

Das Projekt „Bayern 3D – Heimat Digital“

Gerd Hirzinger und Bernhard Strackenbrock

Kernziel des vor mehr als zehn Jahren auf Eigeninitiative gestarteten Projekts *Virtuelles Bayern* war die fotorealistische 3D-Modellierung von touristisch und kulturhistorisch interessanten Landschaften sowie Baudenkmalern in Bayern mit Technologien der Robotik und 3D-Computergrafik. Das ‚virtuelle Bayern‘ hatte daher von Beginn an zwei zentrale Standbeine bzw. Projektkonzepte, die mit der Zeit eng miteinander verschmelzen sollten: Den ‚virtuellen‘ Tourismus mit Fokussierung auf Landschaften und Städte sowie das (digitale) Kulturerbe mit Fokussierung auf die 3D-Modellierung von bedeutenden Prunkbauten außen und innen. Aus Platzgründen wird in diesem Beitrag nur auf das (digitale) Kulturerbe eingegangen. Eine umfangreiche Darstellung beider Themen ist bereits erschienen.¹

Als besonders wichtig für diese Kernthemen erwiesen sich bedeutende Fortschritte in der 3D-Bildverarbeitung, insbesondere die Entwicklung eines hocheffizienten, pixelweise über globale Energiefunktionen arbeitenden Stereoalgorithmus *SGM* (*Semiglobal Matching*) am Robotik-Institut des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), der mittlerweile Bestandteil vieler photogrammetrischer Softwarepakete ist. Den Anstoß lieferten die aufregenden Daten der Stereo-Zeilenkamera *HRSC* (*High Resolution Stereo Camera*) des DLR, die seit 2002 den Planeten Mars umkreist und Bilddaten liefert, so dass der Mars heute zum großen Teil in 10–20 m Auflösung dreidimensional modelliert ist (Abb. 1).

Digitales Kulturerbe

Historisch bedeutsame Baudenkmäler, für die oft keine detaillierten Aufzeichnungen oder Pläne vorliegen, die zur Dokumentation oder digitalen Rekonstruktion geeignet wären, sollten in einem photogrammetrischen Bildarchiv langfristig virtuell gesichert werden, um zeitliche Veränderungen rückgängig machen zu können, oder eine große Restaurierung nach Zerstörungen durch Unfälle, Umwelteinflüsse oder Brandkatastrophen zu unterstützen.

Eine Auswertung der virtuellen Konserve wie z. B. die Erstellung eines fotorealistischen 3D-Modells kann dann jeweils ereignisgesteuert mit den aktuell modernsten Technologien erfolgen. So können auch heute noch nicht absehbare Technologien aus dem photogrammetrischen Archiv mit Daten versorgt werden, wie z. B. das 3D-Drucken, das zukünftig vielleicht auch ermöglichen wird, größere zerstörte Gebäudeteile einfach neu auszudrucken.

Schon früh zeigte es sich aber, dass ein ähnlich großes Interesse daran besteht, Bauten und Technologievorhaben,

