



Bachelorarbeit

Analyse von historischen digitalen Orthophotos unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Maßstäbe in Hinblick auf die erreichbare Lagegenauigkeit

angefertigt von

Andreas Stumpp

vorgelegt bei

Prof. Dr.-Ing. Andreas Schmitt

Warngau, den 11.08.2021

Kurzfassung

Photogrammetrie ist eine berührungslose Messmethode, um aus einem oder mehreren Bildern eines Objektes oder einer Landschaft, indirekt seine Lage und Form, durch Bildmessung zu bestimmen, sowie durch Bildinterpretation dessen Inhalt zu ermitteln. Neben Fotografien können aber auch Bilder anderer Sensoren zum Einsatz kommen, wie Radar und Laserscanner. Hauptziel der Photogrammetrie ist die exakte dreidimensionale geometrische Rekonstruktion des Objektes.

Ziel dieser Arbeit es die Lagegenauigkeit von historischen digitalen Orthophotos unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen zu bestimmen. Untersucht werden Bildflüge unterschiedlicher Maßstäbe und Alters bei einem durch Agisoft Metashape vorgegebenen Workflow.

Ein Luftbild unterliegt Verzerrungen, die zum Bildrand hin immer größer werden. Dies wird durch die zentralperspektivische Aufnahme des Luftbildes hervorgerufen. Dadurch ist es nicht möglich in ihnen korrekte Entfernungen, Flächen und Koordinaten zu messen. Bei einem Orthophoto hingegen wird die Verzerrung rechnerisch entfernt, was eine genaue Messung ermöglicht. In einem Orthophoto könne nur Lagekoordinaten gemessen werden, da es sich um eine zweidimensionale Aufnahme handelt. Für die Betrachtung der Höhe wird ein separates Höhenmodell verwendet.

Die durchgeführten Analysen zeigen, dass durch die Betrachtung des Aufnahmezeitpunkts bereits eine Aussage über die Genauigkeit getroffen werden kann. Ebenso wirkt sich ein großer Maßstab positiv auf die Genauigkeit aus. Zudem verschlechtert sich die Genauigkeit bei Verringerung der Längs- und Querüberdeckung.

Abstract

Photogrammetry is a non-contact measuring method, to indirectly determine the position and shape, from one or more images of an object or a landscape, through image measurement, as well as to determine its content through image interpretation. In addition to photographs, images from other sensors, such as radar and laserscanners can also be used. The main aim of photogrammetry is to determine the exact three-dimensional reconstruction of the object.

The aim of this work is to determine the positional accuracy of historical digital orthophotos under the given framework conditions. Image flights of different scales and ages are examined in a workflow specified by Agisoft Metashape.

An aerial image is subject to distortions that become larger and larger towards the edge of the image. This is caused by the central perspective recording of the aerial photo. It is not possible to measure correct distances, areas and coordinates in them. In the case of an orthophoto, on the other hand, the distortion is mathematically removed, which enables an accurate measurement.

Only position coordinates can be measured in an orthophoto, since it is a two-dimensional image. A separate elevation model is used to consider the elevation.

The results highlight that the recording time has an influence on the accuracy. A large scale also has a positive effect on accuracy. In addition, the accuracy deteriorates when the longitudinal and transverse overlap is reduced.

Erklärung

Erklärung
gemäß § 15 Abs. 5 APO in Zusammenhang mit § 35 Abs. 7 RaPO

Name: Stumpp
Vorname: Andreas
Geburtsdatum: 22.11.1993
Studiengang: Angewandte Geodäsie und Geoinformatik
Matrikel-Nr.: 70361514
Semester: Sommersemester 2021
Betreuer/in: Herr Prof. Dr.-Ing. Andreas Schmitt

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Warngau, den 11.08.2021

Ort, Datum



Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Abstract.....	III
Erklärung	IV
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
1 Einleitung.....	8
1.1 Motivation.....	8
1.2 Institution	8
2 Daten	9
2.1 Untersuchungsgebiet	9
2.2 Luftbilder	10
2.3 Passpunkte.....	10
3 Werkzeuge	11
3.1 Agisoft Metashape	11
3.2 QGIS.....	11
4 Methodik	12
4.1 Orthophotogenerierung.....	12
4.1.1 Orthophoto.....	12
4.1.2 Innere Orientierung	13
4.1.3 Verzeichnung.....	13
4.1.4 Äußere Orientierung.....	14
4.1.5 Digitales Höhenmodell	15
4.1.6 Bündelblockausgleichung	16
4.2 Erstellung der Passpunkte	16
4.3 Agisoft Metashape Workflow	17
4.4 Berechnung der Genauigkeit	21
5 Ergebnisse.....	22
5.1 Horizontale Genauigkeit	22
5.2 Vertikale Genauigkeit.....	26
6 Diskussion	31
6.1 Lagegenauigkeit.....	31
6.2 Höhengenaugigkeit.....	33
7 Zusammenfassung.....	35

Literaturverzeichnis	37
Anhang.....	39
A Darstellung der statistischen Ergebnisse	39
B Darstellung der visuellen Ergebnisse.....	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchungsgebiet (BayernAtlas).....	9
Abbildung 2: Entstehung des Orthophotos. Die oberste der drei Ebenen ist das Luftbild, dieses wird mit Hilfe des digitalen Geländemodells (= zweite Ebene) entzerrt. Das Ergebnis ist das Orthophoto (=untere Ebene) [Krzystek/Stößel 2018].....	12
Abbildung 3: Darstellung der inneren Orientierung (Mandy Schulze 2016).....	13
Abbildung 4: Darstellung der verschiedenen Verzeichnungen [Kay Pehnke 2016].....	14
Abbildung 5: Darstellung der äußeren Verzeichnung [Krzystek 2018].....	15
Abbildung 6: Unterschied zwischen DOM und DGM [Riemensperger 2004].....	16
Abbildung 7: Setzen der Passpunkte. Auf der linken Seite sieht man den von Agisoft platzierten Punkt. Der von Agisoft platzierte Punkt wird mit einer grauen Fahne markiert. Da sich dieser Punkte nicht an der richtigen Stelle befindet muss dieser von Hand an der richtigen Stelle geschoben werden. Händisch bearbeitete Punkte werden mit einer grünen Fahne markiert.	18
Abbildung 8: Darstellung des Orthophotos von 1983.....	20
Abbildung 9: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse der Berechnungsmethode „Standard“.....	24
Abbildung 10: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse mit der Berechnungsmethode „2 Pixel“.....	24
Abbildung 11: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse mit der Berechnungsmethode „Marker 1m“.....	24
Abbildung 12: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse bei Verwendung der Hälfte der Passpunkte.....	25
Abbildung 13: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse bei Verwendung der Hälfte der Bilder.....	25
Abbildung 14: Darstellung der Genauigkeitsänderungen des Mesh Laufe der Jahre für die Maßstäbe 1:14000 und 1:15000.....	26
Abbildung 15: Darstellung der Genauigkeitsänderungen der Georeferenzierung Laufe der Jahre für die Maßstäbe 1:14000 und 1:15000.....	27
Abbildung 16: Darstellung der Höhengenaugkeit aller Mesh.....	28
Abbildung 17: Darstellung der Höhengenaugkeit aller Georeferenzierungen.....	29
Abbildung 18: Verschiebung der Autobahn des berechneten Orthophotos (links) zum tatsächlichen Ort (rechts).....	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung der verwendeten Bildflüge mit dem Jahr der Aufnahme, dem Maßstab, der Abtastung des Scanners, der Anzahl der verwendeten Luftbilder, dem für die Digitalisierung der analogen Luftbilder verwendeten Scanner und der Flugnummer.....	10
Tabelle 2: Aufzählung der verwendeten Berechnungsmethoden	22
Tabelle 3: Darstellung der Mittelwerte des Orthophotos für alle Aufnahmezeitpunkte und Berechnungsmethoden	27
Tabelle 4: Höhengenaugigkeit des Mesh für alle Aufnahmezeitpunkte und Maßstäbe für die Berechnungsmethoden „Standard“ „2Pixel“ und „Marker 1m“	34

1 Einleitung

1.1 Motivation

Luftbilder unterliegen aufnahmebedingten Verzerrungen und können deshalb nicht direkt in einem GIS oder mit anderen maßstäblichen Vorlagen verwendet werden. Um die Aussagekraft und den Inhalt historischer Luftbilder dennoch, z.B. im Bayernatlas nutzen zu können, müssen diese entzerrt, d.h. zu Orthophotos umgerechnet werden. Die Verzerrungen entstehen durch die zentralperspektivische Aufnahme der Luftbilder. Ein Orthophoto hingegen ist eine orthogonale Aufnahme und somit verzerrungsfrei.

Bei der Berechnung eines digitalen Orthophotos (DOP) mit Hilfe alter Bilder, stößt man verglichen mit heutigen Bildern auf nicht unerhebliche Schwierigkeiten, da die innere und äußere Orientierung der Kamera, manchmal sogar der Kameratyp selbst nicht bekannt sind. Ein weiteres Problem ist das Fehlen eines historischen DGM, um die Bilder zu entzerren. Der Grund für das Fehlen der äußeren Orientierung ist der, dass früher, im Gegensatz zu heute, die äußere Orientierung nicht mittels GPS und INS bestimmt wurde.

Für die Erstellung des Orthophotos für diese Bachelorarbeit wurde deshalb das Programm Agisoft Metashape verwendet. Diese Software benötigt keine Vorgaben für die innere oder äußere Orientierung, sondern berechnet diese mit Hilfe der Passpunkte selbst. Ebenso kann Agisoft Metashape auch das für die Entzerrung der Bilder benötigte DGM, aus den verwendeten Bildern, selbst erzeugen.

1.2 Institution

Die vorliegende Arbeit ist in Kooperation mit dem Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung München entstanden.

Das Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) mit Sitz in München, ist zentraler Ansprechpartner für den gesamten Bereich der amtlichen Vermessung in Bayern. Das LDBV erfasst die Geobasisdaten, beschreibt sie in Informationssystemen und stellt sie in Karten dar. Außerdem gibt das LDBV die für die Erstellung von Orthophotos notwendigen Bildflüge in Auftrag und archiviert diese anschließend. Zudem gehören der Breitbandausbau und die Digitalisierung von Daten, Prozessen und Infrastrukturen, etwa von Behördennetzen, in den Zuständigkeitsbereich des LDBV.

Außerdem ist das LDBV zugleich Aufsichtsbehörde über die 51 Ämter für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, die in Bayern für die Grundstücksvermessungen sowie den Ausbau des schnellen Internets zuständig sind.

Leiter des LDBV ist seit 1. April 2017 Wolfgang Bauer (LDBV o. D.)

2 Daten

Im folgenden Abschnitt werden das Untersuchungsgebiet und die Datengrundlage vorgestellt.

2.1 Untersuchungsgebiet

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Gebiet rund um die Stadt Ansbach untersucht. Das Untersuchungsgebiet liegt im Westen Mittelfrankens im Bundesland Bayern. Es umfasst die kreisfreie Stadt Ansbach und Teile des Landkreises Ansbach, welcher die Stadt Ansbach komplett umgibt. Aufgrund der großen Datenmenge wurde für eine bessere Analyse der Bilder, ein Gebiet mit einer Größe von ca. 10 km x 15 km ausgewählt. Dies verringert nicht nur die Datenmenge enorm, sondern senkt auch die Berechnungszeit der Orthophotos erheblich.

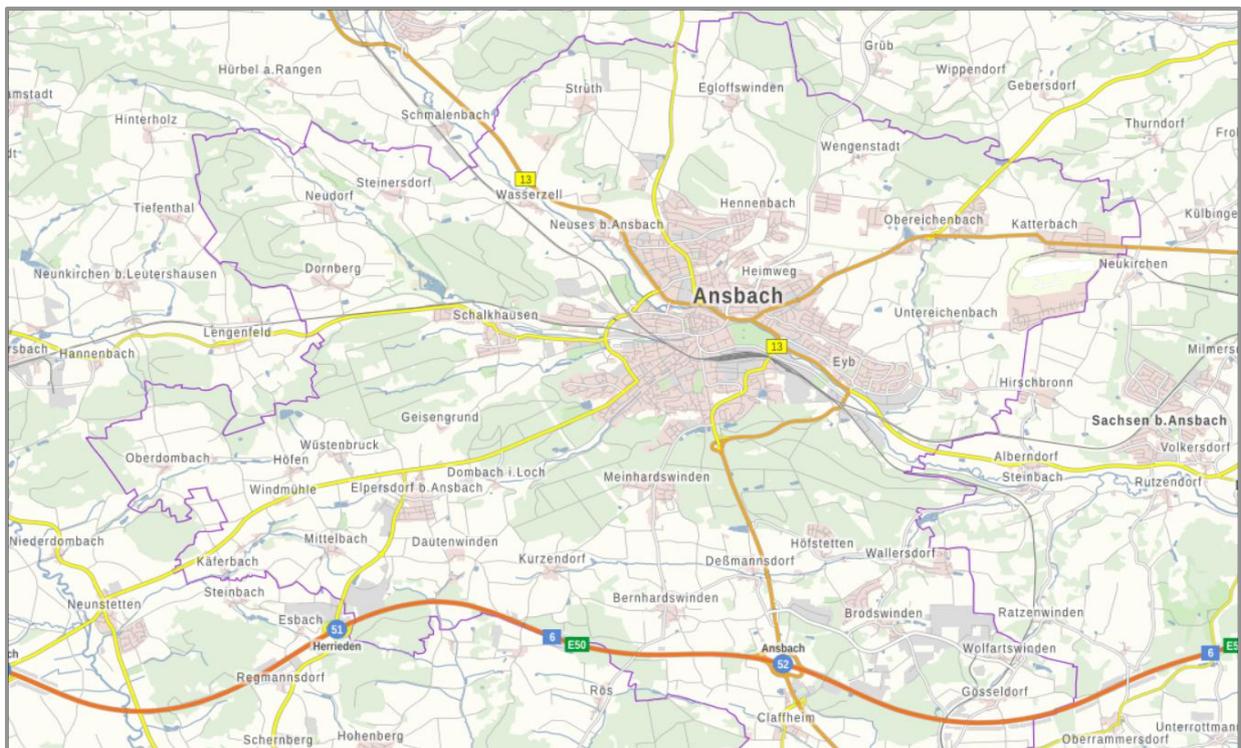


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet (BayernAtlas)

2.2 Luftbilder

Die Basisdaten, welche für die Auswertung herangezogen wurden, sind gescannte panchromatische Luftbilder vom Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung München (LDBV) in Maßstäben 1:5600, 1:14000, 1:15000 1:23.000 und 1:24000. Für den Untersuchungszeitraum sind Luftbilder aus den Jahren 1964, 1970, 1976, 1979, 1983, 1992 und 1994 verfügbar.

Tabelle 1: Auflistung der verwendeten Bildflüge mit dem Jahr der Aufnahme, dem Maßstab, der Abtastung des Scanners, der Anzahl der verwendeten Luftbilder, dem für die Digitalisierung der analogen Luftbilder verwendeten Scanner und der Flugnummer

Jahr	Maßstab	Abtastung Scanner	Anzahl der Bilder	Scanner	Flugnummer
1964	1:24000	1814 dpi	22	Präzisionsscanner Zeiss/Intergraph	64073/0, /2, /4
1970	1:14000	1200 dpi	67	Kamera Phase One	70092/0
1976	1:5600	1200 dpi	136	Kamera Phase One	76055/0
1979	1:23000	1200 dpi	20	Kamera Phase One	79010/0
1983	1:15000	1200 dpi	50	Kamera Phase One	83200/3, /4
1992	1:15000	1200 dpi	73	Kamera Phase One	92001/1
1994	1:23000	1200 dpi	54	Kamera Phase One	94109/0

2.3 Passpunkte

Für die Georeferenzierung der Orthophotos werden Passpunkte benötigt. Mit Hilfe dieser Punkte kann Agisoft Metashape aber auch die nicht vorhandene innere und äußere Orientierung berechnen. Die dafür benötigten Passpunkte wurden vom LDBV zur Verfügung gestellt. Bei diesen Punkten handelt es sich um Gebäudepunkt, also um Firstpunkte und Gebäudeecken. Da sich die Bebauung im Laufe der Zeit verändert und Gebäude abgerissen, Umgebaut oder erweitert wurden konnten nicht alle Passpunkte aus dieser Passpunktliste verwendet werden. Um die vom LDBV vorgegebene Mindestanzahl von 80 Passpunkte pro Orthophoto zu erreichen, mussten deshalb auch neue Passpunkte gefunden werden (Abschnitt 4.2)

3 Werkzeuge

Im folgenden Kapitel werden die für diese Arbeit verwendeten Werkzeuge erläutert.

3.1 Agisoft Metashape

Agisoft Metashape (früher bekannt unter Agisoft PhotoScan) ist ein Softwareprogramm für die photogrammetrische Verarbeitung von digitalen Bildern, sowie Laserscans und die Erzeugung von räumlichen 3D-Daten für GIS-Anwendungen. Agisoft Metashape nutzt dabei die Photogrammetrie, um aus Bildern hochgenaue Punktwolken, Geländemodelle, Orthophotos und 3D-Modelle zu erzeugen. Für die Generierung von Orthophotos benötigt man die innere und äußere Orientierung der Kamera und ein Digitales Geländemodell (DGM) für die Entzerrung der Bilder. Bei den für diese Arbeit verwendeten Luftbildern stand weder eine innere noch äußere Orientierung zur Verfügung, ebenso ist kein DGM für die Entzerrung der Luftbilder vorhanden. Aus den vorhandenen Kalibrierprotokollen konnte lediglich die Brennweite der Kamera ermittelt werden.

Der große Vorteil von Agisoft Metashape ist, dass es für die Herstellung von Orthophotos keine Angaben über die innere und äußere Orientierung oder ein separates DGM benötigt. Um die für die Orthophotogenerierung zwingend notwendigen Daten zu erhalten, berechnet sich das Programm, während der Bündelblockausgleichung (Abschnitt 4.1.6), Näherungswerte für die innere und äußere Orientierung und erzeugt im weiteren Verlauf der Orthophotoherstellung aus den Luftbildern ein digitales Geländemodell (DGM). In dieser Arbeit wurde Agisoft Metashape für die Erstellung der Orthophotos verwendet.

3.2 QGIS

QGIS (ehemals Quantum-GIS) ist eine Open Source Geoinformationssystemsoftware zum Betrachten, Bearbeiten, Erfassen und Analysieren räumlicher Daten. Mit QGIS ist es möglich Vektor- und Rasterdaten (in 2D und 3D) unterschiedlicher Formate und Projektionen anzuzeigen, ohne die Daten vorher in ein gemeinsames Datenformat konvertieren zu müssen. Darüber hinaus unterstützt QGIS verschiedene räumliche Datenbanken wie PostGIS oder SpatiaLite, aber auch viele gängige Raster- und Vektorformate wie z.B. GeoTIFF oder ESRI Shapefile. Ebenso ist es möglich OGC Web Services einzubinden und sich Mesh-Daten anzeigen zu lassen.

Für die Bearbeitung und Analyse von Daten bietet QGIS eine Vielzahl von Werkzeugen, welche jederzeit mit Plugins erweitert werden können. Für spezielle Bedürfnisse kann QGIS mit Hilfe der Programmiersprachen C++ und Python, um eigene Anwendungen erweitert werden. Das Programm QGIS wurde im Rahmen dieser Arbeit für die Generierung neuer Passpunkte verwendet.

4 Methodik

4.1 Orthophotogenerierung

4.1.1 Orthophoto

Luftbilder geben die Landschaft durch die zentralperspektivische Aufnahme des Bildes verzerrt wieder. Sie haben im Gegensatz zu Karten den Nachteil, dass es nicht möglich ist, in ihnen Distanzen, Flächen und Koordinaten zu messen. Ein Orthophoto hingegen ist eine orthogonale Aufnahme und bietet somit eine verzerrungsfreie und maßstabstreue Abbildung der Erdoberfläche, in welcher Distanzen, Flächen und Koordinaten gemessen werden können.

Digitale Orthophotos werden aus Luftbildern durch photogrammetrische Verfahren, unter Hinzunahme der inneren und äußeren Orientierung, sowie eines digitalen Höhenmodells hergestellt. Das Ergebnis sind georeferenzierte, digitale Abbildungen der Erdoberfläche, in denen jedem Pixel eine eindeutige Koordinate zugeordnet werden kann (Krzystek 2018).

