Institut für Photogrammetrie und GeoInformation

Master Geodäsie und Geoinformatik

4. Semester

Masterarbeit

Untersuchungen zur dreidimensionalen photogrammetrischen Erfassung von Pflanzenoberflächen

Erstprüfer: Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke

Eingereicht von: Benedikt Riemann

Matrikel-Nr.: 2988960

Ausgabedatum: 12.04.2017

Abgabedatum: 12.10.2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis ..... **III**
Abbildungsverzeichnis ..... **IV**
Tabellenverzeichnis ..... **V**
1 Einleitung **1**
1.1 Motivation und Ziel 1
1.2 Aufbau der Arbeit 2
2 Grundlagen **4**
2.1 Geometrie 4
2.1.1 Zentralprojektion 4
2.1.2 Innere Orientierung 5
2.1.3 Relative Orientierung 6
2.1.4 Absolute Orientierung 7
2.1.5 Äußere Orientierung 8
2.1.6 Rückwärtsschnitt 9
2.2 Bildflugplanung 10
2.3 Aufnahmekonfiguration 12
2.3.1 Einzelbildaufnahme 13
2.3.2 Stereobildaufnahme 13
2.3.3 Mehrbildaufnahme 14
2.4 Genauigkeitsabschätzung 14
2.5 Mehrbildtriangulation 16
2.6 Delauney-Triangulation 17
2.7 Normalenvektor 18
2.8 Software 19
2.8.1 PhotoScan 19
2.8.2 Kamera 19
2.8.3 Unmanned Aerial Vehicle 20
2.8.4 Free Video to JPG Converter 20
3 Aufnahmekonzept **20**
3.1 Wahl der optischen Messverfahren 20
3.2 Forderungen und Kriterien für die praktische Durchführung 21
4 Praktische Durchführung **22**
4.1 Beschreibung der Ausgangssituation und des Testgebiets 23
4.2 Bildaufnahme des Testgebiets 23
4.2.1 Monokamerasystem 24

4.2.2 Zweikamerasystem 25
4.2.3 Unmanned Aerial Vehicle 27
4.3 Verarbeitung der Bildaufnahmedaten zu einem 3D-Modell 28
4.4 Weiterverarbeitung eines 3D-Modells 34
4.4.1 Höhenbestimmung der Modellpunkte 34
4.4.2 Selektion der Pflanzenfläche 36
4.4.3 Bestimmung der Blattausrichtung 36
5 Einsatzuntersuchung optischer Messverfahren 40
5.1 Monokamerasystem 40
5.2 Zweikamerasystem 41
5.3 UAV-System 41
5.4 Vergleich der drei Aufnahmeverfahren 42
6 Ergebnis 44
6.1 Bewertung der Einsetzbarkeit 44
6.2 Bewertung des Aufnahmeprozesses 45
6.2.1 Einsetzbarkeit für das Testgebiet 45
6.2.2 Einsetzbarkeit für die Agrarindustrie 46
7 Fazit 47
8 Ausblick 49
Literaturverzeichnis 51
Anhang 54
Eidesstattliche Erklärung

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
S.	Seite
vgl.	vergleiche
f./ ff.	folgende/ fortfolgende
u.	und
u.a.	unter anderem
RTK	Real Time Kinematic
GSD	Ground Sample Distanz
UAV	unmanned aerial vehicle
3D	dreidimensional

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zentralprojektion 5
Abbildung 2: Innere Orientierung 6
Abbildung 3: Relative Orientierung 7
Abbildung 4: Absolute Orientierung 8
Abbildung 5: Äußere Orientierung 9
Abbildung 6: Längsüberdeckung 11
Abbildung 7: Querüberdeckung 11
Abbildung 8: Bildflugplan 12
Abbildung 9: Konvergente Stereobildkonfiguration 14
Abbildung 10: Bündelblockausgleichung 16
Abbildung 11: Kreiskriterium 18
Abbildung 12: Delauney-Triangulation 18
Abbildung 13: Normalenvektor 19
Abbildung 14: Darstellung der Beobachtungsstreifen 22
Abbildung 15: Testfeld 23
Abbildung 16: Modellaufbau eines Testfeldes 24
Abbildung 17: Zweikamerasystem 27
Abbildung 18: Einsatz der Aibot X6 27
Abbildung 19: Ausrichtung der Bilder mit Punktwolkenerzeugung 30
Abbildung 20: Dünne Punktwolke 30
Abbildung 21: Reduzierung des Untersuchungsgebiets 31
Abbildung 22: Erzeugung einer dichten Punktwolke 31
Abbildung 23: Dichte Punktwolke 32
Abbildung 24: Mesherzeugung 32
Abbildung 25: Gittermodell u. -netz 33
Abbildung 26: Erzeugen von Textur 33
Abbildung 27: Texturiertes 3D-Modell 34
Abbildung 28: Auswahl der Punkte 35
Abbildung 29: Punktbestimmung der Blattfläche 37
Abbildung 30: Ausrichtungswinkel zur Sonne 39
Abbildung 31: Canon EOS 750D 55
Abbildung 32: Canon EOS 1100D 56
Abbildung 33: CoolPix A 57
Abbildung 34: Aibot X6 58
Abbildung 35: Geographische Lage des Testgebiet Ruthe 59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Höhenwerte der Punkte 36
Tabelle 2: Koordinaten der Blattpunkte 37
Tabelle 3: Daten der Canon EOS 750D 55
Tabelle 4: Daten der Canon EOS 1100D 56
Tabelle 5: CoolPix A 57
Tabelle 6: Datenblattauszug der Aibot X6 58
Tabelle 7: Berechnung der Basislänge 60
Tabelle 8: Berechnung der Basis 62
Tabelle 9: Genauigkeitsabschätzung der Aufnahmen des UAV-Systems 63

1 Einleitung

Heutzutage spielen Verfahren des Monitorings sowie der Kontrolle und der Qualitätssicherung von Prozessabläufen in verschiedensten industriellen Bereichen eine immer wichtigere Rolle. Zentrale Verfahren des Monitorings sind dabei sogenannte optische Messverfahren, bei denen aus erstellten Bildern verschiedene Informationen zum jeweiligen Objekt abgeleitet und anschließend verarbeitet werden können.

Ein Beispiel für eine solche Prozessüberwachung ist in der Fertigungsindustrie zu finden. Durch Kameraaufnahmen des jeweiligen Fertigungsablaufs können der Herstellungs- sowie der spätere Zusammensetzungsprozess der Teile dokumentiert und überwacht werden. Somit lassen sich Fehler, wie beispielsweise Fehlstellungen oder Unvollständigkeiten erkennen und direkt korrigieren. Da prinzipiell das Ziel in allen Fachgebieten und Branchen eine ständig fortlaufende Optimierung der Abläufe und ihrer Ergebnisse ist, sind die Verfahren für das Monitoring der jeweiligen Fertigungs- oder Entwicklungsprozesse inzwischen zu einem sehr nützlichen und bedeutenden Bestandteil des eigentlichen Ablaufs geworden. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung des Monitorings besteht großer Bedarf an solchen Verfahren und die Verwendung wird in immer mehr Bereichen und für mehr Prozesse gefordert. Dementsprechend kommt es bei Verfahren des Monitorings zu immer weiteren und vielseitigeren Entwicklungen.

1.1 Motivation und Ziel

Im Arbeitssektor der Agrarwirtschaft gibt es viele unterschiedliche Herstellungs-, Entwicklungs-, aber auch Untersuchungsprozesse. Für diese gibt es eine Vielzahl an Parametern, die es zu bestimmen, dokumentieren und überwachen gilt. Beim Pflanzenwachstum sind die aktuelle Höhe der Pflanzen im Anbaugebiet, die Auswirkung der Sonne und der Erntezeitpunkt Beispiele für solche Parameter. Daraus lässt sich in diesem Bereich eine hohe Bedeutung des Monitorings ableiten. Die Verwendung von verschiedenen Messverfahren zum Monitoring im Agrarwesen kann zur Verbesserung vieler Abläufe eine nützliche Hilfe sein. Entscheidend ist dabei, zu bestimmen für welche Prozesse und Parameter die bestehenden Messverfahren jeweils geeignet sind.

Mit dieser Problematik befasst sich Herr Christian Wagner in seiner Promotionsarbeit mit dem Arbeitstitel „Messungen und Rekonstruktion der dreidimensionalen Pflanzenarchitektur unter Verwendung bildgebender Sensoren zur Bestimmung morphologischer Pflanzenparameter“ an der Leibniz Universität Hannover. Er untersucht dabei verschiedene

Messverfahren zur Bestimmung und Dokumentation der Parameter für den Prozess des Pflanzenwachstums.

In Anlehnung an diese allgemeine Überprüfung wird in dieser Arbeit konkret die Einsetzbarkeit von optischen Messverfahren für die Dokumentation des Pflanzenwachstums dahingehend untersucht, inwiefern die dreidimensionale photogrammetrische Erfassung von Pflanzenoberflächen möglich und hilfreich ist. Dafür werden von einem Testfeld, auf dem Getreide angebaut wird, durch optische Messverfahren Aufnahmen getätigt. Anschließend werden diese Daten mittels mehrerer Softwareprogramme so verarbeitet, dass sich Informationen, wie beispielsweise die Größe oder Ausrichtung der Pflanzenoberfläche ableiten lassen. Des Weiteren erfolgt eine Abschätzung der Genauigkeit und Einsetzbarkeit der verwendeten Messverfahren hinsichtlich der durchgeführten Aufnahme des Testfelds, als auch speziell im Hinblick auf den industriellen Nutzen für das Agrarwesen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich in acht Kapitel. Nach der Einführung in die Thematik im ersten Kapitel folgen die Beschreibungen der für das Verständnis der Arbeit wichtigen Grundlagen in Kapitel 2. Dabei werden die Geometrie, die verschiedenen Aufnahmekonfiguration für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Objektaufnahmen sowie das Verfahren zur Berechnung und Erstellung eines 3D-Modells genauer beschrieben. Außerdem wird ein Einblick in die jeweilige Software gegeben, die bei den Aufnahme- und Auswertungsprozessen dieser Arbeit zum Einsatz kommt. In Kapitel 3 geht es um die Aufstellung eines Messkonzepts, welches die grundlegenden Überlegungen und Annahmen sowie Anforderungen bezüglich des Messprozesses an sich und der entsprechenden praktischen Durchführung enthält. Das vierte Kapitel umfasst die Beschreibung der dem Messkonzept entsprechenden durchgeführten optischen Messungen und den dazugehörigen Arbeitsabläufen. Dabei erfolgt zunächst die Erklärung der Verfahren und Prozesse zur Bildaufnahme des Testgebiets. Danach wird der Verarbeitungsprozess der Aufnahmen zu 3D-Modellen sowie der anschließenden Auswertung der Daten beschrieben. Als letzter Aspekt dieses Kapitels folgt die Beschreibung zusätzlicher Verarbeitungsschritte, die beispielsweise der Bestimmung der Blattflächen oder deren Ausrichtung dienen sowie die dafür zu Grunde liegenden Auswertungsansätze für einzelne Parameter. Das fünfte Kapitel beinhaltet eine Analyse sowie einen direkten Vergleich der in dieser Arbeit eingesetzten optischen Messverfahren hinsichtlich des Einsatzes für die Aufnahme der Testobjekte. In Kapitel 6 werden die zuvor im Arbeitsprozess und anschließenden Vergleich erzielten Ergebnisse bestimmt und dargelegt. Des Weiteren wird eine Bewertung der Verfahren unter der Berücksichtigung der für die Agrarindustrie relevanten Faktoren

vorgenommen. Nach der Auswertung der Daten wird im siebten Kapitel ein Fazit gezogen, in dem die erzielten Ergebnisse zusammengefasst und abschließend bewertet werden. Zum Abschluss der Arbeit wird im letzten Kapitel noch ein Ausblick gegeben, indem Beschreibungen beispielsweise möglicher anderer Verarbeitungsprozesse oder auch weiterführende Arbeitsansätze erfolgen.

2 Grundlagen

Dieser Abschnitt handelt von unterschiedlichen Grundlagen im Bereich der optischen Messtechnik und dient zum besseren Verständnis der in dieser Ausarbeitung durchgeführten Aufnahmen und Untersuchungen. Zuerst werden die geometrischen Grundlagen der eingesetzten Verfahren, für die Aufnahme von Objekten mittels optischer Messtechnik sowie für die darauffolgende Auswertung dieser Daten, erläutert. Anschließend folgt die Beschreibung der Planung eines Bildflugs und eine Erklärung der Bildaufnahmeverfahren, die für die durchgeführten Messprozesse dieser Arbeit eingesetzt wurden. Dabei wird zu allen drei Verfahren die Möglichkeit der Genauigkeitsabschätzung beschrieben. Des Weiteren folgt in diesem Abschnitt eine Beschreibung der Vorgänge innerhalb der 3D-Vermaschung. Abschließend erfolgt eine Darstellung der für die Aufnahme und Auswertung eingesetzten Software.

2.1 Geometrie

Im Folgenden werden die mathematischen und geometrischen Grundlagen für die eingesetzten Aufnahmearten sowie für die softwareinternen Rechenvorgänge beschrieben. Des Weiteren erfolgt die Erklärung der wesentlichen Elemente der Photogrammetrie.

2.1.1 Zentralprojektion

Das Lochkameramodell stellt das einfachste Aufnahmemodell dar. Es beschreibt die Abbildung einer dreidimensionalen Umgebung auf eine zweidimensionale Projektions- bzw. Bildfläche unter Verwendung der Zentralprojektion. Dabei wird angenommen, dass alle einfallenden Strahlen zentral durch einen gemeinsamen Punkt (Loch), dem sogenannten Projektionszentrum **O**, verlaufen (siehe Abbildung 1).

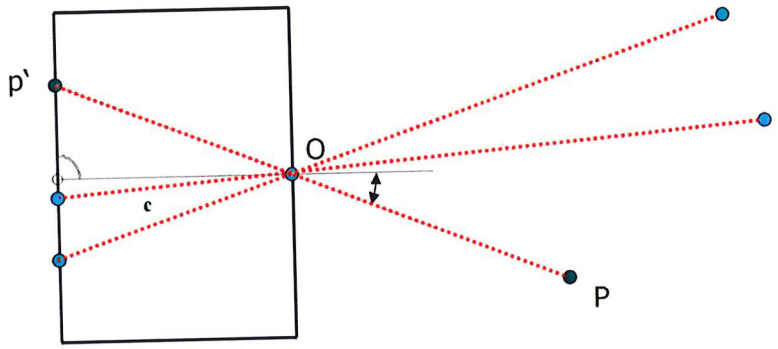

Abbildung 1: Zentralprojektion [Przybilla 2017 S. 2]

In der Abbildung 1 bedeuten:

p' ... projizierter Punkt

P ... Objektpunkt P

c ... Kammerkonstante

O ... Projektionszentrum

Die mathematische Formulierung der Zentralprojektion sind die Kollinearitätsgleichungen, welche in Kapitel 2.1.5 näher definiert werden (vgl. Formel 2.3).

Das Modell der Zentralprojektion bietet die Voraussetzung für die Bestimmung der Orientierung von Bildern [Hoschek u. Lasser 1989 S. 17f.] und somit für eine Vielzahl an photogrammetrischen Verfahren [Finsterwald 2013 S. 21ff.].

2.1.2 Innere Orientierung

Bei einem Aufnahmesystem entspricht die innere Orientierung allen instrumentellen und mathematischen Ansätzen zur Beschreibung des gesamten geometrischen Abbildungsmodells innerhalb der Kamera [Gühring 2002 S. 26]. Dementsprechend gibt die innere Orientierung Aufschluss über die Lage des Projektionszentrums **O** im kamerafesten Bildkoordinatensystem sowie die möglichen Abweichungen vom mathematischen Modell der Zentralperspektive (vgl. Kapitel 2.1.1). Die Parameter der inneren Orientierung sind dabei die Koordinaten x'_0 und y'_0 des Bildhauptpunktes **H'**, der Kammerkonstanten **c** und den Abbildungsfehlern $\Delta \mathbf{x}'$ und $\Delta \mathbf{y}'$ (siehe Abbildung 2) [Luhmann 2010 S. 138].

Der Bildhauptpunkt ist der Lotfußpunkt des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem und liegt bei gebräuchlichen Kameras annäherungsweise in der Mitte des Bildes (**H' = M'**). Die Kammerkonstante entspricht dem lotrechten Abstand des Projektionszentrums zur Bildebene in der negativen z'- Richtung [Luhmann 2010 S. 144].

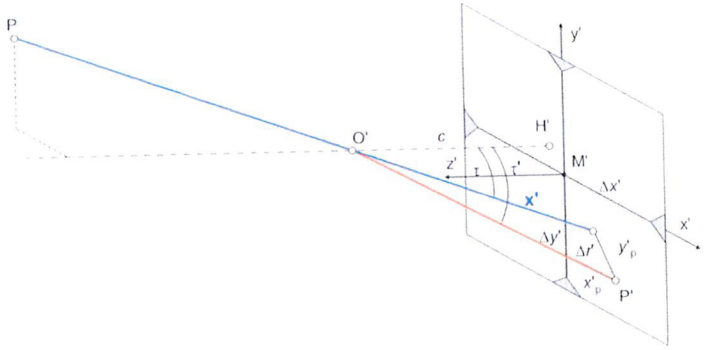

Abbildung 2: Innere Orientierung [Luhmann 2010 S. 144]

Wenn die Parameter der inneren Orientierung bekannt sind, ist es möglich den Bildvektor **X'**, welcher sich auf das Projektionszentrum bezieht, zu bestimmen. Dieser Vektor besteht aus:

$$X' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_p - x'_0 - \Delta x' \\ y'_p - y'_0 - \Delta y' \\ -c \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

Diese drei Parameter lassen sich im Zuge einer Kalibrierung des Aufnahmesystems bestimmen [Luhmann 2010 S. 144].

2.1.3 Relative Orientierung

Die räumliche Lage zweier Bilder zueinander in einem gemeinsamen Modellkoordinatensystem wird als relative Orientierung dieses Bildpaares bezeichnet.

Ein gängiges Verfahren zur Bestimmung der relativen Orientierung ist die sogenannte Methode der unabhängigen Bildpaare. Die x-Achse des Modellkoordinatensystems wird dabei in die Richtung der Basis **b** gelegt. Der Systemursprung befindet sich im Projektionszentrum des linken Bildes **O'** (siehe Abbildung 3). Dementsprechend ergeben sich für die äußere Orientierung im Modellkoordinatensystem folgende Parameter:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0 & \omega_1 \\ y_1 &= 0 & \varphi_1 \\ z_1 &= 0 & \kappa_1 \end{aligned} \qquad \begin{aligned} x_2 &= bx & \omega_2 &= 0 \\ y_2 &= 0 & \varphi_2 \\ z_2 &= 0 & \kappa_2 \end{aligned}$$

Dadurch ergeben sich fünf unabhängige Drehwinkel $(\boldsymbol{\omega_1}, \boldsymbol{\varphi_1}, \boldsymbol{\kappa_1}, \boldsymbol{\varphi_2}, \boldsymbol{\kappa_2})$ die es zu bestimmen gilt. Der Winkel $\boldsymbol{\omega_1}$, welcher der Drehung um die x-Achse entspricht, kann auch mit

dem Winkel ω_2 getauscht werden. Der Maßstab ist frei wählbar, zum Beispiel mit bx = 1, da die relative Orientierung nur eine gegenseitige Ausrichtung der beiden Bilder beschreibt.

