

Informationsvisualisierung mit dynamischen, interaktiven 3D-Karten

Prof. Dr. Jürgen Döllner
Am Luftschiffhafen 1, 14471 Potsdam
Tel. 0331 / 9097212, Fax 0331 / 9097210
doellner@hpi.uni-potsdam.de
Hasso-Plattner-Institut an der Universität Potsdam

1. EINLEITUNG

Dieser Beitrag beschreibt computergraphische Konzepte für die Visualisierung und Kommunikation raumbezogener Informationen auf der Grundlage kartographischer Prinzipien. Die Kartographie mit ihrem über Jahrhunderte entwickelten Repertoire an Methoden und Verfahren bildet die Grundlage für das in diesem Beitrag vorgestellte Werkzeug zur Präsentation, Exploration und Analyse raumbezogener Daten und Prozesse, den dynamischen, interaktiven 3D-Karten. Der Beitrag gibt einen Überblick über die zum Einsatz gelangenden computergraphischen Verfahren, die sowohl eine hohe visuelle Bildkomplexität als auch eine Darstellung in Echtzeit ermöglichen.

Interaktive, dynamische 3D-Karten lassen sich als kartenverwandte Darstellungen begreifen, die raumbezogene Daten und Prozesse auf der Grundlage eines digitalen Geländemodells dreidimensional computergraphisch visualisieren, die Interaktion mit dem Dargestellten ermöglichen und den Kartenaufbau und die Kartengestaltung in Abhängigkeit von der Sichtsituation, den Benutzerwünschen und dem Benutzerverhalten dynamisch festlegen. Der Begriff „3D-Karte“ wurde gewählt, da mit ihm – im heutigen Sprachgebrauch auf dem Gebiet der Computergraphik und Visualisierung – intuitiv ein dreidimensionales Kartenmodell und dessen geometrische Projektion auf eine Zeichenfläche verstanden wird. Arbeiten, die sich mit kartenverwandten Darstellungen in 3D befassen, finden sich u.a. bei Ervin (1993), bei Häberling (2000) in Form der topographischen 3D-Karte und bei Terribilini (1999) in Form des kartographischen 3D-Modells. Kartenverwandte Darstellungen in virtuellen 3D-Umgebungen erlauben allgemein die Interaktion zwischen Benutzer und Karten, die Immersion des Benutzers in die Umgebung (in Abhängigkeit von der eingesetzten VR-Hardware), die Variierung der Informationsintensität und schließlich die Ausstattung von Kartenobjekten mit Intelligenz (MacEachren et al. 1999) - neue Formen von Karten und Kartennutzung entstehen.

Kennzeichnend für die hier vorgestellten 3D-Karten ist es, dass sie auf einem hybriden Geländemodell basieren, dynamisch texturiert werden und softwaretechnisch durch Zusammenschluss von vorgefertigten Kartenbauelementen systematisch und konstruktiv erstellt werden können. In den folgenden Abschnitten wird die Multiresolutionsmodellierung der Geländeoberfläche, Verfahren zur Texturierung der Geländeoberfläche und die Kartenbauelemente besprochen.

2. MULTIRESOLUTIONSMODELL DER GELÄNDEOBERFLÄCHE

Ein digitales Geländemodell muss in unterschiedlichen geometrischen Auflösungen (Level-of-Detail, LOD) darstellbar sein, wenn es in interaktiven computergraphischen Anwendungen eingesetzt werden soll. *Multiresolutionsmodellierung* dient dazu, die geometrische Komplexität einer darzustellenden Szene so zu reduzieren, dass die Szene in Echtzeit (d.h. mit interaktiven Bildwiederholraten) ohne merklichen Qualitätsverlust dargestellt werden kann. So werden z.B. Szenenbereiche, die vom Kamerastandpunkt weit entfernt sind und somit nur einen kleinen Bildbereich belegen, in grober Auflösung, hingegen Bereiche nahe der Kamera in höherer Auflösung gezeichnet. Standards im Bereich der Computergraphik stellen entweder keine auf Geländemodelle spezialisierte Multiresolutionsmodelle bereit (z.B. Java3D) oder verfügen nur über Kom-

ponenten, die eine einzelne Multiresolutionstechnik kapseln (z.B. Level-of-Detail-Knoten in GeoVRML) und i.A. nicht erweiterbar sind.

