

# Zur Qualität dichter Punktwolken aus UAV-basierten Bildflügen

Thomas P. Kersten | Maren Lindstaedt

## 1 Einführung

3D-Punktwolken beeinflussen seit den 1990er Jahren zunehmend den beruflichen Alltag bei geodätischen Aufgaben, wenn es um die 3D-Erfassung und Modellierung von Objekten und der Topographie geht. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) haben sich als unbemannte Flugsysteme mit Kameras und anderen Sensoren ausgestattet wegen des flexiblen Einsatzes seit vielen Jahren für die Erzeugung von bildbasierten Punktwolken etabliert. Daher stellt sich die Frage, welche Qualität kann bei der Erstellung von bildbasierten Punktwolken aus UAV-Bildflügen erzielt werden? Wesentliche Faktoren für die Genauigkeit bei der Generierung von dichten Punktwolken aus Bilddaten sind die eingesetzte Kamera, die Bildorientierung, der Bildmaßstab und die Bildauflösung, die Farbe, die Textur und das Material des Objektes bzw. der Topographie, die Algorithmen der verwendeten Software zur Erstellung von Punktwolken und die gewählte Punktdichte. Fragestellungen zur Qualität bildbasierter Punktwolken wurden in verschiedenen Publikationen erörtert (Kersten und Lindstaedt 2012, Kersten et al. 2016, d’Oleire-Oltmanns und Lackner 2018, Zhang et al. 2018, Haala et al. 2019), während in Przybilla et al. (2019) erste Ergebnisse zur Qualität von Punktwolken aus Bilddaten einer Mittelformatkamera (Phase One) über dem Testfeld Zeche Zollern vorgestellt wurden.

In diesem Beitrag wird die geometrische Qualität von aus UAV-Bildflügen generierten 3D-Punktwolken untersucht und dargestellt. Dazu werden die punkt-, linien- und flächenhaften Abweichungen der Punktwolken zur Referenz von verschiedenen UAV-Systemen in zwei Testgebieten bestimmt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen für die verwendeten Datensätze vorgestellt und diskutiert.

## 2 Die Untersuchungsgebiete

Für die Untersuchungen von Punktwolken standen Bildflugdaten von verschiedenen UAV-Systemen über der Zeche Zollern in Dortmund sowie der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet, geflogen mit



Die Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet wurde im Jahr 2019 in einem gemeinsamen Projekt des Labors für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg und des Landesbetriebs Geoinformation und Vermessung (LGV) der Freien und Hansestadt Hamburg durch einen UAV-Bildflug erfasst. Die viel befahrene Straßenkreuzung stellt ein eher flaches Gelände mit einer Ausdehnung von  $200 \text{ m} \times 150 \text{ m}$  (ca. 3 ha) dar (Abb. 1 unten).

Die mit weißer Sprühkreide signalisierten Passpunkte ( $8 \times 8 \text{ cm}$ ) der Straßenkreuzung wurden durch geodätische Netzmessungen mit Tachymetern bestimmt. Die durch Netzausgleichung und Feinnivellement bestimmten Passpunkte des LGV liegen einer Genauigkeit von  $\sigma_{XYZ} < 10 \text{ mm}$  vor. Zusätzlich wurden weitere Passpunkte mittels freier Stationierung mit einer Genauigkeit von  $\sigma_{XYZ} = 2 \text{ mm}$  hinzugefügt. Für die Aerotriangulation wurden die Passpunkte mit einer Standardabweichung von  $\sigma_{XYZ} = 5 \text{ mm}$  gewichtet.

### 3 Die eingesetzten UAV-Systeme

Für die Bildflüge und Untersuchungen der Punktwolken vom UAV-Testfeld wurden folgende Systeme in den Kampagnen im Oktober 2017 und November 2018 eingesetzt (Abb. 3 auf S. 125 in Kersten et al. 2020):

- DJI Phantom 4 Pro mit Zenmuse X4S,
- DJI Inspire 2 mit Zenmuse X5S ( $c = 15 \text{ mm}$ ),
- DJI Inspire 2 mit Zenmuse X5S (modifizierte Optik mit  $c = 24 \text{ mm}$ ),
- DJI Inspire 2 mit Zenmuse X4S) und
- der Starr- bzw. Flächenflügler senseFly ebee (S.O.D.A. Kamera).

Die wichtigen technischen Daten der UAV-Systeme und der dazugehörigen wichtigsten Bildflugparameter sind in Kersten et al. (2020) in der Tab. 1 (S. 125) zusammengefasst. Zusätzlich wurden die mit einer Mittelformatkamera des Herstellers Phase One (IXU 1000) (Phase One 2019) im Oktober 2017 aufgenommenen Daten analysiert. Der Sensor verfügt über 100 MPixel und wurde auf einer Trägerplattform der Firma Coptersystems (2019) eingesetzt. Die technischen Daten der Phase One sind in Przybilla et al. (2019) beschrieben. Alle Bildflüge mit den oben aufgeführten UAV-Systemen wurden in einer Kreuzanordnung mit unterschiedlicher Flughöhe quer zum 1. Flug durchgeführt, wobei die Flughöhe jeweils um 20 % von den Normalanordnungen abweicht. Die Durchführung der Kreuzbefliegung als separate Flüge hat ihren wesentlichen Grund in der Tatsache, dass die verfügbaren Bildflug-Planungstools (z. B. Map Pilot, Pix4DCapture) eine Kreuzbefliegung mit variierender Flughöhe nicht zulassen. Eine ausführliche Beschreibung der geodätischen Passpunktbestimmung ist in

Przybilla et al. (2018) und in Bäumker (2020) publiziert. Die Genauigkeiten für die Passpunkte wurden mit 5 mm in Lage und Höhe angenommen.

Der Bildflug der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet erfolgte am 28.4.2019 mit der DJI Phantom 4 Pro in einer Kreuzbefliegung (ca. 33 m bzw. 50 m über Grund) unter guten Wetter- und Sichtbedingungen. Insgesamt wurden 1013 Fotos trianguliert und für die Erzeugung der Punktwolken verwendet.

## 4 Die eingesetzten photogrammetrischen Softwarepakete

Für die Durchführung der Aerotriangulationen aller Bildflüge des UAV-Testfeldes und für die Generierung dichter Punktwolken wurden die Softwarepakete Agisoft PhotoScan 1.4.4 und Pix4Dmapper 4.2.27 eingesetzt. Die Straßenkreuzung in Hamburg wurden dagegen mit Agisoft Metashape Professional Version 1.5.1 ausgewertet. Die Software von Agisoft und Pix4D wird in diesem Tagungsband auf Seite 127 in Kersten et al. (2020) kurz vorgestellt.

## 5 Untersuchungsergebnisse

Die in den Berechnungen erzeugten dichten Punktwolken bilden die Grundlage der Untersuchungen. Die verfügbaren Passpunkte werden als Kontrollpunkte verwendet, um punktuelle Abweichungen zu den dichten Punktwolken zu ermitteln. Nachfolgend werden über Profilverläufe linienhafte Vergleiche der Punktwolken vorgenommen. Abschließend erfolgen Vergleiche der verschiedenen Punktwolken über ausgewählte Flächen der Zeche Zollern, die variierende Oberflächenstrukturen repräsentieren. Als Referenzdaten wurden hierfür Punktwolken durch terrestrisches Laserscanning erstellt.

### 5.1 Punktuelle Vergleiche durch Kontrollpunkte

Für die punktuellen Vergleiche wird der kürzeste Abstand (in vertikaler Richtung) zwischen den Kontrollpunkten (CP) und der dichten Punktwolke berechnet. Die Verteilung der Kontrollpunkte ist für beide Untersuchungsgebiete in [Abb. 1](#) dargestellt. Die [Tab. 1](#) fasst die mittleren, maximalen (positiven) und minimalen (negativen) Abweichungen (DZ in mm) in den Punktwolken der verschiedenen UAV-Systeme zu den 45 Kontrollpunkten auf dem Testgebiet der Zeche Zollern zusammen. Die dichten Punktwolken wurde in PhotoScan mit der Auflösung „medium“ und dem Filter „aggressive“ aus den Bilddaten der

**Tab. 1: Vertikale Abweichungen ( $\Delta Z$  in mm) zwischen den 45 Kontrollpunkten (Zeche Zollern) und dichter Punktwolke (Kreuzbefliegung) der fünf verschiedenen UAV-Systeme**

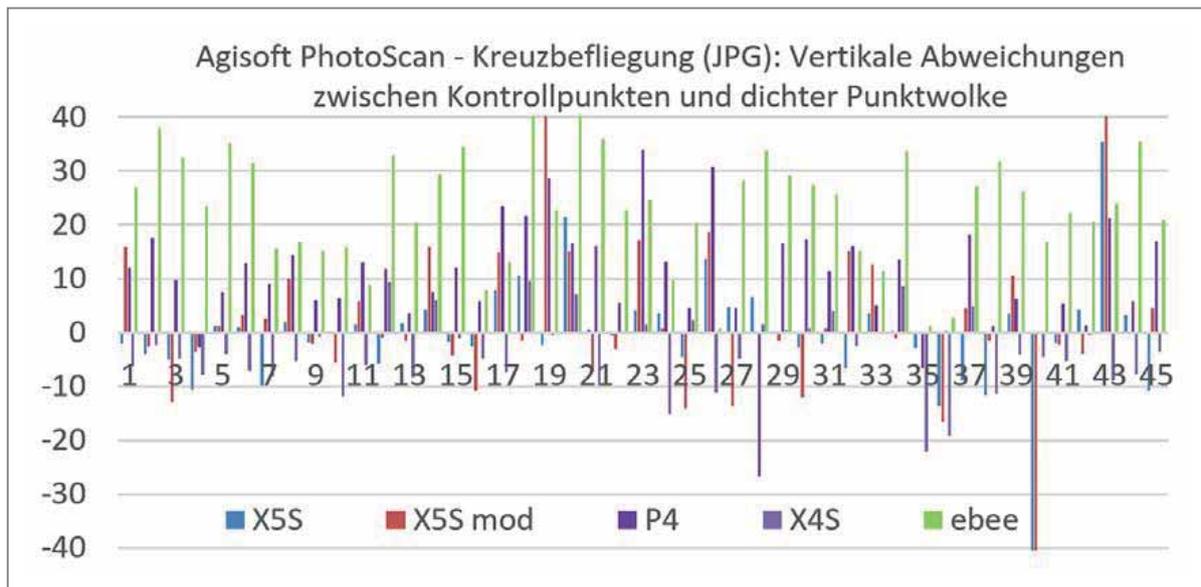
Software	PhotoScan					Pix4Dmapper				
UAV	X5S 15	X5S 24	P4	X4S	SODA	X5S 15	X5S 24	P4	X4S	SODA
Mittelwert	-0,9	1,8	10,4	-3,6	23,9	-3,5	0,7	-2,6	-11,9	3,3
Max	35,4	52,5	34,0	9,6	61,4	29,4	35,5	17,8	16,1	25,7
Min	-64,5	-62,0	-26,8	-22,1	0,8	-24,3	-29,3	-14,7	-32,7	-23,2

Kreuzbefliegung des jeweiligen UAV-Systems erzeugt, während in Pix4Dmapper die Einstellung „half image size“ verwendet wurde. Die Einstellungsmöglichkeiten für die Auflösung und die Filter bei der Berechnung einer dichten Punktwolke mit PhotoScan/Metashape und Pix4Dmapper beschreiben Przybilla et al. (2019) ausführlich.

