

Generierung und Validierung von Höhenmodellen aus Weltrauminformationen

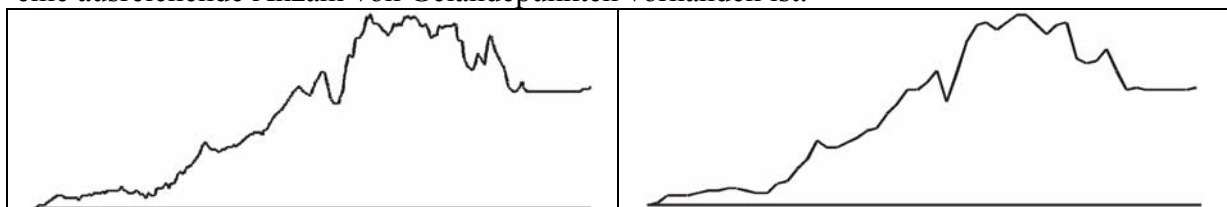
KARSTEN JACOBSEN¹

Zusammenfassung: Digitale Höhenmodelle (DHM) die aus Weltraumbildern erstellt werden sollen, müssen mit den frei verfügbare SRTM C-Band-Höhenmodellen verglichen werden um keinen vermeidbaren Aufwand zu betreiben. Die SRTM-Daten weisen in steilen Gebieten nicht unerhebliche Lücken auf. Ihre Genauigkeit von 3m bis 5m im Flachland und bis zu 20m in steileren Gebieten ist mit der Rasterweite von 3“, entsprechend etwa 90m, auch nicht immer ausreichend. Die Morphologie ist nicht sehr detailliert. Somit besteht immer noch der Bedarf an hoch aufgelösten DHM's mit zufrieden stellender Genauigkeit. Die DHM's weisen keine einheitliche Genauigkeit auf, in Forstgebieten ist mit systematischen Fehlern zu rechnen und die Genauigkeit ist von der Geländeneigung abhängig. Aus präzisen DHM's sind die Punkte, die nicht zur Geländeoberfläche gehören, herauszufiltern. Die SRTM Höhenmodelle müssen auf ihre genaue Lage überprüft werden.

1 Einführung

Digitale Höhenmodelle (DHM's) sind ein wichtiger Bestandteil von Geoinformationssystemen. Mit dem frei verfügbare SRTM C-Band DHM's ist zur Zeit für Europa, Asien, Afrika und Amerika für den Breitenbereich von -56° bis $60,25^{\circ}$ ein für viele Zwecke ausreichender Datensatz verfügbar (<http://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>). Wenn trotzdem aus Weltraumdaten Höhenmodelle mit nicht unerheblichem Aufwand erstellt werden sollen, so müssen diese Vorteile gegenüber den SRTM-Daten aufweisen. Durch die Fülle verschiedener Weltrauminformationen, die naher Zukunft noch zunehmen werden, bestehen verschiedenste Optionen, die optimal kombiniert werden können um durch die SRTM-Daten nicht beseitigten Probleme lösen zu können.

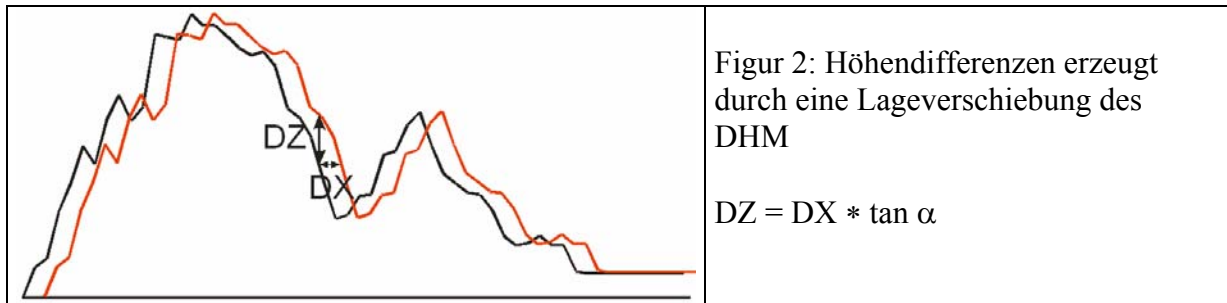
Sowohl die SRTM- als auch die aus optischen Daten automatisch berechneten DHM's beschreiben die Höhe der Vegetation und der Gebäude. Das C-Band RADAR (5,6cm Wellenlänge) dringt nur unwesentlich in die Vegetationsoberfläche ein. Das so erhaltene Digitale Oberflächenmodell (DOM) muss somit gefiltert werden um die nicht zum Boden gehörenden Punkte zu entfernen. Diese Filterung ist nur dann erfolgreich, wenn das Rauschen der erstellten Höhenmodelle deutlich unter der Höhe der Bäume und Gebäude liegt und auch eine ausreichende Anzahl von Geländepunkten vorhanden ist.