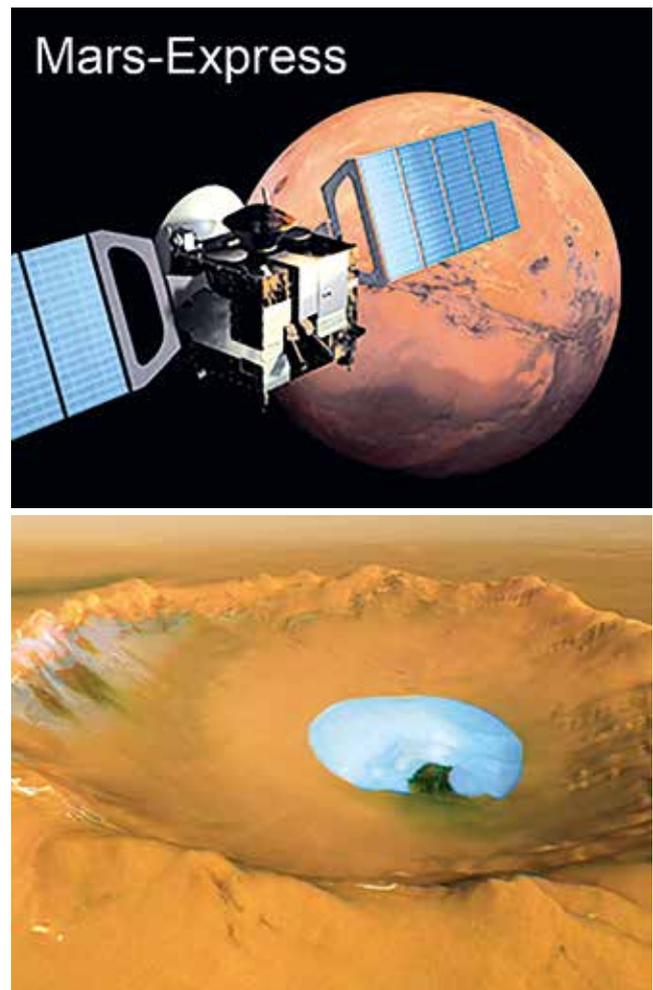


Abb. 1a und b: 3D-Modellierung der Marsoberfläche

die nie realisiert wurden oder die es heute nicht mehr gibt, nach Plänen und alten Fotos virtuell neu entstehen zu lassen. So entstanden im Lauf der Jahre insgesamt vier Kategorien unseres Teilprojekts „digitales Kulturerbe“, die im Folgenden näher erläutert bzw. durch Beispiele verdeutlicht werden:

– existierende Baudenkmäler

In enger Kooperation mit dem 3D-Architektur- und Dokumentations-Spezialisten *illustrated architecture* und dem Landschaftsmodellierer *3DRealityMaps* haben wir (der Münchner VR-Spezialist *VR-Dynamix*, vormals *Time in*

the Box) in den letzten zehn Jahren berühmte und historisch bedeutende Gebäude wie z. B. Königsschlösser und Barock-Kirchen photogrammetrisch in 1–2 cm Auflösung außen und 1–2 mm Auflösung innen räumlich (in 3D) modelliert und visualisiert. Dabei kamen sowohl im Außen- wie auch im Innenbereich schon sehr früh Laserscanner der Firma Zoller und Fröhlich (ZF), wie sie vormals an der TU-München für die Robotik entwickelt wurden, zum Einsatz; zunächst auch eine ursprünglich für Marsmissionen entwickelte Zeilen-Panoramakamera, inzwischen vor allem aber hochauflösende Flächenkameras.

Einen entscheidenden Impuls für diese bis dato weitgehend selbstfinanzierten Arbeiten gab die Entscheidung des bayerischen Finanz- und Heimatministeriums, die Vorarbeiten zum digitalen Kulturerbe zu unterstützen, mit dem Ziel der genauen Zustandsdokumentation, Vermessungstechnik und 3D-Rekonstruktion mit neuesten photogrammetrischen Verfahren und ihrer Integration in den sogenannten Bayern-Atlas; über ihn soll der ‚barrierefreie‘ Besuch der bayerischen Baudenkmäler und ihrer unmittelbaren Umgebung im schnellen Internet ohne Plug-In im Browser möglich werden. *Bayern 3D – Heimat Digital* wurde der neue Name für dieses spannende Projekt.

1. Außenbereich

Mit dem ca. alle 50 m neu aufgestellten Laserscanner und der erwähnten Panorama-Zeilenkamera entstand vor mehr als zehn Jahren unser erstes Gebäudemodell, Schloss Nymphenburg (Abb. 2), basierend auf dem Eindruck, dass für den Außenbereich der Baudenkmäler die für Landschaften und Städte immer populärer werdende Flugzeug-Kamera-Befliegung nicht ausreichen würde. Inzwischen setzen wir aber immer stärker auf die Multicopter-(Drohnen-)Befliegung. Aus deren (Mono-) Bildern lassen sich die relativen Aufnahmepositionen („Pseudo-Stereoansichten“) errechnen, aus denen dann über *SGM* die 3D-Modelle entstehen.

Ausgestattet mit GPS-Steuerung und hochauflösenden Kamerasystemen ermöglicht die Drohnenvermessung eine relativ hohe Rekonstruktionsgenauigkeit und erleichtert und beschleunigt die Vermessung von komplexen Gebäuden und Anlagen, sowie schwer zugänglichen Bauwerken wie Kirchtürmen oder historischen Burganlagen (Abb. 3).



