

Verbesserung der Geometrie von Satellitenbildern durch Höhenmodelle

KARSTEN JACOBSEN¹

Zusammenfassung: Nicht alle hochauflösenden optischen Satellitenbildkameras haben eine ausreichende und stabile Kalibrierung. In Flugrichtung hängt die Bildgeometrie von der relativen Genauigkeit und Frequenz der Winkelbestimmung ab. Nach einer schnellen Orientierungsänderung kann es zu Schwingungen kommen, die nicht immer ausreichend erfasst werden und in den rationalen Polynomkoeffizienten, die die Sensororientierung ausdrücken, berücksichtigt sind. Die original bestimmten Sensorrotationen werden meistens nicht mit den Bilddaten ausgeliefert und können dementsprechend nicht für eine geometrische Rekonstruktion der Bildorientierung genutzt werden. Auf Satellitenstereomodellen basierende digitale Höhenmodelle können durch nicht ausreichend bekannte Bildorientierungen mit üblicher Anzahl von Passpunkten zur Biaskorrektur deformiert und nicht ausreichend horizontiert sein. Systematische, teilweise szintillierende, Differenzen der y -Parallaxen der Vorwärtsschnitte zur Objektkoordinatenbestimmung der Höhenmodelle deuten auf systematische Höhenfehler hin.

Auf verschiedenen hochauflösenden optischen Satelliten basierende Höhenmodelle wurden mittels nahezu weltweiter Höhenmodelle auf systematische Höhenfehler untersucht und korrigiert, bevor sie mit ausreichend genauen Referenzhöhenmodellen verglichen wurden. Als Höhenmodelle zur Korrektur wurden die kostenlos verfügbaren digitalen Oberflächenmodelle (DOM) von SRTM, ASTER GDEM2 und das ALOS World 3D (AW3D30) mit einer Bogensekunde Rasterweite verwendet. AW3D30 hat zwar die größte Höhengenaugigkeit dieser nahezu weltweiten Höhenmodelle, zur Bestimmung der systematischen Höhenfehler reichen jedoch alle aus. Die ermittelten systematischen Höhenfehler sind durch Tiefpassfilterung zu verbessern um einen Einfluss lokal veränderter Vegetationshöhe zu reduzieren.

1 Einleitung

Die innere Orientierung optischer Satellitenkameras wird vor dem Satellitenstart kalibriert. Durch die Startbeschleunigung, Temperatureinflüsse und Austrocknungseffekte kann sie sich später verändern und erfordert eine periodische Überprüfung im Weltraum. Die innere Orientierung ist durch die Sensorkonfiguration komplex, so werden z.B. die panchromatischen Zeilen von WorldView-2 und WorldView-3 aus 60 CCD-Elementen zusammengesetzt (Abb. 1).

Da die CCD-Elemente nicht lückenlos aneinanderstoßen können, sind sie in 2 Gruppen aufgeteilt, die in Aufnahmezeitpunkt gegeneinander versetzt sind. Um eine einheitliche Zeile zusammensetzen zu können, müssen die Teilbilder leicht unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte miteinander kombiniert werden. Die innere Orientierung ist somit auch von der äußeren Orientierung abhängig, die sich durch ein leicht verändertes Aufnahmezentrum und veränderte Aufnahmezeitpunkte bemerkbar machen kann.

¹ Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover,
E-Mail: jacobsen@ipi.uni-hannover.de

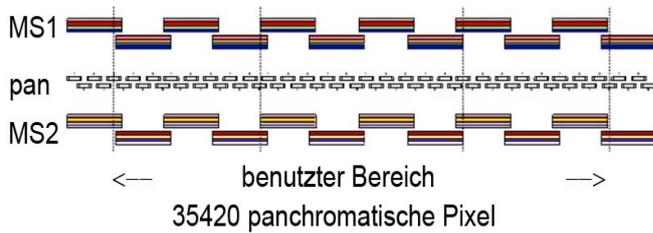


Abb. 1: CCD-Konfiguration von WorldView-2 und WorldView-3
pan = panchromatisch
MS1, MS2 = multispektral

