

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER Institut für Photogrammetrie und GeoInformation

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

Vergleich zwischen klassischer topographischer Geländeaufnahme und photogrammetrischer Auswertung von UAS-Aufnahmen

> Erstprüfer: Herr Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke Zweitprüfer: Herr Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

> > Herr Timo Kaminski Matrikelnummer :10006846

> > > 8. November 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Mot	ivatior	1	7				
2	Gru	Grundlagen						
	2.1	Rechtl	liche Grundlagen	8				
		2.1.1	Luftverkehrsgesetz (LuftVG)	8				
		2.1.2	Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO)	8				
	2.2	Techn	ik des unbemannten Luftfahrtsystems	9				
	2.3	Photo	grammetrische Grundlagen	10				
		2.3.1	Bildflugplanung	10				
		2.3.2	Innere Orientierung	12				
		2.3.3	Kamerakalibrierung	14				
		2.3.4	Äußere Orientierung	15				
		2.3.5	Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung	16				
		2.3.6	Allgemeiner räumlicher Vorwärtsschnitt	18				
		2.3.7	DTM und Orthophoto	20				
	2.4 Methoden der Bildverarbeitung							
		2.4.1	Vegetationsindex	21				
		2.4.2	Ellipsenausgleichung	22				
3	Auswertung 23							
	3.1	Vergleich der tachymetrischen Messung mit der photogrammetrischen						
Messung		Messu	ng	23				
		3.1.1	Diskussion der Ergebnisse	31				
	3.2	.2 Beispiele für photogrammetrische Auswertungen aus dem Orthophoto						
		3.2.1	Nutzungsartengrenzen	32				
		3.2.2	Versorgungsinfrastruktur	32				
		3.2.3	Bäume	34				
		3.2.4	Gebäude	36				
		3.2.5	Topographie	37				
		3.2.6	Einfriedungen	38				
	3.3	Erweit	terung des Orthophotos	39				
		3.3.1	Detektion von Vegetation	39				
		3.3.2	Beispiele	41				
4	Fazi	it und	Ausblick	43				

Erklärung der Urheberschaft

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form in keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift

1 Motivation

Für Planungszwecke, aber auch Bereiche wie Landwirtschaft, Archäologie oder Katastrophenschutz, sind aktuelle Informationen über die Geländeoberfläche von Nöten. Dabei haben alle Informationen einen Raumbezug. Um diesen herzustellen, gibt es unterschiedliche Verfahren.

Photogrammetrische Auswertemethoden sind ein fester Bestandteil des Fachbereichs Geodäsie. Die konventionelle Methode ist eine bildbasierte Aufnahme aus bemannten Flugzeugen. Die Kameratechnik sowie das Befliegen mittels eines Flugzeugs ist kostennintensiv. Deshalb eignet sich dieses Verfahren nicht für kleinräumige Gebiete. Eine kostengünstigere Methode bietet, neben der tachymetrischen Aufnahme, eine bildbasierte Befliegung mittels unbemannten Luftfahrtsystemen (UAS, engl. für: *Unmanned Aircraft System*).

In dieser Abschlussarbeit wird die Kombinationslösung von GNSS und tachymetrischen Messungen einer bildbasierten Messung mittels eines unbemannten Luftfahrsystems gegenübergestellt. Dafür wird ein topographischer Lageplan unter der Leitung des Öffentlich bestellten Vermessungsbüros Rohardt Evensen aus Hannover mit GNSS- und tachymetrischer Technik gemessen und visualisiert. Die bildbasierte Messung erfolgt unter der Leitung des Instituts für Photogrammetrie und GeoInformation der Leibniz Universität Hannover.

Um die Messmethoden gegenüber zu stellen, werden Ergebnisse der bildbasierten Befliegung mittels eines unbemannten Luftfahrtsystem anhand von Beispielen für die Erstellung eines topographischen Lageplanes erläutert. Die Genauigkeit der beiden Verfahren wird durch eine Gegenüberstellung ausgewählter Punktkoordinaten verglichen.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Grundlagen näher beschrieben. Der erste Abschnitt beschäftigt sich mit den rechtlichen Grundlagen in der Bundesrepublik Deutschland. Dabei wird sich in dieser Abschlussarbeit auf die gewerbliche und behördliche Nutzung beschränkt. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Technik des unbemannten Luftfahrtsystems beschrieben. Der letzte Abschnitt beschäftigt sich mit den photogrammetrischen und bildverarbeitenden Grundlagen, die in dieser Abschlussarbeit verwendet werden.

2.1 Rechtliche Grundlagen

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den rechtlichen Grundlagen in der Bundesrepublik Deutschland für unbemannte Luftfahrtsysteme. Dabei wird auf das Luftverkehrsgesetz und die Luftverkehrordung eingegangen.

2.1.1 Luftverkehrsgesetz (LuftVG)

Das Luftverkehrsgesetz (LuftVG) ist ein Bundesgesetz im Geltungsbereich der Bundesrepublik Deutschland. Es regelt für Luftfahrzeuge die Benutzung des Luftraumes. Hierbei wird zweckgebunden unterschieden [vgl. Gröhn, 2017]. Bei gewerblicher und behördlicher Nutzung ist es ein unbemanntes Luftfahrtsystem nach §1 Abs.2 Satz 3 LuftVG. Bei sport- und freizeitliche Nutzung greift §1 Abs.2 Satz 1 Nr.9 LuftVG und ist demnach ein Flugmodell.

2.1.2 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO)

Die Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) ist eine Bundesrechtsverordnung im Geltungsbereich der Bundesrepublik Deutschland. Diese Verordnung regelt den Betrieb von jeglichen Luftfahrzeugen. Für unbemannte Luftfahrtsysteme sind §21 a und b LuftVO von besonderer Bedeutung. Den erlaubnisbedürftigen Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen und Flugmodellen regelt dabei §21a. Einer Erlaubnis bedarf es z. B. dann, wenn nach §21 Abs. 1 Nr.3 LuftVO ein Wohngebiet oder ein Flugplatz nach §21 Abs. 1 Nr.4 LuftVO in unter 1,5 km Entfernung existiert. Außerdem ist die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen und Flugmodellen bei Nacht nach §21 Abs. 1 Nr.5 LuftVO untersagt. In §21a LuftVO sind zusätzlich Bestimmungen bzgl. des Startgewichts angegeben und wann eine Erlaubnis erteilt wird.

§21b LuftVO regelt den verbotenen Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen und

Flugmodellen. So ist ein Steuern außerhalb der Sichtweite nach §21 Abs.1 Nr.1 LuftVO nicht gestattet. Der Abstand zu Menschenansammlungen, Unglücksorten, Katastrophengebieten, Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben sowie deren mobilen Einrichtungen und Truppen der Bundeswehr im Rahmen angemeldeter Manöver und Übungen ist nach §21b Abs.1 Nr.2 LuftVO geregelt. Des Weiteren werden Bereiche nach §21b Abs.1 Nr. 3,4,5 LuftVO definiert, die nur mit ausdrücklicher Zustimmung der Betreiber, Eigentümer oder deren zuständigen Stelle zu überfliegen sind.

