

Hochauflösende Satellitenbilder – ein gleitender Übergang zu Luftbildern

Karsten Jacobsen, Hannover

ZUSAMMENFASSUNG

Zivil verfügbare, hoch auflösende Satellitenbilder haben heute einen Informationsgehalt, der dem von Luftbildern mittleren Maßstabs entspricht. In naher Zukunft wird die Objektpixelgröße bis 41cm verkleinert werden, damit können topographische Karten im Maßstab 1 : 5000 ohne Probleme erstellt werden. Die Anzahl hoch auflösender, optisch abbildender Satelliten hat sich in den letzten Jahren stark erhöht und wird sich noch weiter erhöhen. Die direkte Sensororientierung der Satelliten durch eine Kombination von GPS, Kreisel- und Sternensensoren ermöglicht eine Orientierung der Aufnahmen ohne Passpunkte mit einer Genauigkeit von bis zu 4m. Mit klar definierten Passpunkten kann eine Sub-Pixelgenauigkeit erreicht werden. Das am häufigsten erstellte Produkt sind Orthofotos; für ihre Erstellung sind Höhenmodelle erforderlich. Teilweise können die nahezu weltweit kostenlos verfügbaren Höhenmodelle der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) benutzt werden. Für höhere Genauigkeitsanforderungen und größere Ansprüche an die morphologischen Details lassen sich die Höhenmodelle aus Stereokombinationen der Satellitenaufnahmen ableiten. Das Problem der geringen Zahl von zeitnahen Stereoaufnahmen ist durch die 2005 und 2006 gestarteten Stereosensoren Cartosat-1 und ALOS/PRISM gelöst. Die Vektordatenerfassung für ein GIS ist unproblematisch, es zeigte sich aber auch, dass die Aufnahmebedingungen berücksichtigt werden sollten. Eine zu niedrige Sonnenhöhe erschwert die Auswertung in städtischen Gebieten erheblich.

1 EINFÜHRUNG

Die zivil verfügbaren, hoch auflösenden Satellitenbilder konkurrieren heute mit Luftbildern. Für die Erstellung topographischer Karten oder Orthofotos mittlerer und kleiner Maßstäbe ist der schnelle Zugriff auf die Bilder, die finanzielle Situation und im Ausland häufig die Restriktionen des Einsatzes von Luftbildern von entscheidender Bedeutung. Als gleitender Übergang zwischen den Luft- und den Weltraumbildern sind Drohnen (unmanned aerial vehicles = UAV) angekündigt, die mittels Sonnenkraft mehrere Monate in Flughöhen von 16km bis 20km verbleiben (high altitude long endurance = HALE). VITO, Belgien plant mittels mehrerer HALE UAV in Westeuropa während der Tageszeit kontinuierlich Aufnahmen mit 20cm Objektpixelgröße zu erstellen. Damit ließen sich Karten im Präsentationsmaßstab 1 : 2000 erstellen.

2 HOCHAUFLÖSENDE OPTISCHE WELTRAUMSENSOREN

Die neueren Erdbeobachtungssatelliten sind mit schnell drehenden Kreiselssystemen ausgestattet, die sich bei positiver oder negativer Beschleunigung mit einem Moment auf den Satelliten auswirken und diesen drehen. Damit ist eine schnelle und präzise Drehung in beliebige Richtung möglich und es können nicht nur Nadiraufnahmen erstellt werden. Teilweise erfolgt eine Drehung kontinuierlich während der Aufnahme, wodurch die Abbildungsgeometrie aber nicht negativ beeinflusst wird.

In der üblichen Flughöhe von 450km bis 680km haben die Satelliten eine Geschwindigkeit, projiziert auf die Erdoberfläche, von etwa 7km/sec. Für die Aufnahme eines Pixels stehen bei einer Bodenpixelgröße von 1m damit nur 0,14msec zur Verfügung. Das ist eine zu kurze Zeit für eine akzeptable Bildqualität. Einige Satelliten sind deswegen mit Ladungsverschiebungssensoren (transfer delay and integration = TDI) ausgestattet. Statt einer CCD-Zeile verfügen sie über schmale CCD-Flächensensoren. Die in einem CCD-Element durch die Belichtung aufgebaute Ladung wird mit der Geschwindigkeit der Bildbewegung an das benachbarte CCD-Element verschoben, wo die gleiche Objektfläche wie zuvor weitere Ladung hinzufügt. Üblicherweise wird so die Strahlungsenergie über 13 CCD-Elemente summiert und führt zu guter Bildqualität. Satelliten ohne

Ladungsverschiebungssensoren verringern die Winkelgeschwindigkeit der Abbildung durch permanente Rotation, so erstellt um Beispiel EROS-A eine Szene von 12km Länge über eine Satellitenbahnlänge von etwa 50km.

