

## Genauigkeitsanalyse von hochauflösenden Gelände- und Oberflächenmodellen

ERICH H. MEIER & DANIEL R. NÜESCH, Zürich

**Zusammenfassung:** Die steigende Nachfrage nach hochauflösenden Gelände- und Oberflächenmodellen führte in den letzten Jahren dazu, dass sich neben der Photogrammetrie zwei weitere Technologien für deren Herstellung etablierten: Das *Laserscanning* sowie die *SAR*-Interferometrie (*Interferometric Synthetic Aperture Radar InSAR*). Auch diese Verfahren sind heute operationell einsetzbar und erlauben die Herstellung von qualitativ hochwertigen Terrain- und Oberflächenmodellen. In den vergangenen Jahren wurden an den *Remote Sensing Laboratories RSL* des Geographischen Institutes der Universität Zürich verschiedene solcher Modelle hergestellt bzw. im Rahmen unterschiedlichster Projekte evaluiert und eingesetzt.

Im Rahmen einer Studie des Bundesamtes für Landestopographie wurden in einem Testgebiet in den Schweizer Voralpen Terrain- und Oberflächenmodelle mit Hilfe von *Laserscanner*-, *InSAR*- und Luftbilddaten hergestellt. Qualitative und quantitative Qualitätsanalysen zeigten, dass alle drei Technologien in der Lage sind, eine Informationsdichte zu liefern, welche die Herstellung von Rastermodellen mit Maschenweiten in der Größenordnung von 1–2 Metern erlauben. Die Höhengenaugigkeiten liegen bei rund 20 cm bei den *Laser*modellen, 30 cm beim *InSAR*-Modell und ca. 50 cm beim photogrammetrischen Datensatz.

**Summary:** *Accuracy analysis of high-resolution terrain and surface models.* There has been an increasing demand for high-resolution digital elevation and surface models in recent years. This has resulted in the establishment of two new technologies used for their production, besides photogrammetry: laser scanning and SAR interferometry (*Interferometric Synthetic Aperture Radar, or InSAR*). These two techniques are currently operational, and allow the generation of high-quality terrain and surface models. In the last few years the Remote Sensing Laboratories at the University of Zurich has produced and evaluated various such models in the context of numerous application-oriented projects.

A study carried out for the Swiss Federal Office of Topography has resulted in terrain and surface model generation with the help of laserscanner, InSAR, and aerial photographs for a test area in the Swiss pre-Alps. Qualitative and quantitative analyses have shown that all three methods are capable of generating information detailed enough to allow raster models with a grid-size of about 1–2 meters to be produced. Height and location accuracies are highest using laser-scanned data, at about 20 cm. InSAR errors lie within 30 cm, and photogrammetric models within about 50 cm.

### 1 Einleitung

Während der letzten Jahre war ein sprunghafter Anstieg in der Nachfrage nach Terrain- und Oberflächenmodellen zu verzeichnen. Damit einher ging die Entwicklung neuer Technologien für deren Herstellung. Insbesondere das *Laserscanning*, die *SAR*-Interferometrie sowie die digitalen Luftbildkameras bzw. Zeilenabtaster haben mittler-

weile einen operationellen Status erreicht und sind zu ernsthaften Konkurrenten der traditionellen Photogrammetrie herangewachsen.

Im Rahmen des Projektes zur Aktualisierung der landwirtschaftlichen Nutzflächen wurde durch das Schweizerische Bundesamt für Landestopographie festgestellt, dass für die Erfassung der aktuellen Bodennutzung

Farborthophotos am besten geeignet sind. Da jedoch die zu ihrer Herstellung benötigten, verfügbaren Geländemodelle die geforderte Genauigkeit von 1 m in den Orthophotos nicht erreichten, wurde 1999 ein Methodenvergleich gestartet. Dieser hatte zum Ziel, die nötigen Entscheidungsgrundlagen bezüglich Genauigkeit und Kosten im Hinblick auf die großflächige Herstellung von hochauflösenden Terrain- und Oberflächenmodellen zu liefern. In diesem Zusammenhang wurden die *Remote Sensing Laboratories RSL* des Geographischen Institutes der Universität Zürich mit der Durchführung der Genauigkeitsanalysen beauftragt. Dabei standen primär Fragen der Genauigkeit und technischen Zuverlässigkeit im Vordergrund. Finanzielle, terminliche, logistische oder organisatorische Aspekte wurden nur am Rande berücksichtigt.

## 2 Methodik

Die zahlreichen Erfahrungen, welche bei der Qualitätsanalyse von Geländemodellen gemacht wurden, führten zu einem mehrstufigen Vorgehen, welches neben der numerischen Genauigkeit einzelner Punkte vor allem auch die Zuverlässigkeit der (flächenhaften) Produkte mit in Betracht zieht:

- In einem ersten Schritt wurden die Produkte durch eine detaillierte, optische Analyse der synthetisch schattierten Modelle auf ihre Vollständigkeit, Konsistenz und Plausibilität hin überprüft. Allfällige Lücken oder andere Artefakte wurden auf diese Weise rasch erkennbar. Zudem konnte die Lagegenauigkeit überprüft werden, indem den schattierten Modellen Referenz-Informationen überlagert wurden. Dazu gehörten primär digitalisierte Pläne des Maßstabes 1:2500 als Vektor-Information und, weil diese nicht flächendeckend verfügbar waren, auch Übersichtspläne des Maßstabes 1:10000 in Raster-Form.
- In einem zweiten Schritt wurden die Verteilungen der Höhenwerte überprüft, um mit Hilfe allfälliger Artefakte Rückschlüsse auf Mängel bei bestimmten Verarbeitungsschritten ziehen zu können.
- Im nächsten Schritt wurden Differenzen zwischen den verschiedenen Modellen berechnet und visualisiert. Ihre flächenhafte Interpretation und Beurteilung wurde durch die Herleitung statistischer Kenngrößen sowie durch den Vergleich von Profillinien im Bereich ausgewählter Landschaftselemente unterstützt.
- Der letzte Schritt umfasste die Überprüfung der Höhenwerte mittels Lagefixpunkten sowie die Herleitung darauf basierender, statistischer Größen. Diese Überprüfung umfasste auch eine individuelle Beurteilung der Modelle in der unmittelbaren Umgebung der einzelnen Kontrollpunkte. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Überprüfung von Oberflächenmodellen mittels Bodenpunkten zwar möglich ist, jedoch mit großer Vorsicht durchgeführt werden muss. Kontrollpunkte mit Höhenabweichungen, welche auf lokale Gegebenheiten wie Bebauungen oder Vegetationsdecken und somit auf die Charakteristik der Oberflächenerfassung zurückzuführen waren, wurden nicht berücksichtigt. Darunter fallen z. B. Auswirkungen der Vegetation auf *Laser*-Oberflächenmodelle oder von Strommasten auf *InSAR*-Modelle. In mehreren Fällen konnte durch diese detaillierte Überprüfung auch eine bessere Differenzierung zwischen Höhen- und Lagefehlern erreicht werden, beispielsweise in unmittelbarer Nähe von Bruchkanten. Dieses Vorgehen führte schon verschiedentlich zu angeregten Diskussionen, weil die individuelle Überprüfung der einzelnen Punkte keinen einfachen numerischen Maßstäben folgt und somit scheinbar subjektive Aspekte in eine wissenschaftlich exakte Methode einbringt. Da jedoch die Überprüfung mittels Lagefixpunkten nur für Terrainmodelle angebracht ist und die Mehrzahl der getesteten Datensätze die Oberfläche darstellt, gilt es, dafür zu sorgen, dass diese punktweise Überprüfung nur dort zum Einsatz kommt, wo die durch das Oberflächenmodell repräsentierten Höhen mit der Terrainhöhe gleichgesetzt werden darf. Es entspricht somit dem Bestreben, den unterschiedlichen Charakteristika von Terrain-

und Oberflächenmodellen Rechnung zu tragen.

### 3 Testgebiet und geometrisches Referenzsystem

Die Auswahl des Testgebietes war durch die Bedürfnisse und Vorarbeiten des Bundesamtes für Landestopographie gegeben. Es umfasste je nach Datenprodukt ganz oder teilweise den Perimeter des Kartenblattes 1:25000 LK 1168 *Langnau i.E. (im Emmental)* und somit eine Fläche von ca. 90 bis 210 km<sup>2</sup>. Seine Lage im nördlichen Alpenvorland äußerte sich mit einem Höhenbereich von rund 600 bis 1350 müM mit z.T. sehr steil ausgeprägter Topographie. Dieser Umstand sowie die Tatsache, dass ein Großteil des Gebietes mit Nadelbäumen bewaldet ist, stellte besonders hohe Anforderungen an die Herstellung der Geländemodelle.

Als geometrisches Referenzsystem wurde für alle Produkte das traditionelle Bezugssystem der Schweizerischen Landesvermessung *CH1903* mit dem Landesnetz *LV03* und den Gebrauchshöhen des Landesnivellement *LN03* verlangt. Da jedoch moderne Verfahren wie das *Laserscanning*, die *SAR-Interferometrie* und auch die *Aerotriangulation* bei der Auswertung der Luftbilder sich auf *DGPS*<sup>1</sup>-gestützte Navigation und somit bei der Modellherstellung auf globale, verzerrungsfreie Referenzsysteme abstützen, ergeben sich daraus zusätzliche Fehlerquellen, welche außerhalb der flächenhaften Datenerfassung oder der Produktherstellung liegen. Dabei geht es vor allem um die Geoidundulationen, welche eine Differenz zwischen den Gebrauchshöhen und den aus *GPS*-Messungen errechneten Ellipsoidhöhen von mehreren Metern ausmachen können. Daneben sind aber auch Netzverzerrungen zu berücksichtigen, welche als Differenzen zwischen dem in der Praxis verwendeten Landesnetz und einem verzerrungsfreien, geodätischen Referenzsystem in Erscheinung treten. Diese Abweichungen kön-

nen ebenfalls Beträge von über einem Meter ausmachen.

Aus diesem Grund wurde vor der Durchführung der quantitativen Analysen das Ausmass der Geoidundulationen sowie der Netzverzerrungen für den Perimeter des Testgebietes berechnet: Während vertikale sowie in Nord-Süd-Richtung verlaufende Netzverzerrungen vernachlässigbar sind, umfassen die West-Ost-Verzerrungen eine Bandbreite von ca. 0.26 m und die Geoidundulationen gar eine solche von 0.52 m. Falls diese Abweichungen nicht schon bei der Produktherstellung berücksichtigt wurden, hatte dies spätestens bei der Genauigkeitsanalyse zu erfolgen. Eine Nichtberücksichtigung dieser Größenordnungen würde zu einer systematischen Fehlbeurteilung des entsprechenden Herstellungsverfahrens führen.

