

LandExplorer – Ein System für interaktive 3D-Karten

Jürgen Döllner, Konstantin Baumann, Oliver Kersting
Hasso-Plattner-Institut an der Universität Potsdam

Zusammenfassung

Das Projekt *LandExplorer* befasst sich mit theoretischen und technischen Fragestellungen der Kommunikation raumbezogener Informationen. In diesem Kontext sind interaktive 3D-Karten ein zentrales Konstrukt, das zur Präsentation, Exploration, Analyse und Editierung von raumbezogenen Daten dient. Eine einzelne 3D-Karte setzt sich aus Kartenbauelementen zusammen, die visuelle, strukturelle und verhaltensgebende Aspekte spezifizieren. Durch Instanziierung, Komposition und Assoziation von Kartenbauelementen entstehen konkrete 3D-Karten. Diese Aufgaben werden von einem 3D-Karten-Editor unterstützt, der 3D-Karten als in sich abgeschlossene digitale Dokumente verwaltet. Zur Nutzung von 3D-Karten-Dokumenten steht ein 3D-Karten-Viewer bereit. Somit können 3D-Karten-Dokumente plattform- und anwendungsübergreifend weitergegeben werden. 3D-Karten des LandExplorer-Systems enthalten damit sowohl die raumbezogenen Daten als auch die Werkzeuge und Strategien zu deren Kommunikation.

1. 3D-Karten

Die Kommunikation raumbezogener Informationen stellt eine zentrale Aufgabe heutiger und zukünftiger Informationssysteme dar. Sie ist historisch Gegenstand der Kartographie, aber wegen ihres grundlegenden Charakters auch Thema in Disziplinen wie der Computergrafik, der Visualisierung und der Informationsvisualisierung.

In bezug auf 2D- und 3D-Karten legen Computergrafik und Visualisierung den Schwerpunkt meist auf Algorithmen, Datenstrukturen und Strategien zur visuellen Darstellung räumlicher Sachverhalte, wie z. B. der Multiresolutionsmodellierung digitaler Geländemodelle. In der Informationsvisualisierung hingegen findet sich eine große Zahl von Anwendungen der Kartenmetapher (z. B. Fabrikant 2000) jenseits klassischer geowissenschaftlicher Fragestellungen,

etwa zur Kommunikation komplexer, verräumlichter Informationen.

Das LandExplorer-Projekt befasst sich mit theoretischen und technischen Fragestellungen auf dem Gebiet der Computergrafik und Visualisierung in Hinblick auf die Kommunikation raumbezogener Informationen. Als Mittel werden dazu *interaktive 3D-Karten* eingesetzt, die als visuelle, interaktive Schnittstellen zur Kommunikation von raumbezogenen, aber auch verräumlichten Informationen dienen.

Die 3D-Karten des LandExplorer-Systems stellen Werkzeuge und Strategien zur Präsentation, Exploration, Analyse und Editierung von raumbezogenen Daten auf der Basis virtueller 3D-Kartenmodelle bereit. Eine *3D-Karte* definieren wir als kartenverwandte Darstellung, die raumbezogene Daten und Prozesse auf der Grundlage eines digitalen Geländemodells computergrafisch dreidimensional visualisiert, die Interaktion mit dem Dargestellten ermöglicht und den Aufbau und die Gestaltung der Karte dynamisch festlegt. Der Begriff „3D-Karte“ wurde gewählt, da mit ihm – im heutigen Sprachgebrauch auf dem Gebiet der Computergrafik und Visualisierung – intuitiv ein geometrisch projiziertes, dreidimensionales Kartenmodell verstanden wird. Arbeiten zu 3D-Karten finden sich u.a. bei Ervin (1993), bei Kraak (1994), bei Häberling (2000) in Form der topographischen 3D-Karte und bei Terrilini (1999) in Form des kartographischen 3D-Modells. MacEachren et al. (1999) hingegen diskutiert allgemeiner virtuelle Geo-Umgebungen, wobei auf kartenverwandte Darstellungen zurückgegriffen wird.

Folgende Überlegungen kennzeichnen den hier vorgestellten Ansatz: Eine 3D-Karte setzt sich aus *Kartenbauelementen* (1) zusammen, die Inhalte, Gestaltung, Dynamik und Interaktivität festlegen. Dieser Vorgang wird von einem *3D-Karten-Editor* (2) übernommen, der 3D-Karten als in sich abgeschlossene digitale Dokumente konstruiert. Ein *3D-Karten-Viewer* (3), entworfen als Komponente, ermöglicht die Nutzung von 3D-Karten in Anwendungen und Browsern sowie die



Abbildung 1: 3D-Karte mit Geländemodell, Landmarken und thematischen Geländetexturen.

Individualisierung von 3D-Karten innerhalb der bei der Editierung festgelegten Grenzen.

2. Funktionalität von 3D-Karten

Die Funktionalität, die das LandExplorer-System für 3D-Karten bereitstellt, ist so entworfen, dass sie für unterschiedliche Aufgaben und allgemein für raumbezogene und verräumlichte Daten einsetzbar ist. Wir gliedern die Funktionalität in die Schwerpunkte Präsentation, Exploration, Analyse und Editierung.

2.1 Präsentationsfunktionalität

Die Präsentationsfunktionalität ist für die Visualisierung raumbezogener Daten verantwortlich. Ihre Aufgabe ist es, grafische 3D-Darstellungen zu generieren. Dabei muss sowohl eine hohe Bildwiederholrate als auch eine hohe grafische Qualität erreicht werden.

