

Immersive Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen und ihr Einsatz in der Stadtplanung

JURI ENGEL¹ & JÜRGEN DÖLLNER²

Zusammenfassung: Virtuelle 3D-Stadtmodelle ermöglichen die effektive Kommunikation komplexer stadträumlicher Informationen. Immersive Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen bietet einen intuitiven Zugang zu diesen Informationen und eröffnet neue Anwendungsfelder in der Stadtplanung, z. B. bei der Entscheidungsfindung, dem Marketing und der Öffentlichkeitspräsentation von Projekten, Vorgängen oder Konzepten. Immersive Visualisierung impliziert zahlreiche Anforderungen an das Softwaresystem. In diesem Beitrag untersuchen wir die softwaretechnischen Herausforderungen bei der Entwicklung eines solchen Systems und zeigen anhand eines Prototyps zur immersiven Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen wie man diese Herausforderungen bewältigen kann.

1 Einleitung

Stadtplanungsprojekte erstrecken sich über lange Zeiträume, involvieren eine große Anzahl an betroffenen Entscheidungsträgern und erfordern komplexe Entscheidungsfindung (HUNT ET AL. 2008). Viele der Entscheidungen müssen in einer frühen Projektphase getroffen werden und dabei die topologischen und geometrischen Gegebenheiten wie auch ökonomische, soziale und kulturelle Faktoren berücksichtigen (HAMILTON 2005). Dies erfordert einen schnellen Zugang zu stadträumlichen Informationen und insbesondere deren effektive Kommunikation. Die etablierten GIS (Geoinformationssysteme) sind jedoch einerseits als Experten-Werkzeuge konzipiert und basieren andererseits auf 2D-Konzepten, während die zugrundeliegenden Daten bei der Stadtplanung drei- oder vierdimensional sind (ISAACS ET AL. 2011).

Virtuelle 3D-Stadtmodelle ermöglichen die effektive Kommunikation komplexer dreidimensionaler stadträumlicher Informationen. Eine Vielzahl von Werkzeugen stellt Funktionen zur Visualisierung, Editierung und Analyse virtueller 3D-Stadtmodelle bereit (z. B. Autodesk Infrastructure Modeler, CityGRID und CityServer3D). Diese Systeme sind jedoch im Allgemeinen auch als Experten-Werkzeuge konzipiert und unterstützen die Visualisierung auf klassischen Ausgabemedien. Dadurch ist ihr Einsatz in Situationen die Kollaboration erfordern nur eingeschränkt möglich, da nur eine sehr beschränkte Anzahl an Personen an einem Desktop-System gleichzeitig arbeiten kann oder räumlich verteilt gearbeitet werden muss. Des Weiteren ist eine hohe Vorstellungskraft erforderlich, um sich in die virtuelle 3D-Umgebung hineinversetzen zu können. Stadtplanung ist jedoch ein kollaborativer Prozess, in dem viele Nichtexperten involviert sind. Entscheidungen müssen von Nichtexperten ebenso verstanden, diskutiert und getroffen werden wie von Experten.

Immersive Umgebungen bieten dagegen einen komplementären, intuitiven Zugang zu komplexen virtuellen 3D-Stadtmodellen. Immersion beschreibt dabei das Gefühl sich räumlich in der virtuellen Umgebung zu befinden und erhöht somit deren Virtualität (MACEACHREN ET AL., 1999). LUTZ (2004) unterscheidet drei Arten von immersiven Umgebungen anhand des

¹ Juri Engel, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam; juri.engel@hpi.uni-potsdam.de

² Jürgen Döllner, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam; doellner@hpi.uni-potsdam.de

