

DAS VIRTUELLE BAYERN

3D-Modellierung und Präsentation von Baudenkmalen, Landschaften und Museumsobjekten mit Technologien der Robotik und der 3D-Computergrafik

Prof. Dr. Gerhard Hirzinger⁵, Jürgen Dudowits⁶, Prof. Dr. Florian Siegert⁷, Bernhard Strackenbrock⁸

Das Projekt „Virtuelles Bayern“ wurde vor über 10 Jahren von Prof. Hirzinger ins Leben gerufen. Seitdem sind die Autoren an der Umsetzung dieser ambitionierten Idee mit Unterstützung der DLR-Institute für Robotik und Mechatronik in Oberpfaffenhofen und für Optische Informationssysteme in Berlin beteiligt. Kernziel des Projektes war zunächst die fotorealistische 3D-Modellierung von touristisch und kulturhistorisch interessanten Baudenkmalen und Landschaften.

Unter dem Titel „*Heimat Digital*“ werden sie jetzt „barrierefrei“ interaktiv vor Ort oder im Internet besuchbar. Diese Arbeiten wurden mittlerweile um die Erfassung komplexer mechanischer Museumsgegenstände und Fragestellungen der Kunstgeschichte erweitert; so entsteht momentan in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Museum in München auf der Basis eines Exponates der Weltraumausstellung ein „Apollo-Mondauto-Simulator“, mit dem in Zukunft Besucher eine täuschend „echte“, virtuelle Mondrundfahrt unternehmen können. Parallel dazu laufen die ersten Versuche, die im Virtuellen Bayern eingesetzten 3D-Verfahren auf das Akademieprojekt Corpus der Barocken Deckenmalereien zu übertragen und auch für das Restaurieren und Erhalten der Baudenkmäler und Museumsstücke zu nutzen. Wurden anfänglich im wesentlichen 3D-Technologien aus der Robotik eingesetzt, werden mittlerweile eigene an die Anforderungen der Kulturgut-Digitalisierung und Visualisierung angepasste Geräte und Algorithmen eingesetzt.

Vom virtuellen Bayern zur Heimat Digital

Bedeutende Fortschritte in der 3D-Bildverarbeitung, insbesondere die Entwicklung eines hocheffizienten, pixelweise über globale Energiefunktionen arbeitenden Stereoalgorithmus SGM (Semiglobal Matching) am DLR-Robotik-Institut, der die klassische, Details „verschmierende“ Korrelationstechnik hinter sich lässt, und heute als Standard in der modernen Fotogrammetrie, gaben den Anstoß zum Projekt virtuelles Bayern. Erste Tests der SGM-Anwendung zur 3D-Modellierung von Landschaften lieferten die aufregenden Daten der Stereo-Zeilenkamera HRSC (High Resolution Stereo Camera) des DLR, die seit 2002 den Planeten Mars umkreist und (Zeilen-)Bilddaten liefert, so dass der Mars heute zum großen Teil in 10-20 m Auflösung dreidimensional modelliert ist

Die anfänglich weitestgehend selbstfinanzierten und durch den Enthusiasmus der beteiligten Firmen (illustrated architecture, 3D-Reality Maps und Time in the Box) und der Mitarbeiter am DLR Robotik und Mechatronik Zentrum vorangetriebenen Arbeiten gab die Entscheidung des bayrischen Finanz- und Heimatministeriums, diese Vor-Arbeiten zu unterstützen mit dem Ziel der genauen Zustandsdokumentation, und 3D-Rekonstruktion, ausgewählter Prunkbauten, mit neuesten fotogrammetrischen Verfahren und ihrer Integration in den sog. Bayern-Atlas; über ihn soll der „barrierefreie“ Besuch der bayr. Baudenkmäler und ihrer unmittelbaren Umgebung im schnellen Internet ohne Plug-In im Browser möglich werden soll. Bayern 3D-*Heimat Digital* ist der neue Name für dieses spannende Projekt.

⁵ DLR-Institut für Robotik und Mechatronik

⁶ Time in the Box GmbH

⁷ LMU München / Realitymaps GmbH

⁸ illustrated architecture

Zielstellung dieses Projektes ist der „virtuelle“ Tourismus mit Fokussierung auf Landschaften und Städte und der Aufbau eines **digitalen Kultur-Erbes** mit Fokussierung auf die 3D-Modellierung von bedeutenden Prunkbauten außen und innen als virtuelle Konserve der Objekte.