Als zentrales visuelles Objekt verwendet jede 3D-Karte ein digitales 3D-Geländemodell, das in ein computergrafisches auflösungsvariantes Oberflächennetz überführt wird. Die Geländeoberfläche wird im Allgemeinen mit 2D-Texturen, z. B. Satellitenaufnahmen oder thematische Karten, belegt. Zusätzlich müssen 3D-Geländeobjekte, z. B. Brücken und Gebäude, in die Darstellung integriert werden (Abbildung 1).

2.2 Explorationsfunktionalität

Die Explorationsfunktionalität ist für das interaktive, zielgerichtete Erforschen von Karteninhalten verantwortlich. Ihre Aufgabe ist es, den Nutzer einer 3D-Karte an Karteninhalte heranzuführen, unterschiedliche Sichten auf Karteninhalte zu ermöglichen und den Kartenraum systematisch zu erschließen.

Zur Exploration einer 3D-Karte stehen unterschiedliche Werkzeuge bereit, wie z. B. Navigationswerkzeuge zur virtuellen Begehung und Befliegung von Gebieten, Orientierungshilfen wie z. B. Kompass und Überblickskarte (Abbildung 2) sowie Landmarken zur Aufzeichnung individueller Referenzpunkte.

2.3 Analysefunktionalität

Die Analysefunktionalität ist für die Durchführung von geometrischen wie auch anwendungsspezifischen Berechnungen zuständig. Eine Berechnung wird prozedural als Funktion implementiert, die Zugriff auf die in einer 3D-Karten enthaltenen Daten hat. Kennzeichen der Analysefunktionalität in 3D-Karten ist es, dass einerseits die Analyse visuell gesteuert werden kann, z. B. durch interaktive Festlegung eines Messbereichs, andererseits die Analyseergebnisse in die visuelle Darstellung integriert werden können (Abbildung 3).

Als allgemeine Werkzeuge zur Analyse der Geländemorphologie werden Operationen zur Abfrage von Geländedaten bereitgestellt. Dabei kann der Abfragebereich und die zu ermittelnden Daten spezifiziert werden.

Zur Analyse von Karteninhalten, z. B. themati-

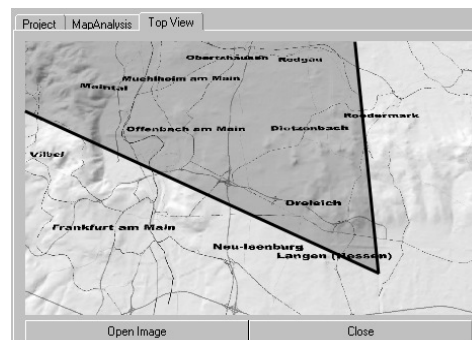


Abbildung 2: Übersichtskarte mit eingeblendetem Sichtvolumen.

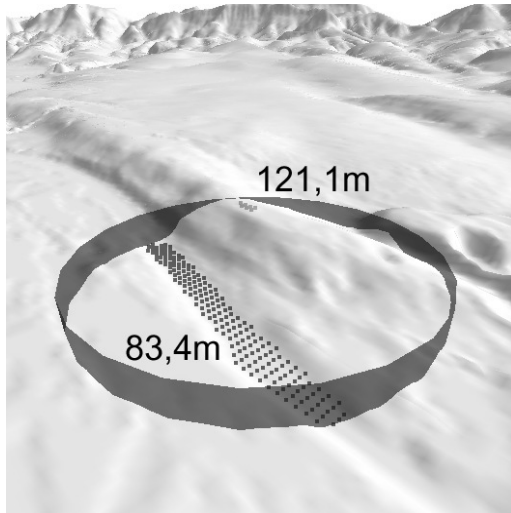


Abbildung 3: Höhenzylinder zur interaktiven Analyse der Geländeoberfläche.

scher Daten, müssen Analysefunktionen Rückgriff auf die Semantik dieser Daten nehmen können, da sie in der dargestellten, visuellen Form im Allgemeinen nicht mehr eindeutig oder vollständig enthalten ist. Deshalb wird die Analysefunktionalität direkt an die Datenverwaltung einer 3D-Karte gebunden.

2.4 Editierungsfunktionalität

Die Editierungsfunktionalität ist für die Erstellung und Modifikation raumbezogener Daten innerhalb einer 3D-Karte verantwortlich. Ihre Aufgabe ist es, vorhandene raumbezogene Daten zu editieren und neue, vom Karten-Editor gewünschte Daten zu erstellen.

Das LandExplorer-System verfügt über generische Editierungsfunktionen, die die Georeferenzierung und die Instanziierung von Kartenobjekten ermöglichen. Besonders relevant für die direkte Editierung sind vektorielle Daten wie z. B. Polygone, Linienzüge und Punkte; ihre Spezifikation wird in der 3D-Darstellung durch den Karten-Editor vorgenommen, z. B. durch Auftragen von Landnutzungsinformation mittels einer virtuellen „Sprühpistole“ oder durch Spezifikation der Eckpunkte eines Polygons (Abbildung 4).

