Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 98 (2000)

Heft: 8

Artikel: Genauigkeitsanalyse von hochauflösenden Gelände- und Oberflächenmodellen

Autor: Meier, E. / Käser, C. / Nüesch, D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-235666

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Genauigkeitsanalyse von hochauflösenden Gelände- und Oberflächenmodellen

Die steigende Nachfrage nach hochauflösenden Geländemodellen 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). Beide Verfahren sind heute operationell einsetzbar und erlauben die Herstellung von qualitativ hochwertigen Terrain- bzw. Oberflächenmodellen. Im Hinblick auf die Verwendung solcher Produkte im Rahmen der Überprüfung landwirtschaftlicher Nutzflächen wurden diese drei Technologien einander gegenübergestellt und ihre Genauigkeit überprüft.

Ces dernières années, la demande croissante en modèles numériques du terrain à haute résolution a eu pour conséquence, qu'à part la photogrammétrie, deux autres technologies se sont établies pour la production: le scannage au laser ainsi que l'interferométrie SAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Les deux procédés sont aujourd'hui opérationnels et permettent la production de modèles de terrain et de surface de très haute qualité. En vue de l'utilisation de tels produits dans le cadre de l'examen des surfaces agricoles utiles, ces trois technologies sont présentées et leur précision contrôlée.

Negli ultimi anni per la crescente richiesta di modelli del terreno ad alta risoluzione si sono imposte, oltre alla fotogrammetria, due altre tecnologie adatte a tali modelli: il laserscanning e la interferometria SAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Oggi ambedue i processi sono già operativi e permettono di generare modelli di terreni e rilievi di alto livello qualitativo. In vista dell'impiego di questi prodotti per la verifica delle superfici agricole coltivabili, si sono messe a confronto le tre tecnologie, verificandone anche la precisione.

E. Meier, Chr. Käser, D. Nüesch

1. Einleitung

Im Rahmen des Projektes zur Aktualisierung der landwirtschaftlichen Nutzflächen (LWN) wurde festgestellt, dass zur Erfassung der aktuellen Bodennutzung am besten Farborthofotos verwendet werden. Um die technische Machbarkeit zur Aktualisierung der LWN zu erproben, führten das Vermessungsamt des Kantons Bern und das Bundesamt für Landestopographie (L+T) über den Gemeinden Langnau i. E. und Lauperswil ein Pilotprojekt durch. Weil das bestehende DHM25 der L+T nicht die geforderte Lagegenauigkeit von 1 m im Orthofoto liefern konnte, wurde photogrammetrisch ein neues, metergenaues Geländemodell erfasst.

In der Zwischenzeit haben neben der Photogrammetrie auch neuere Techniken zur hochauflösenden Geländemodellerfassung wie Laserscanning und Interferometrisches Radar (InSAR) Produktionsreife erlangt. Um Entscheidungsgrundlagen bezüglich Genauigkeiten und Kosten zu erhalten, führte die L+T 1999 einen grossflächigen Methodenvergleich durch und beauftragte die Universität Zürich mit der Durchführung der Genauigkeitsanalyse.

2. Testgebiet

Die Auswahl des Testgebietes war durch die Bedürfnisse und Vorarbeiten der L+T gegeben. Es umfasste je nach Datenprodukt ganz oder teilweise den Perimeter des Kartenblattes 1:25 000 LK 1168 Langnau i.E. Seine Lage im nördlichen Alpenvorland äussert sich mit einem Höhenbereich von ca. 600 bis 1350 m/M. mit z.T. sehr steil ausgeprägter Topographie. Dieser Umstand sowie die Tatsache, dass ein Grossteil des Gebietes bewaldet ist, stellte besonders hohe Anforderungen an die Herstellung von digitalen Geländemodellen.

Als geometrisches Referenzsystem der Produkte wurde das traditionelle Bezugssystem der Schweizerischen Landesvermessung CH1903 mit dem Landesnetz LV03 und den Gebrauchshöhen des Landesnivellement LN03 verlangt. Da moderne Verfahren wie das Laserscanning oder die SAR-Interferometrie sich auf DGPS-gestützte Navigation und somit bei der Modellherstellung auf globale Referenzsysteme abstützen ergibt sich daraus ein kritischer Punkt, nämlich die Berücksichtigung von Geoid-Undulationen und Netzverzerrungen. Falls dies nicht schon bei der Produkteherstellung erfolgte, musste dies spätestens bei der Genauigkeitsanalyse der Modelle geschehen.

