

Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen kartographischen Modellen

Wolf-Dieter Rase

Summary

In recent years new technical solutions were developed for the fast and inexpensive production of mechanical prototypes using a numerical model and computer-controlled devices. The prototypes serve mainly to judge on the form and appearance of parts to be built later in high volume with conventional industrial tools. Rapid prototyping is considerably less expensive and much faster than traditional techniques, such as milling and cutting. Rapid prototyping can also be used to build physical models of three-dimensional GIS objects. Examples are 3D models of the earth's surface, or continuous surfaces interpolated from demographic and socio-economic data. The technical solutions suitable for rapid prototyping of 3D models are described in general. The experiences made in the design and production of some physical models of surfaces based on point-based and polygon-based data are reported.

1 Von 2D nach 3D

Manche Zielgruppen für kartographische Produkte in der großräumigen Planung, insbesondere Entscheidungsträger in Verwaltung und Politik, haben keine Ausbildung und keine Erfahrung in der Nutzung thematischer Karten. Die Dekodierung der visuellen Variablen in der Karte und die mentale Rekonstruktion der kartographischen Botschaft, der dritten Dimension über der Bezugsebene, bereitet Schwierigkeiten, selbst mit Hilfe einer Legende. Vor allem bei komplexen Karten muss für die Dekodierung viel Zeit aufgewendet werden, die bei Entscheidungsträgern nur im begrenzten Umfang zur Verfügung steht. Die Gefahr ist groß, dass die Information in der Karte nicht korrekt, unvollständig oder überhaupt nicht beim Adressaten ankommt und die Karte damit ihren Zweck verfehlt. Die Kartenautoren und -hersteller müssen diesen Tatsachen Rechnung tragen und den Kartennutzern ein Stück entgegenkommen.

Jeder Mensch hat im Laufe seines Lebens gelernt, Tiefen-Indikatoren (*depth cues*) in einem Bild zu erfassen und aus einem zweidimensionalen Bild intuitiv ein mentales Bild der dreidimensionalen Szene abzuleiten. Die lebenslange Erfahrung in der Erfassung von 3D-Szenen soll genutzt werden, um einen kartographischen Inhalt zu transportieren. Der Umweg über die Kodierung der dritten Dimension durch visuelle Variablen und deren Dekodierung kann entfallen. Redundanz erleichtert aber die Informationsverarbeitung. Deshalb ist es sinnvoll, in einer 3D-Darstellung z.B. die Kodierung der Höhenstufen durch die Variablen Farbe und Helligkeit beizubehalten.

In Karten von Oberflächen ist die simulierte Beleuchtung aus Nordwesten schon eine gute Hilfe, um die Formen besser zu erkennen. Die nächste Stufe ist eine perspektivische Zeichnung der Oberfläche, eine schiefwinklige Projektion mit (fast) beliebigem Augenpunkt. Die Gestalt der Oberfläche, d.h. die Verteilung der lokalen Maxima und Minima über der Bezugsfläche ist deutlich zu sehen. Allerdings werden meistens Teile des Bildes verdeckt. Aufgrund der perspektivischen Verzerrung ist der Vergleich der Höhen schwierig. Die einfache Bestimmung von Entfernungen durch Anlegen eines Lineals und Maßstabsumrechnung ist nicht möglich, zumindest auf dem Medium Papier. In einer interaktiven Umgebung hingegen lässt sich, um verdeckte Teile sichtbar zu machen, der Augenpunkt einfach verändern. Höhenunterschiede und Entfernungen können mit Programmunterstützung gemessen werden, z.B. mit Hilfe von Markern, die mit einem interaktiven Zeigegerät (Maus) gesetzt werden.

Ein weiterer Schritt zur Verbesserung des dreidimensionalen Eindrucks sind die Stereogramme. Bei stereoskopischen Verfahren werden beiden Augen unterschiedliche Bilder zugeführt, die vom Gehirn als 3D-Szene interpretiert werden. Technische Verfahren reichen von einfachen Anaglyphen, die mit einer zweifarbigen Brille betrachtet werden, über Lentikular-Bilder mit einer Halbzylinder-Folie (GRÜNDEMANN et al. 2006), Lentikular- und Barrieren-Displays bis zu „Datenhelmen“. Jedes Auge blickt auf ein eigenes Miniatur-Display mit einem Bild, in dem Ort und Blickrichtung des Helmes eingerechnet sind. Das Gehirn des Betrachters erzeugt aus den beiden Bildern ein Stereogramm. Damit die Geometrie der Bilder korrekt berechnet werden kann, muss die Position und Orientierung des Helmes in Echtzeit verfolgt werden, möglichst mit der gleichen Taktrate wie die Bildschirmerneuerung. Solche Datenhelme (HWD, *head-worn displays*) sind in der Regel Teil eines interaktiven Systems, mit dem eine scheinbare (virtuelle) Realität in Echtzeit erzeugt und auf das mittels eines 3D-Zeigegerätes (3D-Maus) eingewirkt werden kann.

Die kurze Beschreibung zeigt schon, dass der technische Aufwand mit der Qualität der Darstellung immer größer wird, von zweifarbigen Brillen über Lentikularfolien und Stereoskope bis zu interaktiven IT-Umgebungen mit hohen Anforderungen an die technische Ausstattung und die Leistungsfähigkeit der verwendeten Computersysteme.

2 3D-Modelle in Architektur und Städtebau

Techniken der Virtuellen Realität (VR) werden seit einigen Jahren in Architektur, Städtebau und Raumplanung eingesetzt. Architekten oder Raumplaner können Gebäude oder Landschaften betrachten, die in der Wirklichkeit noch nicht existieren, sondern lediglich als numerisches Modell in einem Informationssystem gespeichert sind. Die Techniken reichen von fotorealistischen Bildern der virtuellen Objekte über Stereobilder bis simulierten Überflügen oder Durchgängen durch ein Gebäude – vielleicht noch bei verschiedenen Tageszeiten und Lichtverhältnissen. Die zeitliche Dimension wird durch eine Animationssequenz realisiert, entweder vorproduziert und zeitversetzt vorgeführt oder in Echtzeit mit interaktiver Steuerungsmöglichkeit. Mit einer Kamera kann – sogar in Echtzeit – die reale Umgebung aufgenommen und in das Bild passgenau virtuelle Gegenstände eingeblendet werden, z.B. geplante Gebäude, Bau-Ensembles oder Brücken (*mixed reality*; BRENNER u. PAELKE 2006).