3. Kartenbauelemente

Das LandExplorer-System stellt eine Sammlung von Bauelementen zur Konstruktion von 3D-

Karten zur Verfügung. Die generisch ausgerichteten Bauelementtypen erlauben den Entwicklern, aber auch Fachanwendern einzelne 3D-Karten durch Instanziierung, Komposition und Assoziation von Bauelementen zu erstellen ohne dabei das System selbst auf Programmiersprachenebene erweitern zu müssen (Döllner und Kersting 2000). Hierdurch wird die systematische und konstruktive Fertigung von 3D-Karten ermöglicht. Im Gegensatz dazu finden sich in heutigen allgemeinen 3D-Visualisierungs- und 3D-Grafiksystemen (z. B. Java3D oder VRML) größtenteils Konstrukte, die weder einen passenden Abstraktionsgrad noch eine effiziente, auf raumbezogene Daten ausgerichtete Implementierung besitzen.

Wir unterscheiden zwischen visuellen, strukturellen und verhaltengebenden Typen von Kartenbauelementen. Einen Eindruck vom Aufbau einer typischen 3D-Karte gibt Abbildung 5.

3.1 Visuelle Kartenbauelemente

Visuelle Kartenbauelemente sind geometrische georeferenzierte 2D- und 3D-Objekte. Ein visuelles Kartenbauelement verfügt über grafische Attribute, wie z. B. Farbe, Größe, Form und Orientierung. Spezialisierungen visueller Kartenbauelemente sind im Folgenden näher vorgestellt:

Auflösungsvariantes Geländemodell. Es ist zwingender Bestandteil jeder 3D-Karte und repräsentiert die Referenzoberfläche für alle weiteren visuellen Kartenbauelemente.

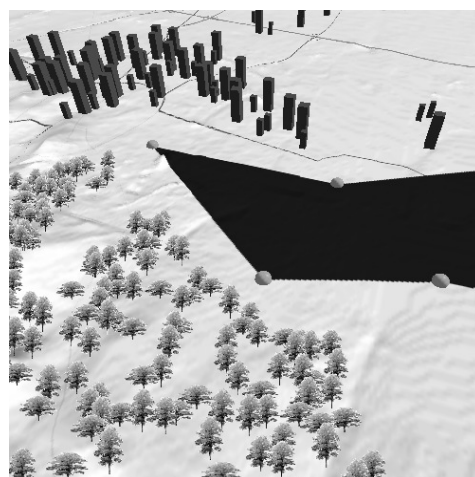


Abbildung 4: Interaktive Editierung unterschiedlicher Thematiken in der 3D-Ansicht.

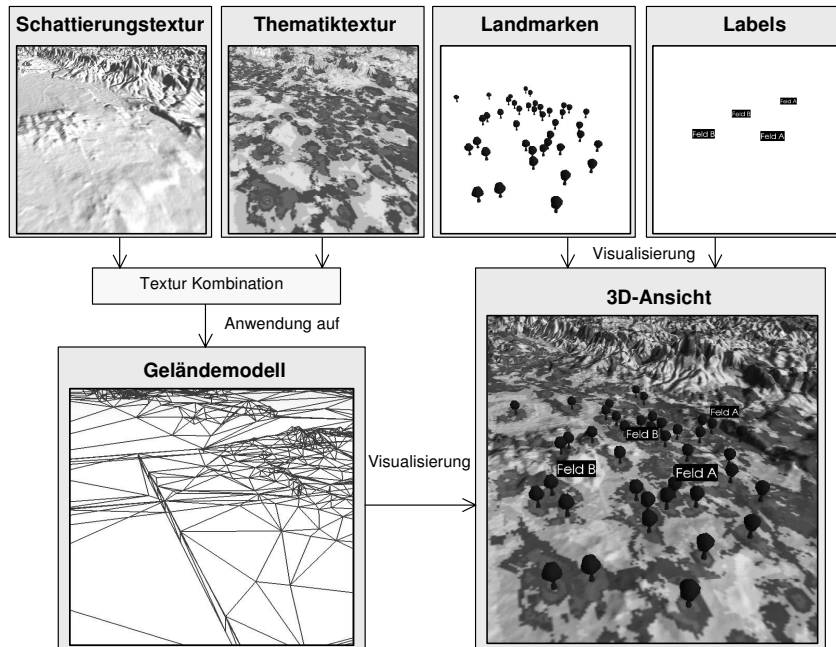


Abbildung 5: Konzeptioneller Aufbau der visuellen Kartenbauelemente am Beispiel einer konkreten 3D-Karte zur Planung von Funknetzen.

Geländetexturen. Sie repräsentieren 2D-Bilddaten, die auf die Geländeoberfläche projiziert werden. Mehrere Texturschichten können die gesamte Geländeoberfläche oder nur Teile davon überdecken; ihre Lage wird über Geo-Koordinaten festgelegt. Texturschichten werden in einer 3D-Kartenansicht visuell kombiniert.

Landmarken. Als georeferenzierte 2D- und 3D-Symbole dienen sie z. B. zur Markierung diskreter Geo-Objekte und Geo-Positionen, zum Aufzeigen von Wegen und Richtungen sowie zur Repräsentation thematischer Informationen.

Labels. Sie sind Texte, die über eine Geo-Position verfügen. Labels werden entweder parallel zur Sichtebene positioniert oder im 3D-Raum verankert, dabei aber automatisch zum Betrachter ausgerichtet (Billboarding-Technik).

3D-Objekte. Sie sind geometrische Objekte, die über eine Geo-Position verfügen. 3D-Objekte repräsentieren z. B. Gebäude, Brücken, Pipelines.