Für digitale Geländemodelle wurden gitter- und dreiecksbasierte Verfahren zur auflösungsvarianten Darstellung erforscht, die sich hinsichtlich der verarbeitbaren Geländegeometrie und der erzielbaren visuellen Qualität unterscheiden. Beispiele neuerer Multiresolutionsmodelle für digitale Geländemodelle sind das Multitriangulation-Verfahren von De Floriani et al. (1998), die Progressive Meshes von Hoppe (1998) oder die Restricted Quad-Tree Triangulation von Pajarola (1998).

Interaktive, dynamische 3D-Karten verwenden ein *hybrides, auflösungsvariantes Geländemodell*, das gitter- und dreiecksbasierte Verfahren mit dem Ziel kombiniert, die Geländeoberfläche grob durch ein reguläres Gitter und geländemorphologisch wichtige Bereiche exakt durch irreguläre triangulierte Netze (TINs) darzustellen. Die eingesetzte LOD-Datenstruktur, der *Approximation Tree* (Baumann, Döllner u. Hinrichs 1999), integriert Gitter- und TIN-Daten, ordnet sie hierarchisch an und generiert automatisiert die LOD-Hierarchie. TINs bewirken, dass wichtige Geländestrukturen (z.B. Flussufer und Bergkämme) geometrisch präzise und somit im Bild scharf wahrgenommen werden können (Abb. 1). Die Datenstruktur ist darüber hinaus generisch gehalten, d.h. es können weitere LOD-Algorithmen und -Datenstrukturen objektorientiert integriert werden.

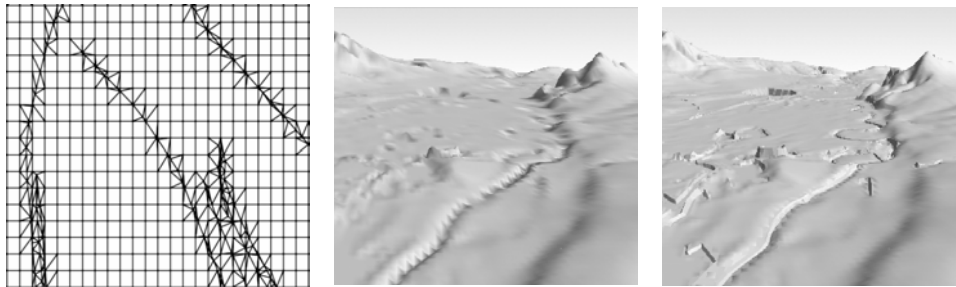


Abbildung 1: Geländemodell bestehend aus Gitterdaten kombiniert mit triangulierten Feinstrukturen (links). Visualisierung ohne Feinstrukturen (Mitte) und mit (rechts) Feinstrukturen.

3. TEXTURIERUNG DER GELÄNDEOBERFLÄCHE

Texturierung als fundamentales computergraphisches Verfahren (Haeberli u. Segal 1993) ermöglicht die visuell komplexe Gestaltung von 3D-Karten. Texturierung ist historisch bekannt als Verfahren zur Projektion von 2D-Bilddaten auf Oberflächen computergraphischer Primitive. Texturierung eröffnet darüber hinaus allgemein der interaktiven Visualisierung Möglichkeiten, Bilder hoher visueller Komplexität, z.B. Bilder mit Schattenwurf und Lichtreflexion, Hardware-unterstützt zu generieren. Speziell werden mit dem Begriff *Multitexturing* (Mehrfach-Texturierung) solche computergraphischen Verfahren bezeichnet, die mehrere Texturen zeitgleich unter Beachtung von Verknüpfungsoperationen auf eine Primitivoberfläche projizieren (Woo, Neider u. Davis 1999). Multitexturing muss – soll es für interaktive Visualisierung nutzbar sein – durch die Computergraphik-Hardware direkt unterstützt werden.