Für behördliche Aufgaben oder Not- und Unglücksfalle wie Katastrophen gilt §21 a Abs. 1 und 4 LuftVO sowie §21 b Abs. 1 nach §21 a Abs. 2 LuftVO nicht.

Bei jeglicher Aufnahme und Speicherung von personenbezogenen Daten sind allgemeine Persönlichkeitsrechte zu wahren. Dies gilt auch für berufs- und gewerbebezogene Rechte. [vgl. Gröhn, 2017]

2.2 Technik des unbemannten Luftfahrtsystems

Für die photogrammetrischen Aufnahmen wurde das unbemannte Luftfahrtsystem DJI Matrice 100 mit der Kameratechnik DJI Zenmuse X3 verwendet. Das System hat ein Gesamtgewicht von insgesamt 2678 g, wobei das Gimbal mit der Kameratechnik 247 g wiegt. Das maximale Startgewicht liegt bei 3400 g. Die Schwebezeit liegt bei diesem Startgewicht laut Herstellerangaben bei 23 Minuten. Windböen, die 10 $\frac{m}{s}$ nicht übersteigen, beeinflussen dabei zusätzlich die Schwebezeit. Die maximale Fluggeschwindigkeit liegt bei 22 $\frac{m}{s}$. [vgl. DJI, 2019] In der Tabelle 1 sind die technischen Daten der Kameratechnik DJI Zenmuse X3 dargestellt.

Kammerkonstante c	Sensor	Auflösung	Umgebungstemp.	Belichtungszeit
3.61mm	CMOS 1/2.33"	4000 x 3000 pixel	-10° bis 40°C	$1/100 \mathrm{~s}$

Tabelle 1: Kameratechnik DJI Zenmuse X3 [DJI, 2019]

2.3 Photogrammetrische Grundlagen

Dieser Abschnitt geht auf die photogrammetrischen Grundlagen dieser Abschlussarbeit ein.

2.3.1 Bildflugplanung

Um Genauigkeitsanforderungen und rechtlichen Gegebenheiten gerecht zu werden, bedarf es einer Bildflugplanung. Die zu befliegende Trajektorie wird im Vorfeld abgeschätzt. Überlappungbereiche sind notwendig, um eine stereoskopische Auswertung durchzuführen. Die Querüberdeckung q wird auf 60% festgelegt, die Längsüberdeckung p auf 80%. Der Streifenabstand a ist der seitliche Abstand zwischen den Aufnahmen. Die Basis b definiert den Abstand der Aufnahmen in Längsrichtung. In der Abb. 1 ist dies angedeutet.



Abbildung 1: Bildflugplanung

Die Pixelgröße am Boden oder auch Ground Sampling Distance (GSD) wird gemäß den Anforderungen des Auftraggebers auf 0.01 $\frac{m}{pixel}$ gesetzt. Die Kammerkonstante c ist bekannt und beträgt laut Herstellerangabe ca. 3.61 mm. Jedes Pixel im Sensor hat die Ausdehnung δ von $1.55 \cdot 10^{-6} \frac{m}{pixel}$. Damit lässt sich über die folgende Beziehung die erforderliche Flughöhe ableiten.

$$h = GSD \cdot \frac{c}{\delta}$$

= $0.01 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{pixel}} \cdot \frac{3.61 \mathrm{mm}}{1.55 \cdot 10^{-6} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{pixel}}}$ (1)
= 23.3 m

Ist die Flughöhe bestimmt, wird der Streifenabstand a sowie die Basis b bestimmt. Der Streifenabstand a lässt sich durch die Flughöhe, die Breite des Sensors von 4000 pixel und die Kammerkonstante c bestimmen, die Basis b durch die Höhe des Sensors von 3000 pixel, die Flughöhe h und die Kammerkonstante c.

Für den Streifenabstand gilt:

$$a = 4000 \cdot 1.55 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{h}{c \cdot (1-q)}$$

$$= 16.0 \text{ m}$$
(2)

Für die Basis b gilt:

$$b = 3000 \cdot 1.55 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{h}{c \cdot (1-p)}$$

= 6.0 m (3)

Nach der Berechnung der Flughöhe wird die Standardabweichung der Objektpunkte berechnet. Die Einflussfaktoren für die Standardabweichung der Lage $S_{x,y}$ sind die GSD sowie die Messgenauigkeit der Objektpunkte im Bild σ . Die Messgenauigkeit σ liegt ungefähr bei ~0.3 pixel [vgl. Heipke, 2018a, S.2]. Die folgende Beziehung beschreibt den Zusammenhang zwischen der Standardabweichung der Lage $S_{x,y}$ und der GSD mit der Messgenauigkeit der Objektpunkte σ .

$$S_{x,y} = GSD \cdot \sigma_{\text{Messgenauigkeit}} \tag{4}$$

Die Standardabweichung der Höhe ist abhängig von der Standardabweichung der Lage und dem Höhenbasisverhältnis $\frac{h}{b}$.

$$S_z = \frac{h}{b} \cdot S_{x,y} \tag{5}$$

[Luhmann, 2010b, S.170]

Da die Flughöhe sowie die Längs- und Querüberdeckung p und q festgesetzt ist, hängt die Basis b vom Öffnungswinkel der Kamera ab. In der Abb. 2 ist für ein Höhenbasisverhältnis $\frac{h}{b}$ von 1, bei einer Querüberdeckung q von 60%, benötigte Öffnungswinkel von 102.68° dargestellt. Die verwendete Kamera hat einen Öffnungswinkel von 94°. Damit verkürzt sich die Basis b und das Höhenbasisverhältnis $\frac{h}{b}$ ist größer als 1. Daraus folgt, dass die Standardabweichung S_z der Höhe größer ist als die der Lage.



Abbildung 2: Visualisierung des Höhenbasisverhältnisses

2.3.2 Innere Orientierung

Die innere Orientierung setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Der Lage des Projektionzentrums PZ innerhalb des Bildkoordinatensystems sowie den Verzeichnungsfehlern der Kamera. Das Bildkoordinatensystem ist ein kartesisches Rechtssystem. Der Koordinatenursprung M wird als Bildmitte bezeichnet.

Das Projektionszentrum PZ wird durch die Kammerkonstante c sowie den Bildhauptpunkt H(x', y') beschrieben. Bei einer zentralperspektivischen Abbildung ist dies der Punkt durch den alle Bildstrahlen geradlinig verlaufen. [vgl. Luhmann, 2010b, S.172] Die Kammerkonstate c ist der lotrechte Abstand des Projektionszentrums PZ zu dem Bildkoordinatensystem. Der Bildhauptpunkt H ist der Lotfußpunkt des Projektionszentrums auf das Bildkoordinatensystem. In der Abb. 3 ist dies angedeutet.