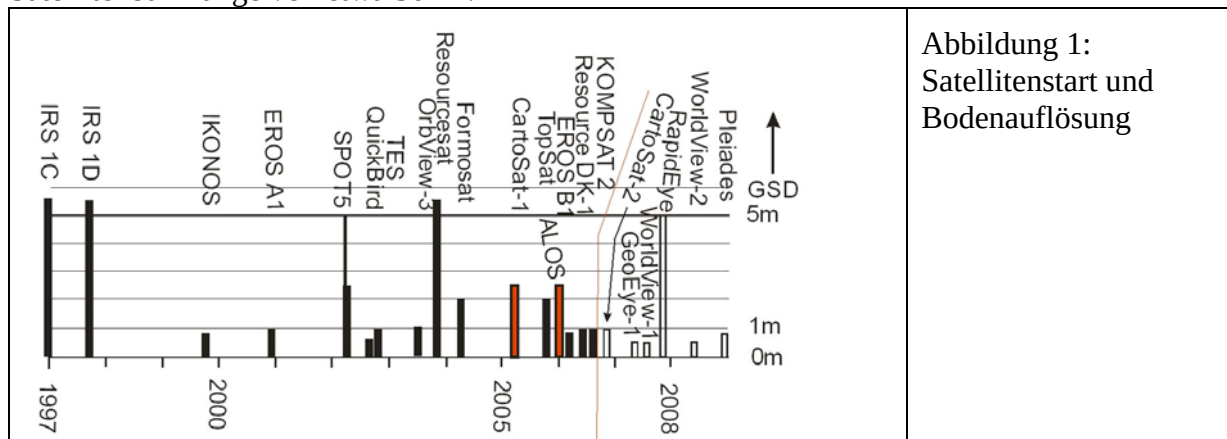


Abbildung 1:
Satellitenstart und
Bodenauflösung

System	Start	Objektpixel [m] pan / MS	Streifen- breite [km]	Anmerkungen
SPOT 5 Frankreich	2002	5 / 10 (2.5)	60	+/-27° quer zur Bahn 2 CCD-Zeilen für pan
HRS (stereo)		5*10	120	23° vor, 23° zurück
MOMS 02, Deutschland	1993	4.5 / 13.5	37 / 78	Nadir + 21.5° vor + 21.5° zurück
MOMS-2P Deutschland	1996	6 / 18	48 / 100	wie MOMS 02
IRS-1C Indien	1995	5.7 / 23	70 / 142	+/-26° quer zur Bahn
IRS-1D Indien	1997	5.7 / 23	wie IRS-1C	
IRS P6 Indien	2003	5.7 MS	24 / 70	+/-26° quer zur Bahn
Resourcesat				
KOMPSAT-1, Südkorea	1999	6.6 pan	17	+/-45° quer zur Bahn
IKONOS-2 USA	1999	0.82 / 3.24	11	frei beweglich, TDI
SpaceImage				
EROS A1, Israel	2000	1.8 pan	12.6	frei beweglich
TES Indien	2001	1 pan	15	frei beweglich
QuickBird-2 USA	2002	0.62 / 2.48	17	frei beweglich, TDI
DigitalGlobe				
OrbView-3 USA	2003	1 / 4	8	frei beweglich, staggered CCDs
OrbImage				
FORMOSAT-2 Taiwan	2004	2 / 8	24	frei beweglich, TDI
Cartosat-1, Indien (stereo)	2005	2.5	30	26° vor, 5° zurück
TopSat, Großbritannien	2005	2.5 / 5	15 / 10	frei beweglich, TDI
ALOS, Japan (stereo)	2006	2.5 / 10	35	Nadir, 24° vor, 24° zurück
EROS-B1, Israel	2006	0.7	7	frei beweglich, TDI
ResourceSat DK-1, Russland	2006	1 / 3	28	frei beweglich, TDI Höhe 356 – 585km Inklination 69.9°
KOMPSAT-2, Südkorea	2006	1 / 4	15	frei beweglich, TDI

Tabelle 1: hoch auflösende optische Weltraumsensoren
MS = multispektral pan = panchromatisch

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, hat die Anzahl der hoch auflösenden Satelliten seit 2005 stark zugenommen. Bislang wurden 2006 drei Satelliten mit Objektpixeln von 1m und kleiner gestartet, ein weiterer ist angekündigt. In den nächsten Jahren werden weitere folgen, teilweise auch von Ländern wie Thailand und Malaysia, die in diesem Bereich bislang noch nicht aktiv waren. Bemerkenswert sind die für 2007 angekündigten Satelliten WorldView-1 und GeoEye-1, die Objektpixel von 45cm und 41cm liefern werden und eine deutlich erhöhte Aufnahmekapazität haben. Von Deutschland und Italien sind Synthetische Apertur Radarsatelliten mit bislang zivil nicht verfügbaren 1m Objektpixelgröße für 2007 angekündigt. Radaraufnahmen haben zwar nicht den gleichen Informationsgehalt wie optische Bilder, sie sind aber von der Wolkenbedeckung unabhängig.

3 BILDORIENTIERUNG

3.1 Allgemeines

Die meisten Weltraumaufnahmen werden als nahezu Originalaufnahmen, die nur um die innere Orientierung verbessert sind, oder als genähert geo-referenzierte Bilder, die auf eine Ebene konstanter Höhe projiziert sind, vertrieben. Die Kosten für beide Produkte sind etwa gleich, wogegen Orthofotos, für die das Höhenmodell vom Besteller geliefert werden muss, sehr viel teurer sind. Mit den Bildern werden Informationen über die direkte Sensororientierung geliefert, meist als geozentrische Koordinaten der Bahn zusammen mit Winkelinformation. Leider gibt es für diese Daten keine Norm, so dass das Format, aber auch die Art der Daten für jeden Satelliten anders ist. Seit kurzer Zeit hat sich die zusätzliche Lieferung der genäherten Satellitenorientierung in Form von rationalen Polynomkoeffizienten (RPC) durchgesetzt. Sie beschreiben die Sensorkoordinaten als Funktion der geografischen Objektkoordinaten (Formel 1). Normalerweise werden Polynome dritten Grades benutzt, die mit $4 * 20$ Koeffizienten die geometrischen Zusammenhänge beschreiben.