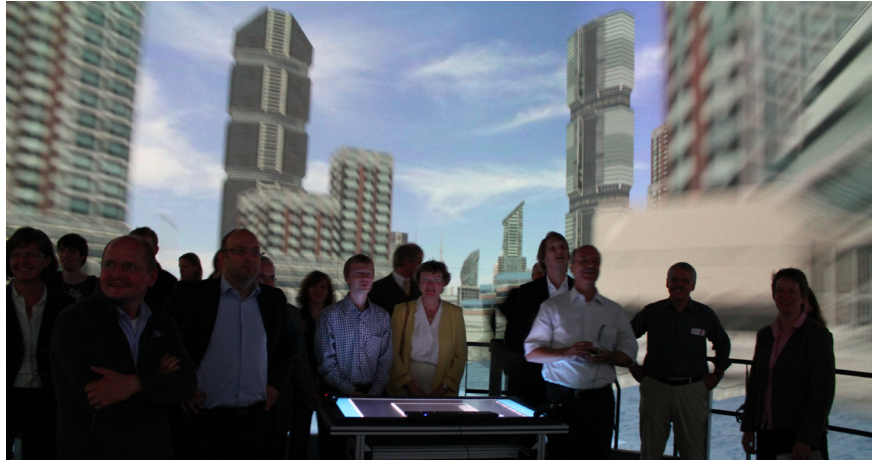


Abb. 1: Immersive Visualisierung eines virtuellen 3D-Stadtmodells im Elbe Dom

Sichtfeldes: immersive Desktop-Umgebungen, semi-immersive Umgebungen (z. B. Powerwalls) und voll-immersive Umgebungen (z. B. CAVEs) die das komplette Sichtfeld abdecken.

Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchungen bildet die voll-immersive Umgebung "Elbe Dom" des Fraunhofer IFF in Magdeburg, die in Abschnitt 2 näher erläutert wird. Diese voll-immersive Umgebung stellt ein herausragendes Kommunikationsmedium auf Basis virtueller 3D-Stadtmodelle, z. B. für die Entscheidungsfindung, das Marketing und die Öffentlichkeitspräsentation von Projekten, Vorgängen oder Konzepten, dar. Immersion ermöglicht dabei besseres räumliches Verständnis von komplexen 3D-Strukturen (SCHUHARDT & BOWMAN, 2007), beschleunigt die Erstellung von kognitiven Karten (PAUSCH ET AL., 1997) und erhöht somit die Effektivität bei der Bewältigung von räumlichen Aufgaben (TAN ET AL., 2004).

Immersive Visualisierung von 3D-Stadtmodellen impliziert zahlreiche Anforderungen an das Visualisierungssystem. In Abschnitt 3 untersuchen wir die sich daraus entwickelnden Herausforderungen und zeigen anhand eines Prototyps (Abb. 1) wie man diese bewältigen kann. In Abschnitt 4 werden die Anwendungsmöglichkeiten von immersiver Visualisierung in der Stadtplanung aufgezeigt. Den Abschluss bildet die Zusammenfassung in Abschnitt 5.

2 Elbe Dom

Der *Elbe Dom* am Fraunhofer IFF in Magdeburg ist ein 360° zylindrisches Projektionssystem für großflächige interaktive Visualisierung (Abb. 2). Die zylindrische Projektionsfläche ist 6,5 m hoch und hat einen Durchmesser von 16 m. Durch seine Abmessungen ist der Elbe Dom besonders geeignet zur Visualisierung von großen Modellen, z. B. virtuellen 3D-Stadtmodellen, im 1:1 Maßstab. Andere Einsatzgebiete sind bisher z. B. Fabrik- und Anlagendesign, Simulation und Training von technischem Personal, und Marketing (BELARDINELLI ET AL., 2008).

Das 360°-Panorama wird mit Hilfe von sechs Laserprojektoren mit jeweils einem Bildwinkel von 68° und einer Auflösung von 1600×1200 Pixel erzeugt. Diese Auflösung entspricht 43 % der Maximalauflösung des menschlichen Auges (SCHOOR ET AL., 2008). Die Projektoren sind nicht Stereoskopie-fähig.