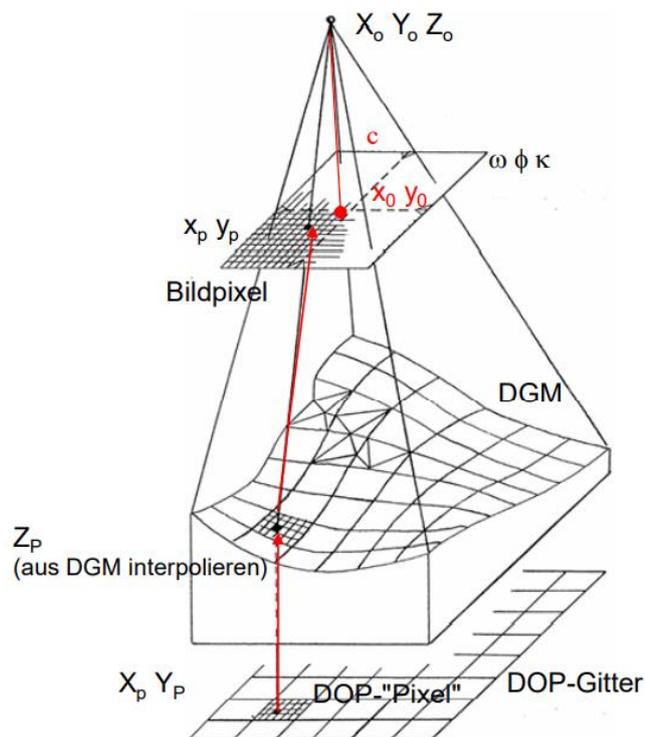


Abbildung 2: Entstehung des Orthophotos. Die oberste der drei Ebenen ist das Luftbild, dieses wird mit Hilfe des digitalen Geländemodells (= zweite Ebene) entzerrt. Das Ergebnis ist das Orthophoto (= untere Ebene) [Krzystek/Stößel 2018]

4.1.2 Innere Orientierung

Die innere Orientierung wird definiert durch die Kamerakonstante c , die Lage des Bildhauptpunkt H' (x_h, y_h) und den Verzeichnungsfehler (Abschnitt 4.1.3).

„Die Kamerakonstante ist der lotrechte Abstand des Projektionszentrums O zum Bildhauptpunkt und entspricht der Brennweite f des Objektivs“ (Krzystek 2018).

Der Bildhauptpunkt ist der Nullpunkt der zentralperspektivischen Abbildung. Er ist festgelegt als Lotfußpunkt des Lots durch das Projektionszentrum auf die Bildebene (Luhmann 2018).

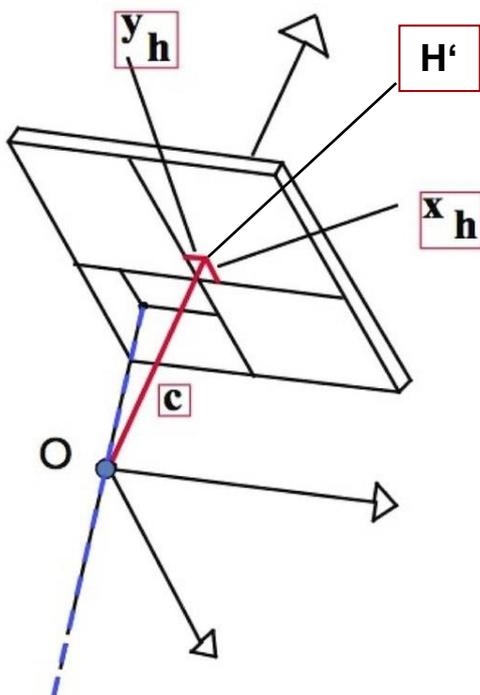


Abbildung 3: Darstellung der inneren Orientierung (Mandy Schulze 2016)

4.1.3 Verzeichnung

Unter Verzeichnung versteht man die nicht maßstabgetreue Abbildung eines Objektes. Die Verzeichnung ist ein geometrischer Abbildungsfehler optischer Kameras und entsteht durch die Linse der Kamera und äußert sich in Form von gekrümmten Linien. Die lässt sich besonders gut an Bauwerken mit geraden Linien zeigen wie z.B. einer Landebahn. Vergleicht man die in Wirklichkeit gerade Landebahn mit einem Foto der Landebahn, wird man feststellen, dass sich die Landebahn auf dem Foto nicht gerade verläuft, sondern krümmt (Abb. 4). Die Krümmung der Linien nimmt mit zunehmendem Abstand vom Bildzentrum zu. Daraus folgt, Objekte nah der optischen Achse werden kaum bis gar nicht verzeichnet, aber mit zunehmender Entfernung des Objekts zur Bildachse wird die Verzeichnung immer größer.

Werden die Linien zum Bildrand nach außen gebogen, entsteht eine tonnenförmige Verzeichnung. Werden die Linien hingegen in Richtung Bildmitte gebogen ergibt sich eine kissenförmige Verzeichnung. Die Tonnen- oder kissenförmige Verzeichnung wird auch als radialsymmetrische Verzeichnung bezeichnet. Neben der radialsymmetrischen Verzeichnung gibt es auch noch die tangentielle und asymmetrische Verzeichnung, welche allerdings nur bei hohen Genauigkeiten berücksichtigt werden müssen (Krzystek 2018).

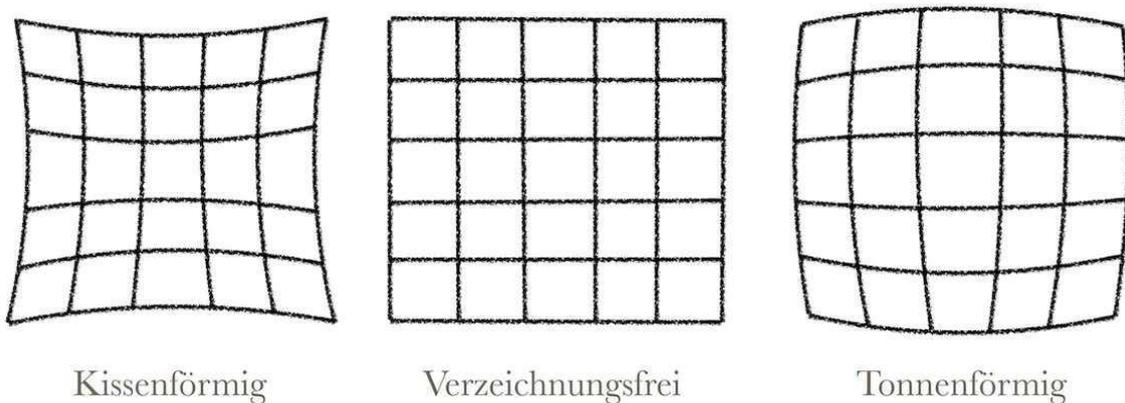


Abbildung 4: Darstellung der verschiedenen Verzeichnungen [Kay Pehnke 2016]

4.1.4 Äußere Orientierung

Als äußere Orientierung bezeichnet man die Lage und Position der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt des Bildes.

Die Parameter der äußeren Orientierung sind Koordinaten X , Y , Z und die Drehwinkel ω , κ , φ . Die äußere Orientierung wird während des Bildfuges durch die Nutzung von GPS und INS bestimmt. Die Position wird dabei durch das GPS und die Drehwinkel durch das INS bestimmt. Unter dem Drehwinkel versteht man dabei die Lage der Kamera bezogen auf die Lotrichtung und die Flugrichtung.

Die Koordinaten X , Y , Z des Projektionszentrums O beschreiben die Position der Kamera.

Die Lage wird durch die drei Drehwinkel ω , κ , φ definiert. Diese beschreiben die Rotation des Bildkoordinatensystems im Raum (Luhmann 2018).

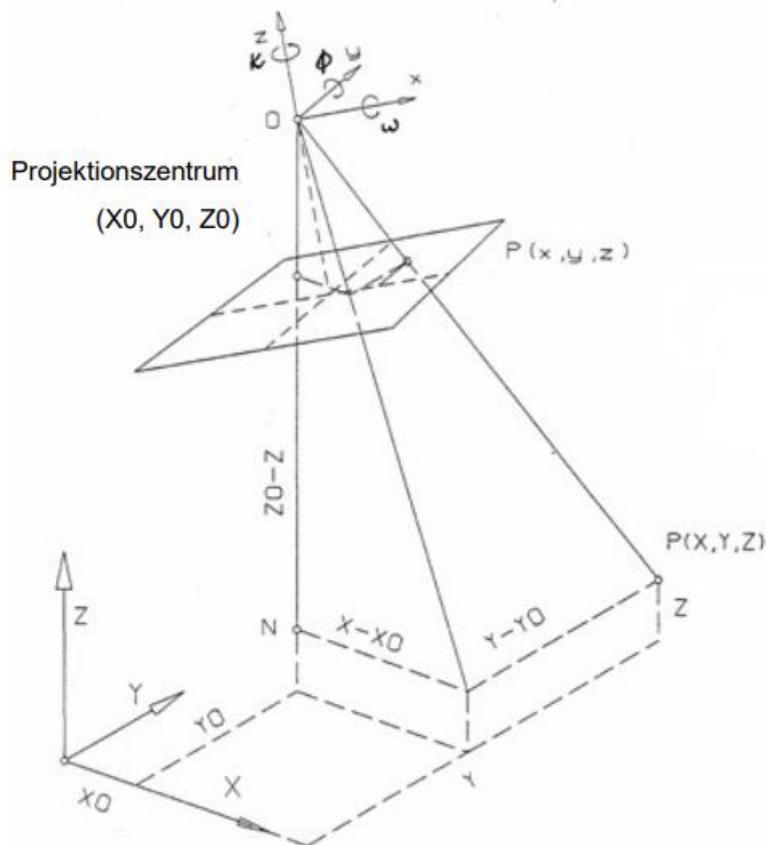


Abbildung 5: Darstellung der äußeren Verzeichnung [Krzystek 2018]

4.1.5 Digitales Höhenmodell

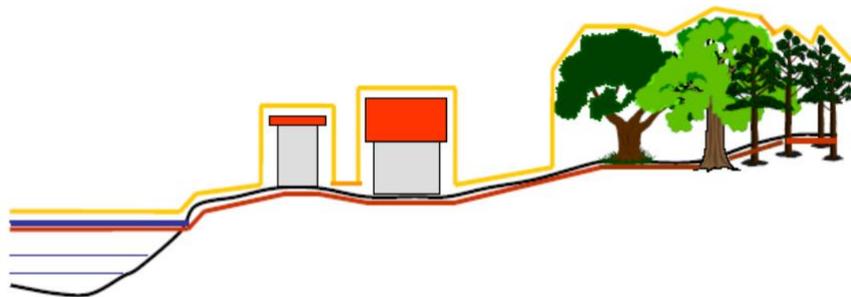
Das digitale Höhenmodell ist ein Modell zur höhenmäßigen Beschreibung der Erdoberfläche, inklusive aller auf ihre vorzufindenden Objekte wie z.B. Gebäude, Bäume und Brücken.

Man unterscheidet dabei zwischen einem digitalen Geländemodell (DGM,) und einem digitalen Oberflächenmodell (DOM).

Im Gegensatz zum digitalen Oberflächenmodell, welches die Erdoberfläche samt aller Objekte darstellt, wie z.B. Gebäude, Bäume und Brücken, beschreibt das digitale Geländemodell nur die natürlich Geländeform der Erdoberfläche ohne künstliche oder natürliche Objekte.

DOM und DGM liegen meist als Rasterdatensatz vor, dabei beschreiben die Koordinaten X und Y die Lage des Pixels. Die Höhenlage des Pixels wird durch den Wert Z angegeben.

Digitale Höhenmodelle könne auf unterschiedliche Weise erzeugt werden. Zum einen durch Luft- oder Satellitenbilder mit Hilfe der Photogrammetrie, durch Laserscanning, oder auch durch den Einsatz Radarsystemen (Krzystek 2018).



Digitales Geländemodell DGM: Trennlinie zwischen Boden / Wasser und Luft
 Digitales Oberflächenmodell DOM: Verläuft an Bauwerken und Bewuchs „oben“

Abbildung 6: Unterschied zwischen DOM und DGM [Riemensperger 2004]

4.1.6 Bündelblockausgleichung

Unter Bündelblockausgleichung oder auch Aerotriangulation versteht man die gleichzeitige Bestimmung aller Orientierungsparameter eines Blockverbandes, welcher aus beliebig vielen Bildern bestehen kann.

Während der Bündelblockausgleichung werden die innere und äußere Orientierung bestimmt, sowie die Bilder georeferenziert.

Um eine Bündelblockausgleichung durchzuführen, müssen sich die Luftbilder erfahrungsgemäß in Längsrichtung mindestens 60% und 20% in Querrichtung überlappen. In diesem Überlappungsbereich werden die Verknüpfungspunkte gesucht, welche es ermöglichen die Bilder untereinander zu verknüpfen. Die Passpunkte werden für die Georeferenzierung der Bilder benötigt. Sie stellen den Zusammenhang zwischen dem Bildkoordinatensystem und dem verwendeten Landeskoordinatensystem her.

4.2 Erstellung der Passpunkte

Passpunkte sind in Luftbildern eindeutig identifizierbare und präzise messbare Punkte, für die Koordinaten im geodätischen Landeskoordinatensystem vorliegen. Die Passpunkte dienen zur Georeferenzierung von Luftbildverbänden, mittels Aerotriangulation und zur unabhängigen Kontrolle der Genauigkeit der Georeferenzierung und der erzeugten Orthophotos (LAIv o. D.).

Das LDBV München hat für die Durchführung dieser Bachelorarbeit eine Datenbank mit Passpunkten zur Verfügung gestellt. Da sich aber im Laufe der Zeit baulich viel getan hat, konnten nicht alle Passpunkte verwendet werden und es mussten somit noch zusätzliche Passpunkte erstellt werden.

Für die Erstellung der Passpunkte wurde die Software QGIS genutzt. Eine Methode, um Passpunkte zu finden, ist der Vergleich der historischen Luftbilder mit einem aktuellen Digitalen Orthophoto, in Form eines WMS-Dienstes. Zunächst muss hierfür der aktuelle WMS des LDBV in QGIS eingefügt werden. Dieser WMS liefert ein schwarz-weiß Bild Bayerns, welches den visuellen Vergleich ermöglicht. Außerdem wird über den WMS-Dienst Easting und Northing der neuen Passpunkte ermittelt. Die Höhe der neuen Passpunkte wurde mit Hilfe eines vom LDBV bereitgestellten DOM, mit einer Gitterweite von 20 m, ermittelt. Da bei den Luftbildflügen keine künstlichen Punkte zur Verfügung standen, musste auf markante bauliche Gegebenheiten, wie Firste, Gebäudeecken, Straßenkreuzungen oder Einfahrten zurückgegriffen werden. Als mögliche Passpunkte eignen sich nur Punkte, die sich im Laufe der Zeit nicht verändert haben.

Weitere für diese Arbeit wichtige Punkte sind die „Key Points“ und „Tie Points“. Bei „Key Points“ handelt es sich um markante Punkte z.B. Punkte mit hohem Kontrast. Diese Punkte werden von Agisoft in jedem Bild gesucht. Als „Tie Points“ oder auch Verknüpfungspunkte werden „Key Points“ bezeichnet, welche in mindestens zwei Bildern vorkommen. Mit Hilfe der „Tie Points“ können die einzelnen Luftbilder untereinander verknüpft werden.

4.3 Agisoft Metashape Workflow

Alle in dieser Arbeit verwendeten Orthophotos wurden mit Agisoft Metashape erstellt. Im gesamten Kapitel Auswertung wurde das Benutzerhandbuch von Agisoft Metashape als Quelle (Agisoft Metashape 2021) und die interne Anleitung des LDBV (LDBV Anleitung 2021) verwendet.

Agisoft Metashape bietet einen Workflow für die Erstellung von Orthophotos. Es müssen lediglich die Ausgangsdaten geliefert und für die Berechnung notwendigen Parameter eingestellt werden.

Die Ausgangsdaten für die Berechnung des Orthophotos sind Luftbilder. Diese werden deshalb zuerst in Agisoft Metashape eingelesen.

Anschließend wird die Kamerakalibrierung über den Menüpunkt „Camera Calibration“ eingestellt. Hier wurde die Pixelgröße der gescannten Luftbilder eingegeben und die Brennweite der Kamera, welche aus dem Kalibrierprotokoll entnommen werden konnte, definiert. Das Koordinatensystem in welchem Agisoft arbeiten soll, sowie das Koordinatensystem der Kamera und Passpunkte wird über dem Menüpunkt „Settings“ definiert. Hierbei wurde der EPSG-Code 25832, welcher dem Koordinatensystem ETRS89/UTM mit der Zone 32N entspricht, verwendet.

Um später ein Orthophoto erstellen zu können, müssen die Bilder vorher ausgerichtet werden. Dafür bietet Agisoft Metashape die Option „Align Photos“, welche automatisch die Position der Bilder im Bildflug ermittelt und sie richtig ausrichtet.

Bei „Align Photos“ handelt es sich um eine Bündelblockausgleichung (Abb. 4.1.6). Hierbei werden alle Bilder gleichzeitig ausgerichtet und mit Hilfe der in diesem Schritt berechneten Verknüpfungspunkte untereinander verknüpft. Außerdem wird bei diesem Schritt die innere und äußere Orientierung berechnet.

Vor der Berechnung kann der Nutzer angeben mit welcher Genauigkeit die Kameraposition berechnet wird. Mit der Einstellung „Highest“ werden die Bilder mit dem Faktor 4 vergrößert. Dies bedeutet, dass aus einem Pixel vier Pixel werden und die Auflösung nun $\frac{1}{4}$ Pixel ist. Unter „High“ arbeitet das Programm mit der Originalgröße der aufgenommenen Bilder und mit der Einstellung „Medium“ wird die Aufnahme um den Faktor 4 verkleinert. Mit der Einstellung „Low“ wird das Bild mit dem Faktor 16 verkleinert und „Lowest“ führt zu einer weiteren Verkleinerung um das Vierfache. Die vom LDBV vorgegebene Einstellung „Lowest“ wurde verwendet.

Ebenso kann einen Grenzwert für die „Key Points“ und „Tie Points“ festlegen. „Key Points“ sind Merkmalspunkte, die das Programm in jedem Bild findet und „Tie Points“ sind die Punkte mit denen Agisoft die Bilder verknüpft. Hier wurden die von Agisoft empfohlenen Werte von 40000 „Key Points“ und 4000 „Tie Points“ verwendet.

Nach dem Ausrichten der Bilder werden die Passpunkte in Agisoft Metashape geladen. Diese sind einerseits für die Georeferenzierung der Bilder notwendig, andererseits kann über die Passpunkte die Genauigkeit der Bündelblockausgleichung überprüft werden.

Da die Bilder nicht georeferenziert sind, müssen vorab einige Passpunkte von Hand gesetzt und deren Koordinaten eingegeben werden, erst dann kann die gesamte Passpunktliste geladen werden. Anhand der vorab gesetzten Passpunkte ist es Agisoft Metashape möglich, die ungefähre Position der neuen Punkte in den Bildern zu berechnen.

Da die Georeferenzierung durch die wenigen vorab gesetzten Passpunkte recht ungenau ist, werden die neu eingefügten Passpunkte nicht an der richtigen Stelle eingefügt und müssen von Hand, in jedem Bild, richtig positioniert werden.

Dabei werden die Punkte, die noch nicht händisch bearbeitet wurden, mit einer grauen Fahne dargestellt. Passpunkte, welche bereits richtig positioniert wurden, werden mit einer grünen Fahne dargestellt.

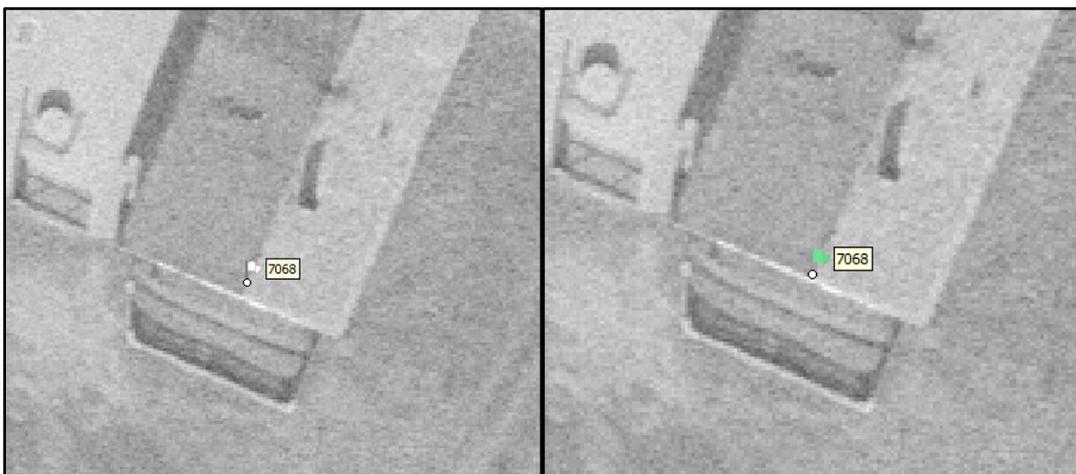


Abbildung 7: Setzen der Passpunkte. Auf der linken Seite sieht man den von Agisoft platzierten Punkt. Der von Agisoft platzierte Punkt wird mit einer grauen Fahne markiert. Da sich dieser Punkte nicht an der richtigen Stelle befindet muss dieser von Hand an der richtigen Stelle geschoben werden. Händisch bearbeitete Punkte werden mit einer grünen Fahne markiert.

