

Automatisierte Kontrolle der Lagequalität Digitaler Orthophotos anhand von Kanaldeckeln und SAR-Passpunkten

Automated Control of the Position Quality of Digital Orthophotos using Manhole Covers and SAR Control Points

Jasmin Fischer | Andreas Schmitt | Stefan Auer | Ulrich Balss

Zusammenfassung

Digitale Orthophotos (DOP) finden breite Anwendung im Geoinformationsbereich. Aktualität und Qualität sind daher schritthaltend sicherzustellen. Dieser Beitrag betrachtet die Lagegenauigkeit des DOP und bringt neben terrestrisch eingemessenen Kanaldeckeln eine neue Kontrollpunktgruppe in die Validierung ein: durch Radar mit synthetischer Apertur (SAR) aus dem All gemessene SAR-Passpunkte. Während sich Kanaldeckel automatisch im DOP finden und zuordnen lassen, erfordert die Messung von SAR-Passpunkten im DOP derzeit noch manuelle Arbeit. Anhand einer 8,4 km² großen Testfläche in München-Milbertshofen mit 133 Kanaldeckeln bzw. 67 SAR-Passpunkten werden beide Ansätze numerisch evaluiert. Die anschließende Diskussion erweitert den Blick über das Testgebiet hinaus auf eine landesweite Anwendung. Auch wenn sich derzeit die Validierung über Kanaldeckel einfacher gestaltet, können SAR-Passpunkte langfristig einen wertvollen Beitrag zur Verdichtung des Kontrollpunktfelds leisten.

Schlüsselwörter: DOP, Qualitätssicherung, Lagegenauigkeit, TerraSAR-X, Kanaldeckel

Summary

Digital orthophotos (DOP) are widely used in the geoinformation sector. Their up-to-dateness and quality must therefore be ensured. This article examines the positional accuracy of DOP and introduces, alongside terrestrially measured manhole covers, a new group of control points into the validation: Synthetic Aperture Radar (SAR) control points measured from space. While manhole covers can be detected and assigned automatically in the DOP, the measurement of SAR control points in the DOP currently still requires manual work. Both approaches are evaluated numerically using an 8.4 km² test area in Munich-Milbertshofen with 133 manhole covers and 67 SAR control points. The subsequent discussion extends the view beyond the test area to a nationwide application. Even if the validation via manhole covers currently appears to be simpler, SAR control points can make a valuable contribution to increasing the density of the control point field in the long term.

Keywords: DOP, Quality Assurance, Positional Accuracy, TerraSAR-X, Manhole Covers

1 Einleitung

Das Digitale Orthophoto (DOP) ist aus vielen Bereichen als flächendeckende Bestandsaufnahme und Planungsgrundlage nicht mehr wegzudenken. Alle Bundesländer bieten daher mittlerweile das DOP mit 20 cm-Pixeln (Hamburg sogar 15 cm und Mecklenburg-Vorpommern 10 cm) als Open Data zum Download oder als Web Mapping Service an (LDBV 2025). Die Nutzer verlassen sich darauf, dass die Lagequalität der Bilddaten den Vorgaben der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen (AdV) entspricht, welche eine Standardabweichung unterhalb der doppelten Pixelgröße fordern (AdV 2020). Die Kontrolle findet anhand von Passpunkten statt, die einerseits koordinatenmäßig bekannt sind und andererseits im Luftbild auch eindeutig identifiziert werden können. Das Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) erstellt aus Luftbildbefliegungen im zweijährigen Rhythmus sowohl das DOP als auch ein Oberflächenmodell (LDBV 2018) und verwendet dafür größtenteils bereits katalogisierte Passpunkte. Aufgrund von Bauaktivitäten wie beispielweise Gebäude- und Straßensanierungen verschwindet jedoch eine zunehmende Anzahl der bisherigen Passpunkte. Deshalb stellt sich langfristig die Frage, wie neue Passpunkte mit minimalem Aufwand generiert und effektiv in den Arbeitsablauf integriert werden können. In dieser Studie werden zwei Passpunktgruppen in Betracht gezogen: Kanaldeckel, welche bereits einzeln terrestrisch (tachymetrisch oder mit DGNSS) auf etwa 3 cm genau eingemessen sind, und SAR-Passpunkte, welche mit Hilfe von Radarsatelliten aus dem All flächenhaft auf wenige Zentimeter bis Dezimeter genau bestimmt werden können (Balss et al. 2023). Ziel ist es, die Eignung dieser beiden Passpunktgruppen für die längerfristige Qualitätskontrolle des DOP anhand eines praktischen Beispiels näher zu beleuchten.

2 Stand der Technik

Während zur Kontrolle einer Aerotriangulation bevorzugt sowohl in Lage als auch in Höhe markante Punkte wie beispielsweise Hausgiebel herangezogen werden, eignen sich zur Lagekontrolle besonders Kanaldeckel oder Straßen-



Abb. 1: Kanaldeckel-Passpunkte im DOP: (links) mit detektiertem Kreis im vierfach überabgetasteten Bild sowie (mittig und rechts) überlagert von Straßenmarkierungen bzw. dem Schatten von Bäumen und daher nicht als solche erkennbar.

markierungen, die zwar eindeutige Lagekoordinaten, aber typischerweise nur geringe Höhenunterschiede in ihrem direkten Umfeld aufweisen (Henjes 2023). Die Aufnahme neuer Passpunkte soll großflächig mit möglichst wenig personellem und materiellem Aufwand möglich sein. Zudem soll die Zuordnung von im DOP sichtbaren Passpunkten zu katalogisierten Passpunktkoordinaten möglichst ohne Eingriff eines Bearbeiters erfolgen (Kraft 2023).

Kanaldeckel sind räumlich und zeitlich stabile Passpunkte, welche sowohl vom Boden aus als auch aus der Luft gut erkennbar sind (Abb. 1). Sie können durch Tachymetrie oder SAPOS-unterstütztem GNSS im Zuge ohnehin laufender Vermessungsarbeiten mit aufgenommen werden, wenn sie nicht eh schon in einem Kanalkataster erfasst sind. Dank ihrer einheitlichen Form und Größe lassen sich ihre Signaturen im Bild einfach modellieren und mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung wiederfinden (Hahn 1997). Heutzutage kommen jedoch auch vermehrt Deep Learning-Ansätze zum Einsatz (Wang und Huang 2024, Mattheuwsen und Vergauwen 2020, Commandre et al. 2017), welche robuster gegenüber Abschattungen, Verschmutzungen und weiteren Bildstörungen sein sollen. Aber auch die herkömmlichen Verfahren mit Kantenfilterung und anschließender Hough-Transformation zur Berechnung der Kreisparameter (Mittelpunkt und Radius) liefern zuverlässige Ergebnisse und sind sogar auf die stark verrauschten Aufnahmen eines Bodenradars übertragbar (Yamaguchi und Mizutani 2021). In satellitengestütztem Radar sind Kanaldeckel wegen der Schrägsichtaufnahme einerseits und der geringen räumlichen Auflösung andererseits derzeit noch nicht zu erkennen.