3.2 Auflösungsvariantes Geländemodell

Die auflösungsvariante Modellierung (*multiresolution modeling*) der Geländeoberfläche ist not-

wendig, um die Darstellung der Geländeoberfläche in Echtzeit zu gewährleisten; eine Ad-hoc-Visualisierung scheidet im Allgemeinen aus, da die geometrische Komplexität des Ursprungsdatensatzes zu hoch wäre, um direkt von der Grafik-Hardware verarbeitet zu werden. Mit sichtabhängiger, auflösungsvarianter Modellierung können z. B. Szenenbereiche, die vom Kamerastandpunkt weit entfernt sind und somit nur einen kleinen Bildbereich belegen, in gröberer Auflösung, hingegen Bereiche nahe der Kamera in höherer Auflösung gezeichnet werden (*view-dependent level-of-detail*); ebenso werden Bereiche außerhalb des Kamerasisichtbereichs entfernt (*view-frustum culling*).

Für die Multiresolutionsmodellierung stehen eine Vielzahl von Verfahren bereit, z. B. Progressive Meshes von Hoppe (1998) für allgemeine 3D-Netze. Spezialisierte Verfahren für Geländeoberflächen arbeiten entweder auf der Basis von regulären Gitternetzen oder TINs. Beispiele hierfür sind die Multitriangulation von De Floriani et al. (1998), die Restricted Quad-Tree Triangulation von Pajarola (1998) und der Algorithmus von Lindstrom (2001). Die genannten Verfahren konzentrieren sich auf das Management der 3D-

Geometrie; ein Management zugeordneter Texturdaten wird nicht unterstützt.

Das LandExplorer-System verwendet als Multiresolutionsverfahren den *Approximation-Tree* (Baumann et al. 1999). Es erlaubt eine präzise Repräsentation der Geländemorphologie durch die Kombination von Geländedaten in Form regulärer Gitter mit Geländedaten in Form von TINs. Dadurch kann eine Geländeoberfläche grob durch ein reguläres Gitter und geländemorphologisch wichtige Bereiche exakt durch TINs modelliert werden. Dieses Multiresolutionsverfahren kann gegen ein Standardverfahren, z. B. für Grid-Daten, ausgetauscht werden, wenn hybrid-strukturierte Geländeoberflächen nicht notwendig sind.

3.3 Auflösungsvariante Geländetexturen

Eine Geländetextur ist ein Kartenbauelement, das Bilddaten besitzt und georeferenziert ist. Weitere Attribute spezifizieren die Bildoperationen, die bei der Projektion auf die Geländeoberfläche Anwendung finden.

Texturierung als grundlegendes computergrafisches Verfahren ermöglicht die visuell komplexe Gestaltung computergrafischer Primitive (Haeberli und Segal 1993). Texturierung dient der Projektion von 2D-Bilddaten auf 3D-Oberflächen; 3D-Texturen finden Anwendung insbesondere bei Volumendarstellungen. Darüber hinaus kann Texturierung zur Simulation von Beleuchtungsphänomenen (z. B. *Environment-Mapping* und *Shadow-Mapping*) und zur Modellierung von Oberflächenfeinstrukturen (*Bump-Mapping*) eingesetzt werden (Heidrich 1999); Bilder nahe am Photorealismus sind damit in Echtzeit möglich. Als technische Ausgangsbasis dient u. a. *Multitexturing*, das mehrere Texturen simultan unter Beachtung von Verknüpfungsoperationen in einem Rendering-Durchgang auf ein Primitiv anzuwenden erlaubt (Woo et al. 1999).

Geländetexturierung. Im LandExplorer-System können mit Geländetexturen visuell komplexe und dynamische 3D-Karten gestaltet werden. Hierzu lassen sich einzelne Thematiken als Rasterdaten (z. B. Landnutzung, Bebauung, Bewuchs etc.) durch 2D-Geländetexturen repräsentieren. Durch Konfiguration der Bildoperationen (z. B. Blending oder Modulation) und mit 2D-Hilfsexturen (z. B. Transparenz- und Helligkeitsexturen) können diese Geländetexturen im Bild-

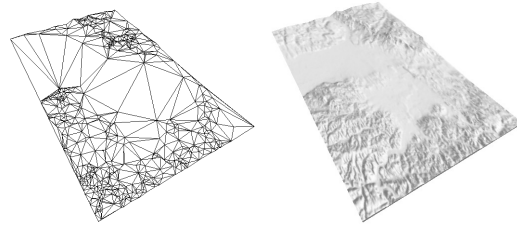


Abbildung 6: Das LOD-Geländemodell erreicht mit Schattierungstextur trotz einfacher Geometrie (links) hohe visuelle Qualität (rechts).

raum kombiniert und auf die Geländeoberfläche projiziert werden.

Analog zu Geländemodellen werden im LandExplorer-System Texturdaten auflösungsvariant modelliert, um Texturen beliebiger Größe und in größerer Anzahl verarbeiten zu können. Hierzu wurde der *Texture-Tree*, ein Multiresolutionsmodell für 2D-Geländetexturen, implementiert. Mehrere *Texture-Trees* lassen sich mit einem *Approximation-Tree* assoziieren und mit *Multitexturing* effizient rendern (Döllner et al. 2000). Der *Texture-Tree* übernimmt das Nachladen und die *Level-of-Detail*-Generierung von Texturdaten in einem separaten Thread, um diese Vorgänge vom interaktiven Rendering zu entkoppeln. Die Multiresolutionsmodellierung der Geländegeometrie muss mit der Geländetexturen kooperieren, da für jeden Oberflächenbereich die Auswahl einer Texturauflösungsstufe von der ausgewählten Geometrieauflösungsstufe abhängt; sie wird über eine benutzerdefinierte geometrische und visuelle Fehlerschranke gesteuert.

