

# Monoskopische 3D-Geometrieerfassung unter Annahme von Bedingungen aus orientierten Schrägbildern

JOHN MORE<sup>1</sup> & ALBERT WIEDEMANN<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Die Erfassung dreidimensionaler Strukturen und Maße ist die Kernaufgabe der Photogrammetrie. In der Regel müssen die Objekte in mindestens zwei Bildern messbar sein, um diese Aufgabe zu erfüllen. In der Praxis scheitert diese Forderung häufig an äußeren Umständen. In diesem Aufsatz wird geschildert wie unter der Voraussetzung orientierter Bilder, der Existenz eines Digitalen Höhenmodells und einigen wenigen geometrischen Bedingungen dreidimensionale Koordinaten und Maße aus einem einzelnen Bild entnommen werden können. Am Beispiel der Messung von Mastkoordinate, deren Höhe und andere geometrischer Maße wird eine Methode vorgestellt, die auf orientierten Bildern des Schrägbildsystems AOS basiert.*

## 1 Einleitung

Viele photogrammetrische Aufgaben scheitern an den Anforderungen, den zu erfassenden Punkt in mindestens zwei Bildern messen zu müssen. Andererseits liegen häufig andere Informationen oder Bedingungen vor, mit deren Hilfe auch aus einem einzelnen Bild dreidimensionale Daten entnommen werden können. Bei Kenntnis der Kameraorientierung und von Geometrien im Objektraum können auch aus einzelnen Bildern Koordinaten und geometrische Maße ermittelt werden. Deren Güte hängt von der Qualität der Orientierung und der Geometrien im Objektraum ab.

Die BSF Swissphoto betreibt das Schrägbildsystem AOS (WIEDEMANN 2009). Damit können von allen Seiten eines Objekts Schrägbilder aufgenommen werden. Dennoch verdecken in einzelnen Bildern immer wieder andere Objekte wichtige Details. In einem exemplarischen Baublock waren von 128 Gebäudefußpunkten gerade mal 41 Ecken messbar, davon nur 28 in mehreren Bildern, während 13 in nur jeweils einem Bild messbar waren. Mit Hilfe dieser Gebäudefußpunkte können z.B. Dachüberstände bestimmt werden. Unter Verwendung eines Digitalen Geländemodells können auch aus den nur einfach bestimmten Bildpunkten 3D Objektkoordinaten hergeleitet werden.

Eine andere exemplarische Fragestellung ist die Bestimmung der Position, Höhe und Spannweite von Leitungsmasten..

---

<sup>1</sup> BSF-Swissphoto GmbH, Mittelstr. 7, 12529 Schönefeld; E-Mail: [john.more@bsf-swissphoto.com](mailto:john.more@bsf-swissphoto.com), [albert.wiedemann@bsf-swissphoto.com](mailto:albert.wiedemann@bsf-swissphoto.com)

## **2 Methodischer Ablauf**

### **2.1 Bedingungen**

Die dreidimensionalen Strukturen (Bsp.: Strommasten) sollen aus einzelnen Schrägbilder in [m] bis [dm] Genauigkeitsbereich monoskopisch gemessen werden. Es wird vorausgesetzt, dass das Bild orientiert ist, sowie ein digitales Geländemodell vorhanden ist, alle aufzunehmenden Objekte senkrecht stehen und rechte Winkel besitzen. Es kann jede kalibrierte Kamera verwendet werden und die Aufnahme entweder vom Boden, aus einem Hubschrauber oder aus einer Luftbildbefliegung eines Schrägbildsystems gemacht werden. Der Lotfußpunkt des Objektes muss im Bild messbar und darf nicht durch Vegetation etc. verdeckt sein. Die Geometrie der Objekte wird in mehreren Schritten ermittelt. Zuerst werden Lotfußpunkte, danach vertikal über den Lotfußpunkten stehende Punkte gemessen. Zu letzt können die Endpunkte von rechtwinklig zum Objekt stehenden Elementen ermittelt werden.