Das SAR-Prinzip ermöglicht im High Resolution Spotlight-Modus der TerraSAR-X-Mission eine räumliche Auflösung von rund einem Meter. Aufrecht und isoliert stehende metallische Strukturen wie Straßenlaternen oder Masten von Verkehrszeichen erzeugen darin ein starkes und selbst aus verschiedenen Perspektiven stabiles Signal. Aus der Kombination mehrerer Aufnahmen lässt sich die Position des Rückstreucentrums bestenfalls auf wenige Zentimeter genau bestimmen (Balss et al. 2016). Je nach Beschaffenheit der Straßenlaterne, ihrer direkten Umgebung und den eingehenden Aufnahmen kann für jeden Punkt eine Genauigkeit geschätzt werden (Suchandt und Balss 2024). Das Rückstreucentrum am Fußpunkt der Straßenlaterne in Richtung des Satelliten ist jedoch per se nicht im DOP erkennbar (Abb. 2). Es muss als Schnittpunkt zwi-

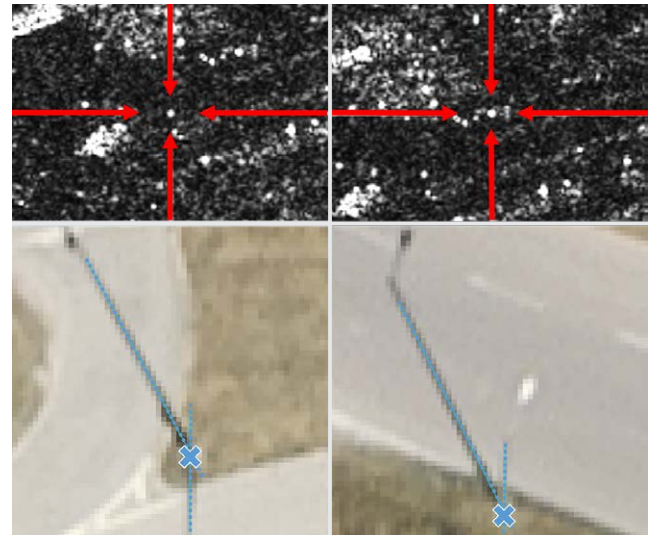


Abb. 2: SAR-Passpunkte im Radarbild oben (© DLR 2023) und im DOP unten (© Bayerische Vermessungsverwaltung 2023): das rote Fadenkreuz markiert die starke, stabile und von ihrer Umgebung eindeutig abgrenzbare Rückstreuung der Masten von Straßenlaternen im Radarbild. Die Rekonstruktion des Rückstreucentrums im DOP nutzt den Schattenwurf und zusätzlich den eventuell auftretenden Umklappeffekt, markiert durch die blauen Hilfslinien.

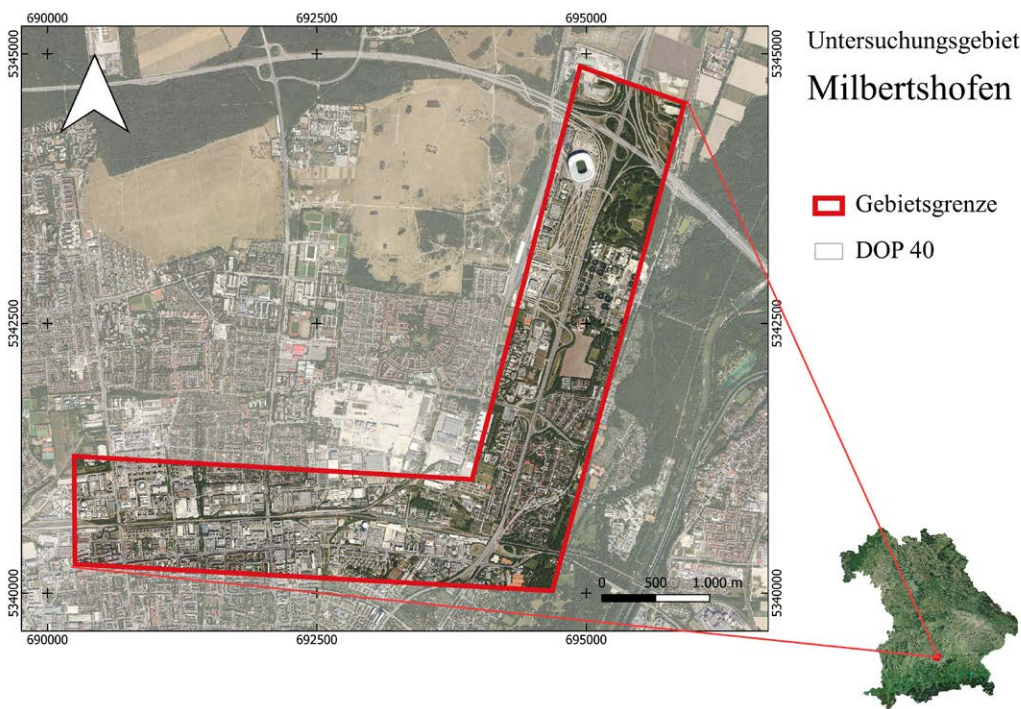
schen der im DOP manchmal umgeklappt erscheinenden Straßenlaterne und ihrem Schattenwurf berechnet und anschließend zum Satellit hin ausgerichtet werden (Kurz et al. 2019). Besteht Zugriff auf die ins DOP einfließenden Luftbilder, kann aus der Mehrfachaufnahme der Straßenlaterne das Rückstreucentrum teilautomatisiert abgeleitet werden (Krauß et al. 2022). Beim fertigen DOP, in dem die Straßenlaterne in Orthogonalprojektion abgebildet ist, muss ein menschlicher Interpret die Lage des Rückstreucentrums abschätzen.

3 Datengrundlage

München-Milbertshofen im Norden der Landeshauptstadt wurde aufgrund seiner heterogenen Landbedeckung als Testgebiet ausgewählt (Abb. 3). Das vorstädtische Szenario bietet für GNSS-Messungen auf Kanaldeckeln wie auch für SAR-Passpunkte vergleichbare Verhältnisse. Es umfasst weitreichende Siedlungs- und Verkehrswegeflächen inklusive Autobahnen, Industrie- und Gewerbegebiete sowie Grünflächen und Gehölze in Parks, aber auch landwirtschaftlich genutzte Flächen. Für das etwa 8,4 km² umfassende Gebiet liegen von der Stadt München die Koordinaten von 286 Kanaldeckeln und vom Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) insgesamt 760 SAR-Passpunkte unterschiedlicher Genauigkeit vor. Während die Kanaldeckel-Passpunkte über mehrere Jahre eingemessen worden sind, wurden die SAR-Passpunkte aus drei TerraSAR-X-Aufnahmen Anfang Juni 2023 abgeleitet. Das DOP20 gehört zum Befliegungsgebiet 1220028 – Mün-