Figur 1: Höhenprofil 5km lang, $\Delta Z=80m$, links 5m Punktabstand, rechts 90m Punktabstand

¹ Dr. Karsten Jacobsen, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover, jacobsen@ipi.uni-hannover.de

Nicht nur die Genauigkeit des DHM, auch der Punktabstand ist von Bedeutung wie aus Figur 1 ersichtlich. Die Interpolation des gezeigten DHM mit 90m Punktabstand führt zu einem Genauigkeitsverlust von 2,4m. In dem später näher erläuterten gebirgigen Testgebiet Zonguldak führt die Interpolation eines DHM mit 90m Punktabstand sogar zu einem Genauigkeitsverlust von 12m. Neben dem Verlust von morphologischen Details ist somit der Genauigkeitsverlust in stärker bewegtem Gelände nicht unerheblich.

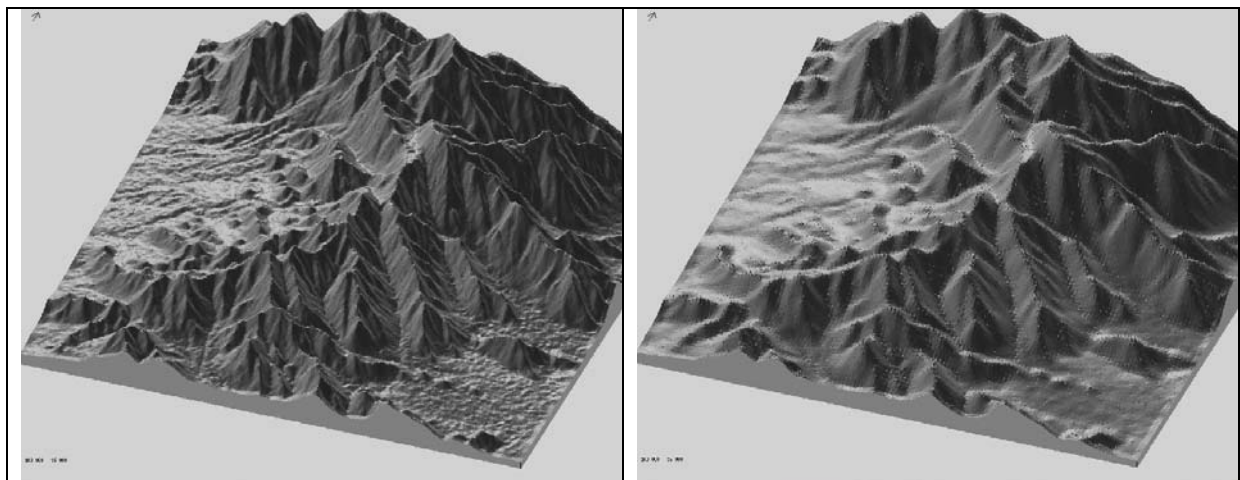


Genauigkeitsprobleme von DHM's können auch durch Lageverschiebungen hervorgerufen werden (Figur 2). Lagefehler der SRTM-Daten können durch die direkte Sensororientierung (GPS + Kreisel + Sternkamera) hervorgerufen werden. Häufig gibt es aber auch Probleme mit dem Datum der benutzten Landeskoordinatensysteme in Relation zum Internationalen Bezugssystem (ITRF). In vielen Ländern ist das Datum nicht publiziert, manchmal auch nicht richtig bekannt. Eine Überprüfung der Lage der DHM's ist somit immer empfehlenswert.