Schattierungstexturen. Klassisch entsteht die Schattierung eines Geländemodells dadurch, dass an den Eckpunkten des Geländenetzes Beleuchtungsintensitäten errechnet werden (*Phong-Beleuchtungsmodell*), die über die Polygonfläche interpoliert werden (*Gouraud-Schattierung*). Kritisch ist hierbei, dass die Beleuchtung von der Geometrie (konkret: von den Oberflächennormalen an den Eckpunkten) abhängt. Der Benutzer nimmt diese Abhängigkeit bei Änderungen der polygonalen Struktur der Geländeoberfläche störend über die Veränderungen in der Schattierung wahr. Die Änderung der Geländeoberfläche ist bei auflösungsvarianten Geländemodellen aber zwangsläufig der Fall ist.

Im LandExplorer-System wird die Schattierung einer Geländeoberfläche für das Gelände-

modell in höchster Auflösung als Geländetextur automatisiert vorberechnet und auf die auflösungsvariante Geländeoberfläche projiziert. Dadurch steht (1) auch einem gering aufgelösten 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 Schattierung 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 vermindert werden (Abbildung 6).

3.4 Strukturelle Kartenbauelemente

Strukturelle Kartenbauelemente klassifizieren und organisieren individuelle Sammlungen von Kartenbauelementen. Sie werden eingesetzt, um die Bauelemente einer einzelnen 3D-Karte zu ordnen und um Beziehungen zwischen ihnen auszudrücken; sie erlauben dem Karten-Editor, große Sammlungen systematisch zu verwalten.

Kategorien sind Kartenbauelemente, die anderen Kartenbauelementen zusätzliche Semantik zuzuweisen. Ein Kartenbauelement kann zu mehreren Kategorien gehören; eine Kategorie kann

homogen oder inhomogen sein, d.h. nur mit Kartenbauelementen eines Typs oder beliebigen Typs assoziiert werden.

Zum Beispiel kann die homogene Kategorie „Wegweiser“ ausschließlich Landmarken enthalten. Die inhomogene Kategorie „Planungsvorschlag-1“ kann visuelle Kartenbauelemente zusammen fassen, die zu einer bestimmten Planungsvariante gehören.

Kategoriegesteuert können Kartenbauelemente selektiert, aktiviert, deaktiviert oder in anderer Weise ausgewertet werden.

Gruppen sind Kartenbauelemente, die andere Kartenbauelemente hierarchisch ordnen. Eine Gruppe besteht aus einer Menge von typhomogenen oder typinhomogenen Kartenbauelementen. Gruppen können Hierarchien bilden, d. h. Gruppen können Untergruppen enthalten. Ein Kartenbauelement kann grundsätzlich nur einer Gruppe angehören.

Zum Beispiel kann die Gruppe „Straßen“ alle Kartenbauelemente, z. B. Vektordaten und 3D-Objekte, enthalten, die Straßen repräsentieren. Untergruppen für Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen können eine weitere Unterteilung darstellen.

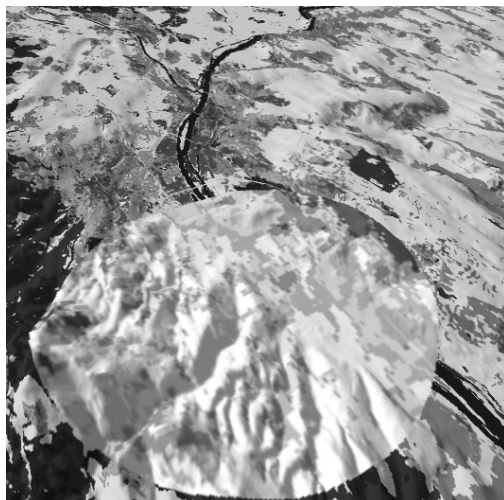


Abbildung 7: Verwendung von Filter-Linsen zur selektiven Darstellung von Thematiken (links) und Luminanz-Linse zur Unterstützung der Wegfindung (rechts).

3.5 Verhaltengebende Kartenbauelemente

Verhaltengebende Kartenbauelemente definieren die Interaktivität und Dynamik von visuellen Kartenbauelementen. Sie reagieren auf Benutzer- und Systemereignisse sowie auf Zustandsänderungen in Kartenbauelementen durch den Aufruf anwendungsspezifischer Aktionen.

Das LandExplorer-System modelliert das Verhalten von Kartenbauelementen separat, um einem Kartenbauelement ein von seiner Klasse unabhängiges Verhalten zuordnen zu können. Aus diesem Grund wird insbesondere das Verhalten von visuellen und strukturellen Kartenbauelementen nicht in ihrer Klasse kodiert, sondern es wird durch die Assoziation mit verhaltengebenden Kartenbauelementen festgelegt.

Ereignistabellen. Eine Ereignistabelle assoziiert Ereignisse mit Aktionen, die ausgeführt werden, falls das mit ihnen assoziierte Ereignis eintritt. Als Ereignistypen werden Geräteereignisse (z. B. Mausklick, Mausbewegung, Tastatureingaben), Zeitfortschritt und Statusänderungen in Kartenbauelementen (z. B. Änderung des Sichtbarkeitsstatus, der Entfernung, der Objektattribute) unterstützt. Aktionen sind anwendungsspezifische Skripte, die von der integrierten Skriptingsprache Tcl (Ousterhout 1998) interpretiert werden – der Karten-Editor bekommt hiermit Werkzeug zur Programmierung von 3D-Karten zur Laufzeit.