Werden alle Voraussetzungen erfüllt kann die Geometrie der Objekte in mehreren Schritten ermittelt werden. Zuerst werden die Lotfußpunkte der Objekte im Bild (Bildkoordinaten) gemessen und mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells (DHM) iterativ ins Objektkoordinatensystem gerechnet. In weiteren Schritten werden alle relevanten, vertikal über den Lotfußpunkten stehende Punkte des Objektes im Bild gemessen und dessen Höhe berechnet. Zu letzt können die Endpunkte von rechtwinklig zum Objekt stehenden Elementen in ihrer Lage ermittelt werden. Ein Strommast kann somit in dessen Höhe und die Position der Isolatoren dreidimensional bestimmt werden.

Damit Einzelbilder geometrisch ausgewertet können, müssen sie auf jeden Fall in einer hinreichenden Genauigkeit orientiert sein. Dies kann das Ergebnis einer direkten Georeferenzierung oder das einer Aerotriangulation/Bündelblockausgleichung sein. Da hier Genauigkeiten im Meter- bis Dezimeterbereich gefordert sind, sollte in den meisten Fällen die direkte Georeferenzierung reichen, zumal die Bündelblockausgleichung Passpunkte erfordert, die selten vorhanden sind und nicht nachträglich gemessen werden.

Die zu verwendende Kamera muss kalibriert sein. Je nach Geländebewegung sollte das DHM eine ausreichende Gitterweite aufweisen (je bewegter das Gelände, desto enger das Gitter). Die Genauigkeit des DHMs sollte in den Bereichen der Lotfußpunkte mindestens die der geforderten Genauigkeit, wenn nicht einen Faktor 10 besser sein.

Das aufzunehmende Objekt muss vollständig abgebildet sein, senkrecht (lotrecht) stehen und wenn weitere Elemente aufzunehmen sind dürfen diese nur rechtwinklig sein. Der Lotfußpunkt des Objektes darf nicht von Vegetation etc. verdeckt sein.

### **2.2 Schritt 1: Berechnung des Lotfußpunktes**

Der Lotfußpunkt (fp) der aufzunehmenden Objekte wird im digitalen Bild gemessen und in metrische Bildkoordinaten umgerechnet. Nun werden diese Bildkoordinaten über die Grundgleichungen der Zentralprojektion in das Objektkoordinatensystem gerechnet. Hierfür ist die Kenntnis der Geländehöhe des Objektpunktes nötig. Da wir diese Höhe nicht kennen, verfolgen wir den Sichtstrahl vom Projektionszentrum aus solange, bis wir das Höhenmodell treffen, das heißt, es wird folgender iterativer Prozess in Gang gesetzt.

- 1) Bildkoordinaten  $x_{fp}', y_{fp}'$  und Bildorientierung  $\Rightarrow$  Objektkoordinaten  $X_i, Y_i, Z_i$   
 Äußere Orientierung: Projektionszentrum  $X_0, Y_0, Z_0$  und Drehmatrix  $A(\varpi, \varphi, \kappa)$   
 Innere Orientierung: In die Bildkoordinaten sind die Hauptpunktlage und Verzeichnung hineingerechnet,  $z' = -ck$  (Kamerakonstante)  
 Startwert 1. Iterationsschritt:  $Z_1 = Z_0$ , i. Iterationsschritt:  $Z_i = Z_{dhm}(X_{i-1}, Y_{i-1})$

$$X_i = X_0 + (Z_i - Z_0) \frac{a_{11}x_{fp}' + a_{12}y_{fp}' + a_{13}z'}{a_{31}x_{fp}' + a_{32}y_{fp}' + a_{33}z'} \quad Y_i = Y_0 + (Z_i - Z_0) \frac{a_{21}x_{fp}' + a_{22}y_{fp}' + a_{23}z'}{a_{31}x_{fp}' + a_{32}y_{fp}' + a_{33}z'}$$

Gleichung 1: Projektive Beziehung

- 2) Abbruchkriterium prüfen: Ist  $dZ_i = |Z_{dhm} - Z_i| < 0.01$  wurde der Lotfußpunkt gefunden.

$$X_{fp} = X_i \quad Y_{fp} = Y_i \quad Z_{fp} = Z_i$$

Dieser Prozess liefert nach ca. 5 Iterationen das Ergebnis. Es können folgende Probleme hierbei auftreten:

- 1) Der Sichtstrahl trifft mehrmals auf das DHM und liefert das Ergebnis im ersten Punkt vom Projektionszentrum aus gesehen. Dies würde als Lagefehler zu erkennen sein.
- 2) Das DHM hat im Bereich des Lotfußpunktes eine Unstetigkeitsstelle. Hierbei ist die Iteration nicht konvergent und findet kein Abbruchkriterium.