Während vertikale sowie Nord-Süd verlaufende Netzverzerrungen vernachlässigbar sind, umfassen die West-Ost-Verzerrungen eine Bandbreite von ca. 0.26 m und die Geoid-Undulationen gar eine solche von 0.52 m innerhalb des Testgebietes. Eine Nichtberücksichtigung dieser Grössenordnungen würde zu einer Fehlbeurteilung der eingesetzten Technologien führen.

3. Methodik

Für die Beurteilung der Oberflächen- und Geländemodelle wurde ein mehrstufiges Vorgehen gewählt:

- 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 waren auf diese Weise deutlich erkennbar. Zudem konnte die Lagegenauigkeit überprüft werden, indem den schattierten Modellen Referenz-Informationen überlagert wurden. Dazu

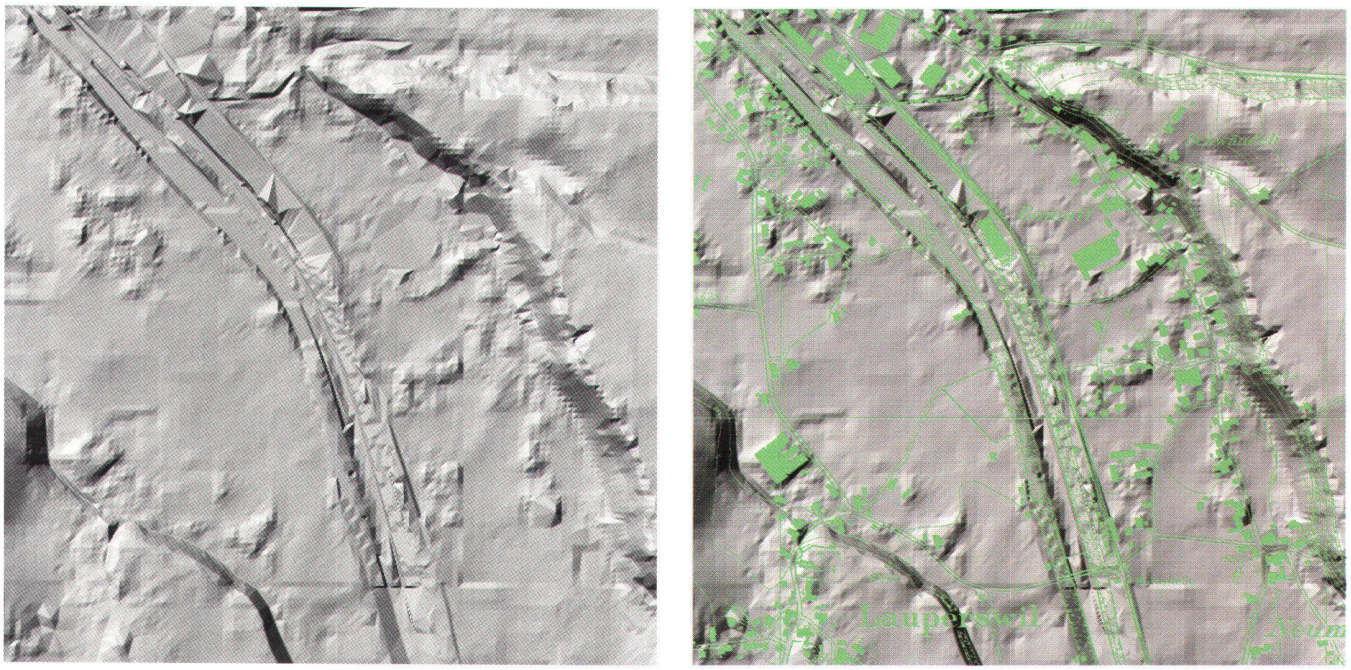

Abb. 1: Photogrammetrisches Modell, schattiert. Rechts: Überlagerung mit Übersichtsplan 1:10 000.

gehörten primär digitalisierte Pläne des Massstabes 1:2 500 als Vektor-Produkte und, weil diese nicht flächendeckend verfügbar waren, auch Übersichtspläne des Massstabes 1:10 000 in Raster-Form.