Um die Parameter der relativen Orientierung berechnen zu können, wird die Koplanaritätsbedingung vorausgesetzt. Diese fordert, dass ein Objektpunkt **P** und die Projektionszentren **O‘** und **O“** in einer Ebene liegen. In der sich aufspannenden Epipolarebene liegen gleichzeitig auch die Bildpunkte **P‘** und **P“**. Die Koplanaritätsbedingung ist nur dann erfüllt, wenn die beiden Raumstrahlen **r‘** und **r“** sich streng im Objektpunkt **P** schneiden, also die Lage der Bildpunkte sowie der Orientierungsparameter fehlerfrei sind. Daraus folgt, dass sich aus jeweils einem Paar identischer Punkte eine Koplanaritätsgleichung aufstellen lässt. Dementsprechend sind mindestens fünf identische Bildpunktpaare mit bekannten Bildkoordinaten notwendig, um die fünf Orientierungsparameter zu bestimmen [Luhmann 2010 S. 275ff.].

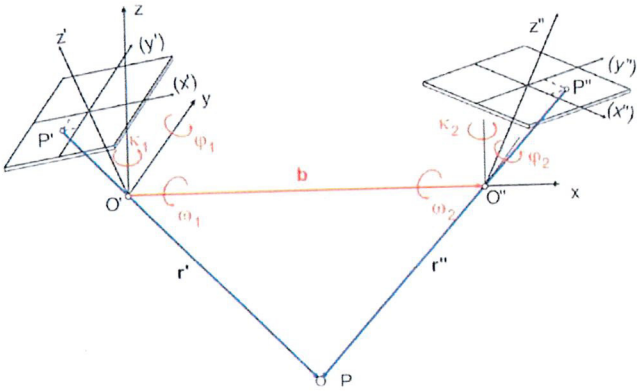

Abbildung 3: Relative Orientierung [Luhmann 2010 S. 277]

2.1.4 Absolute Orientierung

Die absolute Orientierung beschreibt den Zusammenhang des räumlichen Modellkoordinatensystems (Bildkoordinatensystem) mit einem übergeordneten Objektkoordinatensystem. Dementsprechend hat die absolute Orientierung die Aufgabe, das bei der relativen Orientierung mit beliebiger Lage, Orientierung und Maßstab bestimmte Modellkoordinatensystem **xyz** mit Hilfe von Passpunkten in ein übergeordnetes System **XYZ** zu transformieren [Luhmann 2010 S. 289f]. Dieser Zusammenhang kann durch folgende Formel ausgedrückt werden und wird in Abbildung 4 dargestellt:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix} + \mu * D(\omega, \varphi, \kappa) * \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

In Formel 2.2 bedeutet:

X_i, Y_i, Z_i	...	Koordinaten im Objektsystem
x_i, y_i, z_i	...	Koordinaten im Modellsystem
X_O, Y_O, Z_O	...	Translationen
$D(\omega, \varphi, \kappa)$	...	räumliche Drehmatrix
μ	...	Maßstabsfaktor

Diese Transformation zwischen den zwei Koordinatensystemen bezeichnet man als Helmert-Transformation und ergibt sich aus den in Formel 2.2 zu sehenden sieben Parametern (drei Translationen, drei Rotationen und ein Maßstabsfaktor).

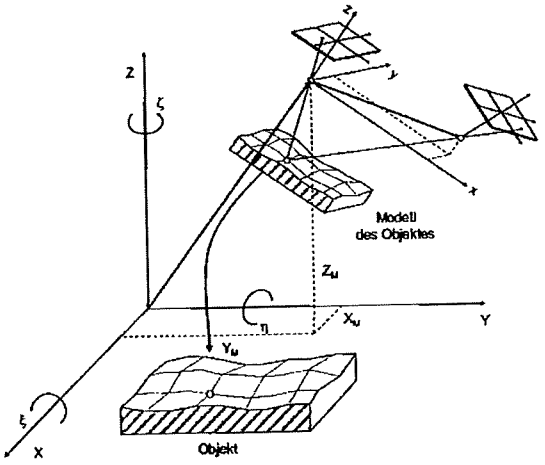

Abbildung 4: Absolute Orientierung [Luhmann 2017 S. 289]

Durch diesen Zusammenhang ist es möglich, dass aufgenommene Objekte, denen eine Bildkoordinate zugewiesen ist, ebenfalls Koordinaten in einem übergeordneten Objektkoordinatensystem erhalten und dadurch eine Georeferenzierung dieser Bilddaten vorgenommen werden kann. Eine Georeferenzierung bedeutet in dem Fall, dass für jedes Bild ein Raumbezug hergestellt wird [Geoportal 2011 S. 8].

2.1.5 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung beschreibt die Lage und Ausrichtung des räumlichen Bildkoordinatensystems in einem übergeordneten Objektkoordinatensystem. Sie wird durch sechs Parameter beschrieben, die im Folgenden erläutert werden (siehe Abbildung 5). Zum einen durch die drei Objektkoordinaten des Projektionszentrums $(\boldsymbol{X_0}, \boldsymbol{Y_0}, \boldsymbol{Z_0})$ und zum anderen

durch die drei Rotationswinkel $(\omega, \varphi, \kappa)$, die den Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem bilden.

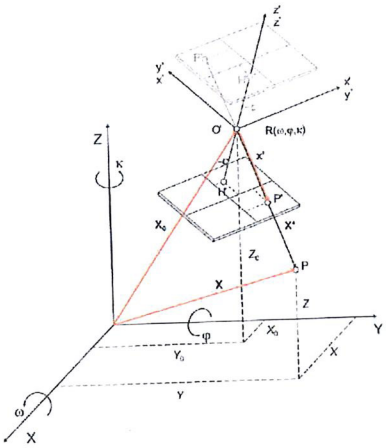

Abbildung 5: Äußere Orientierung [Luhmann 2010 S. 237]

Während es sich bei den Bildkoordinaten (x', y') um 2D-Koordinaten handelt, liegen die Objektkoordinaten (X_0, Y_0, Z_0) in 3D vor. Um später die Objektkoordinaten in das Bildkoordinatensystem und umgekehrt überführen zu können, werden diese transformiert. Der zu Grunde liegende mathematische Zusammenhang ergibt sich durch die Bedingung, dass Objektpunkt, Projektionszentrum und Bildpunkt auf einer Gerade (kollinear) liegen müssen [Gühring 2002 S. 26]. Diese Bedingung wird durch die Kollinearitätsgleichungen beschrieben:

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

$$y' = y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \tag{2.3}$$

Die Parameter $\mathbf{r_{mn}}$ sind dabei die einzelnen Elemente der Rotationsmatrix **R**. Sie lassen sich durch das Bilden von trigonometrischen Funktionen der drei oben genannten Drehwinkel bestimmen [Luhmann 2010 S. 236 ff.].

2.1.6 Rückwärtsschnitt

Als Orientierung eines Bildes ist im Allgemeinen die Ermittlung der äußeren Orientierung (vgl. Kapitel 2.1.5) zu verstehen. In den meisten Fällen ist eine direkte Bestimmung der Orientierung, zum Beispiel durch Strecken- und Winkelmessungen, nicht möglich oder nicht

exakt genug. Stattdessen werden die gesuchten Parameter mit Hilfe des räumlichen Rückwärtsschnittes berechnet. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem die im Bild gemessenen Bildkoordinaten als Grundlage dienen [Luhmann 2010 S. 242].

2.2 Bildflugplanung

Nach der Erläuterung, der für die photogrammetrischen Verfahren wesentlichen geometrischen und mathematischen Grundlagen, erfolgt nun die Beschreibung der Bildflugplanung. Da die Planung im praktischen Teil dieser Arbeit eine entscheidende Rolle einnimmt (vgl. Kapitel 4), wird im Folgenden ein Überblick über die einzelnen Parameter sowie den allgemeinen Ablauf der Bildflugplanung gegeben.

Im Allgemeinen umfasst die Bildflugplanung die Bestimmung aller vorzubereitenden Maßnahmen und technischen Parameter die nötig sind, um eine Luftbildvermessung durchführen zu können [Regensburger 2000]. Die wichtigsten Aspekte sind dabei in mehreren Schritten zu bestimmen.

Als erstes wird die Kamera in Abhängigkeit von Aufnahmegelände und -objekt sowie den Genauigkeitsanforderungen gewählt [Kohlstock 2011 S. 97ff.]. Anschließend ist die Überdeckung der Bilder zu bestimmen, da ein zentrales Ziel bei der Luftbildvermessung die dreidimensionale Erfassung der natürlichen Landschaft und der sich darauf befindenden künstlichen Objekte ist. Um dieses Ziel bei der späteren Auswertung zu erreichen, also zum Beispiel Stereoskopie oder Blockausgleichung (vgl. Kapitel 2.5) durchführen zu können, muss die Voraussetzung, dass die Oberfläche so erfasst wird, dass ein Objektpunkt in mindestens zwei Bildern abgebildet ist, zwingend erfüllt werden. Um dies zu erreichen, ist eine Überdeckung der Bilder von mindestens 50% in Flugrichtung notwendig [Kraus 2004 S. 144]. Diese Überdeckung wird als Längsüberdeckung **p** bezeichnet (siehe Abbildung 6). In der Regel wird jedoch eine Längsüberdeckung von mindestens 60% angestrebt, da es somit zusätzlich in einem Bereich von 20% der Bildfläche zu einer dreifachen Überlagerung der Aufnahmen kommt.

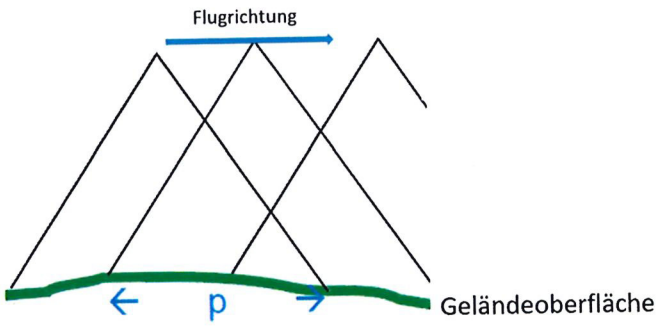

Abbildung 6: Längsüberdeckung
Eigene Darstellung modifiziert nach [Rottensteiner 2016]

Die Überdeckung senkrecht zur Flugrichtung wird als Querüberdeckung **q** bezeichnet und ist ebenfalls vorab zu definieren. Sie liegt üblicherweise bei 20 - 30%, um so Lücken zwischen einzelnen Beobachtungsstreifen zu vermeiden (siehe Abbildung 7). Für die Routenplanung muss daher der Abstand der Bahnen (Beobachtungsstreifen) zur Überfliegung des Aufnahmegebiets entsprechend der geforderten Überdeckung festgelegt werden.

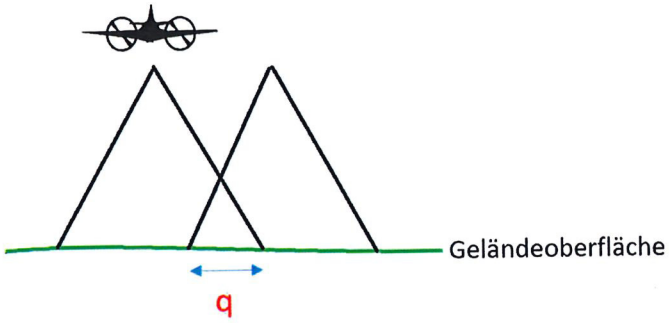

Abbildung 7: Querüberdeckung
Eigene Darstellung modifiziert nach [Rottensteiner 2016]

Neben der Wahl der Bildüberdeckungsparameter sind die Objektpixelgröße und die Flughöhe festzulegen. Die Objektpixelgröße ergibt sich je nach Genauigkeitsanforderung für die Aufnahmeobjekte. Ist die Objektpixelgröße **GSD** gewählt, kann anschließend mit dieser sowie der Sensorpixelgröße $\boldsymbol{\delta}$ und Kammerkonstanten **c** die erforderliche Flughöhe $\mathbf{h_g}$ nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$h_g = c * \frac{GSD}{\delta} \tag{2.4}$$

Die Größe der Basis, der Abstand der einzelnen Bildaufnahmen, sowie der Abstand der Beobachtungsstreifen müssen ebenfalls bestimmt werden. Die Basis **b** wird dabei wie folgt berechnet:

$b = S_x * \frac{h}{c*(1-p)}$, S_x ist dabei die Aufnahmebreite in x - Richtung (2.5)

Der Abstand der Beobachtungsstreifen **a** ergibt sich durch:

$a = s_y * \frac{h}{c*(1-q)}$, $\mathbf{s_y}$ ist dabei die Aufnahmebreite in y - Richtung (2.6)

Die Planung der Flugroute unter Berücksichtigung der vorab bestimmten Parameter kann dann vorgenommen werden (siehe Abbildung 8) [Albertz 2001].

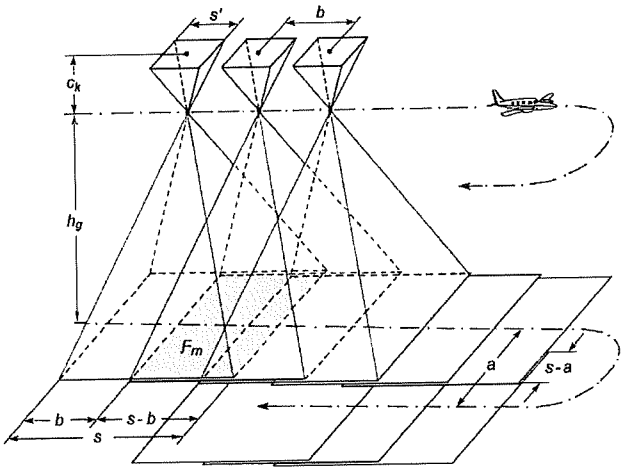

Abbildung 8: Bildflugplan [Kraus 2004 S. 144]

In der Abbildung 8 bedeuten:

a ... Abstand der Beobachtungsstreifen
b ... Basis
c_k ... Kammerkonstante
s ... Breite des Bildes quer zur Flugrichtung (y-Richtung)
s' ... Breite des Bildes in Flugrichtung (x-Richtung)
h_g ... Flughöhe über Grund
F_m ... Stereoskopisch erfasste Fläche
s-a ... Querüberdeckung
s-b ... Längsüberdeckung

2.3 Aufnahmekonfiguration

Nach der Beschreibung der Bildflugplanung, erfolgt in diesem Abschnitt die Erläuterung der möglichen Aufnahmekonfiguration für die optische Messung.

Bei der Aufnahme von Bildern gibt es verschiedene Möglichkeiten der Anordnung der Kamerastandpunkte. In der Photogrammetrie wird zwischen drei Anordnungsformen der Kameras unterschieden:

- Einzelbildaufnahme,
- Stereobildaufnahme und
- Mehrbildaufnahme [Luhmann 2010 S. 131].

2.3.1 Einzelbildaufnahme

Eine Einzelbildaufnahme ist definiert als die Aufnahme eines beliebigen Objektes mit einem einzelnen Bild. Um jedoch eine dreidimensionale Objektrekonstruktion aus nur einem Bild zu erhalten, müssen zusätzliche geometrische Informationen vorliegen. Aufgrund dieser Restriktionen findet diese Aufnahmekonfiguration hauptsächlich Anwendung bei Entzerrungen, Orthophotos oder bei der ebenen Objektauswertung [Luhmann 2010 S. 131f.].

2.3.2 Stereobildaufnahme

Bei der Erfassung von dreidimensionalen Informationen von Objekten ist die Stereobildaufnahme die kleinste mögliche Aufnahmekonfiguration. Sie wird in der Regel dazu verwendet, um automatische oder visuelle stereoskopische Bildauswertungen durchzuführen. Es existieren drei unterschiedliche Stereobildkonfigurationen:

- normal,
- konvergent und
- verschwenkt.

Da im praktischen Teil dieser Arbeit ausschließlich der konvergente Konfigurationsfall Anwendung findet, wird im Folgenden hierauf der ausschließliche Fokus gelegt.

Bei der konvergenten Stereobildkonfiguration können die beiden Aufnahmegeräte bzw. ihre Aufnahmen eines gemeinsamen Objektes leicht geneigt (konvergent) zueinander sein (siehe Abbildung 9). Diese Stereoaufnahmen lassen sich nicht mehr visuell auswerten, da hierfür die normale Konfiguration notwendig ist. Um eine digitale Stereobildauswertung durchführen zu können eignen sich die Aufnahmen jedoch trotzdem.

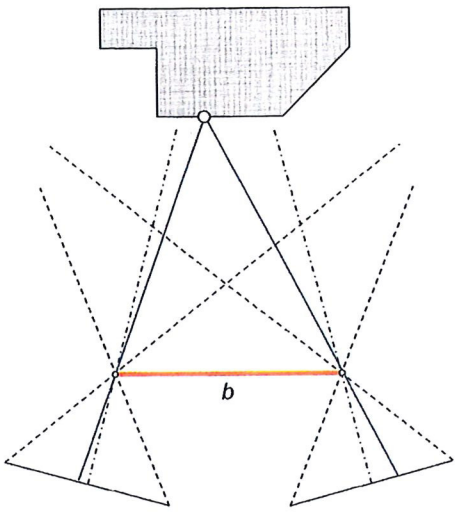

Abbildung 9: Konvergente Stereobildkonfiguration [Luhmann 2010 S. 133]

Ein Vorteil bei Stereobildaufnahmen liegt darin, dass sich aus gemessenen Bildkoordinaten homologer Bildpunkte (x', y', x'', y'') mit Hilfe eines sogenannten räumlichen Vorwärtsschnitts dreidimensionale Koordinaten (x, y, z) bestimmt lassen [Luhmann 2010 S. 132].

2.3.3 Mehrbildaufnahme

Bei der Mehrbildaufnahme werden beliebig viele Bilder eines Objektes getätigt. Anders als bei der Stereobildaufnahme gibt es für die Mehrbildaufnahme keine Einschränkungen bezüglich der Standortwahl und Richtung der Aufnahmen mittels Kamera. Grundsätzlich ist jedoch erforderlich, dass immer mindestens zwei Bilder jeden Objektpunkt aus unterschiedlichen Aufnahmepositionen aufnehmen. Die Objektkoordinaten lassen sich bei der Auswertung durch das Verfahren der Mehrbildtriangulation (vgl. Kapitel 2.5) aus den Bildkoordinaten bestimmen [Luhmann 2010 S. 133f.].

2.4 Genauigkeitsabschätzung

Ein wesentlicher Aspekt bei der Bildaufnahme ist die Abschätzung der Punktgenauigkeit einzelner Punkte. Da die Genauigkeitsabschätzung bei den verschiedenen Aufnahmekonfigurationen unterschiedlich ist, wird im Folgenden für alle drei Konfigurationen die Bestimmung der Genauigkeit separat erklärt.

Bei der Einzelbildaufnahme ist keine dreidimensionale Objektrekonstruktion möglich (vgl. Kapitel 2.3.1). Daher ist eine Genauigkeitsabschätzung für die Bestimmung von dreidimensionalen Punkten nicht zu treffen.

Für die Genauigkeitsabschätzung der Aufnahme einzelner Punkte bei der Stereoaufnahme müssen die Entfernung der Kamera zum Aufnahmeobjekt, die Distanz zwischen den beiden Projektionszentren (Basis), die Kammerkonstante der verwendeten Kamera, die Pixelgröße auf dem Sensor sowie die manuelle Pixelmessgenauigkeit bekannt sein. Mit Hilfe dieser Parameter lässt sich die Genauigkeit mit den folgenden beiden Formeln bestimmen:

Rechtwinklig zum Bildstrahl (X-Y-Richtung):

$$\delta_{xy} = \frac{Y}{c} * pel * px \tag{2.7}$$

Und in Richtung des Bildstrahls (Z-Richtung):

$$\delta_z = \frac{Y}{B} * \delta_{xy} \tag{2.8}$$

In den Formeln 2.7 und 2.8 bedeuten:

Y ... Entfernung zum Objekt
c ... Kammerkonstante
B ... Basis
pel ... Pixelgröße
p ... manuelle Pixelmessgenauigkeit

Eine Beispielberechnung für die Genauigkeitsabschätzung bei der Stereoaufnahme ist im Anhang 7 zu finden.