### 2.3 Schritt 2: Berechnung von Punkten vertikal über dem Lotfußpunkt

Die Höhe (ho) oder die Schnittpunkte (ps) von weiteren Elementen auf der Lotlinie werden im Bild gemessen. Diese „Hochpunkte“ haben alle die selbe Lage, wie der Lotfußpunkt (unter der Voraussetzung, dass das Objekt lotrecht steht). Es ist daher einfach, aus den Bildkoordinaten und der Lagekoordinaten die Höhe dieser Punkte zu berechnen. Die Formel der Zentralprojektion wird entsprechend umgestellt. Es entstehen nun zwei Formeln für Z. Beide Formeln sollten eigentlich das selbe Ergebnis liefern. Nun ist es durchaus möglich, dass das Projektionszentrum auf einer Linie mit der X- oder Y-Achse liegt. In diesen Fällen wird der Term  $X_{fp} - X_0$  oder  $Y_{fp} - Y_0$  nahe oder gleich Null. Eine Berechnung der Höhe ist dann nicht oder nur sehr ungenau möglich. Sind beide Terme Null, liegt das Projektionszentrum direkt über dem Lotfußpunkt und die Höhe ist nicht berechenbar. Es ist also eine Fallunterscheidung nötig.

$$Z_{ps,ho} = (X_{fp} - X_0) \frac{a_{31}x_{ps,ho}' + a_{32}y_{ps,ho}' + a_{33}z'}{a_{11}x_{ps,ho}' + a_{12}y_{ps,ho}' + a_{13}z'} + Z_0 \quad X_{ps,ho} = X_{fp}$$

$$Z_{ps,ho} = (Y_{fp} - Y_0) \frac{a_{31}x_{ps,ho}' + a_{32}y_{ps,ho}' + a_{33}z'}{a_{21}x_{ps,ho}' + a_{22}y_{ps,ho}' + a_{23}z'} + Z_0 \quad Y_{ps,ho} = Y_{fp}$$

Gleichung 2: Gl. 1 umgestellt nach Z

## 2.4 Schritt 3: Berechnung mehrerer Punkte auf einer Orthogonalen zur Lotlinie

Nun können die Punkte ( $p_i$ ) senkrecht zur Lotlinie berechnet werden. Diese Punkte werden im Bild gemessen. Die Bildkoordinaten und die Objekthöhe (Schnittpunkt aus 2.3) sind bekannt. Die Lagekoordinaten können nun wieder mit der Zentralprojektion gerechnet werden.

$$X_{p_i} = X_0 + (Z_{ps} - Z_0) \frac{a_{11}x_{p_i}' + a_{12}y_{p_i}' + a_{13}z'}{a_{31}x_{p_i}' + a_{32}y_{p_i}' + a_{33}z'} \quad Y_{p_i} = Y_0 + (Z_{ps} - Z_0) \frac{a_{21}x_{p_i}' + a_{22}y_{p_i}' + a_{23}z'}{a_{31}x_{p_i}' + a_{32}y_{p_i}' + a_{33}z'}$$

$$Z_{p_i} = Z_{ps}$$

## 2.5 Vollständige Beschreibung des Objektes

Nach diesen Berechnungen liegen alle relevanten Punkte des Objektes als 3D-Koordinaten vor. Berechnungen zur Höhe und Breite/Abstände können nun berechnet und dokumentiert werden. Der wichtigste und fehleranfälligste Schritt ist der der Lotfußpunktberechnung.

## 3 Beispiel

Im folgenden Beispiel werden die Höhe eines Mastes und die Positionen der Isolatoren, sowie die Breite des Balkens von Strommasten aus AOS-Schrägbildern berechnet. Die Bilder entstanden bei einer Befliegung in der Schweiz im bewegten Gelände. Die Bildorientierungen wurden mittels Bündelblockausgleichung berechnet. Das DHM ist das Ergebnis einer ALTM-Befliegung vom Kanton Appenzell.