Abbildung 3: Bildkoordinatensystem

Abweichungen vom Model der Zentralperspektive sind mit Verzeichnungsparametern zu beschreiben. Dabei wird zwischen radial-symmetrischen sowie radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnungen unterschieden. Der radial-symmetrische Einfluss ist der größte Einfluss [vgl. Luhmann, 2010b, S.180].

Radial-symmetrische Verzeichnung

Die radial-symmetrische Verzeichnung wird durch ein Verzeichnungspolynom beschrieben. Dies lässt sich als Reihe entwickeln.

$$\Delta x'_{\rm rad} = x' \cdot \left(\sum_{i=1}^{\infty} k_i \cdot r'^{2 \cdot i}\right) \qquad \text{mit} \qquad r' = \sqrt{x'^2 + y'^2} \\ = x' \cdot (k_1 \cdot r'^2 + k_2 \cdot r'^4 + k_3 \cdot r'^6 \cdots) \\ \Delta y'_{\rm rad} = y' \cdot \left(\sum_{i=1}^{\infty} k_i \cdot r'^{2 \cdot i}\right) \\ = y' \cdot (k_1 \cdot r'^2 + k_2 \cdot r'^4 + k_3 \cdot r'^6 \cdots)$$
(6)

[vgl. Rottensteiner, 2018, S.28]

Dabei sind x' und y' hauptpunktbezogene Bildkoordinaten. In der Regel wird das Verzeichnungspolynom nach dem dritten Parameter k_3 abgebrochen, da der Genauigkeitsgewinn darüber hinaus vernachlässigbar klein wird. [vgl. Luhmann, 2010b, S.180].

Tangentiale und asymmetrische Verzeichnungen

Ein häufig verwendetes Modell für die tangentiale und asymmetrischen Verzeichnungen ist das Brown–Conrady-Modell [vgl. Brown, 1966]. Dabei sind x', y', r' wie bei der radial-symmetrischen Verzeichnung definiert.

$$\Delta x'_{\text{tan}} = \left(p_1 \cdot (r'^2 + 2x'^2) + 2p_2 \cdot x'y' \right) \cdot \left(1 + p_3 \cdot r'^2 + p_4 \cdot r'^4 + \cdots \right)$$

$$\Delta y'_{\text{tan}} = \left(p_2 \cdot (r'^2 + 2x'^2) + 2p_1 \cdot x'y' \right) \cdot \left(1 + p_3 \cdot r'^2 + p_4 \cdot r'^4 + \cdots \right)$$
[Brown, 1966, S.454] (7)

Die Parameter p_1 und p_2 beschreiben die radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnungen. Die Parameter p_3 und p_4 beschreiben die radial-symmetrischen Komponenten der tangentialen Verzeichnung. [vgl. Luhmann, 2010b, S.186]

Weitere Koeffizienten können zum Beispiel Achsenskalierungen berücksichtigen. Die aufgeführten Parameter sind die relevanten Parameter.

2.3.3 Kamerakalibrierung

Mit einer Kamerakalibierung werden die Parameter der inneren Orientierung geschätzt. Die Kamerakalibrierung teilt sich in drei große Bereiche: In die Laborkalibrierung, Testfeldkalibrierung und die Simultankalibrierung. Bei zeitlich stabiler innerer Orientierung ist eine Laborkalibrierung (meist werksseitig [vgl. Luhmann, 2010a, S.20]) oder eine Testfeldkalibrierung durchzuführen, bei zeitlich variabler innerer Orientierung eine Simultankalibrierung. [vgl. Heipke, 2018b, S.12]

Testfeldkalibrierung

Ein Testfeld ist ein geeignetes signalisiertes Objektpunktfeld mit bekannten Koordinaten oder Strecken. [vgl. Luhmann, 2010a, S.20] Sind auch 3D-Objektpunkte auf dem Testfeld, können Kammerkonstante und Projektionszentrum dekorreliert werden. Bei zueinander verdrehten und aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommenen Kameraufnahmen lassen sich die Lage des Bildhauptpunktes und das Projektionszentrum dekorrelieren. [vgl. Heipke, 2018b, S.16] Eine mögliche Aufnahmekonfiguration ist in der Abb. 4 dargestellt. Dabei werden vier Aufnahmen frontal um jeweils 90° gedreht und vier Aufnahmen schräg um jeweils 90° gedreht erstellt.



Abbildung 4: Testfeldkalibrierung [Luhmann, 2010b, S.649]

Die Parameter der inneren Orientierung lassen sich dann in einer Bündelausgleichung als Unbekannte schätzen, wobei die Objektpunkte im Voraus bekannt sind. [vgl. Heipke, 2018b, S.15]

Simultankalibrierung

Die Simultankalibrierung erfolgt am eigentlichen Messobjekt. Um eine Simultankalibrierung durchzuführen, muss die Aufnahmekonfiguration der Testfeldkalibrierung ähneln. [vgl. Luhmann, 2010a, S.21] Die Parameter der inneren Orientierung werden gleichzeitig mit den Koordinaten der Objektpunkte in der Bündelausgleichung bestimmt.

2.3.4 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung beschreibt die Lage des Projektionszentrums sowie die Orientierung des Bildkoordinatensystems im Objektkoordinatensystem. [vgl. Finsterwalder & Hofmann, 1968, S.24] Die Parameter der äußeren Orientierung sind die Rotationswinkel ω, κ, φ sowie die Koordinaten X, Y und Z im übergeordneten Objektkoordinatensystem [vgl. Luhmann, 2010b, S.273].



Abbildung 5: Äußere Orientierung [Luhmann, 2010b, S.272]

In der Abb. 5 sind die Rotationswinkel ω, κ, φ sowie die Koordinaten im Objektkoordinatensystem dargestellt.

2.3.5 Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung

Um die innere und äußere Orientierung gleichzeitig von mehreren Projektionen zu bestimmen, bedarf es einer Bündelausgleichung. Dies ist das Standardverfahren zur Kalibrierung und Orientierung des Aufnahmesystems [vgl. Luhmann, 2010a, S.62]. Dabei werden die Kollinearitätsgleichungen (9), die die Einträge der Rotationsmatrix (8) enthalten, um alle gesuchten Parameter erweitert. Die Kollinearitätsgleichungen beschreiben dabei den Zusammenhang zwischen Objekt- und Bildkoordinaten. Der Zusammenhang ist nicht linear. Deshalb werden im Vorfeld Näherungswerte bestimmt. Für die äußere Orientierung kann dies zum Beispiel eine GNSS-Lösung mit einem inertiales Navigationssystem sein. Für die innere Orientierung kann angenommen werden, dass der Bildhauptpunkt H im Bildkoordinatenzentrum liegt. Für die Kammerkonstante c wird in erster Näherung die Brennweite angenommen.

