

UAS im Gleis – UAS Photogrammetrie als Alternative zur terrestrischen Erfassung von Bahnanlagen

THOMAS KRAFT¹ & MATTHIAS GESSNER²

Zusammenfassung: Die erreichbaren Genauigkeiten der photogrammetrischen Auswertung von Senkrecht- und Schrägluftbildaufnahmen, des Bahngeländes Wittstock/Dosse, aufgenommen mit einem kommerziellen Messkamarasystem von einem unbemannten Oktokopter, werden anhand eines hochlagegenauen Referenznetzes untersucht. Die erreichten Genauigkeiten werden den geforderten Dokumentationsgenauigkeiten der DB Netz AG gegenübergestellt. Der vorgestellte Ansatz zeigt beispielhaft das Potential zur zukünftigen berührungslosen Dokumentation von Objekten im Gleis.

1 Einleitung

Nach den Konzernrichtlinien und betrieblich-technischen Regelwerken der *DB Netz AG* unterliegen alle technischen Anlagen der Deutschen Bahn einer Dokumentations- und Inspektionspflicht. Für die Bestimmung des geographischen Ortsbezugs sind nach RIL 883.0027 (S. 3 ff) terrestrische, satellitengestützte und photogrammetrische Messverfahren zugelassen. Insbesondere die Dokumentation des Oberbaus der Bahnstrecken und der Nebenbauten erfolgt heute überwiegend durch Vermessungsingenieure unter Einsatz terrestrischer und satellitengestützter Messverfahren im Gleis. Aufgrund des kontinuierlichen Bahnverkehrs und der damit eingeschränkten Zugänglichkeit des Gleisbereichs, sind die Arbeitsabläufe zur Erfassung der notwendigen Geoinformationen oft zeit- und kostenintensiv. Mit der Anpassung der gemeinsamen Grundsätze des Bundes und der Länder, für den Aufstieg und den Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen wird insbesondere mit Vergabe der allgemeinen Aufstiegserlaubnis der kommerzielle Einsatz für Fluggeräte unter 5 kg realistisch. EISENBEISS, STEBNER und CRAMER et al. haben gezeigt, dass unter Verwendung kalibrierter Fotokameras auf unbemannten Trägern die photogrammetrische Auswertung zu Messgenauigkeiten von bis zu einem Drittel Pixel führen kann. Insbesondere CRAMER & HAALA und HARWIN & LUCIER bringen den Nachweis, dass absolute Messgenauigkeiten im Subdezimeterbereich möglich sind. In Kooperation mit dem *Regionalbereich Ost der DB Netz AG* sollte untersucht werden, inwieweit sich die photogrammetrische Auswertung eines kalibrierten Messkamarasystems auf einem unbemannten Träger als Alternative zu den bisherigen terrestrischen Messverfahren im Gleis eignet.

¹ Thomas Kraft, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Optische Sensorsysteme, Fachabteilung Sensorkonzepte und Anwendungen, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin
E-Mail: thomas.kraft@dlr.de

² Matthias Geßner, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Optische Sensorsysteme, Fachabteilung Sensorkonzepte und Anwendungen, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin
E-Mail: matthias.gessner@dlr.de

2 Datengrundlage

2.1 Bahngelände und Passpunktfeld

Für die Untersuchung wurde das Gelände am Bahnhof Wittstock/Dosse vom Regionalbereich Ost der DB Netz AG zur Verfügung gestellt. Es handelt sich hierbei um einen aktiven Streckenabschnitt mit kontinuierlichem Regionalbahnverkehr auf einem Gleis. Auf dem Gelände befinden sich zwei Bahnsteige, verschiedene Bahnhofsgebäude, zwei Bahnübergänge und diverse technische Betriebsanlagen. Der Streckenabschnitt enthält drei Gleise ohne Oberleitungen, von denen das südlichste Gleis still gelegt ist.

Für die Verifikation der photogrammetrischen Auswertung wurde ein Bodenpasspunktfeld vermarktet. Die Bestimmung der Punktkoordinaten erfolgte mit einem *Leica TCRP1202+* Tachymeter und einem *Leica GPS 1200* GPS-Rover mittels RTK-Messung. Für die Vermarkung der Passpunkte (PP) außerhalb der Bahngleise (*in Abb. 1 rot markiert*) wurden handelsübliche Vermarkungen aus Kunststoff verwendet. Diese wurden farblich markiert und mit Zielmarken versehen. Zusätzlich wurden im gesamten Gelände diverse Objekte als Kontrollpunkte (KP) eingemessen, wie z.B. Kabeltöpfe, Weichenpolizisten, Schächte (*in Abb. 1 grün markiert*) sowie Bahnsteigkanten und Mastfundamente (*in Abb. 1 gelb markiert*).