## 4 Eingesetzte Technologien

### 4.1 Photogrammetrie

Aus den Standardbildflügen des Bundesamtes für Landestopographie für die Kartennachführung stand das Farbfotomaterial mit einem mittleren Bildmaßstab von 1:30000 und einer Längs- bzw. Querüberdeckung von 70% resp. 30% in digitalisierter Form zur Verfügung. Die Aufnahmen erfolgten am 20. 6. 1998 mit einer *Leica RC-30*-Kamera und einem 153 mm-Objektiv. Die Bildorientierung erfolgte durch das Bundesamt mittels automatisierter *Aerotriangulation*. In Waldgebieten wurden Werte des bestehenden Geländemodelles *DHM25* des Bundesamtes für Landestopographie mit einer ursprünglichen Maschenweite von 25 m auf die erforderliche Rasterweite interpoliert und in das photogrammetrische Geländemodell eingesetzt. Im übrigen Gebiet wurde das Modell mittels automatischer Bildkorrelation und manueller Nachbearbeitung in Form eines *TIN*<sup>2</sup> erfasst. Speziell der Übergang Wald – Nichtwald wurde, wo nötig, manuell mit Bruchkanten bearbeitet, damit keine „fliegenden

<sup>1</sup> *DGPS*: Differential Global Positioning System

<sup>2</sup> *TIN*: Triangular Irregular Network

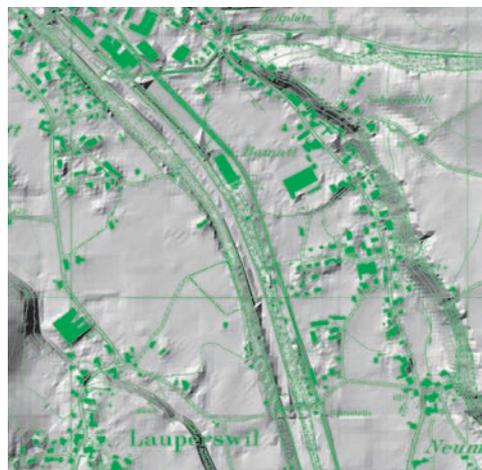
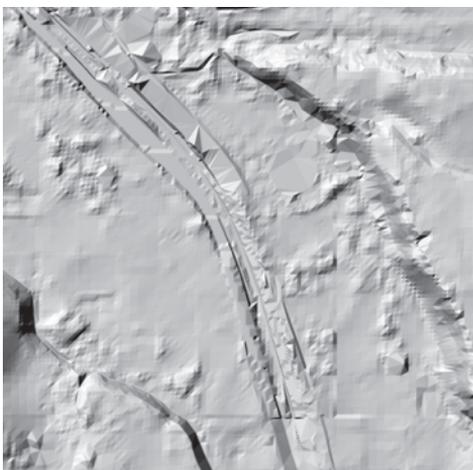
Vorhänge' des automatischen Bild-*Matching* übrig bleiben. Um den Vergleich mit den anderen Modellen zu vereinfachen, erfolgte eine Umrechnung des *TIN* in ein 2-m-Raster. Unter diesen Voraussetzungen wurde, basierend auf dem vorhandenen Bildmaterial, an die Grenze des photogrammetrisch Machbaren gegangen.

Abb.1 zeigt einen ca. 1.5 km  $\times$  1.5 km umfassenden Ausschnitt aus dem schattierten, photogrammetrisch hergestellten Modell. In der Bildmitte von unten nach oben links verlaufend ist der Flusslauf der *Emme* erkennbar. Kleine und größere Dreiecksstrukturen sind als Folge der Dreiecksvermaschung im Zusammenhang mit dem Einfügen von Einzelpunkten oder Bruchkanten deutlich erkennbar. Auffallend ist eine ‚bucklige‘ Struktur in Siedlungsbereichen. Auf Grund der digitalen Bildkorrelation wird hier die Oberfläche und nicht das Terrain wiedergegeben. Wir haben somit keine einheitliche Charakteristik des Modells vorliegen: Während geschlossene Waldflächen speziell erfasst und durch Terraininformationen ersetzt wurden, verfügen bebauete und mit Einzelbäumen bestandene Gebiete über eine Oberflächencharakteristik. Im unteren Bildbereich und rechts der Bildmitte sind zudem Artefakte erkennbar, welche auf Grenzbereiche zwischen photogrammetrischen Blöcken zurückzuführen sind.

## 4.2 Laserscanning

Das *Laserscanning* ist ein aktives, flugzeuggestütztes Messverfahren für die räumliche Erfassung der Erdoberfläche. Es basiert auf gerichteten Entfernungsmessungen, welche als dreidimensionale Vektoren zwischen dem Sensor und der Geländeoberfläche zu verstehen sind. Zu diesem Zweck werden *Laser*-Impulse ausgesendet und ihre Laufzeit zum Boden und zurück gemessen. Zusätzlich wird der *Laser*-Strahl quer zur Flugrichtung abgelenkt, was zu einer zeilenweisen Aufnahme von Höhenprofilen quer zur Flugachse führt. Durch die Vorwärtsbewegung der Plattform werden diese Profile aneinander gereiht und so eine flächenhafte Erfassung der Erdoberfläche erzielt. Voraussetzung für die Herstellung von Oberflächenmodellen sind die hochpräzise Erfassung von Position und Lage der Messplattform mittels *DGPS*- und *INS*-Systemen<sup>3</sup>. Diese Messungen ermöglichen die Berechnung der dreidimensionalen Koordinaten der Reflexionspunkte, welche die Geländeoberfläche inklusive aller Gebäude, Vegetation, temporärer Oberflächenformen etc. repräsentieren. Je nach Verwendungszweck werden diese Rohmessungen gefiltert und in ein regelmäßiges Gitter umgerechnet.