- In einem zweiten Schritt wurden die Verteilungen der Modelle 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 den Vergleich von Profillinien im Bereich ausgewählter Landschaftselemente unterstützt.
- Der letzte Schritt umfasste die Überprüfung der Höhenwerte mittels auf Geländehöhen korrigierten Lagefixpunkten (LFP1 und LFP2) sowie die Herleitung darauf basierender, statistischer Grössen. Diese Überprüfung umfasste auch eine individuelle Beurteilung der Modelle in der unmittelbaren Umgebung dieser Kontrollpunkte. Die Erfahrung hat gezeigt, dass eine schlechte Sichtbarkeit eines Kontrollpunktes durch das entsprechende Aufnahmesystem zu einem Fehler von mehreren Metern im Endprodukt führen kann. Falls es sich bei solchen Fehlern um eng begrenzte, systembedingte Auswirkungen handelte und das Resultat somit nicht für einen grösseren Modell-Bereich repräsentativ war, wurde der entsprechende Kontrollpunkt nicht berücksichtigt. Darunter fallen z.B. Auswirkungen von Strommasten auf die 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.

Die Genauigkeitsbeurteilung der Modelle stützte sich auf die Resultate dieser vier Kontrollschritte. Für die Gesamtbeurteilung der Produkte waren jedoch noch weitere Aspekte von Bedeutung wie Kosten, Projektmanagement usw. Diese gehören jedoch nicht zum Thema des vorliegenden Beitrages.

4. Eingesetzte Technologien

4.1 Photogrammetrie

Aus den Standardbildflügen der L+T für die Kartennachführung stand das Farbfotomaterial mit einem mittleren Bildmassstab von 1:30 000 und einer Längs- bzw. Querüberdeckung von 70% resp. 30% in digitalisierter Form zur Verfügung. Die Bildorientierung erfolgte durch die L+T mittels automatisierter Aerotriangulation. Im Wald wurde das bestehende DHM25, interpoliert auf 10 m Gitterweite, verwendet. Im übrigen Gebiet, insbesondere in der offenen Flur, wurde das Geländemodell mittels automatischer Bildkorrelation und manueller Nachbearbeitung in Form eines TIN (Triangular Irregular Network) erfasst. Speziell der Übergang Wald – Nichtwald wurde wo nötig manuell mit Bruchkanten bearbeitet, damit keine «fliegenden Vorhänge» des automatischen Bild-Matching übrigblieben. Um den Vergleich mit den anderen Modellen zu vereinfachen wurde das TIN in ein 2-m-Raster umgerechnet. Unter diesen Voraussetzungen wurde an die Grenze des photogrammetrisch Machbaren gegangen, um die geforderte Höhengenauigkeit von 1 m zu errreichen. Das DTM wurde im Siedlungsraum ohne Gebäude manuell mit Bruchkanten und Einzelpunkten erfasst.

Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem schattierten, photogrammetrisch hergestellten Modell im Raum Zollbrück–

Lauperswil. In der Bildmitte von unten nach oben links verlaufend ist der Lauf der Emme erkennbar. Kleine und grössere Dreiecksstrukturen sind als Folge der Dreiecksvermaschung im Zusammenhang mit Bruchkanten deutlich erkennbar. Auffallend ist eine «bucklige» Struktur in Siedlungsbereichen. Es handelt sich dabei um Relikte aus der digitalen Bildkorrelation, welche nicht vollständig durch die manuelle Erfassung des Terrains beseitigt wurden. Im unteren Bildbereich und rechts der Bildmitte sind zudem Artefakte erkennbar, welche auf Grenzbereiche zwischen photogrammetrischen Modellen 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 sukzessive aneinandergereiht 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 (Differential Global Positioning System bzw. Inertial Navigation System). 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.

Die hohen Pulsrepetitionsfrequenzen (PRF) der eingesetzten 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 PRFs werden Punktdichten erreicht, welche Rasterweiten in den Endprodukten von ca. 1–2 m erlauben. Einen Überblick über den heutigen Stand der Laserscanning-Technik erhält man in [1], einen Erfahrungsbericht über Laserscanning-Projekte in der Schweiz in [2].