Nachdem alle Passpunkte richtig positioniert wurden, wird die innere und äußere Orientierung jeder Kamera, mit der Funktion „Optimize Cameras“ berechnet. Anschließend können, über das Fenster „View Error“, die Differenzen der Koordinaten zwischen den ausgeglichenen Passpunkten und der Passpunktliste angezeigt werden.

Im nächsten Schritt werden nun alle Passpunkte mit einer Abweichung größer $\pm 1,50$ Meter gelöscht. Hierbei handelt es sich um Passpunkte am Blockrand. Da der Blockrand auch gleichzeitig der Bildrand ist, im welchen die Beleuchtung gering und die Verzeichnung am größten ist, kann es sein, dass ein Passpunkt falsch platziert wurde. Durch die geringe Anzahl an Passpunkten am Bildrand, wird dieser Fehler nur schlecht ausgeglichen und kann somit leicht als Ausreißer identifiziert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Passpunkte einzeln gelöscht werden und nach jedem löschen „Optimize Cameras“ durchgeführt wird. Dies ist notwendig, um zu verhindern, dass Passpunkte gelöscht werden, die nur aufgrund des gelöschten Punktes, eine zu große Abweichung aufweisen.

Nachdem alle Passpunkte, mit einer zu großen Abweichung gelöscht und die Kamera optimiert wurde, folgt die Berechnung der „Dense Cloud“.

Anhand der berechneten Kameraposition werden Tiefeninformationen für jedes Luftbild des Bildflugs berechnet. Das Ergebnis ist die „Depth Map“, eine 3D-Punktswolke, welche die Geländeoberfläche eines jeden Luftbildes abbildet. Aus der Kombination der einzelnen „Depth Maps“ wird die „Dense Cloud“ gebildet. Bei der „Dense Cloud“ handelt es sich um eine dichte 3D-Punktswolke, welche die Geländeoberfläche, der in den Bildern dargestellten Landschaft, wiedergibt.

Agisoft bietet dem Nutzer die Auswahl mehrerer Qualitätsstufen für die Bildung der Dense Cloud. Höhere Qualitätseinstellungen bieten eine detailreichere und genauere Rekonstruktion der Geometrie der Geländeoberfläche, benötigen dafür aber eine höherer Berechnungszeit. Für die Berechnung der Dense Cloud wurde, der Anleitung des LDBV folgend (Anleitung LDBV), die niedrigste Qualitätsstufe gewählt. Die Nutzung der niedrigsten Qualitätsstufe ist dem Umstand geschuldet, dass Agisoft auf höheren Qualitätseinstellungen eine viel detailreichere Punktswolke liefern würde, in den Strukturen wie z.B. Gebäude oder Bäume dargestellt werden, was einem DOM entsprechen würde. Ziel des LDBV ist es aber eine Punktswolke zu erstellen, die einem DGM gleicht, da keine True Orthophotos erstellt werden sollen, sondern Orthophotos. Aufgrund dessen wurde die Dense Cloud mit der niedrigsten Qualitätsstufe erstellt.

Eine weitere Einstellungsmöglichkeit betrifft die Tiefenfilterung. Die Tiefenfilterung kann mit drei verschiedenen Modi durchgeführt werden. Wenn wichtige kleine Details dargestellt werden sollen, empfiehlt sich die Einstellung „Mild“. Falls keine wichtigen kleinen Details vorhanden sind und die Rekonstruktionsgrundlage Luftbilder sind, empfiehlt das Handbuch die Einstellung „Aggressiv“.

Die letzte Einstellung „Moderat“ erzeugt ein Ergebnis zwischen den Einstellungen „Mild“ und „Aggressiv“. Hinter jeder der Einstellungsmöglichkeiten „Mild“, „Moderat“ und „Aggressiv“ befindet sich eine eigene Filtermethode, welche Agisoft leider nicht weiter beschreibt.

Als nächstes wird nun auf Grundlage der Dense Cloud ein Mesh berechnet. Das Mesh ist eine Dreiecksvermaschung, die aus der Dense Cloud, der Sparse Cloud oder der Depth Map erzeugt werden kann.

Bei der Sparse Cloud handelt es sich um eine Punktwolke bestehend aus den Verknüpfungspunkten. Durch die geringe Punktzahl der Spase Cloud ist die Berechnungszeit kurz, erzeugt dementsprechend aber auch ein Mesh mit schlechterer Qualität. Die Generierung des Mesh mit Hilfe der Dense Cloud liefert dagegen ein qualitativ hochwertiges Ergebnis, erhöht aber die Rechenzeit. Für Szenen und Objekte mit einer hohen Anzahl an kleinen Details empfiehlt sich die Depth Map als Datengrundlage.

Für die Berechnung des Mesh stehen wieder einige Einstellmöglichkeiten zur Verfügung. Mit Hilfe der Einstellung „Face Count“, kann festgelegt werden, wie viele Polygone erzeugt werden. Hierbei kann zwischen „High“, „Medium“, „Low“ oder „Custom“ ausgewählt werden. Die Anzahl der Polygone richtet sich dabei nach den Punkten in der „Dense Cloud“. Die entspricht bei „High“ $1/5$, bei „Medium“ $1/15$ und bei „Low“ $1/45$ der Punkte der „Dense Cloud“. Umso höher die Anzahl der Polygone umso höher ist auch die Auflösung des Mesh. Durch die hohe Auflösung wird aber nicht nur das Gelände dargestellt, sondern auch Objekte wie z.B. Gebäude oder Bäume. Da ein Mesh mit hoher Auflösung einem DOM entsprechen würde, was aber nicht gewollt ist, da ein DGM erzeugt werden soll, wird die Einstellung „Low“ gewählt. Durch die geringere Anzahl an Polygonen, sind die einzelnen Polygone größer und Erhebungen wie z.B. Gebäude oder Bäume werden nicht dargestellt.

Aus dem Mesh wiederum, wird der Anleitung des LDBV folgend, anschließend das DEM mit einer Gitterweite von 20 Metern erzeugt. Dieses DEM dient nur zur Darstellung des Höhenverlaufes.

Im letzten Schritt wird aus den einzelnen Luftbildern unter Hinzunahme des zuvor berechneten Mesh, das Orthophoto mit einer Pixelgröße von 0,4 m erzeugt.

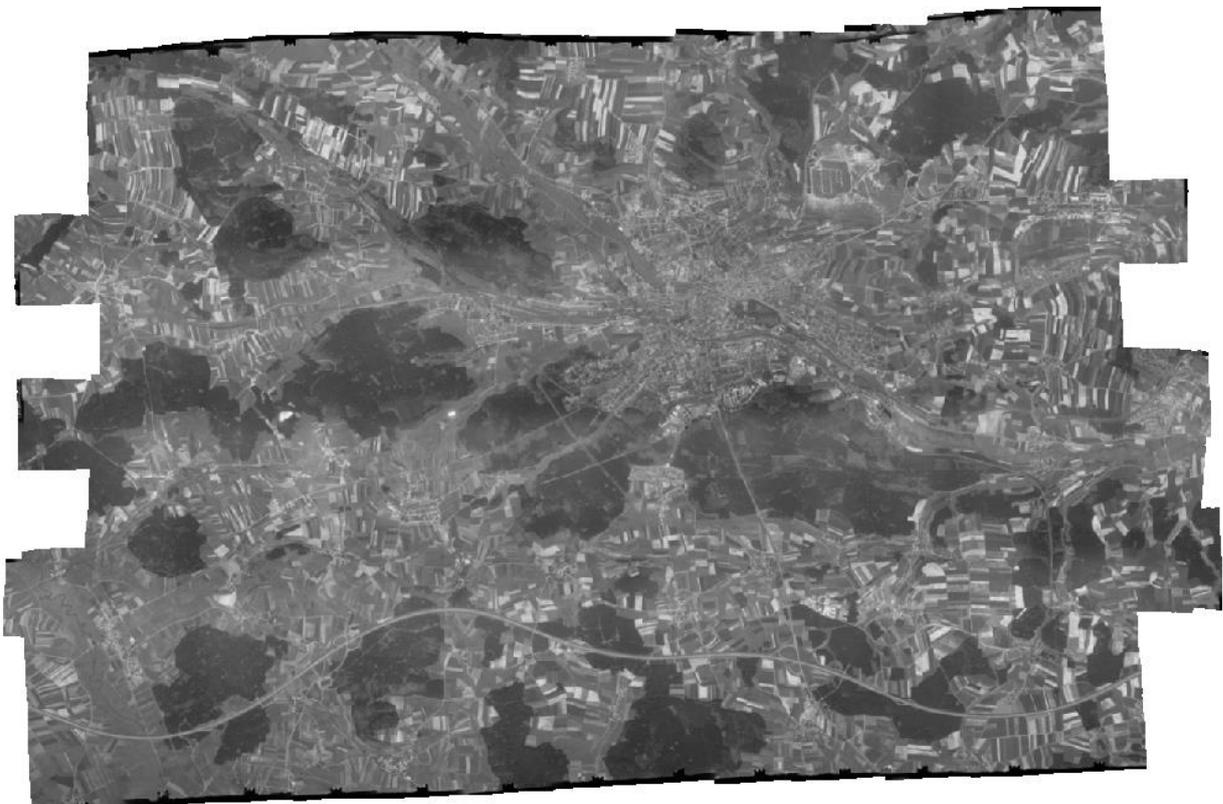


Abbildung 8: Darstellung des Orthophotos von 1983

4.4 Berechnung der Genauigkeit

Um die Genauigkeit der erstellten Orthophotos zu überprüfen, wurden in ihnen neue Passpunkte gesucht. (Abschnitt 4.2).

Um die Genauigkeit des Orthophotos zu bestimmen, wurde Passpunkte im Orthophoto gemessen und anschließend von den tatsächlichen Koordinaten abgezogen. Mit Hilfe dieser Differenz wurden die Ellipsen erstellt, welche die Standardabweichung darstellen und somit die Lagegenauigkeit widerspiegeln. Bei der Höhen-
genauigkeit wurde die Standardabweichung verwendet.

Alle Vergleiche der Lage und Höhe beziehen sich hierbei auf die Ergebnisse der Standardvorgehensweise (= Standard) des LDBV München.

5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Methodik aufgezeigt. Neben der Standardvorgehensweise des LDBV (= Standard), wurden die Orthophotos ebenso mit einer veränderten Genauigkeit der Pixelkoordinate (= 2 Pixel) und einer veränderten Genauigkeit der Passpunkte (= Marker 1m) berechnet.

Die Genauigkeit der Pixelkoordinate wurde hierbei von 1 Pixel auf 2 Pixel verschlechtert und die Genauigkeit der Passpunkte wurde von 2 Meter auf 1 Meter verbessert. Neben der Veränderung der Genauigkeit wurde auch getestet, welchen Einfluss es hat, nur die Hälfte der Passpunkte (= halbe Punkte) zu verwenden.

Durch die große Überlappung der Luftbilder in den 1990er Jahren konnte weiterhin getestet werden, welche Auswirkung die Löschung der Hälfte der Bilder des Flugstreifens (= halbe Bilder), auf die Genauigkeit des Orthophotos hat. D.h. in der Folge der aufgenommenen Bilder wurde jedes zweite Bild gelöscht.

Tabelle 2: Aufzählung der verwendeten Berechnungsmethoden

Berechnungsmethoden
Standard
2 Pixel
Marker 1m
Halbe Punkte
Halbe Bilder

5.1 Horizontale Genauigkeit

Bei der Betrachtung der Ellipsen der Georeferenzierung fällt auf, dass diese über alle Berechnungsmethoden hinweg kleiner sind als die Genauigkeit der Orthophotos.

Die Ellipsen (Abb. 9) zeigen deutlich die Genauigkeitssteigerung der Orthophotos im Laufe der Jahre. Die Länge der großen Halbachse verbessert sich hierbei von 1,541 m im Jahr 1970 auf 0,435 m im Jahre 1994.

Wie die Aufnahmezeitpunkte 1976 (Maßstab 1:5600), 1979 (Maßstab 1:23000) und 1983 (Maßstab 1:15000) deutlich zeigen, ergibt eine Veränderung des Maßstabs eine Verbesserung der Genauigkeit. Für die Jahre 1994 und 1992 trifft dies hingegen nicht zu. So ist die Ellipse aus dem Jahr 1994 mit einer Fläche von 0.507 m² und einem Maßstab vom 1:23000 kleiner als die Ellipse aus dem Jahre 1992 mit einer Fläche von 0.960 m² und einem Maßstab von 1:15000.

Eine höhere Auflösung steigert ebenfalls die Genauigkeit des Orthophotos. Deutlich zeigt dies das Jahr 1964. Dieser Bildflug wurde nicht wie alle anderen, mit einer Abtastung von 1200 dpi, sondern mit einer Auflösung von 1841 dpi, gescannt.

So ist das Orthophotos des Jahres 1964 mit einer großen Halbachse von 1,198 m, trotz des größeren Maßstabs, genauer als die Orthophotos aus dem Jahr 1970, mit einer großen Halbachse von 1,541 m.

Mit einer veränderten Berechnungsgenauigkeit verändert sich die Form und Ausrichtung der Ellipsen der Georeferenzierung kaum. Die Größe der Ellipse verringert sich hingegen deutlich. So verändert sich zum Beispiel die große Halbachse der Ellipse aus dem Jahr 1979 von 0,520 m bei „Standard“ (Abb. 9) auf 0,381 m bei „2 Pixel“ (Abb. 10), sowie 0,389 m bei „Marker 1m“ (Abb. 11).

Ebenso wie bei den Ellipsen der Georeferenzierung, ändert sich die Form und Ausrichtung der Ellipsen des Orthophotos bei veränderter Berechnungsgenauigkeit, kaum und bleibt in Nord-Süd-Richtung am größten.

Im Gegensatz zur Georeferenzierung vergrößern sich die großen Halbachsen der Ellipsen des Orthophotos zum Teil deutlich, vor allem wenn die Genauigkeit der Marker von zwei auf einen Meter verändert wird. So verlängert sich die große Halbachse, mit der Variante „Marker 1m“, im Jahr 1994 von 0,435 m auf 0,703 m (Anhang 1.1.3). Nur das Jahr 1983 bildet eine Ausnahme. Hier kommt es, bei einer Veränderung der Berechnungsgenauigkeit auf „2 Pixel“ und „Marker 1m“, in beiden Fällen zu einer Verkürzung der großen Halbachse um 0,15 m und 0,18 m.

Auch beim Aufnahmezeitpunkt 1992 kommt es bei einer Berechnung mit der Genauigkeit 2 Pixel zu einer Verkürzung der großen Halbachse, aber auch zu einer Richtungsänderung von Nord-Ost auf Nord-West.

Eine eindeutige Verbesserung der Lagegenauigkeit, über alle Aufnahmezeitpunkte und Maßstäbe hinweg, konnte für keine der beiden Varianten „2 Pixel“ (Abb. 10) und „Marker 1m“ (Abb. 11), festgestellt werden.

Werden nur die Hälfte der Passpunkte für die Berechnung der Orthophotos verwendet (Abb. 12), verschlechtert sich die Lagegenauigkeit der Georeferenzierung über alle untersuchten Aufnahmezeitpunkte und Maßstäbe hinweg.

Die Genauigkeit der Orthophotos verschlechtert sich bei Halbierung der Passpunkte bei allen untersuchten Aufnahmezeitpunkten und Maßstäben. Der Aufnahmezeitpunkt 1970 bildet hier aber eine Ausnahme. In diesem Jahr verbesserte sich die Genauigkeit.

Die Berechnung des Orthophotos mit nur der Hälfte der Bilder (Abb. 13) hat die gleichen Auswirkungen wie die Berechnung des Orthophotos mit der Hälfte der verfügbaren Passpunkte. Auch hier verschlechtert sich die Genauigkeit der Georeferenzierung und die des Orthophotos.

Die Verringerung der Genauigkeit fällt bei der Georeferenzierung gering aus. So verändert sich die große Halbachse hier im Jahr 1994 von 0,3942 m auf 0,4308 m. Beim Orthophoto hingegen verlängert sich die große Halbachse im selben Jahr, von 0,4352 m auf 1,1877 m.

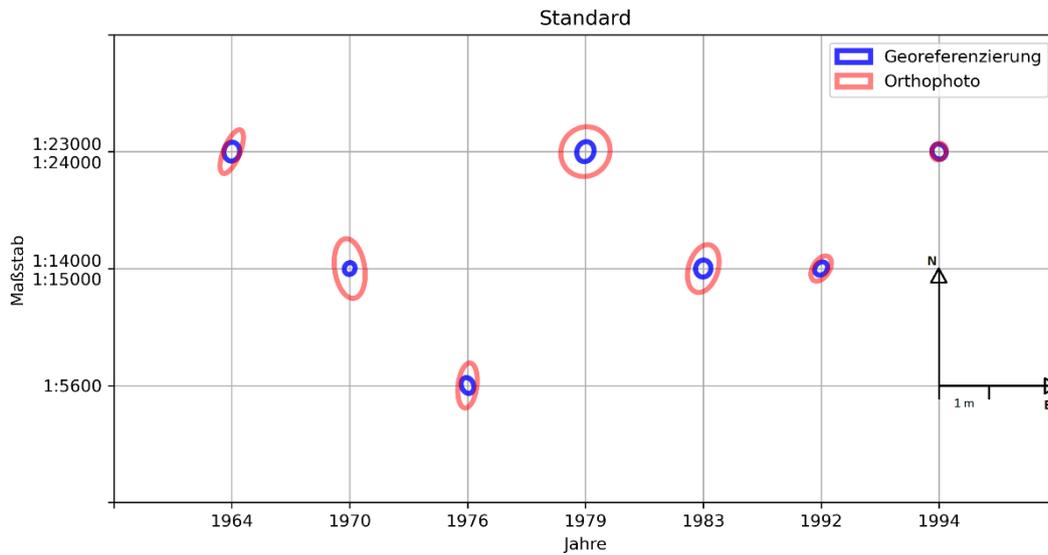


Abbildung 9: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse der Berechnungsmethode „Standard“

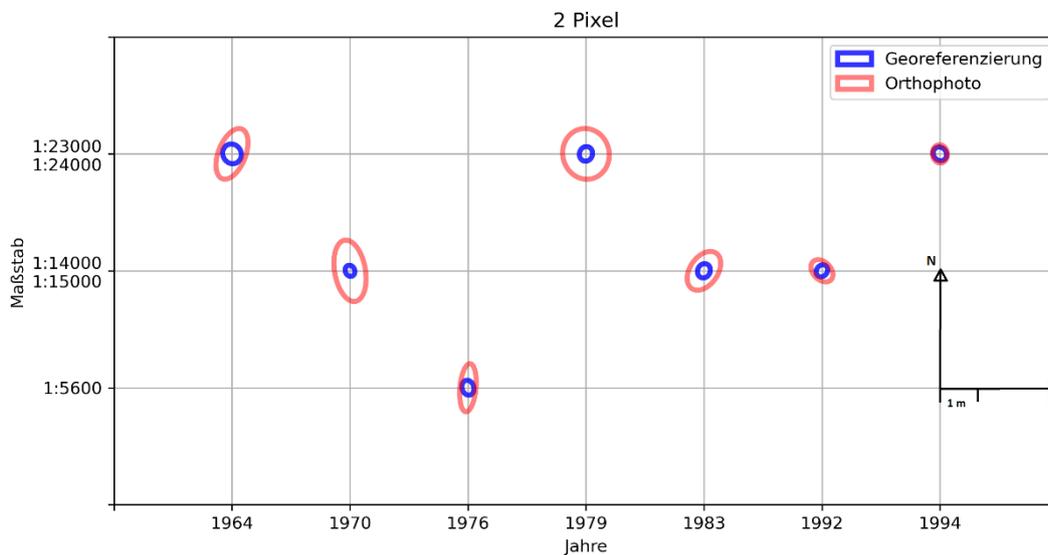


Abbildung 10: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse mit der Berechnungsmethode „2 Pixel“

