



Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern

Heinrich Ebner ¹, Albert Baumgartner ², Carsten Steger ³

¹ *Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU München, D-80290 München*

² *Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU München, D-80290 München*

³ *Forschungsgruppe Bildverstehen, Institut für Informatik IX, TU München, D-80290 München*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **86** (3), S. 177–186

1998

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Ebner_VGI_199825,  
  Title = {Automatische Extraktion von Stra{\ss}en aus digitalen Luftbildern},  
  Author = {Ebner, Heinrich and Baumgartner, Albert and Steger, Carsten},  
  Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
    Geoinformation},  
  Pages = {177--186},  
  Number = {3},  
  Year = {1998},  
  Volume = {86}  
}
```



gen scheinbar dominieren während andere in den Hintergrund treten.

Eine lithologische Differenzierung geologischer Einheiten ist in unseren Breiten mit den momentan zur Verfügung stehenden Fernerkundungsdaten nur bedingt möglich. Alle verwendeten Verfahren waren nur lokal anwendbar, zeigen dort aber Möglichkeiten auf, die auf der Basis der voraussichtlich in den nächsten Jahren zur Verfügung stehenden hyperspektralen Fernerkundungsdaten auch unter den in Österreich gegebenen klimatischen Verhältnissen mineralogisch-lithologische Differenzierungsmöglichkeiten auf der Basis von Fernerkundungsdaten erwarten lassen.

In Gebieten, in denen die als Grundwasserspeicher dienende Lockergesteinsauflage nur geringmächtig ausgebildet ist, beeinflussen Störungszonen aufgrund ihrer bevorzugten Wasserwegigkeit maßgeblich das hydrogeologische Regime. Setzen sich Störungszonen aus den Festgesteinen in Sedimentbecken fort und sind diese (sub)rezent noch aktiv, so ist zu erwarten, daß das hydrogeologische Regime der Sedimentbecken durch diese Störungssysteme beeinflusst wird. Strukturvergleiche zwischen Satellitenbilddaten und aerogeophysikalischen Verfahren in Verbindung mit geologischen Basisdaten ermöglichen die indirekte Identifizierung von

Lithologien und Strukturen unter Sedimentbedeckung. Dies gibt Aufschluß über Wegigkeiten und Speicherkapazitäten oberflächennaher Grundwasserleiter und stellt eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die Grundwasserprospektion dar.

Literatur

- [1] Engman, E.T. & Gurney, R.J. (1991): Remote Sensing in Hydrology. – 225 pp., London.
- [2] Belocky R., Heiss G. & Salzer F. (1997): Structural analysis and lithological classification in humid areas using satellite remote sensing and airborne geophysics – a case study from the Bohemian Massif / Lower Austria. – In: Checci G., Engman E.T. & Zilioli E. (eds.): „Earth Surface Remote Sensing.“ – Proceedings of SPIE Vol. 3222, 351–356
- [3] Oberhauser, R. (1980): Der geologische Aufbau Österreichs., Springer, Wien New York, 1980
- [4] Schermann, O. (1965): Über Horizontalseitenverschiebungen am Ostrand der Böhmischen Masse. – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. 16
- [5] Seiberl, W. & Heinz, H. (1986): Aerogeophysikalische Vermessung im Bereich der Kremser Bucht. – Bund/Bundesländer-Rohstoffprojekt N-C-006d/81, 42 Bl, 12 Abb., 7 Beil, Geol. B.-A., Wien
- [6] Seiberl, W., Rötzel, R. & Pirkl, H. (1996): Aerogeophysikalische Vermessung im Bereich von Pulkau/NÖ.-Vollzug des Lagerstättengesetzes: Projekt ÜLG-20/94-1, 52 S., 8. Abb., 10 Beil, Geol. B.-A., Wien
- [7] Crosta, A.P. & Moore, J. McM. (1989): Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting case history in greenstone belt terrain. – Proceedings of the 7th (ERIM) Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, 2–6 Oct, pp. 1173–1187



Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern¹

Heinrich Ebner, Albert Baumgartner und Carsten Steger, München

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird ein Ansatz zur automatischen Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern präsentiert. Der Ansatz beruht auf der Verwendung verschiedener Auflösungsstufen des Luftbildes. Die Straßen werden als Netz modelliert, das aus Kreuzungen und aus Verbindungen zwischen diesen Kreuzungen besteht. Für verschiedene sogenannte „globale Kontexte“, d.h. offene Landschaft, Wald und Siedlung, werden Relationen zwischen Hintergrundobjekten, wie Gebäuden oder Bäumen, und Straßenobjekten, wie Straßenabschnitten, modelliert. Die Relationen, wie z.B. der Schattenwurf von Gebäude auf Straßenabschnitt, bestimmen sogenannte „lokale Kontexte“. Die automatische Unterteilung des Luftbildes in globale Kontexte dient dazu, die Extraktion auf die erfolgversprechendsten Regionen zu fokussieren und ermöglicht Aussagen darüber, in welchen Bereichen des Luftbildes das Ergebnis am zuverlässigsten ist. Für die Straßenextraktion werden Kanten im ursprünglichen Bild hoher Auflösung (0,2 – 0,5 m) und Linien in einem auflösungsreduzierten Bild extrahiert. Unter Verwendung beider Auflösungsstufen und expliziten Wissens über Straßen werden Hypothesen für Straßenabschnitte generiert. Diese werden in einem iterativen Verfahren zu langen Verbindungen gruppiert. Neben reinen Gruppierungsverfahren werden zum Schließen von Lücken auch Wissen über den lokalen Kontext und sogenannte „Ribbon-Snakes“ genutzt. Die Vernetzung der Straßen erfolgt durch die Extraktion von Kreuzungen. Die dargestellten Beispiele und die Ergebnisse einer Evaluierung auf Grundlage manuell erfaßter Referenzdaten zeigen die Leistungsfähigkeit des Verfahrens.