Auch bei der Mehrbildaufnahme ist eine Genauigkeitsabschätzung möglich. Das Prinzip ist dabei das Gleiche wie bei der Stereoaufnahme. Es können dieselben beiden Formeln (vgl. 2.7 und 2.8) verwendet werden, um die Genauigkeit rechtwinklig und in Richtung des Bildstrahls zu bestimmen. Der Unterschied besteht darin, dass die Genauigkeit beim Stereofall direkt vor der eigentlichen Messung abzuschätzen ist, während eine Bestimmung der Genauigkeit bei der Mehrbildaufnahme erst nach Durchführung der Messung möglich wird. Der Grund dafür ist, dass sich die Basis beim Stereofall aus dem Abstand der beiden Projektionszentren der beiden Kameras ergibt und vorab bestimmt werden kann. Bei der Mehrbildaufnahme existiert hingegen nur eine Kamera. Um trotzdem eine Basis und daraus die Aufnahmegenauigkeit für einen Punkt bestimmen zu können, wird die Position des Projektionszentrums aus zwei Bildern verwendet. Voraussetzung ist dabei, dass die Bilder beide denselben Punkt abbilden. Für diesen gemeinsamen Punkt kann dann die Basis als Abstand der beiden Projektionszentren bestimmt sowie anschließend die Genauigkeit abgeschätzt werden [Luhmann 2010 S. 136ff.]. Eine Beispielberechnung für die Genauigkeitsabschätzung bei der Mehrbildaufnahme ist dem Anhang 8 zu entnehmen.

2.5 Mehrbildtriangulation

Nachdem bereits ein Überblick über die geometrischen Grundlagen der Photogrammetrie sowie die Planung der Bildflugaufnahme und der Einstellungsmöglichkeiten für den Aufnahmeprozess gegeben ist, wird in diesem Abschnitt ein für die für spätere Auswertung der Aufnahmen und Verarbeitung zu 3D-Modellen grundlegendes Verfahren, die Mehrbildtriangulation, beschrieben.

Die Mehrbildtriangulation, auch Bündelblockausgleichung genannt, ist ein Verfahren bei dem eine beliebige Anzahl an Bildern, zum Beispiel eines Bildfluges, rechnerisch eingepasst und miteinander verknüpft wird. Dabei werden photogrammetrisch gemessene Bildpunkte, geodätische Messungen und ein übergeordnetes Koordinatensystem berücksichtigt. Die einzelnen Aufnahmen werden durch korrespondierende Punkte zu einem gemeinsamen Gesamtmodell verbunden. Der Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem wird durch die Verwendung einer minimalen Anzahl von Passpunkten erreicht. Das ermöglicht gleichzeitig auch die Überbrückung von passpunktlosen Räumen durch Mehrbildverbände. Die geometrische Grundlage bildet dabei die Forderung, dass sich alle Bildstrahlen der korrespondierenden Bildpunkte optimal in ihrem Objektpunkt schneiden bzw. bündeln (siehe Abbildung 10).

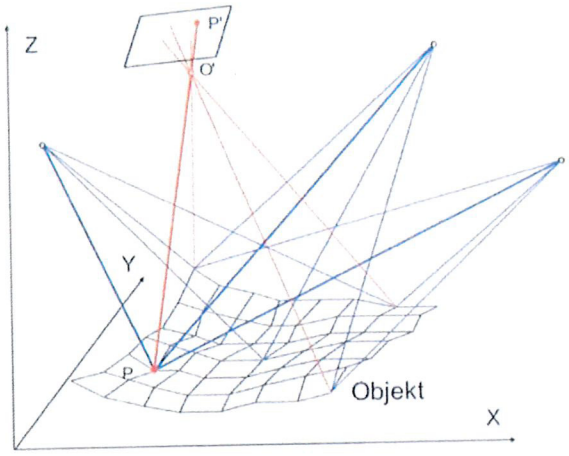

Abbildung 10: Bündelblockausgleichung [Luhmann 2010 S. 302]

Bei der Durchführung des Bündelblockausgleichs werden in einem überbestimmten Gleichungssystem die 3D-Objektkoordinaten (X, Y, Z), die Orientierungsparameter oder auch weitere Modellparameter bestimmt. Das mathematische Modell basiert auf den in Kapitel 2.1.5 erläuterten Kollinearitätsgleichungen [Luhmann 2010 S. 301ff.]. Zu beachten ist, dass die Ausgleichsrechnung für alle Unbekannten Näherungswerte benötigt.

Diese werden automatisiert durch die Kombination von Vorwärts- und Rückwärtsschnittberechnung bestimmt (vgl. Kapitel 2.1.6). Als erster Schritt wird dabei ein Bildpaar als sogenanntes Startmodell festgelegt und dessen relative Orientierung berechnet. Danach wird jedes weitere Bild, bei dem es mindestens drei homologe Punkte gibt, durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt in das bestehende Modell eingebunden und anschließend neue Objektpunkte mit einem räumlichen Vorwärtsschnitt bestimmt. Danach kann der räumliche Rückwärtsschnitt wiederholt zur Verbesserung der äußeren Orientierung durchgeführt werden. Dieser Prozess wird iterativ durchgeführt und endet erst, wenn alle Bilder in den Bildverband eingebunden wurden. Sind alle Bilder orientiert, erfolgt mit Hilfe der im Modell- und Objektkoordinatensystem vorhandenen Passpunkte eine abschließende äußere Orientierung. Damit liegen für die 3D-Objektkoordinaten und Orientierungen Näherungswerte vor [Luhmann 2010 S. 327ff.].

Das entstandene 3D-Modell ermöglicht es, die einzelnen Punkte miteinander zu verknüpfen. Das Ergebnis ist die Entstehung eines Dreiecksnetzes. Die Verknüpfung der Punkte miteinander wird als Vermaschung des Dreiecksnetzes bzw. als Dreiecksvermaschung bezeichnet und erfolgt mit Hilfe der sogenannten Delauney-Triangulation (vgl. Kapitel 2.6).

2.6 Delauney-Triangulation

Um die in Kapitel 2.5 angesprochene Dreiecksvermaschung der Punkte des 3D-Modells zu realisieren, wird die Delauney-Triangulation verwendet. Mit Hilfe der Delauney-Triangulation wird aus einer Menge von Punkten (Punktwolke) ein Dreiecksnetz erstellt. Das Grundprinzip der Dreiecksvermaschung, d.h. die Suche der Dreiecke, ist, dass der kleinste Winkel des jeweiligen Dreiecks möglichst groß ist und somit die Seiten des Dreiecks möglichst gleich groß sind. Dabei wird ein Kriterium angewendet, welches als Kreiskriterium bezeichnet wird. Die Dreiecke werden hierbei so konstruiert, dass außer der drei Eckpunkte sich kein weiterer Punkt im Umkreis des Dreiecks befinden darf (siehe Abbildung 11). Dieses Kriterium ist für alle Punkte so lange anzuwenden, bis alle Punkte durch Dreiecke vermascht sind (siehe Abbildung 12) [Meier u. Borkowski 2011 S. 179f.].

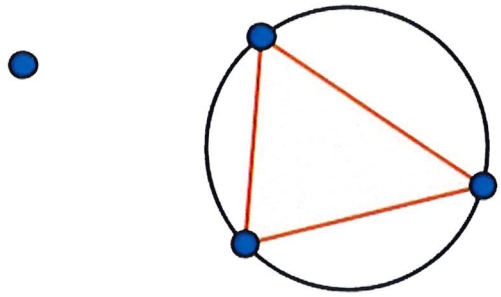

Abbildung 11: Kreiskriterium
Eigene Darstellung in Anlehnung an [Mathmunch 2017]

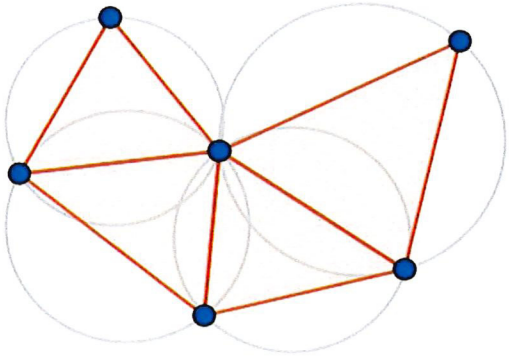

Abbildung 12: Delauney-Triangulation
Eigene Darstellung in Anlehnung an [Matchmunch 2017]

2.7 Normalenvektor

Der im Folgenden erklärte Normalenvektor wird benötigt, um bei der Weiterverarbeitung der 3D-Modelle die Ausrichtung der Pflanzenblätter gegenüber der Sonne (vgl. Kapitel 4.4.3) zu bestimmen.

Ein Vektor, der senkrecht auf einer durch zwei Richtungsvektoren $\vec{\mathbf{v}}$ und $\vec{\mathbf{u}}$ aufgespannten Ebene **E** steht, wird als Normalenvektor $\vec{\mathbf{n}}$ dieser Ebene bezeichnet. Dieser Vektor ergibt sich aus $\vec{\mathbf{n}} = \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{u}}$ (siehe Abbildung 13). Des Weiteren lässt sich eine Ebene eindeutig durch den Normalenvektor und einen Punkt der Ebene $(P_0 \in E)$ definieren [Richter 2009 S. 111].

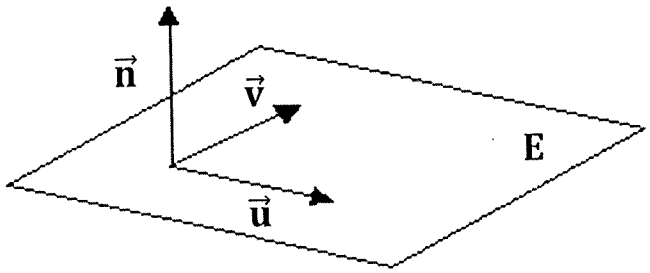

Abbildung 13: Normalenvektor
Eigene Darstellung modifiziert nach [Brunner u. Brück 2013 S. 51]

2.8 Software

Zur Durchführung der Bildaufnahmen sowie der anschließenden Auswertung der Bilddaten werden verschiedene Geräte und Softwareprodukte verwendet. Die Software ist im Folgenden kurz beschrieben. Für eine ausführlichere Dokumentation wird auf die angegebene Literatur verwiesen. Gleiches gilt auch für die eingesetzten Aufnahmegeräte, deren genauer Aufbau der bei Bedarf aus dem Anhang und der angegebenen Literatur zu entnehmen ist.

2.8.1 PhotoScan

PhotoScan ist ein Softwareprodukt der Firma Agisoft und ermöglicht verschiedenste photogrammetrische Prozesse und Bearbeitungsfunktionen von digitalen Bildaufnahmen [Agisoft 2016 S. V]. Des Weiteren ist es möglich, aus den Digitalbildern räumliche 3D-Modelle zu generieren. Sowohl die Bildausrichtung als auch die 3D-Modellrekonstruktion sind voll automatisiert durchführbar [Kuhn 2014 S. 124]. Dabei sind die Art der Bildaufnahmen sowie die einzelnen Aufnahmepositionen bei der Verarbeitung irrelevant, solange das zu rekonstruierende Objekt in mindestens zwei Bildern sichtbar ist [Kersten u. Lindstaedt 2012 S. 29].

2.8.2 Kamera

Für Bildaufnahmen der Testobjekte werden zum einen die Kamera EOS 750D und die EOS 1100D der Firma Canon eingesetzt. Zum anderen wird die CoolPix A der Firma Nikon eingesetzt. Alle drei Kameras besitzen Eigenschaften, wie zum Beispiel eine Auflösung, die für die geforderte Aufnahmegenauigkeit und -anforderungen akzeptabel sind. Für die

Kamera der UAV, der CoolPixA, ist außerdem ihr geringes Gewicht entscheidend. Die genauen Angaben der Kameras sind als Datenblätter im Anhang angefügt (vgl. Anhang 1, 2 und 3).

2.8.3 Unmanned Aerial Vehicle

Bei der für die Luftbildaufnahmen eingesetzten Unmanned Aerial Vehicle (UAV) handelt es sich um die Aibot X6 von der Firma Hexagon Geosystems. Es ist eine selbständig fliegende UAV, die speziell für Aufgaben im Bereich der Vermessung und für Beobachtungs- und Inspektionsaufgaben im Agrarwesen entwickelt wurde [Hexagon 2017]. Im Anhang 4 befindet sich eine ausführlichere Beschreibung dieses Gerätes.

2.8.4 Free Video to JPG Converter

Der Free Video to JPG Converter ist eine kostenlose Software der Firma DVDVideoSoft aus Großbritannien. Sie ermöglicht das Schneiden von Videoaufnahmen in einzelne Teile, bis hin zu einzelnen Bildern. Somit eignet sich die Software zur Konvertierung von Video- in Bilddaten. Die Intervalle der Schneidungssequenz können dabei frei gewählt und somit individuell angepasst werden [DVDVideoSoft 2006].

3 Aufnahmekonzept

Durch die Erstellung eines Konzepts wird vor Beginn der eigentlichen optischen Messungen ein Plan aufgestellt, in dem unter Berücksichtigung der angestrebten Beobachtungsziele die einzelnen Messabläufe strukturiert und definiert werden. Des Weiteren sind notwendige Vorüberlegungen zu tätigen sowie Genauigkeits- und Messparameter zu definieren, die es bei der praktischen Umsetzung einzuhalten gilt.

3.1 Wahl der optischen Messverfahren

Prinzipiell lässt sich die Photogrammetrie zum einen in terrestrische und Luftbildphotogrammetrie sowie zum anderen in Einbild-, Stereo- und Mehrbildphotogrammetrie unterscheiden [Stier u. Haupt 2017]. Bei der Aufnahme der Testobjekte, den Getreidepflanzen, sollen deswegen drei unterschiedliche optische Messgeräte eingesetzt werden, da mit ihrer Verwendung eine Abdeckung von unterschiedlichen Arten und Verfahren der Photogrammetrie vorgenommen wird. Somit kann nach Auswertung der Ergebnisse eine generelle Aussage über die Eignung optischer Messgeräte getroffen werden. Zunächst soll die Aufnahme der Pflanzen mit einer einzelnen Kamera terrestrisch erfolgen, um einen relativ simplen Aufbau

und manuellen Aufnahmeprozess zu testen. Im Folgenden wird diese Art der Aufnahme als Monokamerasystem bezeichnet. Zum anderen soll der Aufnahmeprozess mit einem Zweikamerasystem erfolgen, durch den aufgrund der stereografischen Aufnahmeart eine andere Variante der optischen Messung untersucht wird. Dieser Aufnahmeprozess wird ebenfalls terrestrisch durchgeführt. Zuletzt soll mit einer UAV eine Luftbildmessung vorgenommen werden, welches sich nochmals von den anderen beiden Messverfahren unterscheidet. Entsprechend der Verwendung einer UAV ergibt sich für diese Variante die Bezeichnung „Aufnahme mit einem UAV-System". Bei den jeweiligen Verfahren sollen die Aufnahmen in Form einer Bildflugplanung vorab geplant werden (vgl. Kapitel 2.2), auch wenn nur bei dem UAV-System eine Überfliegung des Gebiets ausgeführt wird.

3.2 Forderungen und Kriterien für die praktische Durchführung

Durch Wind kann es zu Verwehungen der Aufnahmeobjekte sowie zur Bewegung der Aufnahmegeräte kommen. Bei Regen ist ein Einsatz der UAV nicht realisierbar und die Aufnahmen der anderen optischen Messgeräte können durch Reflektionen der Regentropfen verfälscht werden. Daher sind zur Erzielung optimaler Ergebnisse der optischen Messungen Voraussetzungen wie Windstille und Trockenheit am Aufnahmetag für alle drei Aufnahmeverfahren einzuhalten.

Die Aufnahmehöhe muss vor Beginn der optischen Messungen jeweils bestimmt sein. Dabei ist die Höhe der Testobjekte zu berücksichtigen, da ein gewisser Mindestabstand zwischen Aufnahmehöhe und dem höchsten, der Kamera am nächsten liegenden Objekt gewährleistet werden soll. Bei der Aufnahme mit dem UAV-System ist zu beachten, dass die Rotoren der Drohne einen Abwind erzeugen, weshalb ebenfalls ein Mindestabstand eingehalten werden muss. Außerdem bildet die Aufnahmehöhe die Grundlage für die Einhaltung der Überlappungsanforderung sowie der Genauigkeitsabschätzung (vgl. Kapitel 2.4).

Da die Aufnahmen der Testobjekte miteinander verknüpft werden sollen (vgl. Kapitel 2.5), ist eine angemessene Längs- und Querüberlappung der Bilder zu erfüllen. Aus diesem Grund müssen für alle drei Verfahren entsprechend der Größe des Aufnahmegebiets Aufnahmerouten festgelegt werden. Die Anzahl der Beobachtungsstreifen (siehe Abbildung 14) ist dabei, zusätzlich zur Größe des Testgebiets, auch in Abhängigkeit der Aufnahmehöhe, da sich so die Größe der einzelnen Bilder verändert, zu bestimmen.

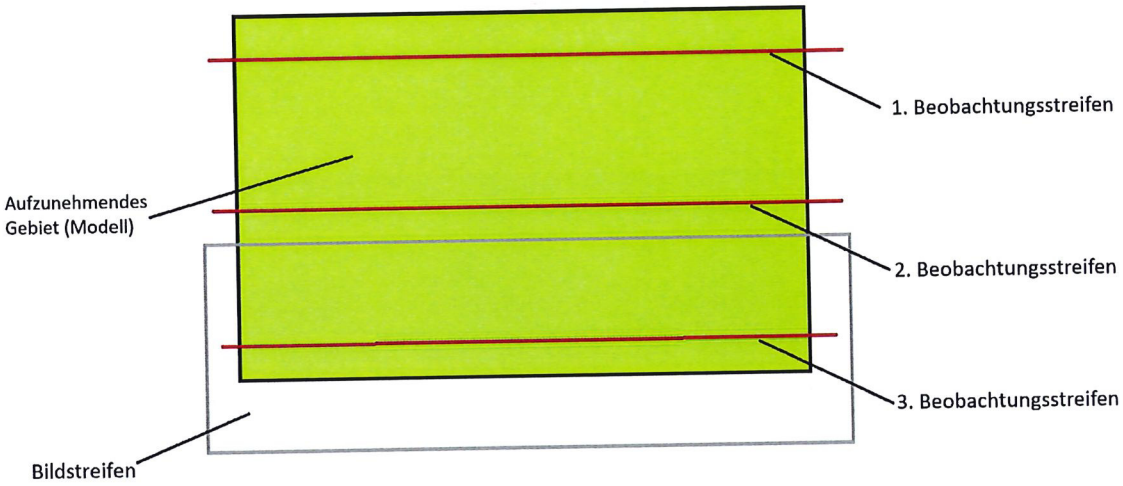

Abbildung 14: Darstellung der Beobachtungsstreifen
Eigene Darstellung

Durch Berücksichtigung derselben zwei Größen ist auch die Wahl der Aufnahmestandorte (Wahl der Aufnahmeabstände) entlang der Beobachtungsstreifen zu treffen. Als Genauigkeitsvorgabe soll eine Aufnahmegenauigkeit von maximal 1cm gelten, da somit eine akzeptable Detailerkennbarkeit der Aufnahmeobjekte gewährleistet ist und eine Aussage über die Realisierungsmöglichkeiten der Verfahren für das Pflanzenmonitoring getroffen werden kann.

Als Genauigkeitsabschätzung für das Monokamerasystem ist die Bodenauflösung aus der Aufnahmehöhe und der Pixelgröße des Sensors zu bestimmen. Für die stereoskopische Messung ist entsprechend der Vorgabe vorab eine Genauigkeitsabschätzung der Aufnahmepunkte durchzuführen, um dadurch die Wahl der Basis für die spätere Messung festlegen zu können (vgl. Anhang A.6 und A.7). Für das UAV-System wird dies erst nach der Aufnahme durchgeführt, da aufgrund der fehlenden Stereoskopie, die Genauigkeitsabschätzung erst nachträglich aus den Bildern errechnet werden kann (vgl. Kapitel 2.4).