$x_{ij} = \frac{Pi1(X,Y,Z)j}{Pi2(X,Y,Z)j}$	$y_{ij} = \frac{Pi3(X,Y,Z)j}{Pi4(X,Y,Z)j}$
$Pn(X,Y,Z)j = a_1 + a_2*Y + a_3*X + a_4*Z + a_5*Y*X + a_6*Y*Z + a_7*X*Z + a_8*Y^2 + a_9*X^2 + a_{10}*Z^2 + a_{11}*Y*X*Z + a_{12}*Y^3 + a_{13}*Y*X^2 + a_{14}*Y*Z^2 + a_{15}*Y^2*X + a_{16}*X^3 + a_{17}*X*Z^2 + a_{18}*Y^2*Z + a_{19}*X^2*Z + a_{20}*Z^3$	
Formel 1: Rationale Polynomkoeffizienten x_{ij}, y_{ij} = Bildkoordinaten X, Y = geographische Objektkoordinaten Z = Höhe	

3.2 Orientierung von Bildern projiziert auf eine konstante Objekthöhe

Die genähert geo-referenzierten, auf eine konstante Objekthöhe projizierten Bilder, auch als Level 1B Produkte bezeichnet, werden etwas häufiger vertrieben als die Originalbilder. Zum Beispiel sind IKONOS-Bilder nur als Level 1B Produkte zu beziehen.

Im Institut für Photogrammetrie und Geoinformation wurden im Rahmen des Programmsystems BLUH Lösungen für die verschiedenen Produkte und Verfahren entwickelt. Dieses schließt die geometrisch strenge Orientierung mittels der rationalen Polynomkoeffizienten und die geometrische Rekonstruktion ein, wie auch die Näherungslösungen der dreidimensionalen Affintransformation und der direkten linearen Transformation (DLT). Mit Hilfe der RPC werden die Punktlagen nach der individuellen Höhe korrigiert; es folgt danach eine zweidimensionale Transformation auf Passpunkte. Bei IKONOS-Aufnahmen reicht eine einfache Verschiebung, während die anderen Satelliten eine Affintransformation benötigen. In dem hannoverschen Programm CORIKON

werden die einzelnen Transformationsparameter auf Signifikanz untersucht und können individuell ausgeschlossen werden.

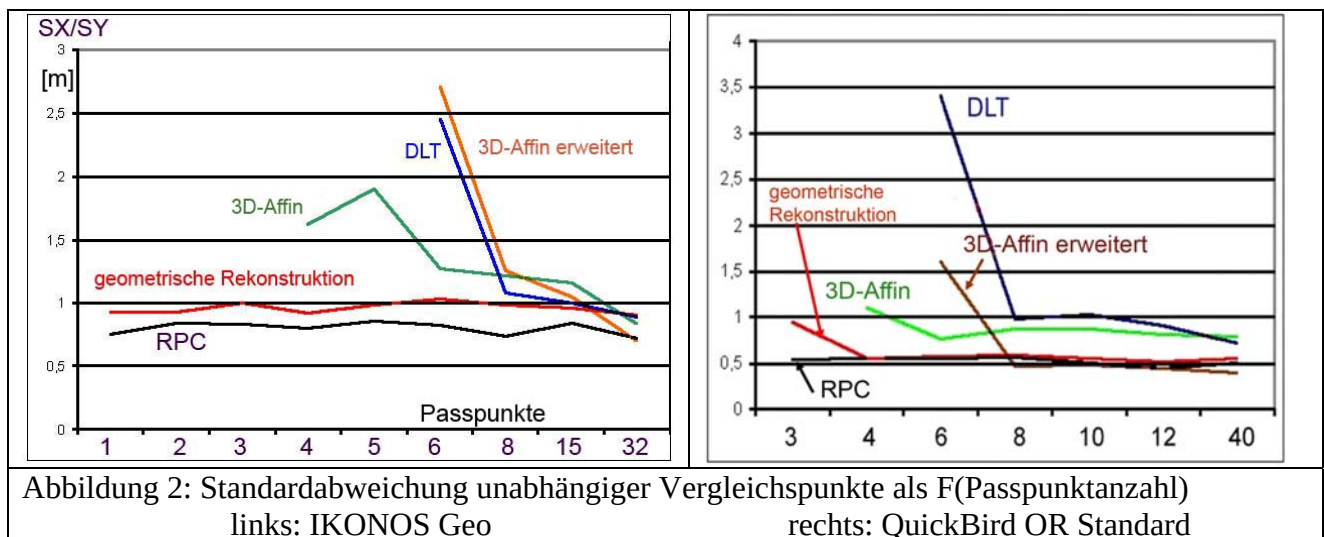
Die geometrische Rekonstruktion benutzt die für die Szenenmitte angegebenen Richtungs- und Höhenwinkel zum Satelliten. Unter Berücksichtigung der Erdrotation wird die bekannte Satellitenbahn auf diesen Vektor verschoben. Aus der individuellen Szenenposition wird der Aufnahmezeitunterschied gegenüber der Szenenmitte abgeleitet und die aktuelle Position des Satelliten für die Aufnahme der entsprechenden Zeile auf dem Satellitenorbit berechnet. Damit kann die aktuelle Blickrichtung berechnet werden, die für die Lagekorrektur nach der Punkthöhe benutzt werden. Der Bezug auf die Passpunkte entspricht der Lösung für die RPC.