Die Aufnahmen im Testgebiet Langnau erfolgten am 27.5.99 und somit bei einer sehr dichten Vegetationsdecke mit einem ALTM-1020-Scanner der deutschen Firma TopScan. Für die Aufnahme von 92 km^2 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.

Abbildung 2 zeigt die mittels Laserscanning hergestellten Modelle über demselben Gebiet wie in Abbildung 1. Auf den ersten Blick erstaunt der grosse Detailreichtum und die Präzision, mit welcher die Form von Objekten abgebildet wird.

4.3 InSAR

Unter der Bezeichnung Synthetic Aperture Radar (InSAR) versteht man ebenfalls aktive Systeme, welche mit Hilfe von Mik-

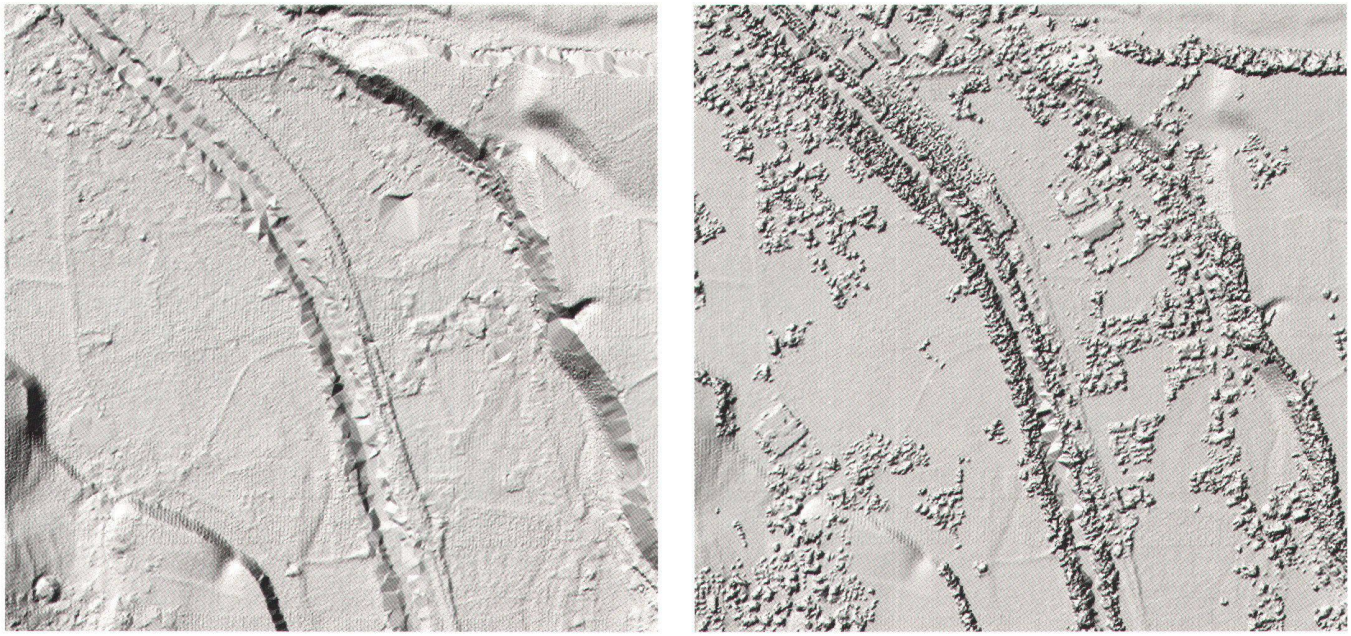

Abb. 2: Laserscanner-Modelle, schattiert. Links: Terrain-, rechts: Oberflächenmodell.