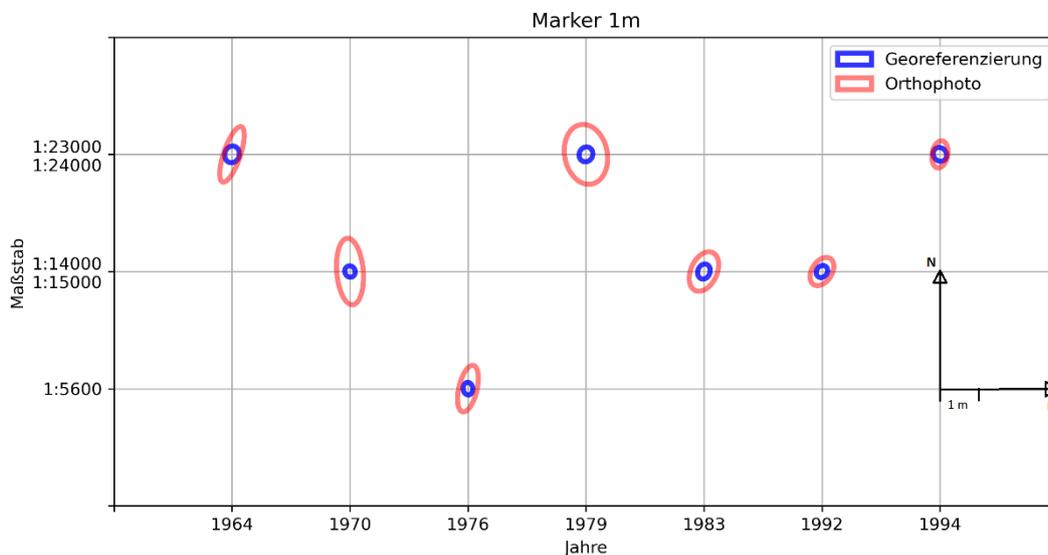


Abbildung 11: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse mit der Berechnungsmethode „Marker 1m“

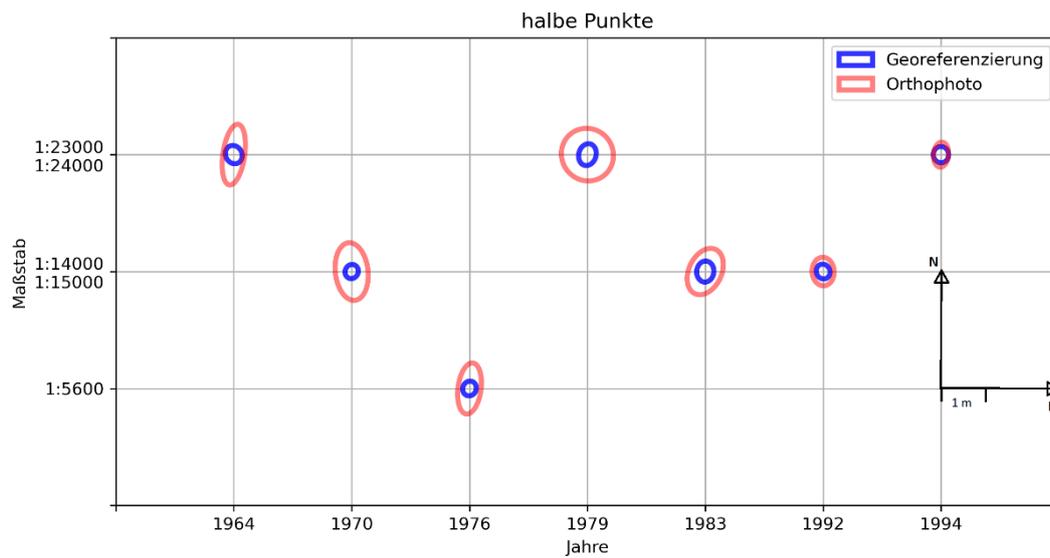


Abbildung 12: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse bei Verwendung der Hälfte der Passpunkte

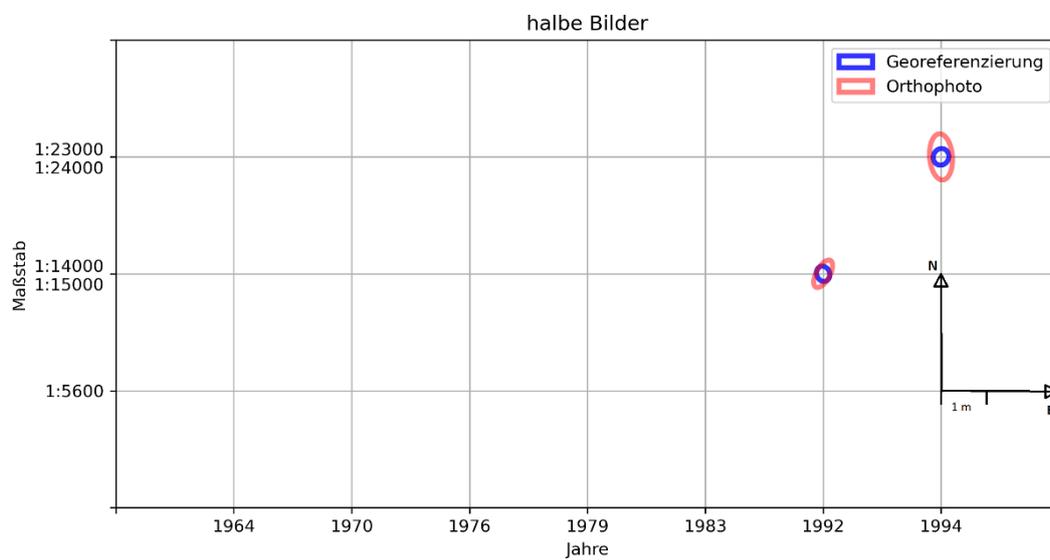


Abbildung 13: Darstellung der Präzision anhand der Konfidenzellipse bei Verwendung der Hälfte der Bilder

5.2 Vertikale Genauigkeit

Nicht nur die Lagegenauigkeit, sondern auch die Höhengenaugigkeit verbessert sich im Laufe der Jahre. Ein Grund hierfür ist die stetig steigende Längs- und Querüberdeckung der Bilder im Laufe der Jahre.

Besonders deutlich ist dies bei der Standardvorgehensweise zu erkennen. Hier verbessert sich die Genauigkeit von 3,495 m im Jahr 1970 auf 1,645 m im Jahr 1992.

Keine der verwendeten Berechnungsmethoden konnte, wie bereits im vorherigen Abschnitt, eindeutig als beste Berechnungsmethode identifiziert werden. So liefert im Jahr 1970 die Berechnung mit der „Hälfte der Punkte“, 1983 die Berechnung mit „Marker 1m“ und im Jahr 1992 die Standardvorgehensweise, die jeweils besten Ergebnisse.

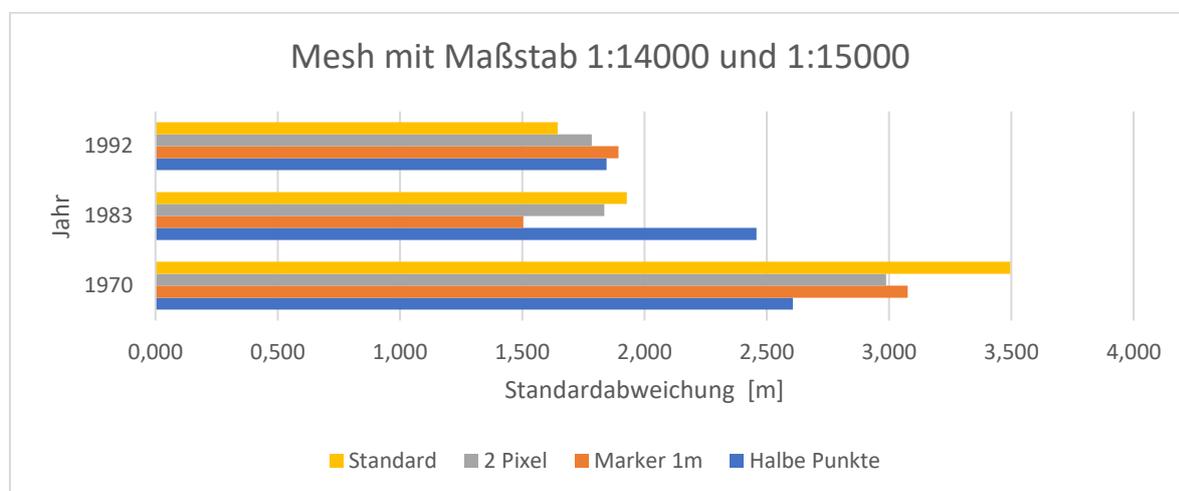


Abbildung 14: Darstellung der Genauigkeitsänderungen des Mesh Laufe der Jahre für die Maßstäbe 1:14000 und 1:15000

Auch bei der Georeferenzierung ist eine Verbesserung der Genauigkeit im Laufe der Jahre zu beobachten.

Die Georeferenzierung mit der Variante „Marker 1m“ liefert hier über alle Jahre hinweg die besten Ergebnisse. Ebenso zeigt sich eine deutliche Genauigkeitssteigerung bei der Verwendung der Variante „2 Pixel“ gegenüber der Variante „Standard“.

Im Gegensatz zum Jahr 1992 fällt auf, dass die Verwendung der Hälfte der Passpunkte in den Jahren 1970 und 1983 das jeweils schlechteste Ergebnis liefert.

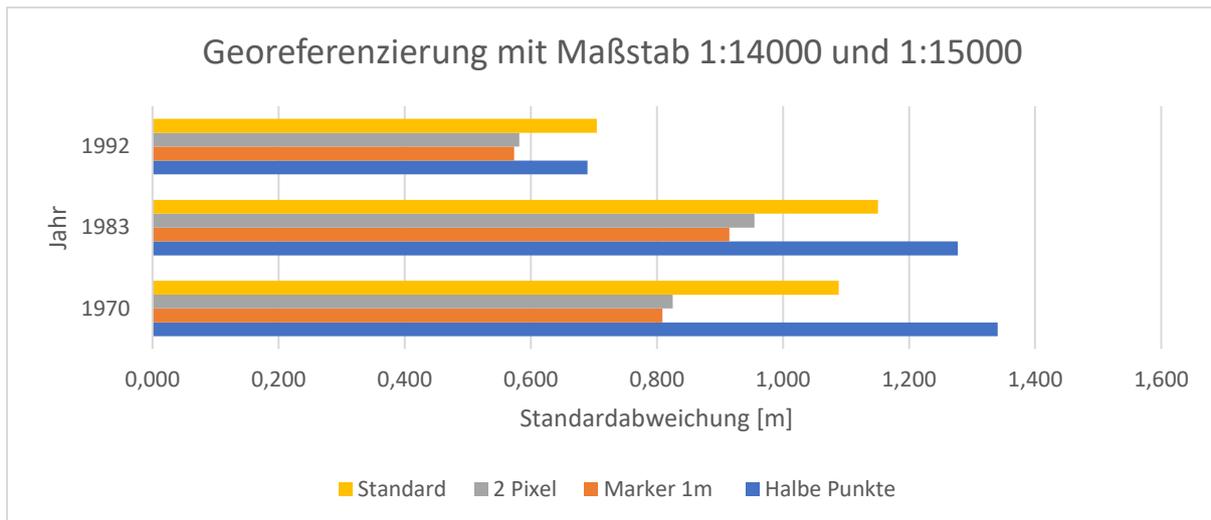


Abbildung 15: Darstellung der Genauigkeitsänderungen der Georeferenzierung Laufe der Jahre für die Maßstäbe 1:14000 und 1:15000

Besonders auffällig ist, dass die beiden Varianten „2 Pixel“ und „Marker 1m“, bei der Georeferenzierung immer die besten Ergebnisse erzeugen, was sich aber bei der Genauigkeit des Mesh nicht widerspiegelt.

Wenn man die Mittelwerte der Georeferenzierung mit denen des Mesh vergleicht, fällt auf, dass sich die Mittelwerte der Georeferenzierung nahe bei Null befinden (Tabelle 3). Die Mittelwerte des Mesh hingegen bewegen sich in den Jahren 1994, 1992, 1983, 1979 und 1970 in einem Bereich zwischen -0,50 m und -2,75 m, sowie in den Jahren 1976 und 1964 zwischen 0,25 m und 4,53 m. Das bedeutet, dass das von Agisoft berechnete Mesh bei einem negativen Wert über dem Referenz DGM liegt und bei einem positiven Wert darunter.

Tabelle 3: Darstellung der Mittelwerte des Orthophotos für alle Aufnahmezeitpunkte und Berechnungsmethoden

	1994	1992	1983	1979	1976	1970	1964
	Δh [m]						
Standard	-1,85	-1,34	-1,08	-1,75	0,34	-0,13	1,96
2 Pixel	-1,49	-1,58	-0,50	-2,17	0,26	-0,12	0,61
Marker 1m	-1,88	-1,62	-0,64	-1,24	0,31	-0,19	0,71
Halbe Punkte	-1,99	-1,56	-1,17	-2,75	4,53	-0,93	1,31
Halbe Bilder	-1,72	-1,60					

Der Vergleich der Berechnungsmethoden (Abb. 16) zeigt, dass keine der Berechnungsmethoden, in jeden der sieben Aufnahmezeitpunkte, stets das beste Ergebnis erzielte. So ist die Methode „Standard“ zum Aufnahmezeitpunkt 1976 die genaueste, aber im Jahr 1970 die ungenaueste.

Es kommt neben einer Verbesserung der Höhengenaugigkeit im Laufe der Jahre auch zu einer Verbesserung der Genauigkeit, wenn die Luftbilder einen kleinen Maßstab aufweisen. Besonders deutlich zeigen dies die Jahre 1994 und 1979 mit einem Maßstab von 1:23000 und die Jahre 1992 und 1983 mit einem Maßstab von 1:15000. Auch das Jahr 1976, mit einem Maßstab von 1:5600, zeigt deutlich den Einfluss des Maßstabs auf die Höhengenaugigkeit.

Wie im Jahr 1976 ersichtlich, haben die Passpunkte ebenfalls Einfluss auf die Genauigkeit. Aufgrund des kleinen Maßstabs, von 1:5600, gibt es hier Bilder mit wenigen oder keinen Passpunkten, was sich wiederum negativ auf die Höhengenaugigkeit auswirkt, wie am Beispiel „Halbe Punkte“ ersichtlich.

Neben dem Alter der Bilder und der daraus resultierenden Längs- und Querüberdeckung, dem Maßstab oder der Anzahl der Passpunkte, hat auch die Auflösung der Bilder Einfluss auf die Höhengenaugigkeit. Ersichtlich ist dies am Orthophoto aus dem Jahr 1964. Das Orthophoto wurde aus Bildern mit einer Auflösung von 1814 dpi erstellt und erreicht eine ähnliche Höhengenaugigkeit wie die Orthophotos aus den 1990er, welche mit Bildern mit einer Auflösung von 1200 dpi erstellt wurden.

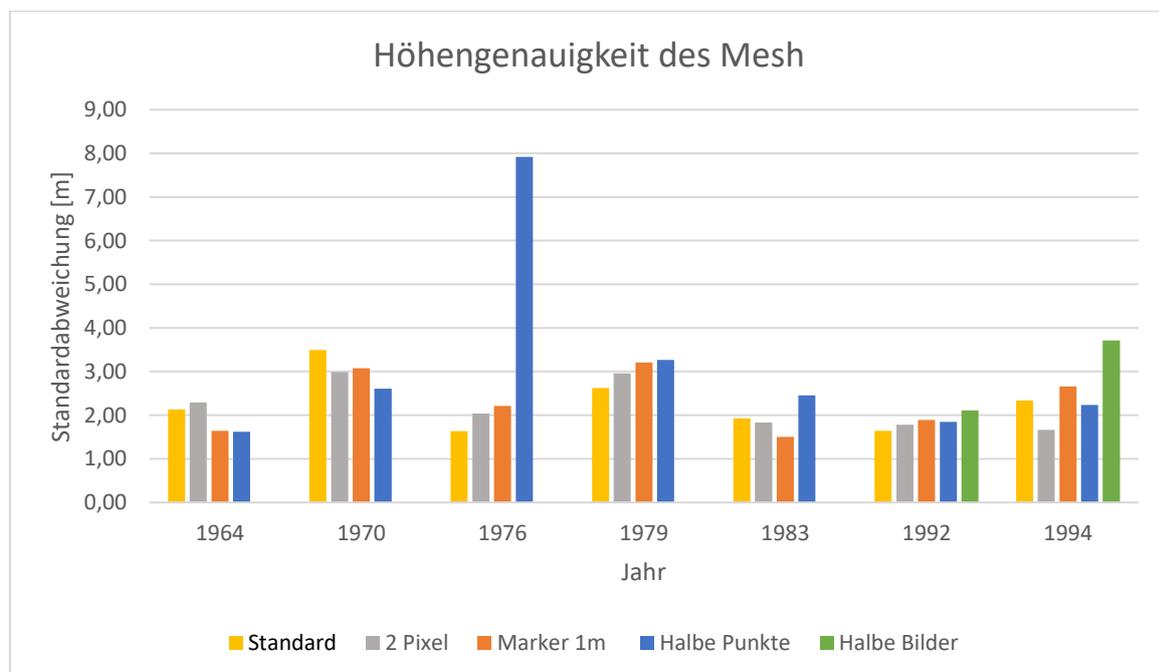


Abbildung 16: Darstellung der Höhengenaugigkeit aller Mesh

Wie zuvor erwähnt, konnte für die Erstellung der Orthophotos keine eindeutig beste Berechnungsmethode gefunden werden. Dies spiegelt sich aber nicht in der Georeferenzierung wider. Hier konnte eindeutige Verbesserung in der Höhengenaugigkeit, für die beiden Varianten „2 Pixel“ und „Marker 1m“ festgestellt werden (Abb. 17).

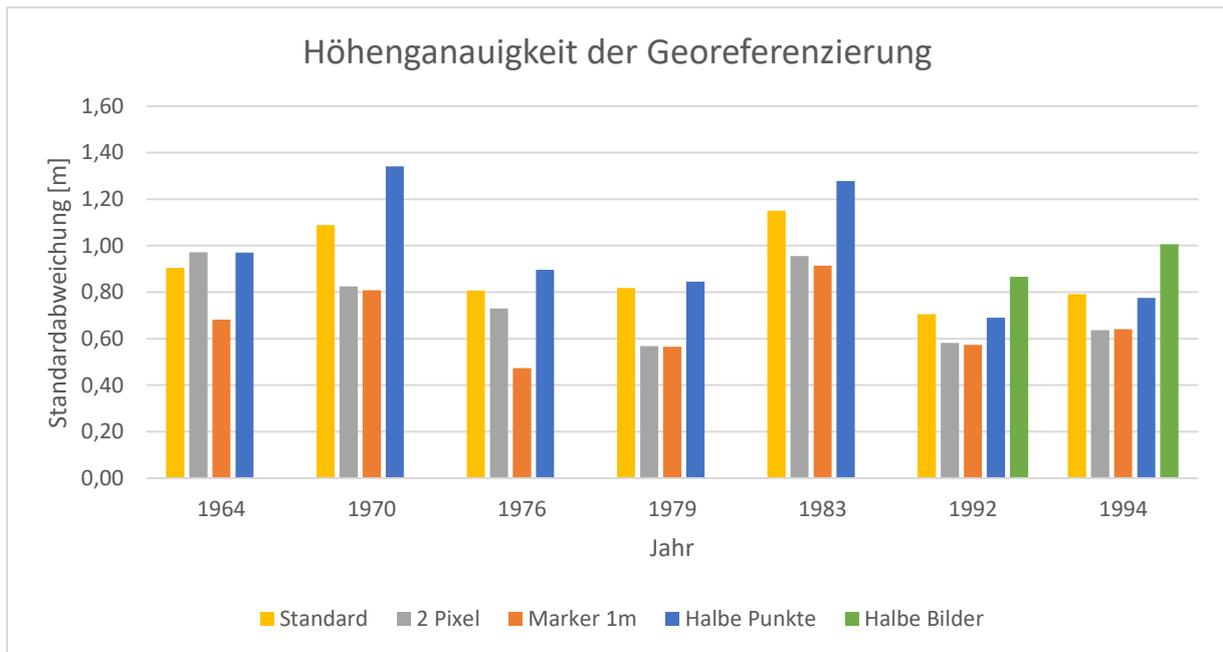


Abbildung 17: Darstellung der Höhengenaugkeit aller Georeferenzierungen

Dass die besseren Ergebnisse der Georeferenzierung nicht auf das Orthophoto übertragen werden konnten, legt nahe, dass das von Agisoft berechnete Mesh Fehler aufweist. Da das Orthophoto mit Hilfe des Mesh entzerrt wird, verursachen Fehler im Mesh eine Verschiebung im Orthophoto, was sich wiederum negativ auf die Lage- und Höhengenaugkeit auswirkt.