Bei Architektur-Wettbewerben werden meistens reale Modelle der eingereichten Entwürfe gefordert. Eigentlich sind die aufwendigen und kostspieligen Modelle überflüssig, denn mit VR-Techniken sind mehr visuelle Informationen verfügbar, nicht nur die Ansicht von außen auf das Gebäude, sondern auch die Darstellung der Innenräume unter verschiedenen Lichtverhältnissen, die wechselnden Perspektiven beim Gang durch das Bauwerk und der Blick von innen nach außen auf die Umgebung. Man kann nur spekulieren, warum sich angesichts der Möglichkeiten der VR die realen Modelle immer noch so großer Beliebtheit erfreuen. In Relation zu den Baukosten, um die es bei Architekturwettbewerben üblicherweise geht, sind die zusätzlichen Kosten für den Bau der Modelle nicht sehr hoch. Dagegen ist der Aufwand für die VR-Technik noch sehr groß, wenn mehrere Personen gleichzeitig das Objekt betrachten wollen. Insbesondere Animationen in Echtzeit erfordern leistungsfähige Computersysteme. Wahrscheinlich haben Architekten auch eine besondere Präferenz für handwerklich geschaffene Gegenstände. Wichtig ist sicher auch das haptische Erlebnis, die Möglichkeit des Anfassens, des *Begreifens* im wörtlichen und übertragenen Sinn.

Hingegen werden reale Modelle von dreidimensionalen GIS-Objekten, z.B. Oberflächen, so gut wie nie realisiert. Das Fehlen einer Tradition für den Modellbau, wie es sie in der Architektur gibt, mag ein Grund sein, ein anderer die Kosten für das Modell im Vergleich zu den Kosten der räumlichen Analyse und der Visualisierung in Karten. Wenn das physische Modell eines Ge-

bäudes manchmal Vorteile gegenüber den Techniken der VR hat, ist die Frage berechtigt, ob reale Modelle von GIS-Objekten nicht auch zu einer besseren Visualisierung der Information und als Folge davon zu erweiterten Einsichten führen können. Insbesondere bei Diskussionen und Entscheidungsfindungen in einer Gruppe haben 3D-Modelle einige Vorteile, z.B. die Option der verbalen und nichtverbalen Interaktion zwischen den Gruppenmitgliedern. Bei einer Präsentation mit einem Projektor auf einen Bildschirm oder bei Nutzung von VR-Systemen sind kaum Blickkontakte als Voraussetzung für eine persönliche Interaktion möglich (FAULKNER 2006). Das ist wohl auch ein Grund, warum bei Architekturwettbewerben die Gebäudemodelle verlangt werden.

3 Rapid-Prototyping-Verfahren zur Herstellung von 3D-Modellen

Ein Weg zur kostengünstigen Erzeugung realer Modelle aus Geo-Informationssystemen sind die in den letzten Jahren entwickelten Techniken des *rapid prototyping* (COOPER 2001, KREMPL 2006). Der Begriff *rapid prototyping* bedeutet in diesem Zusammenhang die schnelle und preiswerte Fertigung von Teilen oder Werkstücken, die bis zu diesem Zeitpunkt nur als numerisches Modell in einem Computersystem existieren. (Der gleiche Begriff wird übrigens auch in der Informatik verwendet, als Sammelbezeichnung für Verfahren und Techniken, mit denen schnell und kostengünstig Computerprogramme erstellt werden, etwa zum Testen eines Verfahrens oder eines Algorithmus.) Die Prototypen von Werkstücken dienen in der Regel zur Beurteilung der Form, manchmal auch der mechanischen Funktion. Sie müssen nicht unbedingt aus dem Material bestehen, das für den eigentlichen Verwendungszweck vorgesehen ist. Für die Beurteilung eines Lenkrad-Designs genügt zum Beispiel ein Material geringerer Festigkeit, weil der Prototyp keine so extremen Kräfte wie ein Lenkrad in einem wirklichen Automobil aushalten muss.

Im Folgenden werden die am häufigsten verwendeten technischen Lösungen für *rapid prototyping* im Hinblick auf die Verwendung in der Kartographie und in raumbezogenen Informationssystemen kurz beschrieben.

Die Verfahren der schnellen Fertigung von Prototypen lassen sich drei großen Gruppen zuordnen, die ihre Äquivalente in der bildenden Kunst haben:

- **Abbau (Methode *Michelangelo*):** Von einem Block wird durch Bearbeitung mit einem Werkzeug Material entfernt, bis die endgültige Form erreicht ist. Aus dem Marmorblock entsteht die Skulptur durch Materialabbau mit Hammer und Meißel.
- **Verformung (Methode *Chillida*):** Das Material wird durch Krafteinwirkung verformt, so wie ein Schmied eine Stange Eisen in eine Sense verwandelt. Die große Eisenplastik von Eduardo Chillida vor dem neuen Bundeskanzleramt in Berlin ist durch Verformen entstanden.
- **Aufbau (Methode *Rodin*):** Das Modell wird aus dem Material aufgebaut, bis die Form dem Konzept entspricht. Eine Skulptur oder eine verkleinerte Vorlage werden aus Gips oder einem anderen plastischen Material modelliert.
- **3D-Zeichnung: (Methode *Dürer*)**
Die Technik der Glasinnengravur ist das dreidimensionale Äquivalent einer monochromen Zeichnung.

3.1 Abbau durch Fräsen aus dem vollen Material

Die Oberfläche wird mit einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine (NC-Maschine) aus dem vollen Block eines beliebigen Materials gefräst. Für glatte Oberflächen und kleinräumige Formen müssen relativ feine Werkzeuge benutzt werden, etwa ein Fräskopf mit einem geringen Durchmesser. Das feine Werkzeug entfernt pro Zeiteinheit weniger Material als ein gröberes

Werkzeug. Ein größeres Werkzeug kommt schneller zum Ergebnis, arbeitet aber weniger genau. Deshalb werden auf NC-Fräsmaschinen unterschiedlich große Fräswerkzeuge verwendet, um auf schnellem Wege eine möglichst glatte Oberfläche oder feine Formen zu erzeugen. Bei größeren Maschinen ist ein programmgesteuerter Werkzeugwechsel möglich.

Die abbauende Fertigung durch spanabhebende Techniken ist generell zeitaufwendiger als die anderen Verfahren. Als Material für Oberflächenmodelle wird man einen Kunststoff wählen, weil das Fräsen schneller abläuft, die Standzeit des Werkzeugs länger ist und keine Kühlung erforderlich wird wie bei einem Metall. Die professionellen CAD-Programme und ihre Zusätze enthalten Funktionen für die Aufbereitung des Modells, die Berechnung der optimalen Fräsbahnen und die Wahl des geeigneten Werkzeugs. Seit einigen Jahren sind preisgünstige Fräsmaschinen mit Computersteuerung auf dem Markt, deren Werkstück-Dimensionen, Geschwindigkeiten und Leistungen die Herstellung von kleineren Oberflächen-Modellen aus Kunststoff ermöglichen. Trotz des höheren Zeitaufwandes hat die abbauende Fertigung Vorteile gegenüber anderen Verfahren hinsichtlich der besseren mechanischen Festigkeit des Bauteils und der Unempfindlichkeit gegen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen – abhängig vom verwendeten Material.