Virtueller Tourismus

Mit einem „irdischen“ Duplikat der bereits oben erwähnten Marskamera, die in einem Flugzeug montiert war, haben wir ab 2002 das Voralpenland überflogen und schon 3D-Landschaftsmodelle in 30 cm Auflösung generiert. Später wurde das mit den ab ca. 2005 aufkommenden großen Flächenkameras von Microsoft/Vexcel mit Auflösungen bis zu 10 cm wiederholt.

Genau genommen entstehen mit nur senkrecht nach unten blickenden Kameras nur 2,5-D-Geländemodelle, bei denen Fassaden und Bäume wie mit Schleiern verhängt sind. Ähnliches gilt für die Landschaftsmodellierung aus Laserbefliegungen der Vermessungsämter mit nachfolgender Texturierung, allerdings erlauben spezielle Bildverarbeitungsalgorithmen bei hoher Überdeckung benachbarter Bilder eine automatische Fassadentexturierung.



Abb. 1: München 10 cm mit Fassadentexturierung

Um „echte“ 3D-Landschaftsmodelle zu generieren, bietet es sich an, Kamera-Arrays, die auch schräg in alle Richtungen blicken, zu nutzen wie die neue Ultracam Osprey von Microsoft oder die in der DLR-Robotik derzeit entwickelte Schwenkspiegeltechnik. (Innen-)Stadtmodelle in 5 cm Auflösung sollten künftig zum Standard werden. Was dann „nahtlos“ anschließen muss, ist die 3D-Modellierung berühmter Baudenkmäler von außen (heute vor allem durch Drohnen) in 1 bis 3 cm Auflösung, die dann beim „virtuellen Flug“ von der Landschaft ins Gebäude in eine 1 bis 3 mm-Auflösung übergeht. So werden große Sprünge in der Detaillierung vermieden. Allerdings geht es hier in 3D um bis zu 900-fach höher aufgelöste Landschaften als bei Google oder Microsoft.

Digitales Kultur-Erbe

Historisch bedeutsame Baudenkmäler für die oft keine detaillierten Aufzeichnungen oder Pläne vorliegen, die zur Dokumentation oder digitalen Rekonstruktion geeignet wären, sollten in einem fotogrammetrischen Bildarchiv langfristig virtuell gesichert werden, um zeitliche Veränderungen rückgängig machen zu können, oder eine große Restaurierung nach Zerstörungen durch Unfälle, Umwelteinflüsse (Überschwemmungen wie in diesem Frühjahr, Erdbeben usw.), oder Brandkatastrophen zu unterstützen. Für diese Zielsetzung haben sich in den letzten Jahren photogrammetrische Auflösungen von 0,5 bis 3 mm im Gebäude-Inneren - bei Anlegung strenger Maßstäbe - 1,5 bis 5 mm Auflösung im Außenbereich bewährt, wobei die konkret zu wählende Auflösung vom Baustil des Objektes abhängig ist.

Eine Auswertung der virtuellen Konserve wie z. B. die Erstellung eines fotorealistischen 3D-Modells kann dann jeweils ereignisgesteuert mit den dann modernsten Technologien erfolgen. So können auch heute noch nicht absehbare Technologien wie z. B. das 3D Drucken, das zukünftig vielleicht auch ermöglichen wird, größere zerstörte Gebäudeteile einfach neu auszudrucken, aus dem photogrammetrischen Archiv mit Daten versorgt werden. Damit so hohe Auflösungen, die über die Leistungsfähigkeiten normaler Laserscanner weit hinausgehen, effektiv bei der Datenerfassung erreicht werden können, wurde für das Projekt ein MultiSensor Ansatz entwickelt, bei dem klassische Laserscanner mit einem „robotischen“ fotogrammetrischen System kombiniert und fusioniert werden. Ein ähnlich großes Interesse besteht daran, Bauten und Technologievorhaben nach Plänen und alten Fotos virtuell neu entstehen zu lassen, die nie realisiert wurden oder die es heute nicht mehr gibt. Und Museumsobjekte, die mobil waren, es aber nicht mehr sind. So entstanden im Lauf der Jahre mehrere Kategorien unseres Teilprojekts *digitales Kulturerbe*, die im Folgenden näher erläutert bzw. durch Beispiele verdeutlicht werden:

a) Existierende Bauten

- **Objekte von außen**

Ausgestattet mit GPS-Steuerung und hochauflösenden Kamerasystemen ermöglicht die Drohnenvermessung eine hohe Rekonstruktionsgenauigkeit und beschleunigt die Vermessung von komplexen Gebäuden und historischen Burgenanlagen. Aus deren Bildern lassen sich die absoluten Aufnahmepositionen errechnen, mit denen dann über SGM die 3D-Modelle entstehen.



Schloss Neuschwanstein



Schloss Linderhof

Burg Nürnberg

Abb.2: 3D-Modelle der Schlösser und Burgen

Heute reicht der Einsatzbereich von Multicopter-Drohnen von der fotografischen Dokumentation aus der Luft, über die Bauwerksinspektion und Bauwerksaufnahme für die Sanierung bis hin zur kompletten 3D Rekonstruktion von komplexen Gebäuden. Mit einer detaillierten Flugplanung und einer GPS-gesteuerten, autonom nach dieser Planung fliegenden Drohne kann eine enorme Effizienzsteigerung bei der Erfassung erzielt werden. Ein komplexes Bauwerk wie die Burganlage in Nürnberg kann an nur einem Tag komplett mit tausenden von Luftbildern dokumentiert und archiviert werden.

- **Prunkräume**

Die Nutzung der Laserscan-Technologie, in Kombination mit Farbkameras, die in unterschiedlichen Formen die Texturinformation beitragen, war von Anfang an (um 2002) unser favorisierter Ansatz für Innenräume. Benötigte der Laserscanner vor etwa 10 Jahren noch 30 Minuten für einen Rundumscan, so haben die Scanner heutzutage bei 7 Minuten Scanzeit selbst schon eine kleine Farbkamera eingebaut. Für hochqualitative Texturen ist jedoch immer der Einsatz einer separaten Kamera erforderlich. Komplexe 3D-Strukturen die mit einem Laserscanner nicht aufgelöst werden können mit einer extrem lichtempfindliche und hochdynamische sCMOS-Kamera mit bis zu 30 Bilder/Sekunde abgefilmt und mit dem SGM Verfahren in Punktwolken überführt werden. Die algorithmische „Kunst“ besteht dann darin, die etwas gröberen Laserpunktvolken (1-2 mm) mit den aus den Kamerafeinbildern (0.1 bis 2 mm) berechneten Punktwolken zueinander zu kalibrieren und dann zu verschmelzen. Wir sprechen daher auch vom **multiskaligen, Multi-Sensor Konzept (MuSe)**, bei dem unterschiedliche Sensortypen mit modernen Methoden der Fotogrammetrie zusammengeführt werden. Dabei stellen die räumlichen Punktwolken für den Laserscanner wie für das Kamerasystem die gemeinsame Basis im sog. T3C-Format dar (Abb. 3:).