2 Shuttle Radar Topography Mission

Mit Interferometrischem Synthetischen RADAR (InSAR) wurde im Rahmen der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) im Februar 2000 die Landfläche von -56° bis $60,25^\circ$ Breite aufgenommen. Die SRTM-Mission umfasste sowohl das deutsch-italienische X-Band (3cm Wellenlänge) als auch das US-amerikanische C-Band. Das X-Band SAR wies nur eine Streifenbreite von 45km auf, womit die Landfläche nicht vollständig erfasst wurde. Das C-Band hatte dagegen mit dem Scan-SAR-Mode eine Streifenbreite von 225km womit sogar 94,6% der Landmasse mindestens zweimal abgedeckt wurde. Die theoretisch höhere Genauigkeit der kürzeren Wellenlänge des X-Bandes wurde damit zumindest teilweise durch eine Mehrfachüberdeckung kompensiert.

Radaraufnahmen haben durch das layover und Schatten Probleme in steilen Gebieten. Die X-Band-Daten werden vom DLR zusammen mit einer Höhenfehlerkarte ausgeliefert, welche die abgeschätzten Höhengenaugigkeiten enthalten. Die problematischen Flächen werden damit gut beschrieben. Die C-Band-Daten enthalten dort Datenlücken. In dem extremen $1^\circ * 1^\circ$ -DHM im Bereich des Mount Everest fehlen 9% der Höhen, weltweit allerdings nur 0,15%. Das DLR vertreibt die X-Band Höhenmodelle mit einer Rasterweite von $1''$, entsprechend etwa 30m, während die C-Band-Daten mit Ausnahme der USA nur mit einer Rasterweite von $3''$, entsprechend etwa 90m, verfügbar sind. Figur 3 zeigt den Informationsverlust des C-Band DHM mit einer Rasterweite von $3''$ gegenüber der Rasterweite von $1''$. Dementsprechend führt auch die Interpolation der DHM's mit größerer Rasterweite auf kleinere Abstände zu Genauigkeitsverlusten (Tabelle 1). Die Interpolationsverluste sind von der Änderung der Geländeneigung abhängig und können bei bewegtem Gelände erhebliche Beträge annehmen.



Figur 3: SRTM C-Band DHM 10km x 10km

links: DHM mit 1'' Rasterweite

rechts: DHM mit 3'' Rasterweite

Tabelle 1: Genauigkeitsverlust durch Interpolation

	Rasterweite	durchschnittliche Geländeneigung	durchschnittliche Änderung der Geländeneigung	SZ
Zonguldak	80m	0.27	0.32	12.0 m
Arizona	90m	0.17	0.09	4.8 m
New Jersey	60m	0.024	0.015	0.45 m
New Jersey	120m	0.024	0.015	1.12 m

Im Bereich von Zonguldak, Türkei wurden sowohl das C-Band- als auch das X-Band-Höhenmodell untersucht. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, handelt es sich in Zonguldak um ein sehr bewegtes Gelände mit Höhen von 0m (Schwarzes Meer) bis 847m. Die durchschnittliche Geländeneigung von 27% wird noch von der durchschnittlichen Änderung der Geländeneigung von einer Rasterweite zur nächsten mit 32% übertroffen. Als Referenz ist ein DHM, abgeleitet aus einer topographischen Karte 1 : 25 000, verfügbar. Ein erster Vergleich der Höhenmodelle zeigte eine klare Lageverschiebung der SRTM-Daten gegenüber dem Referenzmodell. Die SRTM-Daten basieren auf der direkten Sensororientierung ohne lokale Passpunkte, so dass ein systematischer Lagefehler erwartet werden muss. Darüber hinaus war das Datum der türkischen Landeskoordinaten gegenüber dem internationalen terrestrischen Referenzsystem, das für die SRTM-Daten benutzt wird, nicht bekannt. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Schritt die SRTM-Höhenmodelle auf das Referenzhöhenmodell durch Ausgleichung mit dem Programm DEMSHIFT verschoben, wodurch sich das Quadratmittel der Widersprüche um den Faktor 2 verbesserte. Eine entsprechende Verschiebung war auch bei den anderen untersuchten Datensätzen erforderlich.