Unterschiedliche Kartenbauelemente können eine gemeinsame Ereignistabelle besitzen, wodurch Kartenbauelemente unterschiedlicher Klassen mit einheitlichem Verhalten ausgestattet werden können. Weiter lässt sich so Verhalten als

wiederverwendbares Bauelement darstellen.

4. Visualisierungsstrategien

In diesen Abschnitt werden weiterführende Kartenbauelemente vorgestellt, die einzelne Visualisierungsstrategien für die Kommunikation raumbezogener Information umsetzen.

4.1 Geländetextur-Linse

Geländetextur-Linsen regeln die Sichtbarkeit und Kombination von Geländetexturen in einer 3D-Karte. So können Informationen einzelner „Informationsschichten“ dynamisch fokussiert werden. Geländetextur-Linsen ermöglichen Strategien zur Reduktion der visuellen und kognitiven Komplexität des Karteninhalts. Zwei Varianten von Linsen stehen bereit.

Luminanz-Linse. Sie modifiziert die Helligkeit einer Geländetextur. Durch die Animation der Luminanz-Linse können z. B. Anwender durch 3D-Karten geleitet werden, etwa zur Wegklärung (Abbildung 7 rechts).

Filter-Linse. Sie schränkt die Sichtbarkeit von Geländetexturen ein. Sie kann zur selektiven Darstellung mehrerer Geländetexturen verwendet werden, z. B. indem eine Geländetextur innerhalb der Linse aus- bzw. eingeblendet wird (Abbildung 7 links).

4.2 Geländetexturen-Sequenz

Eine Sequenz von Geländetexturen wird als eigenständiges Kartenbauelement unterstützt. Sie kann zum Beispiel zur Repräsentation von zeitvarianten Rasterdaten eingesetzt werden: Jede Geländetextur der Sequenz spezifiziert in diesem Fall einen Key-Frame einer Animation. Während

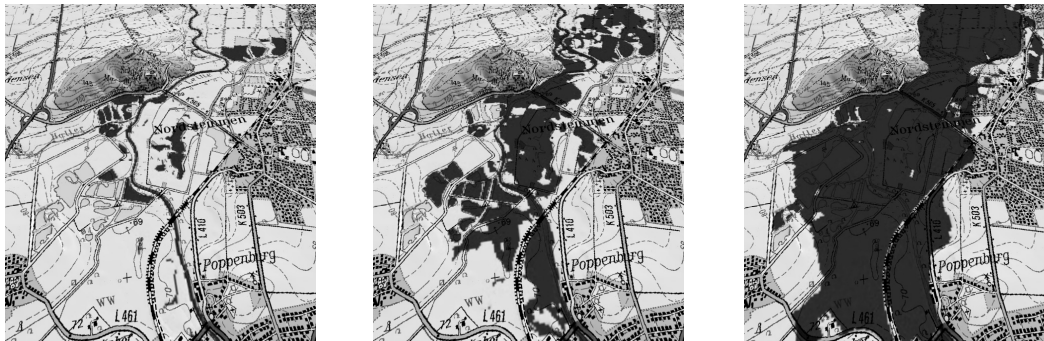


Abbildung 8: Visualisierung dynamischer Daten mittels Geländetexturen-Sequenz.



Abbildung 9: Geländetexturschichten, jeweils in Abhängigkeit der Kameradistanz verblendet.

der Animation werden zwei aufeinanderfolgende Geländetexturen mit gegenläufigen Gewichtungen interpoliert. Die Animation ist selbst für hochauflösende Geländetexturen möglich, weil die Texturen im Bildraum während des Renderings kombiniert werden und somit die rechenaufwändige Berechnung von Zwischenbildern entfällt. Die Kombination übernimmt vollständig die Computergrafik-Hardware.

Abbildung 8 zeigt die Überflutung in einer Landschaft; die Wasserausbreitung wurde zu diskreten Zeitpunkten erfasst und jeweils als Geländetextur dargestellt.

4.3 Distanzabhängige Geländetextur

Die Qualität, mit der eine Geländetextur auf die Geländeoberfläche aufgetragen wird, kann in Abhängigkeit von der Kameradistanz erfolgen. Die Tiefe im 2D-Bild lässt sich so als Maß für die Detaillierung nutzen.

Insbesondere nützt dieses Kartenbauelement dann, wenn Geländetexturen zu einer Thematik in unterschiedlicher Auflösung vorliegen – die am höchsten aufgelöste Geländetextur ist visuell um so stärker gewichtet, je näher die Geländeoberfläche der Kamera ist; für die niedrigste Auflösung wird die inverse Einstellung verwendet (Abbildung 9). Derartige Geländetexturen sind im Allgemeinen unterschiedlich kartographisch generalisiert; die Überblendung stellt zudem einen glatten visuellen Übergang sicher. Analog zur

Geländetextur-Sequenz werden auch hier sämtliche Texturen im Bildraum kombiniert.

4.4 Vektorgrafik-Geländetextur

Eine Vektorgrafik-Geländetextur wird durch analytisch vorliegende 2D-Primitive wie z. B. Punkte, Linien und Polygone sowie durch mit ihnen assoziierte grafische Attribute wie Linienstärke oder Strichfarbe spezifiziert. Das LandExplorer-System nutzt hierzu den Szenengraph, der für die Spezifikation von 3D-Szenen verwendet wird. Damit steht die gesamte grafische Funktionalität des Renderingsystems für Vektorgrafiken zur Verfügung, jedoch mit dem Schwerpunkt 2D.