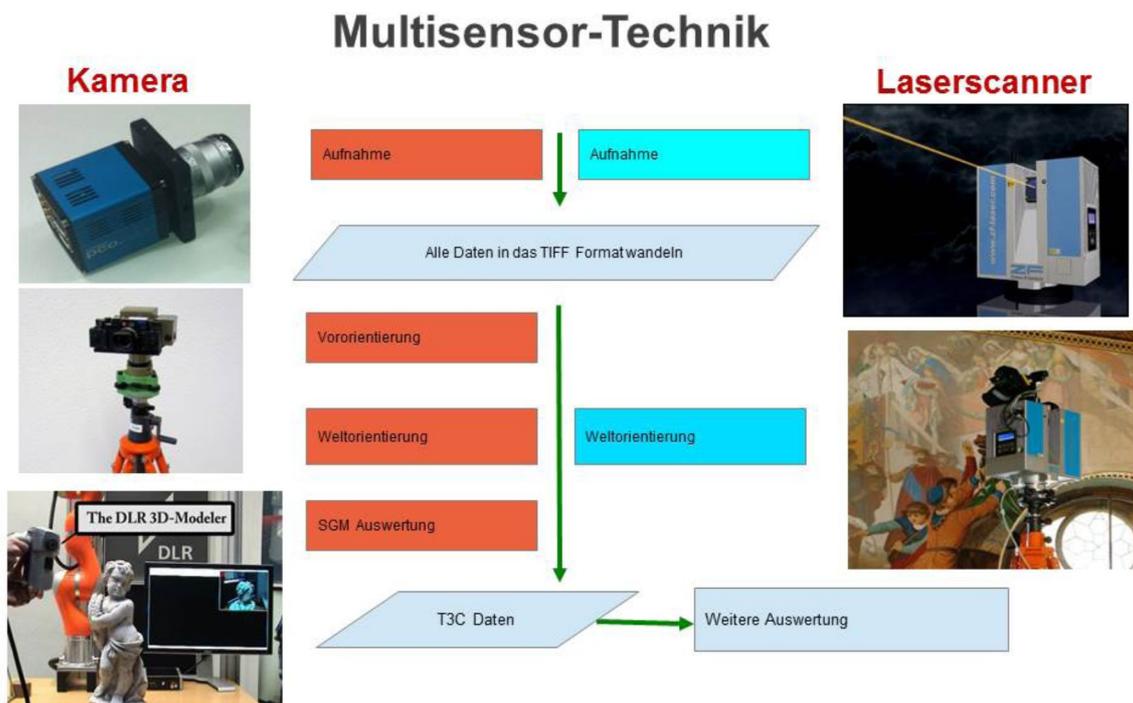


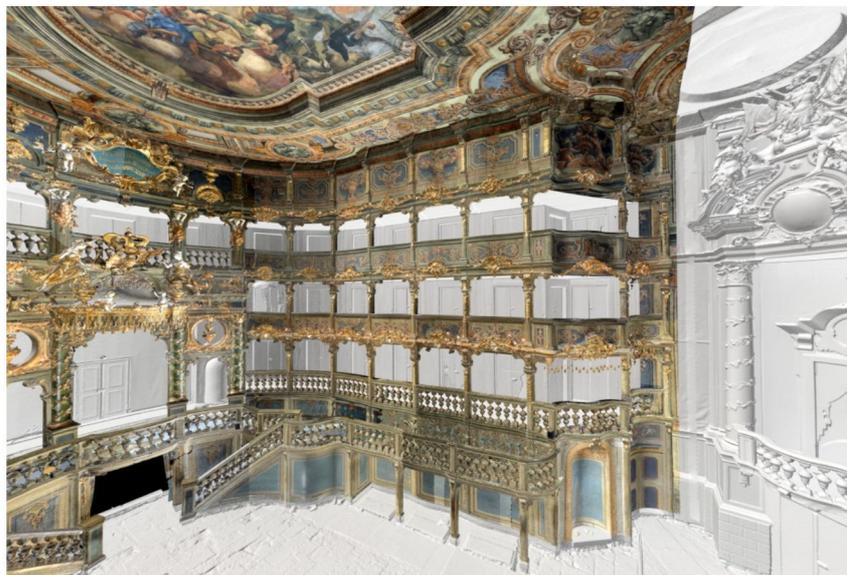
Abb. 3: Ablaufprinzip zur Erstellung von 3D-Daten im sog. T3C Format

In einem der bisher spektakulärsten Projekte, der von der bayrischen Forschungstiftung als Verbundprojekt geförderten, hochgenauen 3D-(Innenraum-)Modellierung des Markgräflichen Opernhauses in Bayreuth wurde diese Methodik zur Reife gebracht, es ist für uns daher das **MuSe-Projekt Bayreuth**. Die speziell aufgebaute MuSe Kamera mit sCMOS-Technologie kann mit der Hand geführt und um ein LED-Flash ergänzt werden. Damit werden die aufzunehmenden Objekte gleichsam abgefilmt.

Die fertigen Daten können dann z. B. in eine „Gamingengine“ wie die Echtzeitvisualisierungssoftware Unity übertragen und dort animiert werden, oder allen gängigen CAD Systemen in der Bauwirtschaft zugänglich gemacht werden. Für eine Echtzeit 3DVisualisierung optimieren die 3D-Grafik-Spezialisten der Fa. Time in the Box die Modelle und ergänzen sie um Beleuchtungsmodelle und Avatare. Schwierige Oberflächen wie Vergoldungen, Tapeten und Stoffe stellen allerdings höchste Ansprüche an die 3D-Modellierung.