¹ Vortrag von Prof. Ebner anlässlich der Verleihung der Friedrich-Hopfner-Medaille am 15. Mai 1998 an der TU-Wien

Abstract

This paper presents an approach for the automatic extraction of roads from digital aerial imagery. The approach makes use of several versions of the aerial image having different resolutions. Roads are modeled as a network of intersections and links between these intersections. For different so-called „global contexts“, i.e., rural, forest, and urban area, the model describes relations between background objects, e.g., buildings or trees, and road objects, e.g., road-segments. The relations, e.g., the casting of a shadow from a tree on a road-segment, determine so-called „local contexts“. The automatic segmentation of the aerial imagery into different global contexts is used to focus the extraction to the most promising regions and additionally allows to predict in which parts of the image the results are most reliable. For the actual extraction of the roads edges are extracted in the original high resolution image (0.2 – 0.5 m) and lines in an image of reduced resolution. Using both resolution levels and explicit knowledge about roads, hypotheses for road-segments are generated. They are grouped iteratively to larger segments. In addition to grouping algorithms also knowledge about the local context and so-called „Ribbon-Snakes“ are used to bridge gaps. To construct the road network, finally intersections are extracted. The given examples and the results of an evaluation based on manually plotted reference data indicate the potential of the approach.

1. Einleitung

In der digitalen Photogrammetrie gibt es operationelle automatische Lösungen für geometrische Aufgaben. Dies sind z.B. die Messung von Rahmenmarken und das Auffinden homologer Punkte für die Bestimmung der relativen Orientierung, für die Generierung eines digitalen Oberflächenmodells, oder für die automatische Aerotriangulation. Semantische Aufgaben, wie Aufbau und Fortführung Geographischer Informationssysteme (GIS), müssen bisher immer noch von einem Operateur manuell erledigt werden. Dies ist zeitaufwendig und teuer. Daher sind automatische Lösungen hochwillkommen.

Forschungsarbeiten, die sich mit der automatischen Extraktion von topographischen Objekten aus Luft- und Satellitenbildern befassen, gibt es bereits seit den siebziger Jahren. Ziel ist hierbei heutzutage die Fortführung von GIS-Daten. Auch wenn die Objektextraktion für die GIS-Fortführung durch die Verwendung vorhandener GIS-Daten erleichtert werden kann, beschränkt sich der hier vorgestellte Ansatz dennoch auf die Extraktion von Objekten (hier: Straßen) ohne die Verwendung dieser Daten. Dafür gibt es mehrere Gründe: Eine automatische Extraktion ohne Verwendung von Vorwissen zeigt die Möglichkeiten und Grenzen eines Extraktionsverfahrens wesentlich besser als eine GIS-gesteuerte Extraktion und kann daher einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der Probleme der automatischen Bildinterpretation leisten. Weiterhin ist es für die GIS-Fortführung ohnehin unumgänglich, daß auch neue Objekte extrahiert werden, für die es keine Vorinformation gibt.

Einen guten Überblick über Modelle und Strategien zur Straßenextraktion gibt [5]. Die am meisten verbreiteten Vorgehensweisen sind die Extraktion und Verfolgung von Linien in Bildern niedriger Auflösung (z.B. [3]) und die Zuordnung

von Profilen sowie die Detektion von Straßenrändern in Form von (anti-)parallelen Kanten in Bildern hoher Auflösung (z.B. [10]). Die verschiedenen Ansätze verwenden spezielle Methoden und zusätzliches Wissen, wie z.B. geometrische Bedingungen, auf unterschiedliche Art und Weise.

Werden die Relationen zwischen Straßen und anderen Objekten, wie Fahrzeugen, Gebäuden oder Bäumen, außer Acht gelassen, so ist eine zuverlässige Extraktion meist nicht möglich. Diese Hintergrundobjekte haben oft einen starken Einfluß auf die Charakteristik der Straßen, oder zumindest auf ihr Aussehen in Luftbildern: So werfen z.B. hohe Objekte Schatten und können Verdeckungen verursachen. Durch die Verwendung von Kontext-Information, wie in [1], können Extraktionsalgorithmen besser gesteuert werden. Im Extremfall ist die Straßenextraktion nicht mehr durch Verfolgung von Linien oder Detektion von Straßenrändern möglich, sondern muß wie in [8] durch die Erkennung und Gruppierung von Fahrzeugen, d.h. Hintergrundobjekten, erfolgen.

Die Eigenschaften von Straßen unterscheiden sich in verschiedenen Auflösungsstufen und in verschiedenen globalen Kontexten. In dem hier vorgestellten Verfahren werden im ursprünglichen, hochaufgelösten Bild Kanten, in einem auflösungsreduzierten Bild Linien extrahiert. Unter Verwendung beider Auflösungsstufen und expliziten geometrischen und radiometrischen Wissens über Straßen, werden Hypothesen für Straßenränder abgeleitet, und daraus Straßenabschnitte generiert. Straßenabschnitte sind semantische Objekte mit Attributen und zugeordneten Methoden. Die Fähigkeit eines Straßenobjekts, explizit eine spezifische Region zu repräsentieren, erleichtert die Suche nach zusätzlicher Evidenz, wie z.B. Fahrbahnmarkierungen. Verbindungen zwischen zwei Kreuzungen werden aus Straßenabschnitten aufgebaut. Die At-

tribute und Methoden der Straßenobjekte variieren entsprechend dem Kontext. Zur Beschreibung der verschiedenen Erscheinungsformen von Straßen werden hier drei „globale Kontexte“ unterschieden: Siedlung, Wald, Offene Landschaft. Für jeden globalen Kontext werden spezifische Relationen zwischen Straßenobjekten und Hintergrundobjekten berücksichtigt, welche hier als „lokale Kontexte“ bezeichnet werden.

Das Straßenmodell und die verschiedenen lokalen Kontexte werden im Abschnitt 2 dargestellt. Abschnitt 3 erläutert neben der grundlegenden Beschreibung der Strategie für die Extraktion die für den hier präsentierten Ansatz charakteristischen Elemente. An eine Bewertung der Ergebnisse in Abschnitt 4 schließt sich ein kurzer Ausblick an.