Die erste Information über eine mögliche Beeinflussung eines Höhenmodells durch Probleme der inneren und der äußeren Orientierung liefern die y -Parallaxen der Vorwärtsschnitte für die Punkte der Höhenmodelle nach der automatischen Bildzuordnung. Abbildung 2 zeigt die systematischen y -Parallaxen für die Berechnung eines WorldView-2 Höhenmodells nach Mittelbildung in X - und Y -Richtung. Die gruppenweise Mittelbildung der y -Parallaxen in der X -Richtung (quer zum Orbit) zeigt Widersprüche mit der Frequenz der Länge der einzelnen CCD-Elemente was sich durch eine hochfrequente Vibration des Satelliten erklären lässt, während die Mittelwerte in Y -Richtung auf Fehler der absoluten Orientierung hindeuten. Das östliche Nachbarmodell des WorldView-2-Stereopaars, das während der gleichen 1,5 Minuten wie das Modell 2 (Abb. 2) aufgenommen wurde, zeigt als Funktion von X die gleiche Frequenz und Amplitude. In der Y -Richtung sind ähnliche Werte wie im Modell 2 vorhanden.

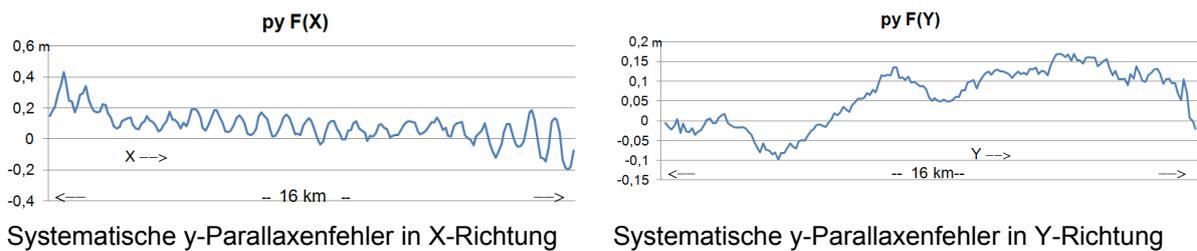


Abb. 2: Systematische Parallaxenfehler WorldView-2, Karaburun, Modell 2

Systematische Sensororientierungsfehler lassen auch systematische Höhenfehler erwarten. Vom chinesischen optischen Stereosatelliten Ziyuan-3 wird über eine begrenzte Genauigkeit der Kalibrierung und der direkten Sensororientierung berichtet (PAN & ZOU 2016; JIANG et al. 2015a; JIANG et al. 2015b; RADHADEVI et al. 2016; JACOBSEN 2016a). Satellitenvibrationen nach schneller Bewegung von einem Aufnahmegebiet zum nächsten können die Satellitenbildgeometrie beeinflussen. Wenn hochfrequente Änderungen zwar durch die Kreisel registriert wurden, aber nicht direkt in der Bildgeometrie berücksichtigt sind, können sie nicht durch die rationalen Polynomkoeffizienten (RPC) dritter Ordnung ausreichend berücksichtigt werden und verursachen systematische Höhenfehler. Diese lassen sich allerdings durch nahezu weltweite Referenzhöhenmodelle, wie SRTM, ASTER GDEM2 und AW3D30, nachweisen und a posteriori berücksichtigen.

Eine Reihe von Höhenmodellen, erstellt aus optischen Satellitenbildpaaren, wurde durch Vergleich mit Referenzhöhenmodellen auf systematische Fehler untersucht und korrigiert. Hier stellt sich das Problem, dass SRTM, ASTER GDEM2 und AW3D30 digitale Oberflächenmodelle sind, die die Höhen der sichtbaren Oberflächen repräsentieren. Das SRTM DOM basiert auf interferometrischen synthetischen Apertur-Radar (InSAR) im C-Band. Das C-Band Radar dringt nur geringfügig in die Vegetation ein. Die Vegetationshöhe kann sich seit der Aufnahme im Februar 2000 verändert haben. ASTER GDEM2 nutzt alle brauchbaren optischen

Stereoaufnahmen von Terra ASTER, die seit Dezember 1999 aufgenommen wurden und präsentiert damit eine mittlere Vegetationshöhe des gesamten Aufnahmezeitraums. Für das seit Mai 2016 verfügbare AW3D30 (JACOBSSEN 2016b) wurden alle brauchbaren ALOS PRISM Tri-Stereoaufnahmen verwendet, aufgenommen vom Januar 2006 bis zum May 2011. Die Oberflächendefinition ist stark von der Bodenauflösung abhängig, die bei Terra ASTER 15m und bei ALOS PRISM 2,5m beträgt. Alle drei Höhenmodelle haben einen Punktabstand von 1 arcsec, entsprechend etwa 31m am Äquator. ASTER GDEM2 ist nicht so genau wie das SRTM DOM und AW3D30 (Jacobsen 2016b) weswegen es im Folgenden nicht weiter erwähnt wird. Bei allen durchgeführten Untersuchungen wurden dreidimensionale Lageabweichungen der Höhenmodelle durch Ausgleichung a priori berücksichtigt.