Die Firma *Solid Terrain Modeling* (STM) in Fillmore, Kalifornien fertigt im Kundenauftrag 3D-Geländemodelle aus Hartschaumstoff an. Der Kunde liefert die numerische Definition der Oberfläche und ein Rasterbild der Oberflächen-Textur. Mit einer computergesteuerten Fräsmaschine wird das Modell aus einem vollen Block aus Hartschaumstoff gefräst. Anschließend tragen vier Sprühdüsen mit den Farbkomponenten Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz die farbige Textur auf die Oberfläche auf. Die Sprühdüsen werden dabei so nah wie möglich über die Oberfläche geführt. Die einzelnen Werkstücke können bis zu 120 x 240 x 20 cm groß sein. Modelle mit größeren Abmessungen werden aus mehreren Teilen zusammengesetzt, wie etwa das kürzlich fertig gestellte Reliefmodell von British Columbia (Kanada) mit einer Ausdehnung von ca. 12 x 22 Metern, bestehend aus 100 einzelnen Kacheln (vgl. STM). Die Anzahl der Systeme, die STM bisher für Kunden gebaut hat, ist nicht sehr groß, weil die hohen Kosten sich nur bei einem entsprechenden Bedarf amortisieren. Für „Normalkunden“ müssen deshalb die Modelle am Sitz von STM in Kalifornien gefertigt und anschließend zum Kunden transportiert werden – bei großen Modellen eine nicht geringer Posten zusätzlich zu den Kosten für die eigentliche Modellfertigung.

3.2 *Verformung*

In vielen Buchhandlungen in Frankreich werden dreidimensionale Modelle mit der Oberflächengestalt des jeweiligen Departements angeboten. Die Oberfläche besteht aus einer dünnen Folie, auf die Höhenstufen, Gewässer, Straßen und Siedlungen bzw. ihre kartographischen Symbole aufgedruckt sind. Die Form der Oberfläche entsteht durch die Verformung der bedruckten Folie durch Druck und Hitze über einer Form, die sehr wahrscheinlich auf einer numerisch gesteuerten Fräsmaschine gefertigt wird. Die 3D-Modelle aus tiefgezogener Folie sind relativ preiswert, weil die Herstellungskosten der Matrize – vergleichbar mit dem Druck von Karten in hoher Auflage – auf viele Exemplare umgelegt werden können. Für Unikate ist der Herstellungsprozess unverhältnismäßig teuer.

3.3 *Aufbau aus Schichten*

Eine weitere technische Lösung ist der Aufbau des Modells aus Schichten, die übereinander angeordnet werden. Jede der aufeinander folgenden Schichten des Modells benötigt eine feste Unterlage. Im Prinzip sind nur Oberflächen geeignet, die an einem Punkt in der Grundfläche nur einen Höhenwert haben (2½D-Oberflächen). Konkave Werkstücke, also Körper mit Eindellungen

gen und Überhängen, sollten so im Raum orientiert werden, dass eine 2½D-Oberfläche entsteht. Wenn das nicht möglich ist, wird das Modell aus mehreren Teilstücken zusammengesetzt. Bei einigen Techniken reicht jedoch die Festigkeit oder die Stützwirkung des Materials aus, um Hohlräume und Unterschneidungen zu überbrücken. Fragile Teile des Modells können auch mit Verstrebungen oder Pfeilern abgestützt werden, die nach Abschluss der Fertigung entfernt werden.

Eine einfache Möglichkeit mit nur geringer maschineller Unterstützung wäre beispielsweise das Ausschneiden der Modellschichten aus Karton oder Styropor-Platten, entweder von Hand oder mit einer numerisch gesteuerten Maschine. Die einzelnen Lagen werden von unten nach oben passgenau zur Oberfläche zusammengesetzt. Die automatisierte Version dieser Technik waren rechnergesteuerte Maschinen, die das Anfertigen der Schichten und ihr Zusammenfügen zum Modell unter Rechnerkontrolle durchführten. Die Teile, die nicht zum Modell gehören, wurden nach Fertigstellung manuell entfernt. Das Verfahren mit Papierschichten, genannt *Layered Object Manufacturing* (LOM), ist inzwischen vom technischen Fortschritt überholt worden, die Maschinen für die automatisierte Herstellung sind nicht mehr erhältlich.

3.3.1 Stereolithographie

Das älteste Verfahren für die schnelle Prototypen-Herstellung ist die Stereo-Lithographie (SLA, von *stereo lithography apparatus*). Sie wird seit den 1980er Jahren routinemäßig in der industriellen Fertigung verwendet. Das Verfahren nutzt die Eigenschaft bestimmter Kunststoffe, bei der Belichtung mit UV-Licht durch Polymerisation vom flüssigen in den festen Aggregatzustand zu wechseln. In einem Vorratsbehälter ist eine in vertikaler Richtung bewegliche Grundplatte angebracht. Bei der ersten Schicht ist die Platte dünn mit flüssigem Kunststoff bedeckt. Mit einem rechnergesteuerten Laserstrahl wird die Oberfläche der Flüssigkeit innerhalb des Querschnittes für das Werkstück belichtet. An den Stellen, die vom Lichtstrahl getroffen werden, polymerisiert der Kunststoff und wird fest. Dann wird das Modell um eine Schichtdicke in die Flüssigkeit abgesenkt und die nächste Schicht Flüssigkeit auf dem schon verfestigten Teil belichtet. Nach und nach wird aus den vielen dünnen Schichten ein zusammenhängender Körper in einer fast beliebigen Form aufgebaut.

Mehrere Varianten des Grundprinzips unterscheiden sich durch die Art des Photopolymers oder des Lasers. Die Stereolithographie ergibt sehr glatte Werkstück-Oberflächen, aber das Gerät ist teuer und deshalb der Modellbau kostspielig.

3.3.2 Materialauftrag mit Düsensystemen

Eine andere, dem Tintenstrahl-Drucker ähnliche Realisierungsmöglichkeit ist das Auftragen der Materialschicht mit einem Düsensystem, das über die Grundfläche bewegt wird. Das Material wird nur an den Stellen der Schicht abgesetzt, die zum Modell gehören. Eine Möglichkeit der technischen Realisierung ist ein thermoplastisches Material, das in der Düse geschmolzen und nach dem Auftragen bei niedrigerer Temperatur wieder hart wird (vgl. 3D.COM). Bei einem anderen Gerät wird ein fotoempfindliches flüssiges Polymer durch Belichtung mit einer UV-Lichtquelle in den festen Zustand gebracht. Ein Gerät verwendet zwei Düsensysteme, eines für das Material, aus dem sich das Modell zusammensetzt, ein zweites für das Material, mit dem die Hohlräume gefüllt werden. Das Füllmaterial wird nach der Fertigstellung durch chemische Lösung ausgewaschen.