2. Modell

Um Straßen aus einem digitalen Luftbild extrahieren zu können, ist es notwendig, eine klare Vorstellung von dem Objekt „Straße“ zu haben. Hier umfaßt das Modell explizites Wissen über Geometrie (Straßenbreite, Parallelität der Straßenränder, ...), Radiometrie (Reflexionseigenschaften), Topologie (Netzstruktur) und Kontext (Relationen mit anderen Objekten, wie z.B. Gebäuden und Bäumen). Das nachfolgend beschriebene Modell ist in zwei Teile gegliedert: Ein Teil beschreibt die charakteristischen Eigenschaften von Straßen in der realen Welt und im Luftbild und leitet daraus ein Straßenmodell ab (Abschnitt 2.1). Der andere Teil definiert verschiedene lokale Kontexte und weist diese verschiedenen globalen Kontexten zu (Abschnitt 2.2).

Auf diese Weise wird das komplexe Modell für das Objekt Straße in Teilmodelle zerlegt, die an den jeweiligen globalen Kontext angepaßt sind. Diese Teilmodelle betonen bestimmte Eigenschaften und können daher als spezialisierte Modelle betrachtet werden.

2.1. Straßen

Straßen in der realen Welt: Die Beschreibung von Straßen in der realen Welt kann zuerst aus ihrer Funktion für die Menschen abgeleitet werden. Straßen erschließen die Erdoberfläche und erscheinen daher als Netz, das von Menschen besiedelte und bewirtschaftete Gebiete verbindet. Je dichter ein Gebiet bewohnt und je intensiver es genutzt ist, desto dichter ist das Straßennetz. Entsprechend ihrer Bedeutung werden die einzelnen Teile des Straßennetzes in ver-

schiedene Kategorien mit unterschiedlichen Attributen eingeteilt. Je nach Kategorie unterscheiden sich die Straßen u.a. hinsichtlich minimalem Krümmungsradius und maximal zulässiger Steigung. Informationen über Art und Zustand des Fahrbahnbelags, Existenz von Markierungen, Geh- und Radwegen, oder rechtliche Bestimmungen (Straßenbezeichnung, Verkehrsvorschriften) sind als Attribute für einzelne Teile einer Straße von Bedeutung.

Straßen in Luftbildern: Das Aussehen von Straßen in Bildern hängt von den spektralen Eigenschaften des verwendeten Sensors und dessen Auflösung im Objektraum ab. Der hier vorgestellte Ansatz zur Straßenextraktion ist zunächst auf Schwarzweißbilder bzw. die Verwendung eines einzigen Farbkanals beschränkt und es werden nur Abhängigkeiten von der Auflösung berücksichtigt. In Bildern niedriger Auflösung, d.h. mehr als 2 m pro Pixel, erscheinen Straßen meist als Linien, die ein mehr oder weniger dichtes Netz bilden. In Bildern höherer Auflösung dagegen, d.h. bei weniger als ca. 0.50 m, erscheinen Straßen als langgestreckte homogene Flächen mit relativ konstanter Breite. In der originalen, höheren Auflösung ist die erreichbare geometrische Genauigkeit deutlich besser. Jedoch wird die Straßenextraktion durch Hintergrundobjekte, wie Fahrzeuge, Bäume oder Gebäude stark gestört.

In einem geglätteten Bild – was der reduzierten Auflösung entspricht – können Linien, die Straßenachsen repräsentieren, teilweise auch in Gegenwart dieser störenden Hintergrundobjekte noch sicher extrahiert werden. Durch die Glättung werden Detailstrukturen der Straße, wie z.B. ein Fahrzeug auf der Straße oder auch Objekte wie Fahrbahnmarkierungen, eliminiert. Dies kann als Abstraktion interpretiert werden, d.h. das Objekt Straße wird vereinfacht und seine grundlegenden Eigenschaften werden hervorgehoben [6].

Straßenmodell: Aus dem letzten Absatz folgt, daß die Fusion der Ergebnisse einer Straßenextraktion in reduzierten und hoch aufgelösten Bildern dazu beitragen kann, die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Zudem können Details wie Fahrbahnmarkierungen, welche bei einer Auflösung von 0.20 m oder weniger zu erkennen sind, als zusätzliche Evidenz zur Bestätigung von Straßenhypothesen genutzt werden. Die Verwendung mehrerer Auflösungsstufen erhöht einerseits die Robustheit der Straßenextraktion, andererseits ergibt sich daraus die Notwendigkeit, verschiedene Merkmale in den einzelnen Auflösungsstufen zu verwenden und die Merkmale al-

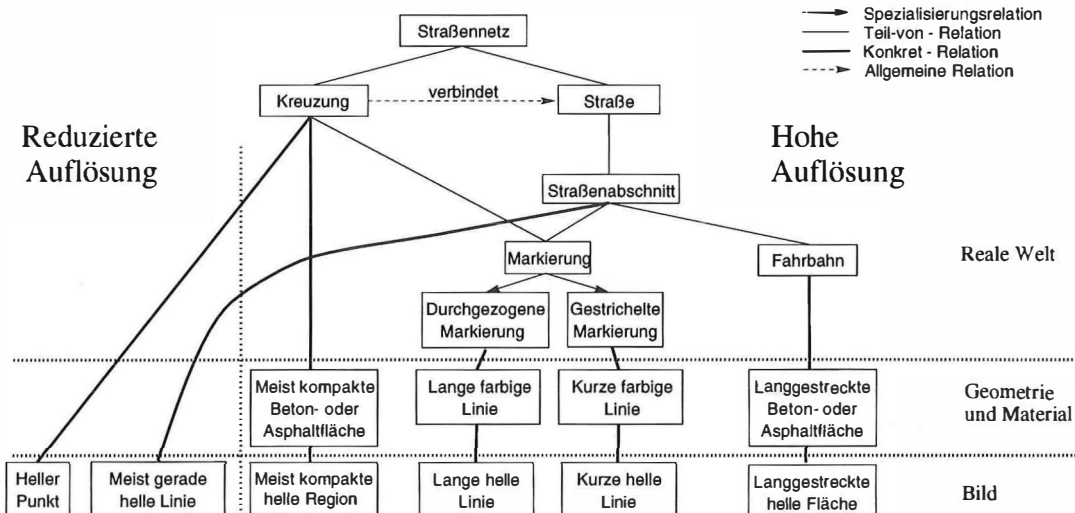


Abb. 1: Straßenmodell

ler Auflösungsstufen in einem Modell zu vereinen. Dies führt zu dem in Abbildung 1 dargestellten Straßenmodell.