Abb. 2: 3D-Modell Nymphenburg, weitgehend vom Boden aus modelliert

Heute reicht der Einsatzbereich von Mehrflügler- oder Multicopter-Drohnen – mit typischerweise vier, sechs oder acht Propellern – 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 Genauigkeit von 1–5 cm. Mit einer detaillierten Flugplanung und einer GPS-gesteuerten, autonom nach dieser Planung fliegenden Drohne kann eine enorme Effizienzsteigerung bei der Erfassung, Analyse und Dokumentation des Bauwerkszustandes erzielt werden. Während die klassische Vermessung das Aufstellen von Gerüsten oder Hebeplattformen erfordert, kann ein komplexes Bauwerk wie die Burganlage in Nürnberg so an nur einem Tag komplett dokumentiert und archiviert werden.

In der Tat hat im Rahmen des forschungsorientierten *Heimat Digital*-Projekts der Partner *3DRealityMaps* die Schlösser Neuschwanstein und Linderhof sowie das Schachenhaus und die Würzburger Residenz mit photogrammetrischen Drohnen befliegen, tausende hoch aufgelöster Fotos aufgenommen und zu 3D-Modellen prozessiert (Abb. 4 und 5).

Die von den Drohnen mit hoher Überlappung aufgenommenen Fotos sowie die Positions- und Fluglagedaten wurden anschließend weiterverarbeitet, um daraus eine dichte 3D-Punktvolke des Gebäudes zu berechnen. Im Fall von Neuschwanstein wurden über 4000 Fotos aufgenommen, aus denen in mehreren Tagen Rechenzeit mit einem Hochleistungscluster eine solche 3D-Punktvolke berechnet wurde. Aus dieser können direkt alle Maße des Objektes mit hoher Genauigkeit ermittelt werden. Zur 3D-Visualisierung wird im nächsten Schritt aus der Punktvolke ein trianguliertes Netzwerk, ein sogenanntes *TIN (Triangulated Irregular Network)* oder *Mesh* berechnet, das als Grundlage zur Texturierung dient und den Datensatz von über 50 GB auf etwa 3 GB reduziert. Die photogrammetrischen Verfahren sind so genau, dass selbst kleinste Details, z. B. in der Fassade von Schloss Linderhof, exakt wiedergegeben werden. Mit klassischen Methoden wäre der Aufwand, diese Details zu erfassen, unbezahlbar (Abb. 6).

Schwierigkeiten bei der Texturierung bestanden darin, dass sich die Befliegungen jeweils über den ganzen Tag hingen, währenddessen sich die Licht- und Schattenverhältnisse kontinuierlich veränderten. Umfangreiche, teilautomatisierte Korrekturen in den Originalfotos waren notwendig, um diese unvermeidbaren Effekte zu minimieren.



Abb. 3: Nürnberger Burg 3D nach Multicopter-Kamera-Flug



Abb. 4a und b: Neuschwanstein als 3D-Modell



Abb. 5: Würzburger Residenz 3D aus Drohnenbefliegung

2. Innenräume

Die Nutzung der Laserscan-Technologie, die von jedem Standort aus räumliche Punktwolken generiert und von Farbkameras, die dann – in welcher Form auch immer – die Texturinformation beitragen, war am Anfang (um 2002) unser favorisierter Ansatz für die Innenräume. Brauchte der Laserscanner vor etwa zehn Jahren noch 30 Minuten für einen Rundumscan, bis er dann an der nächsten Position mit einem weiteren Scan beginnen konnte, und die

erwähnte Zeilen-Panoramakamera ca. zwei Stunden für den Rundblick an einer Stelle, so hat der Scanner bei 7 Minuten Scanzeit jetzt selbst schon eine kleine Farbkamera für die grobe Einfärbung der Punktwolken. Und für die hochqualitativen Bilder braucht dann z. B. eine extrem lichtempfindliche und hochdynamische *sCMOS*-(*scientific Complementary metal-oxide-semiconductor*) Kamera des Kelheimer Kameraspezialisten *PCO* gerade noch 3–4 Minuten. Die algorithmische ‚Kunst‘ besteht dann darin, die etwas größeren Laserpunktwolken (1–2 mm) mit den aus den Kamerafeinbildern (0.1–2 mm) rechenbaren Punktwolken zueinander zu kalibrieren (orientieren) und dann zu verschmelzen. Wir sprechen daher auch vom multiskaligen *MuSe*-(*MultiSensor*-)Konzept, bei dem unterschiedliche Sensortypen mit modernen Methoden der Photogrammetrie zusammengeführt werden. Dabei stellen die räumlichen Punktwolken für den Laserscanner wie für das Kamerasystem die gemeinsame Basis im sogenannten T3C-Format dar (Abb. 7).