Tab. 1: Produktspezifikationen der Passpunktgruppen sowie des DOP

	Kanaldeckel-Passpunkte	SAR-Passpunkte	DOP20
Betreiber	Stadt München	DLR e.V.	LDBV Bayern
Projektion	EPSG 25832 ETRS 89 UTM Zone 32	EPSG 4258 ETRF 2000 UTM Zone 32	EPSG 25832 ETRS 89 UTM Zone 32
Aufnahme	DGNSS-Messung (terrestrisch)	TerraSAR-X (Satellitenmission)	Digitale Großformat-Kamera (Flugzeug)
Bodenabtastung	286 Punkte	760 Punkte	20 cm
Lagegenauigkeit	3 cm	Dezimeterbereich	40 cm
Eigenschaften	Punktnummer, Koordinaten, Objektart	ID, Koordinaten, Genauig- keit, Aufnahmen	RGB-Aufnahmen Längsüberlappung > 80 % Querüberlappung > 50 %
Stand	15.11.2023	05.06.2023 07.06.2023 09.06.2023	14.08.2022
Quelle	Kraft 2023	Balss et al. 2023	LDBV 2018



chen. Die Befliegung fand am 14.08.2022 statt. Das DOP wurde am 13.12.2022 vom LDBV fertiggestellt. Die wichtigsten Parameter zu den verwendeten Daten sind in Tab. 1 zusammengefasst. Details zu den ausgewerteten SAR-Aufnahmen finden sich in Tab. 2.

4 Methodik

Anstatt die knapp zwei Milliarden Pixel im DOP20 von Bayern auf mögliche Passpunkte hin zu untersuchen, wird hier der umgekehrte Weg gewählt: die Koordinaten bekannter Passpunkte werden ins DOP projiziert, um in

einer begrenzten Bildkachel um diese Sollkoordinaten herum nach dem entsprechenden Passpunkt zu suchen. Diese Vorgehensweise reduziert zum einen die Datenmenge und garantiert zum andern, dass maximal ein Passpunkt pro Bildkachel vorhanden ist. Der folgende Ablauf ist in Abb. 4 zusammengefasst.

Da ein typischer Kanaldeckel mit 80 cm Durchmesser im DOP20 nur etwa vier Pixel breit ist, werden die Bildkacheln vierfach überabgetastet, anschließend kantengefiltert, binarisiert und einer speziellen Hough-Transformation für Kreissignaturen unterzogen. Der dabei detektierte Kreismittelpunkt ergibt zurückprojiziert ins Landessystem die Ist-Koordinaten des Passpunkts (Abb. 1). Von den

Tab. 2: Eigenschaften der High Resolution Spotlight-Aufnahmen von TerraSAR-X, aus denen die SAR-Passpunkte berechnet worden sind. »HH« bedeutet, dass das SAR-Signal in horizontaler Ausrichtung gesendet und empfangen wurde. »Aufsteigender/absteigender Orbit« gilt relativ zur geographischen Breite und gibt die Blickrichtung im DOP an.

Datum	Polarisation	Relativer Orbit	Beam	Einfallswinkel	Orbitrichtung	Blickrichtung im DOP
03.06.2023	HH	40	Spot 77	48,8°	Aufsteigend	von Westen
07.06.2023	HH	93	Spot 81	49,7°	Absteigend	von Osten
12.06.2023	HH	2	Spot 50	39,0°	Absteigend	von Osten

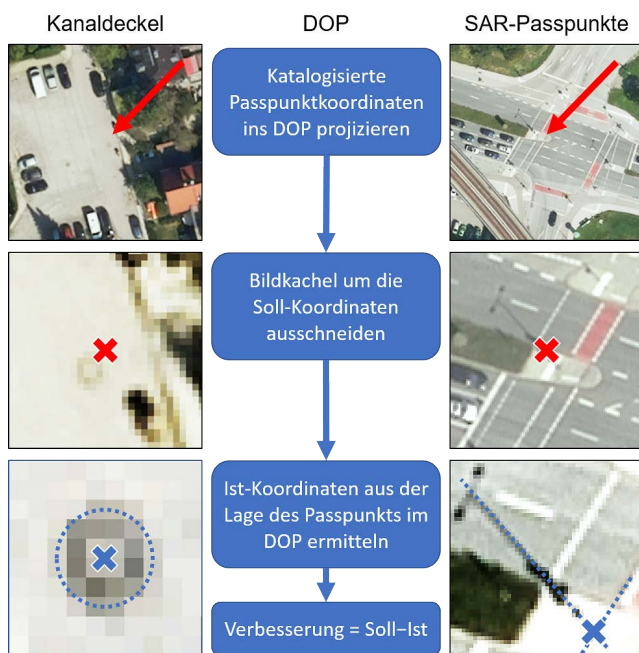


Abb. 4: Ablaufschema der teilautomatisierten Qualitätskontrolle

SAR-Passpunkten werden nur diejenigen mit einer Genauigkeit von unter 20 cm gemäß den Vorgaben der AdV herangezogen. Da eine automatische Wiedererkennung im Bild zu wenige Zuordnungen geliefert hat, wird deren Lage visuell abgeleitet. Dabei nutzt man den (im modernen DOP nur noch selten vorhandenen) Umklappeffekt von Straßenlaternen und deren Schattenwurf als Hilfslinien (Abb. 2). Der Schnittpunkt ergibt einen ersten Anhaltspunkt, muss aber zudem bezüglich der Aufnahmegeometrie (aufsteigender oder absteigender Orbit gemäß Tab. 2) noch minimal korrigiert werden, um die Ist-Koordinaten des SAR-Passpunkts zu erhalten.

Aus den Soll- und Ist-Koordinaten werden nun Verschiebungsvektoren berechnet und ausgewertet. Mit Hilfe einer Inverse Distance Weighted Interpolation werden die punkthaft vorhandenen Verbesserungen auf das regelmäßige Bildraster übertragen. Um Diskrepanzen im Referenzsystem auszuschließen, wird zusätzlich eine Helmert-Transformation zwischen Soll- und Ist-Koordinaten angewandt. Die Restklaffungen beschreiben schließlich die innere Lagegenauigkeit.

5 Ergebnisse

Von den 286 verfügbaren Kanaldeckel-Passpunkten wurden 133 korrekt zugeordnet (Abb. 5), wobei lediglich 16 Zuordnungen manuell überprüft werden mussten (Fischer 2024). Zahlreiche Kanaldeckel waren im DOP aufgrund von Abschattungen oder überlagernden Straßenmarkierungen nicht erkennbar (vgl. Abb. 1). Eine stichprobenhafte, visuelle Prüfung der 137 nicht-zugeordneten Punkte ergab, dass auch ein menschlicher Interpret diese Kanaldeckel im DOP nicht erkennen würde. Zur Visualisierung der Verbesserungen werden in Abb. 7 die Verschiebungsvektoren 2500-fach überhöht vor dem Hintergrund der interpolierten absoluten Abweichung in der Lage dargestellt. Die mittlere Abweichung über alle Kanaldeckel-Passpunkte liegt laut Tab. 3 bei 9 cm in der Lage.