4 Praktische Durchführung

In diesem Abschnitt folgt die Beschreibung der praktischen Umsetzung des in Kapitel 3 aufgestellten Konzepts. Dabei sind die einzelnen Arbeitsschritte, die zu einer möglichen Bestimmung der Wachstumsparameter der Getreidepflanze mittels optischer Messverfahren durchgeführt werden, dargestellt. Im ersten Schritt werden Bildaufnahmen von einem Modell mehrerer Getreidepflanzen gemacht, um so die theoretische Durchführbarkeit zu testen. Anschließend wird das Gleiche für ein Testgebiet mit realen Pflanzen wiederholt. Dafür werden drei optische Messverfahren (1, 2, 3) eingesetzt (vgl. Kapitel 3). Hierbei

erfolgt eine Bewertung ihrer Vor- und Nachteile sowie Realisierungsmöglichkeit. Im Anschluss an die Aufnahmen erfolgt die Verarbeitung der Bildaufnahmedaten mit Hilfe des Bildverarbeitungsprogramms PhotoScan. Im vierten und letzten Schritt werden unterschiedliche Weiterverarbeitungsmöglichkeiten des dreidimensionalen Modells, welches zuvor mit dem Bildverarbeitungsprogramm erstellt wurde, erläutert. Dabei geht es um die Bestimmung der Höhen aller Punkte sowie die Selektierung der Blattflächen der Getreidepflanzen. Außerdem soll die Ausrichtung der selektierten Flächen ermittelt werden.

4.1 Beschreibung der Ausgangssituation und des Testgebiets

Das Testgebiet, welches mit verschiedenen optischen Messgeräten aufgenommen wird, befindet sich am Rand des Ortes Ruthe (vgl. Anhang 5). Auf dem Testgebiet befinden sich eine Vielzahl von abgesteckten Parzellen, auf denen Getreidepflanzen angebaut werden. Die Getreidepflanzen dienen als Aufnahmeobjekte (siehe Abbildung 15). Ein Testfeld entspricht je einer durch schmale Pfade abgegrenzten Parzelle, auf welcher die Pflanzen aufgenommen werden.

Abbildung 15: Testfeld
Eigene Darstellung

4.2 Bildaufnahme des Testgebiets

Entsprechend dem in Kapitel 3 aufgestellten Aufnahmekonzept wird im Folgenden die Durchführung der optischen Messung des Testgebiets beschrieben. Die Aufnahmedurchführung wird dabei für die drei unterschiedlichen Verfahren separat und in der Reihenfolge der Ausführung erklärt.

4.2.1 Monokamerasystem

Bei der ersten der drei Aufnahmedurchführungen wird das Testgebiet mit einer einzelnen Kamera zur optischen Messung der Pflanzen aufgenommen. Die Aufnahmekonfiguration entspricht dabei der Mehrbildaufnahme (vgl. Kapitel 2.3.3). Dabei wird die Kamera vom Typ EOS 750D der Firma Canon verwendet.

Das Verfahren wird als erstes durchgeführt, da vor der Aufnahme realer Pflanzenobjekte anhand eines Modells die Ausführbarkeit getestet werden soll und dies mit dem Monokamerasystem am einfachsten zu realisieren ist (siehe Abbildung 16). Durch die Testmessung kann unter Modellbedingungen die Ausführungs- und Umsetzungsmöglichkeit von optischen Messverfahren zur Aufnahme von Pflanzen geprüft werden, bevor es zur Untersuchung unter realen Bedingungen kommt. Sollte die Durchführung die Aufnahme des Modells nicht erfolgreich sein, ist eine weitere Untersuchung unter realen Bedingungen hinfällig. Auf dem Modelltestfeld sind die Modellpflanzen dabei entlang mehrerer Bahnen gleichmäßig angeordnet, sodass jede für sich vollständig, also ohne Verdeckungen, sichtbar ist. Auch sind die Modellpflanzen alle gleich groß. Die Pflanzennachbildungen bestehen aus dünnem Eisen, wodurch sie starr und unbeweglich und somit gegenüber Wind oder leichter Erschütterung unempfindlich sind. Dieser Modellaufbau dient dazu, Probleme, die bei der Aufnahme realer Pflanzen auftreten können, zu eliminieren.

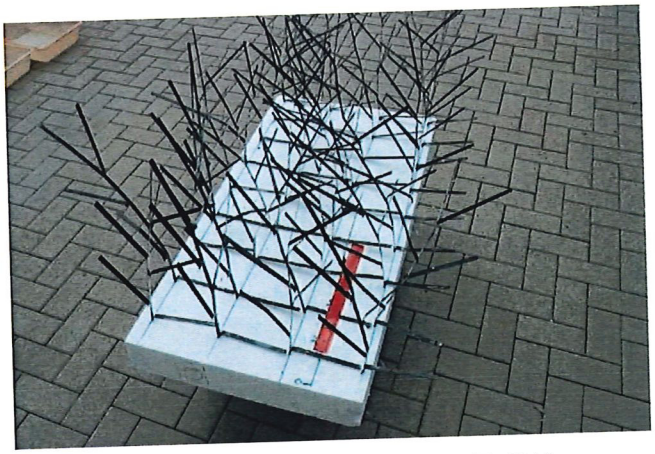

Abbildung 16: Modellaufbau eines Testfeldes
Eigene Darstellung

Als Aufnahmemodus wird bei der Kamera der Videomodus gewählt, um so eine durchgängige und gleichmäßige Bildaufnahme zu garantieren. Dadurch kommt es zu der geforderten Längsüberdeckung der Bilder. Die Bildauflösung der Kamera im Videomodus liegt bei 1.920 x 1.080 Bildpunkten. Dies ist deutlich geringer als bei Aufnahmen im Einzelbildmodus (6.000 x 4.000). Für die anschließende Bildauswertung ist diese Auflösung jedoch entsprechend der Genauigkeitsanforderungen angemessen. Das Modell wird dabei aus ca.

1,40 m Höhe entlang von drei vorab geplanten Beobachtungsstreifen aufgenommen. Durch die Aufnahme entlang der drei Bahnen wird eine angemessene Querüberlappung der Bilder des Aufnahmedurchgangs erzielt (vgl. Kapitel 2.2 und Kapitel 3). Eine höhere Anzahl an Streifen wäre ebenfalls möglich, da so die Überlappungsfläche der Bilder in Querrichtung noch größer werden würde. Angesichts der Genauigkeitsanforderungen ist die gewählte Überlappung jedoch ausreichend. Die aufgenommenen Bilder müssen dann für eine anschließende Weiterverarbeitung und Auswertung auf einen Computer übertragen und gespeichert werden. Dieser Prozess wird in Kapitel 4.3 näher erläutert.

Nachdem der Aufnahmeprozess anhand des Modells durchgeführt wurde, erfolgt die optische Messung der Getreidepflanzen auf dem realen Testgebiet (siehe Abbildung 15). Die aufzunehmende Parzelle ist 1,50 m x 3,00 m groß. Die Höhe der Pflanzen der Parzelle wird an mehreren Stellen mit einem Zollstock bestimmt und für das Gesamtgebiet abgeschätzt. Die ermittelte Höhe liegt bei ungefähr 0,40 m. Die Aufnahmehöhe beträgt ca. 1,20 m. Dadurch ist ein akzeptabler Abstand zwischen Kamera und Pflanzenoberkante gegeben. Wie im Konzept gefordert, wird zur Erzielung optimaler Ergebnisse der optischen Messungen ein windstiller und trockener Aufnahmetag gewählt. Da das reale Testgebiet etwas größer ist als das Modell, erfolgt die Aufnahme der Getreidepflanzen dabei entlang von vier Beobachtungsstreifen. Durch die Aufnahme entlang von vier Bahnen ist eine ausreichende Querüberlappung der Bilder gewährleistet. Wie beim Messprozess des Modells wird auch bei den Aufnahmen des Testgebiets der Videomodus verwendet. Der Grund dafür ist ebenfalls, dass so ein gewisser Grad an Überlappung der Bilder in Längsrichtung erreicht werden kann und durch den Videomodus eine fortlaufende Aufnahme des Testgebiets gewährleistet ist.

Nachdem alle vorbereitenden Maßnahmen, beispielsweise die Einstellungen des Aufnahmegeräts, abgeschlossen sind, können die Getreidepflanzen im Testgebiet mit dem Monokamerasystem aufgenommen werden.

4.2.2 Zweikamerasystem

Bei dem zweiten Aufnahmedurchgang des Testgebiets wird mit einem Zweikamerasystem gearbeitet. Dadurch kann direkt eine stereoskopische Messung erfolgen und die Aufnahmekonfiguration entspricht der Stereobildaufnahme (vgl. Kapitel 2.3.2). Dabei werden zwei Kameratypen verwendet, die konvergent zueinander aufgestellt sind. Es handelt es sich um die EOS 750D und die EOS 1100D der Firma Canon.

Bevor der Aufnahmeprozess beginnen kann, wird das Zweikamerasystem zusammengebaut. Dafür werden die beiden Kameras mit einer Basis von 0,40 m an einem Teleskopstab angebracht. Die Basis ist dabei der Abstand der zwei Aufnahmeachsen der Kameras. Die Berechnung dieser Basis ist im Anhang 6 genauer erläutert. Anschließend erfolgt die Montage des Teleskopstabs mit den Kameras an einem Fahrradlenker. Der Stab ist dabei so befestigt, dass dieser sich nicht bewegen kann und die Kameras somit stabile Positionen haben (siehe Abbildung 17). Anschließend werden beide Kameras auf einen gemeinsamen Punkt ausgerichtet und in der Halterung festgestellt. Dies bewirkt, dass die eingestellte Aufnahmerichtung auch bei der Bewegung des Fahrrades gleichbleibt. Nachdem die Montage der Kameras und ihrer Halterungsvorrichtung abgeschlossen ist, ist die Konstruktion des Zweikamerasystems für die Bildaufnahme einsetzbar.

Die Lenker- und Stabhöhe liegen bei 1,05 m. Da die Kameras unterhalb des Teleskopstabes angebracht sind, ist die Kamerahöhe etwas niedriger und liegt bei 0,95 m über dem Boden des Testgebiets. Die Höhe der Pflanzen der Parzelle wird wie beim Monokamerasystem abgeschätzt und liegt bei ungefähr 0,45 m. Somit ergibt sich eine kurze, aber akzeptable Distanz zwischen Aufnahmegerät und Aufnahmeobjekt. Die aufzunehmende Parzelle ist wie beim ersten Aufnahmedurchgang 1,50 m x 3,00 m groß. Die Aufnahme der Getreidepflanzen erfolgt dabei entlang von vier Beobachtungsstreifen, da so eine für die spätere Auswertung angemessene Querüberlappung der Bilder garantiert wird. Die Aufnahmeroute ist identisch zu dem des Monokamerasystems. Das Fahrrad wird dabei entlang der Parzelle bewegt und die Kameras auf dem Teleskopstab so positioniert, dass sie jeweils entlang des Beobachtungsstreifens das Testgebiet aufnehmen. Zur Erzielung optimaler Ergebnisse der optischen Messungen ist ein windstiller und trockener Aufnahmetag gewählt (vgl. Kapitel 3). Wie bei den bisherigen Messprozessen wird auch bei den Aufnahmen des Testgebiets mit dem Zweikamerasystem der Videomodus verwendet. Grund dafür ist ebenfalls die Erreichung einer ausreichenden Überlappung der Bilder. Die Auflösung der Videos ist bei beiden Kameras ähnlich (vgl. Anhang A.1 und A.2). Die Videoaufnahmen beider Kameras werden jeweils gleichzeitig gestartet und beendet. Damit ist gewährleistet, dass bei der späteren Auswertung zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Videosequenz die Videobilder der Kameras die gleichen Objekte zeigen.

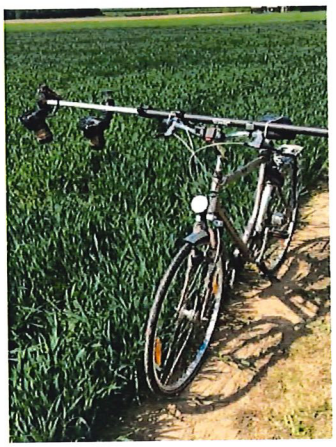

Abbildung 17: Zweikamerasystem
Eigene Darstellung

Nachdem der Aufbau abgeschlossen, die Vorgaben des Konzepts eingehalten und alle Einstellung an den Kameras getätigt worden sind, kann die gleichzeitige Aufnahme der Getreidepflanzen auf dem Testgebiet durch das Zweikamerasystem erfolgen.

4.2.3 Unmanned Aerial Vehicle

Für die dritte Aufnahmedurchführung wird eine UAV eingesetzt. Die Aufnahmekonfiguration entspricht der Mehrbildaufnahme (vgl. Kapitel 2.3.3). Die eingesetzte UAV ist der Aibot X6 von der Firma Hexagon (siehe Abbildung 18). Die Messung wird in Form einer Luftbildmessung durchgeführt.

Abbildung 18: Einsatz der Aibot X6
Eigene Darstellung

Als Aufnahmegebiet wird eine größere Fläche in Form von mehreren Parzellen definiert, da aufgrund der deutlich höheren Aufnahmehöhe im Vergleich zu den ersten beiden Bildaufnahmedurchgängen mit einem einzelnen Bild bereits mehrere Parzellen erfasst werden können. Die UAV fliegt mehrere Durchläufe über das Testgebiet, sogenannte Überflüge.

Die UAV befindet sich bei den einzelnen Durchläufen auf unterschiedlichen Aufnahmehöhen (6 m, 8 m, 10 m und 15 m), um die vorteilhaftesten Bedingungen zu ermitteln. Diese sind bei 8 m gegeben, weshalb auch nur die Aufnahmen aus diesem Durchgang weiter ausgewertet werden. Bei 8 m Flughöhe ist die Mindesthöhe erreicht, in der auf die Pflanzen keine Auswirkungen durch den Rotorenabwind der Drohne festzustellen sind. Da mit dieser Aufnahmehöhe schon eine deutlich größere Fläche als notwendig erfasst wird, ist eine noch größere Aufnahmehöhe nicht erforderlich. Die Höhe der Pflanzen liegt bei ca. 0,70 m.

Bei den Überflügen werden entlang von nur einem Beobachtungsstreifen optische Messungen durchgeführt. Aufgrund der Aufnahmehöhe von 8 m ist die Aufnahmefläche groß genug, um die Parzellen entlang von nur einem Streifen vollständig zu erfassen. Der Beobachtungsstreifen zieht sich dabei mittig durch das Testgebiet. Dabei erfolgt die Aufnahme bei einem Aufnahmedurchgang (Überflug) das Testgebiet sowohl beim Hin- als auch beim Rückweg. Durch die doppelte Aufnahme erhöht sich die Anzahl an überschneidenden Bildern und ermöglicht eine bessere Auswertung. Des Weiteren wird bei der Kamera der UAV kein Videomodus verwendet. Es werden einzelne Bilder in immer gleichen Abständen aufgenommen. Aufgrund der Aufnahmehöhe und der entsprechenden Bildgröße sind ausreichende Längsüberlappungen der Bilder entlang des Beobachtungsstreifens garantiert. Daher wäre eine Aufnahme per Video wie bei den anderen Bildaufnahmedurchgängen nicht vorteilhaft. Als Aufnahmezeitpunkt wird, wie auch bei den vorherigen Bildaufnahmedurchgängen, ein trockener und möglichst windstiller Tag gewählt (vgl. Kapitel 3).

Bevor der Bildflug per UAV beginnt, ist ihre genaue Position zu bestimmen. Dieses geschieht mit Hilfe einer Realtime-Kinematic-Einheit (RTK), die gewährleistet, dass die Position der UAV auch während des Überfluges ermittelt und bekannt ist. Damit ist auch gleichzeitig die Position der Kamera während der Bildaufnahmen bekannt, was die Verknüpfung der Bilder vereinfacht und die spätere Einbindung in ein Koordinatensystem, also die Georeferenzierung (vgl. Kapitel 2.1.4) ermöglicht.

Nachdem alle Vorkehrungen getroffen, die Vorgaben des Konzepts eingehalten und die Einstellungen konfiguriert worden sind, wird die Aufnahme mittels der UAV durchgeführt.

4.3 Verarbeitung der Bildaufnahmedaten zu einem 3D-Modell

Nachdem die Aufnahmen des Testfeldes vollständig durchgeführt worden sind, erfolgt anschließend die Verarbeitung und Auswertung der Bilddaten. Dafür werden sie in ein Bildverarbeitungsprogramm eingeladen.

Als Bildverarbeitungsprogramm wird PhotoScan (vgl. Kapitel 2.8.1) verwendet, da es über alle im Folgenden benötigten Funktionen und Tools zur Verarbeitung und Auswertung der Bilddaten verfügt. Bevor dies jedoch geschieht, werden die Aufnahmedaten des Mono- und des Zweikamerasystems erst noch konvertiert. Sie liegen als Videodateien vor, da die Aufnahmen bei diesen beiden optischen Messverfahren im Videomodus durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 4.2.1 und 4.2.2). Um eine Bearbeitung in PhotoScan durchzuführen, müssen sie als Bilddateien vorliegen. Für die Konvertierung von Video- in Bilddateien wird die Software Free Video to JPG Converter verwendet (vgl. Kapitel 2.8.4).

Nachdem die Aufnahmen als Bilddaten vorliegen, beginnt die Verarbeitung der jeweiligen Bilder der einzelnen Aufnahmedurchgänge. Da die Aufnahmen von unterschiedlichen optischen Messgeräten, zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemacht wurden, werden ihre Datensätze nicht miteinander verknüpft, sondern separat voneinander verarbeitet. Als Ergebnis sollen 3D-Modelle aus den einzelnen Bilddatensätzen berechnet werden, um aus diesen weitere Informationen über verschiedene Wachstumsparameter ableiten zu können.

Zur Erstellung der Modelle sind einige Verarbeitungsschritte notwendig, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden. Obwohl die drei Bilddatensätze von unterschiedlichen Messdurchläufen stammen, ist der Ablauf der Weiterverarbeitung und Auswertung synchron. Aus diesem Grund wird der Verarbeitungsprozess von den Bilddaten zum 3D-Modell ausschließlich für einen Datensatz, den des UAV-Systems, beschrieben. Das im Folgenden beschriebene Verfahren der Gewinnung eines 3D-Modells kann simultan auf die Ergebnisse der anderen beiden Aufnahmedurchgänge angewendet werden.

Als erster Schritt muss eine innere Orientierung der Bilder vorgenommen werden. Dies geschieht automatisch beim Einladen der Bilder in PhotoScan. Die den Bildern zugehörigen EXIF-Daten enthalten dabei die nötigen Informationen für die innere Orientierung. Außerdem besitzt das Programm eine Datenbank in der verschiedene Kameratypen hinterlegt sind. Durch einstellen des Typs besitzt das Programm automatisch die Informationen für die innere Orientierung.

Nachdem die Bilddaten der UAV in das Programm geladen sind, ist die relative Orientierung (vgl. Kapitel 2.1.3) der einzelnen Bilder zu bestimmen. Nach dem Ausrichtungsschritt erfolgt die Berechnung einer dünnen Punktwolke. Im Programm entsprechen diese beiden Vorgänge einem Ausführungsschritt (siehe Abbildung 19).