In einem der bisher spektakulärsten Projekte, der von der bayerischen Forschungstiftung als Verbundprojekt geförderten, hochgenauen 3D-(Innenraum-)Modellierung des Markgräflichen Opernhauses in Bayreuth (einem Welt-erbe-Objekt) 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 wer-



Abb. 6a und b: Schloss Linderhof 3D-Gebäudemodell



Abb. 7a, b, c und d: Innenräume des digitalen Kulturerbes: Paradeschlafzimmer in Schloss Linderhof – Spiegelsaal Herrenchiemsee – „Blaue Grotte“ Linderhof – Türkischer Salon im Schachenhaus

den. Die Aufnahmen erfolgen mit 10 bis 30 Vollbildern pro Sekunde, so dass die aufzunehmenden Objekte gleichsam abgefilmt werden.

Die fertigen Daten werden dann z. B. in eine „Gaming engine“ wie die Echtzeitvisualisierungssoftware *Unity* übertragen und können dort animiert werden. Die 3D-Grafik-Spezialisten der Firma *Time in the Box* (jetzt *VR-Dynamics*) korrigieren Modellierungsfehler und Artefakte und realisieren Beleuchtungsmodelle. Schwierige Oberflächen wie Vergoldungen, Tapeten und Stoffe stellen allerdings höchste Ansprüche an die 3D-Modellierung (Abb. 8).

Zu den seither modellierten ‚Highlights‘ gehören sicher die Innenräume der Würzburger Residenz (wie Tiepolo-Treppenhaus oder Gartensaal) und der Bamberger Residenz (z. B. Kaisersaal) (Abb. 9).

3. 3D-Rekonstruktion von historischen Möbeln, Museums- und Technologie-Objekten

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 dahinterstehende Mechanik (z. B. Schubladentechnik) zeigen will. Die ‚Tischlein-Deck-Dich-Technologie‘ im Linderhof-Esszimmer ist beispielhaft als Element des *Heimat Digital*-Projekts, ähnlich wie es früher schon die Nymphenburger Springbrunnen-Technik war.

Quasi als Test für die Anwendbarkeit der Bauten-Rekonstruktions-Technik auf größere freistehende Museums-Objekte (statt Innenräume) wurde der sogenannte Puttenschlitten Ludwigs II. im Münchner Marstallmuseum, das weltweit erste beleuchtete Fahrzeug, in 3D modelliert. Wegen seiner vielen glänzenden Bronze- und Goldflächen stellte er eine Herausforderung für die skizzierten Algorithmen und den sogenannten Farbausgleich dar (Abb. 10). Prinzipiell aber wurden die gleichen Techniken wie bei der Innenraummodellierung mit Laserscannern und lichtempfindlichen Kameras angesetzt.

– nicht mehr existierende, weil inzwischen zerstörte Architekturen und Objekte

(z. B. Wintergarten auf der Residenz München, Brunnenhaus in Bad Kissingen, Prunkschiff *Bucentaur* auf dem Starnberger See). Hier dienen erste Schwarzweiß-Fotos, Stiche und ggf. Aquarelle als Hauptquelle (Abb. 11).

– zerstörte, aber teilweise wiederaufgebaute Architekturen, die sich virtuell rekonstruieren lassen

Die quasi als Rohbau mit Ziegelmauerwerk wieder aufgebaute, im Krieg völlig zerstörte Allerheiligen-Hofkirche in München wurde mit dem Laserscanner in 3D eingescannt und dann nach einem Aquarell von Franz Xaver Nachtmann, der einzig verfügbaren Farbinformation, texturiert und ‚virtuell begehbar‘ gemacht (Abb. 12).

– nie realisierte Baupläne und (technische) Projekte



Abb. 8a, b, c und d: Die millimetergenaue 3D-Modellierung des Markgräflichen Opernhauses Bayreuth

Es gibt in Bayern etliche Baupläne und technische Projekte, wie sie vor allem von König Ludwig II. geplant waren, aber nicht realisiert wurden. Dies sind z. B. Planungen für ein Wagner-Festspielhaus am Isarhochufer, nicht realisierte Pläne in Schloss Neuschwanstein, Schloss Falkenstein, ein chinesisches und byzantinisches Schloss, eine Chiemsee-Barke, frühe Luftschiff-Entwürfe, eine Seilbahn über den Alpsee. Ludwigs 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 (Abb. 13).