Die 3D-Affintransformation und DLT benutzen keine Information über die Aufnahmerichtungen, diese werden aus Passpunkten abgeleitet. Das erfordert allerdings eine größere Anzahl von Passpunkten, die räumlich gut verteilt sein müssen. Liegen die Passpunkte auf genähert gleicher Höhe, können sich numerische Probleme ergeben.

$$\begin{aligned} x_{ij} &= a_1 + a_2 * X + a_3 * Y + a_4 * Z + a_9 * X * Z + a_{10} * Y * Z + a_{13} * X * X \\ y_{ij} &= a_5 + a_6 * X + a_7 * Y + a_8 * Z + a_{11} * X * Z + a_{12} * Y * Z + a_{14} * X * Y \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Formel 2: erweiterte dreidimensionale} \\ \text{Affintransformation} \end{array}$$

Der normalen 3D-Affintransformation (Formel 2, Koeffizienten 1 – 8) liegt das mathematische Modell der Parallelprojektion zugrunde, was nicht korrekt ist. Aus diesem Grund wurde sie um die Koeffizienten 9 bis 12 erweitert, womit die individuelle Strahlneigung berechnet wird. Originalbilder weisen teilweise keine parallelen Szenengrenzungen auf, dieses kann mit den Koeffizienten 13 und 14 berücksichtigt werden.

Die DLT basiert auf dem mathematischen Modell der Zentralprojektion und vereint die innere und die äußere Orientierung. Dies kann besonders bei kleinen Höhenunterschieden der Passpunkte zu numerischen Problemen führen. Von einigen kommerziellen Satellitenbildorientierungsprogrammen wird auch eine Lösung angeboten, bei der eine wählbar reduzierte Anzahl der RPC-Koeffizienten mit Hilfe von Passpunkten berechnet wird. Diese Lösung ist absolut unseriös da keinerlei statistische Analysen zur Überprüfung der gewählten Parameter in diesen Programmen vorhanden sind. Untersuchungen haben gezeigt, dass es schon dicht neben Passpunkten zu nicht akzeptablen geometrischen Abweichungen kommt.



In Abbildung 2 sind typische Ergebnisse der Bildorientierungen von IKONOS- und QuickBird-Bildern in Abhängigkeit der Anzahl der verwendeten Passpunkte dargestellt. In beiden Fällen handelt es sich um Bilder des Testfeldes Zonguldak, Türkei, die auf eine konstante Objekthöhe

projiziert wurden. Die RPC-Orientierung und die geometrische Rekonstruktion sind weitgehend von der Passpunktanzahl unabhängig, während für die Näherungslösungen 3D-Affintransformation und DLT eine deutlich höhere Passpunktanzahl benötigt wird um mit IKONOS-Bildern Subpixelgenauigkeiten zu erreichen. QuickBird hat einen größeren Öffnungswinkel und dreht die Aufnahme­richtung kontinuierlich, das führt dazu, dass die Näherungslösungen auch mit einer größeren Passpunktanzahl keine Subpixelgenauigkeit zulassen. Erst die erweiterte 3D-Affintransformation führt mit mindestens 8 Passpunkten zu den gewünschten Ergebnissen.

3.3 Orientierung von Originalbildern

Für die Orientierung von Originalbildern des Satelliten SPOT wurde bereits vor 20 Jahren das hannoversche Programm BLASPO entwickelt, dass die Aufnahmegeometrie mittels der Bahninformation und der Blickrichtung rekonstruiert. Heute stehen genauere Ergebnisse der direkten Sensororientierung zur Verfügung, die auch in Form der RPC mitgeliefert werden. Trotzdem werden immer noch in einem nicht unerheblichen Umfang die oben beschriebenen Näherungslösungen eingesetzt.

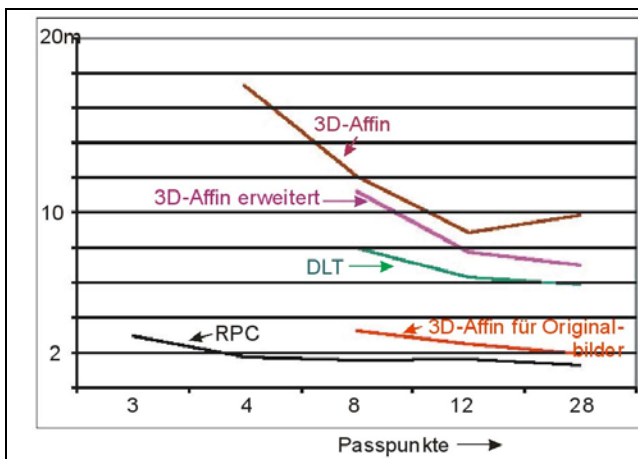


Abbildung 3: Standardabweichung unabhängiger Vergleichspunkte als F(Passpunktanzahl) – OrbView-3, Zonguldak