3.1 Mehrfach-Texturierung von Geländeoberflächen

Um Texturierung als leistungsfähigen Mechanismus zur Gestaltung interaktiver 3D-Karten einsetzen zu können, müssen Texturdaten auflösungsvariant modelliert und mit dem auflösungsvarianten digitalen Geländemodell integriert werden. Hierzu wurde ein zum auflösungsvarianten, hybriden Geländemodell komplementäres *LOD-Modell für 2D-Geländetexturdaten* entwickelt (Döllner, Baumann u. Hinrichs 2000), das Texturdaten beliebiger Größe verarbeitet, Multitexturing unterstützt und mit dem Geländemodell kooperiert. Die Kooperation ist notwendig, da die Auswahl einer Texturauflösungsstufe von der zuvor ausgewählten Geometrieauflösungsstufe abhängt. Die Auswahl wird über eine benutzerdefinierte geometrische und visuelle Fehlerschranke gesteuert.

Die visuell komplexe und dynamische Gestaltung von 3D-Karten wird erst mit Multitexturing-Verfahren ermöglicht, da nur so mehrere Thematiken und deren Verknüpfung im Bildraum in Echtzeit realisiert werden können. Zunächst lassen sich verschiedene Thematiken (z.B. Landnutzungsinformation, Bebauung, Bewuchs etc.) durch einzelne raumbezogene 2D-Texturen repräsentieren. Durch sekundäre 2D-Texturen (z.B. Helligkeitstexturen) können diese primären 2D-Texturen durch Bildoperationen im Bildraum verknüpft werden. Zum Beispiel können mit einer sekundären Graustufentextur, deren Graustufen verschiedenen Transparenz-Werten entsprechen, zwei primäre Geländetexturen überblendet werden.

3.2 Schattierungstexturen

Als erste, unmittelbare Anwendung ermöglicht Multitexturing den Einsatz von *Schattierungstexturen*, die die Schummerung des auflösungsvarianten Geländemodells enthalten. Klassisch entsteht die Schattierung eines Geländemodells dadurch, dass an den Eckpunkten der Geländeoberflächenpolygone (i.d.R. Dreiecke) Beleuchtungsintensitäten errechnet werden, die über die Polygonfläche interpoliert werden. Kritisch ist hierbei, dass bei einer Änderung der polygonalen Struktur der Geländeoberfläche, wie dies bei auflösungsvarianten Geländemodellen zwangsläufig der Fall ist, der Benutzer dies störend über die Veränderungen in der Schattierung wahrnimmt.

In dynamischen, interaktiven 3D-Karten wird die Schattierung einer Geländeoberfläche automatisiert für das Geländemodell in höchster Auflösung *vorberechnet* und auf das LOD-Geländemodell *als Textur* übertragen. Dadurch steht (1) auch einem gering aufgelösten LOD-Geländemodell die volle Schattierungsqualität zur Verfügung. Beim Übergang zwischen verschiedenen Auflösungsstufen wird (2) die geometrische Veränderung kaum wahrgenommen, da sich im Bild nur die Silhouetten verändern. Hinzu kommt, dass (3) die *Schattierung pro Pixel* aus der hochaufgelösten Schattierungstextur abgeleitet wird und somit keine Interpolationsstörungen auftreten. Da die Schummerung wesentlich für die Wahrnehmung der Morphologie einer 3D-Karte ist, kann mit diesem Verfahren die visuelle Qualität der Kartendarstellung drastisch erhöht und die dafür erforderliche geometrische Komplexität drastisch vermindert werden (Abb. 2).

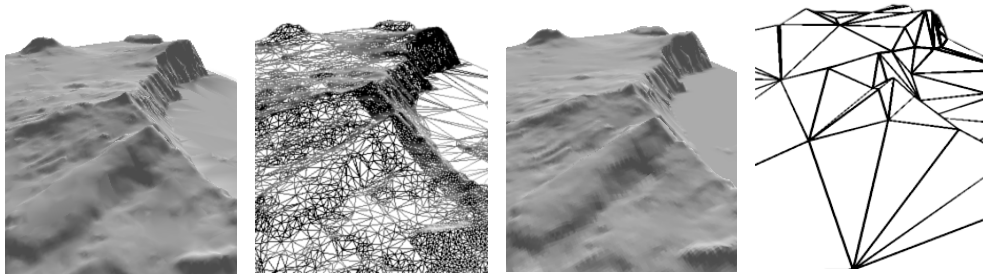


Abbildung 2: Links dreiecksbasierte Schattierung unter hoher geometrischer Auflösung, rechts gering aufgelöstes Geländemodell mit Schattierungstextur.