2 Systematische Fehler digitaler Höhenmodelle aus Satellitenbildern

2.1 Ziyuan-3

Mittels der beiden äußeren Aufnahmen des chinesischen Tri-Stereo-Satelliten Ziyuan-3, die 3,4m Bodenauflösung haben, wurde mit den ISPRS-Testdaten Sainte-Maxime ein Höhenmodell durch Kleinste-Quadrate-Bildzuordnung erstellt. Die Bildorientierung erfolgte, wie üblich, durch bias-korrigierte rationale Polynomkoeffizienten (RPC), andere Informationen über die direkte Sensororientierung lagen nicht vor.

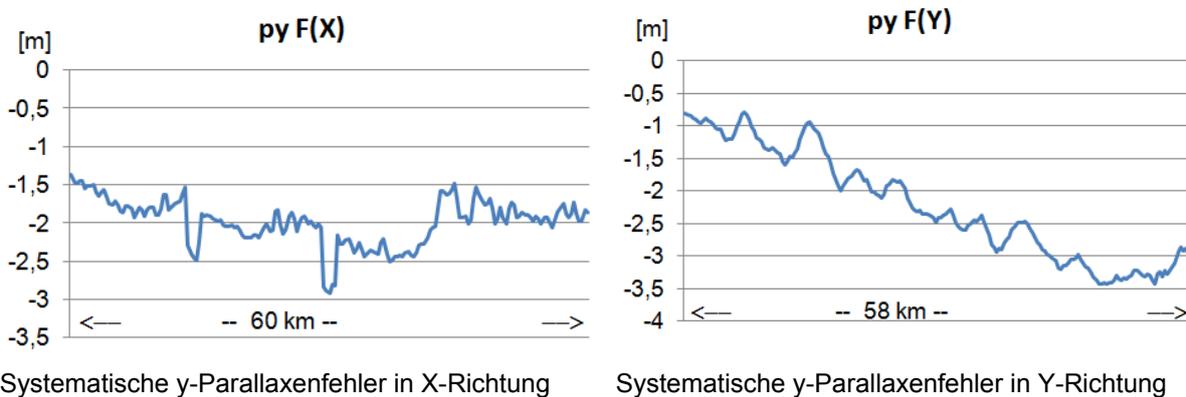


Abb. 3: Systematische y-Parallaxenfehler des Ziyuan-3 Stereomodells Sainte-Maxime

Die systematischen y-Parallaxenfehler (Abb. 3) unterscheiden sich von denen der von WorldView-2 (Abb. 2). Es treten zwar auch in X-Richtung Deformationen auf, jedoch zeigen sich periodischen Einflüsse hauptsächlich in Y-Richtung (in Orbit-Richtung). Der Größenunterschied der Parallaxenabweichungen ist durch die Bodenauflösung von 0,5m bei WorldView-2 und 3,4m bei Ziyuan-3 zu erklären. Der leichte Trend der y-Parallaxen in X-Richtung bei WorldView-2 und der starke Trend in Y-Richtung bei Ziyuan-3, sind durch Orientierungsunsicherheiten hervorgerufen. Das Ziyuan-3 DOM wurde mit einem Referenz-DOM des französischen IGN verglichen, das eine Standardabweichung von etwa 20cm hat. Es basiert auf digitalen Luftbildaufnahmen die fast zeitgleich mit den Ziyuan-3 Bildern aufgenommen wurden und 10cm Bodenauflösung haben. Außerdem sind in Abbildung 4 die systematischen Höhenfehler gegenüber dem SRTM-DOM und gegenüber AW3D30 dargestellt. Die systematischen Höhenfehler in X- und Y-Richtung wurden

durch ein gleitendes Polynom dritter Ordnung geglättet, das die 9 nächst benachbarten Werte berücksichtigt, um den zufälligen Einfluss der Vegetationsänderungen zu reduzieren.

