

---

# Herausforderungen bei der Erstellung von 3D-DLMs

Christian HEIPKE

Institut für Photogrammetrie und GeoInformation · Leibniz Universität Hannover ·  
Nienburger Str. 1 · 301767Hannover  
E-Mail: heipke@ipi.uni-hannover.de

## Zusammenfassung

Der Beitrag befasst sich mit der Integration von Vektor- und Höhendaten zu einem konsistenten, dreidimensionalen Digitalen Landschaftsmodell. Er zeigt die bei der Integration auftretenden geometrischen und semantischen Probleme auf und diskutiert zwei Ansätze zur Lösung. Diese beruhen auf der vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der Kleinsten Quadrate, allerdings mit Ungleichungen als Nebenbedingungen, einerseits und auf aktiven Konturen (snakes), einer Optimierungsmethode aus der Bildverarbeitung, andererseits. Das Potenzial beider Verfahren wird anhand von Beispielen aufgezeigt.

## 1 Geodaten, DLM und die dritte Dimension

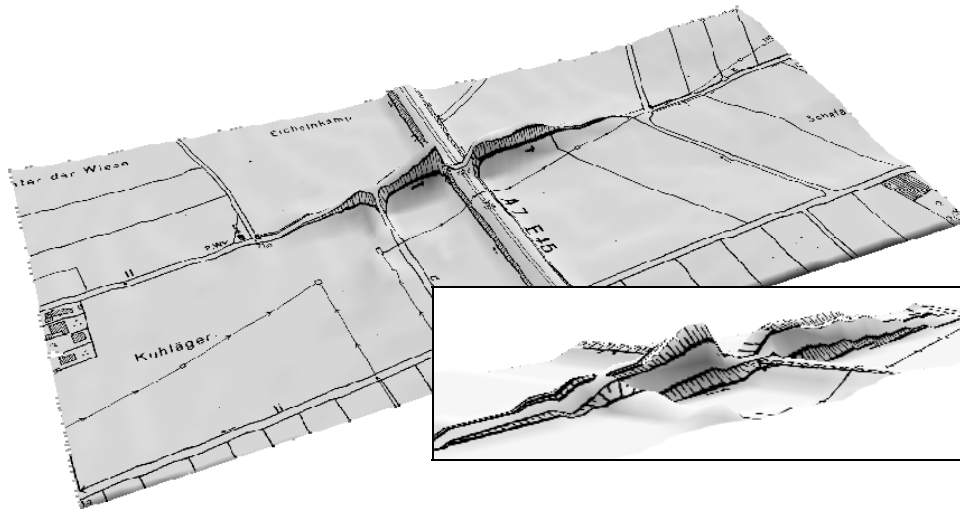
Geodaten werden heute in der Regel in Digitalen Landschaftsmodellen (DLM) vorgehalten. Der zugehörige Objektartenkatalog enthält eine, oft hierarchische, Beschreibung der zu speichernden Objekte inkl. der Sachdaten und Vorgaben zur geometrisch/topologischen Datenstruktur. Die in Deutschland bekanntesten Beispiele für DLM sind ALKIS (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem) und ATKIS (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem) der Vermessungsverwaltungen der Länder sowie das Landbedeckungsmodell (LBM-DE) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie.

DLM enthalten in der Regel sowohl Informationen über die Lage als auch über die Höhe. Die Berücksichtigung der dritten Dimension ist aus vielerlei Gründen wünschenswert. Anwendungen reichen von Aufgaben der Dokumentation (3D-Kataster) und der Sichtbarkeitsanalyse über die Visualisierung (etwa in digitalen Globen) und Simulation, z. B. für Hochwasserschutz, Lärm- und Schadstoffausbreitung bis hin zu geologischen Fragestellungen. Auch der Transport- und Logistikbereich benötigt Höhendaten, um Fahrzeiten und Kraftstoffverbrauch einer Fahrzeugflotte möglichst genau berechnen zu können.

