

ZUKUNFT UND VERGANGENHEIT – 4D-MODELLIERUNG ALS WERKZEUG FÜR DIE BAUPLANUNG UND DIE BAUGESCHICHTLICHE FORSCHUNG

André Borrmann – Katja Heine

EINLEITUNG

Unter 4D-Modellen versteht man die Verknüpfung einzelner Objekte eines 3D-Modells mit Zeitpunkten bzw. Zeiträumen [MCKINNEY et al. 1996]. Für die Bauplanung bedeutet dies zumeist, dass ein 3D-Modell des zu errichtenden Bauwerks mit den antizipierten Konstruktionszeiträumen bzw. Fertigstellungszeitpunkten verknüpft wird. Ergebnis dieser Verknüpfung ist eine animierte Darstellung, die Aussagen über die Machbarkeit bzw. potentielle Probleme im Bauablauf ermöglicht. Darüber hinaus können jedoch auch die Bewegungsabläufe von Geräten und Hilfsmitteln in das 4D-Modell aufgenommen werden, um das eingesetzte Bauverfahren detailliert zu beschreiben.

Die 4D-Modellierung von Bauabläufen bildet einen wesentlichen Schwerpunkt des Bayerischen Forschungsverbundes „ForBAU – Die virtuelle Baustelle“, der von 2008 bis 2010 von der bayerischen Forschungsstiftung gefördert wird. Der Forschungsverbund konzentriert sich dabei auf die Planung und Realisierung von Infrastrukturmaßnahmen, genauer von Trassen und darin befindlicher Brückenbauwerke. Hierzu werden Verfahren für eine integrative dreidimensionale Modellierung des gesamten Bauvorhabens entwickelt und mit Methoden der Prozesssimulation verknüpft [BORRMANN et al, 2009].

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zur 4D-Modellierung in der Bauplanung und schlägt eine Brücke zur möglichen Verwendung im Kontext der bauhistorischen Forschung: Die Verknüpfung eines bauhistorischen 3D-Modells mit den zugehörigen Bauphasen erlaubt nicht nur eine zeitlich sequentielle Darstellung der Bauphasen zum Zwecke der Validierung bauhistorischer Annahmen und Präsentation gegenüber Dritten, sondern bildet auch eine geeignete Grundlage für die formale Analyse mit Hilfe einer raum-zeitlichen Anfragesprache.

4D-MODELLIERUNG IN DER BAUPLANUNG

4D-ANIMATION VON BAUABLÄUFEN

In der Bauplanung werden zunehmend moderne computergestützte Methoden eingesetzt, die auf dem Erzeugen eines Building Information Models (BIM) beruhen [EASTMAN et al, 2008]. Dabei handelt es sich um ein intelligentes Modell des geplanten Bauwerks, das neben der 3D-Geometrie auch semantische Informationen zu den einzelnen Bauteilen (wie Typ, Material, Brandschutzklasse etc.) und deren Beziehungen untereinander beinhaltet.

Der Bauablauf wird hingegen mit Hilfe von Projektplanungsprogrammen geplant, in denen einzelne Vorgänge als Balken in einem Gantt-Diagramm modelliert werden. Kombiniert man die darin festgehaltenen Konstruktionszeiträume bzw. Fertigstellungszeiträume mit den betreffenden Bauteilen des 3D-Modells lässt sich auf einfache Weise eine 4D-Animation des geplanten Bauablaufs erzeugen. Diese erlaubt eine visuelle Analyse des Bauablaufs durch den verantwortlichen Planer hinsichtlich der grundsätzlichen Machbarkeit sowie die Identifikation potentieller Probleme [MCKINNEY et al. 1996, MCKINNEY & FISCHER 1998].

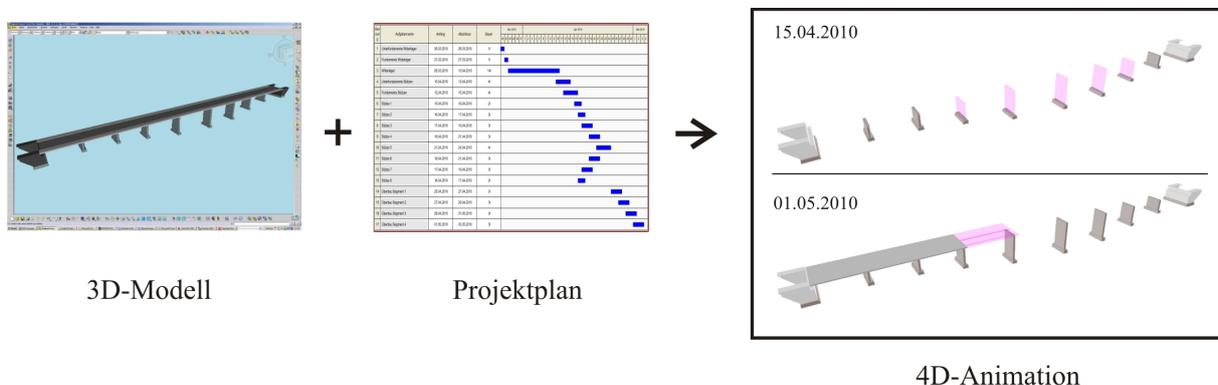


Abbildung 1: Die Verknüpfung eines 3D-Modells mit einem Projektplan erlaubt eine 4D-Animation des Bauablaufs.

In Abbildung 1 ist beispielhaft die Verknüpfung eines 3D-Brückenmodells mit dem zugehörigen Projektplan sowie das resultierende 4D-Modell dargestellt. Die gerade im Bau befindlichen Teile werden farbig hervorgehoben.

Werden neben der zeitlichen Konstruktionsreihenfolge von Bauteilen auch Hilfskonstruktionen wie Schalung und Rüstung modelliert und die Bewegungen einzelner Maschinen und Hilfsgeräte in die Animation mit aufgenommen, kann der Bauablauf noch präziser erfasst werden und bspw. mögliche räumliche Konflikte identifiziert werden. Als Beispiel seien die Arbeiten von Sampaio et al. an der Technischen Universität Lissabon genannt, die detaillierte Animationsmodelle für verschiedene Verfahren im Brückenbau erstellt haben, u.a. für das Freivorbau- und das Vorschubverfahren¹ [SAMPAIO 2003, MARTINS & SAMPAIO 2009]. Eine derartige Animation kann im Rahmen der Arbeitsvorbereitung und als Diskussionsgrundlage für die ausführenden Firmen verwendet werden. Darüber hinaus eignet sie sich auch hervorragend für die Lehre im konstruktiven Ingenieurbau.

Es ist jedoch wichtig festzuhalten, dass bei jeder Form der 4D-Animation die einzelnen Zeitpunkte, zu denen bestimmte Ereignisse eintreten, durch den Modellierer vorgegeben werden. Im Unterschied zur Simulation werden beispielsweise weder Abhängigkeiten zwischen einzelnen Arbeitsschritten noch die Verfügbarkeit der notwendigen Ressourcen geprüft. Entsprechend können aus einer 4D-Animation keinerlei Aussagen hinsichtlich der tatsächlichen Durchführbarkeit des Vorhabens innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums abgeleitet werden.

4D-SIMULATION

Die Prozesssimulation wird eingesetzt, wenn verlässliche Aussagen zum Auslastungsgrad von Ressourcen und zur Gesamtprozessdauer gewünscht sind. Dabei werden einzelne Arbeitsschritte modelliert und deren Abhängigkeit untereinander sowie die benötigten Ressourcen berücksichtigt. Für die eigentliche Simulation können verschiedene Methoden zum Einsatz kommen, darunter die Petri-Netz-Modellierung und die ereignisdiskrete Simulation. Letztere hat sich vor allem im Bereich der Fabrikplanung weitgehend durchgesetzt. Das Verfahren der ereignisdiskreten Simulation wird im Rahmen des ForBAU-Projekts für die Untersuchung von Erdbau- und Brückenbauprozessen eingesetzt [JI et al., 2009].

Ergebnis des Simulationslaufs ist ein detaillierter Zeitplan, dem Zeitdauern einzelner Prozessschritte entnommen und ggf. zu größeren funktionalen Einheiten aggregiert werden können. Verknüpft man diesen Zeitplan wiederum mit einer 3D-Repräsentation des Bauvorhabens einschließlich der eingesetzten Geräte und Hilfskonstruktionen, erhält man eine 4D-Simulation des Baugeschehens.

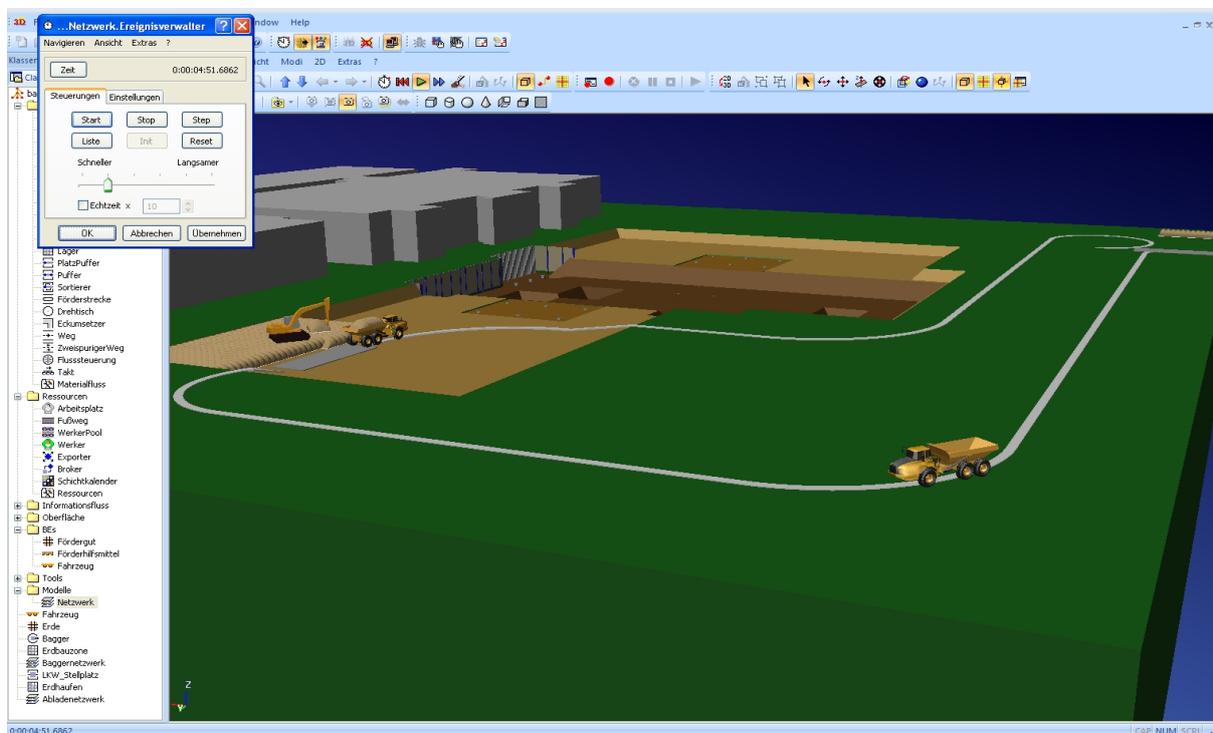


Abbildung 2: 4D-Simulation eines Erdbauprozesses. Simuliert wird das Beladen und Entladen zweier Dumper.

¹ Ein daraus generierter Film ist unter <http://www.octaviomartins.com/lancamentoIncremental/> verfügbar.

In Abb. 2 ist beispielhaft ein Schnappschuss einer 4D-Erdbausimulation dargestellt. Dabei wird der Aushub von Erdmaterial mittels eines Baggers sowie der Transport des Erdmaterials von der Aushubstelle zu einer Deponie mittels zweier Dumper-Fahrzeuge simuliert. Wesentlich ist dabei, dass der zugrundeliegende Bagger-Simulationsbaustein so lange den Aushub vornimmt, bis der bereitgestellte Dumper voll beladen ist. Danach unterbricht er den Aushubvorgang und wartet, bis der nächste Dumper zum Beladen bereitsteht. Auf diese Weise wird die Abhängigkeit der beiden Prozessbausteine abgebildet und es lässt sich die Gesamtprozessdauer bei der vorliegenden Konfiguration bestimmen. Sowohl das Bagger-Spiel als auch die Transportzeiten unterliegen dabei statistischen Schwankungen. Das Ergebnis der Simulation ist damit wiederum eine stochastisch verteilte Gesamtprozessdauer. Des Weiteren lässt sich die Simulation hinsichtlich des Auslastungsgrads von Bagger und Dumper auswerten. Wird eine zu starke Unterauslastung des Baggers durch häufiges Warten festgestellt, kann die Anzahl der eingesetzten Bagger erhöht und eine erneute Simulation gefahren werden. Somit lassen sich schnell und flexibel verschiedene Konfigurationen durchspielen.

Problematisch bei der Verwendung der Ereignis-diskreten Simulation für Bauprozesse ist, dass die Reihenfolge von Prozessschritten weitgehend starr vorgegeben werden muss. Dies bildet die Realität in der stationären Industrie ab, wo häufig Fließbänder eingesetzt werden, nicht jedoch die zumeist spontan ablaufenden Prozesse auf Baustellen. Um dem zu begegnen, wurde von König et al. die Constraint-basierte Simulationsmethode entwickelt [BEISSERT et al. 2007, KÖNIG et al. 2007]. Diese gibt keinen starren Prozessablauf vor, sondern wählt den nächsten auszuführenden Arbeitsschritt dynamisch unter Verwendung einer Zufallsfunktion. Dabei werden die zum Ausführen einzuhaltenden Randbedingungen wie benötigte Ressourcen und notwendig abgeschlossene Prozessschritte als sogenannte Constraints modelliert. Nur Arbeitsschritte, für die alle Constraints erfüllt sind, werden in die Liste aufgenommen, aus der der nächste auszuführende Arbeitsschritt ausgewählt wird. Im Rahmen des ForBAU-Projekts wird die Constraint-basierte Methode zur Simulation von Brückenbauabläufen eingesetzt [WU et al., 2009].

4D-MODELLIERUNG IN DER BAUHISTORISCHEN FORSCHUNG

Die Methoden der 4D-Modellierung lassen sich auch in der bauhistorischen Forschung gewinnbringend einsetzen. Beispielsweise können mit Hilfe von 4D-Animationen bauhistorische Annahmen und Theorien auf Plausibilität untersucht werden. Um dies zu illustrieren, wurde auf Grundlage des 3D-Modells der Domus Severiana auf dem Palatin in Rom eine 4D-Modell generiert und sequentiell in den einzelnen Entstehungsphasen animiert. Darüber hinaus scheint es sinnvoll, die Möglichkeiten der 4D-Simulation für die Untersuchung und Validierung von Bauabläufen an historischen Bauwerken und von historischen Bautechniken zu nutzen.

AUFNAHME UND BAUHISTORISCHE DOKUMENTATION DER DOMUS SEVERIANA

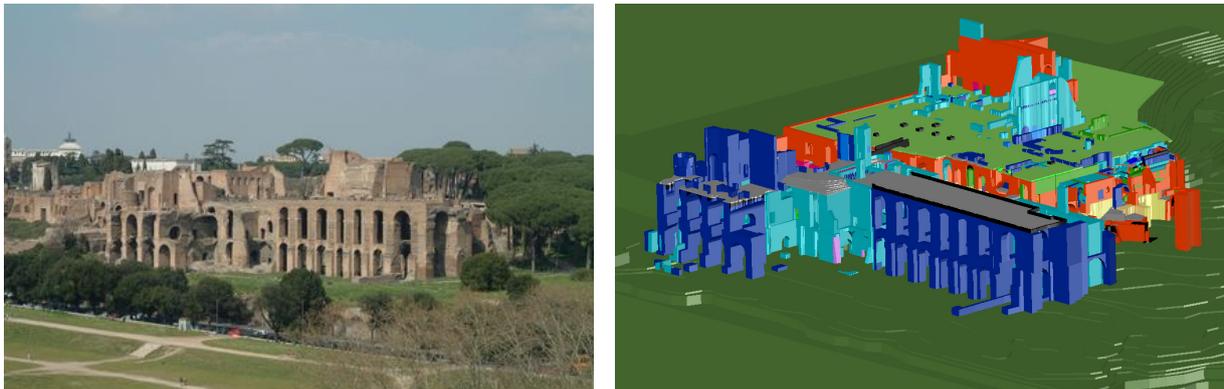


Abbildung 3: Ansicht von Süden (links) und 3D-Modell (rechts) der Domus Severiana

Die Domus Severiana und das Gartenstadion auf dem Palatin in Rom wurden in den Jahren 1998-2003 von den Lehrstühlen für Baugeschichte und Vermessungskunde der BTU Cottbus detailliert vermessen und dokumentiert [WULF 2001, RIEDEL, WEFERLING 2002]. Auf Grund der Komplexität des Bauwerkes wurde eine ausschließliche Dokumentation des Gebäudekomplexes in klassischen 2D Grundriss-, Schnitt- und Ansichtszeichnungen als nicht ausreichend erachtet und ergänzend ein digitales 3D-Gebäudemodell erstellt [BRASSE, RIEDEL, 2006]. Um die Geometriedaten mit Informationen zu den einzelnen Bauteilen verknüpfen zu können, wurde ein Bauwerksinformationssystem für die Domus Severiana entwickelt. Dieses wurde so konzipiert, dass es grundsätzlich zur Dokumentation beliebiger Bauwerke einsetzbar ist und in das webbasierte Informationssystem CISAR für die Dokumentation archäologischer und bauhistorischer Forschungen, welches ebenfalls an der

BTU Cottbus als openSource-Lösung entwickelt worden ist, als Modul integriert werden konnte [HEINE u.a. 2006, BRASSE u. a. 2009].

Basis-Objekte des Bauwerksmodelles sind Wände und horizontale Elemente wie Decken und Fußböden, welche zunächst als Volumenkörper in AutoCAD® modelliert und anschließend, um sie im Internet einfach visualisieren zu können, ins VRML-Format exportiert worden sind. Diesen Basisobjekten wurden mittels einer umfangreichen Datenbank Sachinformationen, wie Typologien, Konstruktionsdetails und Datierungen, aber auch Fotos und Zeichnungen zugeordnet. Topologische Beziehungen wie die Nachbarschaft von Räumen wurden explizit in der Datenbank hinterlegt. Dem Entwurf der Datenbank wurde eine sehr hohe Bedeutung beigemessen, da die Inhalte und Beziehungen der einzelnen Tabellen den physikalischen Aufbau und die Funktionalität des Bauwerkes widerspiegeln müssen. Die Abbildung 4 zeigt das Konzept der „Raumbuch“-Datenbank und verdeutlicht die Komplexität der Datenbankstruktur. Die Datensätze der Sachdatentabellen sind mit den Geometriedaten im VRML-Format verknüpft worden, so dass es möglich ist, Abfrageergebnisse aus der Datenbank in Form der zugehörigen 3D-Geometrieobjekte zu visualisieren oder aber auch Sachdaten zu den einzelnen Objekten im Geometriemodell anzuzeigen.

Ein Nachteil des derzeitigen Konzeptes des Bauwerksinformationssystems besteht darin, dass die Geometrie der Bauwerksobjekt ausschließlich in Form der VRML-Daten existiert, weshalb räumlich-topologische Abfragen nur insofern möglich sind, dass diese Informationen, wie zum Beispiel Wandstärken oder eben die Nachbarschaft von Räumen, als Sachdaten in der Datenbank explizit hinterlegt sein müssen.

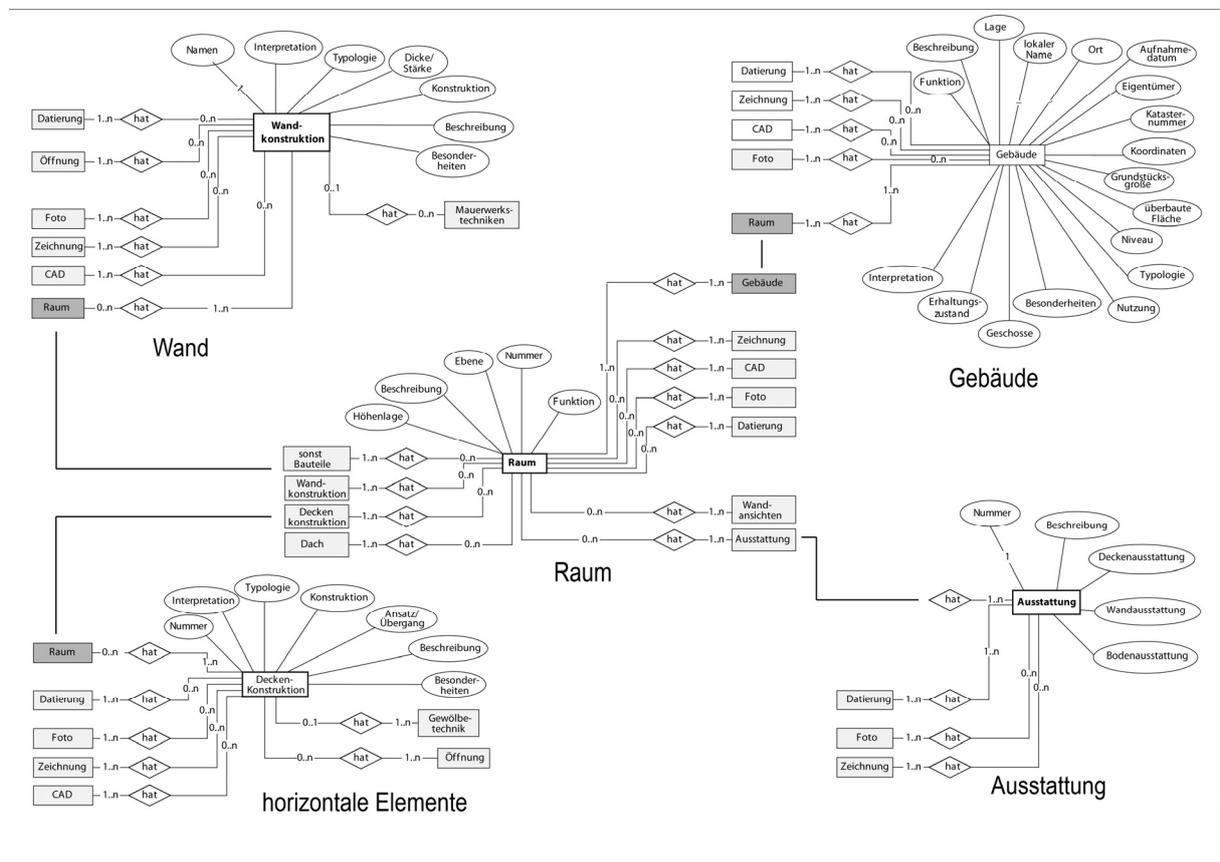


Abbildung 4: Datenbankstruktur (ERM) des „Raumbuches“ des Bauwerksinformationssystems

4D-MODELLIERUNG DER DOMUS SEVERIANA

Da im Bauwerksinformationssystem für jedes Bauteil sowohl die detaillierte 3D-Geometrie vorgehalten wird als auch eine Verknüpfung zur zugehörigen Bauphase existiert, war die Generierung eines 4D-Modells problemlos möglich. Auf dieser Basis wurde eine 4D-Animation² erstellt, aus der Sequenzen in Abb. 3 gezeigt werden. Zu sehen sind die folgenden Entstehungsphasen:

1. vorflavisch
2. flavisch
3. hadrianisch
4. severisch
5. maxentianisch
6. aktueller Zustand

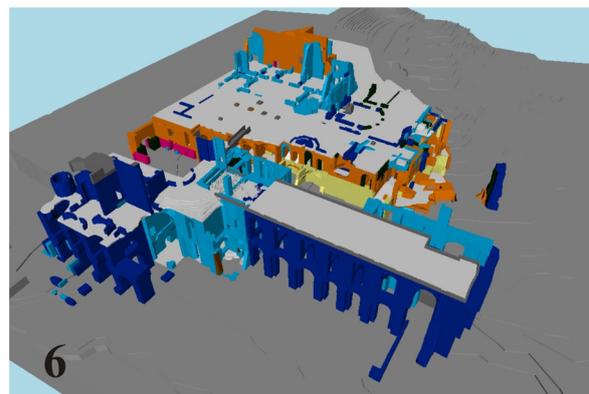
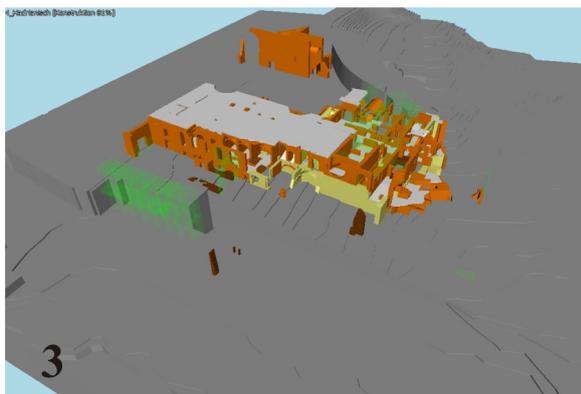
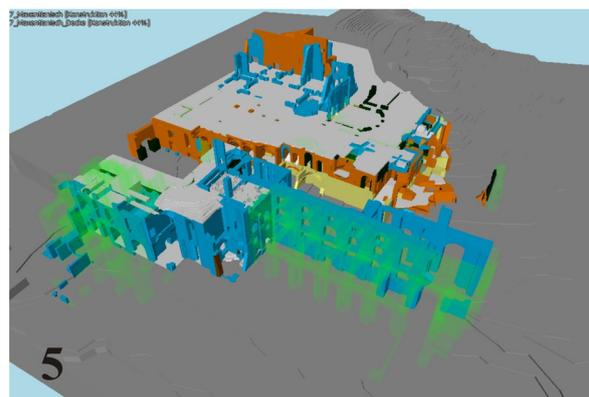
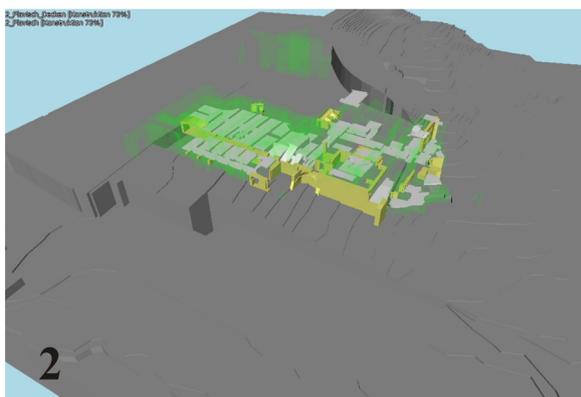
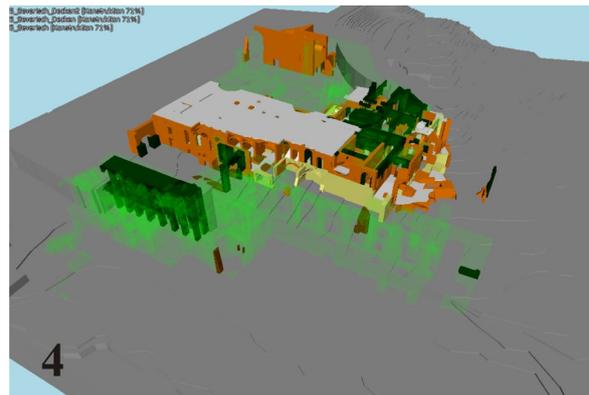
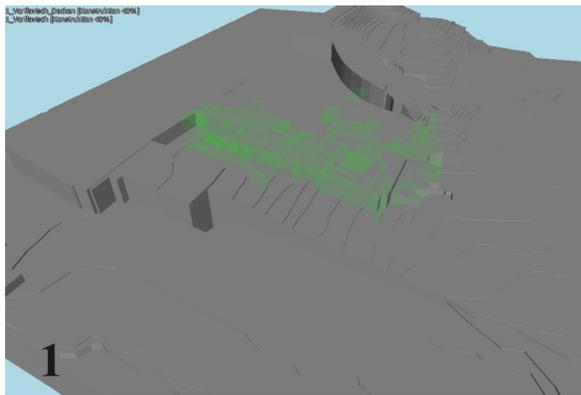


Abbildung 5: Sequenzen der 4D-Animation, die die einzelnen Bauphasen der Domus Severiana zeigen

² Der produzierte Film ist unter <http://www.cie.bv.tum.de/de/component/content/article/31/159> verfügbar.

FORMALE ANALYSE AUF BASIS EINER RAUM-ZEITLICHEN ANFRAGESPRACHE

Neben der rein visuellen Analyse eines bauhistorischen Modells sind weitergehende computergestützte Analysefunktionalitäten für die bauhistorische Forschung wünschenswert. In diesem Zusammenhang planen die Autoren die Umsetzung einer raum-zeitlichen Anfragesprache für bauhistorische Bauwerksmodelle. Die Basis hierfür bildet die am Lehrstuhl für Computation in Engineering der Technischen Universität München entwickelte räumliche Anfragesprache für 3D-Bauwerksmodelle [BORRMANN & RANK 2009c]. Diese stellt verschiedene Klassen von räumlichen Operatoren zur Verfügung, die in einer Erweiterung der Anfragesprache SQL als Selektionskriterium eingesetzt werden können. Dazu gehören im Einzelnen

- metrische Operatoren (wie näher als, ferner als, ...) [BORRMANN et al., 2009]
- direktionale Operatoren (wie oberhalb, unterhalb, nördlich, südlich, ...) [BORRMANN; RANK, 2009a]
- topologische Operatoren (wie innerhalb, überlappt, berührt, ...) [BORRMANN; RANK, 2009b].

Diese Operatoren ermöglichen Anfragen wie:

- „Finde alle Wände oberhalb von Decke 4.“
- „Finde alle Unterzüge in Raum 24.“
- „Gibt es Türen im Umkreis von 15 m?“

Für jede dieser Operatorklassen wurden formale Definitionen geschaffen und verschiedene Algorithmen für ihre Implementierung entwickelt. Zur Verarbeitung geometrischer Informationen kommt dabei u.a. eine oktalbaumgestützte Repräsentation der Bauteile zum Einsatz.

Für die Entwicklung einer raum-zeitlichen Anfragesprache ist einer Erweiterung der räumlichen Anfragesprache um zeitliche Operatoren notwendig. Als Grundlage bietet sich hierbei die von ALLEN vorgenommene Klassifikation von Intervallrelationen an (ALLEN, 1983), bei der 13 qualitative verschiedene Beziehungen zwischen Zeitintervallen unterschieden werden.

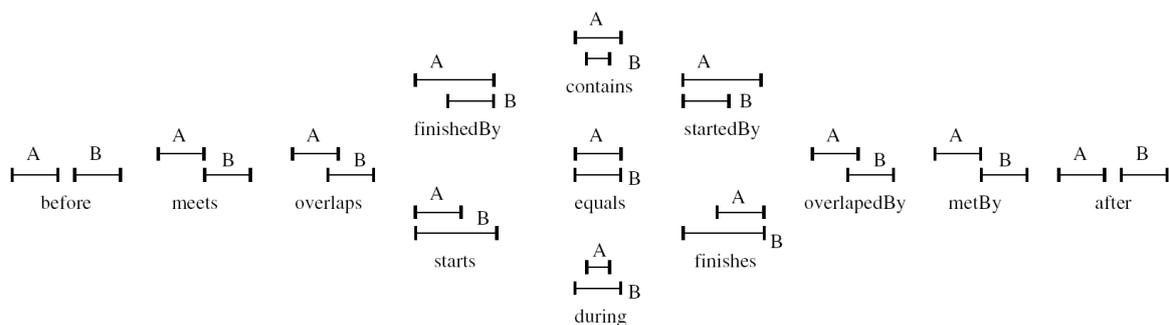


Abbildung 6: Die in (ALLEN, 1983) identifizierten Beziehungen zwischen Zeitintervallen.

Die Kombination von räumlichen mit zeitlichen Operatoren wird Anfragen an 4D-Modelle erlauben wie

- „Welche Objekte wurden in der direkt vorhergehenden Phase gebaut und berühren Stütze 17?“
- „Welche Objekte liegen oberhalb Decke 4, wurden aber früher gebaut?“
- „Gibt es nördlich von Wand 4, Objekte die zum selben Zeitpunkt gebaut wurden?“

Eine zeit-räumliche Anfragesprache wird damit die Navigation in komplexen 4D-Datenbeständen vereinfachen und kann u.a. zur Überprüfung von bauhistorischen Hypothesen und Theorien herangezogen werden. Zur Implementierung der raum-zeitlichen Operatoren sind verschiedene technische Ansätze denkbar. Dazu zählt die Codierung des 4D-Modells in einem Hexadeca-Baum als Grundlage einer simultanen Bearbeitung von räumlichen und zeitlichen Operatoren.

Zur Umsetzung der konzipierten raum-zeitlichen Anfragesprache für bauhistorische Modelle ist umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Beitrag hat einen Überblick zur 4D-Modellierung in der Bauplanung gegeben. Dabei wurde zwischen 4D-Animationen und 4D-Simulation unterschieden. Während zur Realisierung einer 4D-Animation ein bestehendes 3D-Modell mit festgesetzten Konstruktionszeiträumen bzw. Fertigstellungszeitpunkten verknüpft wird, werden diese Zeitpunkte bei der 4D-Simulation durch die Abbildung von einzelnen Prozessschritten und ihre Verknüpfungen berechnet. Beide Methoden dienen der Vorbereitung und Prüfung von Bauabläufen.

Die Methoden der 4D-Modellierung sind auch in der bauhistorischen Forschung gewinnbringend einsetzen. So kann durch Verknüpfung eines 3D-Bauwerksmodells mit seinen bauhistorischen Phasen eine 4D-Animation geschaffen werden, um zum einen die Ergebnisse bauhistorischer Forschung einer breiten Öffentlichkeit in intuitiver Weise zugänglich zu machen und zum Anderen die getroffenen bauhistorischen Annahmen zu validieren. Exemplarisch wurde ein 4D-Modell der Domus Severiana auf dem Palatin in Rom präsentiert.

In Zukunft soll verstärkt an einer weiteren Computerunterstützung für die Schaffung und Validierung von bauhistorischen 4D-Modellen gearbeitet werden. Hierzu ist die Umsetzung einer formalen raum-zeitlichen Anfragesprache geplant.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken Frau Dr. Ulrike Wulf-Rheidt vom Deutschen Archäologischen Institut und Frau Dipl.-Ing. Christiane Brasse von der BTU Cottbus für die freundliche Bereitstellung des 3D-Modells der Domus Severiana. Die Autoren danken außerdem den Fördermittelgebern Thyssen-Stiftung und Bayerische Forschungsförderung.

LITERATURVERZEICHNIS

ALLEN, J. (1983) Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. *Communications of the ACM*, 1983, 26 (11), 832-843

BEISSERT, U.; KÖNIG, M.; BARGSTÄDT, H.-J. (2008): Generation and Local Improvement of Execution Schedules Using Constraint-Based Simulation; XIIth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Beijing.

BORRMANN, A., SCHRAUFSTETTER, S., RANK, E. (2009) Implementing metric operators of a Spatial Query Language for 3D Building Models: Octree and B-Rep approaches. *Journal of Computing in Civil Engineering* 23 (1), pp. 34-46.

BORRMANN, A., RANK, E. (2009a) Specification and implementation of directional operators in a 3D spatial query language for building information models. *Advanced Engineering Informatics* 23 (1), pp. 32-44.

BORRMANN, A., RANK, E. (2009b): Topological analysis of 3D building models using a spatial query language. *Advanced Engineering Informatics* 23(4). pp. 370-385.

BORRMANN, A., RANK, E. (2009c): Query Support for BIMs Using Semantic and Spatial Conditions. In: Underwood, J., Isikdag, U. (Eds): *Handbook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Technologies*, IGI Global, 2009.

BORRMANN, A., JI, Y., WU, I-C., OBERGRIESSER, M., RANK, E., KLAUBERT, C., GÜNTNER, W. (2009): ForBAU - The virtual construction site project. In: *Proc. of the 24th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction*. Istanbul, Turkey.

BRASSE, CH., RIEDEL, A. (2006): Ein Bauwerksinformationssystem für die "Domus severiana" und das Gartenstadion auf dem Palatin in Rom – Möglichkeiten und Grenzen. In: Riedel, A., Heine, K., Henze, F. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech II – Informationssysteme in der historischen Bauforschung*. Verlag Phillip von Zabern, 2006, S.150-156

BRASSE, CH., HEINE, K., ZHAO, D., WULF, U. (2009): A 3D Solution for a Web-based Building Information System. In: Posluchny, A., Lambers, K., Herzog, I. (eds.): *Layers of Perception, Proceedings of the 35 th International Conference on Computer Application and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*, Berlin, April 2-6, 2007. Dr. Rudolf Habelt GmbH Verlag, Bonn, 2009, S. 241, CD

HEINE, K., BRASSE, CH., WULF, U. (2006): WWW-Based Building Information System for "Domus Severiana" Palace at Palatine in Rome by Open Source Software. In: Ioannides, M., Arnold, D., Niccolucci, F., Mania, K.: *VAST 2006 – Joint Event of VAST/CIPA/EG/ EuroMed*, Nikosia, 2006, Eurographics Association, Aire-la-Ville, 2006, S. 75-82

HEINE, K., HENZE, F. (2009): CISAR - ein modulares Informationssystem für raumbezogene Daten aus Archäologie und Bauforschung. In: Przybilla, H., Grünkemeier, A. (Hrsg.): *Denkmäler3.de - Industriearchäologie*. Shaker Verlag Aachen, 2009, S. 83-90

HENZE, F., LEHMANN, H., LANGER, W.(2009): CISAR - A Modular Database System as a Basis for Analysis and Documentation of Spatial Information. In: Posluchny, A., Lambers, K., Herzog, I. (Hrsg.): *Layers of Perception, Proceedings of the 35 th International Conference on Computer Application and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*, Berlin, April 2-6, 2007. Dr. Rudolf Habelt GmbH Verlag, Bonn, 2009, S. 228-233.

JI, Y; BORRMANN, A., RANK, E., WIMMER, J., GÜNTNER, W.A. (2009): An Integrated 3D Simulation Framework for Earthwork Processes. In: Proc. of the 26th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction. Istanbul, Turkey, 2009.

KÖNIG, M., BEISSERT, U., STEINHÄUER, D., BARGSTÄDT, H.-J. (2007): Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering. Proc. of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation

MARTINS, O., SAMPAIO, A.Z. (2009): Virtual visual simulation of the incremental launching method of bridges construction, in: 17^o Portuguese Meeting of Computer Graphics, University of the Interior Beira, Covilhã, Portugal, 2009, pp. 29- 33

MCKINNEY, K., FISCHER, M. (1998): Generating evaluating and visualizing construction schedules with CAD tools. Automation in Construction 7, pp. 433-447

MCKINNEY, K., KIM, J., FISCHER, M., HOWARD, C. (1996): Interactive 4D-CAD. In: Proc. of the 3rd Congress on Computing in Civil Engineering

RIEDEL, A., WEFERLING, U.(2002): From pencil drawing to computer model: a method combining strategy for the documentation of the "Domus Severiana" at the Palatine in Rom. In: Albertz, J. (Hrsg.): Surveying and documentation of historic buildings-monuments-sites, (Proc. XVIII int. Symposium CIPA 2001), 2002, S. 132–139.

SAMPAIO, A.Z. (2003): Definition of a bridge deck geometrical modelling process to automate design graphical representations, in: Proc. of IKM 16th International Conference on the Applications of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering, Weimar.

SAMPAIO, A. Z., HENRIQUES, P. G., CRUZ, C. O. (2009): Virtual environment in Civil Engineering education: Construction of a wall, a bridge and a roof. In: Proc. of the m-ICTE2009 Conference on Research, Reflections and Innovations in Integrating ICT in Education

WU, I. C., BORRMANN, A., RANK, E., BEISSERT, U., KÖNIG, M. (2009): A Pattern-Based Approach for Facilitating Schedule Generation and Cost Analysis in Bridge Construction Projects. In: Proc. of the 26th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction. Istanbul, Turkey.

WULF, U. (2001): Mit welcher Methode sollen wir aufnehmen? Kombiniertes Einsatz von Aufnahmemethoden am Beispiel der "Domus Severiana" auf dem Palatin in Rom. In: Weferling, U, Heine, K., Wulf, U. (Hrsg.): Von Handaufmaß bis High Tech– Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung. Verlag Phillip von Zabern, 2001, S.153–164.

ABBILDUNGSNACHWEIS

Abb. 1-6 Verfasser

Anschriften:

Dr.-Ing. André Borrmann, Lehrstuhl für Computation in Engineering, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80290 München.

E-Mail: borrmann@bv.tum.de

Dr.-Ing. Katja Heine, BTU Cottbus, Lehrstuhl Vermessungskunde, K.-Wachsmann-Allee 2, 03046 Cottbus.

E-Mail: Katja.Heine@tu-cottbus.de