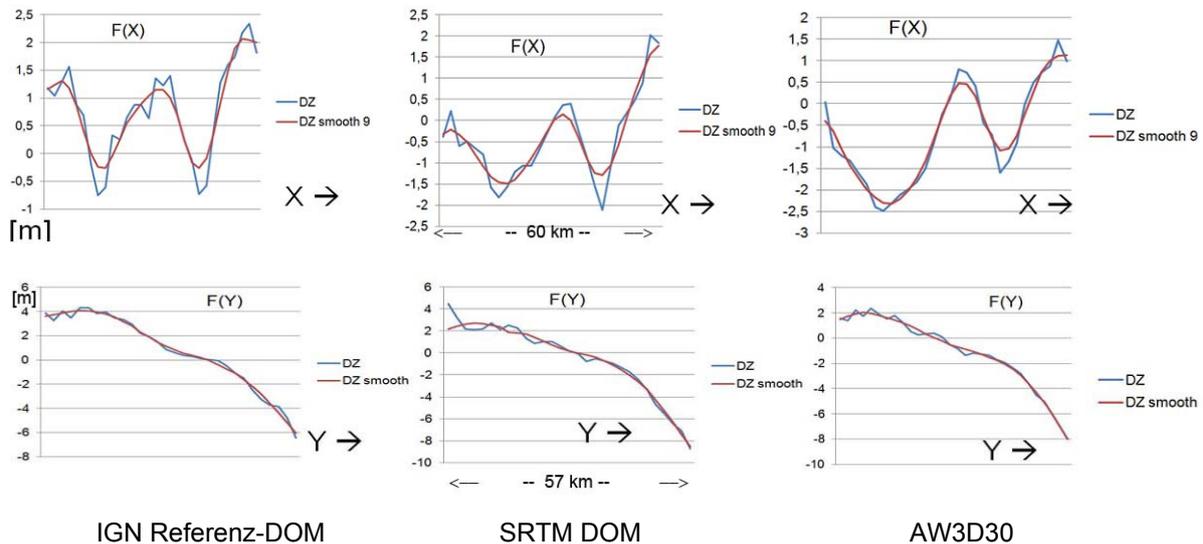


Abb. 4: Systematische Höhenfehler des Ziyuan-3-DOM gegenüber den Referenz-DOM

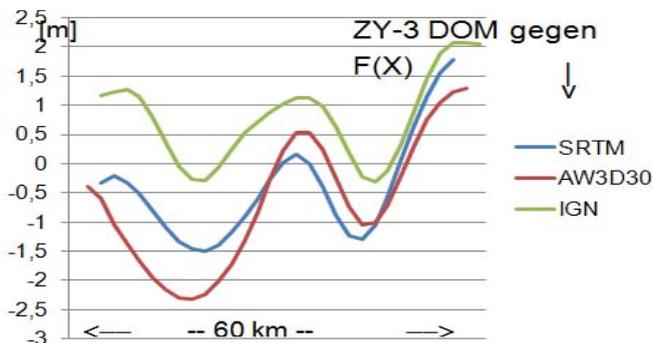


Abb. 5: Geglättete systematische Höhenfehler des Ziyuan-3 Oberflächenmodells gegenüber 3 Referenz-DOM

Während in der Bahnrichtung (Y) eine Neigung des Höhenmodells dominiert, sind in Zeilenrichtung (X) klare Undulationen erkennbar, die, wenn leichte Neigungen und ein Höhenversatz berücksichtigt werden, sehr ähnlich sind (Abb. 5).

Tab. 1: Genauigkeitsmaße für die Differenz gegenüber dem Ziyuan-3 Höhenmodell

Höhenmodell	SZ original	NMAD original	SZ nach Verbesserung	NMAD Nach Verbesserung
IGN	5,33 m	5,06 m	4,34 m	3,35 m
SRTM	5,78 m	5,32 m	4,98 m	3,99 m
AW3D30	4,90 m	4,54 m	3,75 m	3,22 m

Tabelle 1 zeigt die Standardabweichung der Höhendifferenzen (SZ) die „normalized median absolute difference“ (NMAD) der ursprünglichen und der um die systematischen Höhenfehler

verbesserten Höhenmodelle gegenüber den Referenzhöhenmodellen. SZ reduziert sich im Mittel um 19% und NMAD um 29% durch Korrektur um die systematischen Höhenfehler. Die Normalverteilung basierend auf NMAD beschreibt in allen Fällen die Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen besser als die Normalverteilung basierend auf SZ (Abb. 7).