– Virtuelle Besichtigung im Internet

In einem letzten Schritt wurden die Modelle der Prunkbauten weiter vereinfacht, um sie im Internet der Öffent-

lichkeit verfügbar zu machen. Die Reduktion der Datenmengen war erforderlich, weil bestehende Softwarelösungen und Datenübertragungsraten es nicht erlauben, ein 3D-Gebäudemodell mit 3 GB Größe interaktiv zu betrachten. Als internettaugliches Format bot sich die neue, von allen großen Browserherstellern unterstützte *WebGL*-Technologie an. Aus dem 3 GB großen Ausgangsmodell wurde 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 bayerischer 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.



Abb. 9: Würzburger Gartensaal (links), Bamberger Kaisersaal (rechts)



Abb. 10a und b: 3D-Modelle: Puttenschlitten Ludwigs II. und Möbel in der Residenz München

Ausgewählte Objekte können Sie bereits auf der Internetseite der Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen virtuell besuchen (<https://vr-dynamix.com/bayern3d-heimat-digital/>).

ren (ohne Laden von Spezialsoftware im Browser) und über die Entwicklung einer gemeinsamen Plattform- und Server-Technologie von der Landschaft mit sukzessive höher werdender Auflösung in die Prunkbauten und wieder heraus zu ‚fliegen‘.

Resümee/Ausblick

Unser langfristig verfolgtes Ziel lautet: Die attraktivsten Landschaftsregionen, Baudenkmäler und historischen (Technologie-)Entwicklungen Bayerns in bisher nicht gekannter Detaillierung in 3D zu modellieren, ‚interaktiv barrierefrei‘ im Internet ‚befliegbar‘, begehbar bzw. betrachtbar zu machen, damit geschichtliche Zusammenhänge in 3D be-greifbar werden.

Die neue WebGL-Technologie erlaubt es, die dabei anfallenden riesigen Datenmengen in Echtzeit zu visualisie-

Exkurs:

Vermessung der Venus-Grotte im Park von Linderhof

Die Bergbauvermessung (Markscheidewesen) befasst sich seit der frühen Neuzeit intensiv mit der geometrischen Erfassung von unterirdischen Hohlräumen und deren Bezug zur Tagesoberfläche. Dafür ist seit dem 18. Jahrhundert ein spezielles Instrumenten-Repertoire entstanden, das immer die aktuellen Entwicklungen im geodätischen Instrumentenbau aufgenommen und auf die speziellen Bedürfnisse



Abb. 11a, b, c und d: Nicht mehr existierende Bauten – Wintergarten Ludwigs II.



Abb. 12a und b: Allerheiligen-Hofkirche München, rechts: heute – links: nach dem Krieg
 c: Zerstörung und Wiederaufbau als „Rohbau“ – 3D-Modellierung und virtuelle Texturierung

der Untertage-Vermessung angepasst hat. Das gilt insbesondere für die Photogrammetrie und das Laserscannen, da diese bildgebenden Methoden es erlauben, den eigentlichen Messvorgang von Untertage in eine Büroumgebung zu verlagern. Ein spektakuläres Beispiel für eine frühe hochpräzise Untertage-Photogrammetrie (Abb. 14) ist die Vermessung der steinzeitlichen Bilderhöhle von Altamira aus den

50er Jahren, die für die Kopie der Höhlendecke im Deutschen Museum in München angefertigt wurde.

Die Venusgrotte im Park vom Schloss Linderhof wurde von uns erstmalig im Winter 2007/2008 mit einem hochauflösenden ZF-Laserscanner in weiten Bereichen erfasst. Die Daten entstanden im Zuge des Vorläuferprojektes von *Bayern 3D – Heimat Digital* und wurden von Prof. Hirzlin-



Abb. 13a, b, c und d: nicht realisierte Ludwig II.-Projekte – Nicht mehr gebaute Schlösser und der erträumte Alpseeflug



Abb. 14: Photogrammetrische Aufnahmen in der Höhle von Altamira 1958

ger vom DLR veranlasst und durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt war die Grotte im Wesentlichen frei von Gerüsten und Fangnetzen und es entstanden ca. 160 Laserscans, überwiegend mit einer Auflösung von 10 000 x 20 000 Pixeln in Schwarz-Weiß. Diese Scans wurden für ein VR-Modell ausgewertet und dem Projekt zur Sanierung der Grotte zur Verfügung gestellt. Dieses mittlerweile gut zehn Jahre alte VR-Modell hat in Anbetracht des rasanten Fortschrittes auf

diesem Gebiet heute schon selbst einen historischen Status inne.