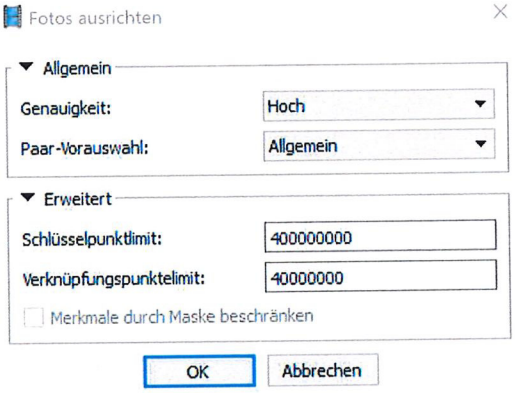

Abbildung 19: Ausrichtung der Bilder mit Punktwolkenerzeugung
Eigene Darstellung

Bevor die Ausrichtung der Bilder beginnt, sind zunächst noch einige Parameter einzustellen. Die Genauigkeit ist auf „Hoch" zu setzen, um den Suchbereich der Epipolarlinie zu verringern und dadurch die Anzahl an Zuordnungen die nicht korrekt sind zu reduzieren. Für die Paar-Vorauswahl wird die Einstellung „Allgemein" beibehalten, da dies der Standardeinstellung entspricht. Da die Anzahl an Punkten, aufgrund von beispielsweise nicht ausreichender Kapazitäten, in diesem Fall nicht reduziert werden muss, kann als Punktelimit für jedes Bild (Schlüsselpunktlimit und Verknüpfungspunktelimit) ein sehr hoher Wert gewählt werden, bei dem eine Erreichung dieser Grenze nicht erfolgt. Als Ergebnis ergibt sich eine dünne Punktwolke mit den ausgerichteten Kameras (siehe Abbildung 20).

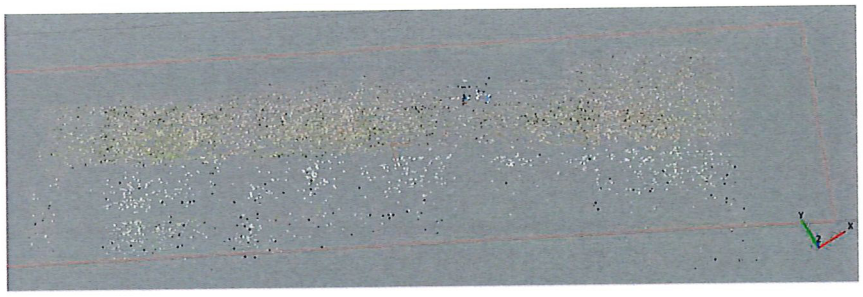

Abbildung 20: Dünne Punktwolke
Eigene Darstellung

Um die Datenverarbeitung zeitlich zu beschleunigen, erfolgt nach diesem Schritt eine Verringerung der Datenmenge. Dies geschieht durch die Selektion eins Teilstücks des gesamten Testgebiets. Das bedeutet, dass ein kleinerer Bereich der dünnen Punktwolke ausgewählt und nur dieser für die weiteren Arbeitsschritte verwendet wird. Durch die Reduzierung der Datenmenge wird gleichzeitig der Rechenaufwand verringert und somit die schnellere Durchführung der folgenden Arbeitsschritte ermöglicht (siehe Abbildung 21). Die Reduzierung der Daten ist legitim, da es hierbei um die Untersuchung der allgemeinen Realisierungsmöglichkeiten geht und dies auch mit einem kleinen Datenausschnitt durchführbar ist.

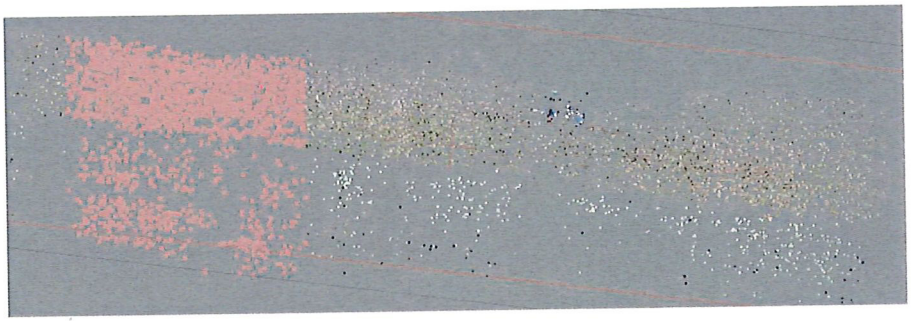

Abbildung 21: Reduzierung des Untersuchungsgebiets
Eigene Darstellung

Die im ersten Schritt berechneten Kamerapositionen werden im nächsten Schritt als Grundlage genommen, um mit Hilfe der Mehrbildtriangulation (vgl. Kapitel 2.5) detaillierte Informationen für die einzelnen Aufnahmepunkte zu bestimmen und anschließend daraus eine Kombination zu einer dichten Punktwolke durchzuführen (siehe Abbildung 22).

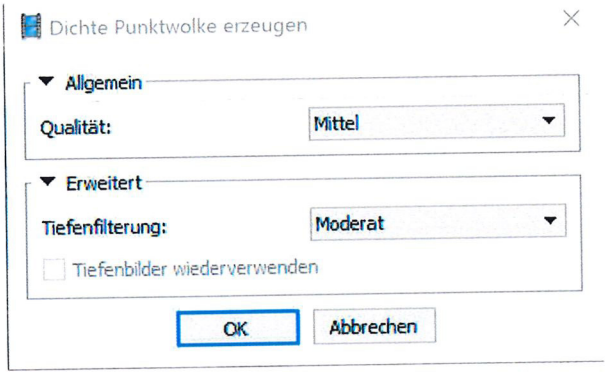

Abbildung 22: Erzeugung einer dichten Punktwolke
Eigene Darstellung

Als Einstellungen werden eine „mittlere" Qualität und eine „moderate" Tiefenfilterung verwendet. Da durch eine höhere Qualität nur die Anzahl der Punkte steigt, nicht jedoch die Genauigkeit, ist die mittlere Wahl ausreichend. Für die Tiefenfilterung wird die moderate Einstellung gewählt, da dadurch zum einen genügend mögliche Ausreißer aussortiert, aber gleichzeitig nicht zu viele kleinere Details, wie bei einer aggressiveren Filterung, verloren gehen. Nach der Durchführung dieses Programmschritts ist das Ergebnis eine dichte Punktwolke (siehe Abbildung 23).

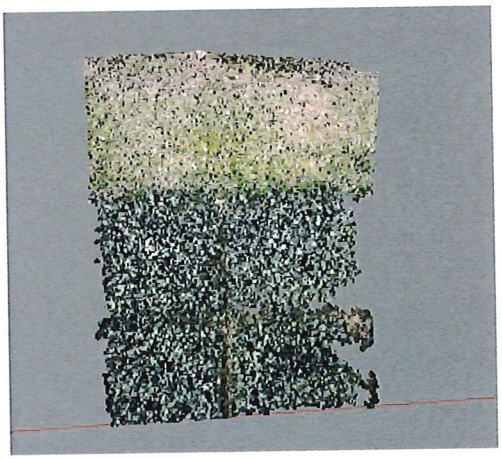

Abbildung 23: Dichte Punktwolke
Eigene Darstellung

Im dritten Schritt wird die erstellte dichte Punktwolke zu einem Gittermodell (Mesh) weiterverarbeitet. Für diesen Berechnungsschritt führt die Software eine Delauney-Triangulation (vgl. Kapitel 2.6) durch. Als Einstellung ist die Oberflächenart „Höhenfeld" gewählt. Als Grundlage (Quellendaten) wird die vorab berechnete dichte Punktwolke verwendet und eine hohe Flächenzahl gewählt, um eine entsprechend hohe Polygonzahl zu erhalten. Außerdem ist die Interpolation aktiviert, da dies der Standardeinstellung bei der Erzeugung eines Mesh entspricht (siehe Abbildung 24).

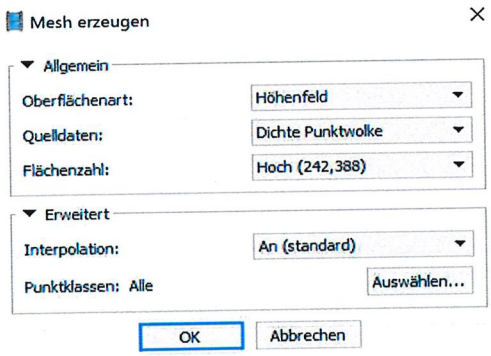

Abbildung 24: Mesherzeugung
Eigene Darstellung

Nach der Ausführung der Funktion ergibt sich ein Gittermodell sowie Gitternetz für den Ausschnitt des Testgebiets (siehe Abbildung 25).

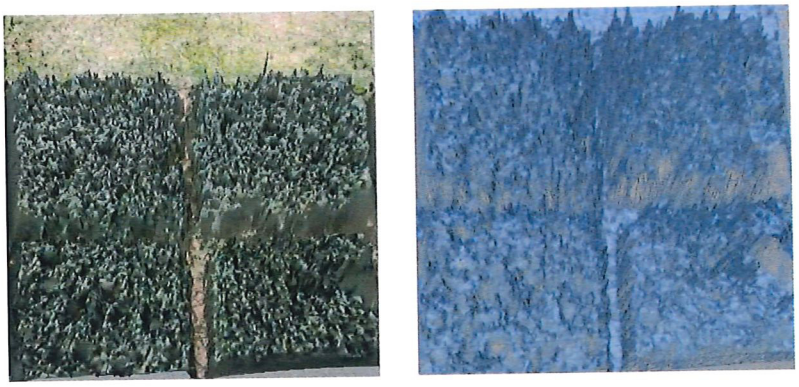

Abbildung 25: Gittermodell u. -netz
Eigene Darstellung (links Gittermodell, rechts Gitternetz)

Der vierte und letzte Schritt zur Konstruktion eines 3D-Modells ist die Erstellung der Textur. Dazu werden für jede Stelle im 3D-Modell die zugehörige Textur aus den Bildaufnahmen extrahiert. Die Extraktion wird entsprechend pixelweise durchgeführt. Der Abbildungsmodus ist dabei auf „Allgemein", der Überlagerungsmodus auf „Mosaik" und die Texturgröße auf 4096 gestellt. Dies entspricht den Standardeinstellungen von PhotoScan. Die Aktivierung der Farbkorrektur ist hierbei nicht notwendig, da bei den verwendeten Aufnahmen keine besonderen Helligkeitsunterschiede auftreten (siehe Abbildung 26).

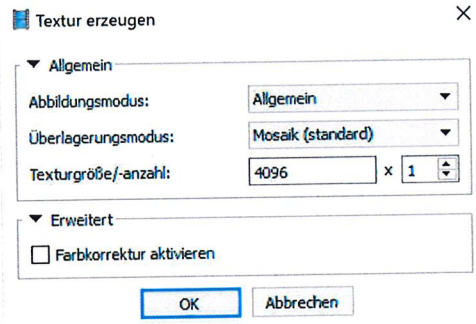

Abbildung 26: Erzeugen von Textur
Eigene Darstellung

Das Ergebnis dieses Arbeitsschritts ist dann ein texturiertes 3D-Modell des Testgebietsausschnitts (siehe Abbildung 27).

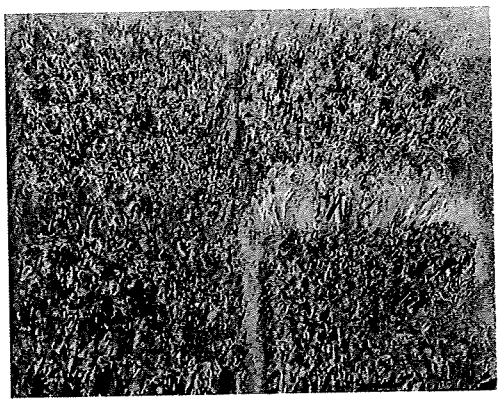

Abbildung 27: Texturiertes 3D-Modell
Eigene Darstellung

4.4 Weiterverarbeitung eines 3D-Modells

Nachdem aus den Bilddaten der verschiedenen Aufnahmedurchgänge 3D-Modelle erstellt sind, können diese zur weiteren Auswertung, hinsichtlich des Ziels Parameter des Pflanzenwachstums zu bestimmen, weiterverwendet werden. Die praktisch und theoretisch durchgeführten Weiterverarbeitungsschritte sind im Folgenden beschrieben. Die für die Durchführung angestellten Überlegungen, zum Beispiel für grundlegende mathematische Ansätze oder Berechnungsschritte sowie verschiedene Funktions- und Anpassungsmöglichkeiten durch Softwareanwendungen werden dargelegt.

4.4.1 Höhenbestimmung der Modellpunkte

Heutzutage gibt es für fast alle Getreidepflanzen Erfahrungswerte für die Höhe [Nabors 2007 S. 99], an denen erkannt werden kann, ob sich die Anbaupflanzen in einem normalen Wachstumsprozess oder in einer Form von sogenannter Wachstumsdepression befinden. Die Höhe gibt ebenfalls Aufschluss über mögliche Aufwuchsschäden [Gutachterring 2017]. Für eine Abschätzung über das Wachstumsverhalten der Pflanzen sowie die Untersuchung ihrer Ursachen, muss dementsprechend die Höhe der Pflanzen als Parameter bestimmt werden [Ehlert et al. 2010]. Diese Höhenbestimmung kann mit Hilfe von optischen Messungen erfolgen.

Als Grundlage für die folgenden Weiterverarbeitungsmöglichkeiten zur Bestimmung der Höhe dient das 3D-Modell (vgl. Kapitel 4.3). Als erster weiterer Verarbeitungsschritt soll die Höhe der einzelnen Punkte des dreidimensionalen Modells bestimmt werden. Dafür wird ein lokales Koordinatensystem dem berechneten 3D-Modell zu Grunde gelegt. Entsprechend ist für jeden Punkt des Modells eine Koordinate (x, y, z) bestimmt. Dabei ist es möglich, vorab für einzelne Punkte Koordinaten festzusetzen und bzw. oder den Ursprung so zu definieren. Wenn zum Beispiel Anschlusspunkte eines übergeordneten Systems bei

den Aufnahmen miterfasst werden, ist, durch Festlegung dieser Punkte im lokalen System, eine Überführung aller Punkte der Bilddaten in ein übergeordnetes System später realisierbar. Auch ist es möglich, Punkten, die zum Beispiel dem Untergrund, in diesem Fall Ackerboden, zugehörig sind, einen konstanten Höhenwert, wie null Meter, zuzuweisen. Dies ist zum Beispiel bei der Differenzierung von Pflanzenfläche und Boden hilfreich.

Bei dem berechneten 3D-Modell liegen die für alle Punkte Objektkoordinaten vor. Beispielhaft sind zehn Punkte ausgewählt, die alle die Spitze einer einzelnen Pflanze repräsentieren. Ebenfalls erfolgt die Wahl von zehn Punkten, die dem Boden entsprechen (siehe Abbildung 28).

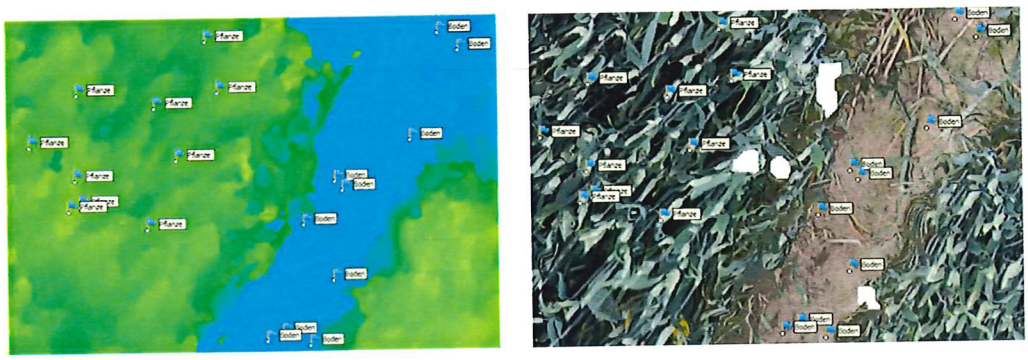

Abbildung 28: Auswahl der Punkte
Eigene Darstellung (links DEM, rechts Orthofoto)

Für alle 20 Punkte ist die jeweilige z-Koordinate (Höhe) bekannt. Durch Berechnung einer mittleren Ebene aus den einzelnen Höhen der Bodenpunkte sowie einer Ebene aus der Mittelung der einzelnen Pflanzenhöhen, ergeben sich zwei Ebenen mit unterschiedlicher Höhe. Aus diesen Werten lässt sich die Höhe der Pflanzen in Relation zum Untergrund für das gesamte Testgebiet bestimmen. Da ebenfalls die Höhen der einzelnen Pflanzen bekannt sind, kann jeweils die Abweichung zum Durchschnittswachstum sowie zu den Höhen der Erfahrungswerte bestimmt werden (siehe Tabelle 1). Aus den Werten der Beispielpunkte ergibt sich eine Differenz der beiden Durchschnittshöhen von 0,71 m.

Pflanzenhöhe	Bodenhöhe	Pflanzenhöhe bei mittlerer Bodenhöhe
72,973686	72,279541	0,6848236
72,919067	72,280273	0,6302046
72,956444	72,279915	0,6675816
73,072761	72,292824	0,7838986
72,982544	72,273163	0,6936816
72,988914	72,308372	0,7000516
72,986931	72,284599	0,6980686
73,067383	72,279526	0,7785206
73,091324	72,30204	0,8024616
72,992531	72,308371	0,7036686
Ø = 73,0031585	Ø = 72,2888624	

Tabelle 1: Höhenwerte der Punkte
Eigene Darstellung

4.4.2 Selektion der Pflanzenfläche

Die in Kapitel 4.4.1 beschrieben Höhenbestimmung ist eine manuelle Vorgehensweise zur Auswahl einzelner Punkte. Dieser Vorgang kann teileweise automatisiert werden, indem eine automatische Klassifizierung der Punkte erfolgt. Dafür ist vorab zu bestimmen, welche Punkte des Modells Pflanzen und welche beispielsweise Boden sind. Diese Unterscheidung kann in Abhängigkeit der Höhe der Punkte vorgenommen werden, indem ein Schwellwert definiert und alles unterhalb dieses Wertes als Boden klassifiziert wird. Da nach der Einführung des Koordinatensystems jeder Punkt des Modells über eine Höhe verfügt, ist die Differenzierung vollständig für das Modell möglich.

Ein weiterer Parameter, der im Zuge dessen mitbestimmt werden kann, ist der Bodenbedeckungsgrad im Anbaugebiet [Ehlert et al. 2010]. Indem ebenfalls eine Klassifizierung der Dreiecksflächen der Vermaschung erfolgt, kann in beispielsweise Blattfläche und Bodenfläche unterschieden werden. Dabei würden die zwischen drei Punkten der Klasse Boden aufgespannten Dreiecksflächen einer Klasse Bodenfläche zugewiesen und entsprechend die aus drei Punkten der Klasse „Pflanze“ aufgespannten Dreiecksflächen einer Klasse „Blattfläche“. Anschließend wäre eine Anteilsberechnung der jeweiligen Klassen an der Gesamtfläche des Feldes durchzuführen.

4.4.3 Bestimmung der Blattausrichtung

Neben der Bestimmung von Parametern aus denen unterschiedliches Pflanzenwachstum abgeleitet werden kann, ist die Ermittlung der Parameter für die möglichen Ursachen ebenfalls hilfreich. Zum Beispiel ist Licht ein entscheidender Faktor für das Wachstum der

Pflanzen [Ebrecht 2005 S. 25], wobei Stärke und Dauer des Lichteinfalls unter anderem von der Position des Objekts gegenüber der Lichtquelle (Sonne) abhängig sind. Dementsprechend ist als ein Ursachenparameter die Ausrichtung der Blätter gegenüber der Sonne zu bestimmen. Dafür ist von den einzelnen Pflanzen der Winkel ihrer Blattfläche zur Sonne zu ermitteln.

Als erstes ist dafür auf jede Dreiecksfläche, die im vorherigen Arbeitsschritt als „Blattfläche" klassifiziert wurde (vgl. Kapitel 4.4.2), ein Normalenvektor (vgl. Kapitel 2.7) aufzustellen. Dieser Vektor spiegelt die Ausrichtung der Blattfläche wieder. Zum besseren Verständnis für die Bestimmung des Normalenvektors ist im Folgenden die Durchführung der Berechnung für drei Blattflächen beispielhaft dargestellt.