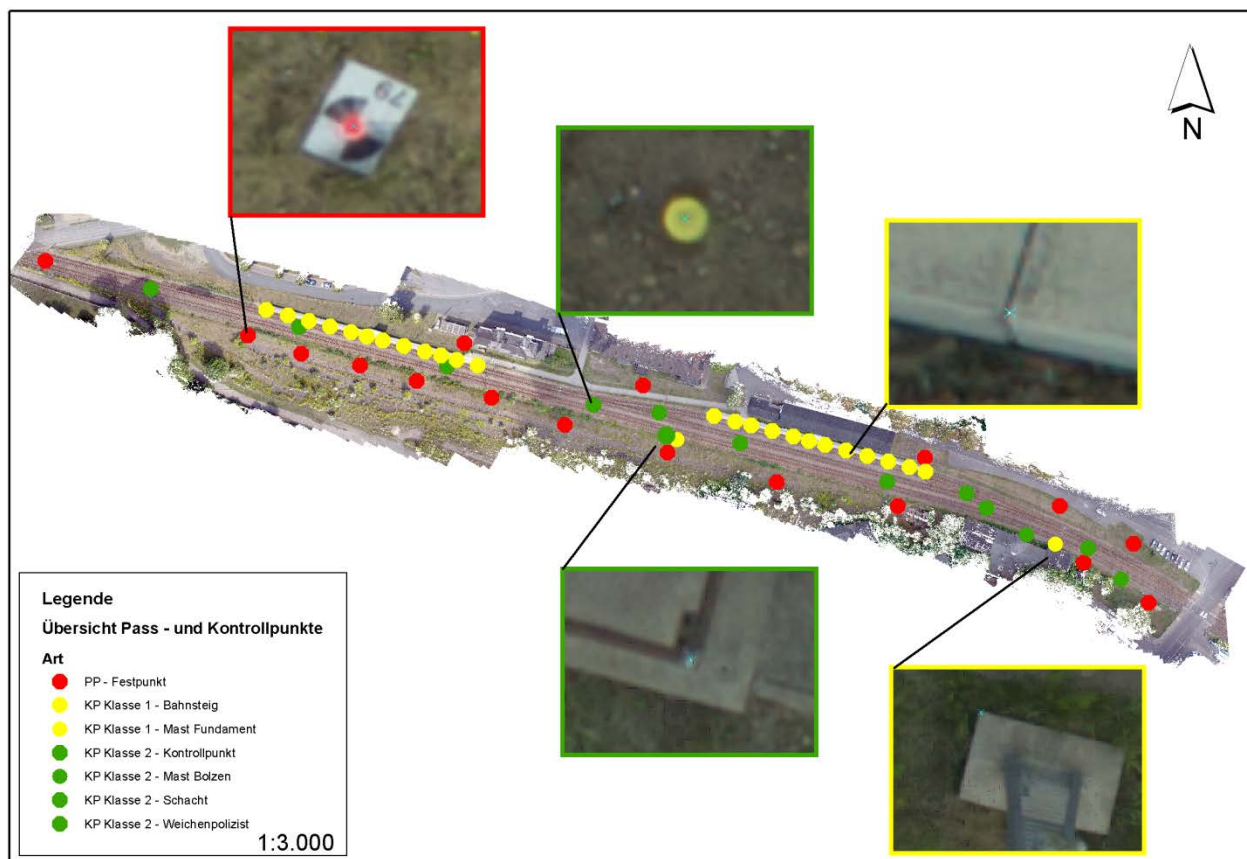


Abb. 1: Übersicht des Passpunktfeldes auf dem Bahnhofsgelände Wittstock/Dosse

Um den Bildverband mit einer hohen Genauigkeit orientieren zu können wurde auf Grundlage der tachymetrischen Messwerte eine freie Ausgleichung durchgeführt und damit ein eigenes lokales Referenznetz geschaffen. Mit der Open Source Software *Java Graticule 3D*³ wurde in einer Ausgleichung ohne Zwang eine mittlere innere Genauigkeit von 3 mm in der Lage sowie 1 mm in der Höhe über sämtliche Passpunkte erreicht. Für die Verwendung der Passpunkte in der Aerotriangulation (AT) wurden deren Koordinaten maßstabsfrei mittels einer 3-Parameter Transformation in Pseudo-UTM-Koordinaten, bezogen auf den WGS84-Ellipsoid, überführt. Damit liegen die Passpunktkoordinaten und die spätere Navigationslösung in hinreichend identischen Koordinatensystemen vor. Abb. 1 zeigt das gesamte Passpunktfeld auf dem Bahngelände mit einer Ausdehnung von ca. 50 x 600 m entlang der Gleise.