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(8)

[Luhmann, 2010b, S.272]

$$\begin{aligned} x'_{P} &= x'_{0} - c' \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_{0}) + r_{21} \cdot (Y - Y_{0}) + r_{31} \cdot (Z - Z_{0})}{r_{13} \cdot (X - X_{0}) + r_{23} \cdot (Y - Y_{0}) + r_{33} \cdot (Z - Z_{0})} \cdot \Delta x' \\ y'_{P} &= y'_{0} - c' \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_{0}) + r_{22} \cdot (Y - Y_{0}) + r_{32} \cdot (Z - Z_{0})}{r_{13} \cdot (X - X_{0}) + r_{23} \cdot (Y - Y_{0}) + r_{33} \cdot (Z - Z_{0})} \cdot \Delta y' \end{aligned}$$
(9)

[Luhmann, 2010b, S.274]

Gemessen werden die Bildkoordinaten der Passpunkte, Verknüpfungspunkte und Kontrollpunkte. Passpunkte und Kontrollpunkte sind signalisierte Punkte. Wie die Bildkoordinaten dazu bestimmt werden, ist in dem Abschnitt 2.4.2 beschrieben. Verknüpfungspunkte werden heutzutage nicht mehr manuell bestimmt. Ein oft verwendeter Algorithmus dazu ist der SIFT-Algorithmus [vgl. Lowe, 1999]. Die Grundidee des Algorithmus ist, dass sich jeder Punkt durch Merkmale beschreiben lässt. Merkmale in der Bildverarbeitung sind Gradienten der Grauwerte. Verglichen werden nun die Merkmale zweier Punkte in zwei Bildern. Sind diese Merkmale ähnlich, ist dies eventuell ein möglicher Verknüpfungspunkt. Die Fundamentalmatrix **F** beschreibt den Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten x'und y'. Es gilt:

$$\mathbf{0} = \begin{pmatrix} x_{1}^{'} & y_{1}^{'} & 1 \end{pmatrix} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix}}_{\mathbf{F}} \cdot \begin{pmatrix} x_{2}^{'} \\ y_{2}^{'} \\ 1 \end{pmatrix}$$
(10)

Die Fundamentalmatrix \mathbf{F} wird entweder mit bekannter innerer und äußerer Orientierung bestimmt (Näherungswerte) oder über mindestens sieben korrespondierende Punkte. Mit dem RANSAC-Algorithmus können so Ausreißer von Verknüpfungspunktpaaren gefunden werden.

2.3.6 Allgemeiner räumlicher Vorwärtsschnitt

Beim allgemeinen räumlichen Vorwärtsschnitt werden die Objektkoordinaten X,Y,Zeines Punktes P bestimmt. Dafür muss der Punkt P in mindestens zwei Bildern sichtbar sein. Die innere und äußere Orientierung ist durch die Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung bekannt. Für jeden zu bestimmenden Objektpunkt P werden in zwei Bildern die x'- und y'- Komponenten gemessen. Im Modell schneiden sich die Geraden in einem Punkt. Die Abb. 6 verdeutlicht das Modell des räumlichen Vorwärtsschnitts.



Abbildung 6: Räumlicher Vorwärtsschnitt

In realen Messanwendungen sind die Geraden windschief. Eine Ausgleichung ist notwendig. Bei drei zu schätzenden Parametern (X-, Y- und Z- Komponente des Punktes P) ist das System überbestimmt. Es gilt: f = 4 - 3 = 1. [vgl. Heipke, 2017, S.13] Die Lösung der Parameter ist optimal, wenn der Abstand der Geraden zueinander minimal ist.

Um die Punktdichte zu erhöhen ist eine Methode das Matching über Merkmale und in Abschnitt 2.3.5 erwähnt. Diese ist allerdings sehr rechenintensiv.

Eine andere Methode ist, durch die Fundamentalmatrix \mathbf{F} den Suchraum auf Epipolarlinien zu reduzieren. Im Anschluss gibt es viele Algorithmen, die die Punktdichte erhöhen (Kreuzkorrelation mit Bildausschnitten, Semi-Global-Matching [vgl. Hirschmüller, 2008]).

2.3.7 DTM und Orthophoto

Das Digitale Geländemodell (DTM, engl. für: *Digital Terrain Model*) ist ein Modell, das die Topographie abbildet. Das Digitale Geländemodell wird aus der 3D-Punktwolke, die durch die Vorwärtsschnitte (Abschnitt 2.3.6) vieler korrespondierenden Punktpaare entsteht, abgeleitet. Jeder Koordinate in der Ebene (X,Y) wird ein Höhenwert zugeordnet. Diese Abbildung ist eine 2,5D Abbildung. Um die Höheninformation der Punktwolke in ein DTM zu überführen, muss die Höhe an jedem Rasterpunkt aus den nächstgelegenden Punkten der Punktwolke interpoliert werden. Im Vergleich zu einem Digitalen Oberflächenmodell sind hierbei künstliche Objekte nicht gefiltert.

Bei einem Orthophoto wird eine Grundfläche definiert. Das Orthophoto ist dann eine paralle Projektion der Oberfläche auf die Grundfläche. Die Projektion auf ein Oberflächemodell wird "True Orthophoto" genannt. Im Anschluss wird für jeden Punkt P(X, Y, Z) der jeweilige Intensitätswert durch Interpolation im auf das DTM projizierten Bild bestimmt. [vgl. Heipke, 2018c, S.7]

In der Abb. 7 ist die Entstehung eines Orthophotos visualisiert.



Abbildung 7: Entstehung eines Orthophoto [Heipke, 2018c, S.6]

2.4 Methoden der Bildverarbeitung

In diesem Abschnitt wird eine Methode zur Detektion von Vegetation beschrieben. Dies dient im weiteren Verlauf der Maskierung von Bildern, um Verdeckung durch Vegetation im Orthophoto zu reduzieren.

2.4.1 Vegetationsindex

Chlorophyll b kommt in allen Landpflanzen vor. Der RGB-Vegetationsindex beruht auf der Tatsache, dass Chlorophyll b im roten und blauen Spektralbereich mehr absorbiert wird als im grünen. [vgl. Spektrum, 2001] Der Index lässt sich wie in Gleichung (11) beschreiben und ist auf ein Intervall von [-1, 1] normiert. In der Abb. 8 ist ein Bild in RGB-Farbdarstellung zu sehen. In der Abb. 9 die Berechnung des RGB-Vegetationsindex, wobei helle Bereiche Vegetation darstellen.

- B blauer Spektralbereich
- G grüner Spektralbereich $\frac{G^2 (R \cdot B)}{G^2 + (R \cdot B)}$ (11)
- R roter Spektralbereich

[Bendig u. a., 2015, S.79–87]



Abbildung 8: Beispielbild

Abbildung 9: RGBVI Beispielbild

2.4.2 Ellipsenausgleichung

Bei der tachymetrischen Messung werden Punkte mit Vermarkungsbolzen eingemessen. Um einen Vergleich anzustellen, wird bei der UAS-Befliegung jeder dieser Punkte mit kreisförmigen Zielmarken ausgelegt. Die kreisförmigen Ziele sind bei einer schrägen 2D-Abbildung im Bild Ellipsen. Für eine automatische Erkennung dieser Punkte benötigt man einen Sternoperator. Eine mögliche Umsetzung mit dem Sternoperator wird im Folgenden erläutert.