3.3 Texturlinsen zur gezielten Visualisierung thematischer Informationen

Texturlinsen sind spezielle Geländetexturen, die die Sichtbarkeit und Kombination anderer Geländetexturen modifizieren. Raumbezogene Informationen können so in 3D-Karten besonders hervorgehoben oder zusätzlich eingeblendet werden. Eine *Filter-Texturlinse* beschränkt die Sichtbarkeit anderer thematischer Texturschichten (Abb. 3). Sie kann dazu verwendet werden, thematische Daten aus einer bestimmten Texturschicht innerhalb der Linse aus- bzw. einzublenden. Eine *Luminanz-Texturlinse* modifiziert die Helligkeit einer anderen thematischen Texturschicht (Abb. 4). Durch die Animation einer Luminanz-Texturlinse können z.B. Anwender durch 3D-Karten geleitet werden (etwa zur Beschreibung eines Weges). Texturlinsen erlauben es, raumbezogene Informationen gezielt zu visualisieren, die im momentanen Kontext von Bedeutung sind. Dadurch lässt sich die visuelle Komplexität des Karteninhalts reduzieren.



Abbildung 3: Filter-Texturlinse zur gezielten Ausblendung thematischer Informationen.

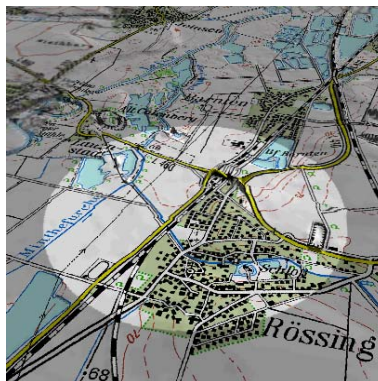


Abbildung 4: Luminanz-Texturlinse zur Hervorhebung von Gebieten.

4. KONSTRUKTION VON 3D-KARTEN

Die Konstruktion von dynamischen, interaktiven 3D-Karten erfolgt durch Instanziierung und Assoziierung von Kartenbauelementen; eine Sammlung von Bauelementen wurde im Rahmen einer prototypischen Implementierung unseres Ansatzes, dem *LandEx*-System (www.landex.de), wobei *Ex* für Explorer steht, entwickelt (Döllner u. Kersting 2000). Kartenbauelemente sind in diesem System in visuelle, strukturelle und verhaltengebende Kartenobjekte unterteilt.

4.1 Kartenbauelemente

Visuelle Kartenobjekte repräsentieren sichtbare, georeferenzierte 3D- und 2D-Objekte, die über graphische Attribute, wie z.B. Farbe, Größe, Form und Orientierung verfügen. Ein spezielles visuelles Kartenobjekt ist das auflösungsvariable, hybride Geländemodell. Weitere Beispiele sind 3D-Landmarken, 2D-Labels und Geländetexturen.

Strukturelle Kartenobjekte klassifizieren und organisieren individuelle Sammlungen von Kartenobjekten und modellieren Beziehungen zwischen ihnen. *Kategorien*, die andere Kartenobjekte klassifizieren, und *Gruppen*, die anderen Kartenobjekte logisch-hierarchisch anordnen, sind Beispiele für strukturelle Kartenobjekte.