Als nächster Schritt werden aus dem berechneten 3D-Modell jeweils drei Punkte einer Blattfläche markiert und die Koordinaten der Punkte bestimmt (siehe Abbildung 29).

Abbildung 29: Punktbestimmung der Blattfläche
Eigene Darstellung

Die Koordinaten sind in Tabelle 2 aufgelistet, wobei die Punkte 1-3, 4-6 und 7-9 jeweils Punkte einer gemeinsamen Blattfläche sind.

Punktnummer i	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	555789,635992	5788610,735946	72,801
2	555789,673807	5788610,759955	72,780
3	555789,667805	5788610,781656	72,901
4	555789,632695	5788610,947191	72,915
5	555789,625769	5788610,936110	72,929
6	555789,577750	5788610,967046	72,887
7	555791,111417	5788610,166339	72,916
8	555791,040311	5788610,154334	72,929
9	555791,023228	5788610,169571	73,002

Tabelle 2: Koordinaten der Blattpunkte
Eigene Darstellung

Anschließend ist aus den Koordinaten die Ebene zu bestimmen. Die Gleichung der Ebene ergibt sich wie folgt:

$$\text{E: } \vec{x}_{i,i+1,i+2} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} + \alpha * \underbrace{\begin{pmatrix} x_{i+1} - x_i \\ y_{i+1} - y_i \\ z_{i+1} - z_i \end{pmatrix}}_{\triangleq \mathrm{R}_1} + \beta * \underbrace{\begin{pmatrix} x_{i+2} - x_i \\ y_{i+2} - y_i \\ z_{i+2} - z_i \end{pmatrix}}_{\triangleq \mathrm{R}_2} \tag{4.1}$$

Durch das Einsetzen der Werte aus Tabelle 2 ergeben sich die Ebenen E: $\vec{x}_{1,2,3}$, E: $\vec{x}_{4,5,6}$ und E: $\vec{x}_{7,8,9}$. Für jede der drei Ebenen ist dann ein Normalenvektor $n = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix}$ zu bestimmen. Dafür wird jeweils das Skalarprodukt S des Normalenvektors mit dem ersten und dem zweiten Richtungsvektor der Ebene (R_1und R_2) wie folgt gebildet:

$$S_1 = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{i+1} - x_i \\ y_{i+1} - y_i \\ z_{i+1} - z_i \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad S_2 = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{i+2} - x_i \\ y_{i+2} - y_i \\ z_{i+2} - z_i \end{pmatrix}. \tag{4.2}$$

Es ergeben sich entsprechend zwei Gleichungen für S_1 und S_2, aus denen die Parameter von n zu bestimmen sind. Da es sich bei n um einen orthogonalen Vektor handelt, der überall auf der Ebene stehen kann, darf für einen der Werte von n, zum Beispiel $n_2 = 1$ angenommen werden. Entsprechend lassen sich aus den beiden Gleichungen die zwei weiteren Größen von n, in diesem Fall n_1 und n_3 bestimmen.

Durch das Einsetzen der Werte der drei Ebenen E: $\vec{x}_{1,2,3}$, E: $\vec{x}_{4,5,6}$ und E: $\vec{x}_{7,8,9}$ in die Formel 4.2 und anschließender Bestimmung der Normalenvektoren ergeben sich folgende Größen für n:

$$n_{1,2,3} = \begin{pmatrix} -0{,}755 \\ 1 \\ -0{,}217 \end{pmatrix} \qquad n_{4,5,6} = \begin{pmatrix} -0{,}03 \\ 1 \\ 0{,}775 \end{pmatrix} \qquad n_{7,8,9} = \begin{pmatrix} -0{,}259 \\ 1 \\ -0{,}216 \end{pmatrix}$$

Von diesen Vektoren ist anschließend der jeweilige Winkel gegenüber dem Vektor zur Sonne zu berechnen. In der folgenden Abbildung wird beispielhaft für vier Ebenen einer Dreiecksvermaschung der Winkel zwischen dem Normalenvektor der Ebene und dem Richtungsvektor zur Sonne dargestellt (siehe Abbildung 30). Aufgrund der großen Distanz der Ebenen (Pflanzenoberfläche) zur Sonne und dem im Verhältnis minimalen Abstand zwischen den Ebenen wird für die Richtungsvektoren die Annahme der Parallelität angenommen.

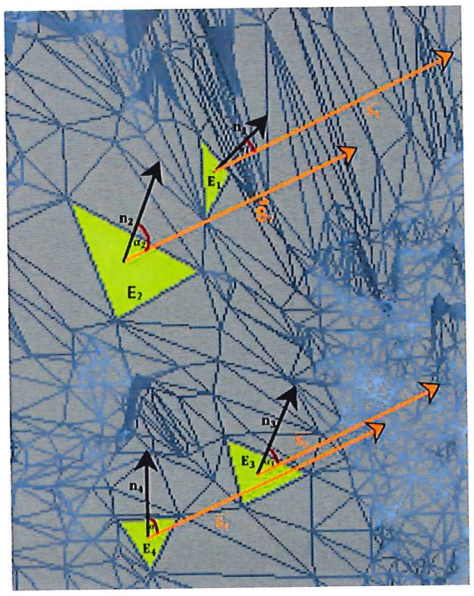

Abbildung 30: Ausrichtungswinkel zur Sonne
Eigene Darstellung

In der Abbildung 30 bedeuten:

E_n … Ebene mit n = 1,2,3,4

n_n … Normalenvektor der Ebene E_n

S_n … Vektor in Richtung der Sonne

Die Position der Sonne bzw. der Sonnenstand muss zur Definition des Sonnenvektors bekannt sein. Dafür sind die Positionsinformationen aus astrologischen Daten zu entnehmen. Die Position der Sonne sowie die Pflanzenposition müssen in einem gemeinsamen Koordinatensystem bekannt sein. Da die Sonnenposition in einem übergeordneten Koordinatensystem angegeben wird, ist eine Georeferenzierung der Aufnahmedaten notwendig, um eine Überführung der Pflanzenpositionen in das gleiche System zu ermöglichen. Da die Sonne im Laufe des Tages die Position verändert, ist die Sonnenposition als zeitabhängige Variable in die Berechnung einzuführen und der Ausrichtungswinkel entsprechend zeitabhängig zu bestimmen. Hierfür existieren bereits teils Softwarelösungen, wie zum Beispiel in Meshlab oder ArcScene, bei denen die Position der Lichtquelle (Sonne) variiert bzw. definiert werden kann [Esri 2016].

Durch eine Simulation der Sonnenposition ist zudem die Verdeckung der Blattflächen durch den Schattenwurf benachbarter Pflanzen oder Objekte bestimmbar, was ebenfalls ein relevanter Parameter ist, der sich auf das Wachstum auswirkt [Pedmale 2015]. Denn je größer die verschattete Fläche, desto kleiner ist der bestrahlte Anteil und somit auch der Beleuchtungsanteil insgesamt.

5 Einsatzuntersuchung optischer Messverfahren

In diesem Abschnitt werden die im vorausgegangenen Kapitel durchgeführten Arbeitsschritte und die erzielten Ergebnisse analysiert werden. Da die Durchführung der einzelnen Aufnahmeprozesse in Kapitel 3 und 4 bereits detailliert beschrieben ist, wird bei der folgenden Analyse darauf verzichtet. Es wird der Fokus auf die Bewertung bezüglich der Einsätze der verwendeten optischen Messverfahren gelegt. Dabei wird zwischen den drei unterschiedlichen Aufnahmeverfahren unterschieden. Zunächst folgt eine Darlegung der Eigenschaften, Möglichkeiten und Probleme der einzelnen Verfahren. Abschließend erfolgt ein direkter Vergleich der drei Verfahren.

5.1 Monokamerasystem

Die Aufnahmekonfiguration „Mehrbildaufnahme" wurde beim Monokamerasystem angewendet. Die Materialkosten sind sehr gering, da außer dem optischen Messgerät keine weiteren Geräte notwendig sind. Beim Einsatz der Kamera ist keine Aufbau- oder Vorbereitungszeit nötig. Der Aufnahmeprozess kann direkt gestartet werden. Einzig eine Einstellung des Aufnahmemodus ist vorzunehmen, was prinzipiell mit einem Zeitaufwand von Null entspricht.

Die Zeit für die Durchführung einer Aufnahme des Testgebiets beträgt ungefähr sechs Minuten (sechs Aufnahmestreifen à eine Minute pro Streifen). Die Aufnahmehöhe kann freigewählt bzw. einfach variiert werden. Beim Durchführen der Aufnahmen ist es allerdings sehr problematisch, eine konstante Aufnahmehöhe und -bahn zu halten. Leichte Variationen sind nicht zu verhindern. Die fehlende Konstanz wirkte sich bei der späteren Kalibrierung und Orientierung der Bilder in der Auswertungssoftware negativ aus. Die Aufnahmeauflösung liegt aufgrund des Videomodus bei 1.920 x 1.080 Bildpunkten. Die GSD der Bilder liegt aufgrund der geringen Entfernung im Submillimeterbereich bei 0,42 mm (siehe Anhang 9).

Nachdem die Aufnahmen getätigt worden sind, können sie nicht direkt zur Weiterverarbeitung in PhotoScan eingeladen werden. Aus den Videodaten müssen vorab mit Hilfe einer Videokonvertierungs- und Videobearbeitungssoftware Einzelbilddaten erstellt werden. Dazu ist eine weitere Software nötig und verursacht zusätzlich Bearbeitungszeit, da die Konvertierung bei der Datenmenge einiges an Rechenzeit verursacht.

5.2 Zweikamerasystem

Bei der Nutzung des Zweikamerasystems wurde die Aufnahmekonfiguration "Stereobildaufnahme" verwendet. Die Materialkosten sind hierbei relativ gering. Es werden zwei Kameras als optische Messgeräts benötigt. Des Weiteren ist ein Gestell notwendig, um die Stereoaufnahme zu ermöglichen. Um die Kameras parallel und fest auf dem Gestell (am Fahrrad) zu installieren sowie sie auf denselben Aufnahmebereich einzustellen ist eine Vorbereitungszeit von ca. 15 Minuten nötig.

Anschließend kann der Aufnahmeprozess gestartet werden. Wichtig dabei ist das gleichzeitige Starten der Aufnahmedurchgänge bei beiden Kameras. Die Aufnahmezeit beträgt ungefähr acht Minuten. Dieser Wert ergibt sich aus der Zeit während die Aufnahmen gemacht werden (vier Aufnahmestreifen à eine Minute pro Streifen) und zusätzlich derselben Zeit die benötigt wird, um das Zweikamerasystem wieder an die Position für den nächsten Aufnahmestreifen zu bringen.

Die Aufnahmehöhe ist aufgrund der Gestellhöhe des Zweikamerasystems auf 0,95 m beschränkt. Die Aufnahmehöhe kann durch die Befestigung konstant gehalten werden. Einzig leichte Unebenheiten entlang der Aufnahmebahn könnten zu minimalen Schwankungen in der Höhe führen, was bei der späteren Weiterverarbeitung in PhotoScan jedoch keine Probleme verursacht. Die Aufnahmeauflösung liegt aufgrund des Videomodus bei 1.920 x 1.080 bzw. 1280 x 720 Bildpunkten. Die Objektgenauigkeit δ_z der Bilder liegt aufgrund der geringen Entfernung und der kurzen Basis im Submillimeterbereich bei 0,8 mm (vgl. Anhang 7). Aufgrund der kleinen Distanz ist auch der GSD-Wert relativ klein.

Die getätigten Aufnahmen können nicht direkt zur Weiterverarbeitung in PhotoScan geladen werden. Aus den Videodaten sind vorab mit Hilfe einer Videokonvertierungs- und Videobearbeitungssoftware Einzelbilddaten zu erstellen. Dazu ist eine zusätzliche Software nötig. Des Weiteren verursacht die Konvertierung zusätzlich Bearbeitungszeit, da die Konvertierung bei der Datenmenge (von zwei Kameraaufnahmen) einiges an Rechenzeit verursacht.

5.3 UAV-System

Wie beim Monokamerasystem wird auch hier als Aufnahmekonfiguration die Mehrbildaufnahme gewählt. Neben der einzelnen Kamera ist entsprechend auch noch eine Drohne im Einsatz, um die Kamera zu tragen. Dies führt zu relativ hohen Materialkosten. Bevor die UAV eingesetzt werden kann, sind einige Vorbereitungen und Einstellungen zu treffen. Dem

entsprechend ergibt sich eine Vorbereitungszeit von knapp zehn Minuten. Auch sind Windstille sowie trockenes Wetter sehr wichtig, um gute Ergebnisse zu erzielen. Bei stärkerem Wind ist ein Einsatz der UAV nicht realisierbar. Bei relativer Windstille ist es möglich, die UAV wie auf einer Schiene, konstant in Höhe und Geschwindigkeit, über das Testgebiet fliegen zu lassen.

Nach der Vorbereitungsphase kann die optische Messung beginnen. Die Objektgenauigkeit in Bildstrahlenrichtung δ_z der Bilder liegt aufgrund der höheren Entfernung im Schnitt bei ca. 7 mm. Die Objektgenauigkeit senkrecht zur Bildstrahlenrichtung δ_{xy} liegt bei 3,1 mm (vgl. Anhang 8). Durch die deutlich höhere Entfernung wird auch die Bodenauflösung (GSD) größer.

Da die Position der UAV zu jedem Zeitpunkt der Aufnahme durch die eingesetzte RTK-Einheit bekannt sowie die Aufnahmehöhe konstant ist, erfolgt die später folgende Orientierung der Bilder in PhotoScan deutlich einfacher und schneller. Eine Georeferenzierung der Bilddaten ist durch die RTK-Einheit möglich, was beispielsweise für die Bestimmung einiger Parameter aus den 3D-Modellen zwingend erforderlich ist (vgl. Kapitel 4.4.3). Außerdem können die getätigten Aufnahmen direkt zur Weiterverarbeitung in PhotoScan eingeladen werden, da es sich bei den Daten bereits um Einzelbilder handelt.

Die Aufnahmezeit beträgt bei diesem Gebiet ungefähr fünf Minuten. Dieser Wert ergibt sich aus der Zeit während die Aufnahmen gemacht werden und der Zeit die benötigt wird, um die UAV aufsteigen und landen zu lassen. Dabei ist anzumerken, dass das Aufnahmegebiet deutlich größer ist, als bei den anderen beiden Verfahren und entsprechend die benötigte Zeit deutlich verlängert. Da der Akku der UAV allerdings mindestens für zehn Minuten ausreichend ist, ist die Länge der Aufnahmezeit unkritisch.

5.4 Vergleich der drei Aufnahmeverfahren

Mit allen drei Verfahren der optischen Messungen des Testgebiets ließ sich der Genauigkeitsanspruch von unter einem Zentimeter erreichen. Dabei ist anzumerken, dass die terrestrischen Verfahren aufgrund ihrer geringeren Aufnahmehöhen im Gegensatz zum Luftbildverfahren kleinere GSD und höhere Genauigkeit aufweisen.

Aufgrund der Stereoaufnahmekonfiguration ist die Erfassung von dreidimensionalen Informationen der Aufnahmeobjekte bzw. die Berechnung eines dreidimensionalen Modells

mit Hilfe des Zweikamerasystems am vorteilhaftesten. Allerdings ist die Erstellung eines 3D-Modells auch mit den Bilddaten der anderen beiden Verfahren möglich. Nach dem Aufnahmeprozess ist die Weiterverarbeitung der Aufnahmedaten von allen drei Verfahren zu 3D-Modellen also möglich, wobei sowohl für Mono- als auch Zweikamerasystem ein weiterer Arbeitszwischenschritt notwendig ist.

Die Aufnahmezeit liegt bei allen drei Verfahren ungefähr im selben Bereich von ein paar Minuten, wobei das UAV-System in der selben Zeit ein deutlich größeres Gebiet aufnehmen konnte und daher absolut gesehen die Aufnahmen schneller durchgeführt hat. Die Vorbereitungszeit war für das Monokamerasystem deutlich geringer, als für das Zweikamera- oder das UAV-System, da direkt ohne Aufbau mit dem Aufnahmeprozess begonnen werden konnte. Dementsprechend ergibt sich aus der Zusammenrechnung der Vorbereitungs- und Aufnahmezeit, dass das Monokamerasystem am zeitlich vorteilhaftesten ist.

Kritisch ist beim Monokamerasystem die Einhaltung der Aufnahmehöhe sowie der Aufnahmebahnen. Das Problem der Konstanz dieser zwei Größen war weder beim Zweikamerasystem, noch bei der UAV problematisch, sodass diese in Bezug auf die Gewährleistung der Aufnahmehöhe sachdienlicher sind.

Die meteorologischen Bedingungen haben auf alle drei Aufnahmeprozesse Auswirkungen. Da der Wind für Verwehungen der Pflanzen sorgt, würde dies die gezielte Aufnahme deutlich erschweren. Eine direkte Einschränkung durch das Wetter für die optische Messung selbst gibt es vor allem bei dem UAV-System. Bei zu hohen Windgeschwindigkeiten wird die UAV zu stark beeinträchtigt, was zu kritischen Positionsversätzen, Höhenschwankungen und Bildverzerrungen führen kann. Eine weitere Einschränkung des UAV-Systems ist außerdem, dass eine Mindestaufnahmehöhe von acht Metern nötig ist, da ansonsten der Abwind der Propeller der UAV für Verwehungen der Getreidepflanzen sorgen könnte.

Bei der Betrachtung der Materialkosten liegt das Monokamerasystem am unteren Rand der Kosten. Für das Zweikamerasystem fallen bereits die doppelten Kosten an und der Einsatz der UAV bewirkt um ein vielfaches höhere Kosten, sodass hier eine Vorteilhaftigkeit eher bei den Mono- oder Zweikamerasystemen liegt.

Der Anschluss der Aufnahmen an ein übergeordnetes Koordinatensystem, um die Lage der einzelnen Bilder zu kennen und die spätere Orientierung deutlich zu erleichtern, ist für die

optische Messung mittels des UAV-Systems leicht zu realisieren. Durch den Einsatz einer RTK-Einheit wird dies einfach möglich. Für die anderen beiden Verfahren wurde darauf verzichtet, da dafür in das Testgebiet extra ein Anschluss an ein übergeordnetes System hätte gelegt werden müssen.

6 Ergebnis

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen und der Vergleich der drei optischen Messverfahren hinsichtlich der Eignung für die Aufnahme der Getreidepflanzen des Testgebiets und der Ermittlung möglichen Ableitung einiger Wachstumsparameter zusammengefasst und eine Bewertung der Einsetzbarkeit vorgenommen. Des Weiteren wird eine Eignungseinschätzung der Verfahren für den allgemeinen Einsatz für die Agrarindustrie gegeben.

6.1 Bewertung der Einsetzbarkeit

Nach der Aufnahme der Getreidepflanzen im Testgebiet mit allen drei Verfahren, konnten aus allen Bilddatensätzen dreidimensionale Modelle erstellt werden. Für die Modellerstellung sowie die anschließende Auswertung der Daten ist nicht die Art der Datenaufnahme, sondern nur die Einhaltung der Anforderungen an die Daten von Relevanz. Da diese Anforderungen von allen drei optischen Verfahren eingehalten wurden, muss bezüglich der Einsetzbarkeit der optischen Messverfahren für die dreidimensionale photogrammetrische Erfassung sowie Nutzbarkeit der Daten zur Parameterbestimmung des Wachstums von Pflanzen nicht unterschieden werden.