Tabelle 1 drückt die innere Genauigkeit aus, deswegen wurde das Ziyuan-3 Höhenmodell mittels der systematischen Höhenfehler von SRTM und AW3D30 verbessert und das Ergebnis mit dem IGN Referenzhöhenmodell verglichen (Tabelle 2). Die erreichte Höhengenaugkeit im Gelände mit Neigungen kleiner als 10% liegt unter der Bodenauflösung von 3,4m und ist damit sehr zufriedenstellend.

Tab. 2: Genauigkeitsmaße für das Ziyuan-3 DOM verbessert um systematische Höhenfehler gegenüber SRTM und AW3D30, verglichen mit dem IGN Referenz-DOM in offenen Gebieten und zusätzlich für die flacheren Bereiche mit Geländeneigungen < 10%

Referenz zur Verbesserung	SZ	NMAD	SZ für $\alpha < 10\%$	NMAD für $\alpha < 10\%$
SRTM	4,53 m	2,86 m	3,24 m	2,76 m
AW3D30	3,62 m	2,62 m	2,86 m	2,62 m

Durch Verbesserung mit dem AW3D30 wurden bessere Genauigkeiten als mit dem SRTM DOM erreicht. Das entspricht der höheren Genauigkeit von AW3D30 gegenüber dem SRTM DOM (Jacobsen 2016b). Der Unterschied im NMAD für flache Gebiete beträgt allerdings nur 5%.

2.2 SPOT-5

Auch das SPOT-5 Höhenmodell Zonguldak zeigt in X-Richtung ähnliche systematische Höhenfehler wie das Ziyuan-3 DOM (Abb. 6), wogegen in der Bahnrichtung nur eine geringfügige Neigung vorhanden ist.

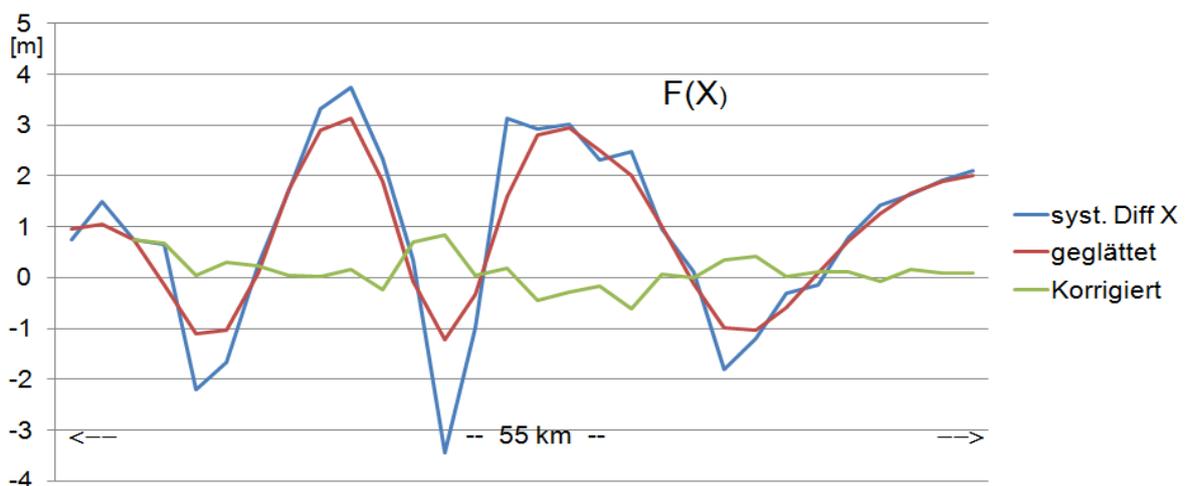


Abb. 6: Systematische Höhenfehler des SPOT-5 Höhenmodells Zonguldak gegen AW3D30 in X-Richtung

Tabelle 3: Genauigkeitsmaße des SPOT-5 DOM vor und nach Verbesserung um systematische Fehler