Von den 760 gelisteten SAR-Passpunkten besitzen zwar 166 eine Genauigkeit unter 20 cm, aber lediglich 67 SAR-Passpunkte lassen sich visuell auch im DOP eindeutig zuordnen. Weitere 37 Zuordnungen zwischen Bild und Datenbank mit einer geschätzten Genauigkeit zwischen 20 cm und 40 cm wurden ergänzend hinzugefügt (Abb. 6). Auch wenn die mittlere Lageabweichung gemäß Tab. 3 mit gut 34 cm noch unter dem geforderten Wert von 40 cm liegt, zeigen die Verschiebungsvektoren in Abb. 7 eine deutliche Tendenz nach Süden, was zu einer näheren Betrachtung des Referenzsystems veranlasst.

Obwohl alle Koordinaten in UTM 32N vorliegen, handelt es sich bei den SAR-Passpunkten mit EPSG:4258 um eine andere Realisierung des Referenzsystems als bei den Kanaldeckel-Passpunkten und dem DOP, welche in EPSG:25832 gegeben sind. Eine Helmert-Transformation bestätigt, dass zwischen den SAR-Passpunkten und dem DOP ein mittlerer Versatz von 25 cm in Nord-Süd- und von 11 cm in Ost-West-Richtung vorliegt. Alle anderen Transformationsparameter, auch die bezüglich der Kanaldeckel-Passpunkte, sind nach Tab. 3 vernachlässigbar. Obwohl der Maßstab im Falle der Kanaldeckel oberhalb der Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % liegt, macht er auf das Gesamtgebiet nur gut 3 cm aus, was der Genauigkeit der Kanaldeckel-Passpunkte entspricht. Nach der Transformation verringern sich die Restklaffungen der SAR-Passpunkte um 40 % auf nur noch 21 cm in der Lage (Tab. 3). Die so korrigierten Verschiebungsvektoren (Abb. 8) zeigen zwar bei den SAR-Passpunkten noch immer eine deutlich höhere Abweichung als bei den Kanaldeckel-Passpunkten an, jedoch ist keinerlei Systematik mehr erkennbar.

Tab. 3: Restklaffungen vor und nach der Helmert-Transformation sowie ausgeglichene Parameter

	Kanaldeckel-Passpunkte	SAR-Passpunkte
Restklaffungen	[cm]	[cm]
RMSE in X	6,4	29,7
RMSE in Y	6,3	17,2
RMSE Lage	9,0	34,3
Transformationsparameter		
Translation in X	2,42 cm ± 0,46 cm	24,69 cm ± 1,82 cm
Translation in Y	-3,79 cm ± 0,46 cm	10,97 cm ± 1,82 cm
Rotation	0,96" ± 0,54"	1,12" ± 2,10"
Maßstabsunterschied	9,66 ppm ± 2,63 ppm	21,66 ppm ± 10,19 ppm
Rotationszentrum X	5341275,02 m	5341124,65 m
Rotationszentrum Y	693497,78 m	693030,99 m
Verbleibende Restklaffungen	[cm]	[cm]
RMSE in X	5,8	16,5
RMSE in Y	4,9	13,2
RMSE Lage	7,6	21,1

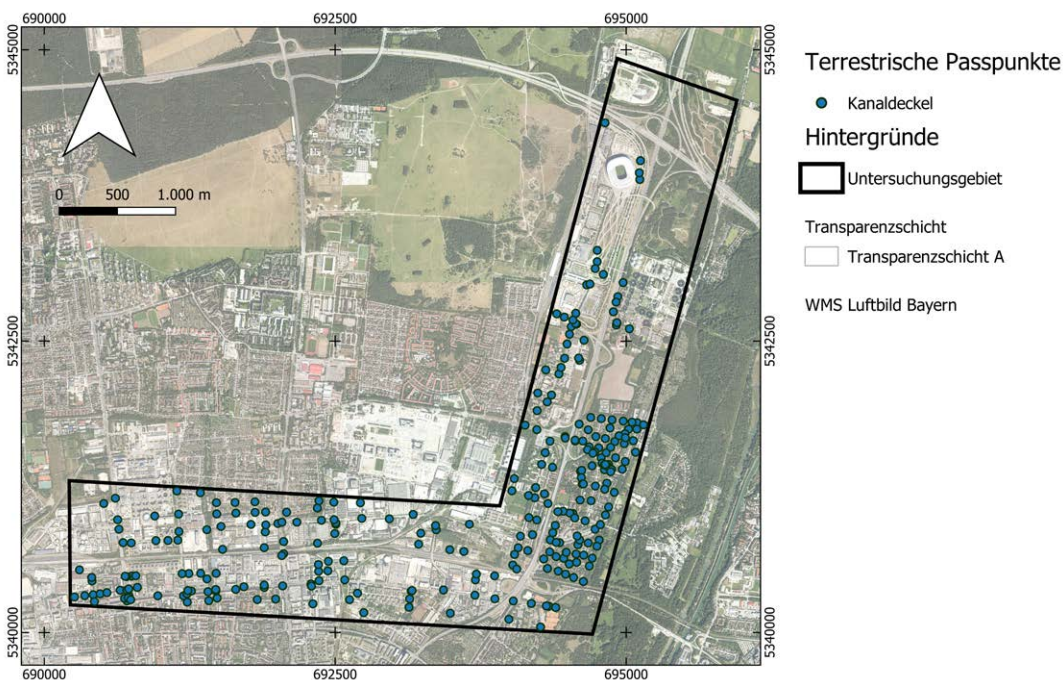


Abb. 5: Räumliche Verteilung der Kanaldeckel-Passpunkte im Untersuchungsgebiet

6 Diskussion

Die Kanaldeckel-Passpunkte haben durchweg eine Lagegenauigkeit von unter 3 cm und liegen dank der Verwendung des SAPOS-Dienstes bereits im passenden Referenzsystem vor. SAR-Passpunkte können je nach Beschaffenheit des Rückstreuers und seiner Umgebung unterschiedlich

genau sein. Ein Anteil von 22 % erfüllt die von der AdV geforderte Genauigkeit von unter 20 cm. Von der Kanaldeckel-Punktgruppe sind im Untersuchungsgebiet mit 133 die meisten Zuordnungen zwischen Bild und Datenbank vorhanden. Von den ausreichend genauen SAR-Passpunkten konnten mit 67 im selben Gebiet nur etwa halb so viele Punkte verwendet werden. Diese sind dafür aber