Abbildung 10: Ellipsenfinder mit dem Sternoperator

Zuerst werden Näherungswerte für das Ellipsenzentrum benötigt. Möglich wäre eine manuelle Festlegung oder eine Suchmaske. Ist der Näherungswert bestimmt, werden Suchstrahlen in alle Richtungen gelegt. Die Schnittpunkte der Geraden mit dem Grauwertübergang von schwarz auf weiß werden gespeichert. Aus allen Schnittpunkten wird der Mittelpunkt x, y die große und kleine Halbachse a und b sowie der Richtungswinkel α geschätzt. [vgl. Luhmann, 2010b, S.475] In der Abb. 10 ist dies angedeutet.

3 Auswertung

Eine Art der Darstellung einer Geländeaufnahme ist der topographische Lageplan. Dieser wird den Ergebnissen der photogrammetrischen Auswertung gegenübergestellt. Dazu wird das Gebiet mit dem unbemannten Luftfahrtsystem DJI Matrice 100 sowie mit der Kameratechnik DJI Zenmuse X3 in einer Höhe von 25m in West-Ost-Richtung beflogen. Für die Bildflugplanung wird die Softwarelösung von DJI verwendet. Die photogrammetrische Auswertung wird mit der Softwarelösung Metashape realisiert. Dabei werden zuerst die innere und äußere Orientierung durch eine Bündelausgleichung geschätzt. Im Anschluss wird die Punktdichte erhöht (siehe Abschnitt 2.3.5). Aus dieser dichten Punktwolke wird das digitale Oberflächenmodell sowie das Orthophoto abgeleitet. Bei einer weiteren Untersuchung wird die innere Orientierung durch eine Testfeldkalibrierung vorgegeben. Die Ergebnisse sind im weiteren Verlauf der Abschlussarbeit dargestellt.

Für einen Vergleich dieser Methoden werden Vorteile, Unterschiede und Herausforderungen an Beispielen erläutert. Eine Genauigkeitseinschätzung erfolgt mittels eines direkten Vergleichs zwischen den beiden Methoden.

3.1 Vergleich der tachymetrischen Messung mit der photogrammetrischen Messung

Um die tachymetrische Messung mit der photogrammetrischen Messung zu verknüpfen, werden elf Punkte in der Örtlichkeit vermarkt und eingemessen. Für die photogrammetrische Messung wurden bei der Befliegung Tafeln als Punktziele ausgelegt. Dafür werden im Vorfeld Kreise aus schwarzer Kartonage ausgeschnitten und zentrisch auf die Tafeln geklebt. In der Mitte dieser Tafeln ist ein Loch. In der Örtlichkeit wird dieses Loch dazu verwendet, die Tafeln zentrisch über den eingemessenen Punkt zu positionieren.

Die Auswertung der tachymetrischen Messung erfolgt mit der Netzausgleichungssoftware JAG3D [Lösler, 2019]. Die GPS-Beobachtungen werden dabei als Näherungswerte für die Datumsgebung eingeführt. Das Netz wird im Anschluss mit weicher Lagerung ausgeglichen.

Die photogrammetrische Auswertung erfolgt mit dem Programm Metashape. Dabei wird für die Bestimmung der Punktziele das Tool für "Marker Detection" verwendet. Dieses sucht in den Bildern Ellipsen und bestimmt dabei das Zentrum der Punktziele (siehe Abschnitt 2.4.2). Für die Steuerung des unbemannten Luftfahrtsystems ist ein GPS-Sensor mit Codebeobachtung verbaut. Diese Sensordaten können ausgelesen werden. Dieser Sensor ist allerdings nicht hinreichend genau, um die Ergebnisse direkt zu vergleichen. Deshalb werden die elf Punkte durch eine 2D-Lagetransformation in das tachymetrische Netz überführt. Es wird ein Rotationswinkel α sowie eine Translation in X- und Y-Richtung nach [Kahmen, 2006, S.229] bestimmt.

$$X_{tachy} = X_{photo} + \xi \cdot \cos(\alpha) + \eta \cdot \sin(\alpha)$$

$$Y_{tachy} = Y_{photo} + \xi \cdot \sin(\alpha) + \eta \cdot \cos(\alpha)$$
(12)

Für die Höhenauswertung wird ein Parameter bestimmt, der den Höhenversatz repräsentiert. Die Ergebnisse der tachymetrischen Ausgleichung sowie die Verbesserung der Transformationen sind in der Tabelle 2 dargestellt. Die Parameter a (große Halbachse) und b (kleine Halbachse) beschreiben dabei die 1σ -Konfidenzellipsen der jeweiligen Punkte.

Pkt.	Y [m]	X [m]	Z [m]	$a \; [mm]$	$b \; [mm]$
1	32555628.127	5794922.084	62.949	5.7	5.1
2	32555560.056	5794918.016	63.174	6.4	5.0
3	32555667.293	5794896.367	65.289	4.5	4.3
4	32555666.799	5794893.632	65.336	4.5	4.3
5	32555598.132	5794851.490	63.746	4.2	4.0
6	32555559.890	5794918.921	63.182	6.6	5.0
7	32555576.840	5794889.879	63.419	5.8	5.1
8	32555556.822	5794895.660	63.266	7.4	5.5
9	32555628.543	5794921.207	62.927	5.7	5.2
10	32555596.894	5794851.199	63.731	4.2	4.0
11	32555576.328	5794890.942	63.413	5.9	5.1
	Mi	5.5	4.8		

Tabelle 2: Tachymetrische Netzausgleichung

In der Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Punktzieldetektion nach einer Simutankalibrierung dargestellt. Die Einträge der Spalten Δx , Δy repräsentieren die Verbesserungen nach der Lageausgleichung und die Spalte Δz die Verbesserungen nach der Schätzung des Höhenversatzes.

Pkt.	<i>Y</i> [m]	X [m]	Z [m]	$\Delta x \ [cm]$	Δy [cm]	$\Delta z [\mathrm{cm}]$
1	32555628.100	5794922.110	62.924	0.1	-2.1	-1.4
2	32555560.017	5794918.006	63.151	1.4	0.2	-1.2
3	32555667.303	5794896.365	65.317	-3.0	1.5	3.7
4	32555666.807	5794893.635	65.346	-2.9	0.9	2.0
5	32555598.126	5794851.474	63.747	-0.6	1.5	1.1
6	32555559.851	5794918.918	63.159	1.4	-0.6	-1.2
7	32555576.805	5794889.879	63.397	1.5	-0.5	-1.1
8	32555556.798	5794895.652	63.241	0.3	-0.1	-1.5
9	32555628.514	5794921.225	62.904	0.4	-1.3	-1.3
10	32555596.887	5794851.183	63.742	-0.5	1.5	2.0
11	32555576.288	5794890.946	63.392	2.0	-1.0	-1.0

Tabelle 3: Punktzieldetektion mit Simultankalibrierung

In der Abb. 11 ist die Lage der Punktziele nach der tachymetrischen Ausgleichung dargestellt. Der Maßstab beträgt dabei 1:1000. Die 1 σ -Konfidenzellipse aus der Tabelle 2 und die Verbesserung aus der Tabelle 3 (blauer Vektor) sind im Maßstab 1:1 dargestellt.



Abbildung 11: Punktverbesserung Lage Simultankalibrierung

In der Abb. 12 ist die Lage der Punktziele nach der tachymetrischen Ausgleichung dargestellt. Der Maßstab beträgt dabei 1:1000. Die Verbesserung nach der Schätzung des Höhenversatzes sind bei positivem Vorzeichen nördlich abgetragen, bei negativem Vorzeichen südlich. Der Maßstab beträgt dabei 1:1.



Abbildung 12: Punktabweichung Höhe Simultankalibrierung

In der Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Punktzieldetektion nach einer Testfeldkalibrierung dargestellt. Die Einträge der Spalten Δx , Δy repräsentieren die Verbesserungen nach der Lageausgleichung und die Spalte Δz die Verbesserungen nach der Schätzung des Höhenversatzes.

Pkt.	<i>Y</i> [m]	X [m]	Z [m]	$\Delta x \ [cm]$	Δy [cm]	$\Delta z [\mathrm{cm}]$
1	32555628.143	5794922.121	63.117	-3.7	-3.7	4.8
2	32555560.005	5794918.019	63.370	3.1	-1.8	7.6
3	32555667.303	5794896.365	65.317	-2.5	1.2	-9.2
4	32555666.807	5794893.635	65.346	-2.3	0.6	-10.9
5	32555598.126	5794851.474	63.747	0.1	0.9	-11.8
6	32555559.839	5794918.932	63.378	3.1	-2.6	7.6
7	32555576.809	5794889.834	63.589	1.8	3.3	4.9
8	32555556.795	5794895.631	63.466	1.2	1.3	7.9
9	32555628.557	5794921.235	63.096	-3.5	-2.7	4.8
10	32555596.887	5794851.183	63.742	0.2	0.9	-10.9
11	32555576.290	5794890.904	63.584	2.4	2.6	5.1

Tabelle 4: Punktzieldetektion mit Testfeldkalibrierung

In der Abb. 13 ist die Lage der Punktziele nach der tachymetrischen Ausgleichung dargestellt. Der Maßstab beträgt dabei 1:1000. Die 1 σ -Konfidenzellipse aus der Tabelle 2 und die Verbesserung aus der Tabelle 3 (blauer Vektor) sind im Maßstab 1:1 dargestellt.



Abbildung 13: Punktverbesserung Lage Testfeldkalibrierung



Abbildung 14: Punktabweichung Höhe Testfeld

In der Abb. 14 ist die Lage der Punktziele nach der tachymetrischen Ausgleichung dargestellt. Der Maßstab beträgt dabei 1:1000. Die Verbesserungen nach der Schätzung des Höhenversatzes sind bei positivem Vorzeichen nördlich abgetragen, bei negativem Vorzeichen südlich. Der Maßstab beträgt dabei 1:2.

3.1.1 Diskussion der Ergebnisse

Die Verbesserungen bei der Simultankalibrierung sind kleiner als bei der Testfeldkalibrierung. Bei der Testfeldkalibrierung sind die Abweichungen der Höhe größer als die der Lage (siehe Tabelle 4). Dies bestätigt den Abschnitt 2.3.1 Bildflugplanung. Bei der Simultankalibrierung sind keine Unterschiede zwischen der Lage- und Höhenverbesserung auffällig. Dies lässt vermuten, dass die Kammerkonstante c bei der Simultankalibrierung besser bestimmt worden ist bzw. sich die Kammerkonstante c seit der Testfeldkalibrierung (2017) verändert hat.

Die Verbesserungen der Lage sowie der Höhe haben kleinräumig die selbe Richtung. Daraus lässt sich ableiten, dass bei kleinräumige Gebieten höhere Genauigkeiten zu erwarten sind.

3.2 Beispiele für photogrammetrische Auswertungen aus dem Orthophoto

Welche Objekte in einem topographischen Lageplan einzumessen sind, entscheidet der Auftraggeber. Im folgenden Abschnitt sind für übliche Objekte Beispiele angegeben.

3.2.1 Nutzungsartengrenzen

Grenzen von Nutzungsarten oder Infrastruktureinrichtungen sind im Orthophoto klar erkennbar. Auch komplexere Strukturen, die bei einer tachymetrischen Aufnahme zeitintensiv aufzumessen sind, lassen sich schnell digitalisieren. In der Abb. 15 begrenzt das Pflaster eine Fläche bogenförmig. Die Struktur ist im Orthophoto klar sichtbar und kann digitalisiert werden.



Abbildung 15: Nutzungsartengrenze im Lageplan (links) und Orthophoto (rechts)

3.2.2 Versorgungsinfrastruktur

Versorgungsinfrastruktureinrichtungen sind bauliche Anlagen mit klar trennbaren Strukturen. Kanalisationstechnik als Versorgungsinfrastruktur zeichnet sich oberirdisch zum Großteil durch Schachtdeckel aus. Diese sind zumeist rechteckig oder kreisförmig. Bei Schachtdeckeln oder Ähnlichem ist der Mittelpunkt aufzunehmen. Der Mittelpunkt dieser kann z. B. durch eine Ellipsenausgleichung in den Ursprungsbildern oder direkt im Orthophoto (Abschnitt 2.4.2) ermittelt werden. Der Ausschnitt des Lageplans (Abb. 16) zeigt einen Bereich mit acht Schachtdeckeln, einer Rollstuhlauffahrt und einer Treppe. In dem Ausschnitt des Orthophotos (Abb. 17) sind sechs Schachtdeckel sichtbar. Das Orthophoto ist in dem Bereich, der die Bäume nicht verdeckt, wesentlich detaillierter. So sind z. B. die Rundungen der Rollstuhlauffahrt oder die Treppenstufen besser sichtbar. Im digitalem Oberflächenmodell (Abb. 18) ist das Gefälle der Rollstuhlauffahrt zusätzlich zu erkennen.



Abbildung 16: Lageplan Versorgungsinfrastruktur



Abbildung 17: Orthophoto Versorgungsinfrastruktur



Abbildung 18: Digitales Oberflächenmodell Versorgungsinfrastruktur

3.2.3 Bäume

Die Baumschutzsatzung der jeweiligen Stadt/Gemeinde beschreibt für öffentliche Baumaßnahmen, welche Bäume einzumessen/schützenswert sind. Private Auftraggeber können dies nach Belieben erweitern. Aufzunehmen ist dann der Stammmittelpunkt sowie der Stamm- und Kronendurchmesser.