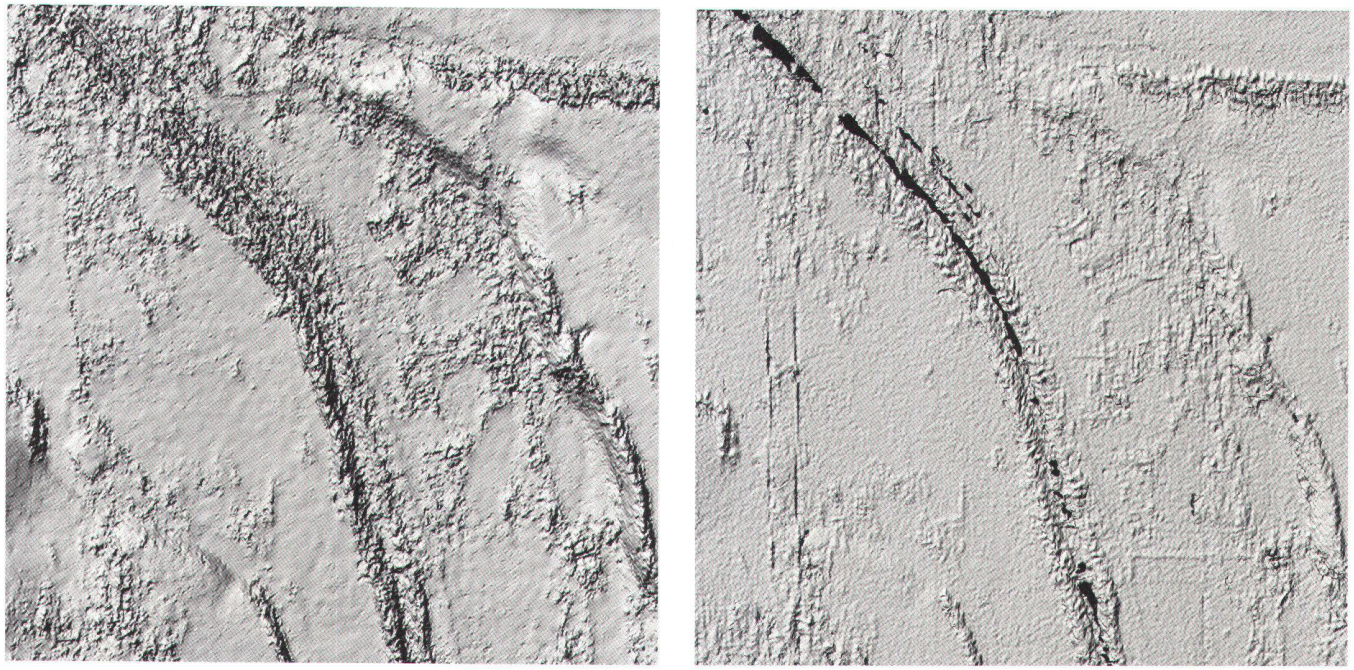

Abb. 3: InSAR-Modelle, schattiert. Links: AeS, rechts: DoSAR.

rowellen, 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. Jene 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 verwandelt werden muss.

Ein Vorteil der SAR-Bilder besteht darin, dass sie neben Intensitäts- auch Phasen-Informationen enthalten. Diese macht man sich bei der SAR-Interferometrie zunutze, 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 Radar-Echos Phasenverschiebungen aufweisen, welche von der Höhenlage der jeweiligen Rückstreuelemente am Boden abhängen. Kennt man die exakte Position und Lage der Plattform, so kann man aus diesen Phasenverschiebungen ein Oberflächenmodell herleiten. Eine Einführung und einen Überblick über die SAR-Technik und die heutigen Systeme findet man in [3], [4] und [5].

Das Testgebiet wurde mit 2 SAR-Systemen aufgenommen: Mit dem DoSAR-System des europäischen Luft- und Raumfahrtkonzerns Astrium (früher Dornier) und mit dem AeS-1-Sensor der deutschen Firma Aero-Sensing Radarsysteme GmbH. Detaillierte Beschreibungen beider Systeme findet man in [6] und [7]. Beide Systeme operierten in Flughöhen von ca. 3500 müG und erfassten einen Bildstreifen am Boden von 2–3 km Breite. Zwecks Minimierung von Radarschatten wurde das Gebiet von beiden Systemen aus verschiedenen Richtungen beleuchtet. Bleibt anzufügen, dass bei beiden SAR-Befliegungen sehr schlechte Wetterbedingungen mit dichter Bewölkung, Regen und starken Winden herrschten.