3.3.3 Schichten aus Pulver

In einer Maschine wird auf die Arbeitsfläche eine dünne Schicht eines Pulvers (Stärke, Gips, Kunststoff oder Metall) aufgebracht. In dem Bereich der Schicht, der zum Modell gehört, werden die Pulverteilchen miteinander und mit der darunter liegenden Schicht verbunden, z.B. durch Aufbringen eines Klebemittels. Metallpulver kann durch lokales Erhitzen mittels eines Laserstrahls verfestigt werden (Selektives Laser-Sintern, SLS). Ist die Schicht fixiert, wird die nächste Schicht aufgetragen. Der Prozess wird solange fortgesetzt, bis die letzte Schicht des Modells aufgebracht ist. Das nicht fixierte Pulver wird nach Fertigstellung des Werkstücks manuell durch Schütteln oder durch Ausblasen mit einem Luftstrahl entfernt und kann für den Aufbau neuer Modelle weitergenutzt werden.

Bei einem Verfahren wird jede Schicht des Metallpulvers nach dem Sintern zusätzlich plangeschliffen. Dadurch ist die Dicke der Schicht besser kontrollierbar, die Schichten können dünner und gleichmäßiger aufgetragen werden. Das Modell wird insgesamt genauer, ein wichtiger Gesichtspunkt beispielsweise für die Schmuckindustrie, die mit sehr kleinen und fein gegliederten Werkstücken arbeiten muss (vgl. SOLIDSCAPE). Werkstücke aus Sintermetall erhalten durch Eintauchen in flüssiges Metall mit niedrigem Schmelzpunkt eine höhere Festigkeit. Mit diesem Verfahren fertigt zum Beispiel die Künstlerin Bathsheba Grossman ihre Skulpturen, die auf mathematischen Oberflächen und Konzepten der Topologie basieren (vgl. BATHSHEBA SCULPTURE).

Bei Verwendung von geeigneten Werkstoffen und entsprechender Nachbehandlung ist die direkte Herstellung von Werkzeugen aus Metall möglich (*rapid tooling*). Diese Werkzeuge können zum Beispiel für die Formgebung von Kunststoffen oder den Metallguss verwendet werden. Damit lassen sich Kleinserien von Werkstücken wirtschaftlicher produzieren, weil die Kosten geringer sind als bei der konventionellen spanabhebenden Fertigung.

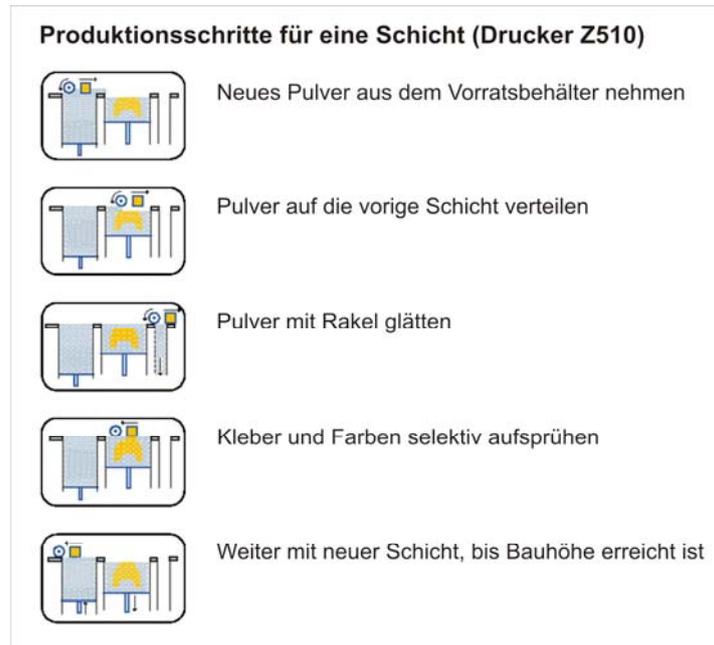
Die Modelle aus Stärke- oder Gipspulver werden nach dem Aufbau in der Regel mit Wachs, Kunstharz (Epoxidharz), Cyanoacrylat (Sekundenkleber) oder einem anderen Festiger getränkt. Dadurch wird die mechanische Stabilität erhöht und die Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen vermindert. Mit dem Festiger infiltrierte Modelle können wie Holz nachbearbeitet werden, etwa durch Schleifen oder Polieren. Farbauftrag oder eine Metallbeschichtung mit galvanischen Verfahren ist möglich. Durch ein geeignetes Pulvermaterial und die dazu passende Infiltrierflüssigkeit lassen sich auch flexible Modelle mit dünnen Wänden herstellen.

Mit der Kombination von Stärkepulver und Wachs als Imprägniermittel können Modelle gebaut werden, die ohne weitere Zwischenschritte für den Metallguss nach dem Prinzip der verlorenen Form verwendet werden können: Das Modell wird in eine Gussform aus hitzefestem Material eingebettet. Beim Eingießen des flüssigen Metalls verbrennt das Modell ohne feste Rückstände.

3.3.4 3D-Drucker mit Farbe

Die Fertigung von Werkstücken mit Rapid-Prototyping-Verfahren beschränkte sich bis vor einigen Jahren auf einfarbige Modelle. Das Einfärben der Modelle mit Pinsel oder Airbrush war natürlich möglich, die Personalkosten für das Auftragen der Farbe waren aber im Verhältnis zu den Herstellungskosten sehr hoch. Fotochemische Verfahren – also Beschichtung mit einer fotoempfindlichen Schicht, Belichtung und Entwicklung – sind denkbar, aber bei komplexen Formen schwierig zu realisieren, ganz abgesehen von den Problemen mit der Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Modelle. Ist die visuelle Variable *Farbe* – wie in der Kartographie – unbedingt notwendig ist, muss deren Auftrag in die Fertigung integriert werden, um die Kostenvorteile des *rapid prototyping* zu erhalten.

Abb. 1:
Produktion einer Schicht im 3D-Drucker Z510



Zur Zeit sind allein die Geräte Z510 und Z810 der Firma ZCorporation (vgl. ZCORP) in der Lage, ein farbiges Modell mit ausreichender Auflösung des Farbmusters herzustellen. Die Teile der jeweiligen Schicht, die zum Modell gehören, werden mit einem farblosen und drei farbigen Klebern fixiert. Die letzteren enthalten jeweils Pigmente in den subtraktiven Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb (Abb. 1). Für das Auftragen des Klebers werden die gleichen Druckköpfe verwendet wie bei einem handelsüblichen Tintenstrahldrucker. In Analogie zu den Tintenstrahldruckern hat man diese Geräte deshalb *3D-Drucker* genannt. Andere Anwendungsgebiete für *rapid prototyping*, etwa Medizin (Bau von 3D-Modellen aus Daten der medizinischen Bildgebung zur Vorbereitung von Operationen), Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung, Maschinen- und Anlagenbau, Mode- und Produktdesign, Biologie oder Strukturforschung profitieren ebenfalls von der Möglichkeit, Modelle und Werkstücke mit hoher Farbauflösung herzustellen.