Unsere Vermessungsarbeiten in der Grotte haben wir 2017 wiederaufgenommen und die bisher vorhandenen um ca. weitere 320 Scans – vornehmlich in den Ofennischen, hinter der Putzschale und auf den Gewölben der Grotte – ergänzt. Daneben wurden bisher ca. 3.500 Bilder in hoher Auflösung angefertigt. Alle Laserscans und Bilder sind in dem für die Sanierung der Venusgrotte festgelegten Weltkoordinatensystem (GK4) durch Bündelausgleichung mit Passpunkten orientiert. Für die Auswertung aller Daten wird das MuSe (Multiscale Multisensor)-Vorgehen eingesetzt (Abb. 15 und 16), das im Zuge der Forschungsarbeiten zum „MuSe-Projekt Bayreuth“ am DLR²⁺³ entstanden ist. Kernpunkt dieses Vorgehens ist ein zentrales, auf lange Dauer angelegtes Messbildarchiv. In diesem werden alle Scans, zerlegt in ihren Bildanteil und den Geometrieanteil in zwei TIFF-Dateien, und alle photogrammetrischen Aufnahmen abgelegt. Aus dem Messbildarchiv heraus können die Daten mit unterschiedlichen Softwarepaketen für Grundrisse, Schnitte, und 3D-Modelle als Punktwolken oder Verma- schungen ausgewertet werden (Abb. 17).

Momentan wird dabei mit einem Basismodell von ca. 3 mm Auflösung gearbeitet. Ob ein feineres Modell benötigt wird, ist noch Gegenstand einer laufenden Diskussion. Das 3D-Punktwolken-Modell liegt intern auf dem WWW-Ser-