Der Kronendurchmesser ist im Orthophoto messbar. Der Stammdurchmesser muss im Feld mit dem Maßband bestimmt werden. Der Stammmittelpunkt wird abgeschätzt. Dabei kann es allerdings zu Ungenauigkeiten kommen. Der Baumstamm verläuft nicht zwingend geradlinig. Besonders bei Laubbäumen kann dies ein Problem sein. Außerdem könnten Bäume ineinander verwachsen sein. Dann sind die Kronen nicht auseinanderzuhalten. Zusätzlich kann Wind den Baum bei der Aufnahme der Photos beeinflussen. So kann sich die Baumspitze zur Seite neigen. Bei zeitversetzten Aufnahmen ist es außerdem möglich, dass der Baum sich nicht gleich neigt. In diesem Fall kommt es zu nicht korrekten Zuordnungen und das Oberflächenmodell ist fehlerhaft oder der Baum wird gänzlich nicht modelliert. In dem Ausschnitt des Lageplans (Abb. 19) sowie im Ausschnitt des Orthophotos (Abb. 20) ist ein Nadelbaum dargestellt. Der Nadelbaum verläuft kegelförmig. Dadurch kann der Stammmittelpunkt bestimmt werden.



Abbildung 19: Nadelbaum im Lageplan Abbildung 20: Nadelbaum im Orthophoto

In der Abb. 21 ist die Darstellung von drei Laubbäumen im Lageplan zu sehen und in Abb. 22 die Darstellung dieser Bäume im Orthophoto. Eine Konstruktion der Stammmittelpunkte bzw. Kronendurchmesser ist nicht möglich. Die Bäume sind zu dicht beieinander und ungleichmäßig gewachsen. Dadurch ist eine eindeutige Trennbarkeit der Bäume nicht möglich.



Abbildung 21: Laubbäume im Lageplan Abbildung 22: Laubbäume im Orthophoto

3.2.4 Gebäude

Gebäude sind im Lageplan einzumessen. Da der Normalenvektor der Projektionsebene im Orthophoto die Z-Achse (Höhenachse) repräsentiert, sind die Dächer der Gebäude zu sehen. Im Orthophoto ist nicht ersichtlich, ob das Gebäude ein Dachüberstand hat. Die Gebäude können also nur mit dem Dachüberstand digitalisiert werden. In der Abb. 23 ist das Gebäude so zu sehen, wie es im Lageplan darzustellen ist. In der Abb. 24 ist das Dach des Gebäudes mit Dachüberstand im Orthophoto dargestellt.



Abbildung 23: Gebäude im Lageplan



Dächer haben meist Dachüberstände, um die Fassade zu schützen. Die gemauerten Gebäudeecken sind damit im Orthophoto nicht sichtbar. Aus den Dachüberständen lässt sich nur die Gebäudeecke ableiten, wenn der Abstand zwischen Gebäudeecke und Dachüberstand bekannt ist.

3.2.5 Topographie

Topographische Strukturen wie z. B. Böschungen, Gräben oder Ähnliches können wesentlich detailreicher dargestellt werden als bei einer tachymetrischen Aufnahme. In der Abb. 25 ist eine Böschung mit Stützmauer im Lageplan dargestellt. Im Vergleich zu dem Orthophoto Abb. 26 ist dies im digitalen Oberflächenmodell Abb. 27 besser sichtbar. Für Reliefstrukturen ist deshalb das Oberflächenmodell zu verwenden.



Abbildung 25: Topographie im Lageplan Abbildung 26: Topographie im Orthophoto



Abbildung 27: Topographie im digitalem Oberflächenmodell

3.2.6 Einfriedungen

Einfriedungen sind auftragsabhängig darzustellen. Einfriedungen sind erhöht und damit im digitalen Oberflächenmodell besser sichtbar als im Orthophoto. Im Ausschnitt des Lageplans (Abb. 28) ist ein Zaun dargestellt. Dieser ist im digitalen Oberflächenmodell (Abb. 30) deutlicher zu erkennen als im Orthophoto (Abb. 29).



Abbildung 28: Einfriedung im Lageplan Abbildung 29: Einfriedung im Orthophoto



Abbildung 30: Einfriedung im digitalem Oberflächenmodell

3.3 Erweiterung des Orthophotos

Die aufgenommenen Bilder stellen mehr Bereiche dar, als im Orthophoto sichtbar sind. Diese Bereiche liegen oftmals unterhalb von Vegetation (Bäume etc.). Da das Orthophoto nur die X-,Y-Ebene aus größtmöglicher Höhe widerspiegelt, ist nur die Vegetation zu erkennen. Die Bereiche unterhalb der Vegetation sind aber oftmals interessant für topographische Geländeaufnahmen. Straßenkanten lassen sich so besser rekonstruieren, Schachtdeckel werden sichtbar etc.

Im nachfolgenden Abschnitt wird ein Ansatz vorgestellt, um die Vegetation zu detektieren. Die detektierte Vegetation wird dann in jedem Bild maskiert und das Orthophoto wird neu berechnet.

3.3.1 Detektion von Vegetation

In dieser Arbeit wird auf eine Möglichkeit der unüberwachten Klassifikation zurückgegriffen. Für jedes Bild wird der RGB-Vegetationsindex RGBVI (Abschnitt 2.4.1) berechnet. Dieser liefert für jedes Pixel eine Gleitkommazahl im Intervall von [-1, 1]. Daher wird ein Schwellwert benötigt. Für bimodale Verteilungen des relativen Häufigkeitshistogramms gibt es einen Algorithmus von Nobuyuki Otsu [Otsu, 1979]. Nicht alle Bilder sind allerdings bimodal (nur Vegetation bzw. keine Vegetation etc.). Deshalb wird ein globaler Schwellwert verwendet.

Für die Festsetzung des globalen Schwellwerts wird das relative Summenhäufigkeitshistogramm (Abb. 31) des Beispielbildes (Abb. 32) geplottet. Das Beispielbild repräsentiert die Vegetation des Aufnahmegebiets. Der Schwellwert wird deshalb auf 0.25 gesetzt.



Abbildung 31: Relatives Summenhäufigkeitshistogramm

In der Abb. 33 ist das Ausgangsbild nach der Berechnung des RGBVI und dem Schwellwert von 0.25 abgebildet.



Abbildung 32: Beispielbild



Abbildung 33: Maske des Beispielbild



Abbildung 34: Zusammenfügung

Die Abb. 34 stellt die Zusammenfügung der Maske mit dem Beispielbild dar und damit, welche Bereiche nicht maskiert werden.

3.3.2 Beispiele

In den folgenden drei Beispielen (Abb. 35, Abb. 36, Abb. 37) ist auf der linken Seite das Orthophoto ohne Maskierung von Vegetation dargestellt und auf der rechten Seite das Orthophoto mit Maskierung von Vegetation. So ist z.B. in der Abb. 35 im Orthophoto mit Maskierungen ein zusätzlicher Kanalschacht zu erkennen. Auch die Bordsteinumrandung sowie die Rollstuhlauffahrt wird besser sichtbar.