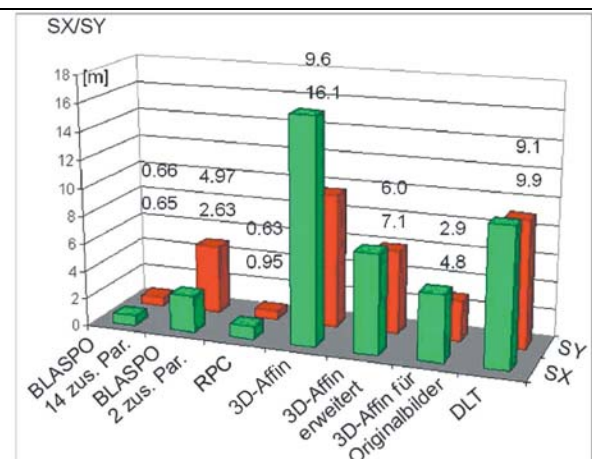


Abbildung 4: Orientierung einer QuickBird-Basic-Szene mit 380 Passpunkten, Atlantic City

Die Orientierung der Originalbilder von OrbView-3 und QuickBird zeigen die gleiche Tendenz wie zuvor, mit der RPC-Lösung und der geometrischen Rekonstruktion werden die besten Ergebnisse mit den wenigsten Passpunkten erreicht. Die Näherungslösungen führen in beiden dargestellten Fällen nicht zu akzeptablen Ergebnissen.

Es wurde eine große Anzahl verschiedenster Satellitenbilder orientiert. Mit gut definierten und genauen Passpunkten wurde mit den strengen Lösungen mindestens eine Genauigkeit in der Größe der Objektpixel erreicht.

4 DIGITALE HÖHENMODELLE

Digitale Höhenmodelle sind ein wesentlicher Bestandteil von Geo-Informationssystemen, sie werden auch für die Erstellung von Orthofotos benötigt, die das am häufigsten angefertigte, photogrammetrische Produkt sind. Mit der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) wurde ein nahezu weltweites Höhenmodell durch Interferometrisches Synthetisches Apertur Radar (InSAR) erstellt. Die mit dem US C-Band erstellten Höhen stehen mit einer Rasterweite von 3 Bogensekunden (92m am Äquator) kostenlos im Internet über <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> zur

Verfügung. Vom DLR können die deutsch-italienischen X-Band-Daten mit einer Rasterweite von einer Bogensekunde bezogen werden, sie decken wegen einer geringeren Aufnahmestreifenbreite aber nicht den gesamten Bereich ab. Mehrere Untersuchungen haben ergeben, dass die Genauigkeit der C-Band- und der X-Band-Höhenmodelle etwa gleich ist. Mit beiden Wellenlängen kann die Vegetation nicht durchdrungen werden, womit es sich um digitale Oberflächenmodelle (DOM) handelt. Es zeigte sich eine klare lineare Abhängigkeit vom Tangens der Geländeneigung. In Waldgebieten wird nicht die gleichen Genauigkeiten wie in offenen Flächen erreicht. Grundsätzlich sollte vor einer Untersuchung der Höhengenaugkeit die Übereinstimmung der Lage mit dem Referenzmodell untersucht werden. Sehr häufig gibt es hier Datumsprobleme, weswegen bei allen Untersuchungen die Übereinstimmung der Lage mit dem hannoverschen Programm DEMSHIFT durch Ausgleichung überprüft und berücksichtigt wurde.

	SZ [m]	Bias [m]	SZ F(Neigung) [m]
Arizona, USA, teilweise Gebirge	3.9	1.3	$2.9 + 22.5 * \tan \alpha$
Williamsburg NJ, USA, flach	4.7	-3.2	$4.7 + 2.4 * \tan \alpha$
Atlantic City NJ, USA, flach	4.7	-3.6	$4.9 + 7.6 * \tan \alpha$
Bayern, Hügelland	4.6	-1.1	$2.7 + 8.8 * \tan \alpha$
Bayern, Gebirge	8.0	-2.4	$4.4 + 33.4 * \tan \alpha$
Zonguldak, Türkei, Gebirge	7.0	-4.4	$5.9 + 5.6 * \tan \alpha$
Mausanne, Frankreich, flach und Hügelland	3.9	-0.9	$2.1 + 11.9 * \tan \alpha$
Tabelle 2: Genauigkeit der SRTM C-Band Höhenmodelle α = Geländeneigung			

Die systematischen Fehler der SRTM-Höhenmodelle sind auf Orientierungsprobleme zurückzuführen. Sie können anhand von Passflächen bestimmt werden. Die Genauigkeiten dieser Höhenmodelle sind für viele Zwecke ausreichend. Im Gebirge gehen durch die Rasterweite von 3 Bogensekunden jedoch morphologische Details verloren. Eine Alternative ist die Erstellung von Höhenmodellen aus stereoskopischen Weltraumbildkombinationen durch automatische Bildzuordnung. Leider sind von den sehr hoch auflösenden Satelliten nur wenige Stereokombinationen, erstellt vom gleichen Orbit aus, vorhanden, da durch die erforderliche Drehung der Satelliten Aufnahmekapazität verloren geht und dies für die Satellitenbetreiber unwirtschaftlich ist. Die Verwendung von Bildern unterschiedlicher Aufnahmezeit ist problematisch, da sich das Objekt und die Sonnenhöhe verändert haben kann, was zu Problemen bei der Bildzuordnung führt.