3D-Modell Opernhaus Bayreuth



Bayreuth - Erste Scan-Resultate mit Texturen

Abb. 4: Die millimetergenaue 3D-Modellierung des Markgräflichen Opernhauses Bayreuth

Die technologischen Fortschritte aus dem Opernhaus-Projekt wurden für *Heimat Digital* genutzt, um z. B. den kompletten touristischen Rundgang in Neuschwanstein (neben Thronsaal und Sängersaal den Wohn-, Arbeits- und Schlaf-Bereich) millimetergenau in 3D zu modellieren wie auch in Linderhof neben dem Schlafzimmer das „Tischlein-Deck-Dich“-Speisezimmer mitsamt seiner Technik (reverse engineering) oder den türkischen Salon im Schachenhaus (Abb.).

Neuschwanstein Thronsaal



Neuschwanstein Thronsaal



Kloster Andechs in 3D



*Paradeschlafzimmer in Schloss
Linderhof*



Spiegelsaal Herrenchiemsee



„Blaue Grotte“ Linderhof



Türkischer Salon im Schachenhaus

Abb. 5: Digitales Kulturerbe

b) Nie gebaute Objekte

Es gibt in Bayern etliche Baupläne und technische Projekte, wie sie vor allem von König Ludwig II. geplant waren aber nicht realisiert wurden (Abb.). Dies sind z. B. Planungen für eine Wagner-Oper am Isarhochufer, nicht realisierte Pläne in Schloss Neuschwanstein, Schloss Falkenstein, chinesisches und byzantinisches Schloss, Chiemsee-Barke, frühe Luftschiff-Entwürfe, Ludwigs des II. Wünsche nach Flugmaschinen und speziell nach der von einem Ballon entlasteten Seilbahn über den Alpsee, obwohl visionär, galten damals als Hirngespinnste und trugen zu seiner Entmündigung bei.



Nicht mehr gebaute Schlösser und der erträumte Alpseeflug



Die nie gebaute königliche Barke auf dem Herrenchiemsee

Abb. 6: nicht realisierte Ludwig II Projekte

c) Kulissen oder wieder entfernte Architekturen

Beispielhaft wurde der Wintergarten Ludwig II auf dem Dach der Münchener Residenz rekonstruiert, der in den 1890er Jahren wieder abgebaut wurde. Hier dienen erste Schwarzweiß-Fotos, Stiche und ggf. Aquarelle als Haupt-Quelle

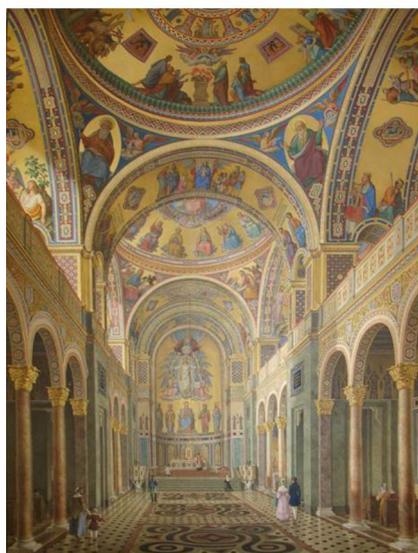


Der legendäre Wintergarten Ludwigs II über der Münchner Residenz

Abb. 7: Nicht mehr existierende Schiffe und Bauten

d) Zerstörte, oder teilweise wiederaufgebaute Architekturen, die sich virtuell rekonstruieren oder vervollständigen lassen

Die quasi als Rohbau mit Ziegelmauerwerk wieder aufgebaute, im Krieg völlig zerstörte Allerheiligenhofkirche in München wurde mit dem Laserscanner in 3D eingescannt und dann nach einem Aquarell von Nachtmann, der einzig verfügbaren Farbinformation, texturiert und „virtuell begehr“ gemacht (Abb.).