Die Bildsynthese wird von einem Render-Cluster mit einem Computer pro Projektor durchgeführt. Ein zusätzlicher Computer ist für die Synchronisation des Clusters und die

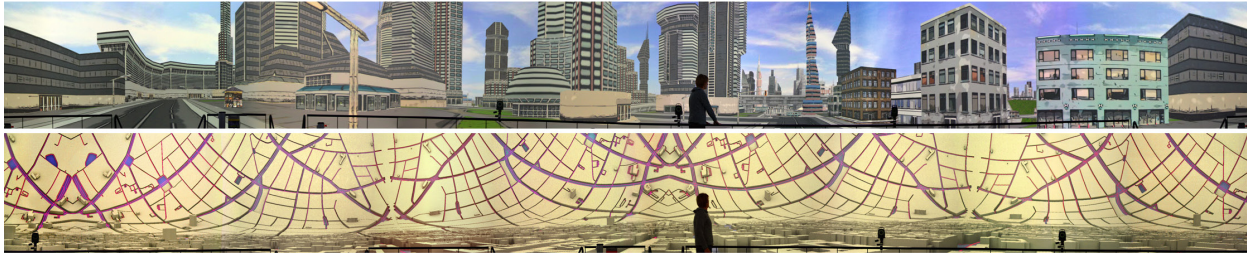


Abb. 2: Der Nutzer ist komplett umgeben von der 360° Visualisierung des 3D-Stadtmodells. Oberes Bild: realistische Visualisierung unter Verwendung der Zentralperspektive. Unteres Bild: Multiperspektive Visualisierung eines generalisierten 3D-Stadtmodells zur Erhöhung des visuellen.

Verarbeitung von Nutzereingaben zuständig. Ein Trackingsystem mit 12 Infrarot (IR) Kameras ermöglicht Positions- und Orientierungsbestimmung von Objekten in Echtzeit mit einer Genauigkeit von 2 mm. Tracking von Händen und Fingern ermöglicht beispielsweise kabellose Interaktion mittels Gesten.

Das Sound-System, bestehend aus 11 Lautsprechern, kann konfiguriert werden um einen Raumklang innerhalb eines Bereichs mit 4 m Durchmesser zu erzeugen. Dies ermöglicht mehreren Nutzern gleichzeitig die räumliche Ortung von virtuellen Schallquellen.

3 Herausforderungen für immersive Visualisierungssysteme

Bei der Entwicklung eines Prototyps zur immersiven Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen sind wir auf zahlreiche softwaretechnische Herausforderungen gestoßen. Im folgenden Kapitel werden diese Herausforderungen sowie Möglichkeiten diese zu bewältigen diskutiert.

3.1 Architektur und Synchronisation

Die Bildsynthese für hochauflösende Mehrfach-Projektor-Systeme muss in einem *Render Cluster* verteilt werden, weil ein einzelner Computer in der Regel nicht in der Lage ist in Echtzeit für alle Projektoren gleichzeitig Bilder zu erzeugen. Ein Render Cluster ist eine Gruppe vernetzter Computer (*Render Nodes*) zur parallelen Bildsynthese. NI ET AL. (2006) und SOARES ET AL. (2008) geben einen Überblick über Algorithmen, Architekturen und Technologien für hochauflösende Displays und parallele Bildsynthese.

In unserem Prototyp haben wir den *Sort-First* Algorithmus implementiert (MOLNAR ET AL., 1994). Dabei wird das zu synthetisierende Bild segmentiert und die Segmente an die Render Nodes verteilt. Da im Elbe-Dom ein Render Node pro Projektor zur Verfügung steht, ist die Segmentierung und Verteilung trivial. Jeder Render Node synthetisiert die Bilder für den angeschlossenen Projektor. Die Synchronisation beschränkt sich dabei auf ein Minimum. Im Gegensatz zu *Sort-Middle* und *Sort-Last* Algorithmen müssen weder Bilder noch Geometrie zwischen den Nodes übertragen werden. Es existieren zahlreiche Frameworks, die einen oder mehrere dieser Algorithmen implementieren, z. B. VR Juggler, FlowVR und Equalizer.