### 3.1 Schrägluftbild, Orthophoto

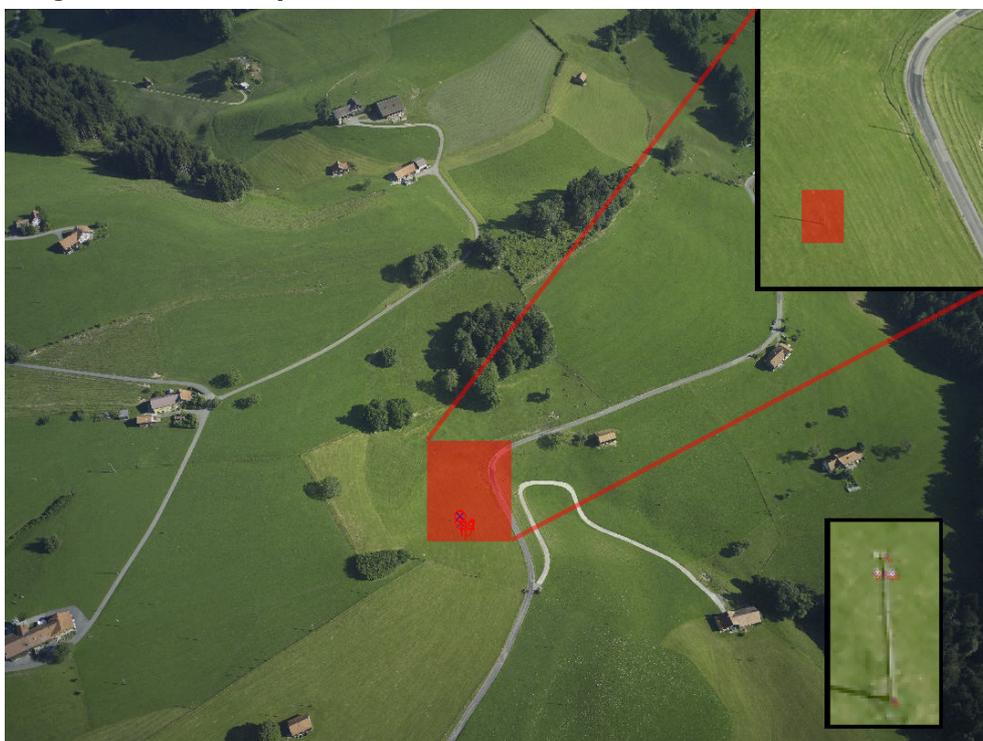


Abb. 3: Schrägluftbild mit Bildmessung des Strommastes

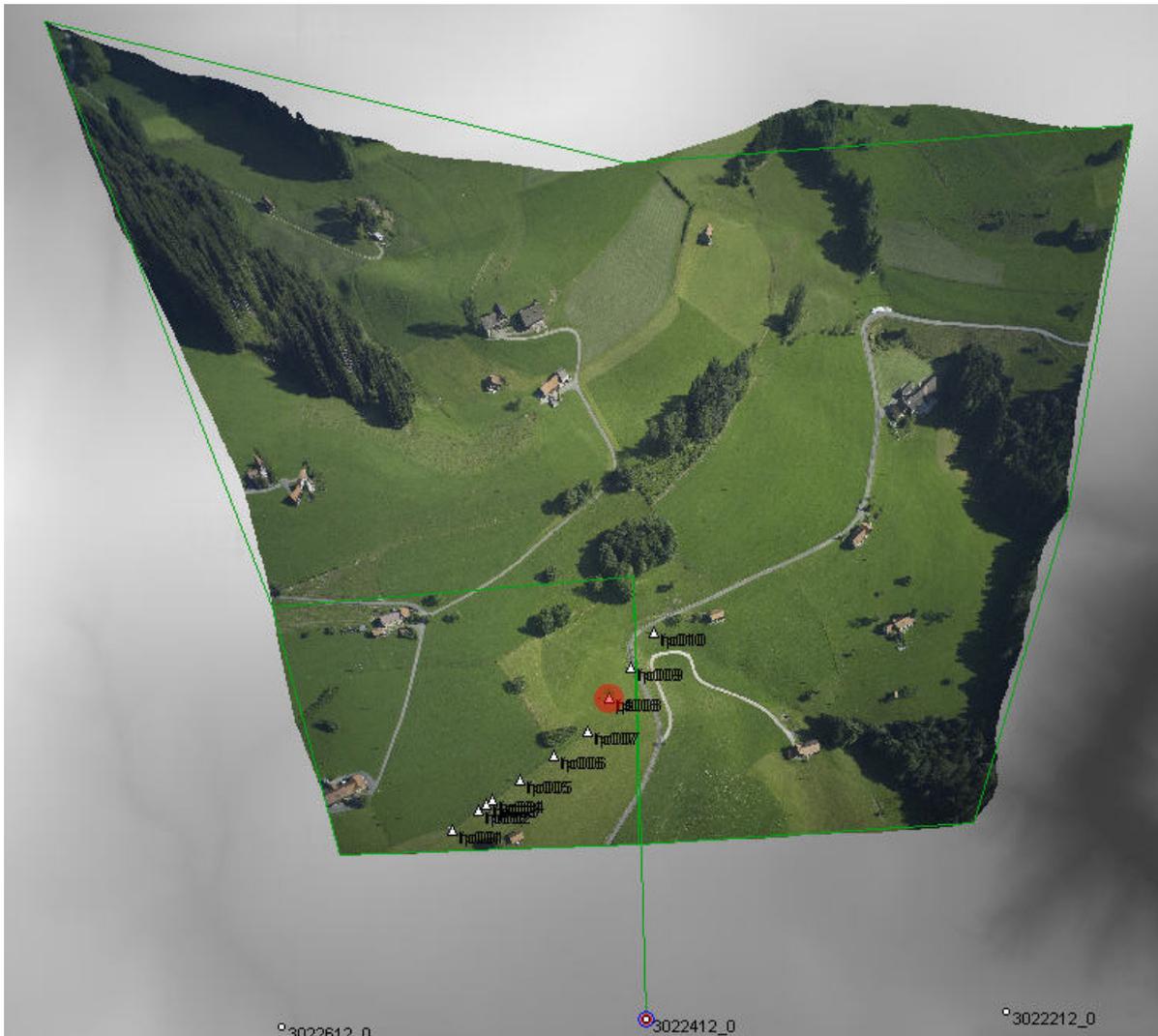


Abb. 4: Orthophoto mit eingeblendeten Objektkoordinaten über einem DHM

Der im Beispiel dargestellte Mast ist rot markiert. Weitere Masten wurden auf die selbe Art beschrieben und lieferten ähnliche Ergebnisse, auf die hier nicht eingegangen wird.

Die Bodenauflösung liegt in diesem Bild zwischen 8cm (kurze Kante unten: Nadirbereich) und 14cm (lange Kante oben), da das Bild um ca. 42gon geneigt ist. Es ist sogar möglich eine Angabe der Höhengauflösung zu machen. Der Bildbereich um den Mast hat eine Höhengauflösung von ca. 18cm.

### 3.2 Objekt: Strommast

Der Strommast besteht in unserem vereinfachten Beispiel aus 5 Punkten: den Lotfußpunkt (fp), den höchsten Punkt (ho), den Schnittpunkt des Balkens mit dem Mast (ps) und die beiden Isolatoren am Balken (p1 und p2). Vorausgesetzt wird, dass der Mast lotrecht steht und der Balken senkrecht zum Mast.