Aquarell Nachtmann



Vorkriegs-Foto

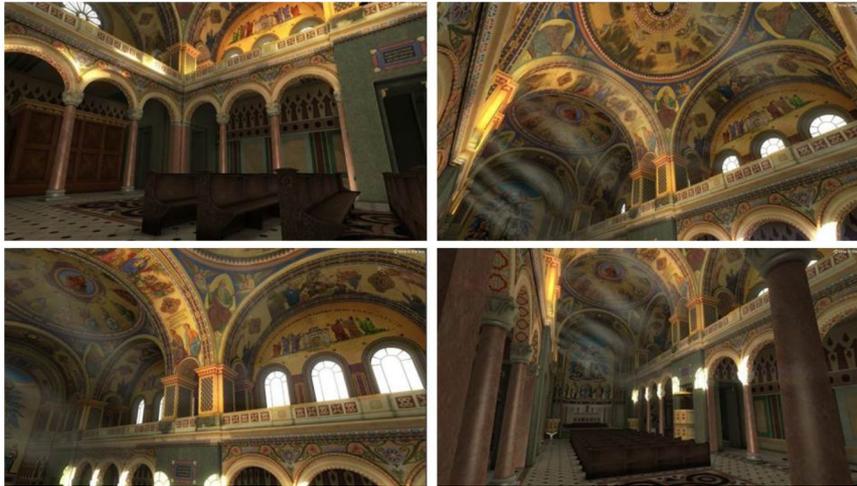
nach dem Krieg



heute



Zerstörung und Wiederaufbau als „Rohbau“



3D-Modellierung und virtuelle Texturierung

Abb. 8: Allerheiligen-Hofkirche München

e) Immobile Museumsobjekte

Ähnlich wie bei den historisch bedeutsamen Prunkbauten gibt es zahlreiche Gründe, auch Museumsobjekte fotorealistisch in 3D zu rekonstruieren, ggf. auch interaktiv im Internet betrachtbar zu machen. Vielfach spielt dabei aber das „reverse engineering“ auch eine zentrale Rolle, z. B. wenn man in der 3D-Modellierung wertvoller Möbel in den Residenzen auch die dahinter stehende Mechanik (z. B. Schubladentechnik) zeigen will. Die 3D-Visualisierung der Tischlein-Deck-Dich-Technologie im Linderhof-Esszimmer ist beispielhaft jetzt ein Element des *Heimat-Digital-Projekts*.

Quasi als Test für die Anwendbarkeit der Bauten-Rekonstruktions-Technik auf größere freistehende Museums-Objekte (statt Innenräume) wurde der sog. Puttenschlitten Ludwigs II. im Münchner Marstallmuseum, das weltweit erste beleuchtete Fahrzeug, in 3D modelliert (Abb.). Wegen seiner vielen glänzenden Bronze- und Gold-Flächen stellte er eine Herausforderung für die skizzierten Algorithmen und den sog. Farbausgleich dar.



Abb. 9: Puttenschlitten Ludwigs II



Abb. 10: Apollo-Autos fahren virtuell über den Mond

Prinzipiell aber wurden die gleichen Techniken wie bei der Innenraummodellierung mit Laserscannern und lichtempfindlichen Kameras angesetzt.

Bei den Objekten des Deutschen Museums hingegen steht das reverse engineering im Vordergrund, um die Bewegungsmechanismen sichtbar zu machen, etwa bei den Apollo-Autos, die vor fast 50 Jahren über den Mond fuhren (Abb.). Statt terrestrischer Landschaften war hier natürlich auch die möglichst genaue 3D-Modellierung der Apollo-Landeplätze aus den besten verfügbaren Daten ein wichtiges Thema. Andere Beispiele sind der Benz-Wagen, das erste Automobil, die Funktion der ersten ventilgesteuerten Dampfmaschine oder die Flugversuche Otto Lilienthals von seinen z. Tl. aufgeschütteten Hügeln.

Virtuelle Besichtigung im Internet

In einem letzten Schritt wurden die Modelle der Prunkbauten weiter vereinfacht, um sie im Internet der Öffentlichkeit verfügbar zu machen. Die Reduktion der Datenmengen war erforderlich, weil bestehende Softwarelösungen und Datenübertragungsraten es nicht erlauben, ein 3D-Gebäudemodell mit 3GB Größe interaktiv zu betrachten. Als internettaugliches Format bot sich die neue, von allen großen Browserherstellern unterstützte WebGL Technologie an. Aus dem 3GB großen Ausgangsmodell wird typischerweise ein neues, vereinfachtes Modell im WebGL Format mit einer Größe von 200 MB berechnet. Es ist aber nur eine Frage der Zeit und der Verfügbarkeit von Breitbandübertragungsraten, bis die 3D-Modelle bayrischer Schlösser in voller Auflösung im Internet betrachtet und interaktiv besichtigt werden können. Die Annäherung an die Gebäude und das virtuelle Hineinfliegen in die Innenräume durch Fenster und Türen mit den unterschiedlichen Genauigkeiten ist besonders herausfordernd für die Software.

