

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

Dr. Wolf-Dieter Rase
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Deichmannsaue 31-37
53179 Bonn

Tel.: +49 228 99 401 2224
Fax: +49 228 99 401 2355
E-Mail: rase@bbr.bund.de



Zusammenfassung

Seit einigen Jahren werden in der Industrie neue Verfahren zur schnellen und kostengünstigen Fertigung von Werkstücken eingesetzt. Diese Prototypen dienen in der Regel zur Beurteilung der Form und der mechanischen Funktion von Werkstücken, die später in hoher Auflage produziert werden sollen. *Rapid prototyping* kann auch genutzt werden, um kostengünstig Modelle von dreidimensionalen GIS-Objekten herzustellen. Beispiele für solche Objekte sind Modelle von kontinuierlichen Oberflächen, die aus demographischen und sozio-ökonomischen Indikatoren interpoliert werden. Die für kartographische Anwendungen wesentlichen Techniken für *rapid prototyping* werden beschrieben. Einige Beispiele für 3D-Modelle von Oberflächen von Daten aus der großräumigen Planung werden vorgestellt und über die Erfahrungen bei der Herstellung der Modelle durch Auftragsfertigung bei einem Servicebüro berichtet.

1 Von 2D nach 3D

Manche Zielgruppen für kartographische Produkte haben keine Ausbildung und keine Erfahrung in der Nutzung von thematischen Karten. Die Dekodierung der visuellen Variablen in der Karte und die mentale Rekonstruktion der kartographischen Botschaft kostet Zeit, die bei Entscheidungsträgern in Verwaltung und Politik nur im begrenzten Umfang zur Verfügung steht. Die Gefahr ist groß, dass die Information in der Karte unvollständig oder überhaupt nicht übermittelt wird. Jeder Mensch hat im Laufe seines Lebens gelernt, Tiefen-Indikatoren (*depth cues*) in einem Bild zu erfassen und so 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 den kartographischen Inhalt besser zu transportieren. Die Kodierung der dritten Dimension durch visuelle Variablen und deren Dekodierung kann entfallen. Es ist aber sinnvoll, in einer 3D-Darstellung zum Beispiel die Kodierung der Höhenstufen durch die Variablen Farbe und Helligkeit beizubehalten, denn Redundanz erleichtert die Informationsverarbeitung.

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, die Verteilung der lokalen Maxima und Minima über der Bezugsfläche sind deutlich erfassbar. Allerdings werden meistens Teile der Oberfläche 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 lässt sich der Augenpunkt einfach verändern, um verdeckte Teile sichtbar zu machen. Höhenunterschiede und Entfernungen können mit Programmunterstützung gemessen werden, zum Beispiel 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 mentales Bild in 3D. Die Position und Orientierung des Helmes muss in Echtzeit verfolgt werden, damit die Geometrie der Bilder korrekt berechnet werden kann. Solche Datenhelme (HWD, *head-worn displays*) sind in der Regel Teil eines interaktiven Systems, mit dem eine scheinbare (virtuel-

le) Realität in Echtzeit visualisiert wird, mit Einwirkungsmöglichkeit durch ein 3D-Zeigegerät (3D-Maus). Der technische Aufwand für Stereogramme wird mit der Qualität der Darstellung immer größer, 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

Die Techniken der Virtuellen Realität (VR) werden seit einigen Jahren in Architektur, Städtebau und Raumplanung angewendet. Architekten oder Raumplaner können Gebäude oder Landschaften betrachten, die in der Wirklichkeit noch nicht existieren, sondern lediglich als numerisches Modell in einem Computer 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 unterschiedlichen Lichtverhältnissen. Die zeitliche Dimension wird durch eine Animationssequenz realisiert, entweder vorproduziert und zeitversetzt vorgeführt oder in Echtzeit mit interaktiver Steuerungsmöglichkeit. In ein Bild der realen Szene können passgenau virtuelle Gegenstände eingeblendet werden, zum Beispiel geplante Gebäude, Bau-Ensembles oder Brücken (*mixed reality*, BRENNER und PAELKE 2006).