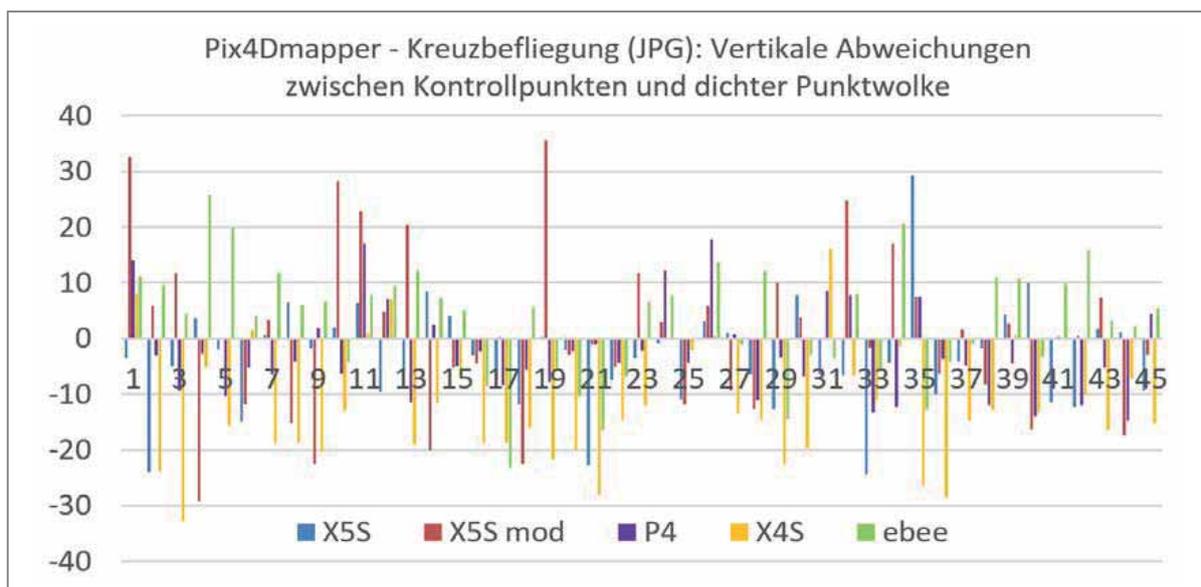
Beide Softwarepakete PhotoScan und Pix4Dmapper zeigen unterschiedliche Ergebnisse, was auch in den [Abb. 2](#) und in [Abb. 3](#) deutlich wird. Das beste Ergebnis erreicht die DJI Phantom 4 Pro mit der Software Pix4Dmapper, da sowohl der Mittelwert, als auch die beiden Werte Min und Max im Vergleich zu den anderen gering sind. Die hohen Mittelwerte bei der Phantom 4 Pro und senseFly ebee S. O.D.A in PhotoScan und bei der Inspire 2 X4S in Pix4Dmapper deuten auf systematische Abweichungen an den Kontrollpunkten hin, was in der [Abb. 2](#) und [Abb. 3](#) auch bestätigt wird. Interessant ist dabei allerdings, dass diese systematischen Abweichungen jeweils nur mit einem der beiden Softwarepakete auftreten. Weitere Untersuchungsergebnisse zu den punktuellen Vergleichen hinsichtlich Bildflughangordnung (Regular vs. Regular & Cross) und Bildformat (JPG vs. TIFF) sind in Schlömer (2019) zusammengefasst. Bei den Untersuchungen zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen mit den TIFF- und JPG-Bilddaten, allerdings bringt die Kreuzanordnung bei den Bildflügen eine Verbesserung der Ergebnisse, d. h. die Abweichungen zwischen Punktwolken und Kontrollpunkten sind meistens etwas geringer.

Bei der hochauflösenden Mittelformatkamera Phase One streuen die vertikalen Abweichungen der PhotoScan-Punktwolke etwas mehr als die entsprechenden Abweichungen aus der Pix4Dmapper-Punktwolke für die UAV-Bildflüge über die Zeche Zollern ([Abb. 4](#)). Im Mittel liegt sie in PhotoScan bei einem Wert von 0 mm. Die Punktwolke aus den Berechnungen mit Pix4Dmapper zeigt eine systematische negative Abweichung, d. h. die entsprechende Punktwolke liegt im Mittel ca. 10 mm oberhalb des Kontrollpunkthöhenlevels. Dieser Wert entspricht ca. 2/3 der in den Flügen definierten Bodenauflösung (GSD) von 14 mm.

Die Berechnung einer dichten Punktwolke wurde für das gesamte Aufnahmegebiet der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet in Agisoft Metashape mit der Auflösung Medium (Filter: mild) ausgeführt. Für die dichte Punktwolke wurden 63,9 Mio. Punkte berechnet. Das Ergebnis der Abweichungen in der Z-Koordinate (DZ) der Kontrollpunkte zur dichten Punktwolke ist in [Abb. 5](#) dargestellt. Ein Kontrollpunkt wurde wegen seiner hohen Abweichung von 7,1 cm als grober Fehler aussortiert. Die überwiegend



**Abb. 2:** Vertikale Abweichungen [mm] zwischen den 45 Kontrollpunkten und den dichten Punktwolken aus PhotoScan für die fünf verschiedenen UAV-Systeme



**Abb. 3:** Vertikale Abweichungen [mm] zwischen den 45 Kontrollpunkten und den dichten Punktwolken aus Pix4Dmapper für die fünf verschiedenen UAV-Systeme

negativen Abweichungen zeigen, dass die dichte Punktwolke im Durchschnitt 5,5 mm und maximal 27,6 mm über den Kontrollpunkten (Referenz) liegt, wobei hier die untersuchten Punkte im offenen, ebenen Gelände liegen. Die Pixelauflösung am Boden (GSD) liegt in den Bilddaten je nach Flughöhe zwischen 9,0 mm und 13,6 mm, so dass der durchschnittliche Wert der Höhenabweichungen an den Kontrollpunkten einer GSD niedriger als 0,5 Pixel entspricht.

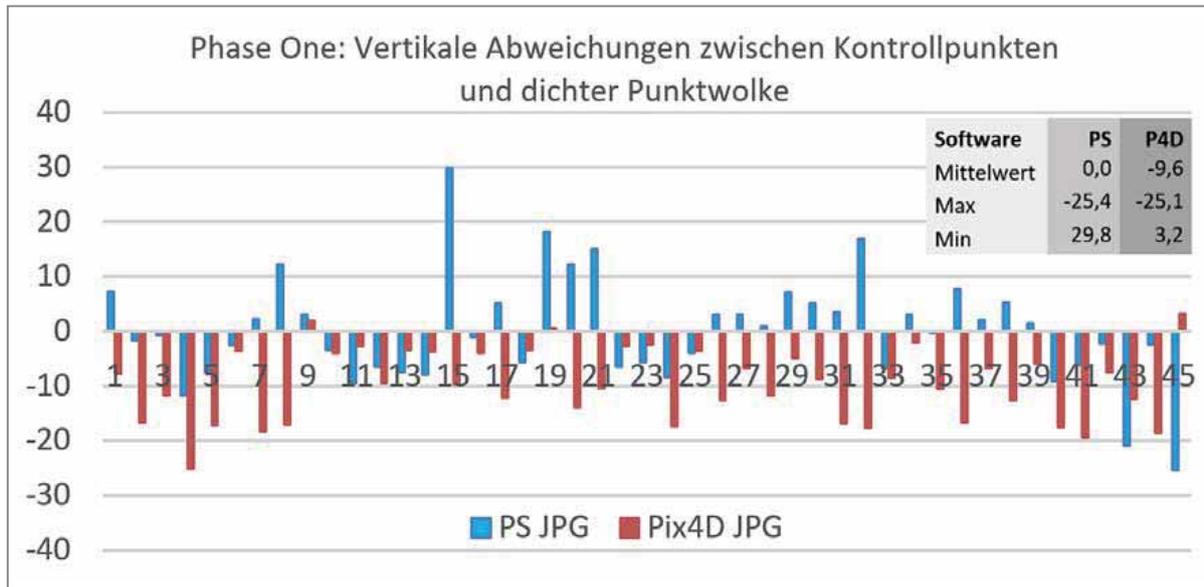


Abb. 4: Abweichungen [mm] in der Z-Koordinate der 45 Kontrollpunkte in den dichten Punktwolken aus PhotoScan (blau) und Pix4Dmapper (rot) für den UAV-Bildflug mit der Phase One

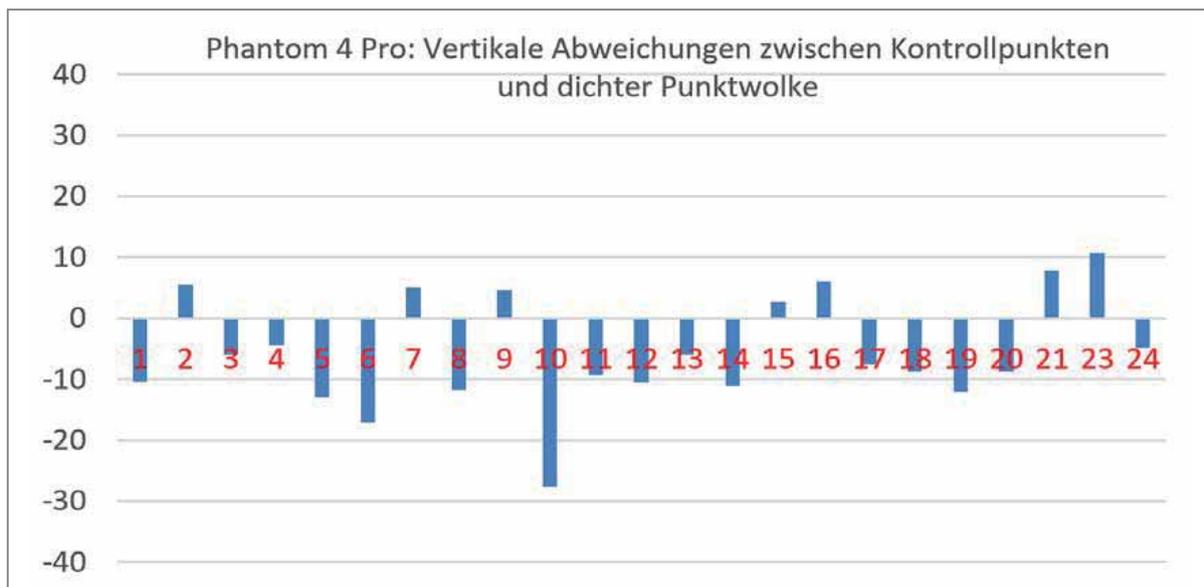


Abb. 5: Abweichungen [mm] in der Z-Koordinate an 23 Kontrollpunkten in der dichten Punktwolke aus Metashape für den UAV-Bildflug über der Straßenkreuzung mit der DJI Phantom 4 Pro

## 5.2 Linienhafte Vergleiche anhand von Profilen

In den linienhaften Vergleichen zwischen Profilen aus den Punktwolken und TLS-Referenzdaten wurden für die Zeche Zollern Objektbereiche mit charakteristischen Merkmalen einbezogen (Abb. 6), u. a. Gleiskörper, Straßenbordsteine, Treppen und Dachstrukturen. Für die Straßenkreuzung Halskestraße standen nur Referenzdaten der tachymetrischen Auswertung zur Verfügung. Im Folgenden werden die Ergebnisse eines Gleisprofils (Zeche Zollern) und die Straßenprofile (Straßenkreuzung) vorgestellt. Die Ergebnisse aller weiteren Profile der Zeche Zollern (Abb. 6 links) sind in Przybilla et al. (2019) zusammengestellt.