Das LandExplorer-System rasterisiert die analytisch gegebene Szenerie im Hintergrund in eine 2D-Textur, die dann unmittelbar für das Rendering der Geländeoberfläche zur Verfügung steht. Bemerkenswert ist, dass mit heutiger Computergrafik-Hardware das Rasterisieren der Texturen in Echtzeit und für jedes berechnete Bild erneut vorgenommen werden kann. Technisch geschieht dies mit dem Pixel-Buffer von OpenGL.

Die Anwendungen von Vektorgrafik-Geländetexturen sind vielfältig (Kersting und Döllner 2002): Dynamische Vektordaten lassen sich in Echtzeit darstellen; nur die Elemente des Szenengraphen müssen dazu aktualisiert werden. Ebenso lassen sich Vektordaten auflösungsvariant darstellen, indem die Texturgröße in Abhängigkeit von der Kameradistanz gewählt wird. Zusätzlich können im Szenengraph der Geländetextur

grafische Varianten für die einzelnen Auflösungsstufen angegeben werden.

Vektorgrafik-Geländetexturen bilden den Ausgangspunkt für die Editierung raumbezogener Daten: Die Inhalte einer solchen Textur, dargestellt durch einen zugeordneten Szenengraph, lassen sich interaktiv verändern, indem Elemente in den Szenengraph eingetragen, modifiziert oder herausgenommen werden. Zugleich kann ermittelt werden, worauf ein Nutzer im Bild zeigt, da die Suchanfrage vom Szenengraph der Textur beantwortet werden kann (*picking*). Die Semantik der visuellen Elemente in einer Vektorgrafik-Geländetextur bleibt dadurch erhalten. Interaktive Editierungsverfahren, wie z. B. Eingabe von Polygonen, lassen sich auf dieser Grundlage implementieren.

5. Kartenfertigung und -nutzung

Im LandExplorer-System wird zwischen der Karten-Fertigung und der Karten-Nutzung unterschieden, so dass das System konzeptionell in zwei Komponenten gegliedert ist (Abb. 10):

Der *3D-Karten-Editor* unterstützt die Auswahl, Instanziierung, Komposition und Assoziation von Kartenbauelementen für eine einzelne 3D-Karte. Jedes Kartenbauelement wird zusätzlich in Hinblick auf die Kartenweitergabe als öffentlich oder privat gekennzeichnet.

Der *3D-Karten-Viewer* unterstützt die Anzeige und Nutzung gefertigter 3D-Karten. Nur öffentliche Kartenbauelemente sind verfügbar; eine nachträgliche Editierung der 3D-Karte ist nicht möglich. Die Anwendung des Viewers setzt nicht die Präsenz des Editors voraus. Durch diese Entkopplung können 3D-Karten verteilt und auf unterschiedlichen Zielsystemen und Anwendungen bereitgestellt werden.

5.1 3D-Karten-Dokumente

Eine 3D-Karte wird als digitales Dokument verwaltet, das mittels Serialisierung aller enthaltener Kartenbauelementen abgespeichert wird – ein 3D-Karten-Dokument ist somit in sich abgeschlossen. Die Serialisierung verwendet LandExplorer-eigene komprimierende Formate für Geländemodelle und Geländetexturen zur Reduktion des Platzbedarfs. Eine Verschlüsselung einzelner Elemente ist in Zukunft möglich, um einen optimalen Schutz der in einer 3D-Karte enthaltenen Daten zu gewährleisten.

5.2 3D-Karten-Viewer

Eine 3D-Karte manifestiert sich in einem 3D-Karten-Viewer. Als visuelles Kartenbauelement ist diese Komponente in das User-Interface einer Anwendung (bzw. als Plug-In in einem Browser) integriert.

In einer 3D-Karte können auch mehrere 3D-Karten-Viewer enthalten sein. Zum Beispiel besitzt eine 3D-Karte stets eine Hauptansicht mit einer perspektivischen Projektion, die durch eine Überblicksansicht mit orthogonaler Projektion ergänzt werden kann (Abbildung 2), die die Navigation und Orientierung in der Hauptansicht vereinfacht.

Technisch ist ein 3D-Karten-Viewer ein Widget (d.h. User-Interface-Komponente), das eine Zeichenfläche für das 3D-Renderingsystem bereitstellt. Das LandExplorer-System enthält Widgets für eine Reihe von User-Interface-Bibliotheken. Dieser Entwurf stellt sicher, dass 3D-Karten als „black boxes“ nahtlos in das User-Interface einer Anwendung eingebaut werden können. Die LandExplorer-Funktionalität wird in diesen Widgets gekapselt und mit einer kompakten Programmierschnittstelle zur Verfügung gestellt.

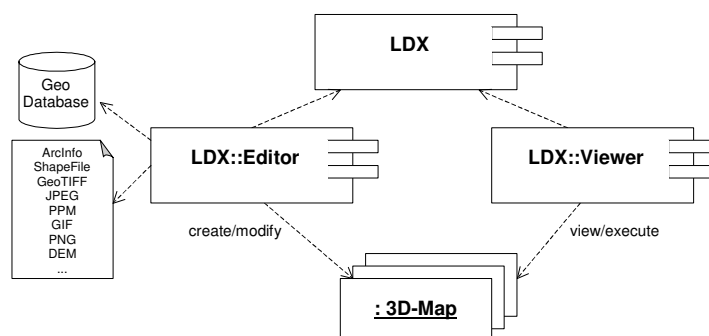


Abbildung 10: Komponentendiagramm des LandExplorer-Systems.

6. Ausblick

Das LandExplorer-System stellt ein Konzept für interaktive 3D-Karten und ihre systematische Konstruktion bereit. Interaktive 3D-Karten dienen als zielgruppenorientierte und aufgabenorientierte Werkzeuge für die Präsentation, Exploration, Analyse und Editierung raumbezogener Daten. Das Konzept basiert auf einer Sammlung generischer, wiederverwendbarer Kartenbauelemente. Als User-Interface-Komponenten lassen sich 3D-Karten von LandExplorer direkt in Anwendungen integrieren. Die leistungsfähigen computergrafischen Verfahren nutzen heutige Computergrafik-Hardware optimal aus.

In einem ersten großen Anwendungsfall wird das LandExplorer-System derzeit in das Funknetzplanungssystem Pegasos-3D von T-mobile als zentrale Visualisierungskomponente für Funknetzplanung integriert (Abbildung 11). Darüber hinaus wird das LandExplorer-System zukünftig als Desktop-Anwendung und Browser-Plug-In zur Verfügung stehen.

Die derzeitigen Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf Visualisierungsverfahren für 3D-Stadtmodelle, dynamische Vektordaten und die interaktive Editierung raumbezogener Daten in 3D.

7. Literatur

- Baumann, K., Döllner, J., Hinrichs, K. (2000) Integrated Multiresolution Geometry and Texture Models for Terrain Visualization. *Proceedings of the Joint EUROGRAPHICS and IEEE TCGV Symposium on Visualization*, 157-166
- De Florian, L., Magillo, P., Puppo, E. (1998) Efficient Implementation of Multi-Triangulations. *Proceedings IEEE Visualization '98*, 43-50
- Döllner, J., Baumann, K., Hinrichs, K. (2000) Texturing Techniques for Terrain Visualization. *Proceedings IEEE Visualization 2000*, 227-234
- Döllner, J., Kersting, O. (2000) Dynamic 3D Maps as Visual Interfaces for Spatio-Temporal Data. *8th International Symposium of ACM GIS*, 115-120.
- Ervin, S. (1993) Landscape Visualization with Emaps. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 13(2):28-33
- Fabrikant, S. I. (2000) Spatialized Browsing in Large Data Archives. *Transactions in GIS*, 4(1):65-78
- Haeberli, P., Segal, M. (1993): Texture Mapping as a Fundamental Drawing Primitive. *Proceedings of the 4. Eurographics Workshop on Rendering*, 259-266

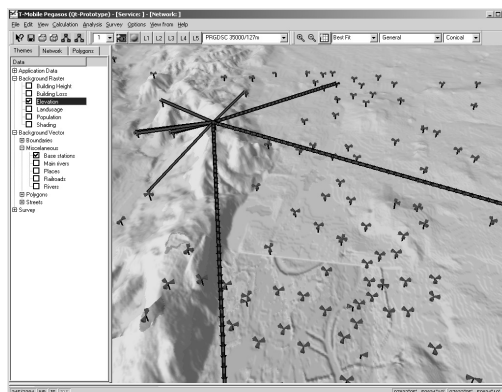


Abbildung 11: Prototypische Anwendung zur Funknetzplanung basierend auf dem LandExplorer-System

- Häberling, C. (1999) Symbolization in Topographic 3D Maps: Conceptual Aspects for User-Oriented Design. *19th International Cartographic Conference*, 1037-1044
- Heidrich, W. (1999) *High-quality shading and lighting for hardware-accelerated rendering*. Ph. D. Thesis, Universität Erlangen
- Hoppe, H. (1998) Smooth View-Dependent Level-of-Detail Control and its Application to Terrain Rendering. *Proceedings IEEE Visualization '98*, 35-42
- Kersting, O., Döllner, J. (2002) Interactive 3D Visualization of Vector Data in GIS. *10th International Symposium of ACM GIS*, im Druck.
- Kraak, M.J. (1994) Interactive Modelling Environment for Three-dimensional Maps: Functionality and Interface Issues. In: A. M. MacEachren, D. R. F. Taylor (Eds.), *Visualization in Modern Cartography*, Pergamon, 269-285
- Lindstrom, P., Pascucci, V. (2001) Visualization of Large Terrains Made Easy. *Proceedings of IEEE Visualization 2001*, 363-370.
- MacEachren, A.M., Kraak, M.J., Verbree, E. (1999) Cartographic Issues in the Design and Application of Geospatial Virtual Environments. *19th International Cartographic Conference*, 657-665
- Ousterhout, J. (1998) Scripting: Higher Level Programming for the 21st Century. *IEEE Computer*, 31(3):23-30
- Pajarola, R. (1998) Large Scale Terrain Visualization Using the Restricted Quadtree Triangulation. *Proceedings IEEE Visualization '98*, 19-26
- Terribilini, A. (1999) Maps in transition: development of interactive vector-based topographic 3D-maps. *19th International Cartographic Conference*, 993-1001
- Woo, M., Neider, J., Davis, T., Shreiner, D. (1999) *OpenGL Programming Guide*. 3rd Ed, Addison-Wesley