Die Erstellung von Höhenmodellen aus Bildern des gleichen Orbits kann aber auch problematisch sein, wenn der Konvergenzwinkel der Aufnahmen zu groß ist. In dem gebirgigen Gebiet von Zonguldak, Türkei wurde ein OrbView-3 Stereopaar untersucht, das ein Höhen-Basis-Verhältnis von 1,4 hat. Der Konvergenzwinkel von etwa 40° führte zu erheblichen Ausfällen der automatischen Bildzuordnung in den Innenstadtbereichen und den Waldgebieten. Die Gebäude wurden aus zu unterschiedlichen Richtungen betrachtet wodurch die Abbildungen sich stark unterscheiden. In dem Gebirgswald kommt es zu ähnlichen Problemen. Im Gegensatz dazu führte ein IKONOS-Stereomodell mit einem Höhen-Basis-Verhältnis von 5,8 in der Stadt Maras, Türkei zu sehr guten Ergebnissen. Der Konvergenzwinkel von nur 9,8° ergab hohe Werte des Korrelationskoeffizienten und die x-Parallaxe konnte mit einer Genauigkeit von 0,22 Pixeln bestimmt werden. Ein kleiner Konvergenzwinkel führt trotzdem zu eingeschränkten Genauigkeiten (siehe Formel 3).

$$SZ = \frac{h}{b} \cdot Sp_x \quad \text{Formel 3: Objekthöhengenaugkeit SZ} \quad h = \text{Aufnahmehöhe} \quad b = \text{Basis}$$

Sp_x = Standardabweichung der x-Parallaxe [Objektpixelgröße]

Auch durch automatische Bildzuordnung werden digitale Oberflächenmodelle erstellt, während die Referenzhöhenmodelle sich meistens auf den Boden beziehen. Durch Filterung mit dem hannoverschen Programm RASCOR können Objekte, die sich oberhalb des Bodens befinden aus dem Höhenmodell entfernt werden, wenn in der Nähe Bodenpunkte vorhanden sind. In geschlossenen Waldgebieten ist das nur eingeschränkt möglich.

Sensor	Gebiet	SZ [m]	SZ F(Neigung) [m]	Spx flache Gebiete [Objektpixel]
ASTER Zonguldak, Gebirge	offene Flächen	25.0	$21.7 + 14.5 \cdot \tan \alpha$	0.7
	Wald	31.2	$27.9 + 18.5 \cdot \tan \alpha$	0.9
	Vergleichspunkte	12.7		0.4
KOMPSAT-1 Zonguldak, Gebirge	offene Flächen	13.6	$11.3 + 11.5 \cdot \tan \alpha$	0.8
	Wald	14.7	$14.1 + 12.1 \cdot \tan \alpha$	1.0
SPOT 5 Zonguldak, Gebirge	offene Flächen	11.9	$5.3 + 5.9 \cdot \tan \alpha$	0.6
	Wald	15.0	$6.6 + 6.3 \cdot \tan \alpha$	0.7
	Vergleichspunkte	3.8	$3.5 + 0.9 \cdot \tan \alpha$	0.4
SPOT 5 HRS, Bayern, Hügelland	offene Flächen	4.7	$4.3 + 1.0 \cdot \tan \alpha$	0.7
	Wald	13.0	$11.0 + 6.2 \cdot \tan \alpha$	1.8
IKONOS, Zonguldak	offene Flächen	5.8		1.5
IKONOS, Maras, flach	Stadt	1.4		0.22
OrbView-3, Zonguldak	offene Flächen	8.5	$4.4 + 15.7 \cdot \tan \alpha$	3.1
Cartosat-1, Warsaw, flach	offene Flächen	2.5	$2.4 + 8 \cdot \tan \alpha$	0.6

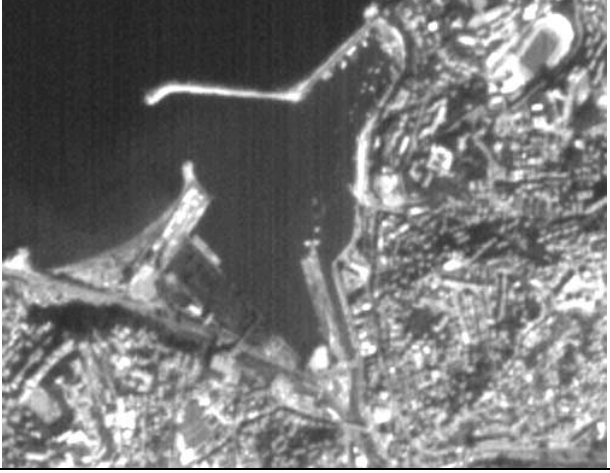
Tabelle 3: Genauigkeit von Höhenmodellen bestimmt durch automatische Bildzuordnung