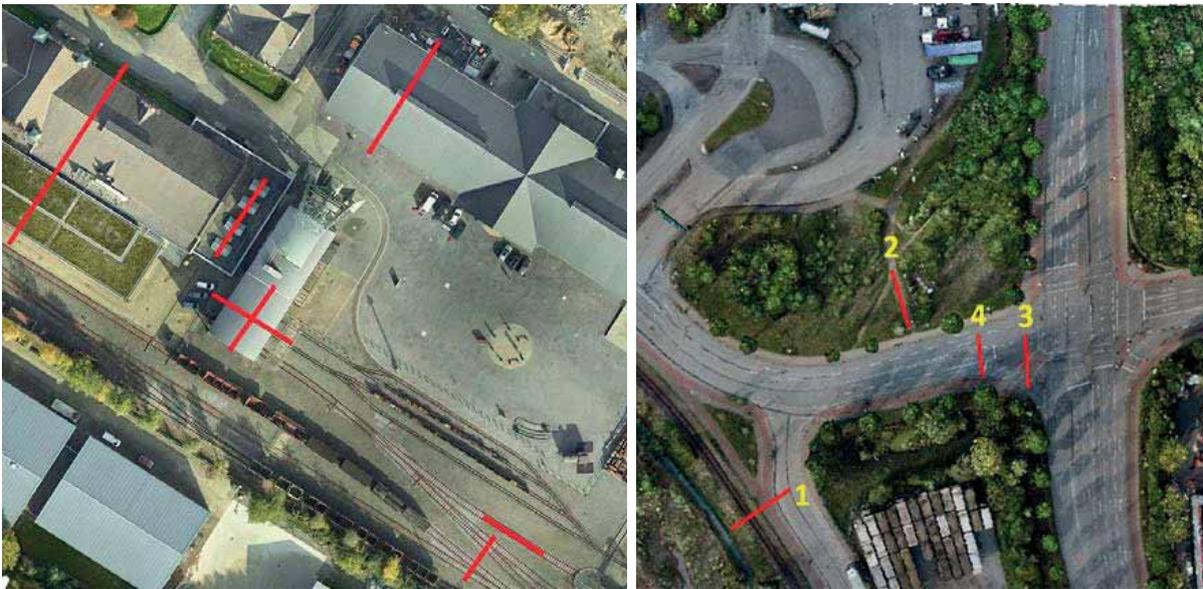


Abb. 6: Verteilung der Profile in der Zeche Zollern (links) und im Testgebiet der Straßenkreuzung (rechts)

Die Qualität der Punktwolken wurde anhand eines Profils quer zu den Gleisen auf der Zeche Zollern visuell analysiert (Abb. 7). Um einen Vergleich der Punktwolken aus beiden Software-Paketen zu ermöglichen, wurden die Qualitätsparameter bei der Erstellung so gewählt, dass sich vergleichbar große Punktwolken ergaben. In Abb. 7 sind die Gleisprofile in der Querrichtung in der Punktwolke von Pix4Dmapper (pink) und PhotoScan (grün) dargestellt. Eine deutliche Glättung des Profils ist in dem grünen Profil (PhotoScan) erkennbar, während im Pix4Dmapper-Profil (in Pink) die Gleisstrukturen signifikanter rekonstruiert wurden.

Die in Abb. 7 und Abb. 8 dargestellten Querprofile zeigen eine deutliche Glättung der PhotoScan-Profile. Die Profile aus Pix4Dmapper sind zwar bezüglich der Schienenstränge grundsätzlich formtreuer, streuen jedoch erkennbar mehr. Auslöser hierfür ist wahrscheinlich der aktivierte Parameter „Multiscale“. Diese Option ist zu deaktivieren, wenn viel Rauschen in der Punktwolke sichtbar ist

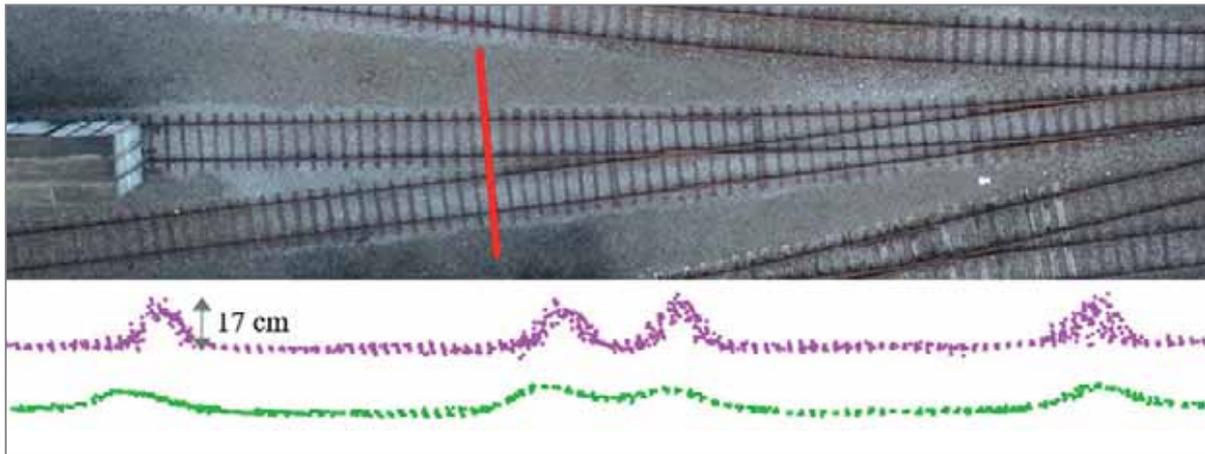


Abb. 7: Darstellung der Profile der beiden Punktwolken quer zur Gleisachse – Profilposition im Foto (oben), Punktwolkenprofile (unten): Pix4Dmapper JPG (pink) und PhotoScan JPG (grün)

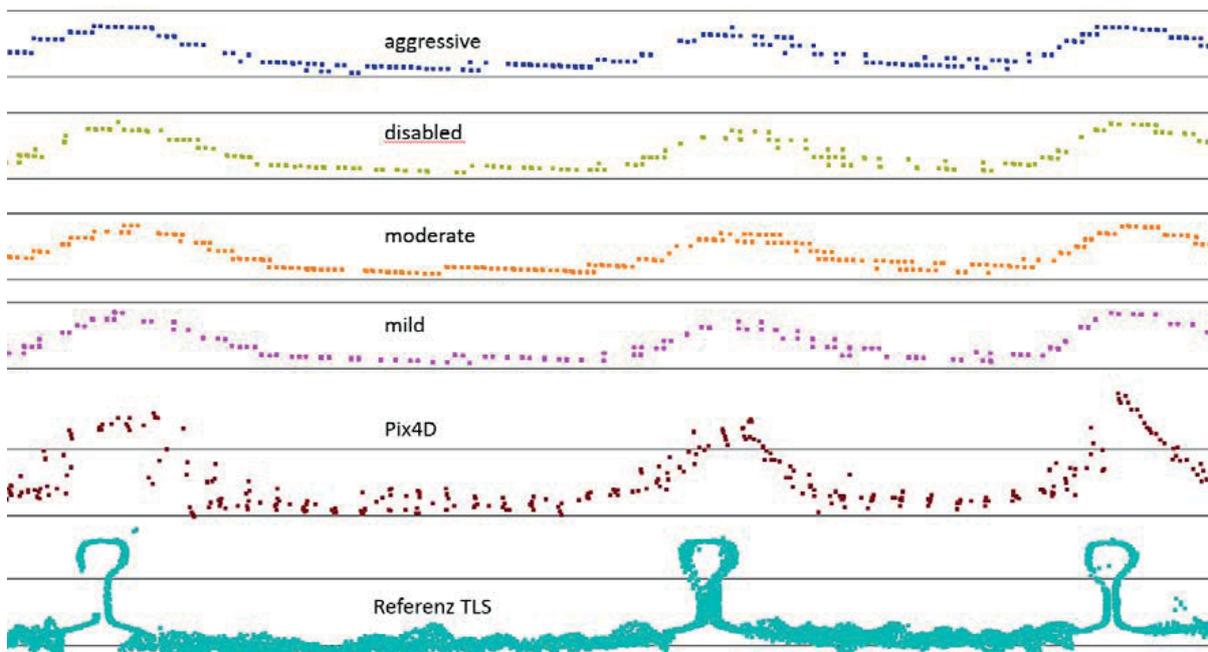


Abb. 8: In PhotoScan erstellte Profile wie in Abb. 7, jedoch unter Verwendung verschiedener Filterfaktoren, im Vergleich zum Profil aus Pix4Dmapper (braun) und zur TLS-Referenz

und Artefakte in 3D-Texturnetzen, dem Oberflächenmodell oder dem Orthomosaik vorhanden sind (Pix4D 2019). Die Angaben des Herstellers zur Wirkungsweise dieses Parameters sind leider wenig konkret.