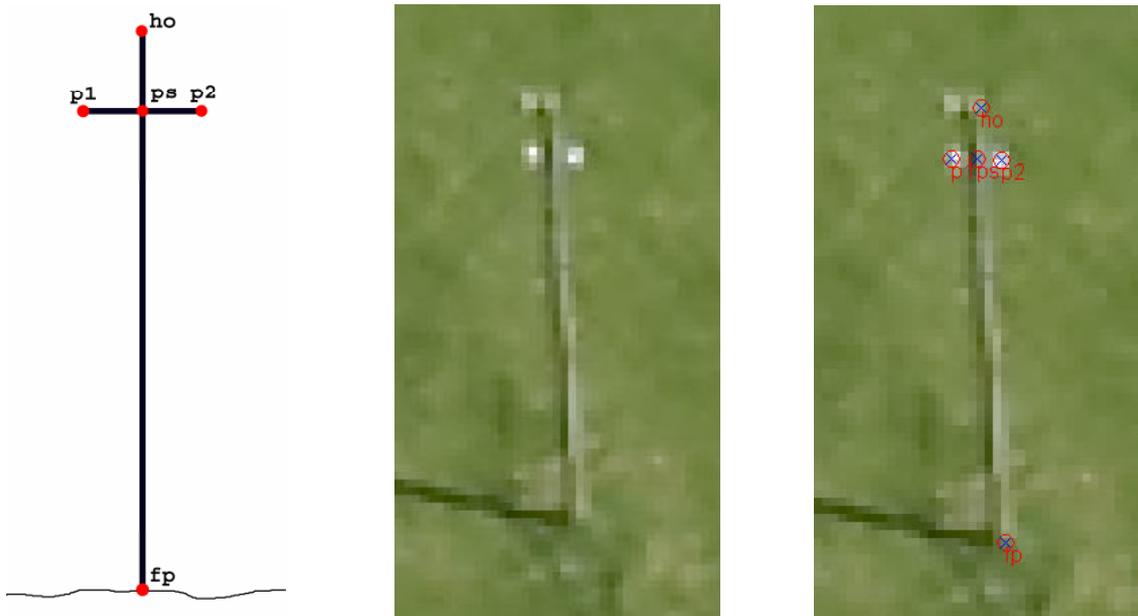


Abb. 1: links: Strommast schematisch, Mitte: Strommast im Bild, rechts: Strommast mit Bildmessung

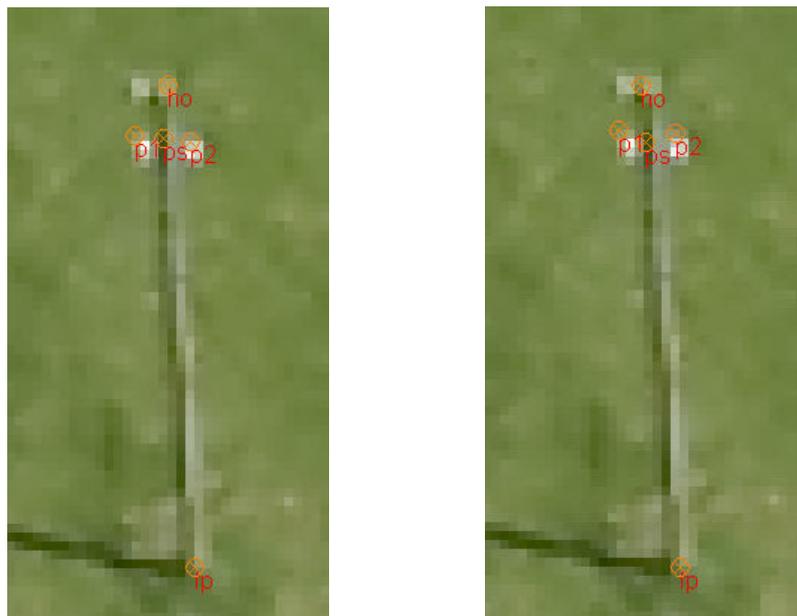


Abb. 2: In das Bild eingeblendete Objektkoordinaten, links: 3D-Stereoauswertung, rechts: monoskopisch

## 4 Ergebnis

Das Ergebnis der Berechnung liegt nun in 3D-Objektkoordinaten vor und wird mit dem eines Vorwärtsschnitts überprüft.

#### 4.1 Vergleich mit Vorwärtsschnittberechnung

Die 3D-Objektkoordinaten werden nun mit einer vorhergehenden 3D-Stereoauswertung (Vorwärtsschnitt) der Punkte fp,ho,ps,p1,p2 direkt gegenübergestellt, und es wird mit den Lagekoordinaten dieser Punkte eine Helmerttransformation berechnet und die Residuen betrachtet. Die Höhendifferenzen beider Berechnungen werden über das vorliegende DHM berechnet und gegenübergestellt.

Tab.1: Vergleich der Koordinaten, V-Vorwärtsschnitt, M-monoskopische Berechnung

	Rechts-V	Rechts-M	Diff.	Hoch-V	Hoch-M	Diff.	Höhe-V	Höhe-M	Diff.
fp	740586.732	740586.764	-0.032	247944.680	247944.392	0.288	828.960	829.447	-0.487
ho	740586.841	740586.764	0.077	247944.725	247944.392	0.333	838.654	839.188	-0.534
ps	740586.748	740586.764	-0.016	247944.815	247944.392	0.423	837.427	838.060	-0.633
p1	740586.449	740586.490	-0.041	247944.916	247944.512	0.404	837.284	838.060	-0.776
p2	740587.040	740587.045	-0.003	247944.571	247944.496	0.075	837.814	838.060	-0.246

Die Höhendifferenzen zeigen einen systematischer Anteil von ca. 0,5m. Der nicht systematische Anteil liegt im Mittel bei 0,2m. Der höhere systematische Anteil kann bei dieser Aufgabenstellung vernachlässigt werden, da zur Beschreibung des Objektes nur relative Höhen verwendet werden.