2.2 Auswahl des Messkamarasystems

Die Auswahl eines geeigneten Messkamarasystems orientierte sich an den geforderten Dokumentationsgenauigkeiten relevanter Objekte im Gleis, den gesetzlichen Vorgaben zum maximalen Abfluggewicht des Gesamtsystems von 5 kg⁴ und den Anforderungen der photogrammetrischen Auswertung.

Die Konzernrichtlinie 883 der DB Netz AG beschreibt alle relevanten Genauigkeitsanforderungen der Eisenbahnvermessung. Nach RIL 883.0020 (S. 3 ff) muss die absolute Genauigkeit der Referenzpunkte des Bezugssystems der Deutschen Bahn (DB_REF) zwischen 5 und 15 mm in der Lage und Höhe liegen. Technische Anlagen, Bauwerke und weitere topographische Objekte im Gleis, sind nach RIL 883.0027 (S. 9 ff) mit absoluten Genauigkeiten zwischen 10 und 50 cm in der Lage und Höhe zu dokumentieren. Mit der gesetzlichen Beschränkung der Flughöhe und unter Beachtung vorhandener Vegetation und Bebauung im Bahnbereich ergibt sich ein typischer Einsatzbereich von 30 bis 100 m über Grund. Entsprechend den heute üblichen Nutzlasten kommerzieller Anbieter von unbemannten Fluggeräten unter 5 kg, liegt die Nutzlastgrenze zwischen 500 und 1000 g. Damit beschränkte sich die Auswahl eines geeigneten Messkamarasystems auf die Klasse der kompakten Fotokameras. Da die photogrammetrische Auswertung eine stabile innere Orientierung fordert, fiel die Auswahl von Kamera und Objektiv auf die *Sony NEX 5R* in Kombination mit dem *Zeiss Biogon ZM 2/35 Objektiv* in der Industrieversion. Das Objektiv wurde mit Blende 4 auf einen Bereich von 30 bis 100 m scharf gestellt und mechanisch fixiert.

Die geometrische Kalibrierung der Kamera erfolgte mit der Software *AICON 3D*⁵ anhand verschiedener Aufnahmen des Passpunktfeldes des Labors für Photogrammetrie an der Beuth Hochschule für Technik Berlin. Das Ergebnis der geometrischen Kalibrierung kann der Tab. 1 entnommen werden.

³ <http://javagraticule3d.sourceforge.net> (abgerufen am: 08.01.2014)

⁴ www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Publikationen/VerkehrUndMobilitaet/unbemannte-luffahrtsysteme.pdf (abgerufen am: 10.01.2014)

⁵ www.aicon3d.com (abgerufen am: 10.01.2014)

Tab. 1: Parameter der Kamerakalibrierung

Parameter	Messwert	Standardabweichung
ck [mm]	35,2670	0,0023
Xh [mm]	-0,0748	0,0013
Yh [mm]	0,0697	0,0018
A1	-1,99902e-5	6,2227e-7
A2	2,20891e-8	3,4892e-7
R0	8,83390	-

Die Georeferenzierung der Aufnahmen erfolgte mit einem *Attitude Heading Reference System* (AHRS) vom Typ *Xsens MTi-G-100*. Damit ist eine konsequente Trennung zwischen Messkamerasystem und unbemanntem Fluggerät gegeben. Mit Montage des AHRS auf der Kamerarückseite kann für jede Aufnahme die räumliche Lage und Rotation des Projektionszentrums näherungsweise bestimmt werden. Die Rohdatenaufzeichnung des AHRS erfolgte mit 25 Hz. Das Gesamtgewicht von Kamera, Objektiv, AHRS, GPS-Antenne, Datenlogger und Verkabelung lag bei 730 g.

2.3 Durchführung der Bildmessflüge

Für das beschriebene Kamerasystem wurde eine Abschätzung der Bildflugplanung für die Senkrecht- und Schrägluftbilddaufnahmen durchgeführt. Zur Generierung von Oberflächen führen nach HAALA & ROTHERMEL Dense-Matching Verfahren zu guten Ergebnissen, wenn die orientierten Bildverbände Längsüberdeckungen von 80 % und Querüberdeckungen von 60 % aufweisen. Unter Beachtung gleicher Bildmaßstäbe, führen Anstellwinkel von 30° oder 45°, im Vergleich zum Senkrechtfall, zu stabileren Geometrien des räumlichen Vorwärtseinschnittes und ermöglichen damit eine genauere Bestimmung der Höhe.