Die Genauigkeitsanforderung bezüglich der Objektgenauigkeit von einem Zentimeter wurde eingehalten. Auch die Bestimmung der Höhe der Pflanzen konnte durchgeführt werden. Bei der Beispielberechnung wurde ein durchschnittlicher Höhenwert von ca. 0,71 m für die Pflanzen bestimmt. Dies entspricht nahezu der Höhenabschätzung mittels Zollstock während der optischen Messung von 0,70 m. Die Bestimmung des Ausrichtungsparameters der Pflanzen ließ sich ebenfalls aus den Daten der optischen Messung errechnen. Die Klassifizierung der Pflanzen oder Blattflächen wurde zwar nur theoretisch angeführt, die Umsetzung und die damit verbundene Möglichkeit den Parameter des Bedeckungsgrades zu bestimmen ist jedoch absolut realistisch einzuschätzen. Anzumerken ist dabei, dass nur für die Bilddaten des UAV-Systems eine Georeferenzierung durchgeführt werden konnte und somit auch nur für diesen Datensatz die Bestimmung aller in Kapitel 4.4 aufgeführten Parameter möglich war. Da die Georeferenzierung mit einem erhöhten Aufwand allerdings auch für die Datensätze der anderen beiden Verfahren möglich wäre, ist dies nicht als allgemeine Einschränkung für eine Nutzungsmöglichkeit zu bezeichnen.

Dem zufolge lässt sich daher eine allgemeine Eignung der optischen Messverfahren für die Datenerfassung und der entsprechenden Realisierung einer Datengrundlage, anhand derer Wachstumsparameter abgeleitet werden können, feststellen.

6.2 Bewertung des Aufnahmeprozesses

Anders als die Datenverarbeitung und -auswertung unterscheidet sich der Prozess der Aufnahme für alle drei optischen Verfahren. Dementsprechend ist auch ein Unterschied hinsichtlich des Eignungsgrades der drei Verfahren für die Aufnahme des Testgebiets festzustellen.

6.2.1 Einsetzbarkeit für das Testgebiet

Das Monokamerasystem weißt dabei mehrere Vorteile gegenüber den anderen beiden Verfahren auf. Es ist sehr preiswert, benötigt praktisch keine Vorbereitungszeit und ist sehr flexibel. Eine hohe Aufnahmegenauigkeit im Submillimeterbereich kann ebenfalls erzielt werden. Nachteilig ist, dass die Konstanz der Aufnahmehöhe und -bahn kritisch sowie die Aufnahmedaten erst von Video- in Bilddaten zu konvertieren sind. Für ein Aufnahmegebiet, wie in diesem Fall das Testgebiet, von sehr geringem Umfang ist dieses Verfahren geeignet, um Aufnahmedaten zu erfassen, die anschließend weiterverarbeitet werden können. Für die Weiterverarbeitung und der damit verbundenen Parameterbestimmung wird meistens eine Georeferenzierung der Daten erforderlich. Diese ist durch vorab Bestimmung von Anschlusspunkten im Testgebiet theoretisch realisierbar, jedoch verhältnismäßig aufwendig.

Das Zweikamerasystem weißt die höchste Aufnahmegenauigkeit auf. Es ermöglicht aufgrund der Stereoaufnahmekonfiguration die direkte Erfassung von 3D-Informationen, was die spätere Auswertung und Verarbeitung zu 3D-Modellen erleichtert. Kritisch anzuführen ist die lange Vorbereitungszeit sowie die Notwendigkeit der Datenkonvertierung von Video- zu Bilddaten. Auch ist die Realisierung der Georeferenzierung der Daten genauso aufwendig wie beim Monokamerasystem. Trotzdem sind auch mit diesem Verfahren Aufnahmen für eine anschließende Auswertung möglich.

Das UAV-System hat bei der Aufnahme des Testgebiets den Vorteil, dass der Aufnahmeprozess fast automatisch abläuft. Auch konnten die Aufnahmen direkt als Bilddaten gespeichert und somit direkt weiterverarbeitet werden. Die Georeferenzierung ist durch den Einsatz der RTK-Einheit leicht zu ermöglichen. Es gibt jedoch bei dem Aufnahmeprozess

auch einige Nachteile, was insgesamt das UAV-System für das Testgebiet am unvorteilhaftesten werden lässt. Die Genauigkeit der Aufnahme ist aufgrund der deutlich höheren Aufnahmehöhe schlechter, als bei den anderen beiden Verfahren. Anzumerken ist allerdings, dass trotzdem die Genauigkeit im geforderten Bereich von unter einem Zentimeter liegt. Auch ist die Vorbereitungszeit in Relation zur späteren Aufnahmezeit sehr hoch. Die Materialkosten sind ebenfalls deutlich höher bei diesem Verfahren. Bei absoluter Betrachtung ist die Möglichkeit mit diesem optischen Messverfahren Aufnahmen zu tätigen und diese für die Weiterverarbeitung zu nutzen jedoch gegeben.

Insgesamt eignen sich alle drei Verfahren für die Aufnahme von Getreidepflanzen und der damit verbundenen Analyse und Auswertung von Parametern aus den jeweiligen Bilddaten. Das Monokamerasystem weist jedoch für dieses Einsatzgebiet die beste Eignung für die Aufnahme auf.

6.2.2 Einsetzbarkeit für die Agrarindustrie

Bei der Betrachtung der Einsetzbarkeit und Eignung der drei optischen Messsysteme unter den Gesichtspunkten der industriellen Nutzung, ergibt sich ein anderes Bild als bei der Bewertung anhand des Einsatzes beim Testgebiet (vgl. Kapitel 6.2.1).

So sind unter dem Aspekt des Einsatzes für die Agrarindustrie die vielen Vorteile des Monokamerasystems deutlich weniger relevant und die Nachteile wirken sich stärker aus. In der Agrarindustrie sind die Anbaugebiete oft mehrere Hektar groß. Dementsprechend sind die Aufnahmeflächen erheblich größer, als bei dem Testgebiet. Die Aufnahmezeit würde mit dem Monokamerasystem somit ins Unermessliche ansteigen, wenn für eine Fläche von einem Quadratmeter bereits ein Zeitaufwand in Höhe von fünf Minuten entsteht. Die UAV hingegen kann aufgrund der deutlich höheren Aufnahmehöhe und der entsprechend größeren Bildgröße, deutlich schneller große Gebiete erfassen. Der Vorteil der geringen Vorbereitungszeit des Monokamerasystems verliert bei großen Flächen stark an Bedeutung und die zehnminütige Vorbereitungszeit der UAV ist somit im Verhältnis wiederum relativ gesehen gering. Der Vorteil von Genauigkeiten unterhalb eines Millimeters, was sowohl das Mono- als auch das Zweikamerasystem erreichen, ist ebenfalls von untergeordneter Rolle, da für die industrielle Nutzung nur die Einhaltung der Forderung, zum Beispiel von ca. einem Zentimeter, von Relevanz ist. Diese Forderung erfüllen in diesem Fall alle drei Verfahren.

Ein weiterer Punkt sind die im Vergleich deutlich höheren Materialkosten des UAV-Systems. Diese relativieren sich jedoch bei häufigen und großflächigen Einsätzen.

Aufgrund der fast automatischen Durchführung der Aufnahmen ist die UAV sehr Personalkosten einsparend, während die Kosten für die aufzuwenden Arbeitsstunden zur Aufnahme einer Anbaufläche von mehreren Hektar beim Mono- und Zweikamerasystem erheblich höher wären. Außerdem handelt es sich bei den Anschaffungskosten um einmalige Ausgaben, während die Personalkosten bei jedem Einsatz erbracht werden müssten.

Für die Weiterverarbeitung und Analyse der Bilddaten ist eine Georeferenzierung der Daten hilfreich (vgl.Kapitel 4.4.3). Diese ist durch Verwendung der RTK-Einheit bei der UAV deutlich simpler zu realisieren, als bei den anderen beiden Verfahren.

Unter Berücksichtigung der in diesem Abschnitt aufgeführten Vor- und Nachteile der drei Verfahren ergibt sich, dass der Einsatz einer UAV, also die Verwendung des UAV-Systems, am wirtschaftlichsten und somit vorteilhaftesten für die industrielle Nutzung ist. Insbesondere aufgrund der großräumigen Einsetzbarkeit hebt sich dieses System von den anderen beiden ab. Bei einer Modifizierung des Zweikamerasystems durch Anbringung an zum Beispiel einem Traktor stellt jedoch auch dieses System eine realisierbare Möglichkeit dar. Das Monokamerasystem ist für den großflächigen Einsatz aus wirtschaftlicher Sicht ungeeignet und damit prinzipiell für die Agrarindustrie von geringem Nutzen.

7 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Eignung optischer Messverfahren für die Untersuchung und Dokumentation des Pflanzenwachstums durch die dreidimensionale photogrammetrische Erfassung der Pflanzenoberflächen zu bestimmen. Weiterhin wurde eine vergleichende Untersuchung der unterschiedlichen photogrammetrischen Messverfahren hinsichtlich der Nutzungsmöglichkeiten vorgenommen. Dies wird sowohl anhand der Beobachtungen des Testgebiets durch Bestimmung der Genauigkeit, Einsetzbarkeit sowie Wirtschaftlichkeit durchgeführt, als auch unter der zusätzlichen und speziellen Berücksichtigung der für die Agrarindustrie relevanten Faktoren.

Um die Eignung der optischen Messverfahren zur Erfassung von Pflanzen beurteilen zu können, wurden Aufnahmen von Getreidepflanzen mit allen drei Verfahren getätigt. Diese Durchführung der Pflanzenaufnahme war bei allen Verfahren erfolgreich. Die Genauigkeitsvorgabe von unter einem Zentimeter konnte jeweils eingehalten und teils sogar deutlich übertroffen werden.

Die vergleichende Untersuchung der drei optischen Messvarianten bei der Aufnahmedurchführung hat für kleine Aufnahmegebiete, wie bei dieser Arbeit, die vorteilhafteste Eignung

eines einfachen Monokamerasystems ergeben, da eine hohe Aufnahmegenauigkeit, in Verbindung mit geringem Zeitaufwand sowie Materialkosten erreicht wurde. Das Stereokamerasystem und das UAV-System konnten im Vergleich für die kleine Fläche des Testfelds nicht dasselbe Maß an vorteilhaften Eigenschaften aufweisen.

Hinsichtlich der industriellen Nutzung im Agrarwesen konnte mit dem UAV-System eine andere Verfahrensart als vorteilhafteste Lösung bestimmt werden. Aufgrund der großflächigen Einsetzbarkeit sowie der Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen ergibt sich die wirtschaftlichste und somit für die Agrarindustrie interessantes Variante zur photogrammetrischen Erfassung der Pflanzen. Während das Monokamerasystem für die industrielle Nutzung wenig vorteilhaft ist, kann unter gewissen Bedingungen und Modifizierung der Installation das Zweikamerasystem ebenfalls eine relevante Alternative zur optischen Messung von Pflanzen bieten.

Bezüglich der Bilddatenverarbeitung zu dreidimensionalen Modellen konnte eine Eignung der Aufnahmedaten aller drei Verfahren festgestellt und dabei die programmtechnische Realisierung dieses Prozesses umgesetzt werden. Die Auswertung der verarbeiteten Bilddaten ergab eine Vielzahl an Informationen und Parametern für das Wachstum von Pflanzen, die so aus den Aufnahmen gewonnen werden können. Dabei wurden verschiedene Möglichkeiten ermittelt, wie und welche Informationen aus den Bilddaten abzuleiten sind. So lässt sich unteranderem die Höhe der einzelnen Pflanzen mit Hilfe der Bilddaten ermitteln. Auch kann der Bodenbedeckungsgrad an Pflanzen und dadurch der Gesamtanteil an Bewuchs des Anbaugebiets bestimmt werden. Die Bestimmung der Ausrichtung der Pflanzen gegenüber der Sonne konnte ebenfalls erfolgreich durchgeführt werden, woraus sich sowohl die Beleuchtungsstärke als auch die Verschattung für die Pflanzen ableiten lässt.

In der Gesamtbetrachtung wird deutlich, dass der Einsatz von optischen Messverfahren für die dreidimensionale photogrammetrische Erfassung von Pflanzenoberflächen möglich und vorteilhaft ist. Die Verwendung des UAV-Systems stellt sich dabei aufgrund der Möglichkeit der effizienten Aufnahme großer Flächen als wirtschaftlichste sowie vorteilhafteste Lösung für die Anwendungen und Aufgaben für das Monitoring im Agrarwesen heraus. Zwar zeigt der aktuelle technische Stand, dass noch nicht für alle Auswertungsschritte für die Wachstumsparameterbestimmung Programmlösungen existieren, jedoch die Messdaten der Verfahren schon jetzt eine solide Grundlage bieten, aus der eine Vielzahl an Informationen für das Pflanzenwachstum abgeleitet werden können.

8 Ausblick

Im Folgenden wird ein fokussierter Ausblick über die möglichen Entwicklungen und Nutzungspotenziale der optischen Messverfahren für das Agrarwesen gegeben sowie eine Handlungsempfehlung für weitere Untersuchungsaspekte in diesem Bereich formuliert.

Das Monitoring als begleitender Prozess verschiedenster Arbeitsabläufe wird auch in Zukunft immer weiter an Bedeutung gewinnen. Aufgrund der immer feineren, genaueren und schnelleren Messungsmöglichkeiten entstehen immer mehr Einsatzmöglichkeiten. Auch in der Agrarindustrie ist die Tendenz erkennbar, dass immer mehr Informationen über die Arbeitsabläufe zu erfassen sind, um die Prozesse zu automatisieren und zu optimieren. Speziell in der Pflanzenwachstumsforschung und der Prävention vor Pflanzenschäden existieren eine Vielzahl an laufenden Untersuchungsprojekten, wie die Fungizidapplikation für Getreide [Dammer et al. 2015] oder die vollständige Digitalisierung des Ackeranbaus [Business Geomatics 2017], bei denen jeweils Kamerasensoren eingesetzt werden.

Für die Agrarindustrie zeichnet sich ein zunehmendes Interesse für die Nutzung photogrammetrischer Verfahren für das Monitoring im Allgemeinen, als auch im Speziellen für die Bestimmung von Wachstumsparametern ab. Diese Tendenz lässt sich zum einen aus dem Fazit dieser Arbeit des nutzungsbringenden Einsatzes optischer Messtechnik zur dreidimensionalen Erfassung von Pflanzen ableiten. Zum anderen ist bereits eine zunehmende Anzahl an Forschungsprojekten in diesem Bereich festzustellen, woraus sich ein gestiegenes Interesse ableiten lässt. Dabei sind die Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten bei weitem noch nicht erschöpft. Die in dieser Arbeit getätigten Überlegungen und aufgestellten Bestimmungsmöglichkeiten der Parameter, die teilweise schon realisiert sind, könnten weiter ausgeführt und entwickelt werden.

Daraus ergibt sich nachfolgend eine Handlungsempfehlung für eine weiterführende Forschungsarbeit. Der Fokus in diesem Bereich kann auf die programmiertechnische Umsetzung der Parameterbestimmung aus photogrammetrischen Aufnahmen gelegt werden, um eine Verbesserung der Ergebnisse zu erreichen. Des Weiteren bietet der Einsatz unterschiedlicher Kameratypen eine weitere Forschungsmöglichkeit. Dadurch können differenzierte Einsatzmöglichkeiten anderer Kameratypen, wie zum Beispiel von Thermal- oder Infrarotkameras auf ihre Nutzungspotenziale hin untersucht werden. Das Ergebnis kann zum Beispiel für die Bestimmung weiterer Wachstumsparameter Anwendung finden.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit und der Betrachtung der aktuellen Situation im Agrarwesen lässt sich somit insgesamt für das Einsatzgebiet photogrammetrischer Messverfahren ein großes Spektrum von diversen Forschungs-, Entwicklungs- sowie Nutzungsmöglichkeiten erschließen, die in der Zukunft zur Verbesserung der Arbeits- und Ertragsprozesse weiter ausgebaut werden können.

Literaturverzeichnis

Agisoft (2016): Agisoft Photoscan User Manual Version 1.2. Verfügbar unter: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf [Zugriff am: 25.7.2017]

Albertz, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Darmstadt. Wissenschaftliche Buchgesellschaft

Brunner, G. und Brück, R. (2013): Mathematik für Chemiker. 3. Überarbeitete und erweiterte Auflage. Dortmund. Springer-Verlag

Business Geomatics (2017): Bonn: Forschung am digitalen Acker. Verfügbar unter: http://www.business-geomatics.com/bgx/2017/05/08/bonn-forschung-am-digitalen-acker/ [Zugriff am: 1.9.2017]

Canon (2017): Datenbaltt der Canon EOS 1100D. Verfügbar unter: http://www3.canon.de/images/pro/fot/slr/file/EOS_1100D_Broschuere.pdf [Zugriff am: 3.8.2017]

Canon (2017): Datenblatt der Canon EOS 750D. Verfügbar unter: https://www.canon.de/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_750d/specifications.aspx [Zugriff am: 23.7.2017]

DVDVideoSoft (2006): Programmbeschreibung von Free Video to JPG Converter. Verfügbar unter: https://www.dvdvideosoft.com/de/products/dvd/Free-Video-to-JPG-Converter.htm [Zugriff am 1.7.2017]

Ebrecht, L. (2005): Vegetation, Standortverhältnisse und Ausbreitungsbiologie von Pflanzen auf Rückegassen und Waldwegen im Göttinger Wald und im Solling. Dissertation der Georg-August-Universität Göttingen. Cuvillier Verlag Göttingen

Ehlert, D., Heisig, M. und Giebel, A. (2010): Einsatzpotenzial von Laserscannern im Pflanzenbau. In: Zeitschrift Landtechnik. Band 65, Nr. 2 (2010), S. 99-101

Esri (2016): 3D-Beleuchtungen in ArcScene. Verfügbar unter: https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/understanding-3d-illumination-in-arcscene.htm [Zugriff am: 28.8.2017]

Finsterwald, R. (2013): Photogrammetrie. De Gruyter Lehrbuch. vollständig überarbeitete Auflage. De Gruyter

Geoportal (2011): Anleitung zur Georeferenzierung und Bildverarbeitung von kommunalen Plänen. Koblenz. Zentrale Stelle Geodateninfrastruktur Rheinland-Pfalz. Verfügbar unter: http://www.geoportal.rlp.de/portal/informationen/downloads/kommunale-plaene.html [Zugriff am: 1.9.2017]

Gühring, J. (2002): 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion. Diss. Stuttgart: Universität Stuttgart, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Gutachterring (2017): Aufwuchsschäden. Verfügbar unter: http://www.gutachterring.de/aufwuchsschaeden/ [Zugriff am: 6.9.2017]

Hexagon (2017): Datenblatt des Aibot X6 Version 2. Verfügbar unter: https://www.aibotix.com/de-de/products/aibot-x6 [Zugriff am: 25.7.2017]

Hoschek, J. und Lasser, D. (1989): Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. Stuttgart. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Kersten, T.P. und Lindstaedt, M. (2012): Generierung von 3D-Punktwolken durch kamera-basierte low-cost Systeme – Workflow und praktische Beispiele. In: Terrestrisches Laserscanning 2012, Schriftreihe des DVW. Band 69. S. 25-46. Fulda. Wißner-Verlag

Kohlstock, P. (2011): Topographie – Methoden und Modelle der Landesaufnahme. De Gruyter

Kraus, K. (2004): Photogrammetrie - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Band 1. De Gruyter Lehrbuch. 7.Auflage. De Gruyter

Kuhn, M. (2014): 3D-Scanner? Agisoft Photoscan!. Verfügbar unter: http://www.software3d.de/downloads/agisoft-photoscan-artikel.pdf [Zugriff am: 25.7.2017]

Luhmann, T. (2010): Nahbereichsphotogrammetrie. 3. Auflage. Wichmann Verlag

Mathmunch (2017): Circling, Squaring and Triangulation. Verfügbar unter: https://mathmunch.org/2013/05/08/circling-squaring-and-triangulating/ [Zugriff am: 15.8.2017]

Meier, S. und Borkowski, A. (2011): Geometrie stochastischer Signale – Grundlagen und Anwendungen in der Geodaten-Verarbeitung. De Gruyeter

Nabors, M. (2007): Botanik. Pearson Education Deutschland GmbH. München

Nikon (2017): Datenblatt der CoolPix A. Verfügbar unter: https://www.nikon.de/de_DE/product/discontinued/digital-cameras/coolpix/2017/coolpix-a#tech_specs [Zugriff am: 1.8.2017]

Openstreetmap (2017): Visuelle Darstellung von Deutschland. Verfügbar unter: https://www.openstreetmap.de/karte.html. [Zugriff am: 30.8.2017]

Pedmale, U. (2016): Cryptochromes Interact Directly with PIFs to Control Plant Growth in Limiting Blue Light. In: Journal Cell. Vol.164. S. 233-245. USA

Przybilla, H.-J. (2016): Vorlesung Zentralperspektive. Hochschule Bochum. Verfügbar unter: http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb_v/labore/photogrammetrie/3._5._Semester/2_3_Zentralperspektive.pdf [Zugriff am: 16.8.2017]

Regensburger, K. (2000): Bildflugplanung. In: Lexikon der Geowissenschaften. Heidelberg. Spektrum Akademischer Verlag. Verfügbar unter: http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/bildflugplanung/1728 [Zugriff am: 28.7.2017]

Richter, M. (2009): Grundwissen Mathematik für Ingenieure. 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden. Vieweg+Teubner

Rottensteiner, F. (2016): Einführung in die Bildflugplanung. Photogrammetrie III. Leibniz Universität Hannover. Hannover

Stier, D. und Haupt, M. (2017): UAV-Photogrammetrie: Von der Flugplanung zum fertigen 3D-Modell – Erkenntnisse und praktische Herausforderungen. In: Schriftenreihe des DVW Band 86/2017. S. 111-127. Wißner-Verlag

Anhang

Anhangsverzeichnis:

Anhang 1: Kamera EOS 750D 55
Anhang 2: Kamera EOS 1100D 56
Anhang 3: CoolPix A 57
Anhang 4: UAV Aibot X6 58
Anhang 5: Geografische Einordnung des Aufnahmetestgebiets 59
Anhang 6: Berechnung der Basislänge 60
Anhang 7: Berechnung der Objektgenauigkeit beim Stereokamerasystem 60
Anhang 8: Berechnung der Objektgenauigkeit beim UAV-System 61
Anhang 9: Berechnung der Bodenauflösung (GSD) beim Monokamerasystem .. 64

Anhang 1: Kamera EOS 750D

Die Canon EOS 750D ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

Abbildung 31: Canon EOS 750D [Canon 2017a]

Die wichtigsten Eigenschaften und technischen Daten sind im Folgenden kurz aufgelistet. Die ausführliche Beschreibung der Kamera ist auf der Internetseite der Firma Canon einsehbar [Canon 2017a].