Tabelle 2: Genauigkeit der SRTM-Höhenmodelle in Zonguldak

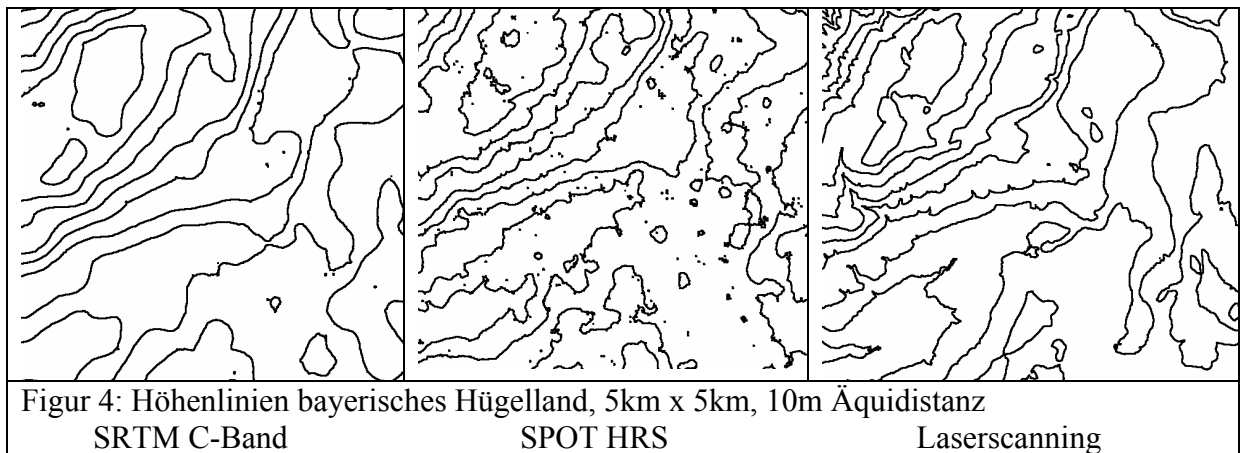
	DZ > 50m	SZ [m]	Bias [m]	SZ F(Neigung) [m]	DZ > 50m	SZ [m]	Bias [m]	SZ F(Neigung) [m]
	X-Band DHM				C-Band DHM			
Offen	0.67%	10.7	-3.5	$7.6 + 9.5 * \tan \alpha$	2.11%	9.9	-2.9	$7.8 + 6.4 * \tan \alpha$
Forst	0.39%	13.8	-8.1	$11.4 + 10.5 * \tan \alpha$	0.03%	13.6	-8.3	$11.6 + 10.5 * \tan \alpha$
Vergleichspunkte	0	5.4	-2.0	$1.3 + 40.6 * \tan \alpha$	0	9.4	-2.0	$4.0 + 122 * \tan \alpha$

45% des Testgebietes Zonguldak ist mit Waldflächen bedeckt. Da sowohl das C-Band- als auch das X-Band-Radar nicht wesentlich in die Waldoberfläche eindringen, wird durch das InSAR, als auch bei automatischer Bildzuordnung optischer Bilder, die sichtbare Oberfläche erfasst. In Forstflächen ist damit mit systematischen Fehlern zu rechnen, die auch klar in Tabelle 2 in Erscheinung treten. Die systematischen Höhenfehler von 8,1m und 8,3m in den Waldflächen sind nicht weit von der durchschnittlichen Baumhöhe von etwa 10m entfernt. Eine Datenanalyse mit dem Hannoverischen Programm DEMANAL zeigte eine klare Abhängigkeit der Höhengenaugkeit von der Geländeneigung in der Form $SZ = a + b * \tan \alpha$ mit α als Geländeneigung. In offenen Gebieten ergibt sich damit für das C-Band DHM eine Standardabweichung der Höhe für flaches Gelände von 7.8m und für um 45° geneigtes Gelände von 14,2m. Die an Vergleichspunkten vorhandenen Widersprüche sind wesentlich kleiner als die Widersprüche gegenüber dem Referenzhöhenmodell. Vergleichspunkte haben allerdings hervorgehobene Eigenschaften, sie liegen in der Regel in ebenen und klar definierten Flächen. Die Analyse zeigt, dass die Höhengenaugkeit eines DHM nicht mit einer einzigen Zahl beschrieben werden kann – eine Unterscheidung nach der Vegetation und der Geländeneigung ist unbedingt erforderlich. Die Standardabweichungen ohne Berücksichtigung der Geländeneigung (SZ) sind nicht ausreichend. Ohne die horizontale Verschiebung des DHM erreicht SZ für die C-Band-Daten in offenem Gelände 26,1m statt 9,9m nach der Verschiebung.

Ein nicht unerheblicher Anteil der Höhen hat größere Differenzen als 50m. Bei den C-Band Daten wird diese Toleranzgrenze von 2,11% der Punkte in offenem Gelände überschritten, allerdings nur bei 0,67% der X-Band Daten. Der größere Anteil in offenem Gelände ist auf die steilen, teilweise fast senkrechten Anstiege an der Küste zurückzuführen. Die Radaraufnahmen haben hier Probleme. Wegen der größeren Streifenbreite der C-Band Aufnahmen fängt das layover bereits bei 30° Geländeneigung an, während es bei den X-Band Daten erst bei etwa 50° anfängt, wodurch der höhere Anteil grober Fehler der C-Band Daten erklärt werden kann.

	SZ [m]	Bias [m]	SZ F(Geländeneigung)
Arizona	3.9	1.3	$2.9 + 22.5 * \tan \alpha$
Williamsburg NJ	4.7	-3.2	$4.7 + 2.4 * \tan \alpha$
Atlantic City	4.7	-3.6	$4.9 + 7.6 * \tan \alpha$
Bayern, hügelig, offenes Gebiet	4.6	-1.1	$2.7 + 8.8 * \tan \alpha$
Bayern, Gebirge, offenes Gebiet	8.0	-2.4	$4.4 + 33.4 * \tan \alpha$
Tabelle 4: Genauigkeit der C-Band-DHM's in unterschiedlichen Testgebieten			

In Deutschland und den USA standen genauere Referenzdaten zur Verfügung, dementsprechend wurden auch bessere Genauigkeiten für die C-Band-DHM's erzielt (siehe Tabelle 4). Im Prinzip tauchten die gleichen Probleme auf – die SRTM-Höhenmodelle mussten in X und Y auf die Referenzhöhenmodelle verschoben werden und es ergaben sich unterschiedliche Genauigkeiten für offene und Wald-Gebiete. In Tabelle 4 sind nur die Ergebnisse für die offenen Gebiete enthalten. Die Quadratmittel der Widersprüche (SZ) sind für das gebirgige Gelände am größten; wird jedoch der von der Geländeneigung abhängige Anteil abgespaltet, so unterscheiden sich die Standardabweichungen der Höhen nur noch von 2,7m bis 4,9m. Wird außerdem der systematische Fehleranteil berücksichtigt, verbessert sich die Genauigkeit für offenes und ebenes Gelände auf 2,5m bis 3,7m. Typisch für das gebirgige Testgebiet in Bayern ist, dass 3% der Höheninformationen im Datensatz fehlen.



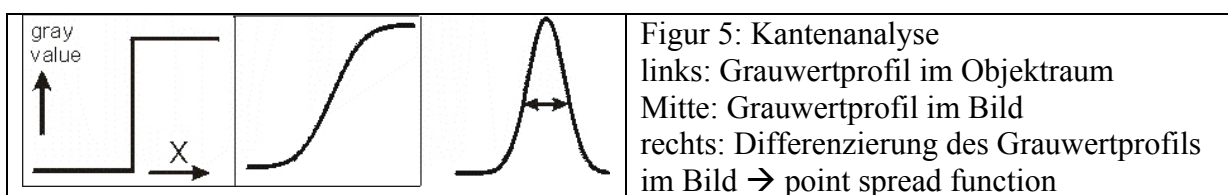
Wie auch aus Figur 3 ersichtlich, führt der Punktabstand von 3“ bei den SRTM-Daten zu einer generalisierten Höhendarstellung die sich in den glatten Höhenlinien (Figur 4 links) auswirkt. Das aus SPOT HRS-Bildern abgeleitete Höhenmodell (Figur 4 Mitte) zeigt bereits mehr Details. Die richtige morphologische Darstellung ergibt sich erst aus dem Laserscanning-Höhenmodell (Figur 4 rechts). Die Glättung schlägt sich nicht in der aufgeführten Genauigkeit nieder, da in ihr nur die Genauigkeit der vorhandenen Punkte wiedergegeben wird. Der Genauigkeitsverlust durch die Interpolation kommt noch hinzu.