Die Aufgabe der Synchronisation in einem Mehrfach-Projektor-System ist es sicherzustellen, dass die Bilder der unterschiedlichen Projektoren als ein kohärentes hochauflösendes Bild erscheinen. Dies wird erreicht durch *Gen-Lock*, *Data-Lock* und *Frame-Lock* (SOARES ET AL., 2008). *Gen-Lock* ist die Synchronisation der Videosignale, z. B. für Stereoskopie, ist meistens in Hardware implementiert und bedarf softwareseitig lediglich einer Konfiguration. *Data-Lock* ist

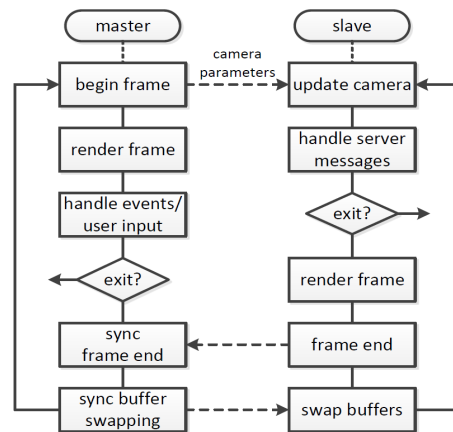


Abb. 3: Synchronisation des Clusters zur Bildsynthese. Am Anfang und Ende jedes Frames synchronisiert der Master-PC die Kamerakonfiguration und den Puffertausch der Slave-PCs.

die Synchronisation der für die Bildsynthese erforderlichen Daten, darunter auch die Position und Orientierung der virtuellen Kamera. Data-Lock ist anwendungsspezifisch und muss in Software implementiert werden. Abbildung 3 verdeutlicht das Synchronisationskonzept unserer Implementierung. Am Anfang jedes Frames überträgt der für die Synchronisation verantwortliche Computer, der sogenannte *Master*, die Parameter der virtuellen Kamera an alle zu synchronisierenden Computer, die *Slaves*, die ihre lokale Kamera entsprechend aktualisieren. Frame-Lock stellt sicher, dass alle Projektoren das nächste Bild gleichzeitig anzeigen. Fehlendes Frame-Lock führt zu *Tearing*-Artefakten, d.h. die Einzelbilder wirken verschoben zueinander. Dies wird durch Synchronisation am Ende jedes Frames erreicht. Die Slaves benachrichtigen den Master, dass die Bildsynthese abgeschlossen ist und warten (*frame end*). Wenn alle Slaves bereit sind, sendet der Master eine entsprechende Nachricht (*synch buffer swapping*), woraufhin alle Slaves die Bildpuffer tauschen und somit das synthetisierte Bild darstellen.

3.2 Herausforderungen bei der Bildsynthese

Eine wichtige Aufgabe der Bildsynthese ist die Bereitstellung von Tiefeninformationen, *Depth Cues*, die eine Wahrnehmung der Tiefe ermöglichen (PFAUTZ, 2000, CUTTING & VISHTON, 1995). Tiefenwahrnehmung ist die Fähigkeit, den Abstand zu und zwischen den Objekten einzuschätzen und die Welt damit dreidimensional wahrzunehmen. Eine starke Wahrnehmung der Tiefe erhöht das Gefühl der Immersion (BIGOIN ET AL., 2007).

Depth Cues können in monokulare, die mit einem Auge wahrnehmbar sind, und binokulare, die beide Augen zur Wahrnehmung benötigen, unterschieden werden. Binokulare Depth Cues, z. B. Stereoskopie, sind wichtig für nahe Objekte, spielen aber nur eine geringe Rolle bei Objekten, die weiter als 10 m entfernt sind (CUTTING & VISHTON, 1995, NAGATA, 1993) und damit bei der Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen im 1:1 Maßstab.

Wir haben zahlreiche monokulare Depth Cues mit Hilfe der Real-Time Rendering Pipeline (AKENINE-MÖLLER ET AL., 2008) implementiert, z. B. lineare Perspektive, relative Größe, Texturgradient, Verdeckung und Bewegungsparallaxe. Schatten und Schattierung sind auch wichtige Depth Cues zur Kommunikation von Formen und Abständen von Objekten. Um diese zu erzeugen nutzen wir, neben lokaler Beleuchtung, *Ambient Occlusion* (AKENINE-MÖLLER ET AL., 2008) zur Simulation von globaler Beleuchtung.

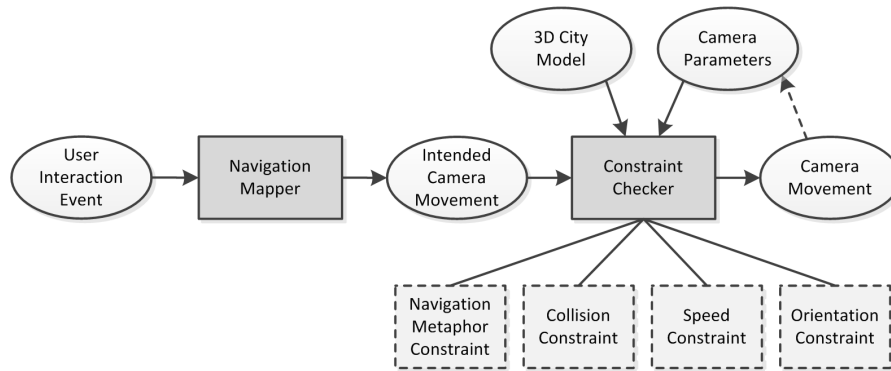


Abb. 4: Navigation mittels intelligenter Interaktionstechniken. Nutzereingaben werden indirekt auf Kamerabewegungen abgebildet und zusätzlich auf Einschränkungen geprüft um unerwünschte Kameraparameter auszuschließen.

Um mit Tiefenunschärfe einen weiteren Depth Cue zu erzeugen, stellen wir die Objekte im Hintergrund unscharf dar. Auch MATHER (1996) stellt fest, dass „der Realismus von computergenerierten Bildern durch das Hinzufügen von selektiver Unschärfe in Hintergrundbereichen erhöht werden kann“. Ein weiterer Depth Cue ist die Luft- und Farbperspektive. Dieser wird in der Computergraphik oft durch Nebel approximiert.

Die fotorealistische Darstellung, die bei der Exploration von virtuellen 3D-Stadtmodellen oft gewünscht ist, stellt zusätzliche Anforderungen an die Bildsynthese. Erst durch eine glaubhafte visuelle Darstellung ist eine volle Immersion möglich, denn visuelle Fehler und zu geringe Auflösung von Geometrie und Texturen fallen dem Nutzer auf, lenken ihn ab und verringern somit die Immersion. Besondere Aufmerksamkeit muss dabei der Beleuchtung, der Vegetation und den atmosphärischen Effekten wie Himmel und Wolken gewidmet werden, da der Mensch mit diesen Objekten und Phänomenen eine hohe natürliche Seherfahrung hat.

3.3 Interaktion und Navigation

Interaktivität ist eins der Hauptfaktoren, die zur Virtualität einer künstlichen Umgebung beitragen (MACEACHREN ET AL., 1999), und ist somit essentiell für immersive Visualisierungssysteme. Bei der Interaktion dürfen die Eingabegeräte den Nutzer nicht von der virtuellen 3D-Umgebung ablenken, da die Immersion sonst reduziert wird. So sollte die Bewegung des Nutzers nicht eingeschränkt werden und die Eingabegeräte dürfen den Nutzerfokus nicht auf sich ziehen, um bedient werden zu können. In unserem Prototypen kommt eine 3D-Maus zum Einsatz, andere Möglichkeiten sind z. B. Flight Stick oder Gestensteuerung durch Handtracking.

Eine zusätzliche Anforderung an immersive Visualisierung ist die intuitive Navigation. Eine vom Nutzer nicht erwartete Reaktion der virtuellen Umgebung auf Eingaben reduziert die Akzeptanz der Anwendung und somit die Immersion. Um eine natürliche Navigation zu unterstützen, wird der Nutzer durch intelligente Interaktionstechniken assistiert (BUCHHOLZ ET AL., 2005).

Intelligente Interaktionstechniken nutzen Navigationsmetaphern, z. B. Fußgänger- oder Hub-schraubemetapher, um Nutzereingaben indirekt auf Kamerabewegungen abzubilden (Abb. 4). Des Weiteren werden Beschränkungen (*Constraints*) definiert um Kollisionen und Orientierungslosigkeit des Nutzers zu vermeiden. Bei immersiver Visualisierung kann es durch die Diskrepanz zwischen dem Gleichgewichts- und dem visuellen Sinn zu Simulatorübelkeit kommen. Um dies zu vermeiden werden durch Constraints abrupte Änderungen von Position

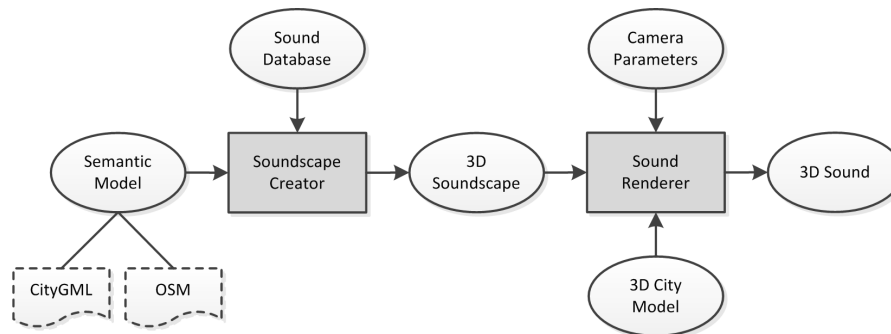


Abb. 5: Erzeugung einer realistischen 3D-Soundlandschaft. Die Geräusche werden anhand von semantischen Informationen aus einem Katalog ausgewählt und im 3D-Stadtmodell verortet. Zur Laufzeit werden die Einzelgeräusche zu einer 3D-Soundlandschaft synthetisiert.

und Orientierung der virtuellen Kamera unterbunden, sowie ihre maximale Geschwindigkeit und Neigung eingeschränkt (KOLASINSKI, 1995).

3.4 Immersive 3D-Soundlandschaft

Eine glaubhafte 3D-Soundlandschaft, die der konkreten natürlichen gezeigten Situation entspricht, erzeugt eine akustische Immersion und trägt so maßgeblich zur Gesamtimmersion bei. PATERSON ET AL. (2010) zeigt, dass eine semantikbasierte und standortbezogene 3D-Soundlandschaft das emotionale Engagement und somit die Immersion erhöht.

LACEY ET AL. (2011) erzeugt eine realistische 3D-Soundlandschaft für ein virtuelles 3D-Stadtmodell durch Aufnahme von tatsächlichen lokalen Geräuschen und ihre Verortung im virtuellen 3D-Stadtmodell. Dieser Prozess erfordert ein hohes Maß an manueller Arbeit. Ein generischer Ansatz ist es, einen Katalog von repräsentativen urbanen Geräuschen zu nutzen und diese anhand von semantischen Informationen, z. B. aus einem CityGML Modell (KOLBE, 2009), in der virtuellen 3D-Umgebung zu platzieren (Abb. 5). Zur Laufzeit wird aus den einzelnen Geräuschen eine 3D-Soundlandschaft unter Berücksichtigung von Verdeckungen, virtueller Kameraposition und Bewegung synthetisiert.

4 Anwendungen in der Stadtplanung

Immersive Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen beispielsweise im Elbe Dom bietet zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in der Stadtplanung z. B. bei der Entscheidungsfindung, dem Marketing und der Öffentlichkeitspräsentation von Projekten, Vorgängen oder Konzepten.

Mehrere Entscheidungsträger können das 3D-Stadtmodell zur Entscheidungsunterstützung gemeinsam erleben und erkunden. Die Nutzer können dabei das Modell über die Kamerasteuerung frei begehen und unterschiedliche Alternativen aus allen Blickwinkeln betrachten, z. B. sowohl aus der Fußgänger- als auch aus der Vogelperspektive. Neben dem allgemeinen Erscheinungsbild können beispielsweise Sichtachsen kontrolliert und verglichen werden. Durch die Immersion werden dabei die räumlichen Zusammenhänge besser verstanden. Dadurch können die Auswirkungen des Planvorhabens besser eingeschätzt werden und Entscheidungen können schneller und effektiver getroffen werden.

Bei der Öffentlichkeitspräsentation kann durch die Größe des Elbe Doms eine relativ große Gruppe von Bürgern (ca. 30-40) das virtuelle 3D-Stadtmodell gleichzeitig erleben. Durch die

Visualisierung im 1:1 Maßstab und durch Immersion wird das virtuelle 3D-Stadtmodell insbesondere aus der alltäglichen Perspektive anschaulich kommuniziert. Dadurch können sich die Bürger leichter in Planvorhaben hineinversetzen und es wird ein besseres Verständnis von Entscheidungen und ihren Konsequenzen erreicht, was zu einer höheren Akzeptanz führen kann. Auch im Kontext des Standortmarketings bietet die Größe der Anlage die Möglichkeit die Standorte „in situ“ zu betrachten. Zusätzlich wird durch die Immersion eine hohe Einprägsamkeit und hoher Wiedererkennungswert erreicht.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Anwendung von immersiven 3D-Umgebungen am Beispiel des Elbe Doms, einem 360° Projektionssystem, in der Stadtplanung vorgestellt. Die Anwendungsfelder reichen von der Unterstützung bei Entscheidungsfindungsprozessen, über Öffentlichkeitspräsentation, bis zum Standortmarketing.

Bei der Entwicklung eines Prototyps zur Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen in immersiven 3D-Umgebungen haben wir zahlreiche softwaretechnische Herausforderungen identifiziert. In diesem Paper haben wir diese Herausforderungen diskutiert und Möglichkeiten zu deren Bewältigung aufgezeigt.

Der Hauptfokus des vorgestellten Prototyps ist auf immersiver Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen mit semi-automatischen 3D-Interaktionskonzepten. In Zukunft planen wir die Navigation um die vorgestellten Constraints zu erweitern um Simulatorübelkeit weiter zu reduzieren. Des Weiteren werden wir eine semantische 3D-Soundlandschaft integrieren um das Gefühl der Immersion zu intensivieren.

Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist Teil der InnoProfile Nachwuchsforschergruppe 3D-Geoinformationen (www.3dgi.de). Wir danken außerdem dem Fraunhofer IFF in Magdeburg (www.vdte.de) für die freundliche Unterstützung und den Zugang zum Elbe Dom.

Literaturverzeichnis

- AKENINE-MÖLLER, T., HAINES, E., & HOFFMAN, N., 2008: Real-Time Rendering 3rd Edition, Natick, MA, USA: A. K. Peters, Ltd.
- BELARDINELLI, C., BLÜMEL, E., MÜLLER, G., & SCHENK, M., 2008: Making the virtual more real: research at the Fraunhofer IFF virtual development and training centre, Cognitive processing, **9**, S. 217–224.
- BIGOIN, N., PORTE, J., KARTIKO, I., & KAVAKLI, M., 2007: Effects of depth cues on simulator sickness, ICST IMMERSCOM 2007, **17**, S. 1-4.
- BUCHHOLZ, H., BOHNET, J., & DÖLLNER, J., 2005: Smart navigation strategies for virtual landscapes, in Trends in Real-time Visualization and Participation, S. 124–131.

- CUTTING, J. E. & VISHTON, P. M., 1995: Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth, in *Perception of space and motion*. Academic Press, S. 69–117.
- HAMILTON, A., WANG, H., TANYER, A. M., ARAYICI, Y., ZHANG, X. & SONG, Y., 2005: Urban information model for city planning, *ITcon* Vol. 10, S. 55-67.
- HUNT, D.V.L., LOMBARDI, D.R., ROGERS, C.D.F. & JEFFERSON, I., 2008: Application of sustainability indicators in decision-making processes for urban regeneration projects, *Engineering Sustainability*, **161**(1), S. 77-91.
- ISAACS, J., GILMOUR, D., BLACKWOOD, D. & FALCONER, R., 2011: Immersive and non immersive 3d virtual city: decision support tool for urban sustainability, *ITcon*, **16**, S. 115–162.
- KOLASINSKI, E. M., 1995: Simulator Sickness in Virtual Environments: Executive Summary, U.S. Army Research Institute, Tech. Rep.
- KOLBE, T. H., 2009: Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML, *3D Geo-Information Sciences*, Springer Berlin Heidelberg, S. 15–31.
- LACEY, J. & HARVEY, L., 2011: Sound Cartography Approaches to Urban Soundcape Research : CitySounds and Sites-of-Respite in the CBD of Melbourne, *Mapping Environmental Issues in the City*, ser. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, S. 246–265.
- LUTZ, B., 2004: Konzepte für den Einsatz von Virtueller und Erweiterter Realität zur interaktiven Wissensvermittlung, Ph.D. dissertation, Technischen Universität Darmstadt.
- MACEACHREN, A. M., EDSALL, R., HAUG, D., BAXTER, R., OTTO, G., MASTERS, R., FUHRMANN, S. & QIAN, L., 1999: Virtual environments for geographic visualization: potential and challenges, *NPIVM '99*, S. 35–40.
- MATHER, G., 1996: Image blur as a pictorial depth cue, *Proc Biol Sci*, **263** (1367), S. 169–172.
- MOLNAR, S., COX, M., ELLSWORTH, D., & FUCHS, H., 1994: A Sorting Classification of Parallel Rendering, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **14** (4), S. 23–32.
- NAGATA, S., 1993: How to reinforce perception of depth in single two-dimensional pictures, Taylor & Francis, Inc., S. 527–545.
- NI, T., SCHMIDT, G. S., STAADT, O. G., LIVINGSTON, M. A., BALL, R., & MAY, R., 2006: A survey of large high-resolution display technologies, techniques, and applications, *Virtual Reality Conference, IEEE*, S. 223–236.
- PATERSON, N., NALIUKA, K., JENSEN, S. K., CARRIGY, T., HAAHR, M., & CONWAY, F., 2010: Design, implementation and evaluation of audio for a location aware augmented reality game, *Proc. of the 3rd International Conference on Fun and Games*.
- PAUSCH, R., PROFFITT, D., & WILLIAMS, G., 1997: Quantifying immersion in virtual reality, *SIGGRAPH'97*.
- PFAUTZ, J. D., 2000: Depth perception in computer graphics, Ph.D. dissertation, University of Cambridge.
- SCHOOR, W., MASIK, S., MECKE, R., SEIFFERT, U., & SCHENK, M., 2008: VR Based Visualization and Exploration of Barley Grain Models with the Immersive Laser Projection System - Elbe Dom, *10th Virtual Reality International Conference*, S. 217–224.
- SCHUCHARDT, P. & BOWMAN, D. A., 2007: The benefits of immersion for spatial understanding of complex underground cave systems, *VRST '07*.
- SOARES, L. P., RAFFIN, B., & JORGE, J. A., 2008: PC Clusters for Virtual Reality, *International Journal of Virtual Reality*, **7** (1), S. 67–80.
- TAN, D. S., GERGLE, D., SCUPELLI, P. G. & PAUSCH, R., 2004: Physically large displays improve path integration in 3D virtual navigation tasks, *CHI 2004*, **6**(1), S. 439-446.