Allerdings ist auch hier noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten. Bei den Web-optimierten Virtual Reality Szenen werden Daten in Dimensionen von ca. 1-50 MB transferiert. Diese Daten werden entweder in einem kompletten Paket geliefert oder sie werden ähnlich wie beim Videocontent „gestreamt“, d. h. der Nutzer befindet sich nach dem Aufrufen einer Szene sofort in der interaktiven 3D-Welt, Oberflächentexturen und detaillierte 3D-Objekte werden dynamisch nachgeladen. Mit Hilfe der Breitbandanbindung können die Download- und Upload-Zeiten auf wenige Sekunden reduziert werden, was sich in einer gesteigerten „User Experience“ auswirkt.

Mit den modernsten VR-Technologien werden die 3D-Welten realitätsnah begehbar gemacht. Bei den sog. immersiven Systemen gibt es zur Zeit zwei unterschiedliche Ansätze: Die stationären VR-Brillen, die mit einem Kabel und mit einem Rechner verbunden sind und die mobilen VR-Brillen, die mit einem eingeschobenen Smartphone funktionieren. In den stationären Systemen befinden sich ein fest eingebautes hoch auflösendes Display und ein Gyroskop als Sensor für die Kopfdrehung und Kopfbewegung. Bei den mobilen Systemen werden die beiden Bilder für das Augenpaar auf dem Smartphone-Display angezeigt, die im Telefon verbaute Sensorik liefert die Daten der Kopfbewegung.

Noch viel extremer als bei der Darstellung im Internetbrowser, müssen die 3D-Strukturen für den Gebrauch mit einer VR-Brille reduziert werden, das gilt vor allem für mobile Anwendungen, da die Prozessor- und Grafikleistung von Smartphones noch begrenzt ist. Hier müssen die in Echtzeit prozessierten 3D-Szenen mit einer Framerate von mind. 80 Hz flüssig angezeigt werden, um ein Unwohlsein (die sog. VR-Krankheit) zu vermeiden. Deshalb werden für den VR-Einsatz die 3D-Modellstruktur und die Oberflächen-Texturierung nochmals stark reduziert, ohne dass sich erkennbare Einbußen in der Qualität der Darstellung ergeben. So wird eine 3D-Szene mit bis zu 30 Mio. Polygone auf ca. 5% reduziert, sodass dann nur noch 1,5 Mio. Polygone vorhanden sind, bei mobilen Anwendungen muss die 3D-Vermaschung noch stärker ausgedünnt werden, s. d. die Anzahl der Polygone nicht größer als 500.000 ist.

Der Zeittunnel als Instrument des digitalen Kulturerbes

Der Zeittunnel ist das zentrale Element der „virtuellen Zeitmaschine“, die auf eine mit einer Zeitachse gesteuerte Wissens- und Erlebnisplattform für den virtuellen Geschichtstourismus zielt. Kern dieser Web-Applikation sind interaktive 3D-Welten, die historisch relevante Architekturen, Ereignisse, Kunstexponate und Erfindungen in Echtzeit visualisieren und erlebbar machen als Beispiel München um 1910 und um 1600. In Technologiekontext ist geplant, historische Maschinen etwa aus dem Deutschen Museum nicht nur statisch zu visualisieren, sondern virtuell zum Leben zu erwecken und Funktionsprinzipien zu erklären