Der Sprung der Fahrbahnmarkierungen (Abb. 18) zeigt deutlich den Versatz des Orthophotos. Der Verlauf der Fahrbahn ist zwar korrekt, aber nach Norden verschoben. Auf der linken Seite ist das berechnete Orthophoto zu sehen und auf der rechten Seite der WMS-Dienst des LDBV, welcher den tatsächlichen Verlauf der Autobahn darstellt.



Abbildung 18: Verschiebung der Autobahn des berechneten Orthophotos (links) zum tatsächlichen Ort (rechts)

6 Diskussion

Ziel dieser Arbeit ist es, die Lagegenauigkeit von historischen Orthophotos in Abhängigkeit des Aufnahmezeitpunktes und des Maßstabs zu untersuchen.

Außerdem wurde betrachtet welchen Einfluss eine höhere Auflösung, eine veränderte Genauigkeit der Passpunkte und die Benutzung nur der Hälfte der Passpunkte und Bilder auf die Genauigkeit hat.

Als Datengrundlage dieser Arbeit wurden historische Luftbilder aus den Jahren 1994, 1992, 1983, 1979, 1976, 1970, 1964 in den Maßstäben 1:24000, 1:23000, 1:15000, 1:14000 und 1:15600 verwendet. Die Luftbilder wurden mit einer Auflösung von 1200 dpi, 1210 dpi und 1814 dpi gescannt.

6.1 Lagegenauigkeit

Mit Blick auf den Aufnahmezeitpunkt der Bilder wird deutlich, dass die Orthophotos aus den Jahren 1994 und 1992 eine höhere Lagegenauigkeit aufweisen als die Orthophotos aus den Jahren zuvor. Dies liegt an der Verbesserung des Filmmaterials für die Kamera und an der verbesserten Entwicklung des Filmmaterials im Studio.

Diese Verbesserungen haben nicht nur Einfluss auf das Orthophoto, sondern auch auf die Georeferenzierung. So verkleinern sich die Fehlerellipsen im Jahr 1979 mit einer Fläche von 5.012 m² (Anhang 1.4.3) auf 0,507 m² im Jahr 1994 (Anhang 1.1.3). Der begrenzende Faktor bei der Längs- und Querüberlappung hierbei war der verfügbare Speicherplatz. Durch eine höhere Überlappung der Bilder müssen auch mehr Bilder (für ein Gebiet gleicher Größe) aufgenommen werden, als es bei einer geringeren Überlappung der Fall ist. Dadurch steigt gleichzeitig auch der benötigte Speicherbedarf an.

Neben einer steigenden Genauigkeit in Abhängigkeit des Aufnahmezeitpunktes der Luftbilder, konnte auch eine steigende Genauigkeit der Orthophotos in Abhängigkeit des Maßstabs festgestellt werden.

So verbessert sich die Genauigkeit des Orthophotos, mit einer Verringerung des Maßstabs stetig, wie an den Jahren 1979 (Maßstab 1:23000), 1983 (Maßstab 1:15000) und 1976 (Maßstab 1:5600) zu sehen (Abb. 9).

Aufgrund des geringeren Maßstabs werden auch kleinere Details sichtbar, welche bei einem Bild mit einem größeren Maßstab verborgen bleiben. Dies erlaubt nicht nur das präzisere Platzieren der Passpunkte, sondern ermöglicht es auch dem Agisoft Metashape mehr Verknüpfungspunkte zu finden.

Auch auf die Georeferenzierung hat der Maßstab einen Einfluss. Bei einem Maßstab von 1:23000, im Jahr 1979, beträgt die große Halbachse 0,520 m, während sie bei einem Maßstab von 1:5600, im Jahr 1976, nur noch 0,418 m beträgt (Abb. 9).

Die Anzahl der Passpunkte der verwendeten hat einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Orthophotos und die der Georeferenzierung.

Wurden nur die Hälfte der verfügbaren Passpunkte benutzt, hat sich die Georeferenzierung in allen Jahren und Maßstäben verschlechtert. Die Genauigkeitsveränderungen am Orthophoto verhalten sich ähnlich. Hier gibt es aber zwei Ausnahmen, nämlich die Jahre 1983 und 1970. Im ersteren kam es zu keiner Veränderung und im zweiten zu einer Verbesserung der Genauigkeit.

Wie bereits erwähnt, hat die Längs- und Querüberlappung einen großen Einfluss auf die Genauigkeit des Orthophotos und der Georeferenzierung.

Dies kann am Beispiel „Halbe Bilder“ gut gezeigt werden. Aufgrund der hohen Überlappung in den Jahren 1994 und 1992, konnten hier die Hälfte der Bilder gelöscht werden, ohne dass es zu Problemen, aufgrund zu einer geringen Überlappung der Bilder, bei der Bündelblockausgleichung kommt.

In beiden Untersuchungsjahren hat sich die Genauigkeit des Orthophotos merklich verschlechtert. Auffällig ist, dass sich die Genauigkeit im Maßstab 1:23000 deutlicher verschlechtert ist als im Maßstab 1:15000. So verschlechtert sich die große Halbachse im Jahr 1994 von 0,435 m (Abb. 9) auf 1,187 m (Abb. 13), wohingegen sich die große Halbachse im Jahr 1992 nur um knapp 0,065 m verschlechtert. Ein Grund hierfür könnte der kleinere Maßstab sein.

Da auch ein Bildflug mit einer höheren Auflösung gescannt wurde, konnte beobachtet werden, ob und welchen Einfluss dies auf die Genauigkeit hat. Die Luftbilder aus dem Jahr 1964 wurden, anstatt mit einer Auflösung von 1200 dpi mit einer Auflösung von 1814 dpi gescannt.

Dies hat zur Folge, dass die Bilder mehr Details zeigen, was zu einer Steigerung der Genauigkeit führt. Das Orthophoto von 1964 ist trotz des höheren Maßstabs genauer als die Jahre 1970 und 1983, mit ihrem geringeren Maßstab. Nur das Orthophoto aus dem Jahr 1976, mit einem Maßstab von 1:5600 und die beiden jüngsten Orthophotos sind genauer.

Bei der Georeferenzierung zeigt sich der positive Einfluss der Auflösung hingegen nicht.

Werden die Genauigkeiten der Eingangsparameter geändert, kommt es bei den beiden Varianten „2 Pixel“ und „Marker 1m“, zu einer Verbesserung der Genauigkeit bei der Georeferenzierung.

Abgesehen vom Jahr 1983, bei beiden Varianten und 1992, bei der Variante „2 Pixel“, kommt es hingegen beim Orthophoto zu einer Verschlechterung der Genauigkeit.

Weiterhin auffällig ist, dass nur im Jahr 1994 eine ähnliche Genauigkeit in der Georeferenzierung und im Orthophoto aufzufinden ist. In allen anderen Jahren wird die Genauigkeit des Orthophotos deutlich schlechter.

Dieser Umstand deutet daraufhin, dass das Mesh, mit dem die Luftbilder entzerrt werden, Fehler aufweist.

6.2 Höhengenaugigkeit

Ebenso wie bei der Lagegenauigkeit, kommt es auch bei der Höhengenaugigkeit im Laufe der Jahre zu einer Verbesserung.

Beträgt die Höhengenaugigkeit 1970 noch 3,495 m, halbiert sie sich im Jahr 1992 auf 1,645 m.

Auch wirkt sich ein kleinerer Maßstab positiv auf die Höhengenaugigkeit aus. Vergleicht man die Orthophotos der Jahre 1994 und 1979 mit einem Maßstab von 1:23000 mit denen aus den Jahren 1992, 1983 und 1970 mit einem Maßstab von 1:14000, zeigt sich eine deutliche Genauigkeitssteigerung in der Höhe.

Am deutlichsten zeigt sich dies im Jahr 1976 mit seinem Maßstab von 1:5600. Dieses Jahr weist die beste Höhengenaugigkeit auf, nur noch das deutlich jüngere Orthophoto, aus dem Jahr 1992, weist eine ähnliche Genauigkeit auf.

Dieses Ergebnis lässt sich auch bei der Georeferenzierung beobachten.

Der Einfluss der Passpunkte lässt sich gut am Jahr 1976 beobachten. Aufgrund des geringen Maßstabs von 1:5600 gibt es hier Bereiche im Mesh mit nur einem, manchmal auch keinen Passpunkten. Dadurch haben die Passpunkte nur einen geringen oder keinen Einfluss auf die Höhe innerhalb des Mesh. Somit wird die Höhe des Mesh nur über die Verknüpfungspunkte festgelegt und ein Höhenfehler in diesen kann gar nicht oder nur schlecht durch einen Passpunkt ausgeglichen werden, da diese das Geländemodell aufgrund ihrer geringen Anzahl nicht gut stabilisieren können.

Wie schon bei der Lagegenauigkeit zu beobachten, verursacht die Löschung der Hälfte der Bilder die schlechtesten Ergebnisse in den Jahren 1994 und 1992. Auch hier liefert der kleinere Maßstab eine höhere Genauigkeit. So verschlechtert sich die Höhengenaugigkeit im Jahr 1994, mit einem Maßstab von 1:23000, von 2,34 m um 1,37 m auf 3,71 m, im Jahr 1992 aber nur um 0,47 m, nämlich von 1,64 m auf 2,11 m. Auch bei der Georeferenzierung erzeugt die Löschung der Hälfte der Bilder das schlechteste Ergebnis.

Erhöht man beim Scannen der Luftbilder die Abtastung von 1200 dpi auf 1814 dpi, verbessert sich ebenso wie die Lagegenauigkeit auch die Höhengenaugigkeit des Orthophotos. Obwohl das Mesh von 1964 aus den ältesten Bildern, mit einem Maßstab von

1:24000 erzeugt wurde, hat es eine höhere Genauigkeit als das Mesh von 1970 mit einem Maßstab von 1:14000. In der Gruppe der Orthophotos, mit einem Maßstab von 1:23000 / 1:24000, hat es sogar die höchste Genauigkeit. Nur das Mesh aus dem Jahr 1992 und solche mit einem Maßstab von 1:15000, sowie das Jahr 1976 erzielen eine bessere Höhengenaugigkeit.

Die gute Höhengenaugigkeit des Mesh von 1964 spiegelt sich aber nicht in einer ebenso guten Georeferenzierung wider.

Werden die Genauigkeiten der Eingangsparameter geändert, kommt es bei den Varianten „2 Pixel“ und „Marker 1m“, zu einer Verbesserung der Höhengenaugigkeit der Georeferenzierung.

Die beiden Varianten erzielen aber keine konstante Verbesserung der Höhengenaugigkeit im Mesh. Weder der Aufnahmezeitpunkt noch der Maßstab hat hierbei einen Einfluss (Tabelle 4).

Tabelle 4: Höhengenaugigkeit des Mesh für alle Aufnahmezeitpunkte und Maßstäbe für die Berechnungsmethoden „Standard“, „2Pixel“ und „Marker 1m“

Jahr	1994	1992	1983	1979	1976	1970	1964
Maßstab	1:23000	1:15000	1:15000	1:23000	1:5600	1:14000	1:24000
Standard	2,339	1,645	1,923	2,621	1,634	3,495	2,131
2 Pixel	1,664	1,784	1,834	2,963	2,04	2,988	2,292
Marker 1m	2,661	1,893	1,503	3,206	2,21	3,075	1,641

Auffällig bei der Betrachtung der Höhengenaugigkeit ist auch, dass die Mittelwerte der Georeferenzierung nahe bei Null liegen (siehe Anhang) die Mittelwerte des Mesh hingegen nicht (Tabelle 3). Die Mittelwerte des Mesh hingegen bewegen sich in den Jahren 1994, 1992, 1983, 1979 und 1970 in einem Bereich zwischen -0,50 m und -2,75 m, sowie in den Jahren 1976 und 1964 zwischen 0,25 m und 4,53 m.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die erreichbare Lage- und Höhengenaugigkeit digitaler historischer Orthophotos anhand von Luftbildern unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Maßstäbe. Außerdem wurde der Einfluss einer höheren Auflösung, einer veränderten Genauigkeit der Passpunkte und die Benutzung nur der Hälfte der Passpunkte und Bilder auf die Lage- und Höhengenaugigkeit untersucht.

Vergleicht man die Lage- und Höhengenaugigkeit der Orthophotos über die Jahre hinweg, so zeigt sich, dass der Aufnahmezeitpunkt einen Einfluss auf die Genauigkeit hat.

Neben dem Aufnahmezeitpunkt Bilder spielt auch der Faktor Maßstab eine große Rolle. Durch die Verwendung eines kleinen Maßstabs verschlechtert sich die Lage- und Höhengenaugigkeit der Orthophotos. Dieses Phänomen zeigt sich vor allen in den Jahren 1979 (1:23000), 1983 (1:15000) und 1976 (1:5600). Hier steigt die Fläche der Ellipsen, mit sinkendem Maßstab, stetig an. So ist die Ellipse im Jahr 1976 eine Fläche von 1.175 m² groß, im Jahr 1983 eine Fläche von 2.970 m² und im Jahr 1979 eine Fläche von 5.012 m².

Wird die Abtastung der Luftbilder erhöht, ergibt sich daraus auch eine bessere Genauigkeit. So ist das Jahr 1964, mit seiner um die Hälfte höheren Abtastung besser als vergleichbare Orthophotos der folgenden Jahre und wird nur durch die Jahre 1992 und 1994 überflügelt.

Auch die Anzahl der verwendeten Passpunkte hat Einfluss auf die Genauigkeit. Wird die Anzahl der Passpunkte halbiert, verschlechtert sich die Genauigkeit des Orthophotos, unabhängig des Aufnahmezeitpunktes der Luftbilder, des Maßstabes oder der Abtastung Teil deutlich.

Das gleiche Ergebnis konnte auch bei Halbierung der verwendeten Luftbilder, in den Jahren 1994 und 1992 beobachtet werden.

Eine Veränderung der Genauigkeit hingegen konnte keine eindeutige Verbesserung oder Verschlechterung hinsichtlich der Lage- und Höhengenaugigkeit belegen. So verschlechterte sich die Genauigkeit der Orthophotos bei Verwendung dieser Variante in den meisten Jahren und erzielte nur in den Jahren 1983 und 1992 eine Verbesserung der Genauigkeit.

Betrachten man die beiden Methoden „2 Pixel“ und „Marker 1m“, bei denen die Eingangsparameter, im Vergleich zur „Standard“ Methode, verändert wurden, zeigt sich kein eindeutiger Trend. So verbessert sich die Genauigkeit im Jahr 1983 bei beiden Methoden, während sie sich im Jahr 1994 bei beiden Methoden verschlechtert und im Jahr 1979 verbessert sich die Genauigkeit bei „2 Pixel“, bei „Marker 1m“ hingegen verschlechtert sie sich (Tabelle 4).

Tabelle 4: Unterschiede der Genauigkeit für die Jahre 1994, 1983, 1979 dargestellt, anhand der Fläche der Ellipsen

	1994	1983	1979
Standard	0.507 m ²	2.970 m ²	5.012 m ²
2 Pixel	0.565 m ²	2.455 m ²	4.804 m ²
Marker 1m	0.879 m ²	2.234 m ²	5.268 m ²

Abschließend kann festgestellt werden, dass ein kleiner Maßstab und eine hohe Abtastung ähnliche Auswirkungen auf die Genauigkeit des Orthophotos haben. Daneben verbessert auch eine große Längs- und Querüberlappung der Luftbilder die Lage- und Höhengenaugkeit der Orthophotos nicht unerheblich. Deutlich zeigt dies das Jahr 1994. Hier verbessert sich die Genauigkeit, bei steigender Überlappung, von einer Ellipsenfläche von 2.159 m² auf 0.507 m² (Anhang 1.1.3).

Literaturverzeichnis

- Agisoft Metashape (2021) Agisoft Manual, URL:
<https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>
(Stand: 01.08.2021)
- BayernAtlas (2021) Bayernatlas, URL:
<https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/?lang=de&topic=ba&bgLayer=atkis&catalogNodes=11,122&E=613958.98&N=5464037.18&zoom=7.000000046469652>
(Stand: 09.08.2021)
- Kay Pehnke (2016) Was ist eine Verzeichnung URL:
<http://www.kay-pehnke.de/blog/2016/1/22/was-ist-verzeichnung>
(Stand: 20.06.2021)
- Krzystek P. (2018) Computer Vision, Skriptum zur Vorlesung, Fachbereich Angewandte Geodäsie und Geoinformatik, Hochschule München
- LAIv (o. D.) Landesamt für innere Verwaltung, Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen Mecklenburg-Vorpommern, Luftsichtbare Passpunkte, URL:
<https://www.laiv-mv.de/Geoinformation/Luftbilder/Luftsichtbare-Passpunkte/>
(Stand: 20.06.2021)
- LDBV (o. D.) Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern, URL:
<https://www.ldbv.bayern.de/index.html> (Stand: 15.06.2021)
- LDBV Anleitung (2021) Interne Anleitung für die Erstellung von Orthophotos
- Luhmann T. (2018) Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden, Beispiele
4. Auflage, Berlin
- Mandy Schulze (2016) Diplomarbeit Mandy Schulze: Vergleich verschiedener Programme zur Kalibrierung von Kameras, URL:

https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/photogrammetrie/studium/finished_theses/abgeschlosseneArbeiten/2014/2014_DA_schulze (Stand: 02.08.2021)

QGIS (2021) QGIS, URL: <https://www.qgis.org/de/site/index.html> (Stand: 12.07.2021)

Riemensperger (2004) Mitarbeiter des LDBV München

Anhang

A Darstellung der statistischen Ergebnisse

1.1 1994 mit dem Maßstab 1:23000

1.1.1 Genauigkeit des Orthophotos

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.377	0.393	2.339	-0.081	-0.201	-1.853
2 Pixel	0.375	0.434	1.664	-0.122	-0.209	-1.488
Marker 1m	0.414	0.686	2.661	-0.122	-0.200	-1.888
Halbe Punkte	0.376	0.611	2.237	-0.122	-0.253	-1.990
Halbe Bilder	0.590	1.219	3.710	-0.084	0.076	-1.723

1.1.2 Genauigkeit der Georeferenzierung

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.365	0.388	0.792	0.000	0.000	-0.000
2 Pixel	0.345	0.355	0.637	0.000	0.000	-0.000
Marker 1m	0.349	0.357	0.641	0.000	0.000	0.000
Halbe Punkte	0.406	0.422	1.006	-0.038	0.038	0.434
Halbe Bilder	0.431	0.403	0.776	0.000	0.000	-0.000

1.1.3 Konfidenzellipse des Orthophotos

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	0.435	0.371	193.67	0.507
2 Pixel	0.471	0.382	172.76	0.565
Marker 1m	0.703	0.398	189.85	0.879
Halbe Punkte	0.646	0.382	185.11	0.775
Halbe Bilder	1.187	0.579	175.60	2.159

1.1.4 Konfidenzellipse der Georeferenzierung

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	0.394	0.349	149,87	0.432
2 Pixel	0.368	0.323	141.50	0.373
Marker 1m	0.369	0.327	139.97	0.379
Halbe Punkte	0.418	0.390	174.38	0.512
Halbe Bilder	0.430	0.392	22.59	0.529

1.2 1992 mit dem Maßstab 1:15000

1.2.1 Genauigkeit des Orthophotos

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.666	0.499	1.645	-0.002	0.201	-1.342
2 Pixel	0.579	0.568	1.784	0.009	0.145	-1.582
Marker 1m	0.718	0.621	1.893	-0.186	0.075	-1.623
Halbe Punkte	0.569	0.712	1.844	-0.113	0.244	-1.556
Halbe Bilder	0.696	0.488	2.113	0.027	0.013	-1.602

1.2.2 Genauigkeit der Georeferenzierung

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.337	0.343	0.705	-0.000	0.000	-0.000
2 Pixel	0.300	0.312	0.582	-0.000	0.000	-0.000
Marker 1m	0.295	0.311	0.574	-0.000	0.000	-0.000
Halbe Punkte	0.388	0.362	0.690	0.000	-0.000	-0.000
Halbe Bilder	0.397	0.345	0.866	-0.000	-0.000	-0.000

1.2.3 Konfidenzellipse des Orthophotos

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	0.714	0.426	32.19	0.960
2 Pixel	0.656	0.456	136.17	0.940
Marker 1m	0.790	0.514	32.57	1.276
Halbe Punkte	0.733	0.562	176,40	1.294
Halbe Bilder	0.779	0.346	28.47	0.847

1.2.4 Konfidenzellipse der Georeferenzierung

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	0.366	0.301	222.23	0.346
2 Pixel	0.328	0.272	218.85	0.280
Marker 1m	0.324	0.271	216.12	0.276
Halbe Punkte	0.384	0.347	336.24	0.420
Halbe Bilder	0.399	0.330	339.14	0.414