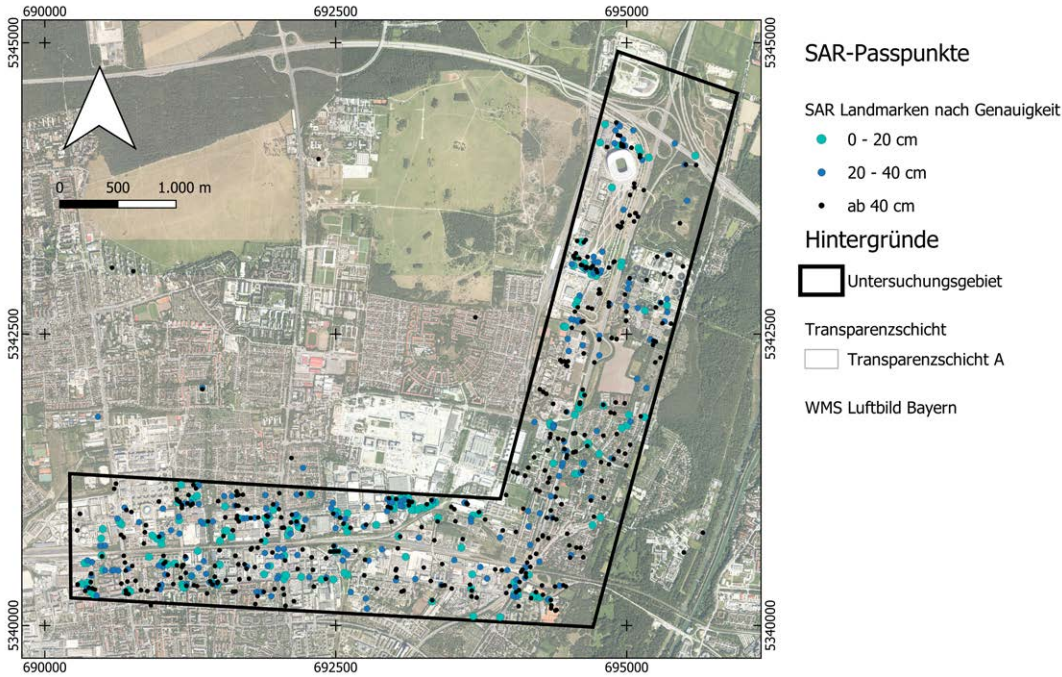


Abb. 6: Räumliche Verteilung der SAR-Passpunkte im Untersuchungsgebiet kategorisiert nach Lagegenauigkeit

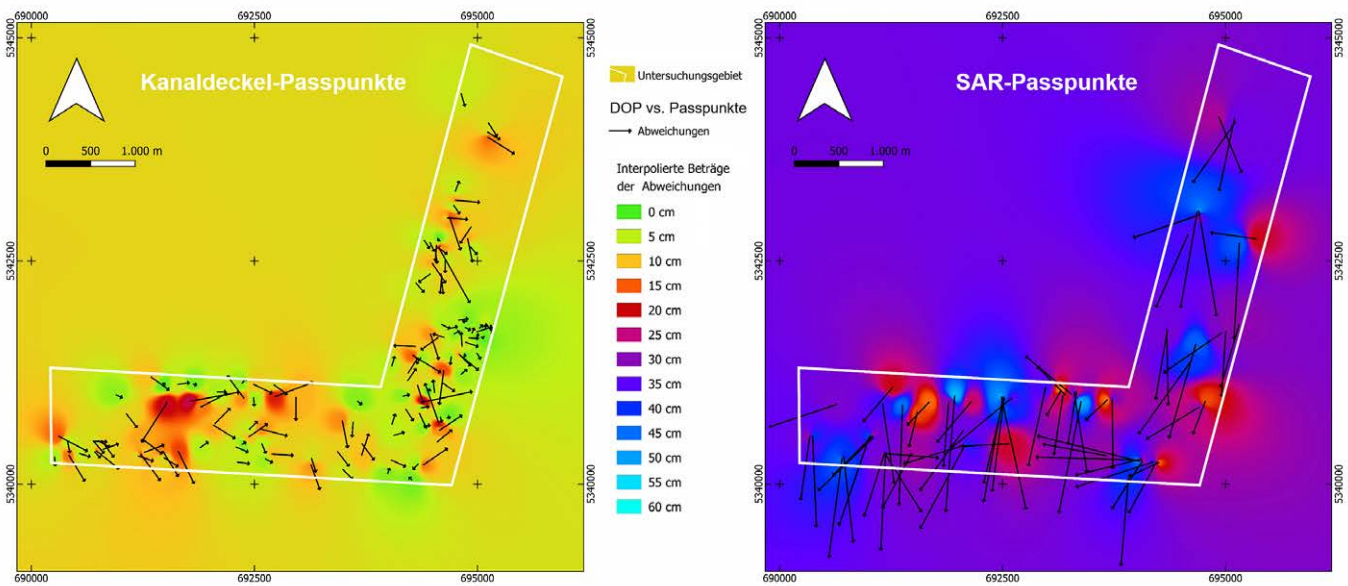


Abb. 7: Abweichungen zwischen DOP und Kanaldeckeln (links) bzw. SAR-Passpunkten (rechts): 2500-fach überhöhte Verschiebungsvektoren vor dem Hintergrund der auf die Fläche interpolierten Lageabweichung

gleichmäßiger verteilt. Die Kanaldeckel im DOP konnten auf 10 cm genau bestimmt werden (Fischer 2024). Das mehrstufige Verfahren bestehend aus Kachelung, Kontrastverbesserung, Kantenfilterung und Kreisdetektion liefert in nur wenigen Rechenschritten mit bewährten Methoden der digitalen Bildverarbeitung verlässliche und nachvollziehbare Ergebnisse. Die Detektion im Bild könnte jedoch zukünftig durch den Einsatz spezieller Krümmungfilter auf einen Arbeitsschritt reduziert werden (Aigner et al. 2025). Mögliche Ansätze neben Deep Learning wären eine Mustererkennung auf hyperkomplexen Basen (Schmitt et al. 2020) oder eine Zerlegung in vordefinierte Strukturen (Schmitt 2016). Letzterer Ansatz wäre

auch problemlos auf rechteckige Schachtabdeckungen erweiterbar.

Im Vergleich dazu müssen SAR-Passpunkte im DOP noch manuell über die Schnittpunkte von Hilfslinien bestimmt werden. Aufgrund der manuellen Arbeitsweise wird die graphische Koordinate bereits bei der Erstellung auf Plausibilität kontrolliert. Der Schnittpunkt selbst ist zwar eindeutig identifizierbar, seine Passgenauigkeit hängt jedoch entscheidend vom Ansetzen der Hilfslinien ab. Während sich die Abweichungen bei der terrestrischen Punktgruppe vor allem im Bereich zwischen 5 cm und 15 cm bewegen, sind es bei den SAR-Passpunkten 20 cm bis 45 cm (Fischer 2024). Der Wertebereich ließe sich bei