<sup>3</sup> *INS*: Inertial Navigation System



**Abb. 1:** Photogrammetrisches Modell, schattiert. Rechts Überlagerung mit Übersichtsplan 1 : 10000.

Moderne Systeme bieten die Möglichkeit, bei diesen Filterungen die zuerst bzw. zuletzt am Sensor eintreffenden Reflexionsanteile zu berücksichtigen. Man spricht in diesem Zusammenhang vom *First-* bzw. *Last-Pulse*-Verfahren. Zusammen mit der Tatsache, dass *Laser*-Impulse auch ausgeprägte Vegetationsschichten wie Wald (vor allem in der kalten Jahreszeit) immer wieder stellenweise durchdringen, ergibt sich die Möglichkeit, den Waldboden oder auch die Vegetationsoberfläche zu erfassen. Die Genauigkeit der Einzelmessungen liegt bei heutigen Systemen unter 15 cm. Bei Flughöhen von ca. 500–1000 müG und den eingesetzten Pulsrepetitionsfrequenzen werden Punktdichten erreicht, welche Rasterweiten in den Endprodukten von ca. 1–2 m erlauben. Einen Überblick über das Prinzip sowie den Stand der *Laserscanning*-Technik erhält man von WEHR & LOHR (1999).

Die Aufnahmen im Testgebiet *Langnau* erfolgten am 27. 5. 1999 und somit bei einer sehr dichten Vegetationsdecke mit einem *ALTM-1020-Scanner* durch die Firma *TopScan*. Für die Aufnahme von 92 km<sup>2</sup> mit einer mittleren Flughöhe von 830 müG und einem Streifenabstand von ca. 250 m waren sowohl für das Oberflächen- als auch das Terrainmodell je 23 Flugstreifen nötig.

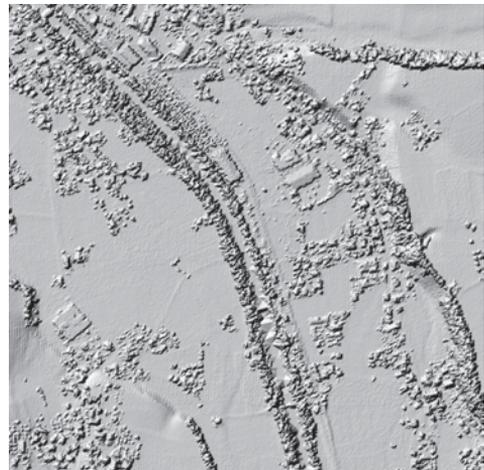
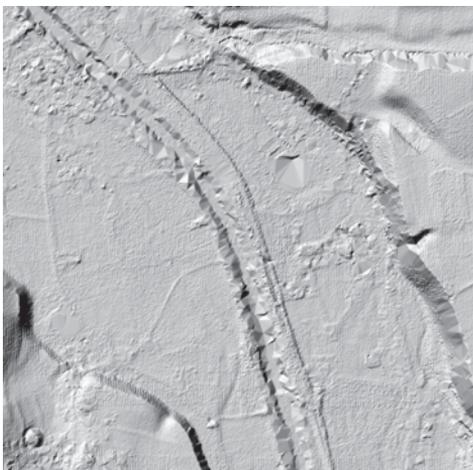
Abb. 2 zeigt die mittels *Laserscanning* hergestellten Modelle über demselben Gebiet

wie in Abb. 1. Auf den ersten Blick erstaunen der grosse Detailreichtum und die Präzision, mit welchen die Form von Objekten abgebildet wird.

### 4.3 *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

Unter der Bezeichnung *Synthetic Aperture Radar (SAR)* versteht man ebenfalls aktive Systeme, welche mit Hilfe von Mikrowellen, im vorliegenden Fall im X-Band bei 9.6 GHz, die Erdoberfläche ‚beleuchten‘ und aus den reflektierten Signalen Bilder und sogar Oberflächenmodelle erzeugen lassen. *SAR*-Systeme senden ihre frequenzmodulierten Impulse immer senkrecht zur Flugrichtung schräg nach unten aus und erfassen so einen Bildstreifen, welcher seitlich versetzt, parallel zum Flugweg verläuft.

Die räumliche Auflösung eines *SAR*-Systems quer zur Flugrichtung ist durch die Dauer sowie die Bandbreite der Sendeimpulse bestimmt. Die Auflösung in Flugrichtung ergibt sich im Wesentlichen aus der Größe der verwendeten Antenne und ist somit ebenfalls unabhängig von der Abbildungsdistanz. Als Primär-Information erhält man einen Hologramm-ähnlichen Rohdatensatz, welcher zuerst mittels aufwändiger Rechenverfahren in ein für das menschliche Auge interpretierbares Bild umgewandelt werden muss.



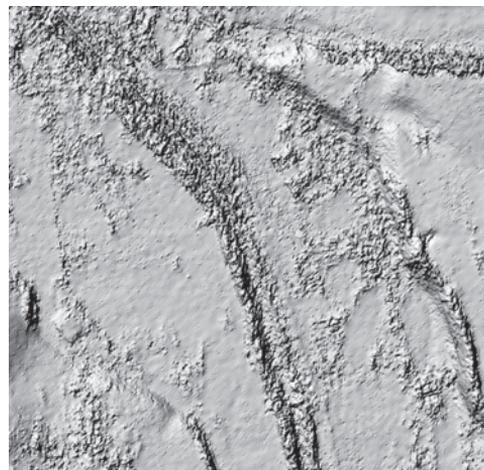
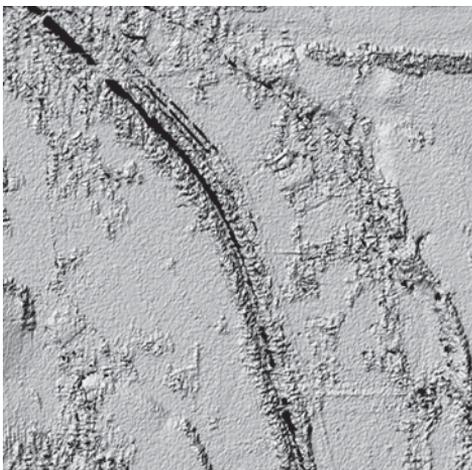
**Abb. 2:** *Laserscanner*-Modelle, schattiert. Links: Terrain-, rechts: Oberflächenmodell.