Das Modell beschreibt die Objekte als „Konzepte“. Es ist in drei Ebenen aufgeteilt, die unterschiedliche Sichtweisen beschreiben. Die reale Welt-Ebene stellt die zu extrahierenden Objekte und ihre Relationen dar. Auf dieser Ebene besteht das Straßennetz aus Kreuzungen und Straßen, die diese Kreuzungen miteinander verbinden. Die Straßen bestehen aus kürzeren Segmenten, den Straßenabschnitten. In der hohen Auflösung bestehen die Straßenabschnitte aus Fahrbahnen und Markierungen. Die Konzepte der realen Welt sind mit den Konzepten der Geometrie- und Material-Ebene über die Konkret-Relation gekoppelt, welche Konzepte verbindet, die gleiche Objekte auf verschiedenen Ebenen repräsentieren. Die Geometrie- und Material-Ebene dient als Zwischenebene, in der die 3D-Gestalt und Materialeigenschaften der Objekte repräsentiert werden. Der Vorteil dieser Ebene besteht darin, daß Objekte – anders als in der Bild-Ebene – unabhängig von Sensoreigenschaften und Blickrichtung beschrieben werden. In der reduzierten Auflösung sind die Straßenabschnitte mit den „meist geraden hellen Linien“ der Bild-Ebene verbunden. Im Gegensatz dazu ist die Fahrbahn als Teil eines Straßenabschnitts in der hohen Auflösung mit der „langgestreckten hellen Fläche“ der Bild-Ebene über die „langgestreckte Beton- oder Asphaltfläche“ der Geometrie- und Material-Ebene verbunden.

Während die hohe Auflösung detaillierte Information liefert, fügt die reduzierte Auflösung glo-

bale Information hinzu. Im Rahmen der Fusion der Information beider Auflösungen können aufgrund der Abstraktion in der reduzierten Auflösung richtige Hypothesen für Straßen hinzugefügt und falsche eliminiert werden, während aus der hohen Auflösung Details gewonnen werden, wie z.B. die exakte Position und Breite der Straße oder Markierungen. Auf diese Weise können die Vorteile beider Auflösungen verschmolzen werden.

2.2. Kontext

Das vorgestellte Straßenmodell enthält Wissen über radiometrische, geometrische und topologische Eigenschaften von Straßen. Dies wird hier um den Kontext erweitert. Hintergrundobjekte, wie Gebäude, Bäume und Fahrzeuge können einerseits die Straßenextraktion unterstützen (z.B. führt zu einem Haus i.d.R. auch ein Weg), andererseits aber auch behindern (z.B. kann ein Haus einen Teil einer Straße verdecken; Hausdächer können ähnlich aussehen wie Straßen). Die Wechselwirkungen zwischen Straßen- und Hintergrundobjekten werden hier lokal und global modelliert.

Lokaler Kontext: Im lokalen Kontext werden typische Beziehungen zwischen einzelnen Straßenobjekten und Hintergrundobjekten modelliert. Situationen, in denen die Straßenextraktion durch Hintergrundobjekte lokal erschwert wird, sind in der offenen Landschaft z.B. Zufahrten zu Feldern oder einzelne Fahrzeuge auf der Fahrbahn. In Siedlungen treten dagegen Probleme eher durch Zufahrten zu Gebäuden auf. Ge-

bäude sind ihrerseits meist parallel zu den Straßen ausgerichtet. In Siedlungen gibt es zudem auch eine Reihe von anderen Objekten, die parallel zu Straßen verlaufen, wie z.B. Geh- und Radwege, und die die Extraktion ebenfalls behindern, aber auch unterstützen können. Für den lokalen Kontext werden diese Situationen in Form von Skizzen beschrieben. Der lokale Kontext Verdeckung_Schatten (Abb. 2) beschreibt z.B. einen Fall, in dem ein hohes Objekt einen Teil der Straße verdeckt oder abschattet, so daß zunächst nur zwei unverbundene Straßenabschnitte gefunden werden. Weitere lokale

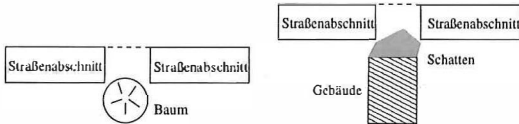


Abb. 2: Lokaler Kontext Verdeckung_Schatten

Kontexte sind Zufahrt_zu_Feld, Zufahrt_zu_Gebäude, Fahrzeug_auf_Fahrbahn oder Geh-/Radweg_parallel_zu_Straße. Diese beispielhaft angeführten lokalen Kontexte können zu komplexeren lokalen Kontexten aggregiert werden, in denen dann z.B. Verdeckung_Schatten und Zufahrt_zu_Gebäude miteinander interagieren.

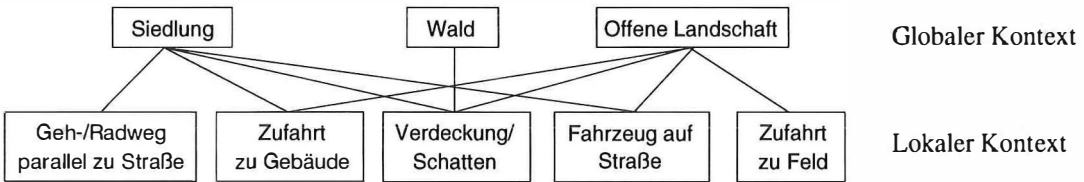


Abb. 3: Globaler und lokaler Kontext

Globaler Kontext: Nicht jeder lokale Kontext muß überall in Betracht gezogen werden. Die Relationen zu Hintergrundobjekten und deren Relevanz für die Straßenextraktion hängen auch von den Gebieten ab, in denen sie auftreten. So haben Straßen in bebauten Gebieten ein deutlich anderes Erscheinungsbild als im Wald oder in der aus Wiesen und Feldern aufgebauten offenen Landschaft. Die Unterschiede im Erscheinungsbild sind zum Teil auch Ausprägung der unterschiedlichen Beziehungen zwischen Straßen und Gebäuden. So stehen Gebäude meist um so näher an den Straßen und sind umso stärker parallel zu ihnen ausgerichtet, je dichter die Bebauung ist. Daher ist es sinnvoll, unterschiedliche lokale Kontexte, d.h. Merkmale und Relationen, nicht nur für verschiedene Auflösungsstufen, sondern auch für verschiedene Gebiete, d.h. globale Kontexte, zu verwenden. Hier werden im folgenden Siedlung, Wald und

Offene Landschaft unterschieden. Der globale Kontext ist nicht nur für die Relevanz und Ausprägung des lokalen Kontexts von Bedeutung. Auch die Extrahierbarkeit der Objekte hängt von ihm ab. Verfahren, die für die Straßenextraktion in der offenen Landschaft gut geeignet sind, sind zumindest nicht ohne weiteres auf die anderen globalen Kontexte übertragbar. In Wald und Siedlung können andere Parametereinstellung zu besseren Ergebnissen führen, meist sind aber komplett andere Ansätze erforderlich. Eine Zuweisung verschiedener lokaler Kontexte zu globalen Kontexten ist in Abbildung 3 dargestellt.