Abbildung 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 Analysen und Vergleiche der verschiedenen Modelle lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Photogrammetrisches Terrain-Modell

Dieser Datensatz zeichnet sich durch vergleichsweise wenig Detailreichtum aus. Die Fehler aufgrund der Fazettenstruktur als Folge der Dreiecksvermaschung dürften sich in Grenzen halten. Nur vereinzelt sind grössere, eng begrenzte Artefakte mit mehreren Metern Abweichung erkennbar. Die Lage des Modells konnte aufgrund des mangelnden Detailreichtums nicht durch Überlagerungen mit Vektordaten verifiziert werden. Erst die Berechnung von Differenzbildern zu anderen, korrekt, gelagerten Modellen, zeigte, dass keine grösseren oder systematischen Verschiebungen vorliegen.

Die Häufigkeitsverteilung der Höhenwerte zeigt auffallende, relative Maxima, welche sich an den Höhenlinien der LK

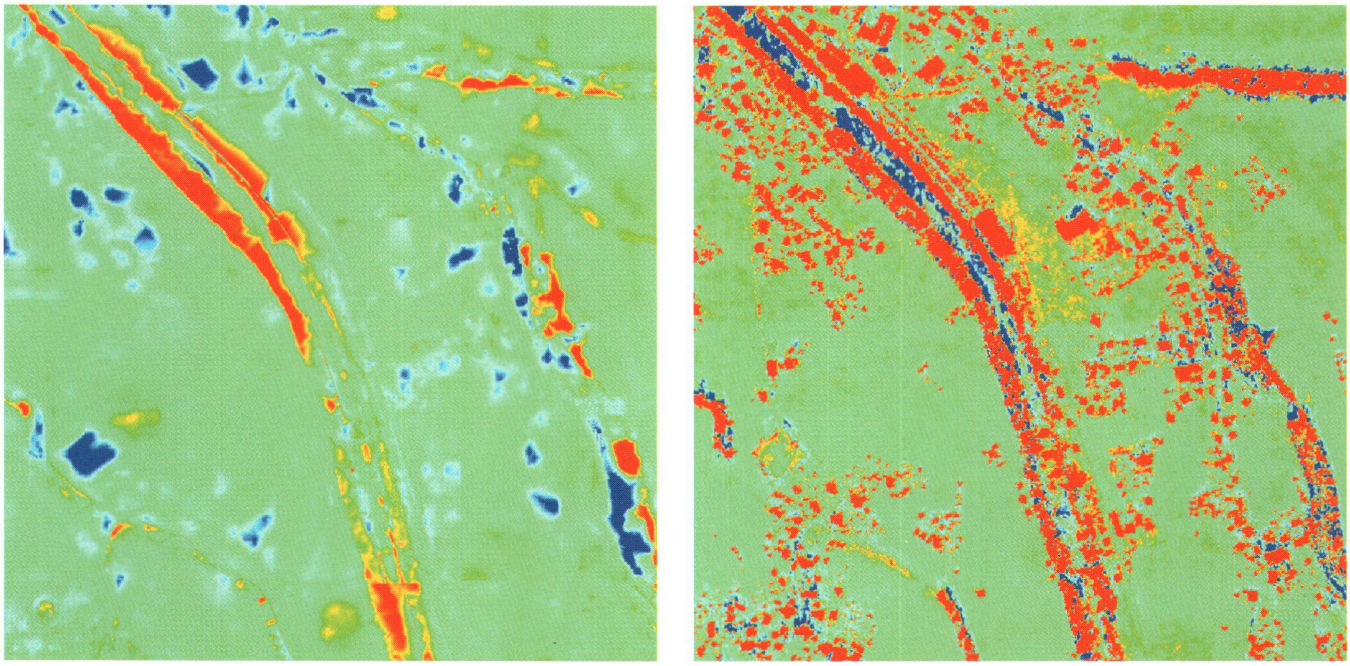

Abb. 4: Differenzbilder. Links: Laser-Boden – Photogrammetrie. Rechts: Laser-Oberfläche – InSAR-AeS.

1:25 000 orientieren. Dies ist eine Folge des Einfügens von DHM25-Informationen in die Waldbereiche des photogrammetrischen Modells.