Verhaltengebende Kartenobjekte können auf Ereignisse und Veränderungen durch den Aufruf von anwendungsspezifischen Aktionen reagieren; sie definieren die Interaktivität und Dynamik von 3D-Karten. Um Kartenobjekten ein von ihrer Klasse unabhängiges Verhalten zuordnen zu können, werden verhaltengebende Kartenobjekte als separate Objekte modelliert. Aus diesem Grund wird das anwendungsspezifische Verhalten nicht in den visuellen und strukturellen Kartenobjekten festgelegt, sondern durch beigefügte verhaltengebende Kartenobjekte modelliert. Beispielsweise assoziieren *Ereignistabellen* Ereignisse (der Benutzeroberfläche) mit Aktionen (fachspezifischen Skripten). Ereignisse umfassen Geräteereignisse (z.B. Maus-

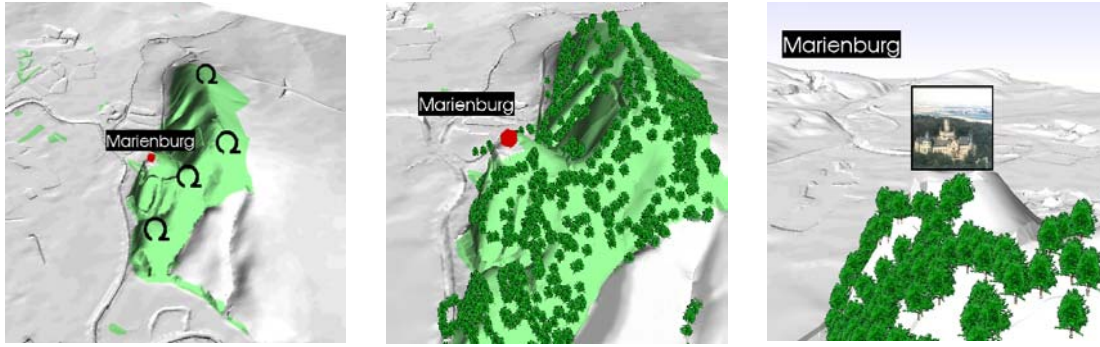


Abbildung 5: Level-of-Detail-Darstellungen des Geobjekts „Burg“ und des Geofeldes „Landnutzung“.

klick oder –bewegung), Zeitereignisse und Statusänderungen von Kartenobjekten (z.B. Sichtbarkeitsänderung von Objekten). *Constraints* sind verhaltengabende Kartenobjekte, die Parameter anderer Kartenobjekte einschränken bzw. überwachen. Aktionen werden im *LandEx*-Kartensystem durch Skripte spezifiziert, die durch die integrierte Skriptsprache Tcl (Ousterhout 1994) interpretiert werden.

4.2 Beispiel: Level-of-Detail-Gruppen

Eine *LOD-Gruppe* enthält eine Sammlung von distanzabhängigen, nicht notwendigerweise typhomogenen Kartenobjekten, die thematische Informationen in unterschiedlichen Auflösungsstufen beschreiben. Für jedes Kartenobjekt in der *LOD-Gruppe* ist ein Sichtbarkeitsintervall anzugeben, das festlegt, bei welchem Abstand zur Kamera das Objekt dargestellt wird. Die Sichtbarkeitsintervalle von Kartenobjekten können sich überlappen, um Übergänge zwischen Auflösungsstufen zu ermöglichen. Die Darstellung thematischer Daten kann dadurch an die Benutzerbedürfnisse und die Bildauflösung angepasst werden.

Abbildung 5 zeigt eine *LOD-Gruppe* bestehend aus Geobjekten und Geofeldern. Je nach Entfernung zur Kamera wird das Geobjekt „Burg“ durch einen Quader bzw. durch ein bildebeneparalleles Photo repräsentiert; analog wird ein Geofeld, ein Landnutzungsdatensatz für die Thematik „Wald“, durch Signaturen in der Bildebene bzw. Baum-Glyphen im Geländemodell dargestellt.

4.3 Geländetextur-Überblendung

Geländetextur-Überblendungen werden eingesetzt, wenn zu thematischen Informationen Geländetexturen mit unterschiedlicher Auflösung vorliegen; diese werden in Abhängigkeit von der Kameraentfernung visuell überblendet. Die einzelnen Geländetexturen sind i.A. unterschiedlich kartographisch generalisiert; die Überblendung stellt einen glatten visuellen Übergang sicher.

Die zu überblendenden Texturen (Abb. 6) werden direkt im Bildraum während des Bildaufbaus kombiniert; zeitaufwendige Bildoperationen auf den Texturdaten entfallen somit. Deswegen können sogar hochauflösende Texturen in Echtzeit überblendet werden.