	SZ	NMAD	SZ für $\alpha < 10\%$	NMAD für $\alpha < 10\%$
--	----	------	------------------------	--------------------------

ursprünglich	7,76 m	5,86 m	6,79 m	5,02 m
Nach Verbesserung	7,32 m	5,10 m	6,23 m	4,13 m

Die nach Korrektur der systematischen Fehler verbleibenden Restsystematiken (Abb. 6 „korrigiert“) sind klein und in Relation zu 5m Bodenauflösung vernachlässigbar. Durch die Verbesserung um die systematischen Höhenfehler reduzieren sich die Standardabweichungen um 6% bzw. 8% und NMAD um 13% bzw. 18%. Die geringere Verbesserung der Standardabweichung und der deutliche Unterschied zwischen SZ und NMAD sind durch den höheren Anteil großer Differenzen als entsprechend der Normalverteilung zu erklären (Abb. 7), die sich besonders auf die Standardabweichung auswirken. Abbildung 7 verdeutlicht auch die bessere Approximation der Häufigkeitsverteilung durch die Normalverteilung basierend auf NMAD als durch SZ. Im Mittel weichen hier die Normalverteilung basierend auf NMAD um 4,5% und SZ um 21,9% von der Häufigkeitsverteilung ab.

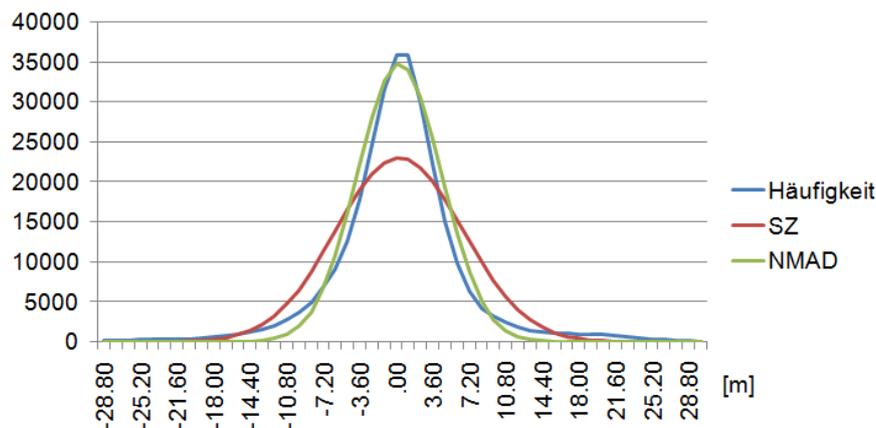


Abb. 7: Häufigkeitsverteilung der SPOT-5 Höhendifferenzen gegenüber dem Referenz-DOM mit überlagelter Normalverteilung basierend auf SZ und NMAD

2.3 WorldView-2

Ein Teil eines WorldView-2 (mit 0.5m Bodenpixel vorhanden) Oberflächenmodells wurde mit einem Laserscanner-Oberflächenmodell verglichen. Da sich einige Steinbrüche in dem Gebiet verändert hatten und sich in den bewaldeten Teilen die Oberflächendefinition zwischen Laserscanner und optischer Bildzuordnung deutlich unterscheidet, wurden die entsprechenden Flächen aus der Untersuchung herausgenommen. Auch hier zeigen sich klare Auswirkung von nicht berücksichtigten Satellitenvibrationen (Abb. 8 und Abb. 2). In Bahnrichtung (Y) ist nur eine gleichmäßige Neigung des DOM vorhanden.