Tab. 2: Residuen der Helmerttransformation

fp > fp	vy:	0.0752	vx:	0.1324	Lagefehler:	0.1522
ho > ho	vy:	-0.0337	vx:	0.0873	Lagefehler:	0.0936
ps > ps	vy:	0.0593	vx:	-0.0021	Lagefehler:	0.0593
p1 > p1	vy:	0.0839	vx:	0.0167	Lagefehler:	0.0855
p2 > p2	vy:	0.0484	vx:	0.3459	Lagefehler:	0.3493

Der Lagefehler liegt im [dm]-Bereich. Obwohl der Mast nur in einen sehr kleinen Bereich des Bildes sichtbar ist, reicht die erreichte Genauigkeit aus, um den Anforderungen zu genügen.

Tab. 3: Höhendifferenzen der Punkte zum DHM, V-Vorwärtsschnitt, M-monoskopische Berechnung

Punkt	Höhe DHM	Höhe-V	Höhe-M	Diff.-V	Diff.-M
fp	829.476	828.960	829.447	-0.516	-0.000
ho	829.443	838.655	839.188	9.212	9.741
ps	829.480	837.428	838.060	7.948	8.613
p1	829.587	837.285	838.060	7.698	8.515
p2	829.367	837.815	838.060	8.448	8.700

#### 4.2 Vergleich über Spannmaße

Für die 3D-Geometrieerfassung des Objektes sind nur relative Werte (Strecken) zwischen den Punkten (fp,ho,ps,p1,p2) nötig. Anhand der 3D-Objektkoordinaten können diese Strecken

berechnet und ein Soll, Ist-Vergleich gemacht werden. Die Sollwerte werden aus dem Ergebnis des Vorwärtsschnitts entnommen.

Tab. 4: Vergleich der Strecken, V-Vorwärtsschnitt, M-monoskopische Berechnung

Strecke	Soll (V)	Ist (M)	Differenz
fp - ho	9.695	9.741	-0.046
fp - ps	8.469	8.613	-0.144
ps - p1	0.347	0.299	0.048
ps - p2	0.543	0.300	0.243
p1 - p2	0.866	0.555	0.311

Auffällig ist die Differenz der Strecke zwischen den Isolatoren. Hier ist der Abstand im Bild schon sehr gering (<8 Pixel), so dass hier größere Ungenauigkeiten zu erwarten sind. Die Höhenberechnung zeigt geringe Abweichungen.

## 5 Zusammenfassung, Ausblick

Mit der Grundformel der Zentralprojektion und zusätzlichen Bedingungen lassen sich Objekte dreidimensional in nur einem Bild erfassen. Die Genauigkeit hierfür hängt maßgeblich von der Einhaltung der Bedingungen ab (DHM, Struktur ist lotrecht und rechtwinklig) sowie der Bildorientierung. Da das Verfahren zur Auswertung von Strecken, also einer relativen Größe, eingesetzt wird, und eine Genauigkeit im [dm] bis [m] Bereich gefordert ist, zeigt sich, dass es für die Strukturerkennung geeignet ist und angewendet werden kann.

Darauf basierend folgt die Entwicklung einer automatischen Objekterkennung und -messung im Bild bis hin zur Voll- bzw. Semiautomatisierung der 3D-Beschreibung eines Objektes.

## 6 Literaturverzeichnis

ALBERTZ, J. & KREILING, W., 1998: Photogrammetrisches Taschenbuch 4. Auflage, S. 166-169, Wichmann Verlag, Karlsruhe

WIEDEMANN, A., 2009: Photogrammetrische Schrägluftbilder mit dem Aerial Oblique System AOS, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung DGPF-Jahrestagung Jena 2009, Band 18

## 7 Danksagung

Wir danken dem Kanton Appenzell und Hr. Eugster der Fa. GEOINFO AG für die Bereitstellung der Schrägbilder und des DHMs.