Bei Architektur-Wettbewerben werden meistens reale Modelle der eingereichten Entwürfe gefordert. Eigentlich sind die 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. Ein Grund könnte sein, dass der Aufwand für die VR-Technik ist noch sehr groß ist, wenn mehrere Personen gleichzeitig das Objekt betrachten sollen. 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, etwa Oberflächen, so gut wie nie realisiert. Das Fehlen einer Tradition für den Modellbau wie in der Architektur 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 Gebäudes 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 Informationen und als Folge davon zu erweiterten Einsichten führen können. Insbesondere bei Diskussionen und Entscheidungsfindungen in einer Gruppe haben 3D-Modelle einige Vorteile, zum Beispiel 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. Das mag ein Grund sein, warum bei Architekturwettbewerben die Gebäudemodelle immer noch verlangt werden.

3 Die wichtigsten Rapid-Prototyping-Verfahren

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. 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.
- **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 Block

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 gröberes Werkzeug kommt schneller voran, arbeitet aber weniger genau. Deshalb werden auf NC-Fräsmaschinen unterschiedlich große Fräswerkzeuge verwendet, um so schnell möglich eine möglichst glatte Oberfläche oder feine Formen zu erzeugen. Seit einigen Jahren sind preisgünstige Fräsmaschinen mit Computersteuerung auf dem Markt, deren Geschwindigkeit und Leistung die Herstellung von kleineren Oberflächen-Modellen aus Kunststoff ermöglichen. Die abbauende Fertigung ist zeitaufwendiger als andere Verfahren, hat dafür aber die Vorteile der besseren mechanischen Festigkeit des Bauteils und der Unempfindlichkeit gegen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen, abhängig vom verwendeten Material.

3.2 Verformung

In vielen Buchhandlungen in Frankreich und im Internet (www.georelief.com) werden dreidimensionale Modelle der Oberflächengestalt von Regionen und 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 mit Druck und Hitze über einer Form, die auf einer numerisch gesteuerten Fräsmaschine gefertigt wird. Die 3D-Modelle aus tiefgezogener Folie sind relativ preiswert, weil die Herstellungskosten der Matrize auf viele Exemplare umgelegt werden können, vergleichbar mit dem Druck von Karten in hoher Auflage. Für Unikate ist der Herstellungsprozess nicht wirtschaftlich.

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). Bei einigen Techniken reicht jedoch die Festigkeit oder die Stützwirkung des Materials aus, um auch Hohlräume und Unterschneidungen zu überbrücken.

3.3.1 Stereolithographie, Materialauftrag mit Düsensystemen

Das erste Verfahren für die schnelle Prototypen-Herstellung war die Stereo-Lithographie, die seit den achtziger Jahren routinemäßig in der industriellen Fertigung verwendet wird. Das Verfahren nutzt die Eigenschaft von bestimmten Kunststoffen, die bei der Belichtung mit UV-Licht vom flüssigen in den festen Aggregatzustand durch Polymerisation wechseln. Eine flüssige Schicht nach der anderen wird durch einen rechnergesteuerten Laserstrahl polymerisiert, der Kunststoff fest. Schicht für Schicht entsteht ein zusammenhängender Körper in einer fast beliebigen Form. Eine andere Realisierungsmöglichkeit ist das Auftragen der Materialschicht mit einem Düsensystem, das rechnergesteuert über die Grundfläche bewegt wird. Das thermoplastische Material verfestigt sich und bildet Schicht für Schicht das Modell.

3.3.2 Schichten aus Pulver

In einer Maschine wird auf die Arbeitsfläche eine dünne Schicht eines Pulvers (Stärke, Gips, Kunststoff oder Metall) aufgebracht. Im Bereich der Schicht, der zum Modell gehört, werden die Pulverteilchen miteinander und mit der darunter liegenden Schicht verbunden, zum Beispiel durch Aufbringen eines Klebemittels. Metallpulver kann durch lokales Erhitzen mit einem Laserstrahl 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 wieder für den Aufbau neuer Modelle genutzt werden.

Die Modelle aus Stärke- oder Gipspulver werden nach dem Aufbau in der Regel mit Wachs, Kunstharz (Epoxy), 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. Ein Farbauftrag oder die Metallbeschichtung mit galvanischen Verfahren ist möglich. Modelle aus Stärkepulver eignen sich gut für das Metallgießen nach dem Prinzip der verlorenen Form, weil das Modell durch die Hitze des flüssigen Metalls ohne feste Rückstände verbrennt.