3 Weltraumbilder

Die Genauigkeit der Höhenbestimmung mittels optischer Weltraumbilder ist vom Höhen-Basis-Verhältnis und der Pixelgröße im Objektraum abhängig (Formel 1). Hinzu kommt noch ein Faktor der in der Regel zwischen 0,2 und 3,0 liegt und von dem Bildkontrast und der geometrischen Bildqualität abhängig ist. Theoretisch wird so mit einem möglichst kleinen Höhen-Basis-Verhältnis die beste Objektpunktgenauigkeit erreicht. Ein kleines Verhältnis bedeutet aber auch eine deutlich unterschiedliche Blickrichtung, die bei bewegtem Gelände oder in städtischen Bereichen zu deutlich unterschiedlichen Bildern führt, was die automatische Bildzuordnung negativ beeinflusst. So ist nur in flachen Gebieten ohne Bäume und Gebäude das kleine Höhen-Basis-Verhältnis direkt von Vorteil, in den anderen Gebieten liegt das optimale Höhen-Basis-Verhältnis deutlich höher (siehe auch Börner et al 1997).

$SZ = \frac{\text{Höhe}}{\text{Basis}} \cdot \text{Objektpixelgröße} \cdot \text{Faktor}$	Formel 1: Höhengenaugigkeit aus optischen Bildern
---	---

Die nominelle Objektpixelgröße ist nicht immer identisch mit der effektiven Pixelgröße. Zum Beispiel haben IKONOS-Bilder die mit einem Inzidenzwinkel von 45° aufgenommen werden, eine physikalische Pixelgröße von 1,15m * 1,62m, sie werden jedoch mit einer nominellen Pixelgröße von 1,00m ausgeliefert. Hinzu kommen noch die allgemeine Bildqualität und der Einfluss der Atmosphäre. Die effektive Objektpixelgröße kann durch eine Kantenganalyse festgestellt werden.



	nominelle Objektpixelgröße	effektive Objektpixelgröße	Tabelle 5: effektive Objektpixelgröße von Weltraumbildern bestimmt durch Kantenanalyse
ASTER	15 m	16.5 m	
TK 350	(10 m)	13 m	
IRS-1C	5.8 m	6.9 m	
SPOT 5	5 m	5 m	
IKONOS pan	1 m	1.0 m	

In dem Testgebiet Zonguldak, Türkei, wurden verschiedene Weltraumbilder mittels Kantenanalyse untersucht. Es zeigte sich, dass bei ASTER, TK350 und IRS-1C die effektive Pixelgröße größer als die nominelle war. Bei TK350 handelt es sich um ein Weltraumfoto bei dem die Pixelgröße nicht von Anfang an fest steht, sondern sich durch das Scannen ergibt. Eine andere effektive Pixelgröße ist somit zu erwarten. Unterschiedliche Weltraumbilder wurden für die Erstellung von Höhenmodellen durch automatische Bildzuordnung verwendet. Sie erfolgte mit dem Hannoverschen Programm DPCOR nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Sensor	Pixel- größe [m]	Höhe / Basis	Gebiet / Punktart	SZ [m]	SZ F(Geländeneigung) [m]
TK 350	(10 /13)	2,0	offen	23.3	$20.0+23.9*\tan\alpha$
			Forst	51.3	$49.0+11.4*\tan\alpha$
			Vergleichspunkte	6.6	$4.7 + 2.2*\tan \alpha$
ASTER	15	1,7	offen	25.0	$21.7+14.5*\tan\alpha$
			Forst	31.2	$27.9+18.5*\tan\alpha$
			Vergleichspunkte	12.7	
SPOT 5	5	1,85	offen	11.9	$8.4 + 6.3*\tan \alpha$
			Forst	15.0	$9.8 + 5.3*\tan \alpha$
			Vergleichspunkte	3.8	$3.5 + 0.9*\tan \alpha$
SPOT 5 HRS	5 * 10	1,2	offen	6.7	$6.4 + 4.9*\tan \alpha$
			Forst	17.0	$16.4+ 2.2*\tan \alpha$
SPOT 5 HRS gefiltert	5 * 10	1,2	offen	4,4	$4,2 + 1.6*\tan \alpha$
			Forst	12.3	$10.0 + 6.9*\tan\alpha$
IKONOS	1	7,5	Maras	1.7	gleicher Orbit
IKONOS	1	3,8	Zonguldak	5.8	$\Delta t = 3$ Monate
QuickBird	0,62	9,1	Arizona	4.8	$\Delta t = 10$ Tage