Das vorliegende Ergebnis wirft die Frage auf, ob in PhotoScan mit anderen Filtereinstellungen der Gleiskörper ähnlich deutlich wie in Pix4D abzubilden ist. Daher wurde ein Gleisabschnitt mit allen vier verfügbaren Filtermöglichkeiten aus PhotoScan mit dem Ergebnis aus Pix4D verglichen. Interessanterweise ergab sich für den Gleiskörper bzw. dessen Oberflächenstruktur keinerlei Unterschied in Abhängigkeit von den verschiedenen Filterstufen (Abb. 8). Daraufhin wurde

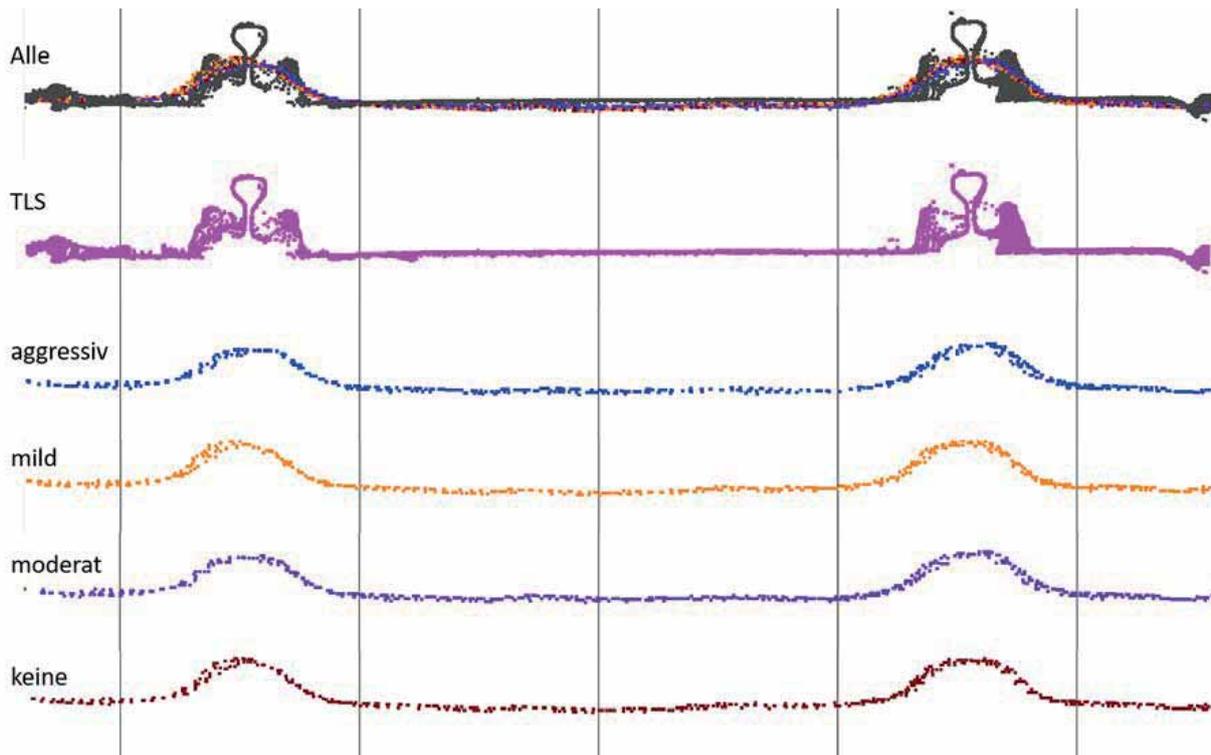


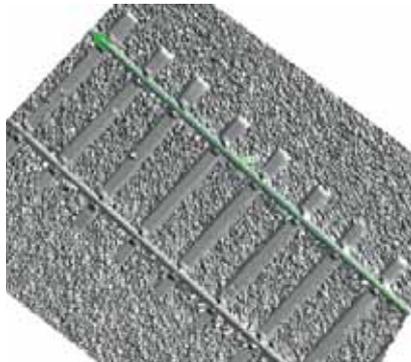
Abb. 9: Aus PhotoScan abgeleitete Querprofile (Phase One, Punktdichte Ultra high) für das Gleis unter Verwendung der verfügbaren Filterfaktoren im Vergleich zur TLS-Referenz (pink)

eine Punktwolke mit der höchstmöglichen Auflösung Ultra high von einem anderen Gleisprofil untersucht, in dem die Ergebnisse der drei höchsten Filterungsstufen (moderat, mild, und aggressiv) gegenübergestellt wurden. Abb. 9 zeigt, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Filterstufen und dem ungefilterten Punktwolkenprofil zu sehen sind. Im Vergleich zur Referenz (Profil in Pink, Abb. 9) sind auch diese Profile deutlich geglättet.

Für die Abweichungen in Tab. 2 wurde die Gleisachse manuell in die Punktwolke gelegt und die Höhe wurde mit der Achse aus der TLS-Punktwolke verglichen. Die Punktwolken wurden in PhotoScan mit den Auflösungen Ultra high und High erstellt, wobei sie zusätzlich den verschiedenen Filterungen von mild bis aggressiv unterzogen wurden. Das Ergebnis zeigt, je stärker die Filterung erfolgt, desto größer ist die Abweichung in der Höhe (DZ) zur Referenz. Ohne Filterung ist die Abweichung der Z-Koordinate in der dichten Punktwolke Ultra high zur TLS-Punktwolke nur bei 2,9 cm, während die Filterung aggressiv eine hohe Abweichung von 12,5 cm verursacht, die auf eine Glättung der Punktwolke durch die Filterung zurückzuführen ist.

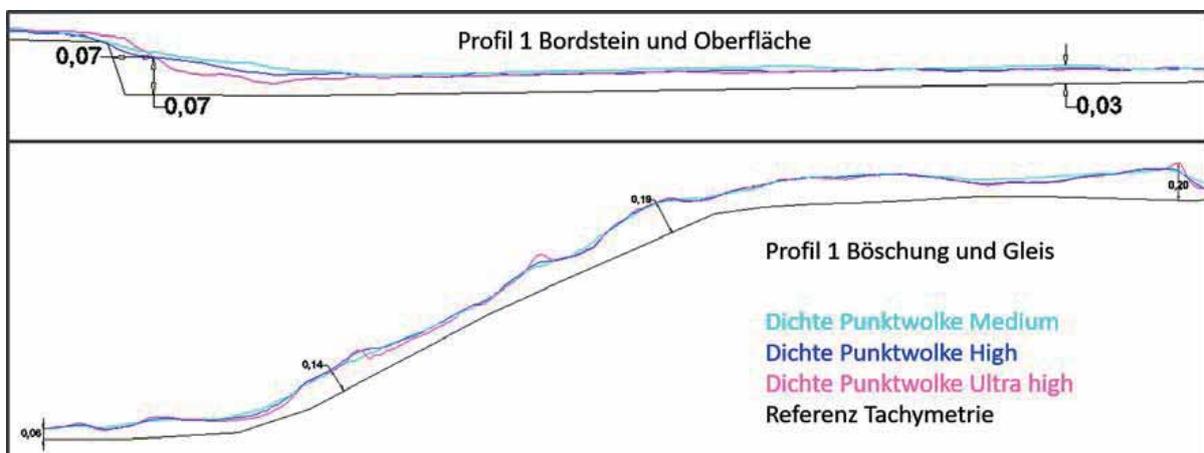
Nach den Erfahrungen von Dewez et al. (2016) bietet eine höhere Auflösung der berechneten, dichten Punktwolke eine bessere Kantentreue oder auch einen höheren Detaillierungsgrad. Selbst der signifikant höhere Rechenaufwand wird akzeptiert, da eine Interpretation der Daten und die Messungen in der Punktwolke nur mit einer sehr hohen Auflösung präzise erfolgen können. Doch die

**Tab. 2:** Vertikale Abweichungen (cm) am Schienenstrang (Zeche Zollern) für die Photo-Scan-Punktwolken *Ultra high* und *High* mit verschiedenen Filtern im Vergleich zur TLS-Referenz



		Gleishöhe [m]	$\Delta Z$ [cm]
	TLS-Referenzhöhe	123,285	0,0
Punktwolke Ultra high	Filter Aggressiv	123,160	12,5
	Filter Moderat	123,201	8,4
	Filter Mild	123,250	3,5
	Filter Kein	123,256	2,9
Punktwolke High	Filter Aggressiv	123,175	11,5
	Filter Moderat	123,184	10,1
	Filter Mild	123,204	8,1

in [Abb. 10](#) und [Abb. 11](#) dargestellten Profile, generiert aus den verschiedenen Auflösungen *Ultra high*, *High* und *Medium* (Filtereinstellung jeweils „Aggressiv“), zeigen im Testgebiet Straßenkreuzung im Vergleich zur Referenz (tachymetrische Aufnahme) deutliche Glättungseffekte an Kanten und oftmals systematische Abstände von 1 bis 20 cm. Die Metashape-Punktwolken mit der Auflösung *Ultra high* passen sich etwas besser an die Topographie an, aber die Verbesserung ist nicht so signifikant, dass die Kanten daraus eindeutig bestimmt werden können. Generell liegen die Punktwolken in der Höhe über den Referenzdaten aus der tachymetrischen Vermessung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Auswertung der tachymetrischen Vermessung zu einer Generalisierung der Geländetopographie geführt hat, so dass die Abweichungen im offenen Gelände zu



**Abb. 10:** In Metashape erstelltes Profil 1 aus verschiedenen dichten Punktwolken der Phantom 4 Pro im Testgebiet Straßenkreuzung im Vergleich zur Referenz (schwarz)

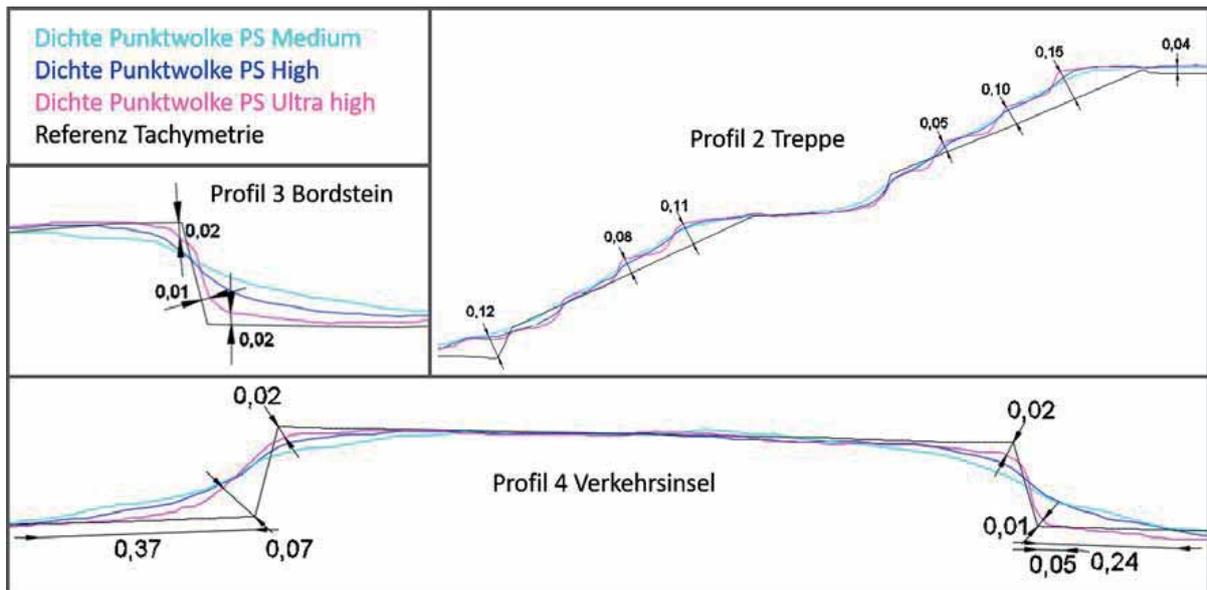


Abb. 11: In Metashape erstellte Profile 2 bis 4 aus verschiedenen dichten Punktwolken der Phantom 4 Pro im Testgebiet Straßenkreuzung im Vergleich zur Referenz (schwarz)

einem Teil darauf zurückzuführen sind. Umfangreiche Untersuchungen mit weiteren Profilen vom Testgebiet Straßenkreuzung beschreibt Grahlmann (2019).

### 5.3 Flächenhafte Vergleiche der Punktwolken mit einer Referenz

Für die flächenhaften Vergleiche verschiedener Punktwolken mit der Referenz wurden nur die UAV-Bilddaten der Zeche Zollern herangezogen, da nur von diesem Gebiet flächenhafte Vergleichsdaten vorlagen. Untersucht wurden die Bildflüge der verschiedenen UAV-Systeme mit der Kreuzbefliegung im JPG-Bildformat. Die dichten Punktwolken wurden sowohl in PhotoScan (Medium) als auch in Pix4Dmapper mit der gleichen Auflösung bzw. Punktdichte erstellt. Die Testobjekte für die flächenhaften 3D-Vergleiche sind in Abb. 12 dargestellt. Die ausgewählten Bereiche repräsentieren Flächen mit variierenden Oberflächenstrukturen: Rampe (Beton), Gleisbett und Pflastersteine. Bei der gepflasterten



Abb. 12: Flächenhafte Testobjekte der Zeche Zollern im Überblick (links, gelb umrandet) und als Detailansicht (v.l.n.r.): Rampe (Beton) – Gleiskörper – Pflastersteine

Fläche mit dem Übergang zu einer betonierten Fläche wurden Bänke sowie Aufsteller aus der Punktwolke entfernt. Als Referenzdaten stehen für die drei Testgebiete Punktwolken durch terrestrisches Laserscanning mit dem Z+F IMAGER 5010C zur Verfügung.

In den Abb. 13 bis 17 werden die farbkodierten Abweichungen aus dem in Geomagic Control gerechneten 3D-Vergleich zwischen Testdatensatz der jeweiligen UAV-Systeme und Referenz visualisiert. Im oberen Teil jeder Abbildung sind die Ergebnisse von PhotoScan und im unteren Teil die von Pix4Dmapper dargestellt. Die farbkodierte Skala zeigt die Abweichungen im Bereich  $\pm 5$  mm grün an, während das positive Maximum mit +35 mm rot und das negative Minimum mit -35 mm blau dargestellt wird. Durch die farbkodierte Visualisierung der Abweichungen lassen sich Systematiken im Ergebnis erkennen.

In Abb. 13 sind die Ergebnisse der 3D-Vergleiche der DJI Inspire 2 X5S (15 mm Objektiv) für die drei Testgebiete dokumentiert. Sieht man in den durch PhotoScan erstellten Punktwolken besonders deutlich die Abweichungen an den Kanten bzw. Gleisen, so erkennt man dagegen in den Pix4Dmapper-Daten starke systematische flächenhafte Abweichungen, da große Teile der Punktwolke im Gleisbereich und beim Pflaster über der Referenz liegen.

Die Ergebnisse der 3D-Vergleiche für das UAV-System Inspire 2 X5S mod sind in Abb. 14 wiedergegeben. Die Abweichungen der mit PhotoScan generierten

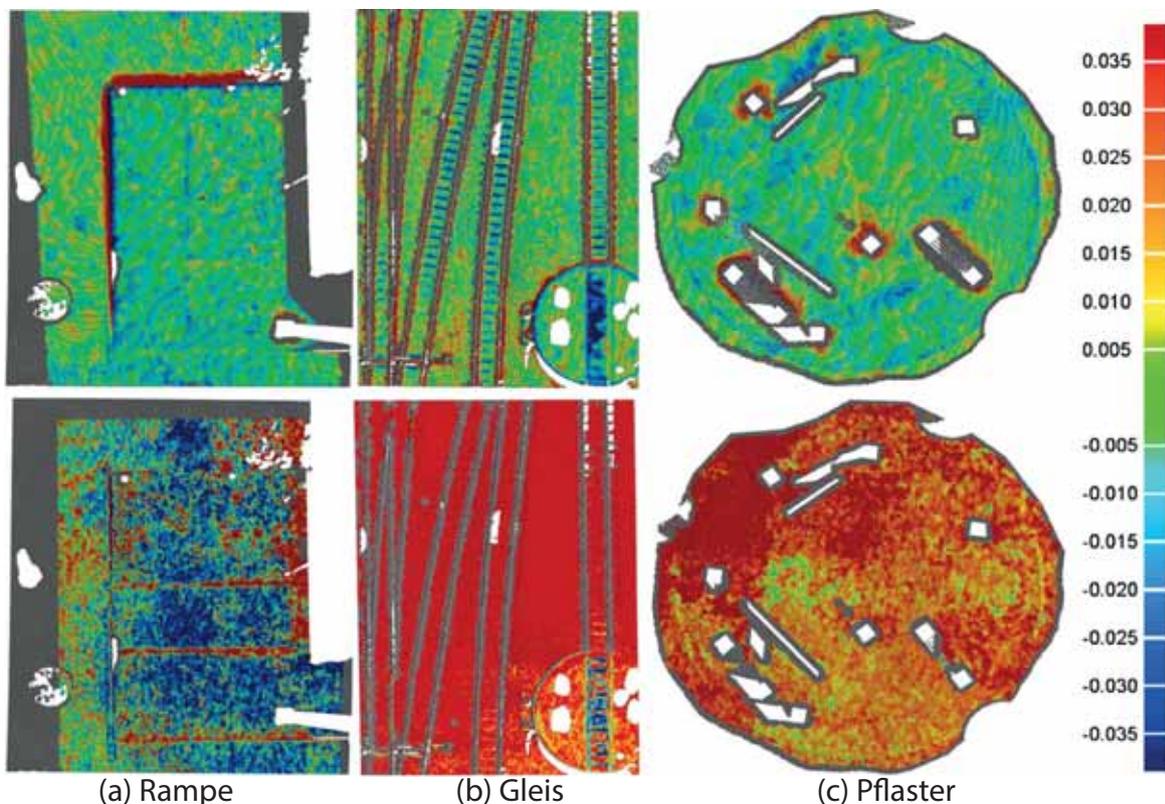


Abb. 13: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems Inspire 2 X5S zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

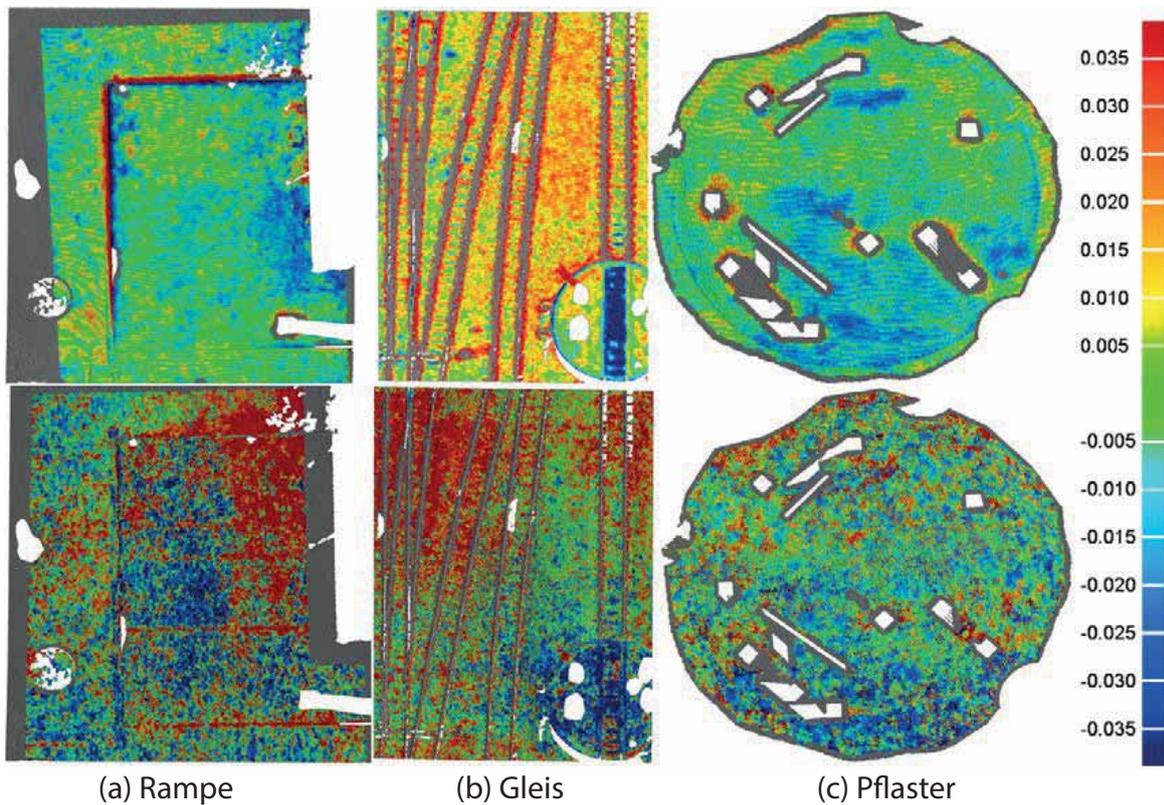


Abb. 14: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems Inspire 2 X5S mod zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

Punktwolken zeigen unterschiedliches Verhalten. Bei der Rampe haben die Kanten erwartungsgemäß die höchsten Abweichungen, während beim Gleis die Punktwolke insgesamt systematisch etwas zu hoch liegt. Die Punktwolken der Inspire 2 X5S mod aus Pix4Dmapper stellen neben den Ergebnissen der X5S die schlechtesten Ergebnisse im Vergleich mit anderen Punktwolken dar. Es gibt keine Verschiebung in eine Richtung, aber die Punktwolke selbst unterliegt einem sehr starken Rauschen. Diese schlechten Ergebnisse können vermutlich auf die jeweils längere Brennweite im Vergleich zu den anderen Systemen und ggf. auf eine unzureichende Kalibrierung der Kamerakonstante in Pix4Dmapper zurückzuführen sein.

Die beiden UAV-Systeme Phantom 4 Pro und Inspire 2, jeweils mit der Kamera Zenmuse X4S, erreichen beim flächenhaften Vergleich mit beiden Softwarepaketen insgesamt die besten Ergebnisse (Abb. 15 und Abb. 16). Die Punktwolken der Phantom 4 Pro sind mit PhotoScan tendenziell eher zu tief, während sie mit Pix4Dmapper leicht zu hoch im Vergleich zur Referenz sind, die Punktwolken aus Pix4Dmapper weisen insgesamt noch etwas geringere Abweichungen auf. Die Punktwolken aus PhotoScan zeigen generell höhere Abweichungen an den Kanten als die aus Pix4Dmapper, nicht nur bei der X4S.

Große systematische Abweichungen liefern die Punktwolken der senseFly S.O.D.A. Sowohl die Punktwolken aus PhotoScan als auch aus Pix4Dmapper

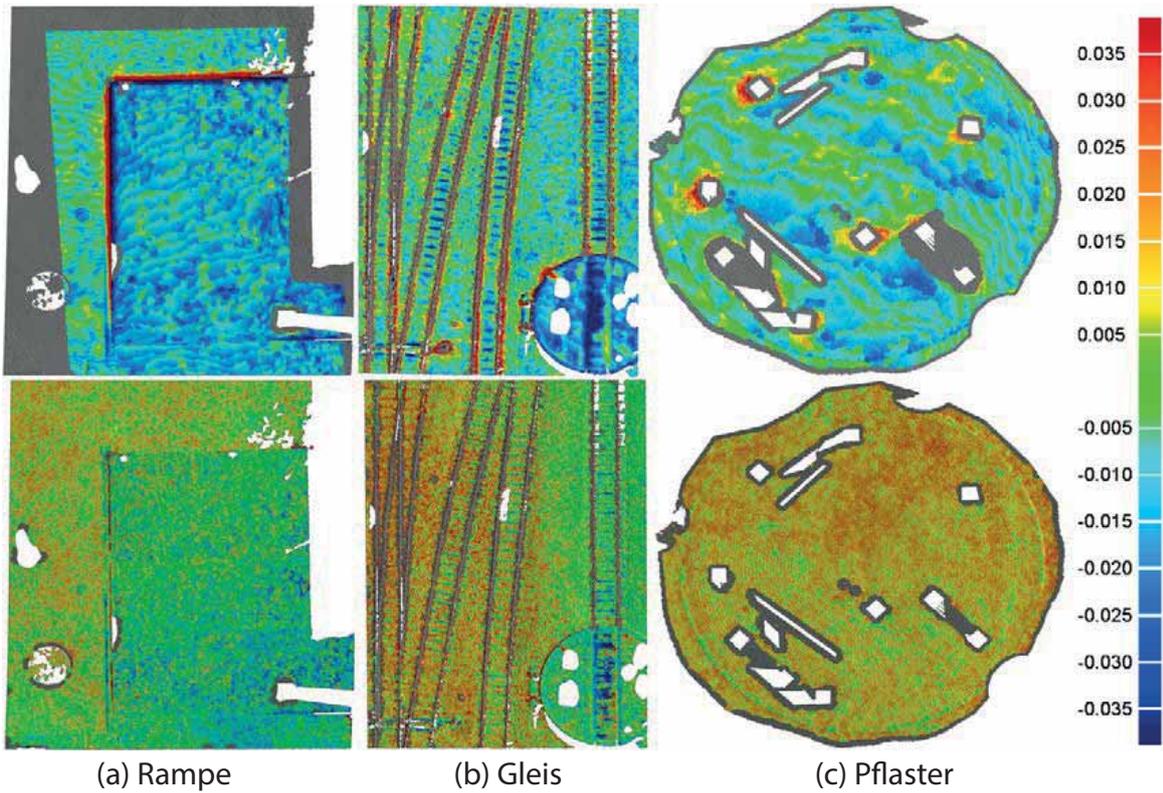


Abb. 15: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems Phantom 4 Pro zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

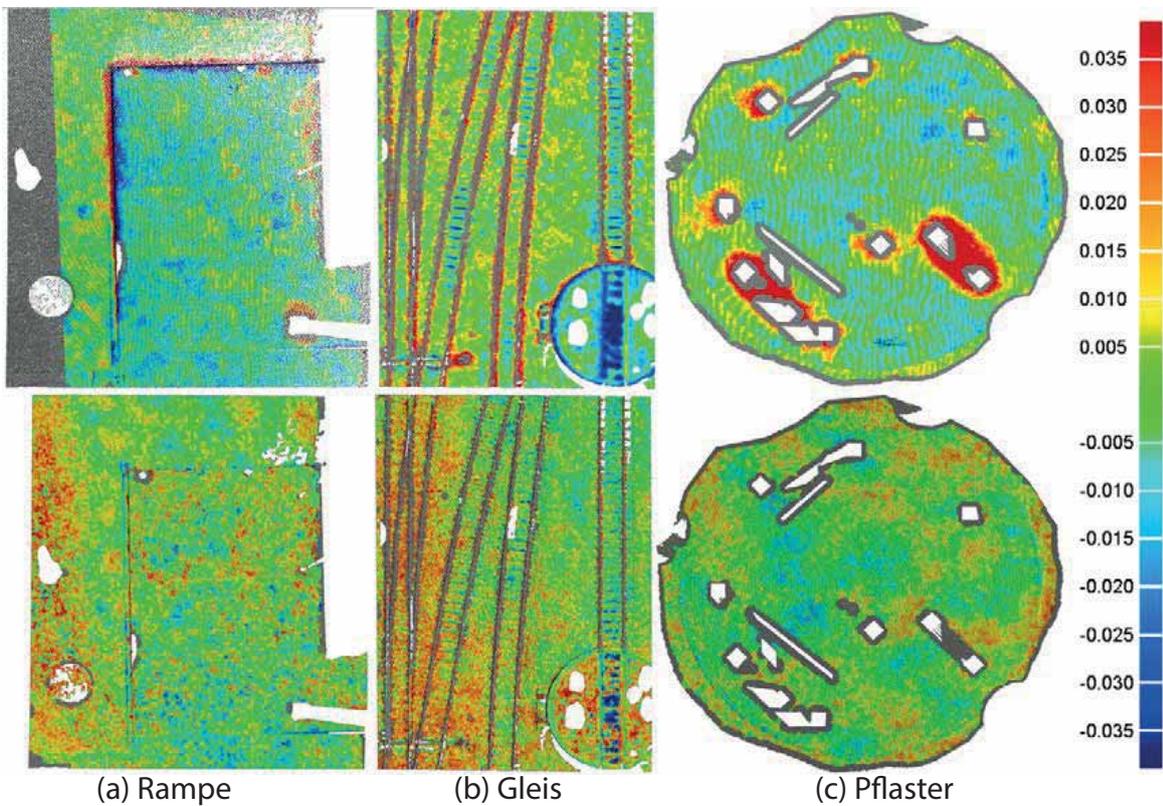


Abb. 16: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems Inspire 2 X4S zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

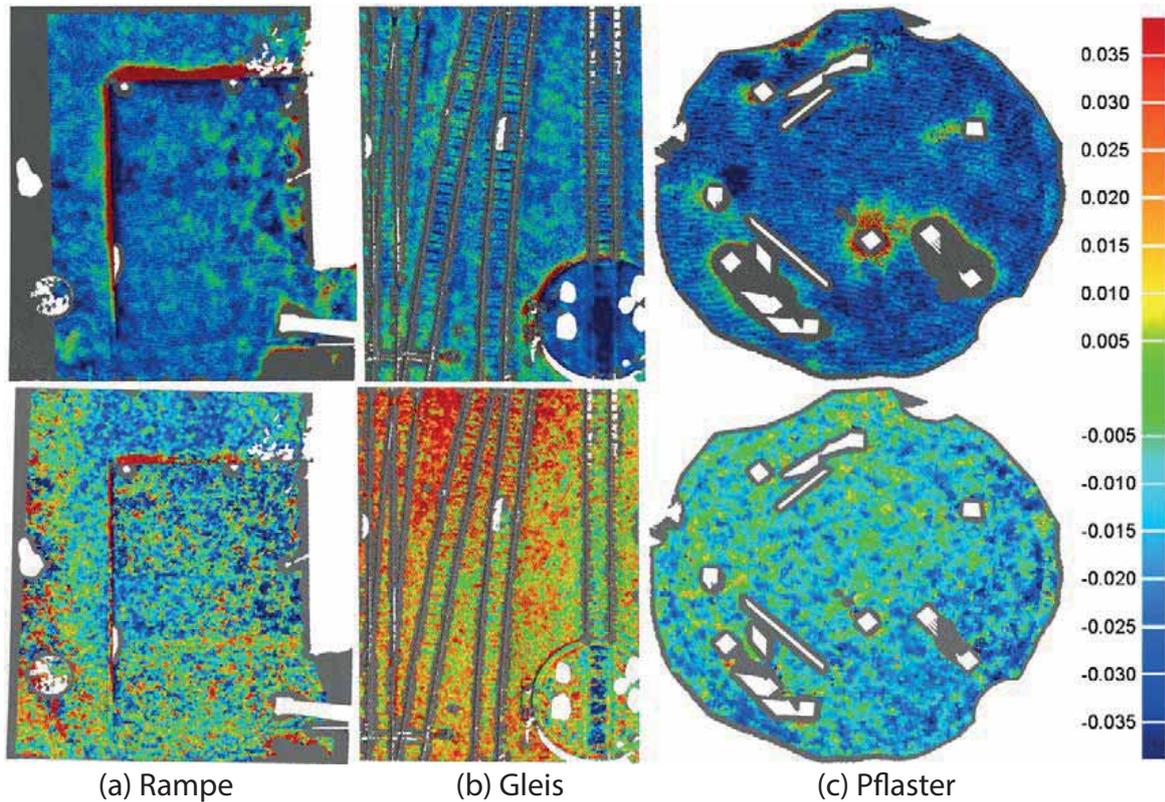


Abb. 17: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems senseFly S.O.D.A. zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

liegen deutlich zu tief, eine Ausnahme stellt der Gleisbereich aus Pix4Dmapper dar (Abb. 17 unten).

Die Punktwolken der Inspire 2 X5S und X5S\_mod weisen im Vergleich zu den anderen Systemen signifikant schlechtere Qualität der Punktwolken in Pix4Dmapper auf, während die Punktwolken mit PhotoScan andererseits im Vergleich zu den UAV-Systemen Phantom 4 Pro und Inspire X4S nicht abfallen. Insgesamt bereitete das Gleisbett den Punktwolken aller UAV-Systeme in beiden Softwarepaketen größere Probleme, da die Abweichungen zur Referenz in diesem Testgebiet im Vergleich zur Rampe und zum Pflaster am größten sind.

In diesem Zusammenhang muss auch die Tab. 3 betrachtet werden. Für diese Tabelle wurden vier Genauigkeitsklassen erstellt, die die prozentualen Anteile der Punkte in den vier Genauigkeitsklassen numerisch zusammenfassen. Zur besseren visuellen Veranschaulichung wurden die prozentualen Anteile der Punkte in den vier Genauigkeitsklassen für die Testgebiete Rampe (oben), Gleis (Mitte) und Pflaster (unten) und den fünf UAV-Systemen in Abb. 18 grafisch dargestellt.

Es konnte aber auch demonstriert werden, dass die signifikant höhere Auflösung der Phase One (100 MPixel) für dieselben Testgebiete der Zeche Zollern bessere Ergebnisse beim 3D-Vergleich nachweist (siehe Abb. 19 und Przybilla et al. 2019). Rechnet man zudem in Geomagic Control einen 3D-Vergleich

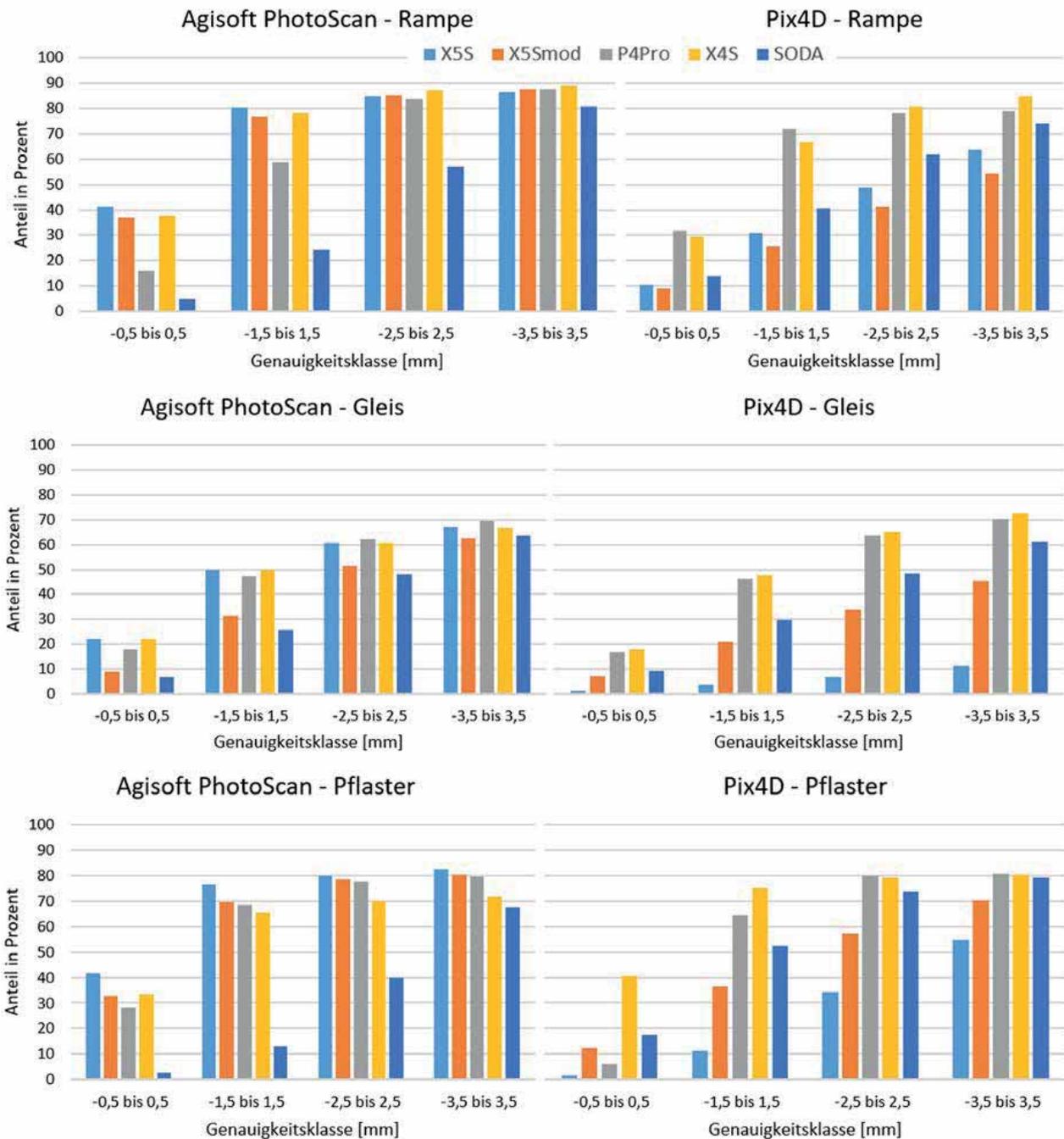


Abb. 18: Anteil [%] der Punkte in einer Genauigkeitsklasse [mm] für die Testgebiete Rampe (oben), Gleis (Mitte) und Pflaster (unten) – Agisoft PhotoScan (links) und Pix4Dmapper (rechts) im Vergleich (Werte aus Tab. 3)

zwischen den in PhotoScan verschieden gefilterten Punktwolken in der Auflösung Ultra high und der Referenz TLS, dann liegen die Abweichungen zwischen der jeweiligen Punktwolke und der Referenz für die Rampe aus Beton in der ebenen Fläche im Bereich von  $\pm 5$  mm (grün), während die Abweichungen an den Kanten bei allen gefilterten Punktwolken praktisch identisch sind (Abb. 19). Während die Abweichungen von  $\pm 5$  mm in der Fläche zwischen bildbasierter Punktwolke und der Referenz ein gutes Ergebnis darstellt, bleiben die Glättung der Kanten und damit die höheren Abweichungen ein Problem.

**Tab. 3:** Einteilung der Abweichungen (in %) zur Referenz in vier Genauigkeitsklassen (innerhalb von -3,5 bis +3,5 cm) für die drei Testgebiete Rampe, Gleis und Pflaster – PhotoScan und Pix4Dmapper im Vergleich

Software	Agisoft PhotoScan					Pix4Dmapper				
UAV	X5S	X5S mod	P4Pro	X4S	SODA	X5S	X5S mod	P4Pro	X4S	SODA
Abweichung	Rampe					Rampe				
-0,5 bis 0,5	41,3	37,0	15,9	37,5	4,7	10,5	8,8	31,7	29,3	13,8
-1,5 bis 1,5	80,3	76,5	58,7	78,0	24,2	30,9	25,7	71,8	66,7	40,6
-2,5 bis 2,5	84,8	85,1	83,7	87,1	57,0	48,9	41,2	78,0	80,6	61,7
-3,5 bis 3,5	86,2	87,5	87,3	88,9	80,6	63,8	54,3	79,0	84,9	73,9
	Gleis					Gleis				
-0,5 bis 0,5	22,0	9,0	17,7	22,0	6,8	1,1	7,0	16,8	17,9	9,4
-1,5 bis 1,5	49,7	31,2	47,4	49,7	25,5	3,6	21,0	46,3	47,6	29,7
-2,5 bis 2,5	60,8	51,5	62,2	60,8	47,9	6,6	34,0	63,6	64,9	48,4
-3,5 bis 3,5	66,9	62,6	69,4	66,7	63,5	11,1	45,2	70,1	72,4	61,0
	Pflaster					Pflaster				
-0,5 bis 0,5	41,8	32,9	28,5	33,5	2,8	1,4	12,5	5,9	40,5	17,5
-1,5 bis 1,5	76,5	69,7	68,4	65,4	13,1	11,2	36,5	64,3	75,1	52,5
-2,5 bis 2,5	80,0	78,5	77,6	69,9	39,7	34,1	57,2	80,0	79,4	73,5
-3,5 bis 3,5	82,7	80,4	79,7	71,8	67,9	54,7	70,5	80,9	80,4	79,2

## 6 Fazit und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten geometrischen Untersuchungen fassen die Ergebnisse zur Qualität bildbasierter Punktwolken mit verschiedenen UAV-Systemen in zwei Testgebieten zusammen.

- Im Testfeld Zeche Zollern, Dortmund: vier Multikopter von DJI (Phantom 4 Pro Zenmuse X4S, Inspire 2 Zenmuse X5S (c = 15 mm), Inspire 2 Zenmuse X5S (modifizierte Optik mit c = 24 mm), Inspire 2 Zenmuse X4S), ein Starr- bzw. Flächenflügler senseFly ebee (S.O.D.A. Kamera) und ein Multikopter von Coptersystems mit der Mittelformatkamera Phase One.
- Im Testgebiet der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet: Multikopter DJI Phantom 4 Pro Zenmuse X4S.