Terrain-Modell aus Laserscanning

Das Geländemodell aus der Laser-Befliegung zeigt einen deutlich höheren Detaillierungsgrad. In offenem Gelände sind beispielsweise feinste Strukturen wie Strassen und Wege aufgrund ihrer leichten Böschungen gut erkennbar. In diesen Bereichen ist aber auch ein leichtes System-Rauschen sichtbar, welches sich in Höhenschwankungen mit einer Amplitude von ca. 0.2–0.3 m manifestiert. Artefakte in Form von Dreiecksstrukturen sind in Waldbereichen zu erkennen, wo mangels Durchdringung der Vegetationsdecke als Folge des ungünstigen Befliegunszeitpunktes eine teilweise manuelle Nachbearbeitung vorgenommen wurde. Dieser Effekt ist in Abbildung 2 entlang der Emme deutlich zu sehen.

Oberflächen-Modell aus Laserscanning

In diesem Datensatz beschränken sich die Dreiecksstrukturen auf den praktisch vernachlässigbaren Bereich von Waldrändern entlang von Flussläufen: Aufgrund der fehlenden Laser-Echos von Wasserflächen musste hier über 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. Besonders der detaillierte Vergleich von Höhenprofilen zeigt diesen auf eindrückliche Weise.

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

InSAR-Oberflächenmodelle

Die InSAR-Modelle verfügen zwar ebenfalls über eine grosse Informationsdichte, jedoch nicht mit derselben Detailtreue wie man sie bei den Laser-Modellen antrifft. 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 aufgrund sogenannter Layover- und Mehrweg-Effekte auch als zusätzliche Vertiefungen und Überhöhungen im Oberflächenmodell. Die horizontale Lage beider Modelle sowie ihre Verteilungen sind einwandfrei.

Im Vergleich zum AeS-Modell ist beim DoSAR-Modell das Systemrauschen etwas deutlicher ausgeprägt und umfasst einen Höhenbereich von ca. 20–30 cm. Zusätzlich sind bei diesem Datensatz noch Überreste von ungenügend unterdrückten range-sidelobes als Nord-Süd-verlaufende Störungen erkenbar. Der Anteil an fehlenden Höhenwerten liegt beim AeS-Modell bei 0.6%, beim DoSAR-Modell bei 4.9%. Dazu gehören nicht nur durch Radarschatten sondern auch durch Spiegelungen auf glatten Oberflächen verlorengegangene Informationen. Da es sich dabei meist um annähernd horizontale (Asphalt-)Flächen handelt, lassen sich diese durch eine angepasste Nachbearbeitung leicht beseitigen.

Vergleich der Modelle

Der flächenhafte Vergleich der Modelle mittels Differenz-«Bildern» sowie der Vergleich von Profilen bestätigt im Wesentlichen die bereits auf visuelle Art gemach-

ten Erfahrungen. Sowohl beim Vergleich des Laser-Geländemodells mit dem photogrammetrischen Modell als auch zwischen dem Laser-Oberflächenmodell und den SAR-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 Modell zurückzuführen. Beim Vergleich der Oberflächenmodelle sind es vor allem die geringere Detailtreue der SAR-Modelle sowie die unterschiedlichen Eindringtiefen und Reflexionsmechanismen der Radarsignale an der Vegetationsdecke, welche zu Höhendifferenzen von mehreren Metern führen (s. Abb. 4).

Dank dieser Vergleiche konnten die Hersteller der SAR-Modelle auf Systemschwächen aufmerksam gemacht werden, welche denn auch in der Zwischenzeit korrigiert wurden: Beim DoSAR-Modell waren dies neben dem Rauschen und den range-sidelobes Wellen mit einer Länge von über 1 km und einer Amplitude von ca. 1 m, welche quer zur Flugrichtung verlaufend als Folge von Interaktionen zwischen den Antennen und dem Flugzeugrumpf auftraten. Beim AeS-Modell waren es mit der Terrainhöhe zunehmende Höhenfehler, welche auf Schwächen bei der Bewegungskompensation der Radarsignale hindeuteten.