Eng verbunden mit der Verwendung von Kontextwissen ist die Frage nach der Quelle für die zusätzliche Information. Da hier die Extraktion von Straßen im Vordergrund steht, sind die Anforderungen an Genauigkeit und Detaillierungsgrad der Information über die Hintergrundobjekte nicht allzu hoch. Diese Information kann entweder aus einem vorhandenen GIS übernommen werden, oder aber aus dem Bild selbst extrahiert werden. Letzteres hat den Vorteil, daß sich keine zusätzlichen Probleme durch veraltete GIS-Daten ergeben. Durch die Zuhilfe-

nahme eines aus zwei und mehreren Bildern automatisch generierten digitalen Oberflächenmodells (DOM) kann ein wesentlicher Teil der für die Straßenextraktion problematischen Situationen erklärt werden. Z.B. können einzelne hohe Objekte im DOM detektiert werden. Unter Verwendung der Information über Aufnahmeort und -zeitpunkt lassen sich anhand des DOM abgeschattete und verdeckte Bereiche bestimmen. Eine Unterteilung des Luftbildes in globale Kontexte zur Steuerung der Straßenextraktion kann entweder aus einem GIS übernommen, oder durch eine Segmentierung des Bildes erreicht werden.

3. Strategie

Neben der statischen Modellierung von Straßen und deren Kontext spielt die Strategie, d.h.

das Wissen darüber, welches Modellwissen wann eingesetzt werden soll, eine zentrale Rolle für die Leistungsfähigkeit des Ansatzes. In diesem Abschnitt erfolgt zunächst eine allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise zur Extraktion von Straßen. Anschließend werden anhand von Beispielen einzelne Teilschritte ausführlicher erläutert.

Die grundlegende Strategie des hier vorgestellten Extraktionsverfahrens besteht darin, die Extraktion auf die Teile des Straßennetzes zu fokussieren, die am einfachsten und sichersten zu erkennen sind, und die zudem einen großen Einfluß auf die weitere Erkennung haben. Welche Merkmale am auffälligsten sind und sich damit für die Extraktion am besten eignen, hängt stark davon ab, in welchem Kontext Straßen extrahiert werden sollen. In Siedlung und Wald reicht Wissen über Geometrie und Radiometrie wegen der Schatten- und Verdeckungsprobleme häufig nicht aus. Andererseits können bereits mit einem relativ einfachen Modell, das nur Wissen über Eigenschaften von Straßen selbst berücksichtigt, für die offene Landschaft relativ gute Ergebnisse erwartet werden.

Entsprechend diesen Überlegungen beginnt die Straßenextraktion in der offenen Landschaft. Die (Zwischen-)Ergebnisse nach diesem Schritt können dann genutzt werden, um die Straßenextraktion in Siedlung und Wald weiterzuführen. Die Unterteilung des Luftbildes in die verschiedenen globalen Kontexte erfolgt mit Hilfe einer texturbasierten Segmentierung. Gemäß dem Straßenmodell wird neben der Originalauflösung von 0.20–0.50 m ein auflösungsreduziertes Bild verwendet, in dem die Straßen nur wenige Pixel breit sind. Mit Hilfe der in der reduzierten Auflösung extrahierten Linien werden aus den in der hohen Auflösung gefundenen Kanten mittels mehrerer Gruppierungsregeln diejenigen ausgewählt, die Kandidaten für Straßenränder sind: Die Kanten müssen einen gewissen Abstand zueinander haben, parallel sein, eine homogene Fläche einschließen, und zudem zu einer Linie aus der reduzierten Auflösung korrespondieren. Aus diesen Kandidaten für Straßenränder werden dann Straßenabschnitte generiert. Straßenabschnitte werden durch die Punkte der Mittelachse mit zugehöriger Breite repräsentiert, und erhalten zudem Attribute, die für die weitere Extraktion bzw. Gruppierung nützlich sind. Die Gruppierung der zunächst noch relativ kurzen Straßenabschnitte zu längeren, d.h. das Schließen von Lücken und die sukzessive Elimination von falschen Hypothesen, erfolgt nach dem Prinzip der „Hypothesenbildung und Verifika-

tion“. Ausgehend von geometrischen Kriterien (Abstand, Kollinearität, Breitenverhältnis) und radiometrischen Kriterien (mittlerer Grauwert, Standardabweichung) werden Hypothesen über zu schließende Lücken generiert. Anschließend werden die hypothetischen Straßenabschnitte im Bild verifiziert. Dieser Verifikationsschritt besteht aus maximal drei Stufen: Auf der ersten Stufe werden die radiometrischen Eigenschaften des neuen Abschnittes mit denen der zu verbindenden Abschnitte verglichen. Die Geometrie des neuen Abschnittes wird dabei durch die zu verknüpfenden Endpunkte und die von diesen ausgehenden Richtungen festgelegt. Sofern sich in den radiometrischen Eigenschaften keine allzu großen Differenzen zeigen, gilt die Hypothese als bestätigt. Im anderen Fall wird in der zweiten Verifikationsstufe mittels einer sogenannten „Ribbon-Snake“ versucht, im Gradientenbild einen optimalen Pfad für die Verbindung zu finden, der eine Annahme der Verknüpfungshypothese rechtfertigt. Schlägt auch dieser Verifikationsschritt fehl, so wird in der dritten Stufe nach einer Erklärung dafür gesucht, weshalb sich für den hypothetischen Straßenabschnitt keine Bestätigung im Bild finden läßt. Als mögliche Erklärungen kommt hierfür der lokale Kontext Verdeckung/Schatten in Betracht. D.h. der lokale Kontext wird als letzte und gleichsam schwächste Verifikationsmethode zum Erklären und Schließen von Lücken herangezogen.