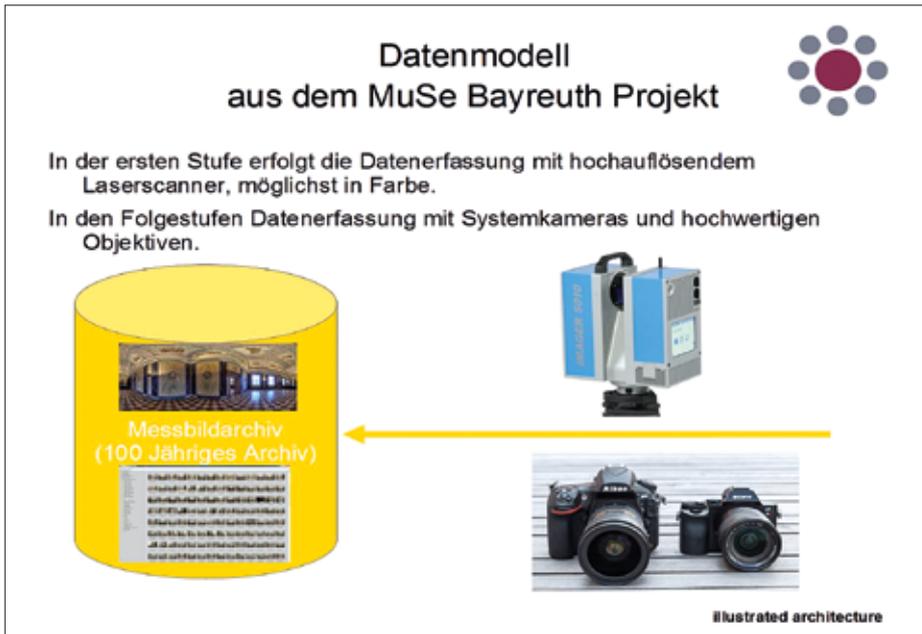


Abb. 15: Aufbau des Messbildarchives bei illustrated architecture

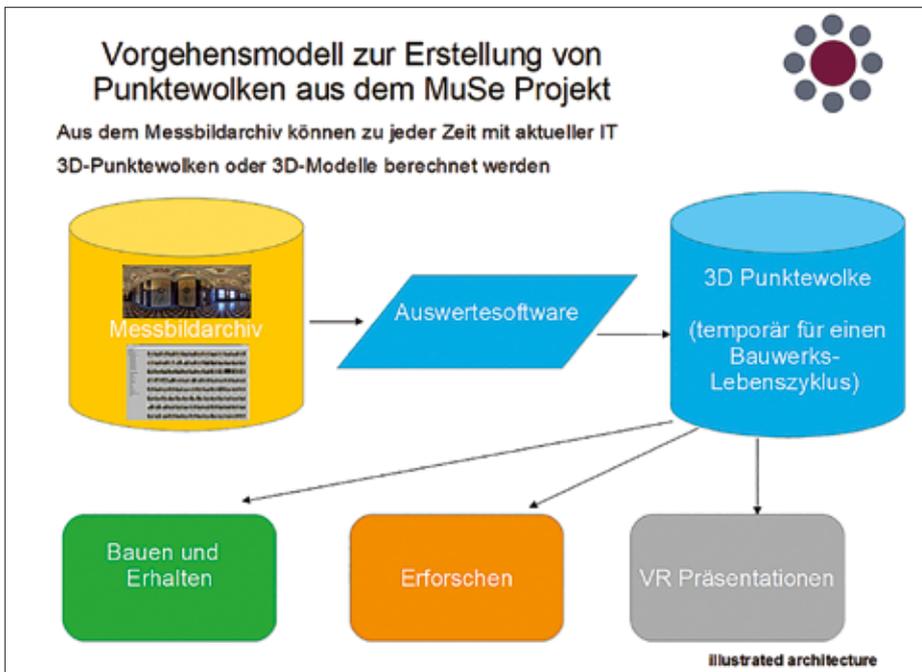


Abb. 16: Datenfluss

ver für Punktwolken des Hasso-Plattner-Institutes Potsdam (HPI) bei *illustrated architecture* vor und kann dort in beliebige Ausschnitte geteilt werden. Diese 3D-Ausschnitte können über Standard-Punktwolkenformate allen gängigen *BIM* (*Building Information Modeling*)- oder 3D-Programmen zugänglich gemacht werden, was mit dem projektleitenden Büro Barthel und Maus auch hervorragend funktioniert.

Abstract

For years, photorealistic “3D world modelling” with technologies from stereo vision, laser scanning and 3D computer graphics has been the goal of the project *Virtual Bavaria*.

“Virtual” tourism with a focus on landscapes and cities as well as the digital cultural heritage with a focus on 3D modelling of the outside and inside of grand historic buildings shall merge more and more in a multi-scale approach and allow a barrier-free virtual visit. The article shows examples of famous architectural monuments which in recent years, especially with camera-equipped drones, have been captured metrologically as meshed and texturable point clouds and modelled photorealistically in 3D.

The 3D modelling of the magnificent interiors as well as of the Venus Grotto at Schloss Linderhof is primarily based on the intelligent fusion of laser scan and camera data. The 3D reconstruction of partly or completely destroyed architectural monuments, but also of those buildings of the famous Bavarian King Ludwig II that were only planned and not realised complements the topic.