Die Erfassung der Höhendaten geschieht heute meist aus der Luft: mittels automatischer Bildzuordnung aus sich überlappenden Bilddaten, durch Laserscanning oder über Radarverfahren (Jäger, Heipke 2014). Daneben steht sowohl in der Forschung als auch in der Praxis die Modellierung der Höhendaten und die Zusammenführung von Lage- und Höheninformation schon länger im Fokus der Diskussion. Einerseits können einzelne Höhenwerte als Attribute für Lageobjekte gegeben sein, damit ist jedoch keine flächendeckende Höheninformation verfügbar. Andererseits kann die Modellierung der Landschaft vollständig objektstrukturiert und dreidimensional geschehen, so dass vertikale Wände, Tunnel, Brücken und Dachüberhänge von Gebäuden konsistent abgebildet werden, auch der Übergang vom Außen- in den Innenraum von Gebäuden ist dann möglich. Dieser Weg wird für 3D-Stadtmodelle beschritten, meist allerdings ohne Flächendeckung zu erreichen.

In der Regel werden topographische Daten heute in einem dualen System gespeichert. Das DLM modelliert die Objekte der Erdoberfläche mit Hilfe von 2D-Vektordaten, ggf. inkl. Höhen als Attribute, während das DGM eine 2.5D-Repräsentation der zugehörigen Geländehöhen darstellt. Viele der bereits genannten Anwendungen benötigen aber detaillierte, genaue und zuverlässige 3D-Objekte. Deshalb ist es von Vorteil, das zweidimensionale DLM und das DGM in ein 3D-DLM überführen zu können. Infolge unterschiedlicher Methoden für die Erfassung, Verarbeitung und Modellierung weisen die beiden Datensätze jedoch Inkonsistenzen auf (s. Abb. 1): so fehlen im DGM in der Regel Informationen über die Höhe von Brücken, und Geländeeinschnitte, in denen sich ein Fluss befindet, weichen von der Lage des Flusses in den Vektordaten ab. Es existieren auch semantische Widersprüche: z. B. ist nicht garantiert, dass eine Seefläche überall dieselbe Höhe besitzt. Damit führt eine einfache Überlagerung des zweidimensionalen DLM und des DGM zu geometrisch und semantisch fehlerhaften Ergebnissen.

Inhalt dieses Beitrages ist die Integration von DLM und DGM auf eine Art und Weise, die sowohl geometrische und topologische als auch semantische Aspekte berücksichtigt und Fehler durch geeignete Modellierung weitgehend vermeidet. Die Ausführungen beruhen im Wesentlichen auf den Arbeiten von Koch, Heipke (2006) und Göpfert et al. (2011). Fragen der rein geometrisch/topologischen Integration werden u. a. in Lenk, Heipke (2006) diskutiert, diese werden im vorliegenden Artikel nicht weiter verfolgt.



**Abbildung 1:** Bei der einfachen Überlagerung von Vektor- und Höhendaten können Probleme entstehen: fehlerhafte Höheninformationen für die Brücke im Zentrum der Abbildung.

## 2 Zwei Methoden zur Integration zweidimensionaler GIS-Daten und einem DGM

Im Zentrum des Interesses dieses Beitrags steht die geometrisch und semantisch korrekte Integration von Lage- und Höhendaten. Dies bedeutet, dass beispielsweise ein See nach

erfolgter Integration überall dieselbe Höhe aufweist, ein Fluss nur bergab fließt und eine Straße nicht durch ein Gebäude verläuft, s. auch Tabelle 1.

Objektart	Objektbeschreibung	
	Lage	Höhe
Straße, Weg	Lang gestreckt; Breite begrenzt und nahezu konstant; Begrenzte Krümmung	Begrenzte Neigung und Krümmung in und quer zur Fahrtrichtung
Schienenbahn	Lang gestreckt; Breite begrenzt und konstant; Begrenzte Krümmung	Begrenzte Neigung und Krümmung in und quer zur Fahrtrichtung
Strom, Fluss, Bach	Lang gestreckt; Breite begrenzt	Abfallendes Niveau in Fließrichtung; ansteigendes angrenzendes Gelände
Kanal, Graben	Lang gestreckt; Breite begrenzt und nahezu konstant	Horizontal; ansteigendes angrenzendes Gelände
Parkplatz, Sportplatz, Landebahn, Rollbahn	Fläche begrenzter Größe	Horizontal
Binnensee, Stausee, Teich, Hafenbecken	Fläche begrenzter Größe	Horizontal; ansteigendes angrenzendes Gelände