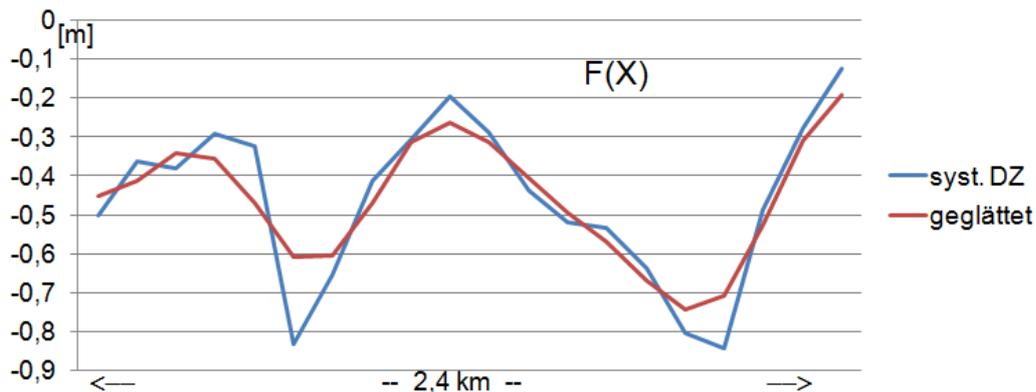


Abb. 8: Systematische Höhenfehler eines Teiles eines WorldView-2 DOM, Karaburun

Tab. 4: Genauigkeitsmaße des WorldView-2 DOM vor und nach Verbesserung um systematische Fehler

	SZ	NMAD	SZ für $\alpha < 10\%$	NMAD für $\alpha < 10\%$
ursprünglich	1,24 m	0,87 m	0,96 m	0,65 m
Nach Verbesserung	1,16 m	0,74 m	0,88 m	0,55 m

2.4 Cartosat-1

Das mittels der Stereoaufnahmen von Cartosat-1 (2,5m Bodenpixel) erstellte Oberflächenmodell in Jordanien zeigt eine gleichmäßige und keine periodische Deformation in X-Richtung (Abb. 9). Die Standardabweichungen werden durch ihre Korrektur um etwa 7% und NMAD um 15% verringert.

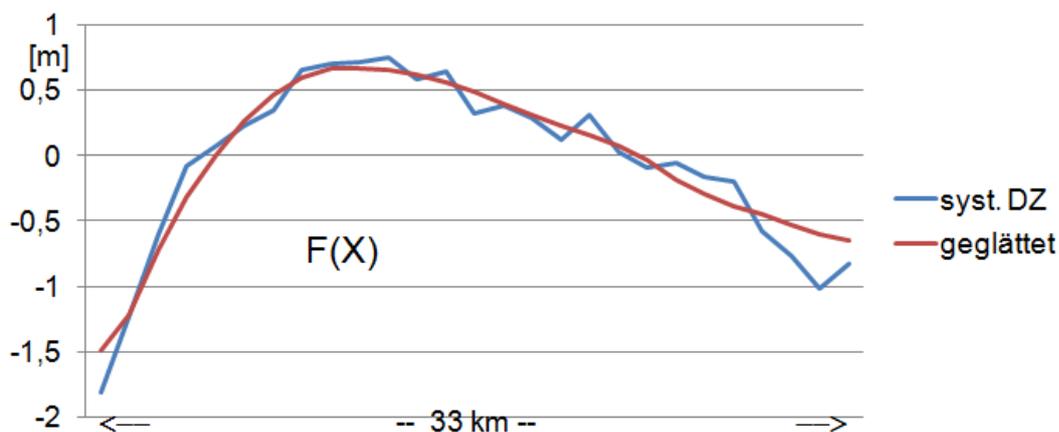


Abb. 9: Systematische Höhenfehler des Cartosat-1 DOM als Funktion von X, Jordanien

Tab. 5: Genauigkeitsmaße eines Cartosat-1 DOM vor und nach Verbesserung um systematische Fehler

	SZ	NMAD	SZ für $\alpha < 10\%$	NMAD für $\alpha < 10\%$
ursprünglich	3,11 m	2,49 m	2,55 m	2,03 m
Nach Verbesserung	2,85 m	1,99 m	2,28 m	1,52 m

3 Zusammenfassung

Die gezeigten Beispiele demonstrieren, dass nicht nur Höhenmodelle die mittels des Ziyuan-3 erstellt wurden, über dessen eingeschränkter Orientierungsgenauigkeit von chinesischer Seite berichtet wird, sondern auch Höhenmodelle anderer optischer Satelliten deformiert sein können. Grundsätzlich müssen die Deformationen in Relation zur Objektpixelgröße und damit zur erreichbaren Höhengenaugkeit betrachtet werden. Um die geometrische Genauigkeit bestimmen zu können dürfen auch nur DOM mit Referenz-DOM oder Geländemodelle mit Referenzgeländemodellen verglichen werden und nicht, wie es in der Literatur häufig geschieht, DOM mit Referenzgeländemodellen verglichen werden. Die Vegetationshöhe bestimmt die Definition der Höhenmodelle und nicht deren Genauigkeit.