Ein großer Vorteil der *SAR*-Bilder besteht darin, dass sie neben Intensitäts- auch Phasen-Informationen enthalten. Diese macht man sich bei der *SAR*-Interferometrie<sup>4</sup> zu Nutze, indem man die von einer Antenne ausgesendeten und am Boden reflektierten Signale über 2 quer zur Flugrichtung versetzte Antennen empfängt. Dieser Versatz führt dazu, dass die empfangenen Radarechos Phasenverschiebungen aufweisen, welche von der Höhenlage der jeweiligen Rückstreuerelemente am Boden abhängen. Kennt man die exakte Position und Lage der Plattform und somit die Phasenzentren beider Antennen, so kann man aus den Phasenverschiebungen ein Oberflächenmodell herleiten. Eine Einführung und einen Überblick über die *SAR*-Technik und die heutigen Systeme findet man bei CURLANDER & McDONOUGH (1991) oder KLAUSING & HOLPP (2000), eine umfassende Einführung in die *SAR*-Interferometrie bei HANSEN (2001).

Das Testgebiet wurde mit 2 *SAR*-Sensoren aufgenommen: Mit dem *DoSAR*-System der Firma *Astrium* (ehemals *Dornier*) und mit dem *AeS-1* der Firma *Aero-Sensing Radarsysteme*. Detaillierte Beschreibungen dieser Systeme findet man bei FALLER et al.

(1998) bzw. bei MOREIRA (1996). Beide Plattformen operierten in Flughöhen von ca. 3500 m üG und erfassten einen Bildstreifen am Boden von 4 km Breite im Falle von *DoSAR* bzw. rund 2.5 km beim *AeS*-System. Zwecks Minimierung des Systemrauschens, des Radarschattens und der *Layover*-Gebiete sowie im Hinblick auf eine bessere Wiedergabe vertikaler Kanten wurde das Gebiet von beiden Systemen aus verschiedenen Richtungen aufgenommen. Beim *DoSAR*-System waren dies die Richtungen 0° und 180°, mit dem *AeS*-Sensor wurde zusätzlich auch aus den Richtungen 90° und 270° beleuchtet. Mit den *DoSAR*-Daten wurde, basierend auf der verwendeten Pulsbandbreite von 100 MHz, eine räumliche Auflösung von 1.5 m quer und ca. 30 cm parallel zur Flugrichtung erzielt. Bei *AeS* waren dies mit einer Bandbreite von 400 MHz rund 12 cm in Azimut- und 37 cm in *Range*-Richtung. Für die Kalibration und Validierung der *DoSAR*-Modelle wurden mit einem mit *DGPS* ausgerüsteten Fahrzeug zahlreiche Straßen innerhalb des Testgebietes befahren. Für dieselben Arbeitsschritte mit den *AeS*-Daten wurden insgesamt 8 so genannte *Corner-Reflektoren* als Kalibrationsquellen aufgestellt. Bleibt anzufügen, dass beide *SAR*-Befliegungen unter sehr schlechten Wetterbedingungen mit dichter Bewölkung, Regen und starken Winden durchgeführt wurden.

<sup>4</sup> *InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar*



**Abb. 3:** *InSAR*-Modelle, schattiert. Links: *DoSAR*, rechts: *AeS*.

Abb. 3 zeigt die entsprechenden Ausschnitte aus den mit *InSAR* hergestellten, schattierten Oberflächenmodellen. Sie zeigen ebenfalls einen recht hohen Detaillierungsgrad, jedoch mit deutlich weniger Bildschärfe als dies beim *Laser*-Oberflächenmodell der Fall war.

## 5 Resultate

Die Resultate einer ersten Qualitätsanalyse wurden Ende 1999 dem Bundesamt für Landestopographie unterbreitet und im Sommer 2000 publiziert (MEIER et al. 2000). Dabei wurden bei den *InSAR*-Modellen deutlich erkennbare, systematische Fehler und Artefakte festgestellt. In der Folge entschlossen sich beide Firmen, ihre Verarbeitungsketten zu überarbeiten, auf der Basis der aufgenommenen Rohdaten neue Modelle herzustellen und diese einer neuen Qualitätsanalyse zu unterziehen. In den folgenden Kapiteln wird primär auf diese neuen Resultate eingegangen. Da die Qualitätsverbesserungen z.T. sehr deutlich ausgefallen sind, werden diese in den Kapiteln 5.3 und 5.4 ebenfalls kurz vorgestellt.