Nach dem Schließen von Lücken zwischen den Straßenabschnitten und der damit einhergehenden Elimination vermutlich falscher Hypothesen, die kurz sind und nicht verknüpft werden können, gilt es im nächsten Schritt, Kreuzungspunkte zu finden, um topologische Beziehungen zwischen den Straßenhypothesen aufzubauen. Idealerweise sollten nach diesem Schritt alle Straßenhypothesen miteinander verbunden sein, so daß zwischen jedem Punkt auf den extrahierten Straßen eine Verbindung zu jedem beliebigen anderen Punkt innerhalb des extrahierten Straßennetzes existiert. Daß ein solches Ergebnis in der Regel nicht erwartet werden kann, liegt zum einen daran, daß sich durch den begrenzten Bildausschnitt die Knotenpunkte, über die die Straßen verbunden werden, zum Teil außerhalb des betrachteten Ausschnittes befinden. Zum anderen ist das Extraktionsverfahren nicht perfekt und erkennt besonders in Siedlung und Wald häufig nur Bruchstücke des Straßennetzes. Bei einer zuverlässigen Extraktion allein in der offenen Landschaft läßt sich somit der Netzcharakter von Straßen nicht optimal nutzen.

Unter Verwendung von Wissen über globalen und lokalen Kontext kann die Semantik einzelner

Straßen genauer bestimmt werden. So können Zufahrten zu Gebäuden und Zufahrten zu Feldern unterschieden werden. Ab einer gewissen Mindestbreite ist zu erwarten, daß eine Straße mit Fahrbahnmarkierungen versehen ist. Daher kann in den extrahierten breiten Straßen gezielt nach Markierungen gesucht werden. Sind Markierungen vorhanden, so ist dies ein zusätzlicher, äußerst wichtiger Hinweis darauf, daß es sich tatsächlich um eine Straße handelt. Im anderen Fall könnte dies ein Hinweis dafür sein, daß es sich um etwas anderes handelt, was in dem Luftbild so ähnlich wie eine Straße aussieht, z.B. ein gemähter Wiesenstreifen. Steht nicht nur ein Schwarzweißbild, sondern Farb- oder Farbinfrarotinformation zur Verfügung, so könnten derartige Verwechslungen durch eine rigorosere Einschränkung des Suchraumes bereits in einem früheren Stadium der Extraktion vermieden werden.

Globaler Kontext: Abbildung 4 zeigt das Resultat einer texturbasierten Segmentierung der Offenen Landschaft in einem Bild mit einer reduzierten Auflösung von ca. 4 m. Die Pixelgröße am Boden beträgt für das gezeigte Beispiel in der hohen Auflösung ca. 0.45 m.

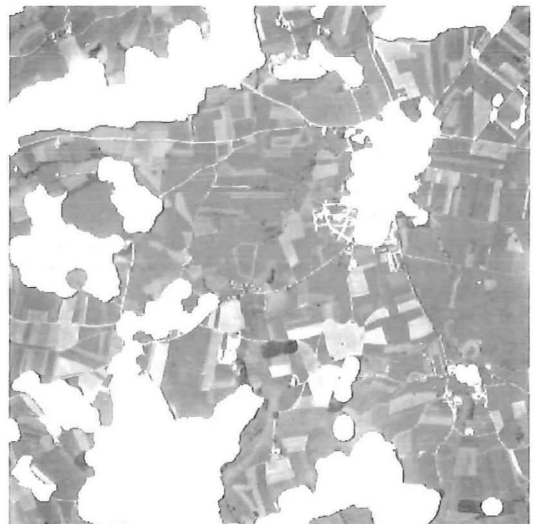


Abb. 4: a) Luftbild b) Offene Landschaft

Straßenhypothesen: Durch eine Fusion der Ergebnisse von Linienextraktion in einer reduzierten Auflösung (ca. 2 m) und Kantenextraktion in der hohen Auflösung (Abb. 5) werden Hypothesen für Straßenränder und daraus dann Hypothesen für Straßenabschnitte generiert (Abb. 6).

Gruppierung: Die mittels der Fusion von Linien- und Kantenextraktion generierten Straßen-

abschnitte hängen größtenteils nicht direkt zusammen und enthalten zudem noch viele falsche Hypothesen. Daher besteht die Hauptaufgabe im Folgenden darin, die korrekten Hypothesen miteinander zu verbinden und die falschen Hypothesen zu eliminieren. In einem iterativen Verfahren werden anhand der oben bereits aufgezählten Gruppierungskriterien Verbindungshypothesen aufgestellt und überprüft. Von Iteration zu Iteration wird hierbei die maximale Länge der zu schließenden Lücken vergrößert, während die übrigen Kriterien zunächst nahezu unverändert bleiben. Um harte Schwellwerte für die einzelnen Kriterien zu vermeiden, werden bei geringfügiger Überschreitung der geforderten Schwellwerte alle Kriterien in eine Gesamtbewertung der Verknüpfungshypothese miteinbezogen. Mit zunehmender maximaler Länge der zu schließenden Lücken werden gleichzeitig kurze, bislang noch nicht verknüpfbare Hypothesen für Straßenabschnitte eliminiert. Abbildung 7 zeigt ein Zwischenergebnis dieses Gruppierungsprozesses.

Nach der Vergrößerung des Schwellwertes für den Abstand werden in den folgenden Iterationen die Anforderungen hinsichtlich der Kollinea-

rität reduziert. In dieser Gruppierungsphase kommt auch die Snake-Technik in Form der Ribbon-Snakes zum Tragen. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise beim Einsatz der Ribbon-Snake ist in [7] zu finden.