Der interessanteste Vergleich zwischen den Modellen und zugleich die am meisten Aufschluss gebende Untersuchung war die Überprüfung mittels Lagefixpunkten. Tabelle 1 zeigt die entsprechende Zusammenstellung. Die unterschiedliche Anzahl Punkte ist im Wesentlichen auf die Unterschiedliche Ausdehnung der verschiedenen Produkte zurückzuführen. Kolonne 2 beinhaltet die gemittelten, Abweichungsbeträge. Sie zeigt, dass die Laser-Modelle mit Genauigkeiten zwischen 15 und 20 cm aufwarten. Jedoch auch das photogrammetrische Modell mit ca. 0.5 m und die InSAR-Oberflächenmodelle mit 0.8 m erreichen die von der L+T geforderte Genauigkeit. Die Streuungen sowie die Extremwerte verhalten sich ähnlich.

Modell	Anzahl Punkte	$\lvert\overline{\Delta h}\rvert$(m)	σ (m)	Min (m)	Max (m)
Photogrammetrie	52	0.48	0.61	–1.32	1.67
Laser Oberfläche	45	0.16	0.19	–0.35	0.67
Laser Boden	46	0.19	0.29	–0.93	0.38
InSAR AeS	84	0.82	0.97	–1.86	1.84
InSAR DoSAR	39	0.79	0.86	–3.14	1.30

Tab. 1: Zusammenstellung der Überprüfungen mittels Lagefixpunkten LFP1 und LFP2.

6. Bewertung

Grundsätzlich erreichen alle Methoden in der offenen Flur die verlangte Höhengenauigkeit von 1 m (mittlerer Fehler). Das Laserscanning besticht durch sein detailliertes, genaues Auflösungsvermögen, insbesondere auch im Wald, die zeitgleiche Erfassung von Terrain- und Oberflächenmodell sowie die ausgereifte Produktionsleistung.

Das InSAR-Verfahren erreicht die Genauigkeitsvorgaben nur knapp, ist aber sehr effizient in Folge der grossen, am Boden erfassbaren Streifenbreite und insbesondere auch durch seine Allwettertauglichkeit. Problematisch sind natürliche oder künstliche Reflektoren, welche als Antennen wirken und die Daten lokal verfälschen können.

Die Photogrammetrie erreicht die geforderte Genauigkeit gut, allerdings unter Einsatz vieler manueller und somit teurer Erfassungsarbeit. Leider können mit dem vorhandenen Fotomaterial über Waldflächen keine besseren Informationen erhoben werden.

Fazit: Bei gleichen Kosten kann mit den neuen Techniken auch der Waldboden miterfasst werden. Weil für das Projekt LWN die Ausscheidung zwischen Wald und Nichtwald ab Orthofotos verlangt ist, kann mit der Bestimmung sowohl des Terrain- wie auch des Oberflächenmodells und den damit automatisch bestimmbaren Waldgrenzen eine wichtige Zusatzinformation mitgeliefert werden.

Literatur:

[1] Wehr, A., Lohr, U. (Ed.): Airborne Laser Scanning, Theme Issue, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, No. 2–3, 1999.

[2] Gut, Th., Budmiger, P.: Laserscanning: Erfahrungen aus Projekten in der Schweiz, VPK 9/99.

[3] Curlander, J.C. and McDonough, R.N.: Synthetic Aperture Radar-Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.

[4] Klausing, H., Holpp, W.: Radar mit realer und synthetischer Apertur, Oldenbourg, München, 2000.

[5] Nüesch, D,: Einführung in die Radar-Fernerkundung, Vorlesungsskript, Geographisches Institut der Universität Zürich-Irchel, Zürich, 1999.

[6] Moreira, J.: Airborne SAR: Image Generation and High Precision DEM Generation, Proc. of XVIII ISPRS Congress, Vienna, 1996.

[7] Faller, N., Hippler, J., Ekantono, K.N.: Operational Topographic Mapping in Indonesia with the Interferometric DO-SAR, Proc. European Conference on Synthetic Aperture Radar – EUSAR'98, Friedrichshafen, 1998.

Dr. Erich Meier
Prof. Dr. Daniel Nüesch
Remote Sensing Laboratories
Universität Zürich - Irchel
Winterthurerstrasse 190
CH-8057 Zürich
e-mail: meier@rsl.geo.unizh.ch
e-mail: nuesch@rsl.geo.unizh.ch

Dipl. Ing. ETH Christoph Käser
Bundesamt für Landestopographie
Prozess Photogrammetrie und Fernerkundung
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern
e-mail: Christoph.Kaeser@lt.admin.ch