Abbildung 35: Orthophoto Maskierung Versorgungsinfrastruktur

In der Abb. 36 ist selbiges zu sehen. Die Abgrenzung der Nutzungsart bzw. des Straßenkörpers wird besser sichtbar.



Abbildung 36: Orthophoto Maskierung Nutzungsgrenzen

In dem Orthophoto ohne Maskierung (Abb. 37) ist mittig ein Baum dargestellt. Dieser verdeckt die Trennung zwischen Pflasterung und Grünfläche. In dem Orthophoto mit Maskierung wird diese Trennung sichtbar.



Abbildung 37: Orthophoto Maskierung Nutzungsgrenzen

4 Fazit und Ausblick

In dieser Abschlussarbeit wurde untersucht, ob sich bildbasierte Aufnahmen mit einem unbemannten Luftfahrsystem für eine topographische Geländeaufnahme eignen. Dazu wurde zunächst die Genauigkeit von ausgewählten Punktkoordinaten mittels eines Vergleichs zur tachymetrischen Messung eingeordnet. Die Lage wurde dabei separat von der Höhe betrachtet. Die Lagekomponenten X und Y weichen dabei bei einer Bündelausgleichung mit Simultankalibrierung in einem Bereich von maximal ± 3 cm im Vergleich zur tachymetrischen Aufnahme ab. Die Höhenkomponente Z weicht in einem Bereich von maximal ± 4 cm ab (siehe Tabelle 3).

Es wurden Beispiele erarbeitet, die den aus tachymetrischen Messungen erstellten topographischen Lageplan mit dem generierten Orthophoto gegenüberstellen. Die einzelnen Ergebnisse sind in dem Abschnitt 3.2 dargestellt.

Jeder Lagekomponente im Orthophoto kann eine Höhenkomponente im DTM zugeordnet werden. Hierbei handelt es sich um die höchste und damit senkrecht von oben sichtbare Höhe. Für Bereiche mit z. B. Belaubung kann dies von Nachteil sein, da nur die Baumkrone sichtbar ist und nicht die darunter liegenden Objekte.

Für dieses Problem wurde in dieser Abschlussarbeit die Vegetation detektiert, in jedem Bild maskiert und das Orthophoto neu berechnet. Dies bietet den Vorteil, dass Bereiche, soweit aus anderen Bildaufnahmen sichtbar, besser dargestellt werden. Bei der Methodik ist allerdings zu beachten, dass die Aufnahmen der Kamera mit einem RGB-Sensor ohne einen zusätzlichen Nahinfrarotkanal erfolgt ist. Die Vegetation wurde damit anhand ihrer Grünwerte detektiert.

Im Orthophoto hat jedes Pixel einen Raumbezug. Damit sind Gebiete, die mit hoher Punktdichte aufgemessen werden, ideal geeignet. Zusätzlich ist die Zeit der Aufnahme vor Ort kürzer als eine herkömmliche tachymetrische Aufnahme.

Diese Methode ist vor allem in in kleinräumigen und vegetationsarmen Gebieten anwendbar. Für eine topographische Geländeaufnahme sind bildbasierte Aufnahmen mit einem unbemannten Luftfahrsystem als Ergänzungslösung zur tachymetrischen Aufnahme geeignet.

Literatur

[Bendig, 2015]	Juliane Bendig u. a. "Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and ne- ar infrared vegetation indices for biomass monito- ring in barley". In: <i>International Journal of Applied</i> <i>Earth Observation and Geoinformation</i> 39 (März 2015).
[Brown, 1966]	Duane C. Brown. "Decentering Distortion of Lenses". In: <i>PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING</i> 32.3 (1966), S. 444–462. URL: https://web.archive.org/web/20180312205006/https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1966journal/may/1966_may_444-462.pdf (besucht am 26.09.2019).
[DJI, 2019]	DJI. DJI Matrice 100. 2019. URL: https://www.dji.com/de/matrice100 (besucht am 14. 10. 2019).
[Finsterwalder & Hofmann, 1968]	Richard Finsterwalder und Walther Hofmann. <i>Pho-</i> <i>togrammetrie</i> . Berlin: Walter de Gruyter & Co, 1968.
[Gröhn, 2017]	Dr. Kerstin Gröhn. Der ordnungsbehördliche Ein- satz von Kameradrohnen. Baurecht, Werner-Verlag. Sep. 2017.
[Heipke, 2017]	Christian Heipke. <i>Vorlesung Photogrammetrie I 2.3.</i> Institut für Photogrammetrie und GeoInformation. Nov. 2017.
[Heipke, 2018a]	Christian Heipke. Vorlesung Photogrammetrie II 2.5. Institut für Photogrammetrie und GeoInfor- mation. Apr. 2018.
[Heipke, 2018b]	Christian Heipke. Vorlesung Photogrammetrie II 2.7. Institut für Photogrammetrie und GeoInfor- mation. Apr. 2018.
[Heipke, 2018c]	Christian Heipke. Vorlesung Photogrammetrie II 3.6. Institut für Photogrammetrie und GeoInfor- mation. Juni 2018.

[Hirschmüller, 2008]	Heiko Hirschmüller. "Stereo processing by semiglo- bal matching and mutual information". In: <i>IEEE</i> <i>TPAMI</i> 30.2 (2008), S. 328–341.
[Kahmen, 2006]	Heribert Kahmen. Angewandte Geodäsie Vermes- sungskunde, 20. Auflage. De-Gruyter-Verlag, Ber- lin. 2006.
[Lösler, 2019]	Michael Lösler. Software für hybride integrierte Netz- ausgleichung. 2019. URL: https://software.applied- geodesy.org/de/ (besucht am 24. 10. 2019).
[Lowe, 1999]	David G. Lowe. "Object Recognition from Local Scale-Invariant Features". In: <i>Proc. of the Interna-</i> <i>tional Conference on Computer Vision ICCV, Cor-</i> <i>fu.</i> 1999.
[Luhmann, 2010a]	Thomas Luhmann. Erweiterte Verfahren zur geo- metrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichs- photogrammetrie. Verlag der Bayerischen Akade- mie der Wissenschaften in Kommision beim Verlag C.H.Beck, 2010.
[Luhmann, 2010b]	Thomas Luhmann. Nahbereichsphotogrammetrie: Grund- lagen - Methoden - Anwendungen. Wichmann, 2010. URL: https://books.google.de/books?id=qdyxPwAACAAJ.
[Otsu, 1979]	Nobuyuki Otsu. "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms". In: <i>IEEE Transacti-</i> ons on Systems, Man and Cybernetics 9.1 (1979), S. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
[Rottensteiner, 2018]	Franz Rottensteiner. <i>Übungen aus Photogramme-</i> <i>trie II.</i> Institut für Photogrammetrie und GeoIn- formation. Juni 2018.
[Spektrum, 2001]	Spektrum. Kompaktlexikon der Biologie Chlorophyll. 2001. URL: https://www.spektrum.de/lexikon/ biologie-kompakt/chlorophyll/2350 (besucht am 31.10.2019).