Bei den oben dargestellten Höhenmodellen treten vor allem in Zeilenrichtung höher frequente Deformationen auf, die nicht durch die innere Orientierung, sondern durch den Versatz der CCD-Einheiten (Abb. 1) in Verbindung mit Satellitenvibrationen erklärt werden können. In Bahnrichtung zeigen sich dagegen hauptsächlich Modellneigungen und großräumige Deformationen. Alle sehr hoch auflösenden optischen Satelliten haben „Transfer Delay and Integration“ (TDI) Sensoren, die die Ladung während der Aufnahme entsprechend der Vorwärtsbewegung in die Nachbarzeilen verschieben und so die Objektreflexion über eine wählbare Zeit integrieren können. Satellitenvibrationen reduzieren deswegen die Bildqualität. Wogegen eine leicht reduzierte Bildqualität bei flächenbasierten Bildzuordnungen praktisch keine Reduktion der Zuordnungsqualität bewirkt.

Durch die Korrektur der Höhenmodelldeformationen treten die in Tabelle 6 aufgezeichneten Verbesserungen ein. Der größte Anteil der Verbesserungen tritt durch die Beseitigung der Modellneigungen und nicht durch hochfrequente Anteile ein. Die Modellneigungen können allerdings auch durch eine Stereorientierung der Höhenmodelle erreicht werden (D'ANGELO 2013), wogegen sie hier entsprechend der üblichen Methode separat für die einzelnen Bilder mittels bias-korrigierter RPC durchgeführt wurde.

Tab. 6: Genauigkeitssteigerung der Höhenmodelle durch Korrektur um systematische Fehler

	Ziyuan-3	SPOT-5	WorldView-2	Cartosat-1
SZ	19%	7%	7%	9%
NMAD	29%	15%	15%	22%

NMAD wird stärker verbessert als SZ, da SZ stärker durch größere Differenzen beeinträchtigt wird und diese häufiger, als der Normalverteilung entsprechend, auftreten (Abb. 7). Auch wenn der Hauptanteil der systematischen Fehler durch die Modellneigungen hervorgerufen wird, dürfen die nicht-linearen Fehler nicht vernachlässigt werden da sie bei Ziyuan-3 30% - 60%, bei SPOT-5 60%, bei WorldView-2 30% und bei Cartosat-1 bis zu 50% erreichen. Eine Korrektur mittels SRTM-DOM oder AW3D30 stellt keinen großen Aufwand dar. Ähnliche Probleme, wenn auch etwas kleiner, wurden auch bei anderen optischen Satelliten festgestellt (Jacobsen 2016a).

4 Literaturverzeichnis

D'ANGELO, P., 2013. Automatic orientation of large multi-temporal satellite image blocks. Proceedings of International Symposium on Satellite Mapping Technology and Application 2013, 1-6

- JACOBSEN, K., 2016a: Analysis and correction of systematic height model errors. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 333-339.
- JACOBSEN, K., 2016b: Ersatz des SRTM Oberflächenmodells durch AW3D30? *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 25*, Kersten, T. (Hrsg.), Tagungsband der 36. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Dreiländertagung vom 7.-9. Juni 2016 in Bern (auf CD), 80-88.
- JIANG, Y.H., ZHANG, G., TANG, X.M., LI, D., HUANG, W.C. & PAN, H.B., 2015a: Geometric Calibration and Accuracy Assessment of ZiYuan-3 Multispectral Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **52**(7), 4161-4172.
- JIANG, Y.H., ZHANG, G., TANG, X., LI, D.R., WANG, T., HUANG, W.C. & LI, L.T. 2015b: Improvement and Assessment of the Geometric Accuracy of Chinese High-Resolution Optical Satellites. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **8**(10), 4841-4852.
- PAN, H. & ZOU, Z., 2016: Penalized Spline: A General Robust Trajectory Model for Ziyuan-3 Satellite. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 365-372.
- RADHADEVI, P.V., SOLANKI, S.S., AKILAN, A., JYOTHI, M.V. & NAGASUBRAMANIAN, V., 2016: Performance Assessment and Geometric Calibration of Resourcesat-2. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 237-244.
- TADONO, T., ISHIDA, H., ODA, F., NAITO, S., MINAKAWA, K. & IWAMOTO, H., 2014: Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-4, 71-76.
- TAKAKU, J., TADONO, T. & TSUTSUI, K., 2014: Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-4, 243-248.