Tabelle 6: Genauigkeit von Höhenmodellen erstellt aus Weltraumbildern

Die benutzten russischen Weltraumfotos von der TK350 hatten keine gute Bildqualität. Sie waren stark verkratzt und wiesen ein starkes Filmkorn auf. Der Kontrast in den Waldgebieten war so schwach, dass die Ergebnisse in den Waldflächen nicht akzeptabel waren. Die Standardabweichung der Höhen in flachen und offenen Gebieten von 20m entspricht einer Parallaxengenauigkeit von 0,8 Pixeln im Verhältnis zur effektiven Pixelgröße von 13m. Dagegen wurde zwischen durch GPS bestimmten Vergleichspunkten und dem TK350-DHM im Quadratmittel eine Abweichung von nur 4,7m in flachen Bereichen erzielt, entsprechend einer Parallaxengenauigkeit von 0,2 Pixeln. Vergleichspunkte eignen sich nicht zur realistischen Abschätzung der Genauigkeit eines DHM da sie in Bereichen mit gutem

Bildkontrast liegen und in der Regel nicht durch unmittelbar benachbarte Objekte gestört werden.

Die ASTER-Bilder haben eine stereoskopische Überdeckung der Kanäle im nahen Infrarot. Dieses hat einen großen Vorteil für die Bildzuordnung in Waldflächen, die in diesem Spektralbereich gute Kontraste aufweisen. Die Genauigkeit von 21,7m in flachen und offenen Gebieten entspricht einer Parallaxengenauigkeit (Spx) von 0,85 Pixeln. Trotz der im Verhältnis zu den SRTM-DHM's eingeschränkten Höhengenaugigkeit führt die mögliche Rasterweite des DHM von 3 Pixeln, entsprechend 45m, in gebirgigen Bereichen zu einer besseren Detailinformation als bei den SRTM-Daten mit einer Rasterweite von 90m.

Ein SPOT 5-Stereomodell, das nur einen Tag Zeitunterschied zwischen den beiden Bildern aufweist, war als Level 1A und Level 1B Produkt verfügbar. Die unterschiedliche Geometrie dieser Produkte machte eine unterschiedliche Bearbeitung erforderlich. Die Level 1A-Bilder wurden mit dem Hannoverschen Programm BLASPO für Satellitenzeilenscanneraufnahmen ausgewertet und die Level 1B-Daten mit dem Hannoverschen Programm CORIKON, das auf eine Ebene projizierte Bilder bearbeiten kann. Die erzielten Objektgenauigkeiten waren nahezu identisch, so dass in Tabelle 6 keine Unterscheidung zwischen beiden erforderlich war. Wie bei allen panchromatischen Bildern ist der Kontrast in Waldbereichen eingeschränkt, dieses wirkt sich aber nicht so negativ aus wie bei den TK350-Aufnahmen. Auch hier ist die an Vergleichspunkten erzielte Genauigkeit (Spx=0,4 Pixel) erheblich besser als die Genauigkeit des gesamten DHM (Spx=0,9 Pixel).

SPOT 5 hat neben den beiden HRG Hauptinstrumenten den zusätzlichen Stereosensor High Resolution Stereo (HRS). Dieser Sensor hat zwei Optiken die 20° nach vorne und 20° nach hinten schauen und damit eine Stereoüberdeckung vom selben Orbit ermöglichen. Die HRS-Bilder werden normalerweise nicht vertrieben, sie standen aber im Rahmen einer Arbeitsgruppe für das SPOT HRS study team zur Verfügung. In dem Testgebiet Chiemsee konnten als Referenzdaten Laserscanning-DHM's der Bayerischen Landesvermessung benutzt werden. Die mit den HRS-Aufnahmen erzielten Genauigkeiten liegen unter den Einflüssen von Bäumen und Gebäuden auf die Höhenbestimmung. Damit konnten die HRS-Höhenmodelle mit dem Hannoverschen Programm RASCOR gefiltert werden, das die nicht zur Erdoberfläche gehörenden Punkte aus dem Datensatz entfernt. Liegen allerdings in geschlossenen Waldgebieten keine Punkte auf dem Boden, so ist auch die Wirkung der Filterung eingeschränkt. In Tabelle 6 ist die deutliche Genauigkeitssteigerung durch die Filterung zu sehen.