Reicht die Bildinformation nicht aus, um eine Verbindungshypothese zu bestätigen, so wird Wissen über den lokalen Kontext des betreffen-



Abb. 5: Eingangsdaten für die Fusion: Linien (schwarz), Kanten (weiß)

den Straßenabschnitts mitberücksichtigt. D.h. es wird nach einer plausiblen Erklärung gesucht, weshalb im Bild zuwenig Hinweise auf eine Straße gefunden werden, und warum die Lücke dennoch geschlossen werden darf. Von Bedeutung sind hier v.a. der lokale Kontext Verdeckung/Schatten. Einen Großteil der Information, die zur Erklärung dieser Problemsituationen erforderlich ist, kann mit Hilfe eines DOM und Kenntnis von Aufnahmeort und Aufnahmezeit gewonnen werden. Daraus können Schattenbereiche im Bild prädiert und dann detektiert sowie Aussagen über Verdeckungen gemacht werden. Zudem lassen sich einzelne hohe Objekte anhand ihrer Textur im Bild in Vegetation und Gebäude unterscheiden [2]. Das DOM ist außerdem nützlich, um falsche Hypothesen für Straßen, die sich auf Hausdächern befinden, zu eliminieren.

Netzbildung: Nach der Generierung von Verbindungshypothesen und deren Verifikation, werden die gefundenen Straßen durch Kreuzungen verbunden. Die Generierung von Kreuzungshypothesen erfolgt auf Grundlage von rein geometrischen Schnittpunktberechnungen zwischen den bereits gefundenen Straßenhypothesen und deren Verlängerungen. An den Enden werden neue Abschnitte generiert, die bis zum Schnittpunkt mit der anderen Straße reichen. Die Verifikation dieses Abschnitts erfolgt nach denselben Kriterien, wie das Schließen der Lücken während des Gruppierungsprozesses. Als weitere Möglichkeit, um zu Hypothesen für Kreuzungen zu gelangen, bietet sich – als kon-



Abb. 6: Hypothesen für Straßenabschnitte

sequente Nutzung der Information aus der niedrigen Auflösung – die Verwendung der Knotenpunkte aus der Linienextraktion an.

4. Bewertung der Ergebnisse

Die Qualität der Ergebnisse ist je nach globalem Kontext sehr unterschiedlich. Für die offene Landschaft sind die Ergebnisse weitgehend richtig und vollständig (vgl. Abb. 8). Voraussetzung für gute Ergebnisse ist ein ausreichend deutlicher Kontrast zwischen Straßen und Um-



Abb. 7: Gruppierung: Zwischenergebnis

gebung. Die Feldwege, die oft ebenfalls mitextrahiert werden, lassen sich anhand ihrer Breite relativ einfach von den übrigen Straßen unterscheiden. In der Siedlung bereitet die große Anzahl von Hintergrundobjekten Probleme. Dadurch, daß die Straßen dort im Bild sehr oft unterbrochen sind, können von Anfang an weniger korrekte Hypothesen für Straßenabschnitte gefunden werden, die sich zudem schlecht gruppieren lassen. Abbildung 9 zeigt die Grenzen des Ansatzes: Die in der offenen Landschaft gefundenen Straßen enden meist am Ortsrand. Eine konsequente Einbeziehung der DOM-Information, welche hier noch nicht erfolgt ist, kann u.U. weiterhelfen.

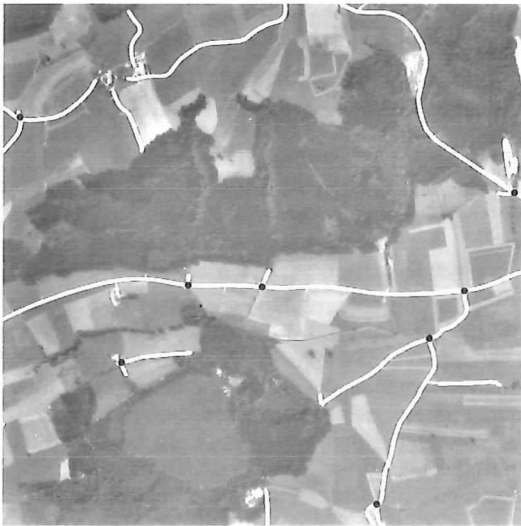


Abb. 8: Extrahierte Straßen und Kreuzungen

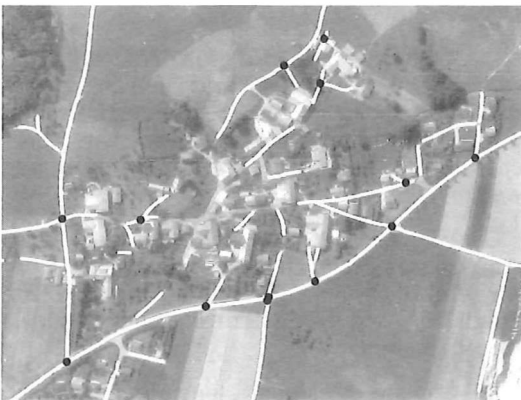


Abb. 9: Ergebnis für Siedlung

Eine quantitative Bewertung der Extraktionsergebnisse auf mehreren Bildern wurde mit dem in [4] vorgestellten Evaluierungsverfahren

vorgenommen. Es zeigte sich, daß für die offene Landschaft die Extraktionsergebnisse relativ zuverlässig ($> 95\%$) und auch ziemlich vollständig (80%–90%) sind. Die geometrische Genauigkeit der korrekten gefundenen Straßenachsen liegt bei ca. einem Pixel, d.h. 0.30–0.50 m.

5. Diskussion und Ausblick

Der vorgestellte Ansatz ist anwendbar auf Bilder mit einer Auflösung von ca. 0.20–0.50 m. Bei einer feineren Auflösung nimmt die Zahl der extrahierten Kanten sehr stark zu und die Fahrbahnen erscheinen wesentlich inhomogener. Bei einer Auflösung von mehr als 0.5 m werden die Straßenflächen im Bild andererseits sehr klein, so daß letztlich nur noch das Linienmodell verwendbar ist. Noch zu untersuchen ist, inwieweit für breite Straßen die Auflösung zukünftiger Satellitenbilder von ca. 0.8 m ausreichend ist.