**Tabelle 1:** Objekte mit impliziter Höheninformation (nach Koch 2006)

Die Einhaltung dieser Bedingungen, die abgesehen von Spezialfällen sofort einsichtig sind, kann bei der einfachen Überlagerung von Lage und Höhe nicht garantiert werden. Je nach vorhandener Zusatzinformation über die Datenqualität muss mindestens eine der beiden Datenquellen (Lage bzw. Höhe) angepasst werden. Die sich dabei ergebenden Möglichkeiten und Probleme sollen an zwei Beispielen illustriert werden:

- der Kombination eines DGM mit relativ großer Maschenweite und eines geometrisch genauen DLM. Hier werden die Höhendaten angepasst (s. Koch, Heipke 2006).
- der Kombination eines engmaschigen und genauen DGM, das z. B. aus einer Laserbefliegung entstanden sein kann, mit weniger genauen Lagedaten. Hier sind die Lagedaten anzupassen und die Topologie soll erhalten bleiben (s. Göpfert, Heipke 2011).

## 2.1 Integration über vermittelnde Ausgleichung mit Nebenbedingungen

In diesem Ansatz liegt der Schwerpunkt auf der semantisch korrekten Anpassung von Höhendaten an die als lagerichtig angenommenen Vektordaten. Exemplarisch werden dazu Daten des ATKIS BasisDLM und des DGM5 mit einer Gitterweite von 12,5 m inkl. Strukturelementen (z. B. Bruchkanten) verwendet.

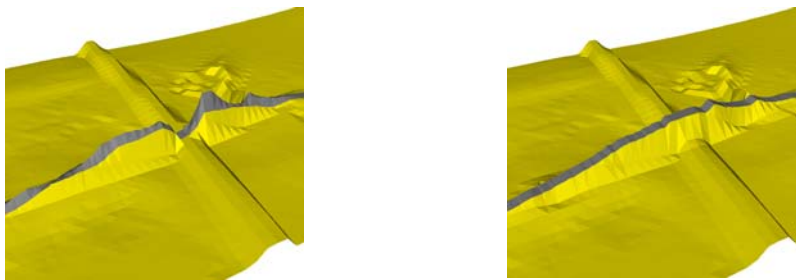
Dabei werden die impliziten Höheninformationen der topographischen Objekte genutzt, um Bedingungen zu formulieren, die die Semantik geometrisch ausdrücken und so zu einem korrekten Datensatz führen. In einem ersten Schritt wird das DGM in ein Dreiecksnetz überführt, dabei wird die Strukturinformation im Zuge einer bedingten Delaunay-Triangulation genutzt. Für die in ATKIS als Mittelachsen modellierten Objekte Straße und Fluss wird dann das Attribut der Breite verwendet, um Umringspolygone als flächige Repräsentationen der Objekte zu erhalten. Umringspolygon und Mittelachse der Objekte und das DGM werden miteinander verschnitten und für alle Punkte des Umringspolygons und der

Mittelachsen werden Höhen aus dem DGM interpoliert. Diese Höhenwerte werden einer simultanen vermittelnden Ausgleichung unterworfen, in der berücksichtigt werden:

- die semantisch motivierten Bedingungen: So müssen alle Höhen einer Seeoberfläche identisch sein, das Längsprofil eines Flusses muss von der Quellen zur Mündung monoton bergab verlaufen, das Querprofil einer Straße muss annähernd horizontal sein, Straßenkreuzungen werden als horizontale Flächen modelliert.
- die vorhandenen Höhendaten: Abweichungen der gegebenen DGM-Höhen gehen als Verbesserungen ein und werden so in die Minimierung einbezogen.
- die Nachbarschaft: Die lokale Glattheit des DGM wird berücksichtigt, indem auch die Höhen der Nachbarkpunkte in die Ausgleichung eingehen. Dadurch kann gewährleistet werden, dass die Neigungen des DGM sich nicht sprunghaft ändern.