### 5.1 Photogrammetrisches Modell

Dieser Datensatz zeichnet sich in allen Bereichen durch vergleichsweise wenig Detailreichtum aus. Die Fehler auf Grund der Facettenstruktur als Folge der Dreiecksvermaschung halten sich in Grenzen und liegen in der Regel deutlich unter einem Meter. Nur vereinzelt sind größere, eng begrenzte Artefakte mit mehreren Metern Abweichung erkennbar (s. Abb. 1). Die Lage des Modells kann auf Grund des mangelnden Detailreichtums nicht durch Überlagerungen mit Vektordaten verifiziert werden. Erst die Berechnung von Differenzbildern sowie Korrelationen mit anderen, korrekt gelagerten Modellen zeigt, dass keine größeren oder systematischen Verschiebungen vorliegen.

Die Häufigkeitsverteilung der Höhenwerte zeigt auffallende, relative Maxima, welche sich an den Höhenlinien der Landeskarte 1:25000 orientieren. Dies ist eine Folge des Einfügens von DHM25 – Informationen in

den Waldpartien des photogrammetrischen Modells. Das 25-m-Modell wurde bekanntlich auf der Basis von digitalisierten Höhenlinien hergestellt. In den Wald- und Waldrandgebieten sind denn auch die größten Höhenfehler sowie Artefakte entlang den Informationsgrenzen zu verzeichnen.

### 5.2 Terrain- und Oberflächenmodell aus Laserscanning

Das Geländemodell aus der *Laser*-Befliegung zeigt einen deutlich höheren Detaillierungsgrad als das photogrammetrische Modell. In offenem Gelände sind feinste Strukturen wie Straßen und Wege auf Grund ihrer leichten Böschungen gut erkennbar (s. Abb. 2, links). In diesen Bereichen ist aber auch ein leichtes System-Rauschen sichtbar, welches sich in Höhengschwankungen mit einer Amplitude von ca. 20 cm manifestiert. Artefakte in Form von Dreiecksstrukturen sind in Waldbereichen zu erkennen, wo mangels Durchdringung der Vegetationsdecke als Folge des ungünstigen Befliegungszeitpunktes eine teilweise manuelle Nachbearbeitung vorgenommen werden musste. Dieser Effekt ist in Abb. 2 entlang des Flusslaufes der *Emme* deutlich erkennbar.

Im *Laser*-Oberflächenmodell beschränken sich die Dreiecksstrukturen auf den praktisch vernachlässigbaren Bereich von Waldrändern entlang von Flussläufen: Auf Grund der fehlenden *Laser*-Echos über Wasserflächen musste hier über etwas größere Distanzen hinweg interpoliert werden. Wie beim Geländemodell ist auch das Systemrauschen als quer zur Flugrichtung verlaufende Rippelmarken mit ähnlicher Amplitude erkennbar. Ansonsten besticht dieses Modell durch seine Detailtreue und seinen immensen Informationsgehalt. Wälder, einzeln stehende Bäume und Gebüsch sowie Gebäude lassen sich deutlich identifizieren.

Die Genauigkeit der horizontalen Lage beider *Laser*-Modelle wurde mittels Vektordaten von Grenzlinien und Gebäudegrundrissen überprüft und liegt innerhalb der Maschenweite von 2 m. Die Häufigkeitsverteilungen beider Modelle zeigen über den ganzen Höhenbereich keine Artefakte.

### 5.3 InSAR Oberflächenmodelle

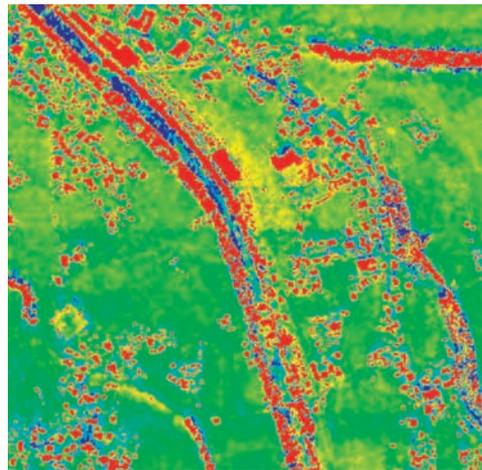
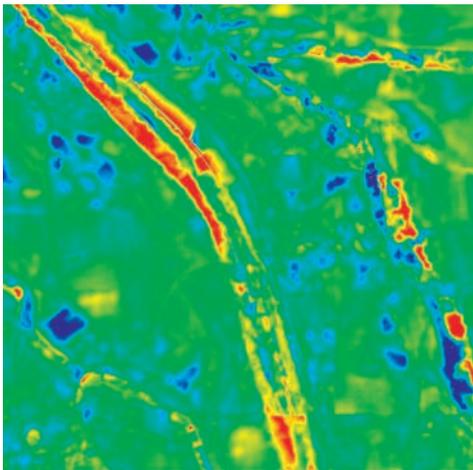
Beide *InSAR*-Modelle verfügen ebenfalls über eine große Informationsdichte, jedoch nicht mit derselben Detailtreue wie die *Laser*-Modelle. Gebäude und einzelne Bäume sind zwar erkennbar, jedoch nicht als solche identifizierbar. Dementsprechend werden auch Waldränder je nach Aufnahmerichtung mehr oder weniger scharf wiedergegeben. Diese Unschärfen zeigen sich nicht nur als abgeschrägte Objekte, sondern auf Grund so genannter *Layover*- und Mehrweg-Effekte auch als zusätzliche Vertiefungen und Überhöhungen im Oberflächenmodell. Die horizontale Lage beider Modelle sowie ihre Verteilungen sind einwandfrei.