Die Überblendungstechnik kann auch zur Animation von Texturen (z.B. zur Visualisierung von zeitvarianten Flutungszuständen in einer Landschaft) eingesetzt werden. Die einzelnen Texturen einer Texturfolge repräsentieren den Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt; durch die fortschreitende Überblendung zwischen jeweils zwei zeitlich benachbarten Texturen entsteht die Animation.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Das Konzept der dynamischen, interaktiven 3D-Karten beruht auf einem hybriden, auflösungsvarianten Geländemodell und einem darin integrierten auflösungsvarianten Mehrfach-Texturierungsmodell. 3D-Karten sind dadurch texturbasiert gestaltbar und in Echtzeit darstellbar. Eine Sammlung von Kartenbauelementen ermöglicht die softwaretechnische Konstruktion einzelner 3D-Karten durch wiederverwendbare



Abbildung 6: Distanzabhängige Überblendung unterschiedlich generalisierter Geländetexturen.

Bauelemente, die in hohem Maße konfigurierbar sind und durch eine Skriptingsprache erzeugt und verbunden werden können. Dadurch lassen sich insbesondere 3D-Karten durch einzelne Benutzer individualisieren und mit Informationen anreichern. Das *LandEx*-Kartensystem, das die vorgestellten Konzepte exemplarisch implementiert, lässt sich als Software-Komponente z.B. in Geoinformationssystemen und virtuellen Geo-Umgebungen zur interaktiven, raumbezogenen Informationsvisualisierung einsetzen.

Derzeit wird an Konzepten zur prozeduralen Texturierung, zur texturbasierten Visualisierung vektorieller Geoobjekte, an texturbasierten Verfahren zur Visualisierung von Geoprozessen und an der Integration von 3D-Modellen als Bestandteile des 2D-Geländemodells gearbeitet.

LITERATURVERZEICHNIS

- K. Baumann, J. Döllner, K. Hinrichs, O. Kersting. A Hybrid, Hierarchical Data Structure for Real-Time Terrain Visualization, *Computer Graphics International CGI '99*, 1999, S. 85-92.
- J. Döllner, K. Baumann, K. Hinrichs. Texturing Techniques for Terrain Visualization, *Proceedings IEEE Visualization 2000*, 2000, S. 227-234.
- J. Döllner, O. Kersting. Dynamic 3D Maps as Visual Interfaces for Spatio-Temporal Data. Proceedings of the 8, *ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACMGIS 2000)*, ACM Press, 2000, S. 115-120.
- L. De Floriani, P. Magillo, E. Puppo. Efficient Implementation of Multi-Triangulations. *Proceedings Visualization '98*, 1998, S. 43-50.
- S. Ervin. Landscape Visualization with Emaps, *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1993, S. 28-33.
- P. Haeberli, M. Segal. Texture Mapping as a Fundamental Drawing Primitive, *Proceedings of the Fourth Eurographics Workshop on Rendering*, 1993.
- C. Häberling. „Topographische 3D-Karten“: Konzeption und Gestaltungsvariablen, IfGI prints, Beiträge zum 3. GeoViSC Workshop, 2000, S. 59-75.
- H. Hoppe. Smooth View-Dependent Level-of-Detail Control and its Application to Terrain Rendering. *Proceedings Visualization '98*, 1998, S. 35-42.
- A. M. MacEachren, M. J. Kraak, E. Verbree. Cartographic Issues in the Design and Application of Geospatial Virtual Environments. *19th International Cartographic Conference*, 1999, S. 657-665.
- J. Ousterhout. *Tcl/Tk*. Addison-Wesley, 1994.
- R. Pajarola. Large Scale Terrain Visualization Using the Restricted Quadtree Triangulation. *Proceedings Visualization '98*, 1998, S. 19-26.
- A. Terribilini. Maps in transition: development of interactive vector-based topographic 3D-maps. *19th International Cartographic Conference*, 1999, S. 993-1001.

-
- A. Terribilini. Maps in transition: development of interactive vector-based topographic 3D-maps. 19th International Cartographic Conference, 1999, S. 993-1001.
- M. Woo, J. Neider, T. Davis. *OpenGL Programming Guide, 3rd Edition*. Addison-Wesley, 1999.