Dieser Ansatz führt auf eine vermittelnde Ausgleichung mit Nebenbedingungen. Zu beachten ist, dass diese Nebenbedingungen sowohl Gleichungen enthalten (so müssen alle Seehöhen identisch sein) als auch Ungleichungen (so dürfen Längs- und Querprofil einer Straße einen gewissen Wert nicht überschreiten). Lösungen für derartige Optimierungsprobleme sind in der Literatur bekannt. Hier wurde eine Überführung in das Lineare Komplementaritätsproblem (Cottle et al. 1992) gewählt, das mittels des Lemke-Algorithmus (Lemke 1968) gelöst wird.

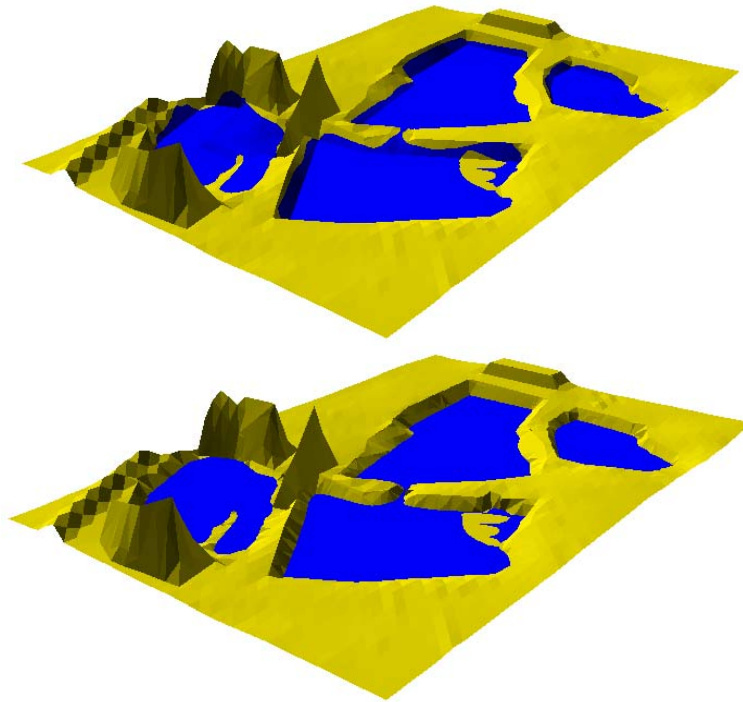
Abbildung 2 und 3 zeigen Ergebnisse der semantisch korrekten Integration. Abbildung 2 greift die in Abbildung 1 dargestellte Situation auf. Links ist die Brücke vor, rechts nach der Integration zu sehen. Die Verbesserung ist klar erkennbar, auch wenn das Ergebnis noch nicht alle Anforderungen erfüllt.



**Abbildung 2:** Brückenverlauf aus Abbildung 1: vor der Integration (links) und danach (rechts). Die Verbesserung ist deutlich erkennbar.

Abbildung 3 zeigt die Integration von Seeoberflächen. Während die Wasserflächen (blau) vor der Integration nicht nur den See sondern auch Teile des Ufers (ocker) bedecken, sind sie nach der Integration streng auf die horizontalen Flächen beschränkt, was als Erfolg zu bewerten ist.

Insgesamt kann die Methode als recht erfolgreich eingestuft werden. Die geometrische Modellierung der Objekte ist allerdings in manchen Situationen nicht unbedingt realitätsnah, so sind z. B. Kreuzungen in bergigen Gebieten nicht immer horizontale Flächen. Als schwierig hat sich auch die korrekte relative Gewichtung der verschiedenen Gruppen an Beobachtungsgleichungen erwiesen. Schließlich werden die Vektordaten als lagerichtig angenommen, was nicht unbedingt der Fall sein muss. Dieses letzte genannte Problem wird in der zweiten hier behandelten Methode weiter verfolgt.



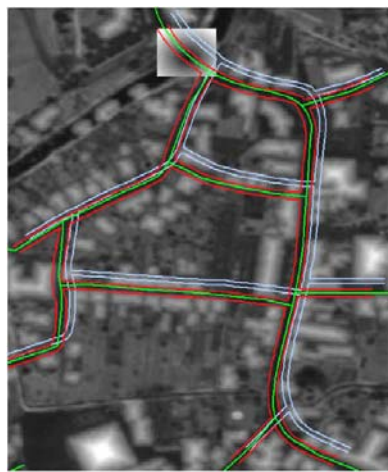
**Abbildung 3:** Überlagerung des Umringspolygons eines Sees und der umgebenden Landschaft vor (oben) und nach (unten) der semantischen Integration.

## 2.2 Integration mittels Network Snakes

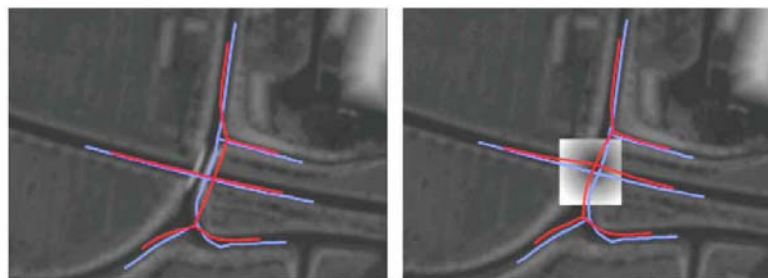
In diesem Kapitel wird eine Methode für die Anpassung der beiden Datensätze vorgestellt, die Snakes (auch parametrische aktive Konturen genannt, Kass et al. 1988) verwendet. Snakes sind zweidimensionale Funktionen, die über die Bogenlänge parametrisiert werden. Eine explizite mathematische Beschreibung der Funktion ist nicht notwendig, da nur gleichabständige Stützstellen betrachtet und (die für die weiteren Berechnungen wichtigen) Ableitungen an den Stützstellen mittels finiter Differenzen bestimmt werden können. Snakes werden verwendet, um ein Optimierungsproblem, nämlich die genaue Lage der Stützstellen, zu lösen, dazu wird das Kalkül der Variationsrechnung genutzt. Es werden zwei unterschiedliche Terme kombiniert: die so genannte interne Energie bestimmt den Verlauf der Kurve. Diese soll möglichst gradlinig und glatt verlaufen, insofern werden größere Richtungsänderungen und Krümmungen bestraft. Die externe Energie speist sich dagegen aus den der Optimierung zugrunde liegenden Daten, hier dem DGM. Die Berücksichtigung der externen Energie führt dazu, dass die Snake sich dem Gelände anpasst. Diese beiden Terme werden geeignet zueinander gewichtet und die sich ergebende Gesamtenergie wird im Zuge der Optimierung iterativ minimiert. In manchen Ansätzen wird ein weiterer Term berücksichtigt, der eine lokale Anziehung oder Abstoßung bewirkt. Dies ist auch in dem hier beschriebenen Verfahren der Fall, dabei werden Gebäude und Brücken genutzt. Gebäude stoßen Straßen ab (so dass Straßen nicht durch Gebäude verlaufen), Brücken ziehen sie dagegen an (so dass eine Straße über eine Brücke verläuft anstatt daneben).

Der verwendete Ansatz konzentriert sich auf Netzwerke von Straßen und Flüssen, die im DLM-Objektartenkatalog durch Mittelachsen repräsentiert werden. Die Straßen und Flüsse werden genutzt, um die Snake zu initialisieren. Sie definieren somit die Topologie sowie die interne Energie. Statt einfacher Snakes werden Network Snakes verwendet, die die Eigenschaft besitzen, die Topologie der Vektordaten zu erhalten (Butenuth, Heipke 2012). Eines der besonderen Merkmale des Ansatzes ist die Tatsache, dass die Mittelachsen nicht nur als Näherungswerte für die Optimierung genutzt werden, sondern auch als Beobachtungen eingehen. Damit wird erreicht, dass zu starke lokale Abweichungen von den Näherungswerten entsprechend deutlich bestraft werden, was die Nachbarschaftsgenauigkeit erhöht und systematischen Fehlern entgegenwirkt.

Das Prinzip der Methode lässt sich gut an Abbildung 4 erkennen. Die Vektordaten wurden systematisch verfälscht, dieser Fehler konnte in der Optimierung behoben werden (die roten Linien liegen um die grüne Referenz herum). Abbildung 5 zeigt die Wirkung der Anziehungskraft der Brücke. Während das Ergebnis wegen der schlechten Näherungswerte für die Straße ohne Berücksichtigung der Anziehungskräfte neben der Brücke liegt ergibt sich ein korrektes Ergebnis, wenn die Brücke geeignet berücksichtigt wird.



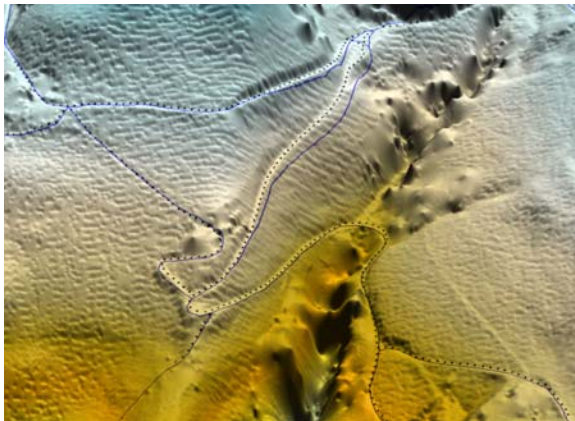
**Abbildung 4:** Integration von Vektor- und Höhendaten (letzte aus einer Laserbefliegung) - blau: Näherungsdaten der Vektoren, rot: Ergebnis der Optimierung, grün: Referenz. Die Höhendaten sind im Hintergrund dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist in der Mitte eine Brücke zu erkennen. Während die Näherungsdaten neben der Brücke verlaufen, liegt das Ergebnis der Integration auf der Brücke (aus Göpfert 2011).



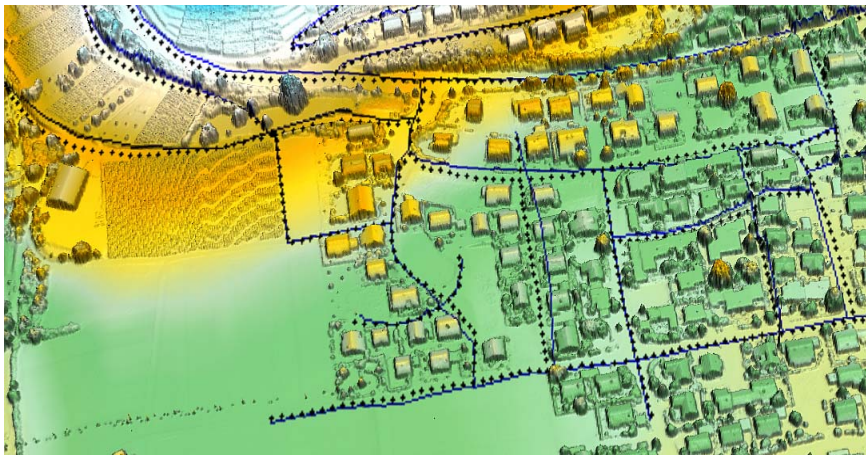
**Abbildung 5:** Ergebnisse der Optimierung ohne (links) und mit (rechts) dem Brückenterm - blau: Näherungsdaten der Vektoren, rot: Ergebnis der Optimierung (aus Göpfert 2011).



Weitere Beispiele zeigt Abbildung 6. Einerseits kommt der Fluss im Geländeeinschnitt zu liegen (oben), andererseits wird verhindert, dass Straßen durch Gebäude verlaufen (unten). Insgesamt hat sich gezeigt, dass die geometrische Lagegenauigkeit der Vektordaten in allen durchgeführten Tests durch die vorgestellte Methode signifikant verbessert werden konnte.



**Abbildung 6:** Ergebnis der Integration mittels Network Snakes für einen gebirgigen Ausschnitt (oben) und ein städtisches Gebiet (unten): durchgezogene Linie: Näherungswerte, gepunktete Linie: Ergebnis der Optimierung (aus Göpfert 2011)



### 3 Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die geometrisch und semantisch korrekte Integration von 2D-Vektordaten und Höheninformation aus einem DGM diskutiert. Anhand zweier unterschiedlicher Verfahren konnte gezeigt werden, dass die Inkonsistenzen zwischen den beiden Datensätzen, die sich durch die unterschiedlichen Erfassungsumstände ergeben, weitgehend eliminiert werden können. Schwerpunktmäßig wurden linienhafte Vektordaten (Straßen, Flüsse) behandelt, das Beispiel der Seen zeigt aber, dass eine Erweiterung auf flächenhafte Objekte möglich ist. Dazu gehören auch Gebäude, die zumindest in hügeligen und bergigen Gebieten zusätzliche Fragen aufwerfen. Hier sind die Verbindungen des Gebäudes zu den Zuwegen von besonderem Interesse, z. B. sollte der Weg zur Haustür nicht

nur lage-, sondern auch höhenmäßig tatsächlich an der Haustür enden. Dabei sind die Gebäude sowie andere Objekte auch als 3D-Primitive (Quader, Zylinder etc.) modellierbar.

Aspekte der Datenerfassung sowie der gemeinsamen Datenhaltung und -aktualisierung des integrierten Datensatzes wurden hier ausgeklammert. Diese Fragestellungen bedürfen einer gesonderten Betrachtung, dabei sind die Vor- und Nachteile der gemeinsamen Datenhaltung gegeneinander abzuwägen. Grundsätzlich kann eine Integration auch online bei Bedarf durchgeführt werden, solange keine nachfolgenden manuellen Schritte notwendig sind. Trotz der kurzfristig sicher aufwändigen Umstellung auf eine gemeinsame Datenhaltung sprechen aber einige Argumente dafür, diese langfristig umzusetzen, da immer mehr Anwendungen geometrisch und semantisch korrekt integrierte Geodaten in 3D benötigen.

## Dank

Der Autor dankt dem Landesamt für Geobasisinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) für die Unterstützung der beiden Projekte.

## Literatur

- BUTENUTH M., HEIPKE C. (2012), Network Snakes: Graph-based Object Delineation with Active Contour Models, *Machine Vision and Applications* 23: 91-10.
- COTTLE R.W., PANG J.-S., STONE R. E. (1992), The Linear Complementary Problem. In: Rheinboldt, W. (Hrsg.): *Computer Science and Scientific Computing*. Boston, Academic Press. 762 S.
- GÖPFERT J. (2011), Snakes for Adapting GIS Road and River Objects to Airborne Laser Scanning Data. *DGK-Reihe C Nr. 671*, 127 S.
- GÖPFERT J., ROTTENSTEINER F., HEIPKE C. (2011), Using snakes for the registration of topographic road database objects to ALS features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66(6): 858-871.
- JÄGER E., HEIPKE, C. (2014), Geotopographie und Photogrammetrie. In: Kummer K., Kötter T., Eichhorn A. (Eds.): *Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen*. Wichmann, 375-431.
- KASS M., WITKIN A., TERZOPOULOS D. (1988), Snakes: active contour models. *International Journal of Computer Vision* 1(4): 321-331.
- KOCH A. (2006), Semantische Integration von zweidimensionalen GIS-Daten und Digitalen Geländemodellen, *DGK-Reihe C Nr. 601*, 97 S.
- KOCH A., HEIPKE C. (2006), Semantically correct 2.5D GIS data - The integration of a DTM and topographic vector data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61(1): 23-32.
- LEMKE C.E. (1968), On complementary pivot theory. In: Dantzig, G. B., Veinott, A. F. (Hrsg.): *Mathematics in the Decision Sciences*. Teil 1. – 95-114
- LENK U., HEIPKE C. (2006), The radial topology algorithm – a new approach for deriving 2.5D GIS data models, *Geoinformatica* 10(4): 447-468.