1.3 1983 mit dem Maßstab 1:15000

1.3.1 Genauigkeit des Orthophotos

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	1.238	0.823	1.927	-0.236	0.100	-1.078
2 Pixel	1.007	0.841	1.836	-0.175	0.240	-0.501
Marker 1m	1.019	0.741	1.503	-0.204	0.209	-0.643
Halbe Punkte	1.216	0.900	2.458	-0.132	0.289	-1.174

1.3.2 Genauigkeit der Georeferenzierung

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.396	0.443	1.151	-0.000	-0.000	-0.000
2 Pixel	0.333	0.371	0.955	-0.000	-0.000	0.000
Marker 1m	0.326	0.388	0.915	-0.000	0.000	-0.000
Halbe Punkte	0.448	0.551	1.278	-0.000	-0.000	-0.000

1.3.3 Konfidenzellipse des Orthophotos

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	1.259	0.751	16.70	2.970
2 Pixel	1.099	0.711	33.96	2.455
Marker 1m	1.066	0.667	24.15	2.234
Halbe Punkte	1.251	0.834	24.76	3.278

1.3.4 Konfidenzellipse der Georeferenzierung

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	0.438	0.390	189.30	0.592
2 Pixel	0.374	0.319	203.77	0.375
Marker 1m	0.392	0.311	200.38	0.383
Halbe Punkte	0.539	0.437	185.52	0.734

1.4 1979 mit dem Maßstab 1:23000

1.4.1 Genauigkeit des Orthophotos

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	1.204	1.290	2.621	-0.515	0.085	-1.752
2 Pixel	1.283	1.203	2.963	-0.381	-0.205	-2.166
Marker 1m	1.121	1.575	3.206	-0.193	0.136	-1.250
Halbe Punkte	1.224	1.353	3.270	-0.193	0.136	-1.250

1.4.2 Genauigkeit der Georeferenzierung

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.447	0.518	0.818	0.000	-0.000	0.000
2 Pixel	0.340	0.383	0.568	0.000	-0.000	0.000
Marker 1m	0.355	0.388	0.566	0.000	-0.000	0.000
Halbe Punkte	0.461	0.574	0.845	0.000	-0.000	0.000

1.4.3 Konfidenzellipse des Orthophotos

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	1.307	1.222	37.60	5.012
2 Pixel	1.307	1.179	347.99	4.804
Marker 1m	1.547	1.084	169.25	5.268
Halbe Punkte	1.364	1.311	328.05	5.617

1.4.4 Konfidenzellipse der Georeferenzierung

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	0.520	0.431	198.74	0.704
2 Pixel	0.381	0.332	195.33	0.397
Marker 1m	0.389	0.342	202.03	0.418
Halbe Punkte	0.568	0.440	195.08	0.785

1.5 1976 mit dem Maßstab 1:5600

1.5.1 Genauigkeit des Orthophotos

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.472	1.199	1.635	0.195	0.063	0.335
2 Pixel	0.425	1.267	2.040	0.097	0.195	0.256
Marker 1m	0.506	1.236	2.210	0.203	0.083	0.305
Halbe Punkte	0.622	1.331	7.922	0.090	0.273	4.531

1.5.2 Genauigkeit der Georeferenzierung

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.413	0.330	0.807	0.000	0.000	0.000
2 Pixel	0.390	0.313	0.730	0.000	0.000	0.000
Marker 1m	0.327	0.252	0.474	-0.000	0.000	0.000
Halbe Punkte	0.393	0.359	0.897	0.000	0.000	0.000

1.5.3 Konfidenzellipse des Orthophotos

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	1.163	0.479	186.78	1.175
2 Pixel	1.240	0.407	185.13	1.585
Marker 1m	1.220	0.463	192.93	1.774
Halbe Punkte	1.319	0.587	187.26	2.432

1.5.4 Konfidenzellipse der Georeferenzierung

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	0.418	0.309	339.44	0.406
2 Pixel	0.390	0.299	343.29	0.367
Marker 1m	0.322	0.246	353.32	0.249
Halbe Punkte	0.384	0.341	19.88	0.411

1.6 1970 mit dem Maßstab 1:14000

1.6.1 Genauigkeit des Orthophotos

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.771	1.516	3.495	0.271	0.465	-0.127
2 Pixel	0.792	1.571	2.988	0.302	0.448	-0.122
Marker 1m	0.669	1.692	3.075	0.242	0.501	-0.189
Halbe Punkte	0.834	1.492	2.607	0.265	0.369	-0.933

1.6.2 Genauigkeit der Georeferenzierung

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.309	0.281	1.089	0.000	0.000	0.000
2 Pixel	0.292	0.251	0.825	0.000	0.000	0.000
Marker 1m	0.298	0.269	0.809	0.000	0.000	0.000
Halbe Punkte	0.422	0.364	1.341	-0.030	0.071	0.093

1.6.3 Konfidenzellipse des Orthophotos

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	1.541	0.764	171.69	3.699
2 Pixel	1.592	0.783	170.09	3.916
Marker 1m	1.706	0.674	175.38	3.612
Halbe Punkte	1.486	0.832	173.53	3.884

1.6.4 Konfidenzellipse der Georeferenzierung

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	0.307	0.271	21.14	0.261
2 Pixel	0.294	0.238	338.14	0.220
Marker 1m	0.295	0.260	341.93	0.241
Halbe Punkte	0.368	0.332	202.98	0.384

1.7 1964 mit dem Maßstab 1:24000

1.7.1 Genauigkeit des Orthophotos

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.548	1.135	2.131	0.321	-0.432	1.960
2 Pixel	0.876	1.422	2.292	0.161	-0.014	0.613
Marker 1m	0.622	1.520	1.641	0.255	-0.313	0.709
Halbe Punkte	0.586	1.464	1.623	0.256	-0.797	1.315

1.7.2 Genauigkeit der Georeferenzierung

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	Δh_x [m]	Δh_y [m]	Δh_z [m]
Standard	0.407	0.488	0.905	-0.000	0.000	-0.000
2 Pixel	0.510	0.479	0.972	-0.000	0.000	-0.000
Marker 1m	0.379	0.432	0.682	-0.000	0.000	-0.000
Halbe Punkte	0.438	0.477	0.970	-0.000	0.000	-0.000

1.7.3 Konfidenzellipse des Orthophotos

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	1.198	0.419	202.03	1.577
2 Pixel	1.367	0.694	201.30	2.980
Marker 1m	1.492	0.426	198.51	1.997
Halbe Punkte	1.570	0.554	188.19	2.732

1.7.4 Konfidenzellipse der Georeferenzierung

	a [m]	b [m]	φ [°]	Fläche [m ²]
Standard	0.485	0.401	188.57	0.611
2 Pixel	0.514	0.465	334,40	0.751
Marker 1m	0.432	0.371	195.09	0.504
Halbe Punkte	0.482	0.415	152.82	0.628

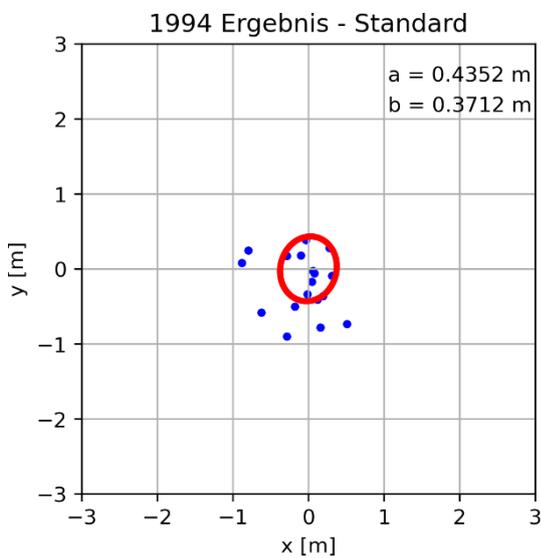
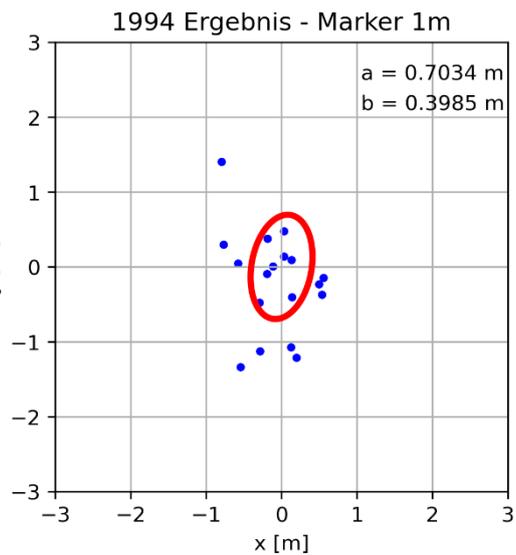
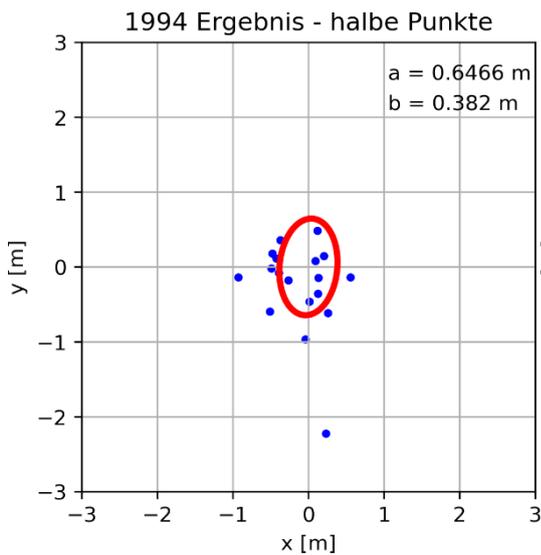
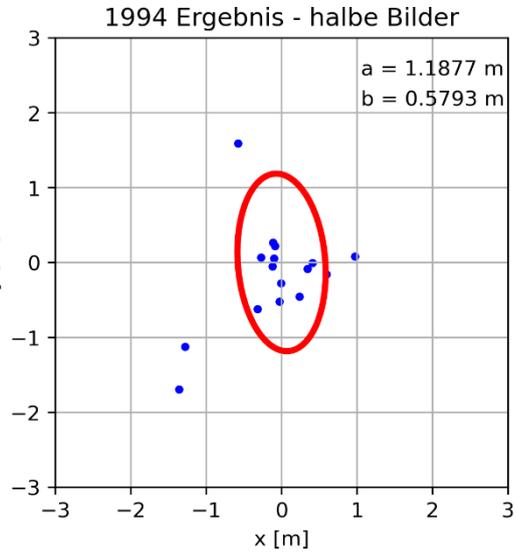
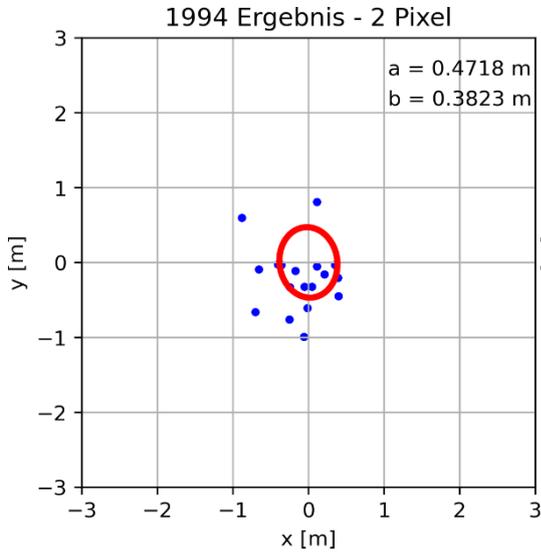
1.8 Passpunkte

Jahr	Georeferenzierung	Orthophoto
1964	114	6
1970	84	13
1976	93	14
1979	125	17
1983	126	18
1992	118	18
1994	130	18

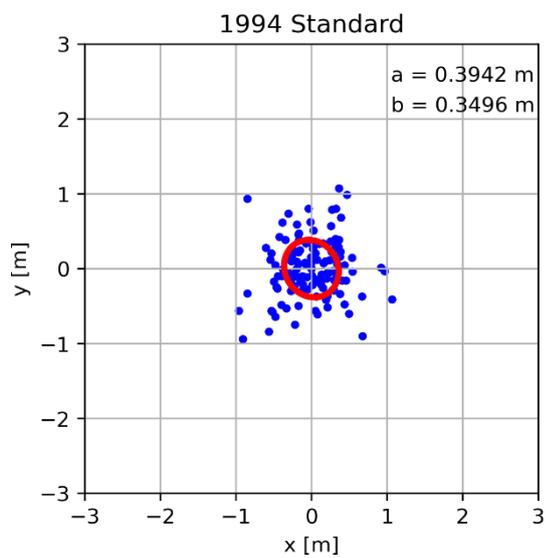
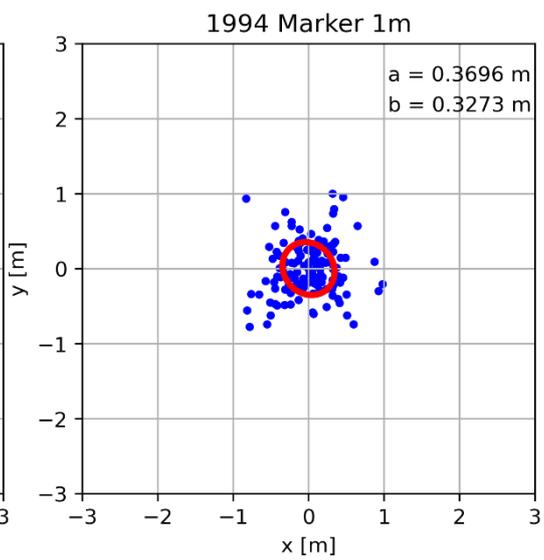
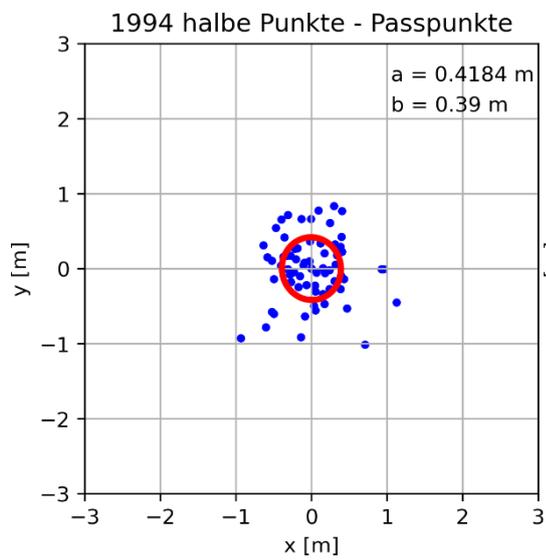
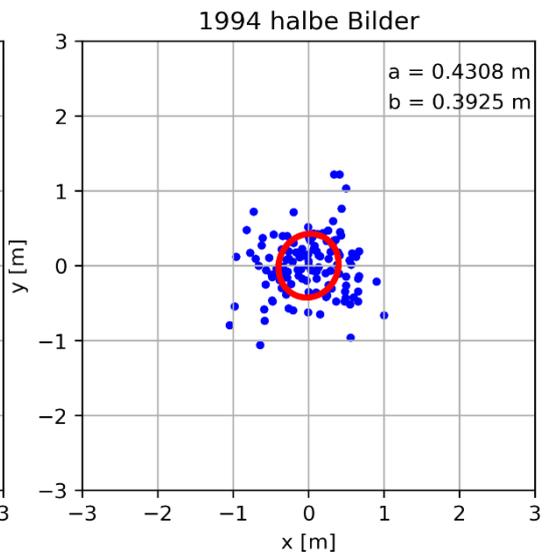
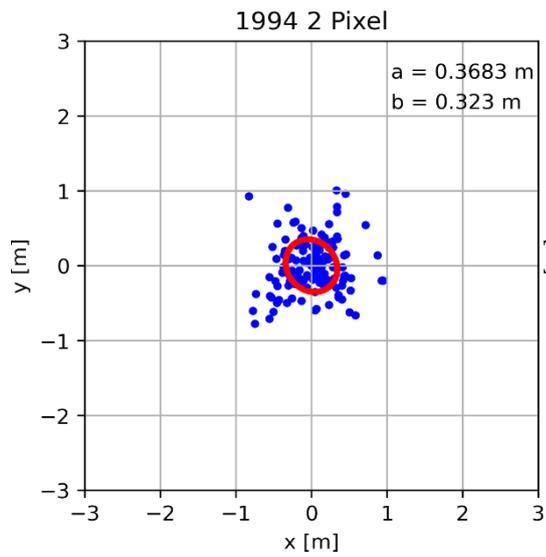
B Darstellung der visuellen Ergebnisse

1.1 1994 mit dem Maßstab 1:23000

1.1.1 Orthophoto

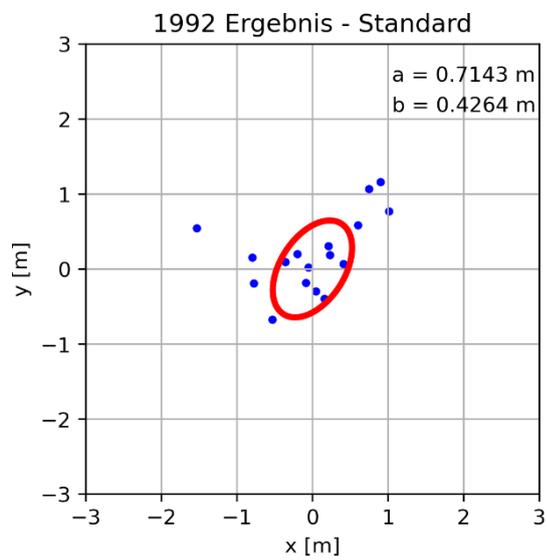
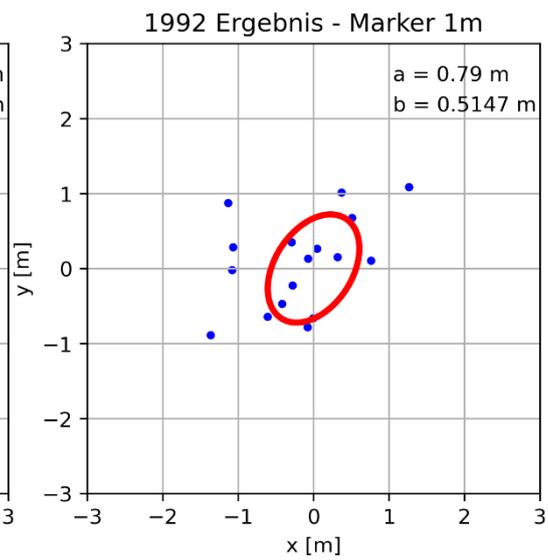
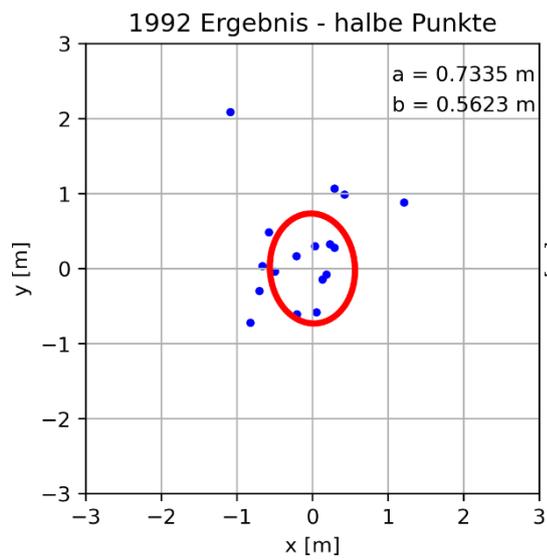
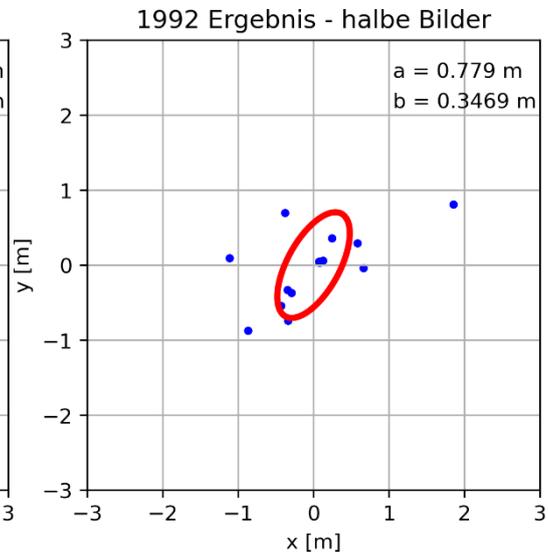
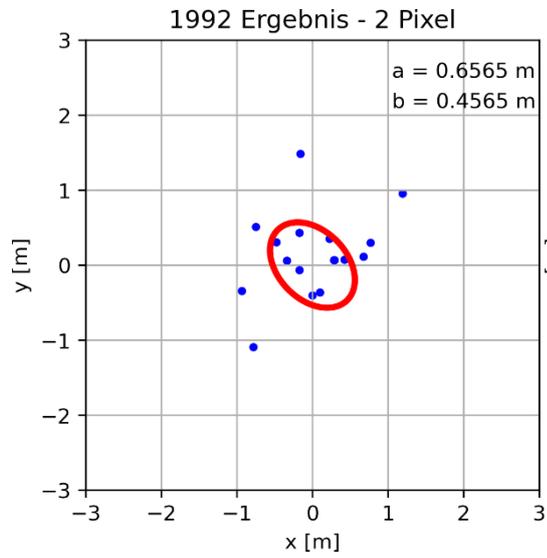