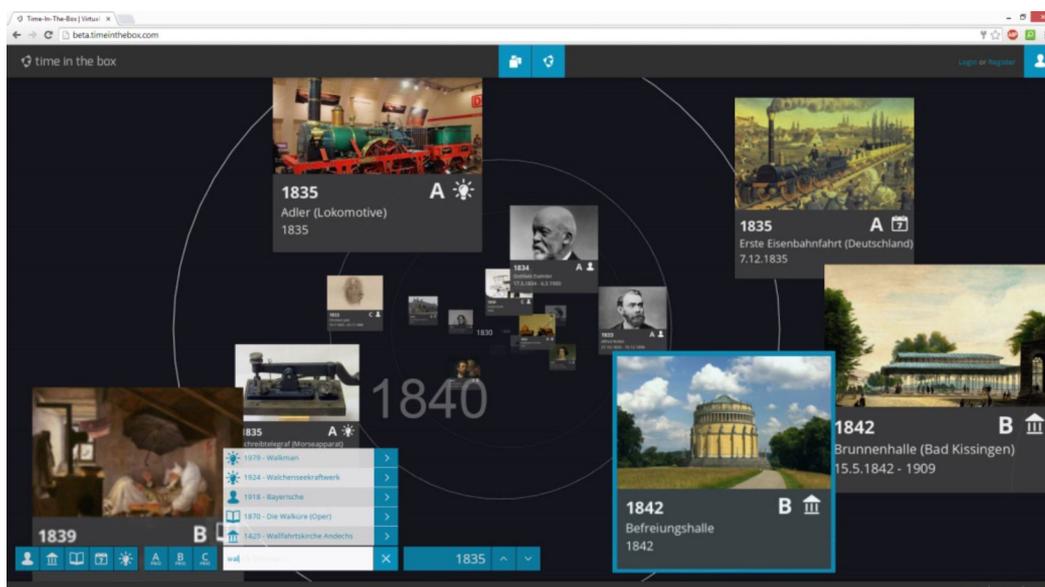


Abb. 11: Zeittunnel



München (Stachus) um 1910 rekonstruiert (Straßenbahnen fahren)

Abb. 12: München 3D-Modelle um 1910 und 1600

Ausblick

Die im Projekt virtuelles Bayern entwickelten Verfahren und Algorithmen werden momentan im Rahmen eines Technologietransfers an verschiedene bayrische Institutionen, die sich mit der Erhaltung und Erforschung des Kulturellen Erbes befassen, übertragen. Dazu zählt der auf 25 Jahre konzipierte neue Corpus der Barocken Deckenmalereien in Deutschland unter Federführung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (Leitung Prof. Hoppe von der LMU) zur Dokumentation der architekturgebundenen Malerei der frühen Neuzeit. Des Weiteren soll in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Restaurierungswissenschaften der Universität Bamberg und dem Hasso Plattner Institut in Potsdam untersucht werden, wie hochauflösende Punktwolken die bauliche Instandhaltung und Restaurierung von Denkmälern unterstützen können.

Literatur

1. Hirschmüller, H.: *Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 30 pp. 328–341, 2 2008.
2. Hirzinger, G., Bodenmüller, T., Hirschmüller, H., Liu, R., Sepp, W., Suppa, M., Abmayr, T. und Strackebrock, B.: *Photo-realistic 3D modelling - From robotics perception towards cultural heritage*. International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, Asona, Switzerland, pp. 22-27 May 2005.
3. Hirzinger, G. und Strackebrock, B., in Günthner W., Borrmann A.: *Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter ausführen* Springer 2011 pp. 50–59.
4. Hirzinger, G.: *Zeittunnel ins virtuelle Bayern*. aviso1-2015 pp.11-15
5. Hirzinger, G.: *Vom virtuellen Bayern zur Heimat Digital*. Erscheint in DVW-Bayern 4.2016, 2016.
6. Hoppe, S.: *Barocke Deckenmalerei in 3D*. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Akademie Aktuell 2/2016 pp. 66-71
7. Scheibe, Karsten: *Design and Test of Algorithms for the Evaluation of Modern Sensors in Close-Range Photogrammetry*. Dissertation, Universität Göttingen. 2006.
8. Strackebrock, B., Hirzinger G. und Wohlfeil, J.: *Multi-Scale / Multi-Sensor 3D-Dokumentation und 3D-Visualisierung höfischer Prunkräume*, EVA Berlin 2014
9. Wohlfeil, J.: *Automated high resolution 3D reconstruction of cultural heritage using multi-scale sensor systems and semi-global matching*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-4/W4 pp. 37 – 43, 2013.