3.3.3 3D-Drucker

Bis vor einigen Jahren konnten mit RP-Verfahren nur einfarbige Werkstücke hergestellt werden. Der Farbauftrag mit Pinsel oder Airbrush ist natürlich möglich, die Personalkosten für das Einfärben sind aber im Verhältnis zu den Herstellungskosten des Teils sehr hoch. Fotochemische Verfahren – also Beschichtung des Modells mit einer fotoempfindlichen Schicht, Belichtung, Entwicklung und Fixierung – sind denkbar, aber bei komplexen Formen schwierig zu realisieren, einmal abgesehen von den Problemen mit der Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Modelle. Wenn die visuelle Variable *Farbe* unbedingt notwendig ist wie in der Kartographie, muss das Aufbringen der Farbe in die Fertigung integriert werden, um die Kostenvorteile des *rapid prototyping* zu erhalten.

Zurzeit sind allein die Geräte Z510 und Z810 der Firma ZCorporation (www.zcorp.com) in der Lage, ein farbiges Modell mit ausreichender Auflösung des Farbmusters herzustellen (der Drucker Z810 hat ein größeres Bauvolumen). 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. 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 RP, 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 mit hoher Farbauflösung herzustellen.

Für kartographische Modelle ist die mechanische Stabilität der Werkstücke aus Keramikpulver mit anschließender Infiltration ausreichend, vorausgesetzt, die Modelle werden mit der angemessenen Vorsicht angefasst und bewegt und bei einigermaßen konstanter Temperatur und trocken aufbewahrt. Die zusätzlichen Eigenschaften der anderen Verfahren spielen für diesen Verwendungszweck keine große Rolle, etwa die erhöhte mechanische Festigkeit oder Hitzebeständigkeit, wie sie zum Beispiel für *rapid-tooling*-Anwendungen notwendig sind.

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 3-D-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 (www.looxis.de).



Abb 1 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 undurchsichtig (Abb. 1). 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 abgeleitet, in unserem Fall einer kartographischen Oberfläche in einer VRML-Datei. Streng genommen ist die Glasinnengravur kein RP-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, deshalb die Analogie mit einer Federzeichnung oder Radierung.

4 Fertigung der Modelle mit dem 3D-Drucker

Der 3D-Drucker Z510 kostet etwa 50.0000 Euro. Bei geringen Stückzahlen ist es deshalb wirtschaftlich sinnvoll, die Modelle im Auftrag fertigen zu lassen. Einige Firmen bieten Dienstleistungen für *rapid prototyping* mit unterschiedlichen Verfahren an. In unserem Fall wurden die Modelle von der Firma 4Dconcepts auf dem 3D-Drucker Z510 gebaut (www.4dconcepts.de). 4Dconcepts erhält die Datei mit der numerischen Repräsentation des Modells als Anhang an eine E-Mail. Nach einer Fehlerprüfung wird das Modell im 3D-Drucker Z510 aufgebaut. Anschließend wird der Block mit dem gewünschten Festiger infiltriert und an den Kunden versandt.

4.1 Numerische Kodierung des Modells

Das Modell besteht aus der 2.5D-Oberfläche, den Seitenwänden, dem Boden (der Rückseite) oder einem Sockel. Dazu kommen die Körper der Höhenlegende, die Maßstabsleiste, die Grenzen und andere Linien, weiterhin die Textketten einschließlich der Zahlen in den Legenden. Die äußere Haut des Modells wird durch eine Menge von 3D-Dreiecken definiert, die 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.

Die numerische Beschreibung des Modells muss in einer standardisierten Form an das Servicebüro versandt werden. Für Modelle mit Farbinformationen wird das Format VRML (*Virtual Reality Markup Language*) verwendet. Jedem Dreieck wird die Farbe über einen Zeiger auf einen Farbvektor zugewiesen.

4.2 Repräsentation von Linien

Für die Orientierung auf dem Modell sind topographische Anhaltspunkte notwendig. 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 visuelles Gleichgewicht gefunden werden.

Das sonst in der Computergraphik übliche Verfahren der Liniendarstellung als Textur auf den Dreiecken ist nicht anwendbar. An steilen Hängen „verschmieren“ die Pixel des Rasterbildes auf-

grund 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, meistens 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.