In der zweiten, verbesserten Version konnte das Systemrauschen im *DoSAR*-Modell deutlich reduziert werden und liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie jenes im *AeS*-Modell. Die starke Glättung führte aber gleichzeitig zu einem Anstieg des Anteils fehlender Höhenwerte (*missing values*) von 4.9% bei der ersten zu 8.2% bei der zweiten Version. Diese Werte liegen deutlich über den entsprechenden Kennzahlen des *AeS*-Modells. Flächen mit *missing values* sind vor allem Gebiete mit Radarschatten und *Layover* sowie glatte Oberflächen, an denen der Großteil des Radarsignals durch

Spiegelung verloren ging. Die in der ersten Version des *DoSAR*-Modells noch ungenügend unterdrückten *Range-Sidelobes*, welche als lineare Artefakte deutlich in Erscheinung traten, sind weitgehend beseitigt.

### 5.4 Vergleiche

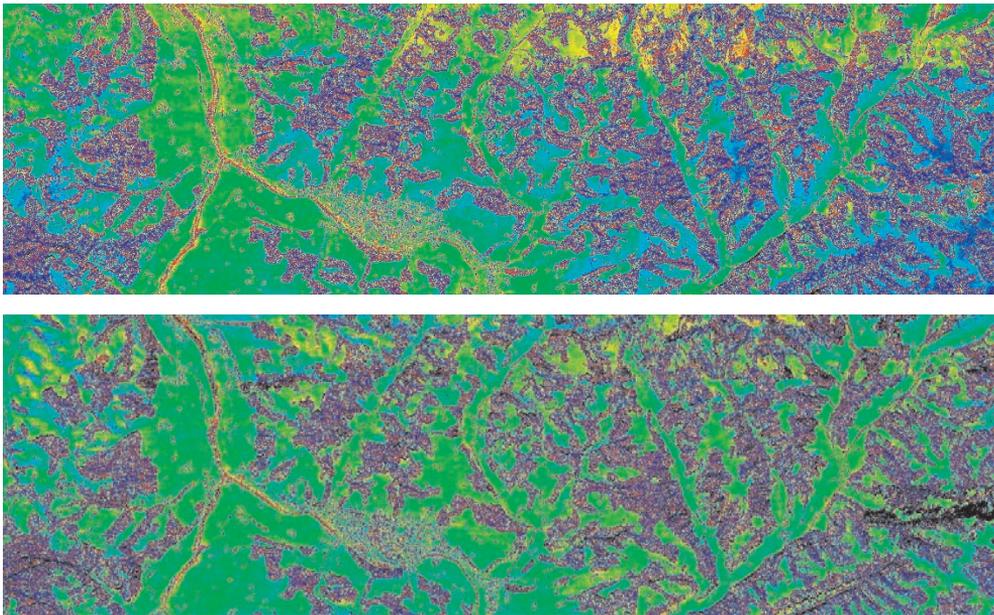
Der flächenhafte Vergleich der Modelle mittels Differenz-„Bildern“ sowie der Vergleich von Profilen bestätigt im Wesentlichen die bereits auf visuelle Art gemachten Erfahrungen. Sowohl beim Vergleich des *Laser*-Geländemodells mit dem photogrammetrischen Modell als auch zwischen dem *Laser*-Oberflächenmodell und den *InSAR*-Modellen zeigen sich die größten Unterschiede im Waldbereich. Diese können bis zu mehrere Meter betragen und sind bei den Terrain-Modellen auf die Interpolation des *Laser*-Modells bzw. den Einsatz von DHM25-Information beim photogrammetrischen Produkt zurückzuführen. Abb. 4 (links) zeigt neben diesen Überhöhungen im *Laser*-Modell auch zahlreiche positive Abweichungen im photogrammetrischen Modell: Dabei handelt es sich um Vegetationsanteile und Gebäude, welche bei der Filterung und Nachbearbeitung nicht vollständig eliminiert wurden. Diese Unterschiede sind alle



**Abb. 4:** Differenzbilder.  
Links: *Laser* (*Last Pulse*) minus Photogrammetrie.  
Rechts: *Laser* (*First Pulse*) minus *InSAR* (*AeS*).







**Abb. 6:** Differenz: *Laser (First Pulse)* minus AeS.  
Oben: Erste Prozessierung.  
Unten: Zweite Prozessierung.



im Wesentlichen auf die unterschiedliche Ausdehnung der Datensätze zurückzuführen. Spalte 2 beinhaltet die gemittelten Abweichungsbeträge. Sie zeigt, dass die *Laser*-Modelle mit Genauigkeiten zwischen 15 und 20 cm aufwarten, während die ersten Versio-

nen der *InSAR*-Modelle mit 0.8 m in der Qualität deutlich abfallen. Das photogrammetrische Modell liegt mit 50 cm mittlerem Höhenfehler im Mittelfeld. Auch die Streuungen und Extremwerte weisen eine ähnliche Reihenfolge auf.

**Tab. 1:** Zusammenstellung der Überprüfungen mittels Lagefixpunkten.

Modell	Anzahl Punkte	$ \overline{\Delta h} $ (m)	$\sigma$ (m)	Min (m)	Max (m)
Photogrammetrie	52	0.48	0.61	- 1.32	1.67
<i>Laser First Pulse</i> (Oberfläche)	45	0.16	0.19	- 0.35	0.67
<i>Laser Last Pulse</i> (Boden)	46	0.19	0.29	- 0.93	0.38
<i>InSAR AeS</i> (1. Prozessierung)	84	0.82	0.97	- 1.86	1.84
<i>InSAR AeS</i> (2. Prozessierung)	86	0.29	0.40	- 1.51	0.89
<i>InSAR DoSAR</i> (1. Prozessierung)	39	0.79	0.86	- 3.14	1.30
<i>InSAR DoSAR</i> (2. Prozessierung)	90	0.70	0.91	- 2.85	2.01

Bemerkenswert ist die Entwicklung der statistischen Kennzahlen von der ersten zur zweiten Version bei den *InSAR*-Modellen: Das *DoSAR*-Modell wurde allein mit dem Ziel, das Rauschen, die *Range Sidelobes* sowie die Wellen zu reduzieren, überarbeitet. Entsprechend ist kaum eine Verbesserung bei der punktwisen Überprüfung zu verzeichnen. Im Gegensatz dazu wurde beim *AeS*-Modell die gesamte Verarbeitungskette mit dem Ziel überarbeitet, die systematischen, Topographie-abhängigen Höhenfehler zu korrigieren. Dies äußerte sich in einer deutlichen Reduktion des mittleren Höhenfehlers von rund 80 cm auf unter 30 cm.