Die hohe Auflösung der IKONOS- und QuickBird-Aufnahmen verspricht von vornherein eine höhere Auswertegenauigkeit. In Maras war ein Stereopaar, aufgenommen vom gleichen Orbit, verfügbar. Das schwache Höhen-Basis-Verhältnis von 7,5 führt zwar zu schleifenden Schnitten, hat aber große Vorteile für die automatische Bildzuordnung, so dass eine Parallaxengenauigkeit von 0,22 Pixeln erreicht wurde. Die Details des abgeleiteten DHM enthalten ausreichende Details zur Erstellung eines 3D-Stadtmodell. Dagegen lagen im Bereich Zonguldak IKONOS-Bilder vor, die im Juli und im Oktober aufgenommen wurden. Während dieser Zeit änderte sich die Sonnenhöhe von 67° auf 41° und bewirkte stark geänderte Schatten. Dadurch war die automatische Bildzuordnung in den Waldgebieten weitgehend erfolglos, aber auch im Stadtgebiet gab es erhebliche Probleme – sichtbar auch in der Genauigkeit des Höhenmodells von nur +/-5,8m, entsprechend einer Parallaxengenauigkeit von nur 1,5 Pixeln.

Im Bereich von Arizona lagen zwei QuickBird-Aufnahmen mit einem Aufnahmezeitunterschied von 10 Tagen vor. Während dieser Zeit änderte sich die radiometrische Grundlage nicht, so dass es keinerlei Schwierigkeiten mit der automatischen Bildzuordnung gab. Die erzielte Genauigkeit von $\pm 4,8\text{m}$ im Verhältnis zu dem nicht fehlerfreien Höhenmodell des USGS entspricht einer Parallaxengenauigkeit von 0,8 Pixeln.

4 Zusammenfassung

Digitale Höhenmodelle können auf wirtschaftliche Weise mittels Weltrauminformationen erstellt werden. Für den größten Teil der Erde liegen die durch InSAR erstellten Höhenmodelle der Shuttle Radar Topography Mission vor. Die C-Band-Daten stehen kostenlos mit einer Rasterweite von $3''$ zur Verfügung. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, mit nicht unerheblichem Aufwand Höhenmodelle aus Weltraumaufnahmen zu erstellen, die keinen Vorteil gegenüber den SRTM-Daten haben. Für ebene und offene Gebiete haben sie eine Genauigkeit in der Größenordnung von $\pm 2,7\text{m}$ bis $\pm 4,9\text{m}$ wenn die meistens vorhandenen Lageverschiebungen berücksichtigt werden.

Die aus Weltraumbildern erstellten DHM's haben in offenen und ebenen Gebieten eine Genauigkeit, die einer Standardabweichung der x-Parallaxe von etwa 0,8 Pixeln entspricht (in Formel 1: Faktor = 0,8). Mit Vergleichspunkten wird dagegen ein Spx von 0,2 bis 0,5 Pixeln erreicht – Vergleichspunkte sind jedoch nicht repräsentativ für die Genauigkeit der Höhenmodelle. Die sinnvolle Rasterweite von mittels automatischer Bildzuordnung erstellter DHM's liegt bei 3 Pixeln. Damit können trotz der niedrigeren Genauigkeit in Gebirgen mehr Details aus ASTER-DHM's als aus den SRTM Resultaten entnommen werden. Für die SPOT-Aufnahmen trifft dieses bereits im Flachland zu. Die sehr hoch auflösenden IKONOS- und QuickBird-Aufnahmen lassen deutlich bessere Genauigkeiten zu. Ihre Rasterweite liegt auch in einer anderen Abstandsklasse. Die geometrische Qualität eines Höhenmodells kann nicht mit einer einzigen Größe beschrieben werden, es gibt eine klare Abhängigkeit von der Geländeneigung und in Waldgebieten ist neben systematischen Fehlern auch mit einer größeren Standardabweichung zu rechnen.

Literaturverzeichnis

- Airault, S., Mandé, St., Gigord, P., Cunin, L., Breton, E., Bouillon, A., Gachet, R., Bernard, M., 2003: Reference3D Accuracy and quality process: First Assessment and perspectives, ISPRS joint workshop Mapping from Space 2003, Hannover, auf CD + <http://www.ipi.uni-hannover.de/>
- Börner, A., Hilliger, E., Reulke, R. 1997: The Optimization of the Stereo Angle of CCD-Line-Sensors with end to end Simulation Systems, „Sensors and Mapping from Space“, Universität Hannover 1997, auf CD
- Jacobsen, K. 2001: New Developments in Digital Elevation Modelling, Geoinformatics, Juni 2001, pp 18 – 21
- Jacobsen, K.2003: DEM Generation from Satellite Data, EARSeL Ghent 2003, Remote Sensing in Transition, Millpress ISBN 90-77017-71-2, pp 273 - 276