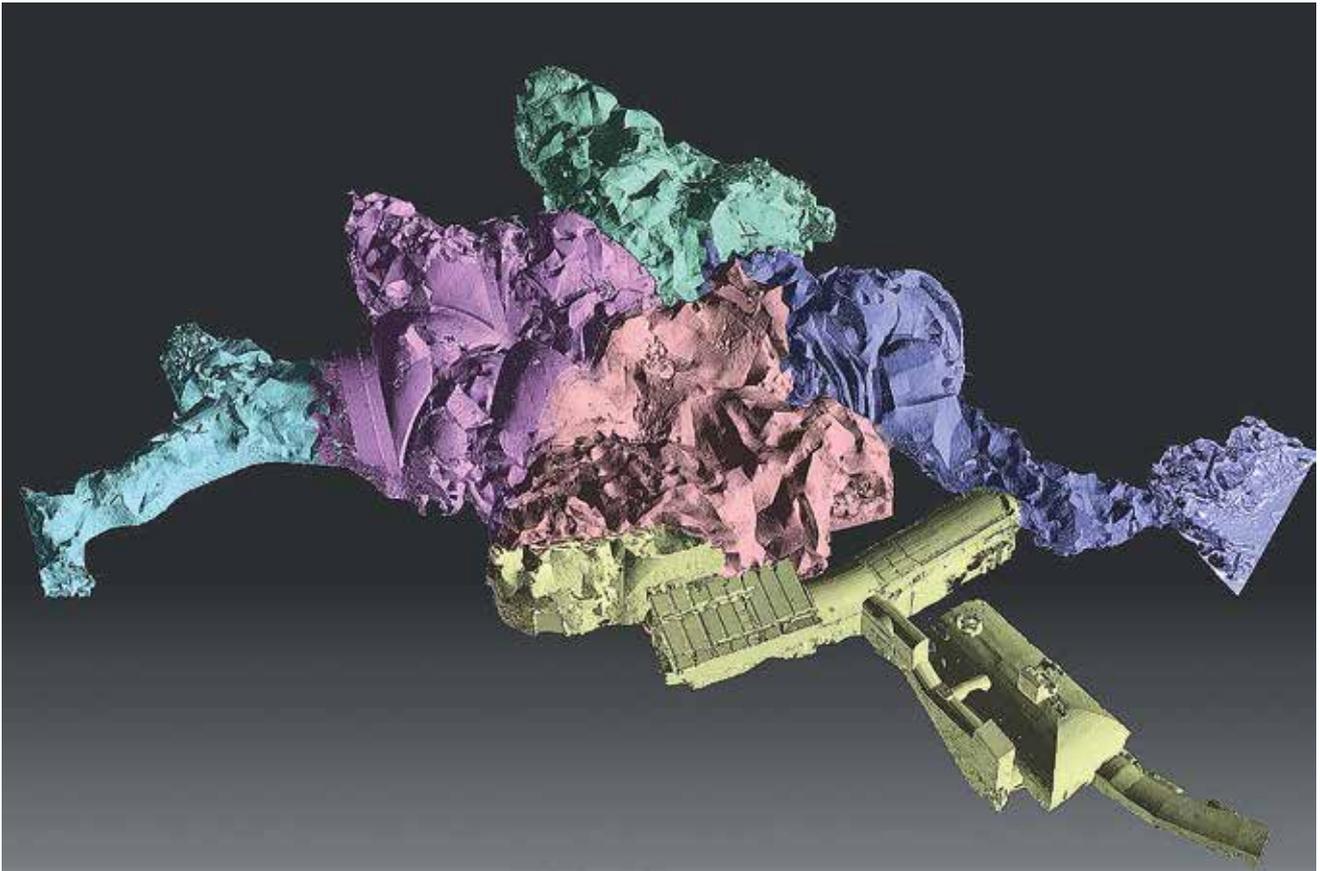


Abb. 17: Einteilung der 3D-Punktwolke der Venusgrotte in Bereiche

¹ HIRZINGER, Zeittunnel, 2015, S. 10–15.

² STRACKENBROCK – HIRZINGER – WOHLFEIL, Multi-Scale/Multi-Sensor, 2014.

³ WOHLFEIL – STRACKENBROCK – KOSSYK, Automated high resolution 3D reconstruction, 2013, S. 37

Literatur

Gerd HIRZINGER, Zeittunnel ins virtuelle Bayern, in: *aviso. Zeitschrift für Wissenschaft und Kunst in Bayern*, 1/2015, S. 10–15 (abrufbar über <https://www.bestellen.bayern.de>).

Bernhard STRACKENBROCK – Gerd HIRZINGER – Jürgen WOHLFEIL, Multi-Scale/Multi-Sensor 3D-Dokumentation und 3D-Visualisierung höfischer Prunkräume, in: Andreas BIENERT – Pedro SANTOS (Hrsg.), *Konferenzband EVA Berlin 2014. Elektronische Medien & Kunst, Kultur und Historie* (EVA Berlin, Band 21), Berlin 2014, S. 110–117.

Jürgen WOHLFEIL – Bernhard STRACKENBROCK – Ingo KOSSYK, Automated high resolution 3D reconstruction of cultural heritage using multi-scale sensor systems and semi-global matching, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial; Information Sciences*, Volume XL-4/W4, 2013, S. 37–43.

Abbildungsnachweis

Abb. 1, 3, 4, 5, 6: 3D RealityMaps GmbH
Abb. 2, 11, 13: VR-Dynamix GmbH
Abb. 7–10, 12: 3D-Modell: B. Strackenbrock illustrated architecture, VR Bearbeitung: VR-Dynamix GmbH
Abb. 12 (Foto): © Bayerische Schlösserverwaltung, www.schloesser.bayern.de
Abb. 14: Deutsches Museum, Bildarchiv (Prof. Pietsch)
Abb. 15–17: illustrated architecture