4.3 Text

Die Umrissse der Zeichen sind in den Dateien für die TrueType-Schriften als Linienzüge (*glyphs*) definiert. Die Linien 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 Form der Extrusion, der Seitenwände und der Kanten sind wählbar. Der 3D-Körper des Textzeichens wird wieder als Menge von Dreiecken in der VRML-Datei gespeichert.

5 3D-Modelle von kontinuierlichen Oberflächen

Zur Evaluierung der technischen Möglichkeiten des *rapid prototyping* wurden einige Modelle von 3D-Oberflächen angefertigt. Die Geometrie-Dateien und die Indikatoren wurden mit dem Software-Paket ArcGIS von ESRI aufbereitet. Die Interpolation der Oberflächen, die Erzeugung der Körper und Dreiecke und deren Speicherung in der VRML-Datei wurden mit eigener Software vorgenommen. Mit dem 3D-Drucker Z510 können Teile bis zu den Dimensionen 25 x 35 x 25 cm gefertigt werden. Die Dicke der einzelnen Schichten ist von 0,089 bis 0,2 mm einstellbar. Das Modell in Abbildung 2 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.



Abb 2 Durchschnittliche Preise für baureifes Land 2003. Inset: Legende und Text vergrößert

Das Modell in Abbildung 2 repräsentiert eine kontinuierliche Oberfläche für die durchschnittlichen Preisen für baureifes Land in den Kreisen der Bundesrepublik Deutschland (MÜLLER-KLEISSLER u. RACH 2004). Aus den Werten für die Bezugseinheiten 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. 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. Das Inset in Abbildung 2 zeigt einen Teil des Körpers für die Höhenlegende und den Legendentext, dazu die grünen und grauen Röhren der Grenzlinien.

6 Fazit

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 von visuellen Variablen. Die perspektivische Darstellung entspricht mehr den allgemeinen Sehgewohnheiten des Menschen, deshalb 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, zum Beispiel 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. Das ist vielleicht auch der Grund für die Renaissance von biologischen Modellen, etwa von Insekten in um das Hundertfache vergrößerten Dimensionen, für Ausstellungen und Museen (KRÄMER 2007).

Ein weiterer Effekt, der für die Nützlichkeit realer Modelle in bestimmten Kommunikationssituationen spricht, ergab sich gänzlich unerwartet. Als ich die Modelle zum ersten Mal meinen Kollegen zeigte, griffen fast alle 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 zum Beispiel zu für eine Besprechung oder Diskussion im kleineren Kreis. Anders als bei einer Präsentation auf Leinwand oder Monitor oder bei der 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 auch 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, Raumbenutzung 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 Lasersinnengravur lassen sich preiswert repräsentative Unikate herstellen, etwa personalisierte Geschenke mit thematischem Bezug oder Auszeichnungen und Trophäen für die Preisträger von Wettbewerben.

An den 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, zum Beispiel die Repräsentation der Linien als dünne Röhren, etwa die Form der Knickstellen oder die Texturierung der Röhren.

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

Literatur

- BRENNER, C. u. V. PAELKE (2006) Das Geo-Scope – ein Mixed-Reality-Ein-Ausgabegerät für die Geovisualisierung. In: Aktuelle Entwicklungen in Geoinformation und Visualisierung, Kartographische Schriften Band 10, Kirschbaum-Verlag, 47–54
- 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. Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Band 17, 270–276
- KRÄMER, T. (2007) Meister der Monster. DIE ZEIT Nr. 2, 4. Januar 2007, 28
- 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 Band 19, 9–38
- PÜTZ, T. u. M. SPANGENBERG (2006) Zukünftige Sicherung der Daseinsvorsorge. Wie viele Zentrale Orte sind erforderlich? In: Informationen zur Raumentwicklung, Heft 6/7.2006, 337–344
- RASE, W.-D. (1998) Modellierung und Darstellung von immateriellen Oberflächen. Forschungen Band 89, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn 1998
- RASE, W.-D. (2001) Volume-preserving interpolation of a smooth surface from polygon-related data. In: Journal of Geographical Systems (2001) 3: 199–213
- RENKA, R. J. (1988) Algorithm 660: QSHEP2D, Quadratic Shepard method for bivariate interpolation of scattered data. ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 14, No. 2, June 1988, 149–150
- TOBLER, W. R. (1979) Smooth pycnophylactic interpolation for geographical regions. In: Journal of the American Statistical Association, Vol. 74, No. 357, 519–535