## 6 Schlussfolgerungen

In der offenen Flur erreichen alle Methoden eine Höhengenaugigkeit von mindestens 0.5 m mittlerem Fehler. Das *Laserscanning* weist dabei die besten Werte aus. Es besticht durch sein Auflösungsvermögen und seine Präzision, durch die zeitgleiche Erfassung von Terrain- und Oberfläche sowie durch die ausgereifte Produktionsleistung. Die neuen Resultate der *InSAR*-Verfahren zeigen, dass diese Technologie in ähnlichen Genauigkeitsbereichen liegt wie das *Laserscanning* oder die Photogrammetrie. Die Wiedergabe feiner Oberflächenelemente ist jedoch weniger detailliert. Das Verfahren ist auf Grund der großen, am Boden erfassbaren Streifenbreiten und durch seine Allwettertauglichkeit sehr effizient. Problematisch sind natürliche oder künstliche Reflektoren, welche als Antennen wirken und die Daten lokal verfälschen. Die *Photogrammetrie* verfügt ebenfalls über ein sehr großes Genauigkeitspotenzial, insbesondere wenn man den Einsatz besser geeigneter Bildmaßstäbe in Betracht zieht. Allerdings ist die Herstellung der Modelle mit viel manueller und somit teurer Erfassungsarbeit verbunden.

Auch in methodischer Hinsicht lassen sich einige Lehren ziehen:

- In bewaldeten Gebieten ist nicht nur die Herstellung sondern auch die Validierung von Terrain- und Oberflächenmodellen eine Herausforderung. Je nach Vegetationsdichte und Befliegungszeitpunkt

stößt man an Grenzen, welche sich auch mit großem Aufwand kaum überwinden lassen.

- Vergleichende Studien, welche in deutlich kleineren Testgebieten durchgeführt wurden, zeigen z. T. abweichende Resultate. Dies beweist einmal mehr, dass die Größe des Untersuchungsgebietes sehr wichtig bezüglich der Zuverlässigkeit der gemachten Aussagen ist.
- Neben der Überprüfung der Höhengenaugigkeit mittels Kontrollpunkten sind vor allem flächenhafte Vergleiche mit Differenzbildern außerordentlich wichtig. Sie helfen, Produktions- und Verfahrensmängel wie beispielsweise Verkippungen oder Phasentrends, aufzuspüren und zu beseitigen.

Zur Zeit scheinen vor allem das *Laserscanning*, aber auch die *SAR*-Interferometrie, stetig an Bedeutung zu gewinnen. Daneben wird es interessant sein zu sehen, welche Marktanteile die digitale Photogrammetrie, basierend auf der neuen Generation von Digitalkameras, erreichen wird bzw. auf welche Bereiche der Geodatenerfassung sich diese drei Technologien konzentrieren werden.

## Dank

Die vorliegenden Arbeiten wurden durch eine Studie des Schweizerischen Bundesamtes für Landestopographie initialisiert. Den Verantwortlichen dieses Bundesamtes sowie aller beteiligten Firmen sei an dieser Stelle herzlich für ihre Unterstützung gedankt.

## Literatur

- CURLANDER, J. C. & McDONOUGH, R. N., 1991: Synthetic Aperture Radar-Systems and Signal Processing. – John Wiley & Sons, Inc., New York.
- FALLER, N., HIPPLER, J. & EKANTONO, K. N., 1998: Operational Topographic Mapping in Indonesia with the Interferometric DO-SAR. – Proc. European Conference on Synthetic Aperture Radar – EUSAR'98, Friedrichshafen.
- HANSEN, R. F., 2001: Radar Interferometry – Data Interpretation and Error Analysis. – Kluwer

- Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- KLAUSING, H. & HOLPP, W., 2000: Radar mit realer und synthetischer Apertur. – Oldenbourg, München.
- MEIER, E.H., KÄSER, C. & NÜESCH, D.R., 2000: Genauigkeitsanalyse von hochauflösenden Gelände- und Oberflächenmodellen. – Vermessung – Photogrammetrie – Kulturtechnik, 8/2000, Villmergen (Schweiz).
- MOREIRA, J., 1996: Airborne SAR: Image Generation and High Precision DEM Generation. – Proc. of XVIII ISPRS Congress, Vienna.
- WEHR, A. & LOHR, U., Hrsg., 1999: Airborne Laser Scanning, Theme Issue. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, No. 2–3.

Anschrift der Verfasser:

Dr. sc. nat. ERICH H. MEIER & Prof. Dr. DANIEL R. NÜESCH, Remote Sensing Laboratories RSL, Geographisches Institut der Universität Zürich, Winterthurerstraße 190, CH-8057 Zürich

e-mail: meier@geo.unizh.ch,

e-mail: nuesch@geo.unizh.ch

Manuskript eingereicht: August 2001

Angenommen: August 2001