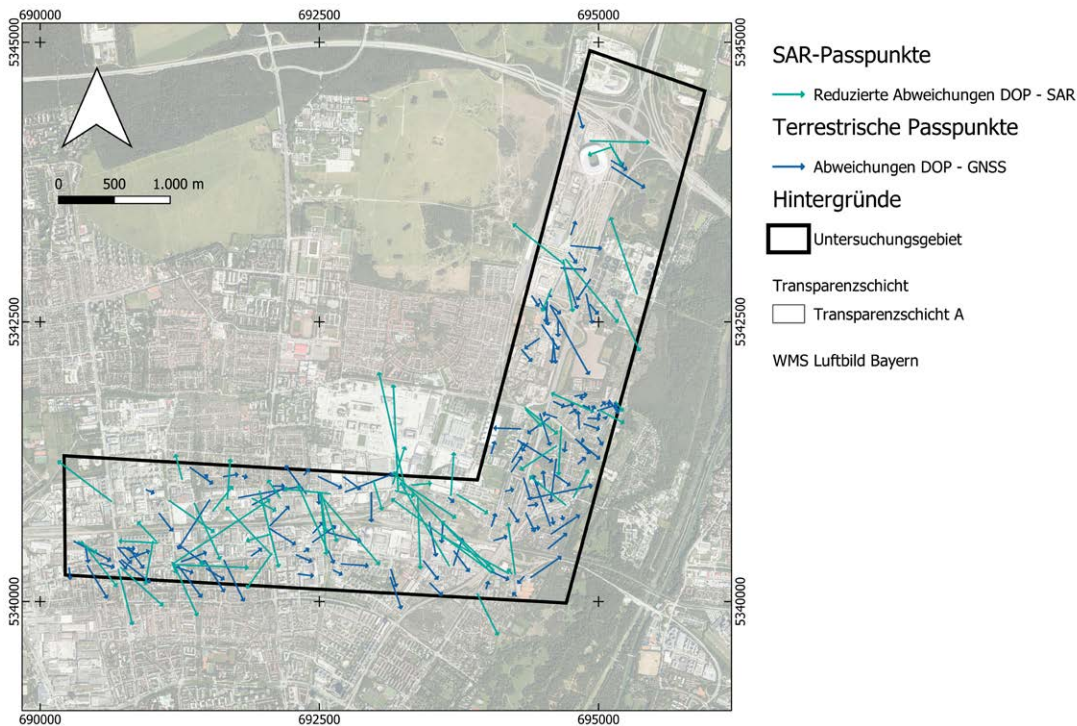


Abb. 8: Verbleibende Restklaffungen nach einer Helmert-Transformation als 2500-fach überhöhte Verschiebungsvektoren für die Kanaldeckel in Blau und die SAR-Passpunkte in Grün

den SAR-Passpunkten verringern, indem eine höhere Anforderung an das Genauigkeitsmaß angesetzt wird. Zu beachten ist jedoch, dass sich deren Anzahl dann weiter verringert. Sowohl die Passpunktmessung (terrestrisch vs. Messung aus dem All) wie auch die Zuordnung im DOP (Mittelpunkt von Kreis vs. Mastfußpunkt) ist für die Kanaldeckel-Passpunkte präziser durchführbar.

Beim Vergleich von SAR-Passpunkten und Kanaldeckeln ist der Zeitaufwand ein wichtiger Faktor. Die Verarbeitung der Kanaldeckel im Testgebiet dauert mit dem vorgestellten Verfahren etwa 28 Sekunden auf einem durchschnittlichen Arbeitsrechner. Die anschließende Prüfung nimmt nur wenige Minuten in Anspruch, da der Bearbeiter lediglich vermutete Ausreißer überhaupt kontrollieren muss, bei denen das automatische Verfahren eine Warnung ausgegeben hat. Das war im Untersuchungsgebiet bei lediglich 16 von insgesamt 286 Kanaldeckeln der Fall (Fischer 2024). Im Gegensatz dazu ist der Zeitaufwand, der für die Zuordnung der SAR-Passpunkte zu Objekten im DOP eingeplant werden sollte, spürbar höher, da jeder Passpunkt einzeln im Bild bestimmt und bei großer Abweichung gegebenenfalls nachträglich korrigiert werden muss. Hier gibt es zwar Ansätze zur Automatisierung, welche jedoch für die Zuordnung von Rückstreuungszentrum und Objekt eine unterstützende Konstellation der Bilddaten, z. B. eine Kombination verschiedener Schattenwurfrichtungen von Masten in optischen Bildern verschiedener Zeitpunkte, unbedingt erfordern. Diese sind im fertigen DOP nicht mehr vorhanden.

Die generelle Verfügbarkeit dieser natürlichen Passpunkte (Kanaldeckel und SAR-Passpunkte) hängt stark von der Landnutzung ab. Wie Abb. 5 eindrücklich zeigt, sind Kanaldeckel im innerstädtischen Bereich reichlich vorhanden. Außerhalb stehen deutlich weniger Kanaldeckel-

ckel-Passpunkte zur Verfügung. Davon ausgehend, dass mittlerweile sämtliche Siedlungen innerhalb Bayerns über eine Kanalisation verfügen, sind aber prinzipiell auf allen bebauten Flächen Kanaldeckel vorhanden, auch wenn deren Einmessung (z. B. auf Autobahnen) mit großem Aufwand einhergeht. SAR-Passpunkte erfordern keine Messung vor Ort und können somit auch auf Autobahnen oder sonstigen schwer zugänglichen Bereichen problemlos aus dem All erfasst werden (Abb. 6). Voraussetzung dafür ist nur das Vorhandensein vertikaler metallischer Strukturen. In natürlicher Umgebung sind jedoch weder SAR-Passpunkte noch Kanaldeckel vorhanden.

Der zeitliche Versatz zwischen Aufnahme der Passpunkte vor Ort und Luftbildbefliegung (vgl. Tab. 1) ist als vernachlässigbar einzustufen. Wenn ein katalogisierter Passpunkt im DOP erkannt wird, fließt er in die Qualitätskontrolle mit ein. Wird er nicht erkannt bzw. weist er aufgrund zwischenzeitlicher Baumaßnahmen eine signifikante Verschiebung auf, wird er als Ausreißer markiert und kann sowohl im DOP als auch vor Ort nachgemessen werden.

Die Aufnahme bzw. Nachmessung der Passpunktgruppen gestaltet sich sehr unterschiedlich. Kanaldeckel lassen sich bei Vermessungsarbeiten in der näheren Umgebung leicht aufnehmen, z. B. im Zusammenhang mit einer Gebäudeeinmessung. Die separate Vermessung sämtlicher Kanaldeckel in einem Gebiet ist zwar mit größerem Aufwand verbunden, allerdings zur Fortführung des Kanal-katasters ohnehin notwendig. Passpunkte innerhalb von Stadtgebieten lassen sich mit SAR-Daten flächenhaft und effizient erfassen. Hierbei stellt aber der Datenzugang eine größere Hürde dar. Derzeit gibt es keine hochauflösende SAR-Mission mit räumlich wie zeitlich kontinuierlicher Aufnahme. Die hier verwendeten TerraSAR-X-Bilder ha-

ben eine Abdeckung von lediglich ca. 5 km × 10 km. Die zu erwartende Kombination aus verbesserter Verfügbarkeit (Anstieg der Anzahl an SAR-Satelliten, u. a. kommerziell, was jedoch mit hohen Kosten verbunden ist) und verbesserter Entfernungsmessung (mit der Korrektur systematischer Effekte für TerraSAR-X-Aufnahmen als Vorbild) verbessern voraussichtlich auch die flächendeckende Lokalisierbarkeit von SAR-Passpunkten. Aktuell ist dieses Verfahren noch eher als experimentell einzustufen.