Da beim Aufbau von Verbindungen nur die jeweils nächsten Nachbarn betrachtet werden, ist nicht gewährleistet, daß stets die im Sinne des gesamten Netzes besten Verbindungen gewählt werden. Abhilfe soll hier das in [9] vorgeschlagene Verfahren bringen, das bei der Gruppierung globale Kriterien mitberücksichtigt.

Für die Extraktion der Straßen in der Siedlung und im Wald stehen mit den Endpunkten am Rand der offenen Landschaft zwar gute Startpunkte zur Verfügung, die Extraktion muß sich in diesen Gebieten jedoch stärker auf andere Evidenz, wie z.B. Gruppierung von Markierungen und Fahrzeugen, als auf parallele Kanten stützen.

Die Straßenextraktion läuft bei dem vorgestellten Ansatz zwar automatisch, aber nicht absolut vollständig und zuverlässig ab. Daher wäre bei einem praktischen Einsatz in jedem Fall ein Operateur erforderlich, der die fälschlicherweise extrahierten Straßen eliminiert und die fehlenden Teile ergänzt. Die Ergebnisse zeigen aber auch, daß bereits mit relativ einfachen Gruppierungsverfahren gute Resultate erzielt werden können. Durch eine weitere konsequente Einbeziehung von Kontextwissen und durch die Integration globaler Gruppierungskriterien sollten sich die Ergebnisse noch einmal deutlich verbessern lassen.

Dank

Diese Arbeit wurde unter dem Kennzeichen Eb 74/8-3 aus Mitteln der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Literatur

- [1] Bordes, G., Giraudon, G. & Jamet, O. (1997): Road Modeling Based on a Cartographic Database for Aerial Image Interpretation, Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, Birkhäuser Verlag Basel, pp. 123–139.
- [2] Eckstein, W. & Steger, C. (1996): Fusion of Digital Terrain Models and Texture for Object Extraction, Proceedings of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition. Vol. III, Environmental Research Institute of Michigan, pp. 1–10.
- [3] Grün, A. & Li, H. (1997): Semi-Automatic Linear Feature Extraction by Dynamic Programming and LSB-Snakes, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 63(8): 985–995.
- [4] Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C. & Jamet, O. (1998): External Evaluation of Automatically Extracted Roads, Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation (2): 81–94.
- [5] Mayer, H. (1998): Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern, Deutsche Geodätische Kommission (C) 494, München.
- [6] Mayer, H. & Steger, C. (1998): Scale-Space Events and Their Link to Abstraction for Road Extraction, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53(2): 62–75.
- [7] Mayer, H., Laptev, I. & Baumgartner, A. (1998): Multi-Scale and Snakes for Automatic Road Extraction, Fifth European Conference on Computer Vision, pp. 720–733.
- [8] Ruskoné, E., Guigues, L., Airlault, S. & Jamet, O. (1996): Vehicle Detection on Aerial Images: A Structural Approach, 13th International Conference on Pattern Recognition, Vol. III, pp. 900–904.
- [9] Steger, C., Mayer, H. & Radig, B. (1997): The Role of Grouping for Road Extraction, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II), Birkhäuser Verlag Basel, pp. 245–256.
- [10] Vosselman, G. & de Knecht, J. (1995): Road Tracing by Profile Matching and Kalman Filtering, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Birkhäuser Verlag Basel, pp. 265–274.

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner, Dipl.-Ing. Albert Baumgartner: Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU München, D-80290 München, Email: {ebn}{albert}@photo.verm.tu-muenchen.de
Dr. rer. nat. Carsten Steger, Forschungsgruppe Bildverstehen, Institut für Informatik IX, TU München, D-80290 München, Email: stegerc@informatik.tu-muenchen.de

Verleihung der Friedrich-Hopfner-Medaille an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Heinrich Ebner

Die Friedrich-Hopfner-Medaille

Die Friedrich-Hopfner-Medaille ist eine Auszeichnung, die von der Österreichischen Kommission für die Internationale Erdmessung (ÖKIE) bzw. ab 1996 von der Österreichischen Geodätischen Kommission (ÖGK) in der Regel alle vier Jahre für hervorragende wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der Geodäsie verliehen wird.

Die Verleihung dieser Auszeichnung an den Vorstand des Lehrstuhles für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München, an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Heinrich Ebner, ist neben der Würdigung der persönlichen Leistung des Geehrten auch ein positives Zeichen im Sinne der immer stärker werdenden Integration der einzelnen Fachbereiche des Vermessungswesens, von der Erdmessung bis zur Photogrammetrie und Fernerkundung.

Die ÖGK ist gemäß ihren Statuten das Organ der Internationalen Geodäsie für Österreich. Sie vertritt die Belange Österreichs in der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) und bei zwischenstaatlich vereinbarten geodätischen Arbeiten, soweit diese nicht in Vollzug des Vermessungsgesetzes erfolgen. Sie ist die offizielle Verbindungsstelle Österreichs zur Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG).

Die ordentlichen Mitglieder der Kommission sind maximal 18 Universitätsprofessoren im Dienststand, sowie je ein Vertreter des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten und des Bundesministeriums für Wissenschaft, Verkehr und Kunst, der Präsident des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV), der Leiter der Abteilung „Grundlagen“ des BEV, der Direktor der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, sowie ein Vertreter der Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten.

Die ÖGK ist damit in dieser personellen Zusammensetzung eine einzigartige Plattform, in der Persönlichkeiten aus Wissenschaft, Verwaltung und Praxis vor dem gemeinsamen fachlichen Hintergrund beurteilend und lenkend tätig werden können.

Die Verleihung der Friedrich-Hopfner-Medaille durch dieses Gremium stellt somit eine ganz besondere Auszeichnung dar und ist die höchste Würdigung, die die österreichische Geodäsie vergeben kann.

Die Stiftung der Medaille erfolgte im Rahmen einer Sitzung der Österreichischen Kommission für die Internationale Erdmessung (ÖKIE), am 26. November 1976 über Vorschlag von Univ.-Prof. Dr. Helmut Moritz und wurde bisher vergeben an: