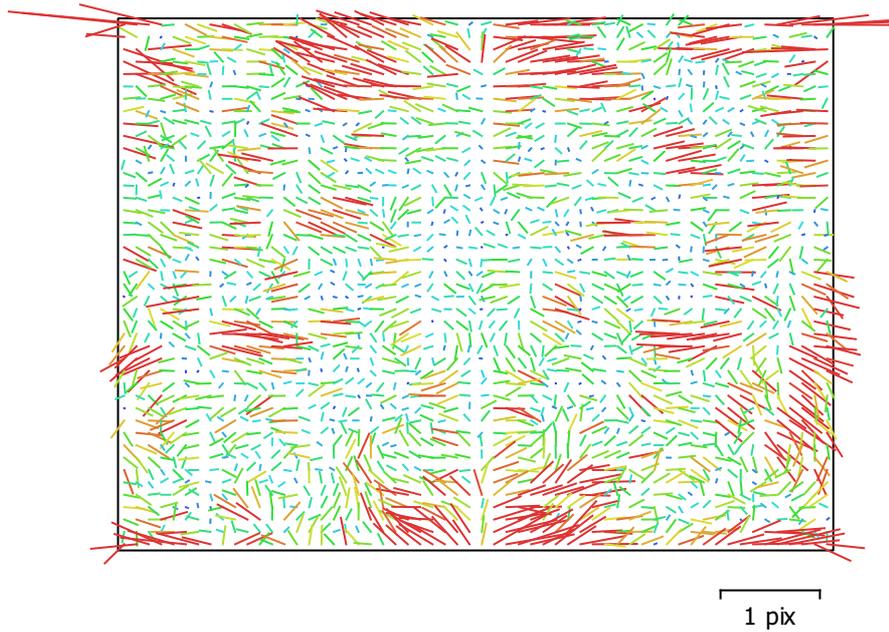


Fig. 2. Image residuals for FC550 (15mm).

FC550 (15mm)

158 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	4608 x 3456	15 mm	3.76 x 3.76 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
P3	-0.406361											
F	4081.18	0.77	1.00	0.29	-0.99	0.90	-0.04	0.10	0.03	-0.03	0.10	-0.29
Cx	55.2391	0.066		1.00	-0.28	0.28	0.54	0.01	0.01	-0.02	0.78	-0.05
Cy	21.6353	0.71			1.00	-0.94	0.04	-0.10	-0.00	0.00	-0.09	0.25
B1	-24.8629	0.13				1.00	0.02	-0.05	0.01	0.01	0.07	0.10
B2	-0.232618	0.017					1.00	-0.08	0.01	0.00	0.09	0.18
K1	0.00516078	9.1e-05						1.00	-0.88	0.82	0.04	-0.41
K2	-0.0139078	0.00039							1.00	-0.98	0.01	0.00
K3	0.0165257	0.00056								1.00	-0.02	0.03
P1	0.00331519	5.5e-06									1.00	-0.09
P2	0.00120807	1.7e-05										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

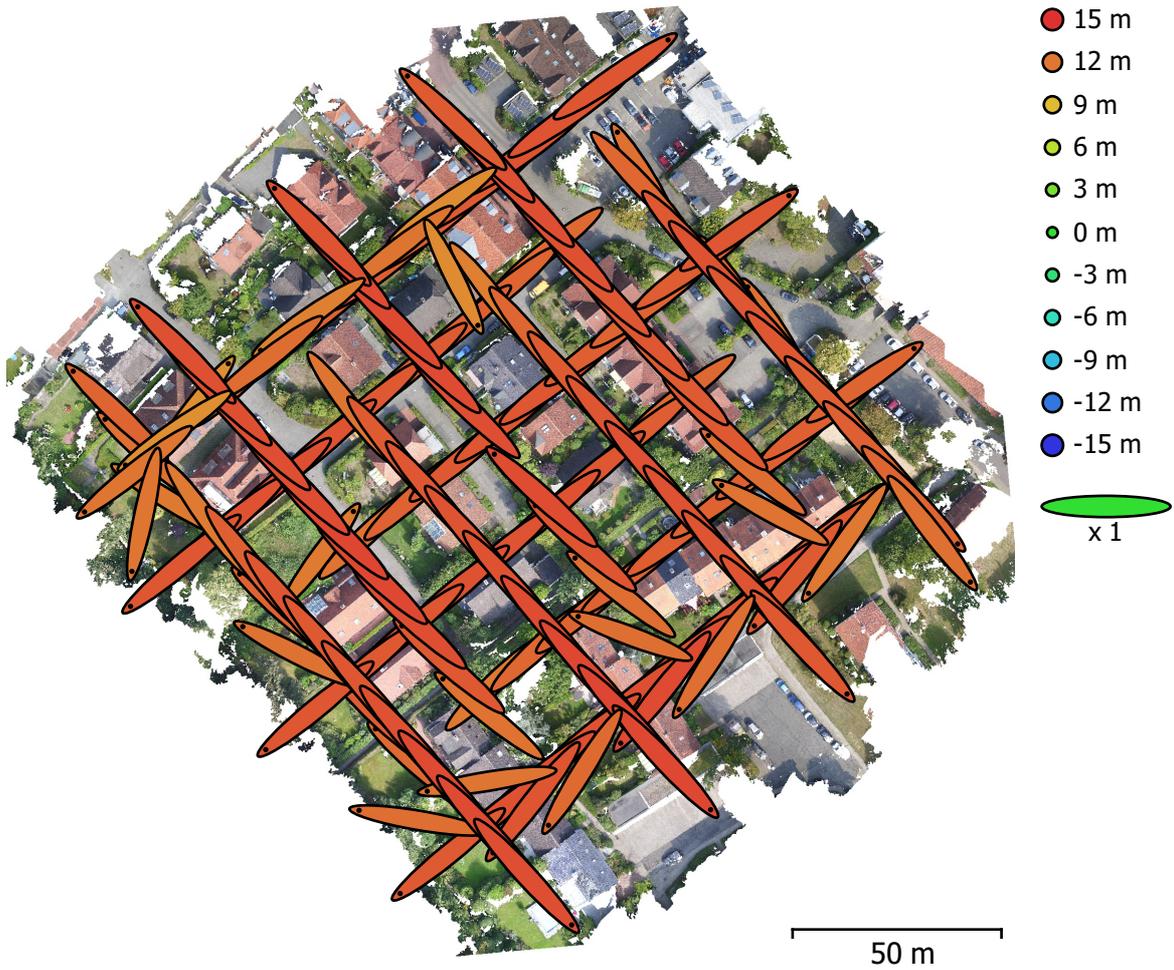


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
21.6647	20.3263	13.1064	29.7072	32.4699

Table 3. Average camera location error.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Camera Orientations

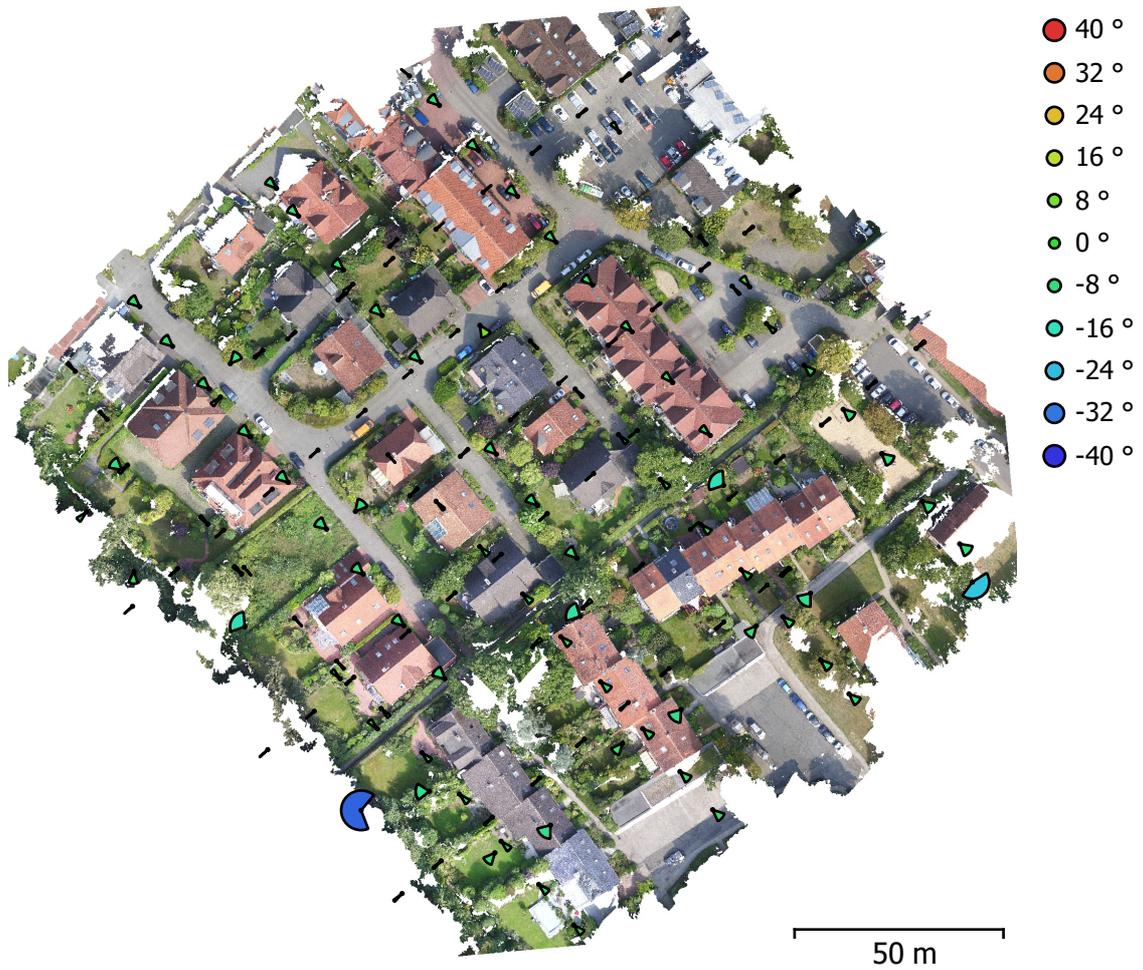


Fig. 4. Camera orientations and error estimates.
Arcs represent yaw error estimates.

Yaw error (°)	Pitch error (°)	Roll error (°)	Total error (°)
6.04945	26.0682	2.31288	26.8607

Table 4. Average camera rotation error.

Ground Control Points



Fig. 5. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
6	1.13994	1.33576	2.88006	1.75606	3.3732

Table 5. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
44	1.23757	1.41793	7.92056	1.88205	8.14109

Table 6. Check points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
00013	-0.481559	1.23849	1.34032	1.88738	0.451 (22)
00034	-0.892986	-2.02719	-4.17438	4.72571	0.445 (20)
00035	-2.05646	-2.044	-2.67622	3.94577	0.405 (16)
00016	-1.03777	-0.41381	1.73905	2.067	0.418 (16)
00030	1.208	-0.233814	-1.13911	1.67675	0.307 (12)
00010	-0.0473469	0.81144	-4.36608	4.4411	0.504 (12)
Total	1.13994	1.33576	2.88006	3.3732	0.429

Table 7. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
00015	-0.604696	-0.410185	0.522091	0.898047	0.379 (15)
00017	-1.25073	0.165128	-1.88335	2.26685	0.451 (18)
99001	0.475083	1.9142	-3.1729	3.73593	0.319 (16)
00024	0.936393	-0.897111	9.04154	9.13406	0.269 (17)
00036	-0.9338	-2.70031	-3.92668	4.85618	0.317 (16)
00020	0.460372	-0.873746	5.67414	5.75944	0.404 (16)
00031	0.183334	-0.790756	-3.91654	3.99977	0.318 (12)
00027	-0.0869375	-2.54516	9.84708	10.1711	0.314 (18)
99000	0.64861	1.21949	-3.91163	4.14834	0.328 (15)
00012	-0.231191	1.41896	2.67584	3.0376	0.305 (14)
00033	0.625227	0.151639	-4.93783	4.97957	0.524 (11)
99002	-1.99809	-0.59758	-8.72508	8.97086	0.441 (17)
00023	0.0376921	-1.39175	8.29574	8.41176	0.294 (11)
00029	0.3784	-0.588296	-5.49422	5.53856	0.456 (10)
00028	2.76287	0.174994	25.1492	25.3011	0.336 (7)
00025	0.278845	0.0900413	9.10731	9.11202	0.410 (13)
00026	0.313195	-0.00557962	11.3019	11.3063	0.266 (10)
00037	-1.78623	-1.53751	-1.81517	2.9748	0.388 (14)
00011	0.905697	1.11476	0.981391	1.73957	0.431 (13)
00014	0.129096	0.580352	-1.54053	1.65128	0.397 (11)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
00022	0.899554	-1.23022	8.26403	8.40338	0.272 (10)
00018	-1.39987	-0.760598	-6.50805	6.70021	0.338 (14)
00019	-2.28327	-1.12616	-11.0549	11.3443	0.398 (20)
99003	-1.68357	-0.464913	-9.27585	9.43886	0.268 (16)
00038	0.337871	-4.40512	-11.878	12.6731	0.281 (8)
00032	0.754432	-0.409465	-3.0382	3.15714	0.378 (12)
00098	1.7326	1.72066	-4.16122	4.82476	0.400 (11)
00099	0.788892	3.44	-4.04627	5.3692	0.504 (14)
00100	0.678083	2.36683	-1.49037	2.878	0.606 (20)
00101	1.81061	1.45427	-1.83078	2.95719	0.601 (16)
00102	0.127742	-0.421534	-4.35288	4.37511	0.574 (16)
00103	1.61134	-0.311794	-3.78815	4.1284	0.343 (16)
00104	-0.0839139	-0.888904	-11.2819	11.3172	0.417 (18)
00105	-1.4838	-0.657775	-11.3535	11.469	0.351 (17)
00106	0.612947	-0.202089	5.62565	5.66255	0.340 (12)
00107	1.06861	-1.17062	4.39463	4.67173	0.536 (11)
00108	1.26075	0.700908	6.97736	7.12491	0.405 (17)
00109	1.08434	-0.692572	7.35297	7.46469	0.257 (19)
00110	1.72286	-0.0904793	-6.48344	6.70906	0.390 (12)
00111	1.72399	0.00513334	-7.27427	7.47578	0.366 (12)
00112	-2.19738	-0.834672	-13.6972	13.8974	0.373 (16)
00113	-2.70033	-1.35921	-11.2513	11.6503	0.605 (12)
00114	0.389017	-2.52993	-5.47955	6.04792	0.436 (13)
00115	0.463227	-0.0324204	-6.49441	6.51099	0.283 (12)
Total	1.23757	1.41793	7.92056	8.14109	0.402

Table 8. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

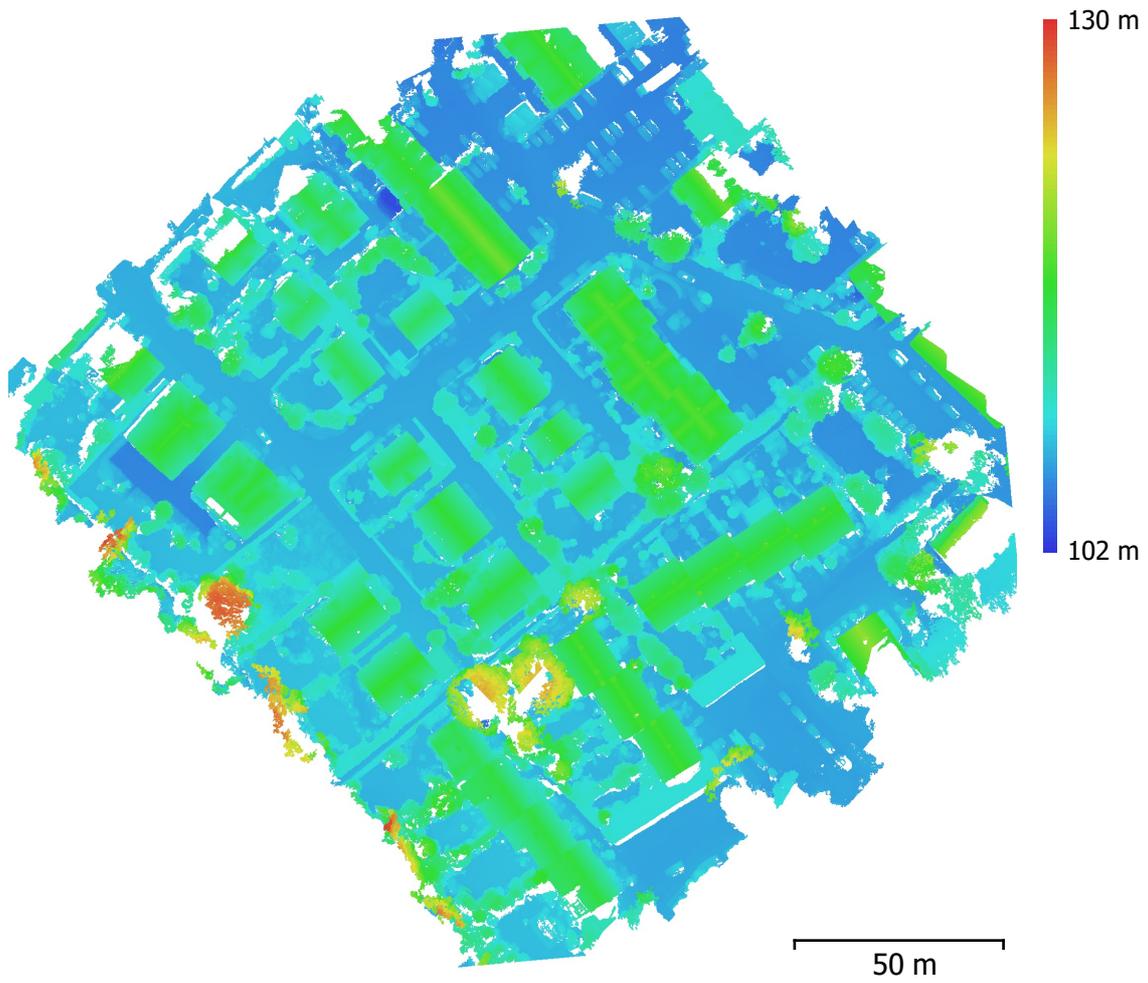


Fig. 6. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown

Point density: unknown

Processing Parameters

General

Cameras	158
Aligned cameras	149
Markers	50
Coordinate system	ETRS89 / UTM zone 32N (EPSG::25832)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	184,439 of 214,590
RMS reprojection error	0.220979 (0.751423 pix)
Max reprojection error	1.23269 (27.3001 pix)
Mean key point size	3.30875 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	2.87915

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	80,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	8 minutes 5 seconds
Alignment time	2 minutes 46 seconds

Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	4 seconds

Dense Point Cloud

Points	81,951,412
Point colors	3 bands, uint8

Reconstruction parameters

Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	45 minutes 22 seconds
Dense cloud generation time	28 minutes 51 seconds

Software

Version	1.4.4 build 6848
Platform	Windows 64