Die zeitliche Verfügbarkeit von TerraSAR-X-Daten wird in wenigen Jahren enden. Beide Satelliten der Mission haben ihre ursprünglich geplante Lebensdauer bereits überschritten, und es ist gibt aktuell noch keinen konkreten Entschluss zu einer Nachfolgemission. Eine mit TerraSAR-X vergleichbare Datenqualität liefert derzeit nur der weitgehend baugleiche spanische PAZ-Satellit (Hisdesat 2025). Dessen Aufnahmekapazität steht jedoch nicht in gleichem Umfang wie bei TerraSAR-X für externe kommerzielle und wissenschaftliche Nutzer zur Verfügung. Dies bedeutet, dass sich der Fokus hinsichtlich der Passpunkte vor allem auf das TerraSAR-X-Datenarchiv richten wird, bis eine neue SAR-Mission mit ähnlicher Lokalisierungsgenauigkeit und Verfügbarkeit wie TerraSAR-X startet. Sentinel-1 wäre zwar flächendeckend und kostenlos verfügbar, erfüllt aber bei Weitem nicht die Anforderungen hinsichtlich räumlicher Auflösung. Obwohl es derzeit Anstrengungen gibt, aus Sentinel-1-Daten ebenso SAR-Passpunkte abzuleiten (Planetek 2025), werden aufgrund der niedrigeren Auflösung eher Gebäudefassaden, aber sicher keine Laternenmasten als stabile Rückstreuer erkannt. Kanaldeckel hingegen bleiben langfristig verfügbar und können mit geringem personellen Aufwand neu eingemessen oder bei Bedarf auch einzeln nachgemessen werden. Eine Nachmessung einzelner SAR-Passpunkte ist zwar prinzipiell möglich, erfordert aber wieder eine komplette Neuaufnahme des gesamten Gebiets mit mehreren Überflügen.

Ein klarer Vorteil beider Verfahren, insbesondere in Kombination, ist die mögliche Automatisierung der Qualitätskontrolle des DOP. So könnten deutlich mehr Passpunkte erfasst und ausgewertet werden als mit den bislang üblichen manuellen Methoden. Diese Effizienzsteigerung bietet ein großes Potenzial zur Verbesserung der geodätischen Genauigkeit, insbesondere in urbanen Gebieten, wo sowohl SAR-Passpunkte als auch Kanaldeckel vorhanden sind. Die Studie zeigt aber auch, dass die automatische Erkennung und Zuordnung von Passpunkten eine große Herausforderung darstellt. Nur für die Kanaldeckel-Passpunkte konnte im Untersuchungsgebiet ein Detektor entworfen und getestet werden, der auch eine ausreichende Anzahl an Zuordnungen zwischen Bild und Datenbank liefert.

Die Frage nach der Erweiterbarkeit der Passpunktgruppen ist besonders interessant. Prinzipiell könnten weitere Signaturen wie Straßenmarkierungen oder Fahrbahnkanten eingebunden werden. Allerdings wäre dies nur mit eingeschränkter Aussagekraft möglich. Linienhafte Objekte wie Kanten können nur Informationen zur Querrichtung liefern, während sie in Längsrichtung keine punktuellen

Informationen bieten. Dennoch wäre es denkbar, andere infrastrukturelle Elemente wie Gebäudeecken in die Analyse einzubeziehen. Diese werden ohnehin von der Bayerischen Vermessungsverwaltung erfasst und könnten zusätzliche Kontrollpunkte bereitstellen. Ein Problem könnten hier Dachüberstände darstellen, welche die Lokalisierung der Gebäudeecken erschweren. Da jedoch im aktuellen Gebäudemodell die Dachform hinterlegt ist, wäre es durchaus möglich, nur Gebäude mit Flachdach und somit minimalem Überstand zur Kontrolle zu verwenden. Trotz der flächendeckenden Verfügbarkeit gilt es zu beachten, dass die Gebäudeecken derzeit keine einheitliche Lagegenauigkeit wie die Kanaldeckel aufweisen.

Insgesamt bieten SAR-Passpunkte und Kanaldeckel zusammen interessante Möglichkeiten zur Generierung geodätischer Kontrollpunkte für das DOP. Allerdings zeigen sich deutliche Unterschiede in der Aufnahme, räumlichen Verteilung, geometrischen Genauigkeit und automatisierten Erkennbarkeit im Luftbild. Während Kanaldeckel in urbanen Gebieten eine zuverlässige und leicht zugängliche Quelle darstellen, können SAR-Passpunkte ergänzend und in der Fläche wertvolle Informationen liefern. Anhand des Untersuchungsgebiets Milbertshofen wurde gezeigt, dass beide Passpunktgruppen für die Qualitätssicherung des DOP20 prinzipiell einsetzbar sind und im vorliegenden Fall auch eine Lagegenauigkeit von unter 40 cm gemäß den Vorgaben der AdV attestieren.

7 Fazit und Ausblick

Aktuelle Digitale Orthophotos (DOP) sind essenzieller Bestandteil der modernen Geoinformationswelt. Sie dienen als Planungs- und Bemessungsgrundlage für unterschiedlichste Anwendungen und unterliegen damit höchsten Qualitätsansprüchen, u. a. hinsichtlich ihrer Lagegenauigkeit. Um diese kontinuierlich, nachhaltig und zugleich ressourcenschonend zu überwachen, braucht es innovative Ansätze zur automatisierten Kontrolle über neue Passpunktgruppen. In dieser Studie werden koordinatenmäßig bekannte Kanaldeckel und sogenannte SAR-Passpunkte in Betracht gezogen. Für die Kanaldeckel-Passpunkte konnte ein Detektor prototypisch implementiert werden, der anhand einer Koordinatenliste an den entsprechenden Stellen im DOP nach Kanaldeckeln sucht und deren Position im Bild ermittelt. Für die SAR-Passpunkte erfolgte die Zuordnung im Rahmen dieser Studie visuell. Der Vergleich von Soll-Koordinaten aus der vorausgegangenen Aufnahme (Kanaldeckel tachymetrisch oder mit DGNSS, SAR-Passpunkte aus TerraSAR-X-Aufnahmen) mit den Ist-Koordinaten aus dem DOP erlaubt schließlich die Beurteilung der Lagegenauigkeit des DOP.

Im Untersuchungsgebiet München-Milbertshofen zeigte das DOP20 sowohl unter Verwendung der Kanaldeckel als auch der SAR-Passpunkte einen mittleren Lagefehler von unter 40 cm und erfüllt somit die Anforderungen der Arbeitsgemeinschaft der deutschen Vermessungsverwal-

tungen (AdV). Während die Beurteilung über Kanaldeckel weitestgehend automatisch abläuft, erfordert die Evaluierung über SAR-Passpunkte noch Handarbeit. Kanaldeckel sind in allen bebauten Gebieten vorhanden und können vor Ort bei Gelegenheit eingemessen werden. Eine kontinuierliche, geometrisch genaue Aufnahme von SAR-Passpunkten liegt jedoch noch in der Zukunft, wodurch sich das aktuelle Augenmerk auf das Datenarchiv von TerraSAR-X (und den weitgehend baugleichen spanischen Satelliten PAZ) richtet. Die Rechenzeit für die Bestimmung der Passpunkte für Kanaldeckel beträgt nur etwa 10 Sekunden pro 100 Kanaldeckel. Menschliches Eingreifen ist lediglich zur abschließenden Plausibilitätskontrolle erforderlich, sofern der Algorithmus Ausreißer detektiert. Das hier aufgezeigte Verfahren zum Abgleich eines DOP mit Kanaldeckel-Passpunkten eignet sich somit für den bayernweiten Einsatz.

Danksagung

Diese Studie wurde in Kooperation mit dem Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) durchgeführt. Die Autoren bedanken sich herzlich bei Dipl.-Ing. (FH) Stefan Kraft (Sachgebiet 853 Aerotriangulation des Referats 85 Luftbildmessung und Fernerkundung) für die fachliche Beratung und bei der Stadt München für die Bereitstellung der Kanaldeckel-Passpunkte.

Literatur

- AdV (2020): Produkt- und Qualitätsstandard für Digitale Orthophotos. Version 4.1, 2020. www.adv-online.de/AdV-Produkte/Geotopographie/Luftbildprodukte/binarywriterservlet?imgUid=75419114-249e-4711-1fea-f5203b36c4c2&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111, letzter Zugriff 01/2025.
- Aigner, S., Hauser, S., Schmitt, A. (2025): Pattern-Based Sinkhole Detection in Arid Zones Using Open Satellite Imagery: A Case Study Within Kazakhstan in 2023. *Sensors*, 25, 798, MDPI. DOI: 10.3390/s25030798.
- Balss, U., Krauß, T., Auer, S., Tian, J. (2023): 3-D Landmarks Derived from TerraSAR-X Data as Ground Control Information for Optical Imagery. In: TerraSAR-X/TanDEM-X Science Team Meeting 2023, DLR, Oberpfaffenhofen, Deutschland. <https://elib.dlr.de/198457/>, letzter Zugriff 02/2025.
- Balss, U., Runge, H., Suchandt, S., Cong, X.Y. (2016): Automated extraction of 3-D Ground Control Points from SAR images – an upcoming novel data product. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 5023–5026. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730310.
- Commandre, B., En-Nejjary, D., Pibre, L., Chaumont, M., Delenne, C., Chahinian, N. (2017): Manhole Cover Localization in Aerial Images With a Deep Learning Approach. In: international Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-1/W1. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-333-2017.
- Fischer, J. (2024): Qualitätskontrolle des TrueDOP unter Verwendung von terrestrischen Passpunkten und TerraSAR-X Landmarken. Bachelorarbeit. Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Fakultät für Geoinformation. <https://opus4.kobv.de/opus4-hm/frontdoor/index/index/docId/703>.
- Hahn, M. (1997): Automatic Control Point Measurement. In: Fritsch, D., Hobbie, D. (Eds.): Photogrammetric Week 97, Wichmann Verlag, Heidelberg. www.researchgate.net/publication/2917944_Automatic_Control_Point_Measurement, letzter Zugriff 02/2025.

- Henjes, B. (2023): Persönliche Kommunikation, 10/2023.
- Hisdesat (2025): PAZ. www.hisdesat.es/en/satelites_observ-paz/, letzter Zugriff 01/2025.
- Kraft, S. (2023): Persönliche Kommunikation und Kommunikation per E-Mail.
- Krauß, T., Kurz, F., Runge, H. (2022): Automatic Pole Detection in Aerial and Satellite Imagery for precise Image Registration with SAR Ground Control Points. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus Publications, V-1-22, 85–91. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2022-85-2022.
- Kurz, F., Krauß, T., Runge, H., Rosenbaum, D., d'Angelo, P. (2019): Precise Aerial Image Orientation Using SAR Ground Control Points for Mapping of Urban Landmarks. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, 61–66. *ISPRS Geospatial Week 2019*, Enschede, Niederlande. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-61-2019.
- LDBV (2018): Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Faltblatt Luftbildprodukte. www.ldbv.bayern.de/file/pdf/1039/Faltblatt-Luftbildprodukte.pdf, letzter Zugriff 01/2025.
- LDBV (2025): OpenData – Kostenfreie Geodaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung. <https://geodaten.bayern.de/opengeodata/>, letzter Zugriff 02/2025.
- Mattheuwsen, L., Vergauwen, M. (2020): Manhole Cover Detection on Rasterized Mobile Mapping Point Cloud Data Using Transfer Learned Fully Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing*, 12, 3820, MDPI. DOI: 10.3390/rs12223820.
- Planetek Italia (2024): SEN3GCP – Sentinel for 3D Ground Control Point. <https://eo4society.esa.int/projects/sen3gcp/>, letzter Zugriff 02/2025.
- Schmitt, A. (2016): Multiscale and Multidirectional Multilooking for SAR Image Enhancement. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, 54, 9, 5117–5134. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2555624.
- Schmitt, A., Wendleder, A., Kleynmans, R., Hell, M., Roth, A., Hinz, S. (2020): Multi-Source and Multi-Temporal Image Fusion on Hypercomplex Bases. *Remote Sensing*, 12, 6, 1–37, MDPI. DOI: 10.3390/rs12060943.
- Suchandt, S., Balss, U. (2024): Precise 3-D Object Positioning for Public Road Pole Cadasters Using TerraSAR-X & Geodetic SAR Processing. *GeoDPA – International Conference on Geoinformation Data, Processing and Applications*, 2024, Oldenburg, Deutschland. <https://elib.dlr.de/205591/1/GeoDPA-2024-Suchandt-et-al-3D-Object-Positioning.pdf>, letzter Zugriff 02/2025.
- Wang, D., Huang, Y. (2024): Manhole Cover Classification Based on Super-Resolution Reconstruction of Unmanned Aerial Vehicle Aerial Imagery. *Applied Sciences*, 14, 2769, MDPI. DOI: 10.3390/app14072769.
- Yamaguchi, T., Mizutani, T. (2021): Detection and localization of manhole and joint covers in radar images by support vector machine and Hough transform, *Automation in Construction*, 126, 103651, Elsevier. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103651.

Kontakt

Jasmin Fischer (B.Eng.) | Prof. Dr.-Ing. Andreas Schmitt
Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Fakultät für Geoinformation
Institut für Anwendungen des maschinellen Lernens und intelligenter Systeme (IAMLIS)
Karlstraße 6, 80333 München
andreas.schmitt@hm.edu

Dr.-Ing. Stefan Auer | Dr. phil. nat. Ulrich Balss
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Methodik der Fernerkundung
Münchener Straße 20, 82234 Weßling
stefan.auer@dlr.de | ulrich.balss@dlr.de