Die mechanische Stabilität der Werkstücke aus Stärke- oder Gipspulver nach anschließender Infiltration mit einem Festiger ist für kartographische Modelle ausreichend, vorausgesetzt, die Modelle werden mit der angemessenen Vorsicht angefasst bzw. bewegt und bei einigermaßen konstanter Temperatur sowie in trockener Umgebung aufbewahrt. Die zusätzlichen Eigenschaften wie erhöhte mechanische Festigkeit oder Hitzebeständigkeit der anderen Verfahren, die z.B. für *rapid-tooling*-Anwendungen notwendig sind, spielen für den kartographischen Verwendungszweck keine große Rolle.

3.4 Glasinnengravur

Seit kurzem ist ein technisches Verfahren verfügbar, das ein dreidimensionales monochromes Bild im Inneren eines Glaskörpers festhält. In vielen Städten gibt es spezialisierte Läden, die 3D-Darstellungen von Gebäuden, Denkmälern, Pflanzen oder Tieren im Inneren eines Glasblocks anbieten. Die Läden sind meistens auch mit einer 3D-Kamera ausgerüstet, mit der die Form eines Gesichts oder Kopfes in ein numerisches Modell umgesetzt werden kann, das anschließend in den Glasblock graviert wird (vgl. LOOXIS).

Abb. 2:
Glasblock mit der Oberfläche der Baulandpreise 2002



Die 3D-Zeichnungen im Glasblock werden mit Glasinnengravur in einem computergesteuerten Gerät hergestellt. Ein in drei Achsenrichtungen geführter und fokussierter Laserstrahl schmilzt einen eng begrenzten Bereich im Glaskörper. An diesen Stellen wird das Glas trüb und undurchsichtig (Abb. 2). Die Schmelzpunkte werden von unten nach oben in Schichten angelegt, damit der Bereich des Glaskörpers darüber für den Laserstrahl transparent bleibt. Die Führung des Laserstrahls bzw. des Fokuspunktes wird aus einem numerischen Modell der Zeichnung, z.B. eine kartographische Oberfläche in einer VRML-Datei, abgeleitet. Streng genommen ist die Glasinnengravur kein Rapid-Prototyping-Verfahren, weil kein Werkstück als Prototyp für die Fertigung entsteht. Es werden aber die gleichen Modelldefinitionen, der schichtweise Aufbau und vergleichbare Steuerungstechniken für die Positionierung des Laserstrahls benutzt. Die 3D-Zeichnungen in den Glasblöcken sind allerdings nur monochrom.

4 Bau der kartographischen Modelle

4.1 Auftragsfertigung von 3D-Modellen

Die Kosten für einen 3D-Drucker Z510 betragen ca. 50 000 Euro. Bei geringen Stückzahlen ist es deshalb wirtschaftlich sinnvoll, die Prototypen im Auftrag fertigen zu lassen. Einige Firmen bieten Dienstleistungen für *rapid prototyping* mit unterschiedlichen Verfahren an. Der Kunde schickt das numerische Modell in einem geeigneten Format an die Service-Firma. Diese produziert das Werkstück und führt, wenn gewünscht, auch die Nachbearbeitung, z.B. Infiltration,

Glättung, das Aufbringen von Farbe oder Elektroplattierung mit einem Metall, durch. Nach der Fertigstellung wird das Modell mit einem Paketservice an den Kunden geschickt.

Im vorliegenden Fall (Abb. 3 u. 4) wurden die Modelle von der Firma 4Dconcepts aus Groß-Gerau auf dem 3D-Drucker Z510 gebaut (vgl. 4DCONCEPTS). Die Firma erhält die Datei mit der numerischen Repräsentation des Modells als Anhang einer E-Mail. Nach der Prüfung der Dateien wird den Kunden auf Wunsch ein Angebot mit den voraussichtlichen Fertigungskosten gemacht. Nach Auftragserteilung wird das Modell im 3D-Drucker Z510 aufgebaut, der Block anschließend mit dem gewünschten Festiger infiltriert und an den Kunden versandt. Normalerweise vergehen drei bis vier Tage, bis das fertige Modell beim Kunden ankommt. Für besonders eilige Aufträge gibt es auch einen Express-Service für die Fertigung über Nacht.

4.2 Numerische Repräsentation des Modells

Das Modell besteht aus der 2½D-Oberfläche, den Seitenwänden, dem Boden (der Rückseite) oder einem Sockel. Dazu kommen die Körper der Höhenlegende, die Maßstabsleiste, die Grenzen und andere Linien sowie die Textketten einschließlich der Zahlen in den Legenden. Die äußere Haut des Modells wird durch eine Menge von 3D-Dreiecken definiert, welche für die stetige Oberfläche ausreichend klein sein müssen. Jedes Dreieck kann eine individuelle Farbe tragen. Die Software des 3D-Druckers berechnet aus den Dreiecken die Teile der Schicht, die zum Modell gehören, vergleichbar mit den Höhenlinien in einer topographischen Karte. Die Koordinaten der Konturen und die Farbinformationen werden an den 3D-Drucker übermittelt, der daraus das Modell Schicht für Schicht aufbaut.

4.3 Dateiformat für Dreiecke

Die numerische Beschreibung des Modells muss in einer standardisierten Form an das Servicebüro übermittelt werden. Ein Quasi-Standard für *rapid prototyping* ist das STL-Format. Ursprünglich entwickelt für die Stereo-Lithographie (daher die Abkürzung STL), wird das Format auch bei anderen Herstellungsverfahren verwendet. Für jedes Dreieck werden auch die Koeffizienten der Ebenengleichung gespeichert, um die Orientierung des Dreiecks festzustellen und damit die Fehlerprüfung zu vereinfachen.

Mit dem Format STL wird nur die geometrische Form des Modells durch eine Menge von Dreiecken beschrieben. Die Kodierung von Farbinformationen ist in der ursprünglichen Definition des Formats nicht vorgesehen. Es gibt zwar Erweiterungen mit Farbinformationen, die aber nicht Standard sind. Für Modelle mit Farbinformationen ist es deshalb besser, das Format VRML (*Virtual Reality Markup Language*) zu verwenden. VRML ist ein allgemeiner Standard für die Beschreibung von dreidimensionalen Szenen einschließlich Beleuchtung, Interaktion sowie Bewegungen in Raum und Zeit. Ausführliche Informationen zu VRML sind zum Beispiel bei HASE (1997) oder bei VRML.ORG zu finden. Für die Definition der Modelle sind nur die Befehle für die Beschreibung der Geometrie einschließlich der Farbe notwendig.

Die Facetten des Modells (die in VRML nicht unbedingt Dreiecke sein müssen), werden durch Verweise auf dreidimensionale Punkte definiert. Die Koordinaten der Punkte, die gemeinsam von mehreren Dreiecken benutzt werden, müssen deshalb nur einmal abgespeichert werden. Aus diesem Grund sind VRML-Dateien in der Regel auch kleiner als STL-Dateien mit dem gleichen Modell. Jedem Dreieck wird die Farbe über einen Zeiger auf einen Farbvektor zugewiesen. Für die Konvertierung von anderen 3D-Formaten in das VRML-Format können geeignete Konverter genutzt werden. Die Konvertierung wird auf Wunsch des Kunden auch von den 3D-Modell-Anbietern ausgeführt.

4.4 Linien im Modell

Für die Orientierung auf dem Modell sind topographische Anhaltspunkte wünschenswert, denn nicht jeder Betrachter ist in der Lage, auf Anhieb die Bundesländer oder die Städte und Ballungsräume im Modell zu identifizieren. Gute Hilfen zur Verortung können zum Beispiel die Grenzen der Bundesländer, die großen Flüsse oder wichtige Verkehrswege (Straße und Schiene) sein. Auf der anderen Seite sind zu viele topographische Informationen hinderlich bei der intuitiven Erfassung der Botschaft, weil die wichtigen Informationen zugedeckt werden. Es muss ein geeignetes Gleichgewicht gefunden werden.

Das sonst in der Computergraphik übliche Verfahren der Liniendarstellung als Textur auf den Dreiecken ist nur bedingt geeignet. An steilen Hängen „verschmieren“ die Pixel des Rasterbildes aufgrund der projektiven Umformung zu einem unansehnlichen Muster. Deshalb werden die Linien im Modell als dünne Röhren konstruiert, die wiederum aus sehr kleinen Dreiecken aufgebaut sind. Die feine Struktur der Röhren resultiert in einer hohen Anzahl von Dreiecken – meist mehr als die Dreiecke der eigentlichen Oberfläche. Für den Bau des Modells auf dem 3D-Drucker spielt die Anzahl der Dreiecke insgesamt aber nur eine vernachlässigbare Rolle und wirkt sich insbesondere nicht auf die Baugeschwindigkeit aus. Die VRML-Datei wird allerdings erheblich umfangreicher und kann ohne Komprimierung möglicherweise das E-Mail-Postfach verstopfen.

Die Linien liegen in der Regel nur in 2D vor. Zur Verortung der Linien auf der Oberfläche muss der Höhenwert jedes Linienpunktes aus der Ebenengleichung der 3D-Dreiecke der Oberfläche berechnet werden. Da die Anzahl der Oberflächen-Dreiecke sehr hoch sein kann, ist das Aufsuchen der Dreiecke, in dem der Punkt liegt bzw. die von der Strecke geschnitten werden, entweder – bei einfacher linearer Suche – hinsichtlich der Zeit oder – bei fortgeschrittenen Suchmethoden – im Bezug auf die Programmkomplexität relativ aufwendig.

4.5 Textketten

Die Umrisse der Zeichen sind in den Dateien für die TrueType-Schriften als geschachtelte Polygone (*glyphs*) definiert. Die Polygone werden aus den TrueType-Dateien extrahiert und mit wählbarer Auflösung in die dritte Dimension extrudiert, so dass ein dreidimensionaler geschlossener Körper entsteht. Verschiedene Optionen für die Ausformung der Zeichenkörper sind wählbar, wie auch das Abschrägen der Kanten (Fasen) mit unterschiedlichen Parametern. Der 3D-Körper des Zeichens wird wieder als Menge von Dreiecken in der VRML-Datei gespeichert.

Leider halten sich nicht alle Designer von TrueType-Schriften strikt an die Spezifikationen. In manchen Schriften bzw. TrueType-Dateien ist der Drehsinn der Glyphen falsch, was beim normalen Gebrauch auf einem 2D-Drucker nicht sichtbar wird. Bei der räumlichen Ausformung führt dieser Fehler aber zu einer falschen Orientierung der Dreiecke und damit zu einer fehlerhaften Definition des 3D-Zeichens. Manche VRML-Viewer prüfen die Orientierung der Dreiecke und warnen den Anwender mit einer Signalfarbe, wenn die Dreiecke falsch orientiert sind. Diese Warnhinweise sollte man beachten (das gilt nicht nur für die Textketten), um nicht unnötig Mittel und Zeit für den Bau fehlerhafter Modelle zu vergeuden.

4.6 Textur

Die Software des 3D-Drucker Z510 kann eine farbige Textur auf den Dreiecken erzeugen. Die Textur wird in einer Rasterdatei gespeichert, deren Dateiname in der VRML-Datei angegeben wird. Diese Option wird für feine Muster angewendet, die schon als Rasterdateien vorliegen, z.B. eine topographische Karte oder ein Satellitenbild. Die Textur wird über das durch Dreiecke definierte 3D-Modell ausgebreitet. Das größte Problem ist wahrscheinlich die exakte Passung

von Textur und Dreiecksnetz. Für die hier beschriebenen Modelle wurde diese Option noch nicht getestet.

5 Beispiele von 3D-Modellen mit Oberflächen

Zur Evaluierung der technischen Möglichkeiten des *rapid prototyping* wurden einige Modelle von GIS-Objekten angefertigt, deren Ausgangsdaten im Geo-Informationssystem des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (vgl. BBR) gespeichert sind. Die Geometrie-Dateien und die Indikatoren wurden mit dem Software-Paket ArcGIS von ESRI aufbereitet und in Shape-Dateien gespeichert. Die Interpolation der Oberflächen und die Erzeugung der Modelldateien wurden mit eigener Software vorgenommen.

5.1 Einige Zahlen zum 3D-Drucker und Modellbau

Mit dem 3D-Drucker Z510 können Teile bis zu den Dimensionen 25 x 35 x 25 cm gefertigt werden (der Drucker Z810 hat ein größeres Bauvolumen). Die Dicke der einzelnen Schichten ist von 0,089 bis 0,2 mm einstellbar. Das Modell in Abbildung 3 entspricht ungefähr den maximalen Abmessungen des Druckers in der xy-Ebene und ist etwa 70 mm hoch. In diesem Fall wurde eine Schichtdicke von 0,1 mm gewählt. Der optimale Wert für die Dicke der Schicht hängt vom Pulvermaterial und dem Verwendungszweck des Modells ab. Die Fertigungszeit ist linear proportional zur Anzahl der Schichten. Bei farbigen Werkstücken werden maximal zwei Schichten pro Minute aufgetragen (bei monochromen Modellen bis zu sechs Schichten). Der Aufbau des Modells aus dünneren Schichten dauert deshalb länger. Das Modell wurde nach dem Aufbau mit Epoxidharz infiltriert.

Die Kosten für das Material (Pulver, Kleber, Infiltrat, Reinigungsflüssigkeit) betragen 50 bis 100 Euro, abhängig vom Bauvolumen. Die gesamten Produktionskosten im Service-Büro (Arbeitsvorbereitung, Modellbau, Material, Infiltrations- und Versandkosten) für das größte Modell beliefen sich auf ca. 800 Euro. Kleinere oder flachere Modelle sind entsprechend preiswerter.

5.2 Durchschnittliche Preise für baureifes Land (Abb. 3)

Aus den durchschnittlichen Preisen für baureifes Land in den Kreisen der Bundesrepublik Deutschland (MÜLLER-KLEISSLER u. RACH 2004) wurde mit dem Verfahren der pyknophylaktischen Interpolation eine stetige Oberfläche berechnet. Das Interpolationsverfahren stellt sicher, dass bei flächenbezogenen Variablen das Volumen über jeder Bezugseinheit dem ursprünglichen Volumen wie bei den Prismen in der 3D-Choroplethenkarte entspricht – mit einer sehr geringen Fehlermarge. Die Interpolation wandelt die 3D-Choroplethenkarte in eine kontinuierliche Oberfläche um. Innerhalb des Bezugspolygons kann deshalb die Höhe variieren, um den Ausgleich zum unmittelbar benachbarten Polygon herzustellen. Der Durchschnitt der Höhe für jedes Polygon bleibt aber konstant, weil sich Volumina und Grundflächen nicht verändern (TOBLER 1979; RASE 2001).

Die Oberfläche wurde mit einer Farbkodierung für die Klassen von 0 bis 50, 50 bis 100, 100 bis 150, 150 bis 300 und über 300 Euro/m² versehen. Die Grenzen der Bundesländer und der benachbarten Länder im Kartenausschnitt sind durch dünne Röhren repräsentiert. Eine kombinierte 3D-Legende für Höhen und Höhenklassen erlaubt sowohl die Zuordnung von Isoflächen in der Karte zu einer Klasse als auch den direkten Höhenvergleich, etwa durch einen Blick von der Seite auf das Modell. Der vergrößerte Ausschnitt in Abbildung 3 zeigt einen Teil des Körpers für die Höhenlegende und den Legendentext, dazu die grünen und grauen Röhren der Grenzlinien.

Abb. 3:
 Durchschnittliche Preise für baureifes Land 2003, Legende und
 Text vergrößert (rechts)



5.3 Zeitentfernung zum nächsten Oberzentrum (Abb. 4)

Das Modell zeigt die Zeitentfernung von jedem Punkt in der Bundesrepublik Deutschland zum nächstgelegenen Oberzentrum. Die Höhe der Oberfläche im Modell ist proportional zur Reisezeit in Minuten, die notwendig ist, um das Oberzentrum auf dem Schienenweg (Bundesbahn, S-Bahn, Straßenbahn) zu erreichen. Die Zeitentfernungen von jedem Punkt im Verkehrsnetz zum nächsten Oberzentrum wurden mit Daten aus dem Erreichbarkeitsmodell des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung berechnet (PÜTZ u. SPANGENBERG 2006). Aus den Datenpunkten wurden die Höhenwerte der Oberfläche mit der Methode der modifizierten Shepard-Interpolation ermittelt (RENKA 1988). Die Interpolation ist notwendig, um aus den Datenpunkten eine glatte Oberfläche mit ausreichender Dichte zu erzeugen (RASE 1998).

Wie erwartet treten die längsten Reisezeiten in der Nähe der Bundesgrenze und in den Gebieten mit niedriger Bevölkerungsdichte auf. In diesen Gebieten liegen die Oberzentren weiter auseinander und das Schienennetz ist weniger dicht. Im Modell sind die bedeutendsten Schienenwege als blaue Linien dargestellt. Von einer Wiedergabe aller Schienenwege zum jeweiligen Oberzentrum wurde abgesehen, weil diese Angaben das Modell überfrachtet hätten. Die Höhenlegende hat die gleiche Funktion wie beim Modell mit den Baulandpreisen.

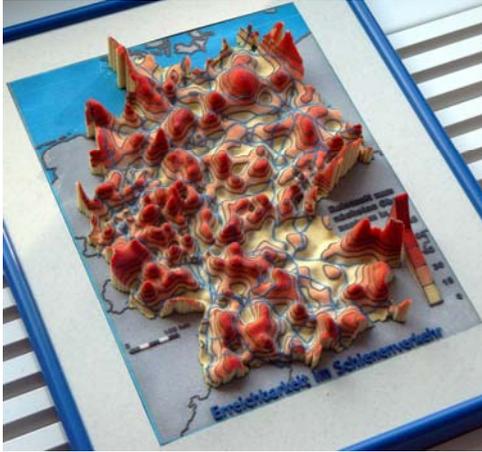


Abb. 4:
 Zeitentfernung zum nächsten
 Oberzentrum im Schienenver-
 kehr. Die Höhe der Oberflä-
 che ist proportional zur Rei-
 sezeit zum nächsten Ober-
 zentrum im Schienenverkehr.)

6 Fazit und Ausblick

Eine perspektivische Darstellung des dreidimensionalen Objekts in den zwei Dimensionen des Papiers vermittelt die Information der dritten Dimension ohne die Notwendigkeit der Kodierung und Dekodierung durch visuelle Variablen. Da sie mehr den allgemeinen Sehgewohnheiten des Menschen entspricht, erfolgt die Erfassung der Oberflächengestalt mehr oder weniger intuitiv. Ein reales 3D-Modell hat alle Vorteile einer perspektivischen Darstellung und vermeidet ihre Nachteile. Durch geringfügige Veränderungen des Augenpunktes, etwa durch Drehen oder Heben des Kopfes oder Bewegen des Körpers, werden die Teile des Modells sichtbar, die bei einer fest eingestellten Perspektive verdeckt sind. Die Schätzung von Entfernungen oder der Höhenvergleich von lokalen Maxima gelingt sehr gut, weil die lebenslange Erfahrung jedes Menschen in der Erfassung von 3D-Szenen und der Interpretation von Tiefen-Indikatoren (*depth cues*) genutzt werden kann.

Ein weiterer Effekt, der für die Nützlichkeit realer Modelle in bestimmten Kommunikationssituationen spricht, ergab sich gänzlich unerwartet. Bei erster Betrachtung der Modelle greift fast jeder spontan auf die Oberfläche. Die Erfassung des Materials und der Oberflächenformen mit dem Tastsinn ist offensichtlich ein sensorisches Grundbedürfnis wie Sehen, Hören, Riechen und Schmecken. Das haptische Erlebnis, das *Begreifen* im wörtlichen Sinn, ist ein sinnlicher Reiz, der für die Übermittlung der Botschaft genutzt werden kann.

Ein reales Modell ist das geeignete Medium, wenn mehrere Personen gleichzeitig einen raumbezogenen Sachverhalt erfassen und beurteilen sollen. Das trifft beispielsweise für eine Besprechung oder Diskussion im kleineren Kreis zu. Anders als bei einer Präsentation auf Leinwand, Monitor oder unter Nutzung von VR-Techniken (Shutter-Brille, Datenhelm) wird die verbale und nonverbale Interaktion zwischen den Teilnehmern nicht behindert. Das ist vielleicht auch eine Ursache – neben dem haptischen Reiz – warum bei Architekturwettbewerben immer noch reale Modelle der Bauwerke verlangt werden. VR-Installationen sind außerdem nicht einfach an einen anderen Ort transportierbar und benötigen einen Stromanschluss.

3D-Modelle wie auch Glasblöcke mit Laserinnengravur sind sehr wirkungsvolle Konversationsobjekte. Das Modell wirkt als Blickfang oder Aufhänger für weitergehende Gespräche, insbesondere mit Entscheidungsträgern ohne direkten Bezug zur großräumigen Planung, Raumbeobachtung und Kartographie. Die Erklärung der Technik wird genutzt, um den dargestellten Sachverhalt und seine Auswirkungen auf die räumliche Entwicklung zu vermitteln („subversive

Kartographie“). Reale Modelle von GIS-Objekten haben auch eine wichtige repräsentative Funktion für Präsentationen und Ausstellungen, weil das dreidimensionale Modell der Oberfläche wirkungsvoll die Aufgabe einer Institution symbolisieren kann – ähnlich wie ein Gebäudemodell. Mit der Technik der Glasinnengravur lassen sich preiswert repräsentative Unikate herstellen, z.B. personalisierte Geschenke mit thematischem Bezug oder Auszeichnungen und Trophäen für die Preisträger von Wettbewerben.

An den beschriebenen Beispielen wurde gezeigt, wie mit den Verfahren der schnellen Prototypenfertigung reale dreidimensionale Modelle von GIS-Objekten hergestellt werden können, einschließlich des Farbauftrags während des Modellaufbaus. *Rapid prototyping* durch Aufbau aus Schichten ist für diese Anwendung schneller und kostengünstiger als der Modellbau mit NC-Maschinen. Die Software für die Konstruktion der Modellbeschreibung ist in einigen Teilen noch verbesserungsfähig. Dies gilt z.B. für die Repräsentation der Linien als dünne Röhren und betrifft den Rechenzeit-Bedarf für die Höhenanpassung an die Oberfläche, die Form der Knickstellen oder die Texturierung der Röhren. Die Einbeziehung von Rasterbildern für die Textur auf der Oberfläche – etwa ein Modell der Erdoberfläche überlagert mit einem Satellitenbild – muss noch getestet werden.

Weitere Möglichkeiten für die Anwendung der 3D-Modelle sind denkbar, etwa für einen Ausschnitt der Erdoberfläche, worauf wechselnde Texturen oder sogar Animationssequenzen mittels eines computergesteuerten Beamers projiziert werden. Damit lassen sich bei Ausstellungen o.Ä. auf dem Relief die unterschiedlichen Schichten oder Faktoren der Raumstruktur oder auch Veränderungen über die Zeit visualisieren, z.B. die Entwicklung der Bodenbedeckung oder die Zunahme der Siedlungsfläche.

Zum Schluss wird darauf hingewiesen, dass die Verfahren des *rapid prototyping* – nicht nur mit den hier gezeigten Techniken und Darstellungsformen – auch sehr gut geeignet sind, um schnell und kostengünstig tastbare Karten für Blinde und Sehbehinderte herzustellen.

Literatur

3d.com: Online im Internet unter: <http://www.3d.com/> (Zugriff: 15.12.2006)

4DConcepts: Produktentwicklung, Rapid Prototyping und Modellbau. Online im Internet unter: <http://www.4dconcepts.de/> (Zugriff: 15.12.2006)

Bathsheba Sculpture: the art of geometry. Online im Internet unter: <http://www.bathsheba.com/> (Zugriff: 15.12.2006)

BBR: Das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung stellt sich vor. Online im Internet unter: <http://www.bbr.bund.de>

BRENNER, C. u. V. PAELKE (2006): Das Geo-Scope – ein Mixed-Reality-Ein-Ausgabegerät für die Geovisualisierung. In: Deutsche Gesellschaft für Kartographie (Hrsg.): Aktuelle Entwicklungen in Geoinformation und Visualisierung. GEOVIS 2006, 5. bis 6. April 2006, Potsdam. Bonn (= Kartographische Schriften, Bd.10), S. 47-54.

COOPER, K. G. (2001): *Rapid prototyping technology*. New York.

FAULKNER, L. (2006): Physical terrain modeling in a digital age. Online im Internet unter: http://www.stm-usa.com/pdf_brochures/Physical_Terrain_Modeling_in_a_Digital_Age.pdf (Zugriff: 05.08.2006)

GRÜNDEMANN, T., M.F. BUCHROITHNER u. K. HABERMANN (2006): Multitemporale und echt-dreidimensionale Hartkopie-Visualisierungen von Geodaten. In: KRIZ, K., W. CARTWRIGHT, A. PUCHER u. M. KINBERGER (Hrsg.): *Kartographie als Kommunikationsmedium*. Wien (= Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Bd.17), S. 270-276.

- HASE, H.-L. (1997): Dynamische virtuelle Welten mit VRML 2.0. Einführung, Programme und Referenz. Heidelberg.
- KREMPL, S. (2006): Homo fabber – Vom Personal Computer zum Personal Fabricator. In: c't H. 5, S. 100-105.
- Looxis: Online im Internet unter: <http://www.looxis.com/index.php?t=home.welcome&l=ger> (Zugriff: 15.12.2006)
- MÜLLER-KLEISSLER, R. u. D. RACH (2004): Struktur und Entwicklung der Grundstücksmärkte für Bauland und bebaute Grundstücke. In: BBR (Hrsg.), Bauland- und Immobilienmärkte, Ausgabe 2004. Berichte Bd.19. Bonn, S. 9-38.
- PÜTZ, T. u. M. SPANGENBERG (2006): Zukünftige Sicherung der Daseinsvorsorge. Wie viele Zentrale Orte sind erforderlich? In: Informationen zur Raumentwicklung, H. 6/7, S. 337-344.
- RASE, W.-D. (1998): Modellierung und Darstellung von immateriellen Oberflächen. Forschungen Bd.89. Bonn.
- RASE, W.-D. (2001): Volume-preserving interpolation of a smooth surface from polygon-related data. In: Journal of Geographical Systems 3, S. 199-213.
- RENKA, R.J. (1988): Algorithm 660: QSHEP2D, Quadratic Shepard method for bivariate interpolation of scattered data. In: ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 14, No. 2, S. 149-150.
- Solidscape: Online im Internet unter: <http://www.solid-scape.com/> (Zugriff: 15.12.2006)
- STM – Solid Terrain Modeling Inc.: World's largest physical terrain model. Online im Internet unter: <http://www.stm-usa.com/bc.htm> (Zugriff: 15.12.2006)
- TOBLER, W.R. (1979): Smooth pycnophylactic interpolation for geographical regions. In: Journal of the American Statistical Association, Vol. 74, No. 357, S. 519-535.
- vrml.org: xml content management. Online im Internet unter: <http://www.vrml.org/> (Zugriff: 15.12.2006)
- ZCorp: Rapid Prototype 3D Printers for Concept Modeling. Online im Internet unter: <http://www.zcorp.com/> (Zugriff: 15.12.2006)