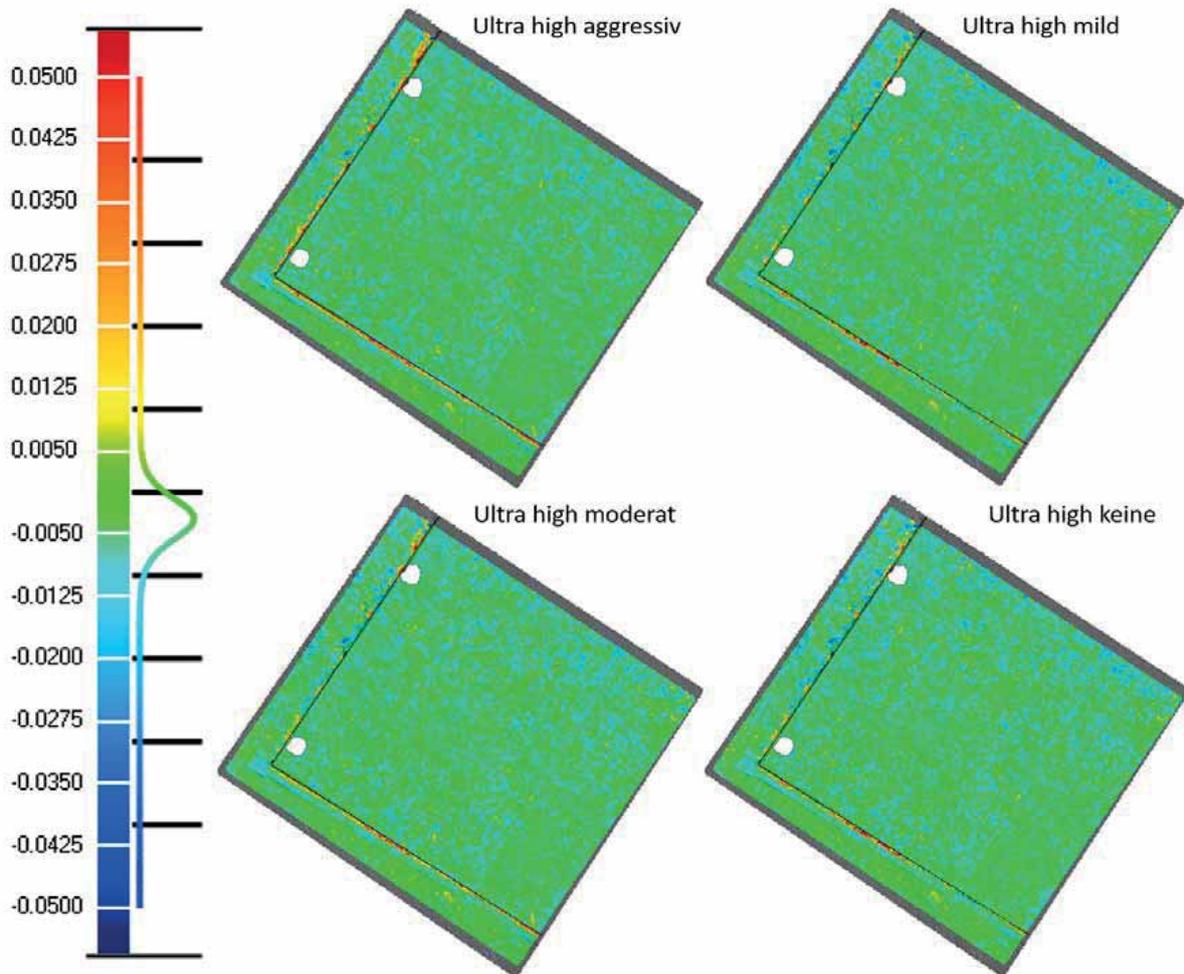


Abb. 19: 3D-Vergleich der verschiedenen Punktwolken (Auflösung Ultra high) der Phase One aus PhotoScan mit der Referenz TLS (Abweichungen farbkodiert mit der Skala: grün  $\pm 5$  mm, rot +50 mm und blau -50 mm)

Die Autoren legen Wert darauf, dass die Ergebnisse für die untersuchten einzelnen UAV-Systeme erzielt wurden, die keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit für die jeweilige Produktserie des untersuchten Systems darstellt. Insgesamt können aus den erreichten Ergebnissen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es wurden unterschiedliche Ergebnisse mit den eingesetzten Softwarepaketen Agisoft PhotoScan und Pix4Dmapper je UAV-System erreicht.
- Die verschiedenen Kameras der eingesetzten UAV-Systeme liefern unterschiedliche Ergebnisse. Es zeigt sich, dass Kameras mit längerer Brennweite (X5S) aufgrund der größeren Flughöhe und dem damit verbundenen kleineren Bildmaßstab erwartungsgemäß schlechtere Ergebnisse erreichen.
- Nach Auffassung der Autoren reicht die Qualität der mit unterschiedlicher Software generierten Punktwolken aus, um aus den UAV-Bilddaten qualitativ gute Orthophotos in hoher Auflösung (z. B. hier GSD 1 cm) zu erstellen.

- Erreichen die Punktwolken in der ebenen Fläche akzeptable bis gute Ergebnisse, bereiten jedoch Kanten durch Glättungseffekte in den Punktwolken Probleme bei der präzisen 3D-Digitalisierung. Es sollte daher noch untersucht werden, ob zusätzliche Schrägaufnahmen die Qualität der dichten Punktwolken für die Auswertung von Kanten signifikant verbessern.
- Die automatische Filterung von Punktwolken muss grundsätzlich mit Vorsicht betrachtet werden, da sie einerseits die Ergebnisse signifikant verfälschen kann, aber andererseits bei den hier präsentierten Untersuchungen keine Veränderungen bzw. Verbesserungen, insbesondere mit PhotoScan, gebracht hat.
- Je höher die gewählte Auflösung bzw. Punktdichte bei der Generierung von dichten Punktwolken ist, desto geringer wird der Glättungseffekt bei Kanten. Vermeiden lässt er sich aber auch durch die höchste Auflösung nicht gänzlich. Zudem muss die steigende Rechenzeit für sehr hohe Punktdichten mit berücksichtigt werden, so dass der Anwender für die jeweilige Aufgabenstellung immer den Kompromiss zwischen der Auflösung der dichten Punktwolken und der dafür benötigten Rechenzeit betrachten sollte.
- Die höhere Auflösung des Kamerasensors, wie z. B. der Phase One, bietet eine höhere Chance auf qualitativ bessere Punktwolken als die eingesetzten Standard-UAV-Systeme. Dabei sollte grundsätzlich berücksichtigt werden, ob sich die Anschaffung einer Mittelformatkamera, mit einem um den Faktor 10 bis 20 höheren Preis, für die anstehende Aufgabenstellung rentiert.

Der Einsatz von UAV-Systemen mit RTK-GNSS (mit Zweifrequenz-Empfängern) bei Bildflügen wird die Bildauswertung u. a. durch die integrierte Sensororientierung weiter automatisieren und stabilisieren. Es wird auch erwartet, dass die Auflösung zukünftiger Kamerasysteme für UAV-Systeme zunehmen wird, so dass dadurch auch die Qualität der Punktwolken verbessert werden kann. Allerdings bieten entsprechende Bildfluganordnungen (z. B. eine Kreuzbefliegung mit zusätzlichen Schrägaufnahmen) in niedrigeren Flughöhen genügend Potenzial, um die Qualität von dichten Punktwolken zu erhöhen. Die damit verbundene erforderliche längere Rechenzeit kann bei einem hohen Grad an Automation akzeptiert werden, zumal zunehmende Leistungsfähigkeit der neuen Generation von Computern die Situation zukünftig verbessern wird.

## Dank

Wir bedanken uns bei Prof. Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Przybilla (Hochschule Bochum) für die Bereitstellung der verschiedenen UAV-Bildflugdaten vom Testfeld Zeche Zollern sowie bei Prof. Dr.-Ing. Manfred Bäumker (Hochschule Bochum) und den Studierenden der Wahlpflichtveranstaltung „Ingenieurvermessung“

2017 und 2018 des Studiengangs Vermessung der Hochschule Bochum für die Passpunktbestimmung auf der Zeche Zollern. Außerdem bedanken wir uns bei Herrn Frederic Schlömer (M.Sc. Geodäsie & Geoinformatik, HCU Hamburg) für die Auswertung der verschiedenen UAV-Bildflugdaten vom Testfeld Zeche Zollern und bei Herrn Björn Grahlmann (B.Sc. Geodäsie & Geoinformatik, HCU Hamburg) für die Auswertung der UAV-Bildflugdaten von der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg.

## Literatur

- Bäumker, M. (2020): Aufbau eines hybriden hochpräzisen 3D-Grundlagennetzes am Beispiel des UAV-Testfelds Zeche Zollern. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Augsburg, 103–120. (Dieser Tagungsband).
- Coptersystems (2019): Multicopter „CS8-MM“. <https://coptersystems.com/produkte/cs8-mm/>, letzter Zugriff 12/2019.
- Dewez, T., Leroux, J., Morelli, S. (2016): Cliff collapse hazard from repeated multicopter UAV acquisitions: return on experience. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 41(B5), 805–811. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLI-B5-805-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-805-2016).
- Grahlmann, B. (2019): Bestandsdatenerfassung durch UAV-basierte Bildflüge am Beispiel einer Straßenkreuzung – Potential, Grenzen und Genauigkeit. Unveröffentlichte Bachelorarbeit im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik der HafenCity Universität Hamburg, 48 S.
- Haala, N., Mandlbürger, G., Cramer, M., Laupheimer, D., Kölle, M. (2019): Kombinierte Analyse hochpräziser Punktwolken aus UAV-Photogrammetrie und -Laserscanning im Hinblick auf Setzungsmessungen. In: Hanke, K., Weinold, T. (Hrsg.): 20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019, Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 69–78.
- Kersten, T., Lindstaedt, M. (2017): Photogrammetrie auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 1/2017, 142. Jg., 3–13. DOI: [10.12902/zfv-0145-2016](https://doi.org/10.12902/zfv-0145-2016).
- Kersten, T., Lindstaedt, M., Mechelke, K., Omelanowsky, D., Prenting, J. (2016): Low-Cost vs. High-End Systeme im Vergleich – 3D-Aufnahme der Ringwallanlage Lembecksburg auf der Nordseeinsel Föhr. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016*, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 150–161.
- Kersten, T., Schlömer, F., Przybilla, H.-J. (2020): Aerotriangulation von UAV-Bilddaten der Zeche Zollern – Die Ergebnisse verschiedener UAV-Systeme und zweier Softwarepakete im Vergleich. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Augsburg, 121–140. (Dieser Tagungsband).
- Lindstaedt, M., Kersten, T. (2018): Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 81–101.
- Luhmann, T. (2018): *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Beispiele*. 4., neu bearb. u. erw. Aufl., Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 783 S.

- d'Oleire-Oltmanns, S., Lackner, B. (2018): Evaluierung terrestrischer und UAS-basierter photogrammetrischer Datenprodukte. AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik, 4-2018, Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 372–377.
- PhaseOne (2019): iXM-100/iXM-50. [https://industrial.phaseone.com/iXM\\_Camera\\_Series.aspx](https://industrial.phaseone.com/iXM_Camera_Series.aspx), letzter Zugriff 12/2019.
- Pix4D (2019): Pix4Dmapper – Dense Point Cloud Parameter. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557799>, letzter Zugriff 12/2019.
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Augsburg, 51–66.
- Przybilla, H.-J. (2019): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit aktueller bildgebender UAV-Sensoren. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 28, 483–497.
- Przybilla, H.-J., Bäumker, M., Vieten, J. (2018): Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 61–79.
- Przybilla, H.-J., Kraft, T., Gessner, M., Zurhorst, A. (2017): Untersuchungen und erste Ergebnisse zur geometrischen Qualität marktgängiger Kameras für den UAV-Einsatz. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 235–245.
- Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., Kersten, T. (2019): Untersuchungen zur Qualität bildbasierter Punktwolken aus UAV-Bildflügen. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 236–248.
- Przybilla, H.-J., Reuber, C., Bäumker, M., Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 24, 45–54.
- Schlömer, F. (2019): Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen UAV-basierter Bildflüge und Punktwolken. Unveröffentlichte Masterarbeit, Studiengang Geodäsie und Geoinformatik, HafenCity Universität Hamburg, 137 S.
- Wikipedia (2019): Industriemuseum Zeche Zollern, Dortmund-Bövinghausen. [https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche\\_Zollern](https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche_Zollern), letzter Zugriff 12/2019.
- Zhang, Z., Gerke, M., Vosselman, G., Yang, M. Y. (2018): Filtering Photogrammetric Point Clouds Using Standard Lidar Filters Towards DTM Generation. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-2, 319–326. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-2-319-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-319-2018).

## Kontakt

Thomas P. Kersten | Maren Lindstaedt

HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning

Überseeallee 16, 20457 Hamburg

[thomas.kersten@hcu-hamburg.de](mailto:thomas.kersten@hcu-hamburg.de) | [maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de](mailto:maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de)