Die absolute Genauigkeit der Höhenmodelle erstellt aus optischen Weltraumaufnahmen ist entsprechend Formel 3 vom Höhen-Basis-Verhältnis und der Objektpixelgröße dominiert. Umgerechnet auf die Standardabweichung der X-Parallaxe, in Einheiten der Objektpixelgröße, lassen sich die Ergebnisse besser vergleichen. Für offene und flache Gebiete wird in der Regel eine Subpixelgenauigkeit erreicht (Tabelle 3). In allen abweichenden Fällen hat es spezielle Probleme der automatischen Bildzuordnung gegeben, die allerdings bereits während der Bildzuordnung zutage traten. Viel versprechend ist der neue Stereosensor Cartosat-1 der auch in anderen Gebieten zu guten Ergebnissen der Höhenmodelle führte. Zudem lässt seine Objektpixelgröße von 2,5m eine Rasterweite von 7,5m zu.

5 INFORMATIONSGEHALT DER WELTRAUMAUFNAHMEN

Für die Erstellung von Geo-Informationssystemen ist die Identifizierbarkeit von Objekten von Bedeutung. Für größere Präsentationsmaßstäbe sind mehr Details erforderlich als für kleine. Als Faustregel ist eine Objektpixelgröße von etwa 0,1mm im Präsentationsmaßstab erforderlich. Danach kann eine topographische Karte im Maßstab 1 : 10 000 aus Weltraumaufnahmen mit 1m Objektpixelgröße erstellt werden. Allerdings müssen immer individuelle Abbildungseigenschaften der Sensoren und die Aufnahmebedingungen berücksichtigt werden. Zusätzlich dürfen die Objektpixel nicht kleiner als 5m sein, da ansonsten einzelne wichtige Objekte, die auch in kleineren Kartenmaßstäben dargestellt werden, nicht mehr sicher erkennbar sind. Dieser Umstand ist lange Zeit nicht richtig berücksichtigt worden, weswegen der eigentliche Durchbruch der Anwendung von Weltraumbildern für die Kartenerstellung erst mit den sehr hoch auflösenden Systemen, speziell mit IKONOS vom Jahr 2000 an, kam. Das speziell für kartographische Zwecke entwickelte

französische Aufnahmesystem SPOT hatte bis SPOT-5 nur eine panchromatische Auflösung von 10m, was zu nicht unerheblichen Ausfällen in den damit erstellten Karten 1 : 50 000 führte. Die 1995 und 1997 gestarteten indischen Satelliten IRS-1C und IRS-1D hatten bereits Objektpixelgrößen von 5,7m, aber wegen des eingeschränkten radiometrischen Umfanges von 6bit (64 verschiedene Grauwerte) eine nicht viel bessere Bildqualität.

	
KOMPSAT-1 6,6m Objektpixelgröße	IRS-1C 5,7m Objektpixelgröße
	
SPOT-5 5m Objektpixelgröße	OrbView-3 1m Objektpixelgröße
	
IKONOS 1m Objektpixelgröße	QuickBird 0,62m Objektpixelgröße
Abbildung 5: Vergleich des Informationsinhaltes verschiedener Weltraumaufnahmen, es sind Ausschnitte mit etwa gleicher Pixelanzahl gezeigt Stadtgebiet Zonguldak, Türkei	

Der Vergleich von Ausschnitten verschiedener Weltraumaufnahmen in Abbildung 5 demonstriert den unterschiedlichen Informationsinhalt. Es zeigt sich aber auch, dass die Objektpixelgröße nicht der einzige Unterschied ist. Komsat-1, IRS-1C und SPOT-5 haben keine sehr unterschiedliche Objektpixelgröße. Komsat-1 zeigt mit 6,6m Objektpixelgröße mehr Details als IRS-1C mit 5,7m. Eine Kantenanalyse der effektiven Auflösung ergab allerdings auch, dass die IRS-1C-Aufnahme einer effektiven Pixelgröße von 6,9m entspricht. In der SPOT-5-Aufnahme sind mehr Objekte identifizierbar als in Komsat-1. Auffällig ist auch der Qualitätsunterschied zwischen OrbView-3 und IKONOS. Beide haben eine nominelle Objektpixelgröße von 1m. OrbView-3 hat aber keinen TDI-Sensor wie IKONOS, sondern arbeitet mit gestaggerten CCD-Zeilen – das sind zwei CCD-Zeilen, die um eine halbe Pixelgröße gegeneinander verschoben sind. Die projizierte Pixelgröße auf dem Boden ist 2m*2m, benachbarte Pixel überlappen sich aber um 50%. Vom Mittelpunkt eines auf den Boden projizierten Pixels bis zum benachbarten ist es damit 1m. Damit hat OrbView-3 eine projizierte Pixelgröße von 2m*2m, die Objektpixelgröße beträgt jedoch nur 1m*1m. Diese überlappenden Pixel können nicht die gleiche Bildqualität wie eine echte Objektpixelgröße von 1m haben. Theoretisch liegt die effektive Objektpixelgröße von OrbView-3 bei etwa 1,3m. Der deutlich bessere Informationsgehalt von QuickBird mit einer Objektpixelgröße von 0,62m ist offensichtlich.