1.1.2 Georeferenzierung

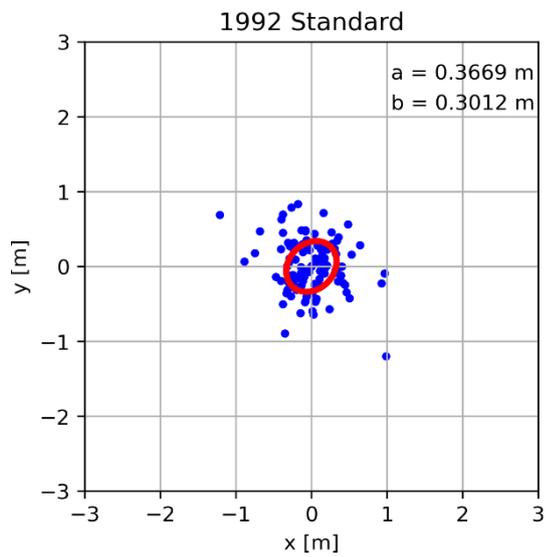
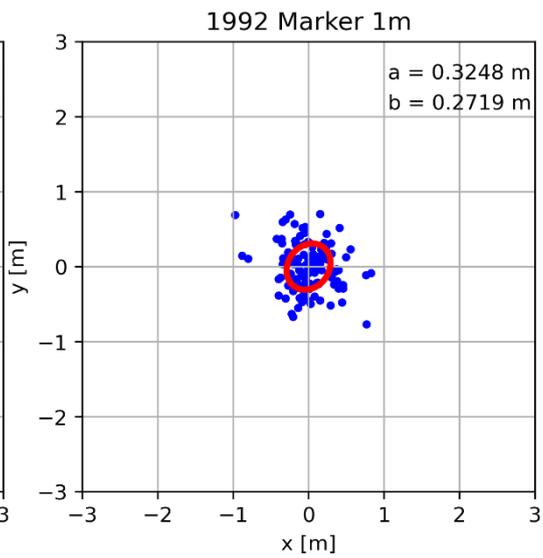
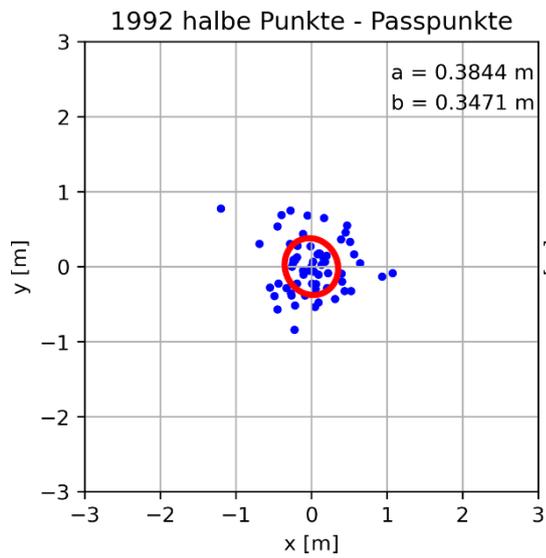
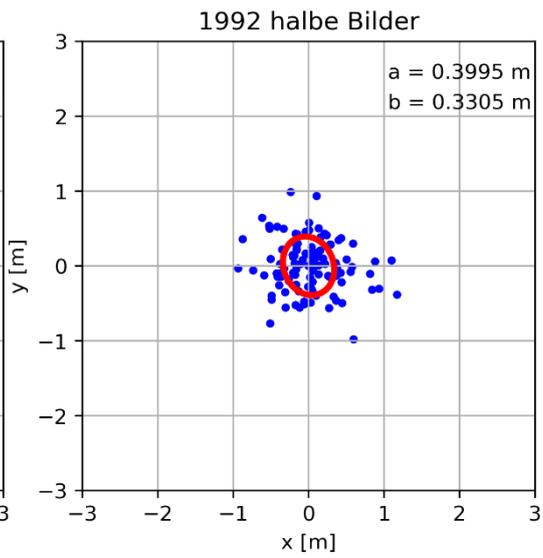
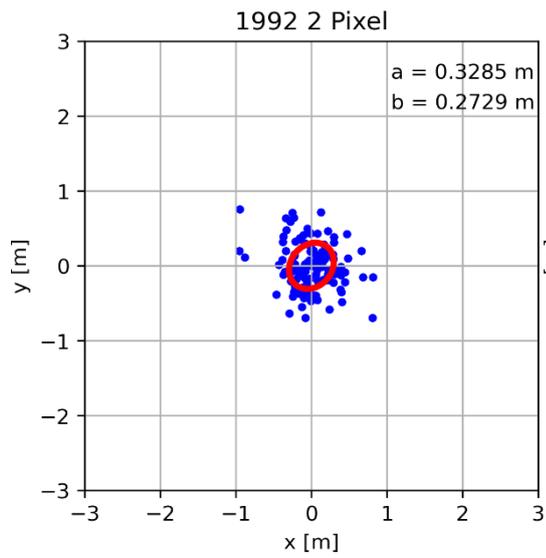


1.2 1992 mit dem Maßstab 1:15000

1.2.1 Orthophoto

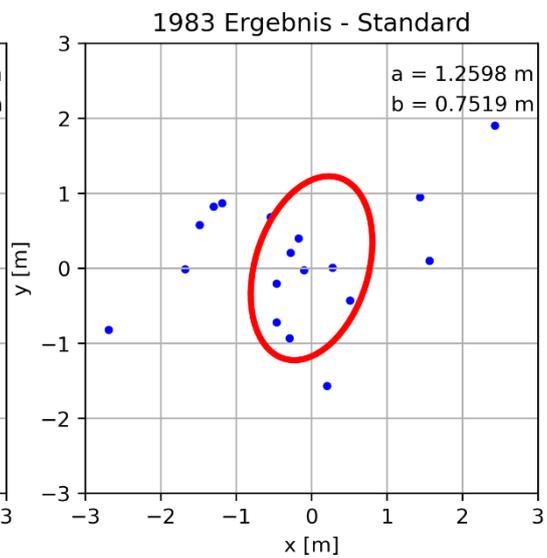
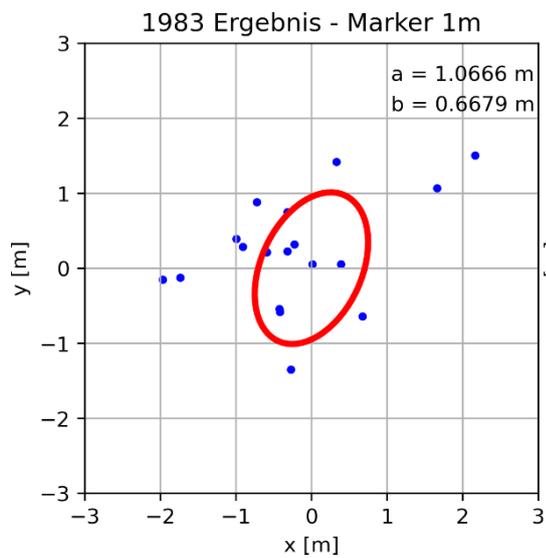
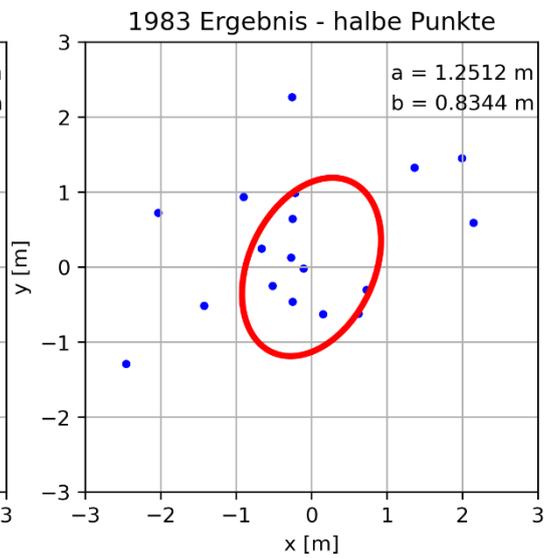
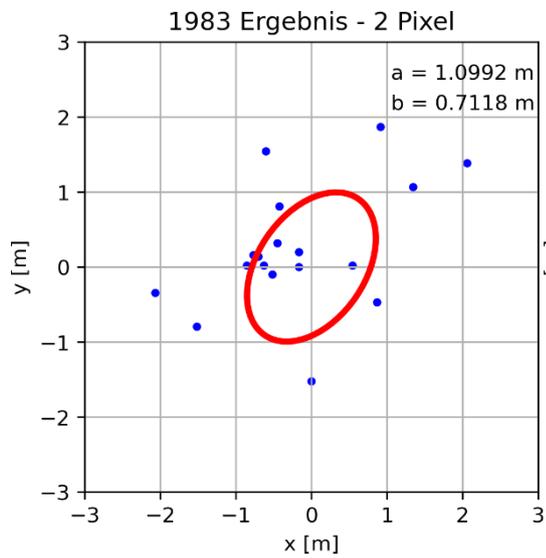


1.2.2 Georeferenzierung

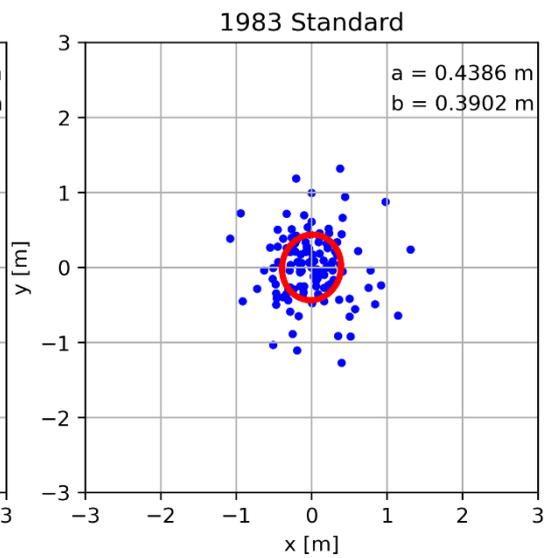
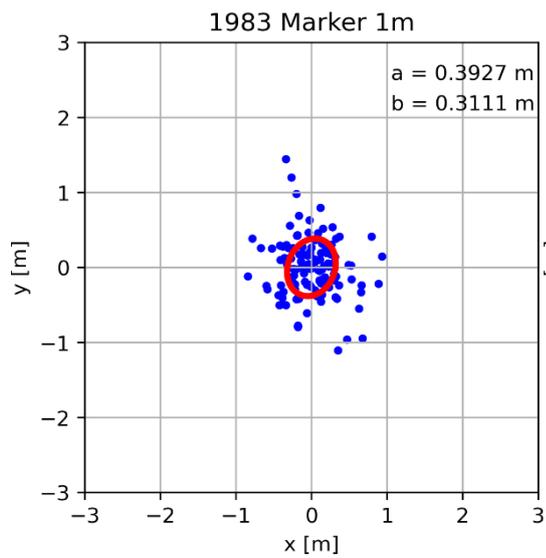
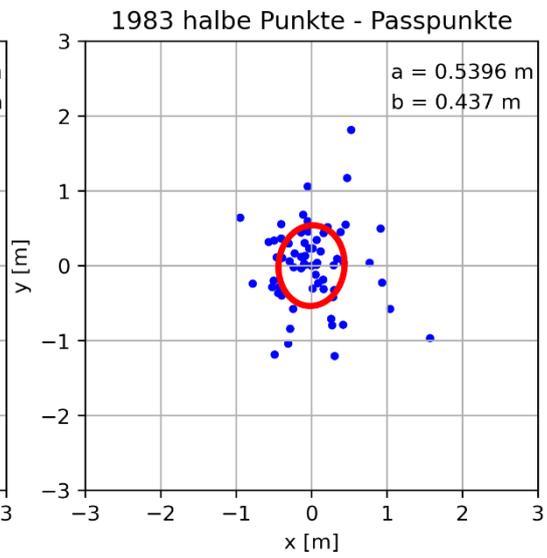
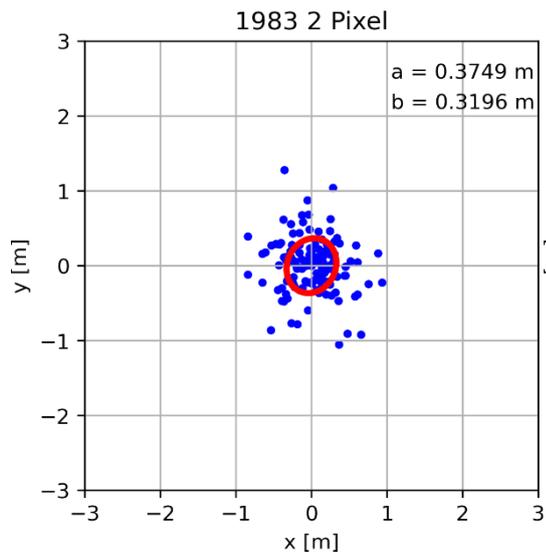


1.3 1983 mit dem Maßstab 1:15000

1.3.1 Orthophoto

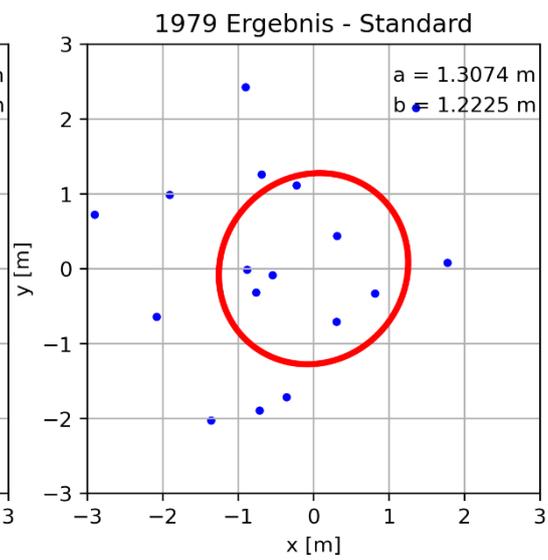
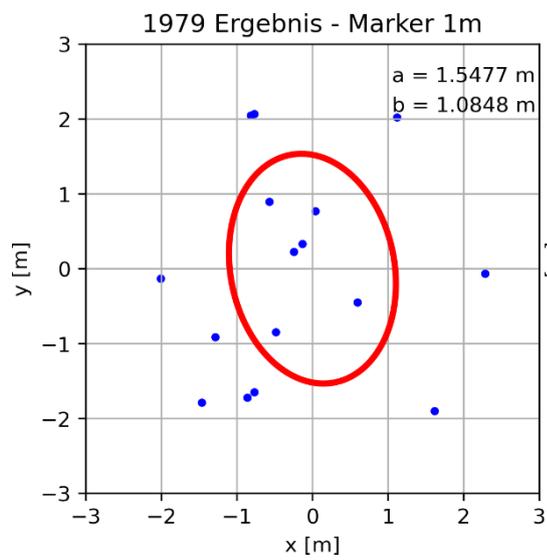
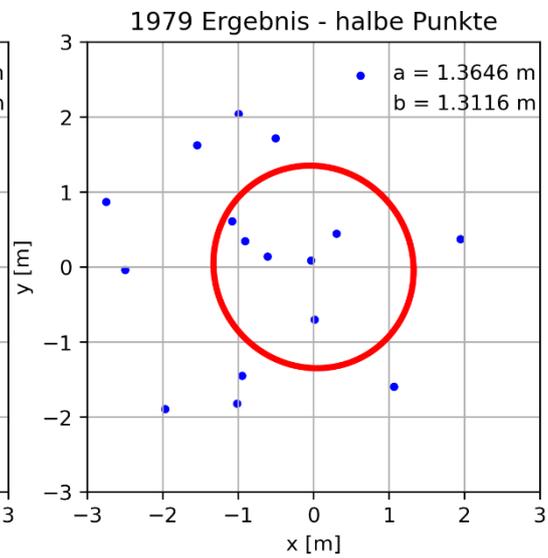
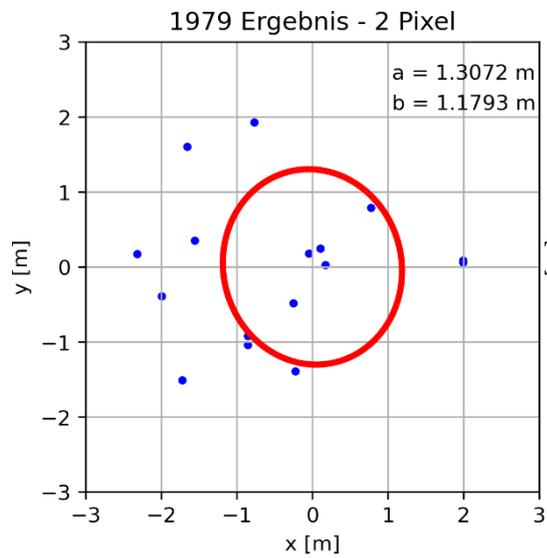


1.3.2 Georeferenzierung

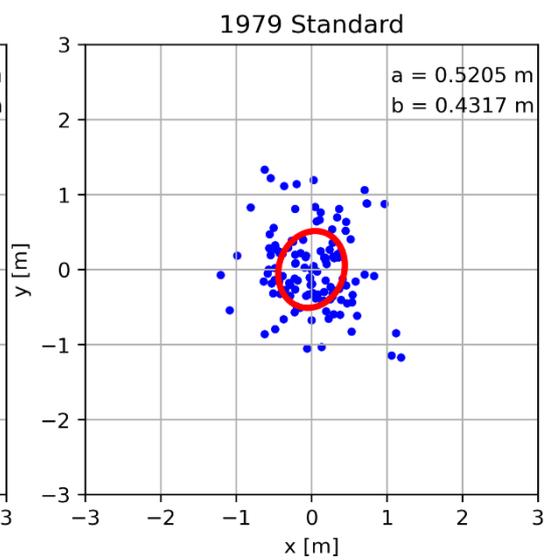
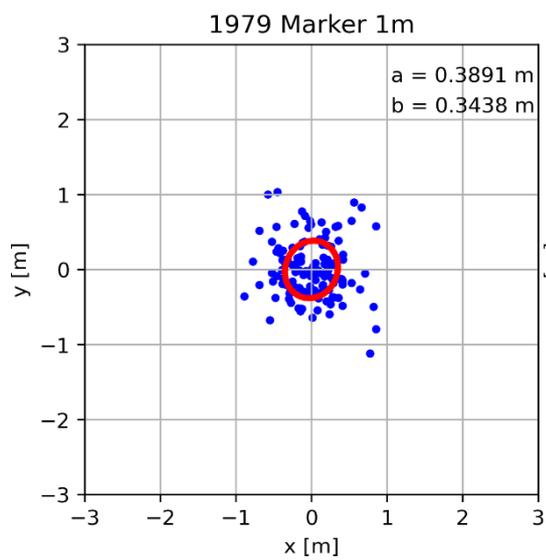
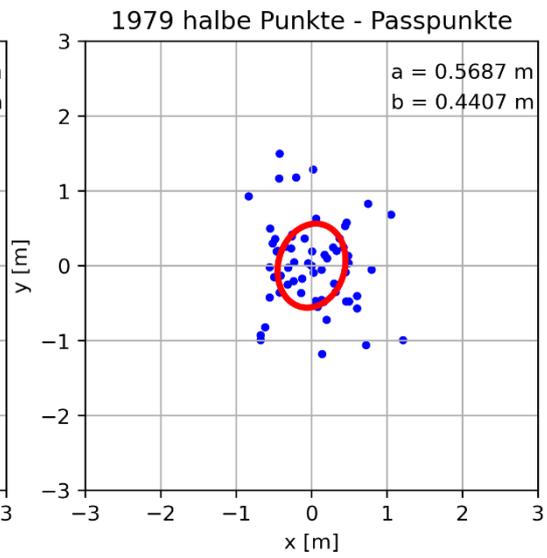
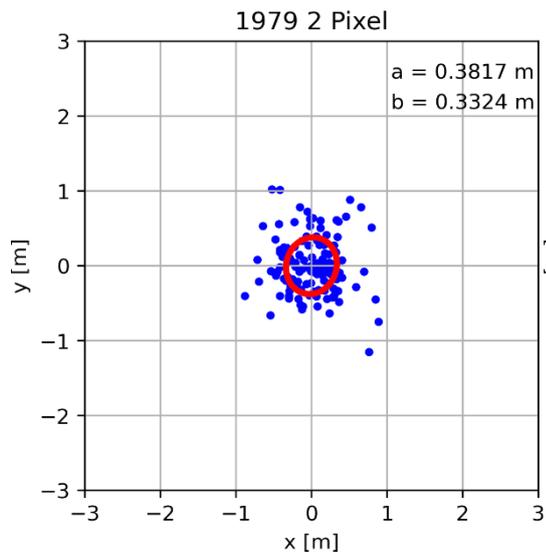