Ausgehend von der gewünschten Bodenauflösung von etwa 1 cm wurde für die Senkrechtaufnahmen eine Flughöhe von 60 m über Grund gewählt. Unter Beachtung möglicher Abweichungen der Flugtrajektorie beträgt die Längsüberdeckung 85 % und die Querüberdeckung der Flugstreifen 75 %. Um die Anzahl der alternierenden Flugstreifen möglichst gering zu halten, wurden diese parallel zu den Gleisen geplant. Aus Sicherheitsgründen wurden die Aufnahmen auf eine östliche und eine westliche Befliegung verteilt. In der Planung der Schrägluftbildbefliegung sollte ebenfalls eine Bodenauflösung von etwa 1 cm in der Bildmitte erreicht werden. Das stillgelegte Gleis 3 diente dabei als Referenz für zwei alternierende Flugstreifen mit einem Anstellwinkel von 40°. Die Umsetzung der Flugplanung erfolgte auf Grundlage eines bereitgestellten *IVL-Plans* der Deutschen Bahn. Der *IVL-Plan* wurde dazu vom DB_REF- in das WGS84-Koordinatensystem überführt. Die Start- und Endkoordinaten der Flugstreifen wurden unter Beachtung aller Grundstücksgrenzen exportiert und im Anschluss in eine Missionsdatei des Fluggerätes überführt.

Für die Durchführung der Bildflüge fiel die Wahl auf einen modifizierten Oktokopter der *HiSystems GmbH*. Das Fluggerät erlaubt einen automatischen Abflug von definierten Wegpunkten unter Angabe der Flughöhe über Grund und gewünschter Fluggeschwindigkeit. Mit einer stabilisierten Kamerahalterung können im Flug zusätzlich die Nick- und Rollbewegungen des Oktokopters kompensiert werden. Weiterhin kann insbesondere für die Erfassung der Schrägluftbildaufnahmen ein definierter Anstellwinkel vorgegeben werden. Fluggerät und Messkamerasystem haben ein Abfluggewicht von 4300g. Vor der Befliegung wurde bei der *Gemeinsamen Oberen Luftfahrtbehörde Berlin-Brandenburg* eine allgemeine Betriebserlaubnis für das Fluggerät eingeholt. Die Durchführung aller Bildflüge erfolgte am 22.08.2013 gemäß den Richtlinien des BMVBS in Abstimmung mit dem zuständigen Bereichsleiter der Bahn und der ortsansässigen Polizeidienststelle.

3 Auswertung

3.1 Senkrechtaufnahmen

Die Auswertung eines im Gleis positionierten Siemenssterns (32 Flächen, 26 cm Durchmesser) erfolgte anhand von 23 Aufnahmen. Es wurde jeweils der größte Durchmesser des Graukeils gemessen. Im Mittel wird eine Bodenauflösung von 12 mm erreicht mit einer Standardabweichung von 3,3 mm. Die Stichproben liegen zwischen 8 mm für die Abbildung des Siemenssterns in der Bildmitte und 19 mm für die Abbildung in den Bildecken.

Die Orientierung des Bildverbands beider Senkrechtbefliegungen wurde im Rahmen einer AT mit der Software *Applikation Master* und *MatchAT* der Firma *Trimble/Inpho* durchgeführt. Da hier die Genauigkeiten der Passpunkte, die theoretische Messgenauigkeit im Bild sowie die Definitionsgenauigkeit in etwa in der gleichen Größenordnung in die Ausgleichung eingehen, sind diese bei der Berechnung der zu erwartenden Genauigkeit für neu bestimmte Punkte mit zu berücksichtigen. Wie den Berechnungen zu entnehmen ist, wird eine Punktgenauigkeit in der Lage von 4 mm und in der Höhe von 15 mm erwartet.

Mit $\sigma_B = \frac{1}{3} * 4,8\mu m = 1,8\mu m$ und $m_b = 1700$ ergibt sich eine Bildpunktmessgenauigkeit von $\sigma_{XY(ideal)} = m_b * \sigma_B = 3 \text{ mm}$. Mit der Annahme der Passpunktgenauigkeit von $\sigma_{XY(pp)} = 3 \text{ mm}$ sowie der Annahme der Definitionsunsicherheit von $\sigma_{XY(nat)} = 1 \text{ mm}$, ergeben sich mit der Aufnahmeentfernung von $Z = 60\text{m}$ und der Basis $B = \{4, 12\}$ nach KRAUS (Formel 2.1-35) folgende Erwartungswerte für die Lage und Höhe:

$$(1) \quad \sigma_X = \sigma_Y = \sqrt{\sigma_{XY(pp)}^2 + \sigma_{XY(Mess)}^2 + \sigma_{XY(nat)}^2} = 4 \text{ mm} \quad (\text{Lage})$$

$$(2) \quad \sigma_Z = m_b * \frac{Z}{B} * \sigma_B = 12\text{mm} * \frac{60}{12} * 0,0018\text{mm} = 15 \text{ mm} \quad (\text{Höhe})$$

Näherungswerte

Für die Näherungswerte der äußeren Orientierung der Luftbilddaufnahmen sollten die vom AHRS aufgezeichneten Daten, wie geografische Breite, Länge und Höhe bezogen auf den WGS84-Ellipsoid sowie Roll, Pitch und Yaw im Flugzeug-Koordinatensystem dienen. Ein Postprocessing der Rohdaten erfolgte mit der Software *Xsens MT Manager*. Bei der Untersuchung der Messwerte konnte eine Streuung der Höhenwerte von ± 35 Meter um die zu erwartende Höhe sowie eine variable Drift im Yaw-Winkel pro Flugstreifen festgestellt werden. Eine Analyse der Flugdaten des Otokopters führte zu valideren Werten und den Aufnahmen wurden zusätzlich über die GPS-Zeit die Höhe über Grund und die Ausrichtung des Fluggerätes zugeordnet. Die Koordinaten der Projektionszentren wurden in das Koordinatensystem der Passpunkte transformiert und die Höhe über Grund wurde mit der mittleren Geländehöhe addiert.

Aerotriangulation

Die Qualität der Näherungswerte des AHRS für die Parameter der äußeren Orientierung waren für die Verknüpfungspunktsuche, basierend auf dem *Feature Based* und *Least Square Matching* nicht ausreichend. Daher wurde mit einer Beta-Version der Software *UAS Master* von *Trimble/Inpho* eine automatische Verknüpfungspunktsuche auf Grundlage des von LOWE entwickelten SIFT-Algorithmus durchgeführt. Mit den verbesserten Näherungswerten für die Parameter der äußeren Orientierung war es nun möglich, die aufgenommen Bilddaten zu triangulieren. Ausgehend von der Kenntnis, dass die erstellten Merkmalspunkte des SIFT lediglich pixelgenau extrahiert werden, wurden diese bei der anschließenden AT nicht berücksichtigt und über ein kombiniertes *Feature Based* und *Least Square Matching* erneut generiert. Nach Durchführung der Bündelblockausgleichung wurde für die Senkrechtaufnahmen eine relative Genauigkeit von unter einem Drittel Pixel erreicht. Die Ergebnisse der Aerotriangulation verdeutlicht Tab. 3.

Tab. 2: Ergebnis der Aerotriangulation der Senkrechtaufnahmen

Verknüpfungspunkte	x	y
RMS automatische Verknüpfungspunkte	1,1 μm	1,2 μm
RMS manuelle Verknüpfungspunkte	2,7 μm	2,7 μm

Verknüpfungspunkte	X	Y	Z
Mittlere Std.Abw. der Verknüpfungspunkte	4 mm	4 mm	11 mm
RMS Passpunkte (23)	15 mm	9 mm	14 mm
RMS Kontrollpunkte (38)	7 mm	5 mm	19 mm

Zu den Ergebnissen der AT sei einschränkend gesagt, dass die Angaben der RMS-Werte für die Pass- und Kontrollpunkte nicht aussagekräftig sind, da die Genauigkeit der Passpunkte, die als Referenz genutzt wurden, in etwa in derselben Größenordnung liegt wie die Messgenauigkeit im Objektraum. Der Bildverband wurde auf 1,3 μm (1/3 Pixel) orientiert und bietet die

Grundlage für die manuelle Bestimmung von Neupunkten durch den mehrfachen räumlichen Vorwärtseinschnitt. Ebenfalls ist damit die Voraussetzung für eine Oberflächengenerierung mit dem am DLR entwickelten Semi-Global Matching Algorithmus (SGM, HIRSCHMÜLLER) erfüllt. Mit Erstellung eines digitalen Oberflächenmodells (DSM) wurde auf Grundlage der AT ein TrueOrtho-Mosaik erstellt. Die erreichten Genauigkeiten der manuellen Bestimmung von Neupunkten werden im Abschnitt 4 erläutert.

3.2 Schrägluftbildaufnahmen

Aufgrund des Höhen-/Basisverhältnis der Aufnahmen von 1:20 innerhalb der Flugrichtung und 1:6 quer zur Flugrichtung ist die Höhenmessung im Bildverband der Senkrechtbefliegung nur mit einer dreifach geringeren Genauigkeit möglich, als dies für die Bestimmung der Lage der Fall ist. Wie bereits im Abschnitt 2.3 bemerkt, kann über die Auswertung der Schrägluftbilder die Schnittgeometrie am Objektpunkt verbessert werden, sodass die Höhe in etwa in derselben Genauigkeit wie die Lage erfasst werden kann. Dazu wurden exemplarisch 96 Aufnahmen der zwei alternierenden Streifen der Schrägluftbildbefliegung orientiert. Die AT wurde rein passpunktbasiert durchgeführt unter Verwendung der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Näherungswerte. Durch den vergleichsweise kleinen Verband waren lediglich 6 Passpunkte und 22 Kontrollpunkte sichtbar, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse einschränkt. Nach der manuellen Verknüpfungspunktmessung innerhalb des Streifens sowie der Messung aller im Bereich vorliegenden Passpunkte, konnten die Näherungswerte der äußeren Orientierung verbessert werden und anschließend eine automatische Verknüpfungspunktmessung durchgeführt werden. Unter Annahme der gleichen a priori Genauigkeiten wie im Senkrechtfall, konnte die AT mit folgenden Genauigkeiten in Tab. 4 berechnet werden.

Tab. 3: Ergebnis der Aerotriangulation der Schrägluftbildaufnahmen

Verknüpfungspunkte	x	y
RMS automatische Verknüpfungspunkte	0,9 μm	1,0 μm
RMS manuelle Verknüpfungspunkte	2,4 μm	2,9 μm

Verknüpfungspunkte	X	Y	Z
Mittlere Std.Abw. der Verknüpfungspunkte	8 mm	10 mm	12 mm
RMS Passpunkte (6)	7 mm	8 mm	11 mm
RMS Kontrollpunkte (22)	9 mm	13 mm	19 mm

Die Annahme, dass Höhenwerte im Schrägluftbildfall genauer bestimmt werden können als es in einer vergleichbaren Senkrechtkonfiguration der Fall ist, lässt sich mit den Ergebnissen der Tabelle 5 und 6 bestätigen. Auf Grundlage des orientierten Bildverbands wurde mit der am *Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart* entwickelten Software *SURE*⁶ eine dichte 3D Punktwolke generiert. Damit konnte zusätzlich gezeigt werden, dass die Genauigkeit der AT einem pixelweisen Dense Matching Verfahren genügt.

⁶ www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/sure/index.en.html (abgerufen am: 28.01.2014)

4 Ergebnisse

Im Folgenden wird das Ergebnis der manuellen Punktbestimmung durch mehrfachen räumlichen Vorwärtseinschnitt im orientierten Bildverband der Senkrecht- sowie der Schrägluftbildaufnahmen dargestellt. Danach folgt eine Analyse der Genauigkeiten manuell bestimmter Punkte auf Grundlage des generierten TrueOrtho-Mosaiks der Senkrechtaufnahmen. Die Betrachtung der Ergebnisse erfolgt für alle in der AT eingeführten Passpunkte und Kontrollpunkte. Dabei werden die Kontrollpunkte in zwei Klassen unterschieden. Klasse 1 enthält schwierig identifizierbare Objekte wie Bahnsteigkanten und Fundamentecken. Klasse 2 enthält markante Objekte wie radialsymmetrische Gleisvermarkungspunkte (GVP) und Schachtecken. (vgl. Abb. 1, Klasse 1 - gelb, Klasse 2 - grün).

4.1 Manuelle Punktmessung im Verband der Senkrechtaufnahmen

Die Standardabweichung der Bildpunktmessung im Objektraum, aller im orientierten Senkrechtbildverband durch Mehrfachmessung bestimmten Passpunkte (PP) und Kontrollpunkte (KP) verdeutlicht Tab. 5. Für die Bestimmung von Neupunkten wird entsprechend den Angaben in der Spalte *KP Klasse 1&2* eine Standardabweichung von 5 mm in der Lage sowie 9 mm in der Höhe erreicht.

Tab. 4: Ergebnisse der manuellen Punktbestimmung durch mehrfachen räumlichen Vorwärtseinschnitt im orientierten Bildverband der Senkrechtaufnahmen

	Alle PP & KP (60 Punkte)			KP Klasse 1&2 (42 Punkte)			KP Klasse 1 (26 Punkte)			KP Klasse 2 (16 Punkte)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Std.Abw. [mm]	3,6	3,7	8,6	3,6	3,6	9,1	3,6	3,7	9,1	3,5	3,5	9,1
Min. [mm]	3,0	3,0	6,0	3,0	3,0	7,0	3,0	3,0	7,0	3,0	3,0	8,0
Max. [mm]	6,0	6,0	15,0	6,0	6,0	15,0	4,0	4,0	11,0	6,0	6,0	15,0

4.2 Manuelle Punktmessung im Schrägluftbildverband

Die Standardabweichung aller im orientierten Schrägluftbildverband durch mehrfachen räumlichen Vorwärtseinschnitt bestimmten Passpunkte (PP) und Kontrollpunkte (KP) verdeutlicht Tab. 6. Im orientierten Bildverband der Schrägluftbildaufnahmen ist eine Bestimmung von Neupunkten im Bereich von 7 mm in der Lage und Höhe möglich. Damit ist bestätigt, dass sich die Höhenmessgenauigkeit auf Grund der Schnittgeometrie in derselben Größenordnung ausprägt wie in der Lage. Eine Kombination der photogrammetrischen Punktbestimmung von Senkrecht- und Schrägluftbildaufnahmen führt zu der Annahme, dass hiermit die höchsten Messgenauigkeiten erreicht werden können.

Tab. 5: Ergebnisse der manuellen Punktbestimmung durch mehrfachen räumlichen Vorwärtseinschnitt im orientierten Bildverband der Schrägluftbildaufnahmen

	Alle PP & KP (26 Punkte)			KP Klasse 1&2 (20 Punkte)			KP Klasse 1 (12 Punkte)			Grüne KP (8 Punkte)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Std.Abw. [mm]	5,2	6,7	6,7	5,3	7,2	7,3	6,0	8,6	8,2	4,3	5,1	5,9
Min. [mm]	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0	4,0	7,0	6,0	4,0	5,0	5,0
Max. [mm]	8,0	12,0	10,0	8,0	12,0	10,0	8,0	12,0	10,0	5,0	6,0	6,0

4.3 Digitalisierung im TrueOrtho-Mosaik

Die Digitalisiergenauigkeit im TrueOrtho-Mosaik ist von mehreren Fehlereinflüssen abhängig. Hier pflanzt sich die Projektionsungenauigkeit der AT, die Extraktionsungenauigkeit des Oberflächenmodells sowie die Digitalisierungenauigkeit der manuellen Punktmessung fehlertheoretisch fort. Zur groben Abschätzung können die in Tab. 7 dargestellten Standardabweichungen verwendet werden, die aus den Differenzen zwischen den terrestrisch erhobenen Koordinaten des Referenznetzes und den im TrueOrtho Mosaik digitalisierten Pass- und Kontrollpunkten bestimmt wurden. Hier sei darauf hingewiesen, dass der Messfehler des Operators beim Digitalisieren im TrueOrtho-Mosaik in etwa die gleiche Größenordnung einnimmt, wie für die Genauigkeit der Passpunkte angenommen wurde. Eine valide Aussage, basierend auf den numerischen Werten ist so nicht zu treffen. Um für diese Methode schlüssige Annahmen treffen zu können, sollten die Pass- und Kontrollpunkte um den Faktor 3 genauer bestimmt werden, als ein Punkt im Bild messbar ist.

Tab. 6: Differenzen der terrestrischen Messungen zu den digitalisierten Punkten im TrueOrtho-Mosaik

	Alle PP & KP (60 Punkte)			KP Klasse 1&2 (42 Punkte)			KP Klasse 1 (26 Punkte)			KP Klasse 2 (16 Punkte)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Std.Abw. [mm]	6,7	5,8	17,7	5,0	5,7	16,9	5,2	3,9	17,8	4,4	8,0	15,1
Min. [mm]	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	7,5
Max. [mm]	38,0	26,9	86,2	17,6	26,9	67,5	15,8	10,2	67,5	17,6	26,9	66,0

5 Fazit und Ausblick

Auf Grundlage der orientierten Bildverbände, der erhobenen Senkrecht- und Schrägluftbildaufnahmen, konnte gezeigt werden, dass über den mehrfachen räumlichen Vorwärtseinschnitt Neupunkte mit einer relativen Genauigkeit im Millimeterbereich bestimmt werden können. Die Ergebnisse der relativen Genauigkeiten machen deutlich, dass nach RIL 883.0020 (S. 3 ff) die Anforderungen an Verdichtungs- und Lagefestpunkte des DB_REF-Bezugssystems erfüllt werden können. Die relative Genauigkeit wird für diese Punkte mit 10 mm in der Lage und Höhe gefordert. Ebenfalls können für die Bestandsdokumentation nach RIL 883.0027 (S. 9 ff) die geforderten relativen Genauigkeiten von 50 mm in der Lage und Höhe für technische Anlagen und Bauwerke erfüllt werden.

Die geforderten absoluten Genauigkeiten liegen hier zwischen 10 cm und 50 cm in der Lage und Höhe. Die absolute Dokumentationsgenauigkeit der Referenzpunkte ist mit 15 mm in der Lage und Höhe angegeben.

Die Qualität der erhobenen Näherungswerte entsprach leider nicht den Anforderungen einer klassischen Aerotriangulation. Das genutzte AHRS macht die Verwendung geeigneter Methoden zur verbesserten Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung notwendig. Trotz dieses Zwischenschritts konnte gezeigt werden, dass die photogrammetrische Auswertung des vorgestellten Messkamarasystems für unbemannte Träger möglich ist. Betrachtet man nur die erreichten relativen Genauigkeiten der manuellen Punktbestimmung über den mehrfachen räumlichen Vorwärtsschnitt, hätten alle Kontrollpunkte gemäß den Konzernrichtlinien dokumentiert werden dürfen. Die geforderten Messgenauigkeiten der Gleisvermessung (RIL 883.0025, S. 1 ff) und der Gleisvermarkung (RIL 883.0032, S. 7 ff) wurden nicht erreicht.

Eine valide Aussage zu den absoluten Genauigkeiten kann leider nicht getroffen werden. Dazu hätten die Pass- und Kontrollpunkte um den Faktor 3 genauer bestimmt werden müssen. Daher kann auch für die Dokumentationsgenauigkeit der Digitalisierung von Punkten in einem TrueOrtho-Mosaik keine valide Aussage getroffen werden. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, welche absoluten Genauigkeiten möglich sind. Eine kombinierte Auswertung von Senkrecht und Schrägluftbildaufnahmen wird vermutlich zu den höchsten Genauigkeiten führen. Die Verwendung am Markt verfügbarer Dense Matching Software wie z.B. *SURE* kann darüber hinaus für eine Generierung von 3D Punktwolken auf Grundlage der orientierten Bildverbände genutzt werden. Aktuelle Untersuchungen wie CRAMER legen die Vermutung nahe, dass mit ausreichender Extraktionsgenauigkeit ebenfalls die Erfassung von Engstellen im Gleisbereich (RIL 883.0026 - S. 3 ff) möglich ist.



Abb. 2: SURE-Punktwolke auf Basis des orientierten Bildverbands der Schrägluftbildaufnahmen

Literaturverzeichnis

- CRAMER, M., HAALA, N., ROTHERMEL, M., LEINSS, B. & FRITSCH, D., 2013: UAV-gestützte Datenerfassung für Anwendungen der Landesvermessung – das Hessigheim-Projekt, DGPF Tagungsband Nr. 22, 2013, S.450-469.
- CRAMER, M. & HAALA, N., 2012: Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge, DGPF Tagungsband Nr. 21, 2012, S.428-440.
- DAVID G. LOWE, 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, Band 60, Nr. 2, S. 91-110.
- EISENBEISS, H., 2009: UAV Photogrammetry. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- HAALA, N. & ROTHERMEL, M., 2012: Dense Multi-Stereo Matching for High Quality Digital Elevation Models. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 2012, Nr. 4, S. 331-343.
- HARWIN, S. & LUCIEER, A., 2012: Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. Remote Sensing, 2012, 4. Jg., Nr. 6, S. 1573-1599.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30, 328–341.
- KRAUS, K., 2004: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Photogrammetrie, Band 1, Auflage 7, 2004, ISBN 3-11-017708-0
- RIL 883, 2011: Eisenbahnvermessung. Handbuch 88301, Aktualisierung Nr. 4, 2011, DB Netz AG
- ROTHERMEL, M., WENZEL, K., FRITSCH, D., HAALA, N., 2012: SURE - Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. Proceedings LC3D Workshop, Berlin, December 2012
- SEILER, I., 2013: Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung der Erlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen gemäß § 16 Absatz 1 Nummer 7 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Referat LR 24, Bonn.
- STEBNER, K., 2010: Orientierung von Schrägluftbildern aus UAV-Aufnahmen mit Amateurkameras. Masterarbeit, Beuth Hochschule für Technik, Berlin.