Abbildung 6 zeigt, dass nicht nur die Objektpixelgröße von Bedeutung ist. Die abgebildeten IKONOS-Aufnahmen wurden zu unterschiedlicher Jahreszeit mit entsprechend unterschiedlicher Sonnenhöhe aufgenommen. Besonders in dem mittleren Bild liegen die meisten Straßen im Schlagschatten. Die Auswertung der Straßen ist schwierig, teilweise kam es zu Verwechslungen zwischen Straßen und Gärten. Probleme kann es auch mit atmosphärischen Einflüssen geben. Direkt neben Wolken ist meist soviel Dunst vorhanden, dass auch dort die Auswertung negativ beeinflusst oder unmöglich wird.

Die meisten Weltraumsensoren haben neben den panchromatischen Kanälen auch Farbkanäle, dominierend blau, grün, rot und nahes infrarot. Die Farbkanäle werden allerdings meist mit einer linear um den Faktor 4 niedrigeren Auflösung aufgenommen. Dieser Auflösungsunterschied entspricht dem menschlichen Auge, wir nehmen Grauwerte deutlich differenzierter auf als Farben. Durch Bildfusion können aus den niedrig aufgelösten Farbkanälen, zusammen mit dem hoch aufgelösten panchromatischen Kanal, hoch aufgelöste Farbbilder erstellt werden. Farbbilder unterstützen die Objektinterpretation, es zeigte sich aber auch, dass mit einer sorgfältigen Auswertung panchromatischer Bilder nahezu der gleiche Informationsinhalt gewonnen werden konnte.

Nach der Definition entspricht „panchromatisch“ dem für das menschliche Auge sichtbaren Bereich. Bei IKONOS und QuickBird geht die Empfindlichkeit des Grauwertkanals aber bis $0,90\mu\text{m}$ und damit sogar geringfügig über den Infrarotkanal hinaus. Dieses hat Vorteile für die

differenzierte Darstellung und die automatische Bildzuordnung in Waldgebieten. Wald wird von den Sensoren, die den Infrarotbereich nicht einschließen in der Regel sehr dunkel und undifferenziert dargestellt, womit es dort häufig zu Ausfällen der automatischen Bildzuordnung kommt.



Abbildung 7: Kartierung von Gebäuden mit QuickBird Farbaufnahmen (2,4m Objektpixelgröße) und QuickBird panchromatischen Aufnahmen (0,62m Objektpixelgröße) rechts: Überlagerung

Abbildung 7 zeigt die Auswirkung der Pixelgröße auf die Gebäudeauswertung. Die Farbkanäle wurden zusammen mit dem panchromatischen Kanal aufgenommen, also unter gleichen Bedingungen. Es zeigt sich klar, dass mit 2,4m Pixelgröße nicht die Details erkennbar sind, wie mit 62cm. Im panchromatischen QuickBird-Bild sind alle Anbauten ohne Probleme auszuwerten. Auch die anderen Objekte, die normalerweise in einer Karte 1 : 5000 abgebildet sind, wurden problemlos erfasst. Dieses ist auch wegen der sehr guten Bildqualität möglich, die der von digitalen Luftbildern und nicht der minderen Bildgüte von analogen Luftbildern entspricht. Somit kann bei diesen Aufnahmen etwas über die Faustregel hinausgegangen werden, die nur einen Kartenmaßstab von 1:6200 zulassen würde.

Die Genauigkeit der Auswertung ist nicht der einschränkende Faktor, dieses ist die Objekterkennbarkeit. Für eine Karte ist normalerweise eine Darstellungsgenauigkeit von 0,25mm ausreichend oder 1,25m im Maßstab 1 : 5000. Klar definierte Objekte lassen sich aber mit Pixelgenauigkeit, also mit 0,6m auswerten.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit den hoch und sehr hoch auflösenden Satellitenbildern besteht ein gleitender Übergang zu Luftbildern. Nach der operationell üblichen Pixelgröße zum Scannen analoger Luftbilder von 20µm, entspricht die Objektpixelgröße von QuickBird einem Luftbildmaßstab 1:32000 und die für nächstes Jahr angekündigten Objektpixelgröße von 41cm bereits 1:20500. Dieses sind in der Luftbilddaufnahme gebräuchliche Bildmaßstäbe für mittlere Kartenmaßstäbe. Durch die autonomen HALE UAV besteht bereits eine Konkurrenzsituation zu großmaßstäbigen Auswertungen. Durch diese neuen Möglichkeiten hat sich die Einsatzmöglichkeit der Photogrammetrie verbessert. Besonders in Ländern mit Einschränkungen der Verfügbarkeit von Luftbildern ergeben sich für private photogrammetrische Firmen neue Arbeitsbereiche.

Die Genauigkeit der Satellitenbilddauswertung ist nicht der einschränkende Faktor, dieses ist die Objektpixelgröße. Um das Genauigkeitspotential der Satellitenbilder voll ausschöpfen zu können, ist eine Orientierung mit Hilfe von Passpunkten erforderlich. Hier sollten nicht alle von kommerziellen Firmen angebotenen Orientierungsverfahren benutzt werden, es ist eine Orientierung mit den RPC die zusammen mit den Satellitenbildern ausgeliefert werden oder eine geometrische Rekonstruktion erforderlich. Näherungsverfahren, die die mitgelieferten Orientierungsinformationen nicht nutzen, sollten vermieden werden.