1.4 1979 mit dem Maßstab 1:23000

1.4.1 Orthophoto

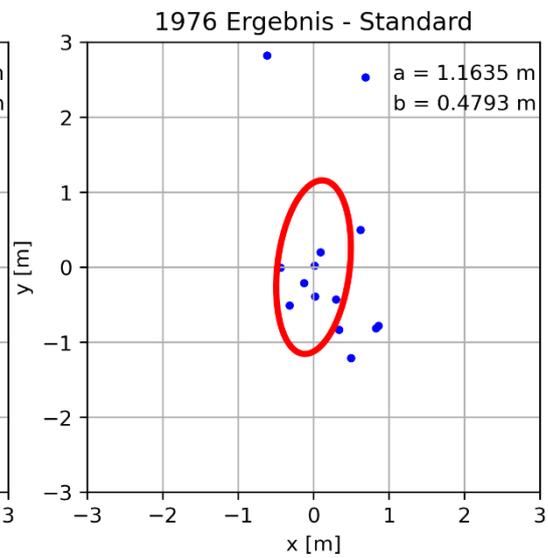
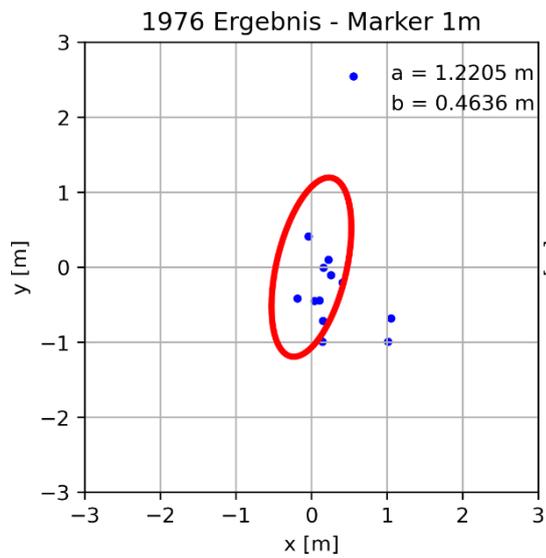
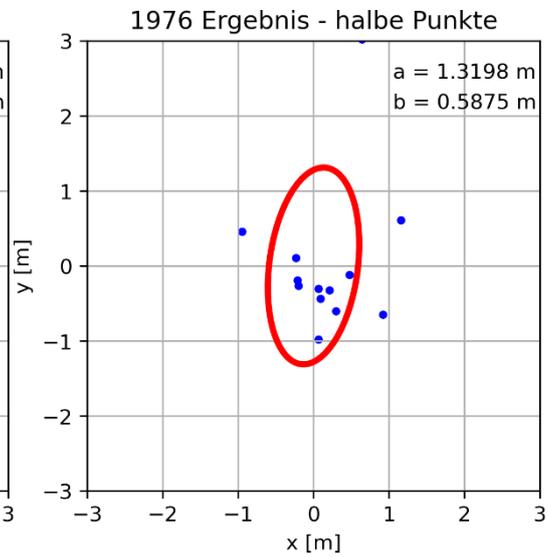
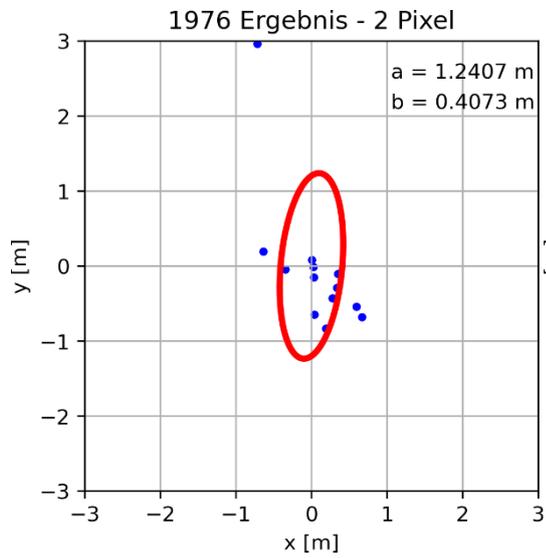


1.4.2 Georeferenzierung

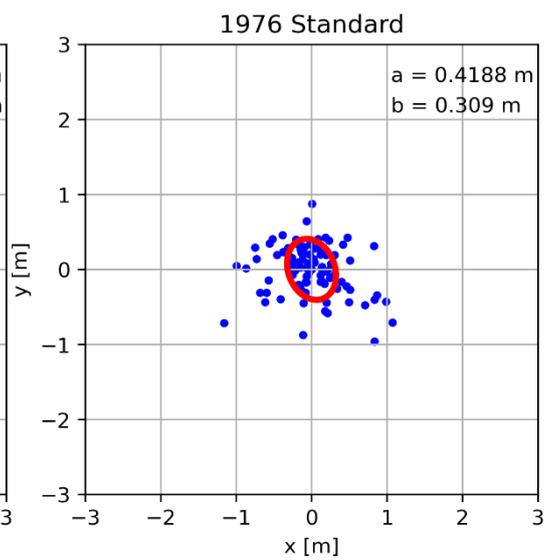
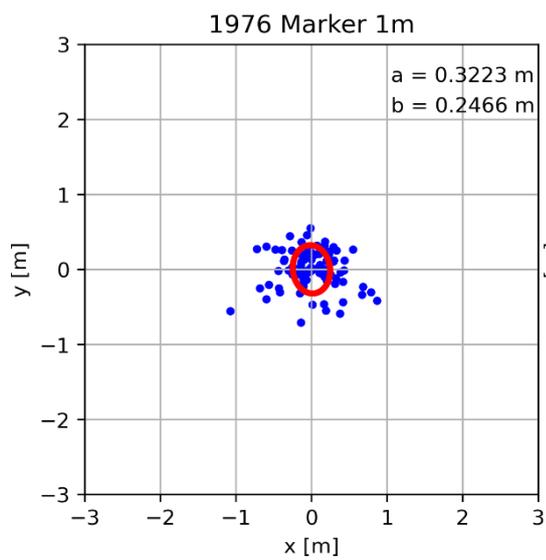
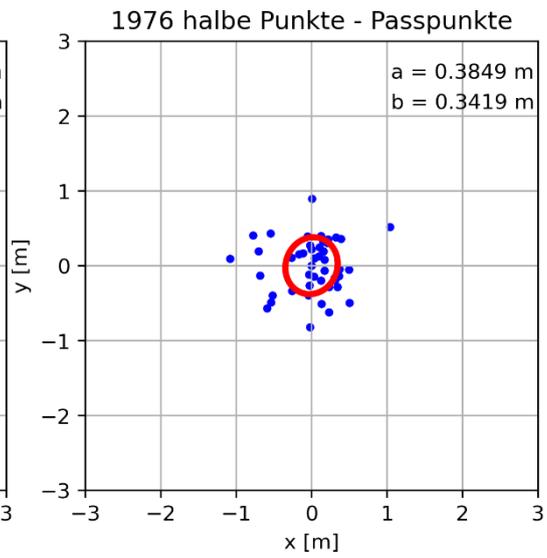
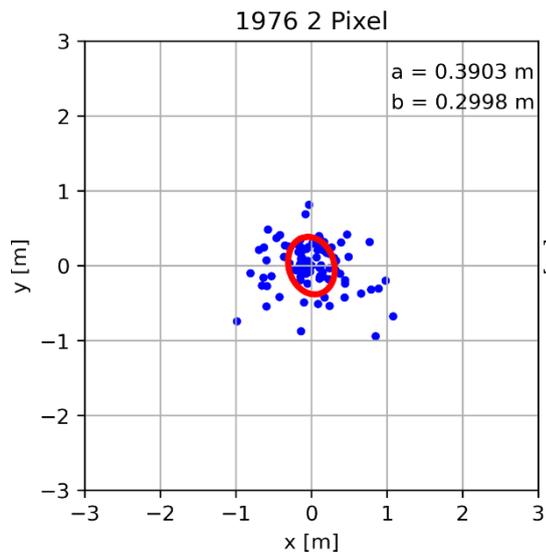


1.5 1976 mit dem Maßstab 1:5600

1.5.1 Orthophoto

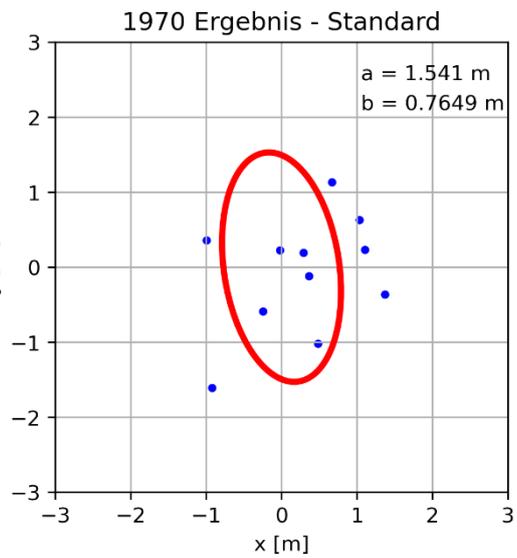
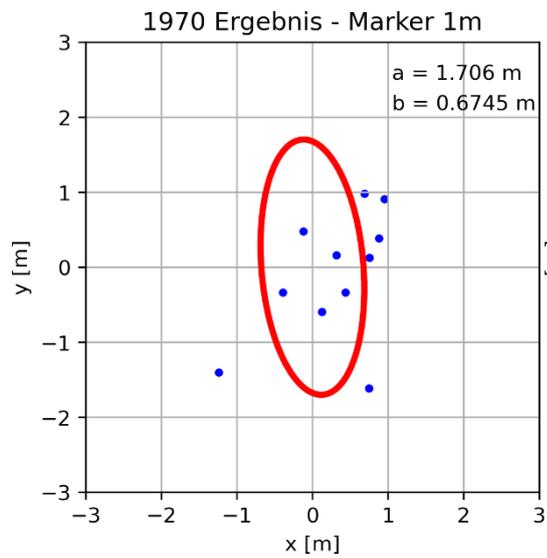
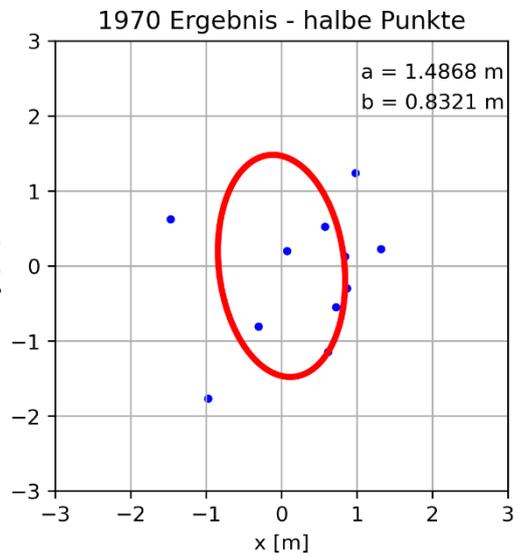
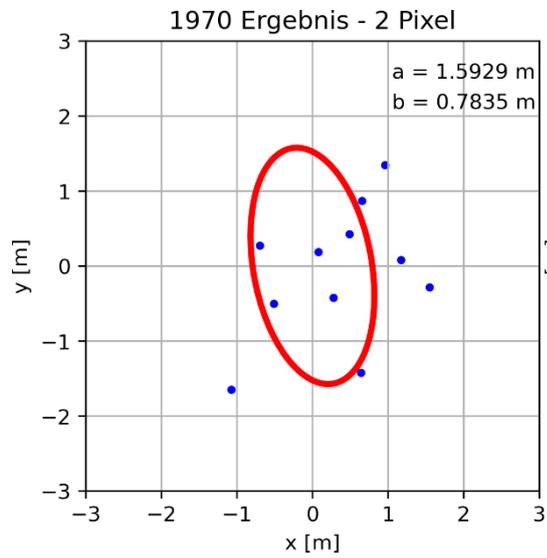


1.5.2 Georeferenzierung

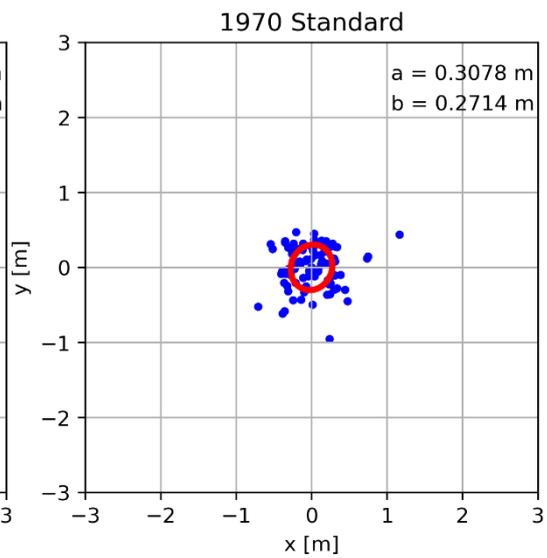
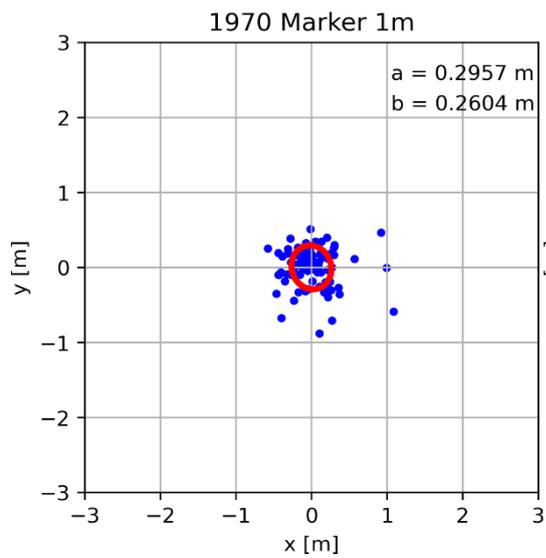
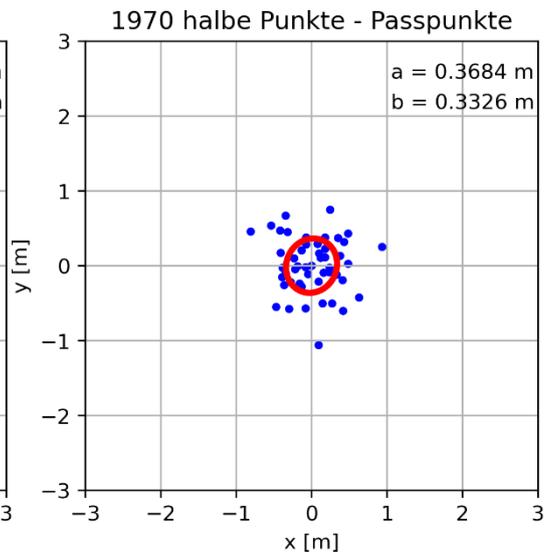
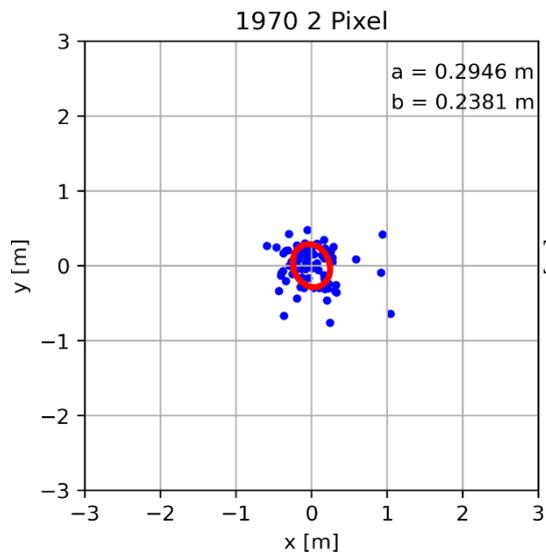


1.6 1970 mit dem Maßstab 1:14000

1.6.1 Orthophoto

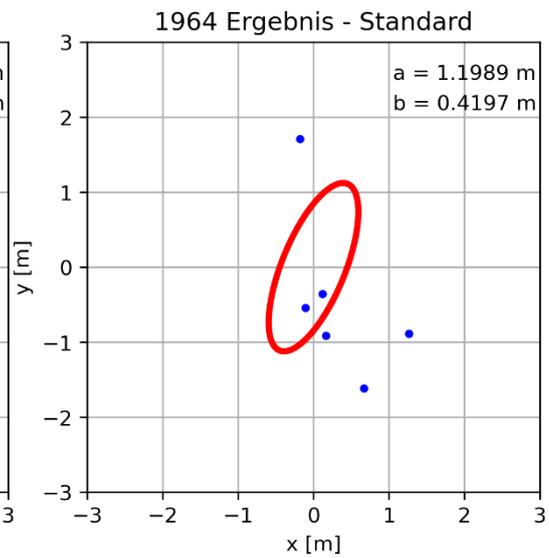
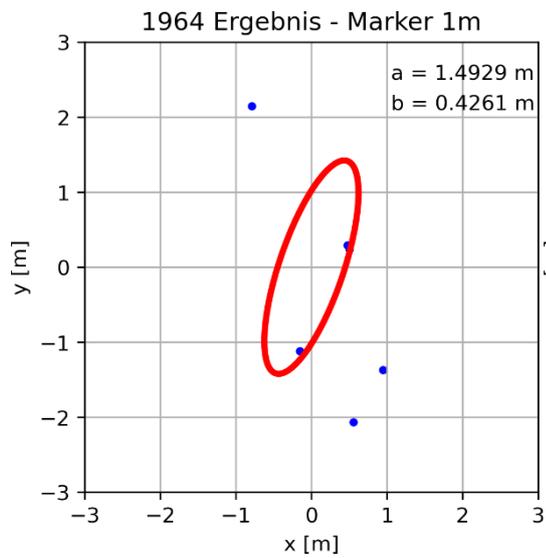
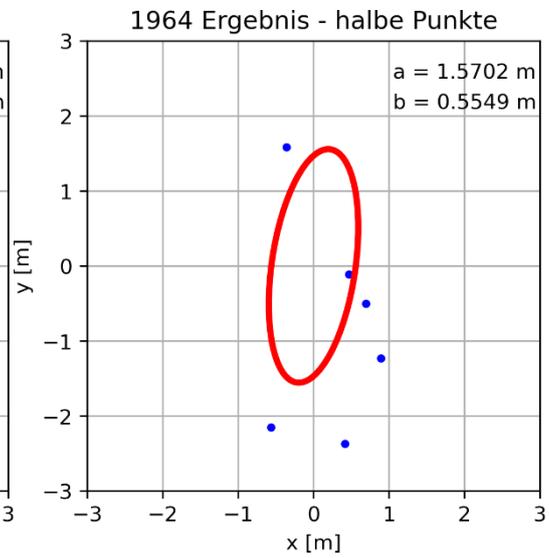
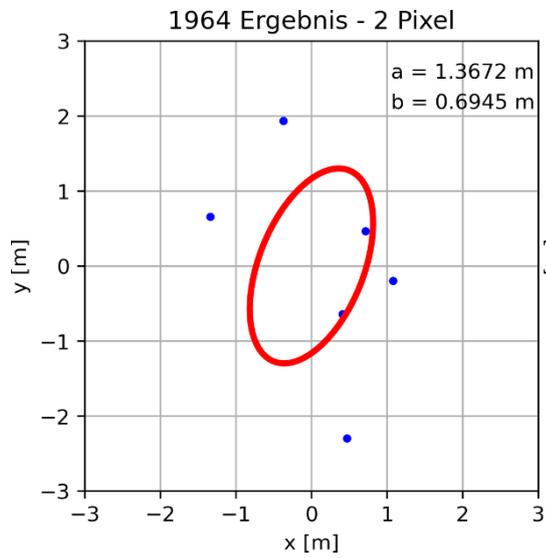


1.7.2 Georeferenzierung



1.7 1964 mit dem Maßstab 1:24000

1.7.1 Orthophoto



1.7.2 Georeferenzierung