Megapixel:	24
Max. Bildauflösung:	6000x4000 Bildpunkte
Sensortyp:	COMS
Sensorgröße:	22,3 x 14,9 mm
Bilder pro Sekunde:	5
Bildformat:	JPEG, RAW
Videoauflösung:	1.920 x 1.080 Bildpunkte
Video-Einschränkung:	1799 s

Tabelle 3: Daten der Canon EOS 750D
Eigene Darstellung modifiziert nach [Canon 2017a]

Anhang 2: Kamera EOS 1100D

Die Canon EOS 1100D ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

Abbildung 32: Canon EOS 1100D
[Canon 2017b]

Die wichtigsten Eigenschaften und technischen Daten sind im Folgenden kurz aufgelistet. Die ausführliche Beschreibung der Kamera ist im vollständigen zugehörigen Datenblatt auf der Internetseite der Firma Canon einsehbar [Canon 2017b].

Megapixel:	12,2
Max. Bildauflösung:	4272 x 2848 Bildpunkte
Sensortyp:	COMS
Sensorgröße:	22,2 x 14,7 mm
Bilder pro Sekunde:	3,2
Bildformat:	JPEG, RAW
Videoauflösung:	1280 x 720 Bildpunkte
Video-Einschränkung:	1020 s

Tabelle 4: Daten der Canon EOS 1100D
Eigene Darstellung modifiziert nach [Canon 2017b]

Anhang 3: CoolPix A

Die CoolPix A der Firma Nikon ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

Abbildung 33: CoolPix A
[Nikon 2017]

Die wichtigsten Eigenschaften und technischen Daten sind im Folgenden kurz aufgelistet. Die ausführliche Beschreibung der Kamera ist im vollständigen zugehörigen Datenblatt auf der Internetseite der Firma Nikon einsehbar.

Megapixel:	16,1
Brennweite	18,5 mm
Sensortyp:	CMOS
Sensorgröße:	23,6 x 15,6 mm
Bilder pro Sekunde:	4
Bildformat:	JPEG, RAW

Tabelle 5: CoolPix A
Eigene Darstellung modifiziert nach [Nikon 2017]

Anhang 4: UAV Aibot X6

Im Folgenden ist die Aibot X6 dargestellt (siehe Abbildung 34) und es werden die wichtigsten Daten der in dieser Arbeit eingesetzten UAV Aibot X6 aufgelistet. Für eine detaillierte Beschreibung der UAV wird auf ihr vollständiges Datenblatt sowie die Internetseite der Firma Hexagon verwiesen.

Abbildung 34: Aibot X6 [Hexagon 2017 S. 2]

TECHNISCHE DETAILS	
Länge / Breite	1,05 m
Höhe	0,45 m
Rahmen und Gerüst	CFK (carbonfaserverstärkter Kunststoff)
Leergewicht	3.400 g
Fluggewicht	4.600 g – 6.600 g
Maximale Zuladung	2.000 g
Maximale Geschwindigkeit	40 km/h*
Flughöhe	bis zu 500 m über dem jeweiligen Gelände* max. 3.000 m ü. NN
Flugzeit	bis zu 20 Min.*
Betriebstemperatur	-20 °C bis 40 °C
Navigation	RTK/GNSS, GPS Empfänger / Smart-Sensor-Fusion inkl. Gyroskop, Beschleunigungssensor, Barometer, Magnetometer sowie Ultraschallsensoren
Steuerung und Flugplanung	Fernsteuerung, Tablet-PC (optional) und PC für automatische Wegpunktflugplanung (Aibotix AiProFlight)
Batterien	Lithium-Polymer 2 x 5.000 mAh

* abhängig von Betriebsmodus, Wetter sowie Zuladung

Tabelle 6: Datenblattauszug der Aibot X6 [Hexagon 2017 S. 1]

Anhang 5: Geografische Einordnung des Aufnahmetestgebiets

Im Folgenden wird zur geografischen Einordnung des Aufnahmetestgebiets die Adresse so wie ein Kartenauszug dargestellt (siehe Abbildung 35).

Adresse:

Forschungsgebiet Ruthe

Jagdweg

31157 Sarstedt

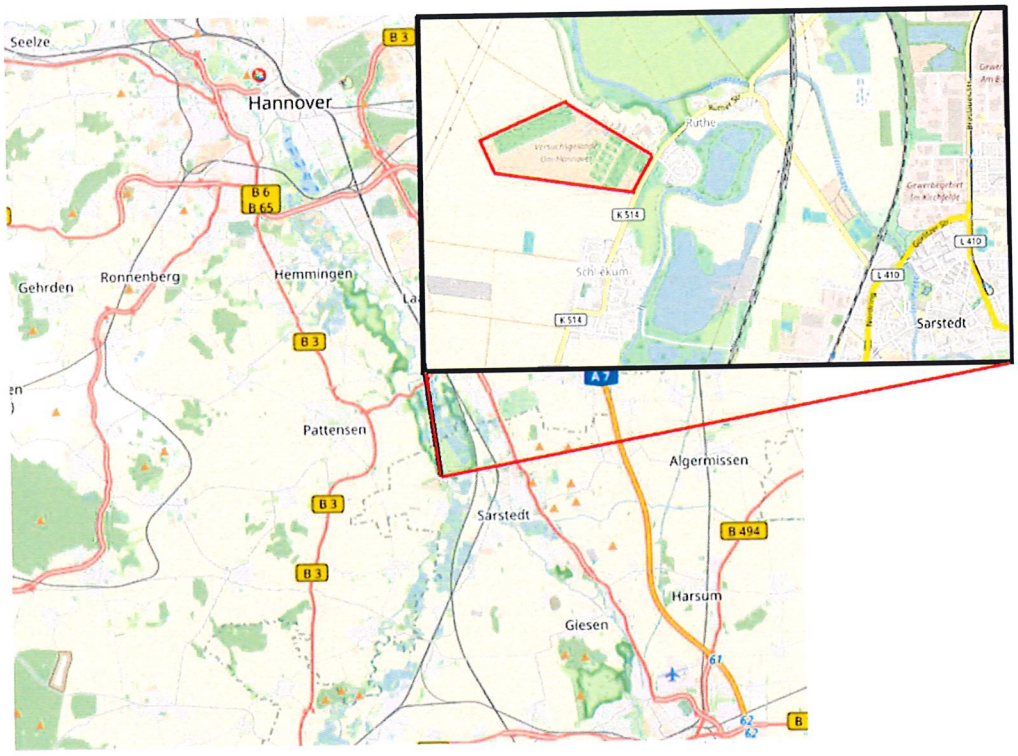

Abbildung 35: Geographische Lage des Testgebiet Ruthe
Eigene Darstellung modifiziert nach einem Kartenauszug „Deutschland" von [Opentstreetmap 2017]

Anhang 6: Berechnung der Basislänge

In die Bestimmung der Basislänge fließen fünf verschiedene Parameter. Die Berechnung wird wie folgt durchgeführt:

$$B = \frac{y}{d_z} * \frac{y}{c} * pel * p \tag{A.6.1}$$

B [mm]	y [mm]	d_z [mm]	c [mm]	pel [mm]	p
3249	950	0,1	20	0,006	1,2
649,8	950	0,5	20	0,006	1,2
406,125	950	0,8	20	0,006	1,2
324,9	950	1	20	0,006	1,2

Tabelle 7: Berechnung der Basislänge
Eigene Darstellung

In der Tabelle 7 bedeuten:

B ... Basis
y ... Aufnahmehöhe
d_z ... Objektgenauigkeit in z
c ... Brennweite
pel ... Pixelgröße
p ... manuelle Pixelmessgenauigkeit

Anhang 7: Berechnung der Objektgenauigkeit beim Stereokamerasystem

Die Formeln zur Berechnung der Genauigkeit sind folgende:

Rechtwinklig zum Bildstrahl (X-Y-Richtung):

$$\delta_{xy} = \frac{Y}{c} * pel * p \tag{A.7.1}$$

In Richtung des Bildstrahls

$$\delta_z = \frac{Y}{B} * \frac{Y}{c} * pel * p = \frac{Y}{B} * \delta_{xy} \tag{A.7.2}$$

In den Formeln A.7.1 und A.7.2 bedeuten:

B ... Basis
y ... Aufnahmehöhe
d_z ... Objektgenauigkeit in z
c ... Brennweite
pel ... Pixelgröße
p ... manuelle Pixelmessgenauigkeit

Da eine Basis von 400 mm, eine Aufnahmehöhe von 950 mm sowie eine Brennweite von 20 mm gewählt wurde und die Pixelgröße 0,006 und die manuelle Pixelmessgenauigkeit 1,2 ist, ergibt sich für die Objektgenauigkeit ein Wert von:

δ_{xy}= (950 mm / 20 mm) * 0,006 * 1,2 = **0,34 mm**

δ_z= (950 mm / 400 mm) * (950 mm / 20 mm) * 1,2 * 0,006 = **0,81 mm**

Anhang 8: Berechnung der Objektgenauigkeit beim UAV-System

Die Formeln zur Berechnung der Objektgenauigkeit bei der Aufnahme mit dem UAV-System sind dieselben wie beim Stereokamerasystem (vgl. Formel A.7.1 und A.7.2). Die Basis wird beispielhaft für die Bilder eines Aufnahmedurchgangs aus den bekannten Projektionszentren der Bilder berechnet. Dies ist möglich, da bei der Aufnahme mit der UAV eine RTK-Einheit verwendet wurde, wodurch die Position der Kamera bei den Aufnahmen durchgehend bekannt ist. Die Basis wird als Abstand der Koordinaten der jeweiligen Projektionszentren bestimmt (vgl. Kapitel 2.4). Dies geschieht mit folgender Formel:

$$B = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2} \qquad \text{(A.8.1)}$$

In der Formel A.8.1 bedeuten:

x_i, y_i, z_i ...	Koordinaten des Projektionszentrums von Bild i
$x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$ ...	Koordinaten des Projektionszentrums von Bild i+1
B ...	Basis

Die Berechnungsergebnisse sind in der folgenden Tabelle 8 aufgelistet.

Bildnummer i	X_i[m]	Y_i[m]	Z_i[m]	$B_{i,i+1}$ [m]
1	555.808,0606	5.788.600,9090	75,0781	3,88831656
2	555.804,5598	5.788.602,5380	75,5361	4,10081671
3	555.801,1211	5.788.604,7240	75,0741	2,97206408
4	555.798,6444	5.788.606,3650	75,1531	2,99800505
5	555.795,9009	5.788.607,4460	75,6941	2,91112036
6	555.793,3585	5.788.608,8640	75,7041	2,84705958
7	555791,155	5788610,508	76,4441	4,03704333
8	555794,4559	5788608,431	75,4011	3,84244444
9	555797,8214	5788606,689	76,0361	6,9253153
10	555803,8013	5788603,197	76,1181	4,25574214
11	555807,3109	5788600,79	76,1381	6,19227488
12	555812,8724	5788598,071	76,2831	3,78543007
13	555809,5752	5788599,814	75,6351	2,92763468
14	555807,1693	5788601,233	76,5121	2,72133841
15	555804,6319	5788602,205	76,6621	3,56370281
16	555801,7406	5788604,286	76,5631	7,9922384
17	555794,7998	5788608,213	76,0341	4,1323625
18	555791,2257	5788610,286	76,1041	3,52073742
19	555788,2017	5788612,032	76,5541	2,7053156
20	555790,471	5788610,611	76,9411	2,58864722
21	555792,8048	5788609,525	76,6671	2,56713635
22	555795,0046	5788608,215	76,8541	2,51287253
23	555797,2702	5788607,128	76,8501	2,71538363
24	555799,3384	5788605,372	76,7391	3,47416675
25	555802,4953	5788603,961	76,4031	5,65165732
26	555807,106	5788600,787	77,1831	3,56825627
27	555804,0819	5788602,533	76,4491	3,80793345
28	555800,7165	5788604,275	76,8231	4,80220387
29	555796,8605	5788607,124	77,0981	3,09229934
30	555794,3144	5788608,875	77,2151	4,0946765
31	555790,6075	5788610,613	77,2831	3,33999358
32	555787,5872	5788612,025	77,0841	3,32731686
33	555790,4065	5788610,277	77,3431	3,69141331
34	555793,6354	5788608,533	77,7421	6,13986166
35	555798,925	5788605,701	79,0451	2,92681379
36	555801,2664	5788603,947	79,1321	2,97972467
37	555803,6761	5788602,195	79,1831	-

Tabelle 8: Berechnung der Basis
Eigene Darstellung

Setzt man die bestimmen Basiswerte aus Tabelle 8 in die Formeln A.7.1 und A7.2. ein ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Werte für die Genauigkeiten **δ_z** und **δ_xy.**

Bildnummer i	Y [mm]	$B_{i,i+1}$ [m]	c [mm]	pel [mm]	p	δ_z	δ_xy
1+2	8000	3888,31656	18,5	0,006	1,2	6,405884848	3,113513514
2+3	8000	4100,81671	18,5	0,006	1,2	6,073938405	3,113513514
3+4	8000	2972,06408	18,5	0,006	1,2	8,38074397	3,113513514
4+5	8000	2998,00505	18,5	0,006	1,2	8,308227549	3,113513514
5+6	8000	2911,12036	18,5	0,006	1,2	8,556193154	3,113513514
6+7	8000	2847,05958	18,5	0,006	1,2	8,748713334	3,113513514
7+8	8000	4037,04333	18,5	0,006	1,2	6,169888728	3,113513514
8+9	8000	3842,44444	18,5	0,006	1,2	6,482359997	3,113513514
9+10	8000	6925,3153	18,5	0,006	1,2	3,596674957	3,113513514
10+11	8000	4255,74214	18,5	0,006	1,2	5,852823618	3,113513514
11+12	8000	6192,27488	18,5	0,006	1,2	4,022448708	3,113513514
12+13	8000	3785,43007	18,5	0,006	1,2	6,579994248	3,113513514
13+14	8000	2927,63468	18,5	0,006	1,2	8,507929044	3,113513514
14+15	8000	2721,33841	18,5	0,006	1,2	9,152888882	3,113513514
15+16	8000	3563,70281	18,5	0,006	1,2	6,989389818	3,113513514
16+17	8000	7992,2384	18,5	0,006	1,2	3,116537178	3,113513514
17+18	8000	4132,3625	18,5	0,006	1,2	6,027570941	3,113513514
18+19	8000	3520,73742	18,5	0,006	1,2	7,074684965	3,113513514
19+20	8000	2705,3156	18,5	0,006	1,2	9,207098838	3,113513514
20+21	8000	2588,64722	18,5	0,006	1,2	9,622055837	3,113513514
21+22	8000	2567,13635	18,5	0,006	1,2	9,702682175	3,113513514
22+23	8000	2512,87253	18,5	0,006	1,2	9,912205173	3,113513514
23+24	8000	2715,38363	18,5	0,006	1,2	9,172961002	3,113513514
24+25	8000	3474,16675	18,5	0,006	1,2	7,169520031	3,113513514
25+26	8000	5651,65732	18,5	0,006	1,2	4,407221933	3,113513514
26+27	8000	3568,25627	18,5	0,006	1,2	6,980470633	3,113513514
27+28	8000	3807,93345	18,5	0,006	1,2	6,541109091	3,113513514
28+29	8000	4802,20387	18,5	0,006	1,2	5,186807722	3,113513514
29+30	8000	3092,29934	18,5	0,006	1,2	8,054882586	3,113513514
30+31	8000	4094,6765	18,5	0,006	1,2	6,083046641	3,113513514
31+32	8000	3339,99358	18,5	0,006	1,2	7,45753174	3,113513514
32+33	8000	3327,31686	18,5	0,006	1,2	7,485944125	3,113513514
33+34	8000	3691,41331	18,5	0,006	1,2	6,747580406	3,113513514
34+35	8000	6139,86166	18,5	0,006	1,2	4,056786537	3,113513514
35+36	8000	2926,81379	18,5	0,006	1,2	8,510315276	3,113513514
36+37	8000	2979,72467	18,5	0,006	1,2	8,359197878	3,113513514
						Ø(δ_z) = **7,075 mm**	Ø(δ_xy) = **3,1135 mm**

Tabelle 9: Genauigkeitsabschätzung der Aufnahmen des UAV-Systems
Eigene Darstellung

Anhang 9: Berechnung der Bodenauflösung (GSD) beim Monokamerasystem

Die Bodenauflösung (GSD) ergibt sich aus der Aufnahmehöhe $\mathbf{H_A}$, der Kammerkonstanten **c** und der Pixelkantenlänge P_G. Die Formel mit der die Bodenauflösung berechnet werden kann ist folgende:

$$GSD = \frac{H_A\,[mm]}{c\,[mm]} * P_G\,[mm] \tag{A.9.1}$$

Mit einer Aufnahmehöhe von 1400 mm, einer Pixelkantenlänge von 0,006 mm und einer Kammerkonstanten von 20 mm ergibt sich durch einsetzen der Werte in die Formel A.9.1:

$$GSD = \frac{1400\,[mm]}{20\,[mm]} * 0{,}006\,[mm] = \mathbf{0{,}42\ mm}.$$