

MULTI-SCALE / MULTI-SENSOR 3D-DOKUMENTATION UND 3D-VISUALISIERUNG HÖFISCHER PRUNKRÄUME

Bernhard Strackenbrock^a, Prof. Dr. Gerd Hirzinger^b, Jürgen Wohlfeil^b

^a *illustrated architecture, Deutschland, bs@illustrated-architecture.de;*

^b *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Robotik und Mechatronikzentrum, Deutschland,
Gerhard.Hirzinger@dlr.de | Juergen.Wohlfeil@dlr.de*

KURZDARSTELLUNG: Architektur, Fassung und Ausstattung höfischer Prunkräume sind ab der Renaissance meist klar durchkomponierte Gesamtentwürfe, gleichsam begehbbare Kunstwerke, deren 3D-Erfassung höchste Ansprüche stellt. Schwierige Oberflächen wie Vergoldungen, Tapeten und Stoffe und eine hohe Dynamik in der Auflösung von Figuren, Möbeln und Wandbauteilen sind die Regel. Aufbauend auf der Erfahrung mit der Erfassung hochwertiger Prunkräume in den Schlössern Herrenchiemsee und Linderhof wurde daher vom DLR Robotik und Mechatronikzentrum ein Multi-Scale / Multi-Sensor Ansatz zur 3D-Erfassung dieser komplexen Räume definiert und in einem durch die Bayerische Forschungsförderung geförderten Projekt mit mehreren Partnern aus der Industrie und Denkmalpflege im Rahmen des MuSe Projektes für die Restaurierung des Markgräflichen Opernhauses in Bayreuth umgesetzt.

Zielsetzung des Projektes ist die Verschmelzung des Laserscannens mit Farbinformationen und moderner Methoden der Photogrammetrie. Dazu werden ein Farblaserscanner ZF 5010C und eine hochleistungsfähige, metrische PCO sCMOS Kamera für einen gemeinsamen 3D Workflow mit Auflösungen zwischen 0,1 und 2 mm eingesetzt. Durch das sCMOS Prinzip mit nur 1,5 bis 2 Elektronen Rauschsignal bei bis zu 60% Quanteneffizienz des Bildwandlers können HDR Bilder „at one Shot“ mit 5MP Auflösung und einem linearen 16 Bit Ausgangssignal erstellt werden. Die speziell aufgebaute MuSe Kamera kann mit der Hand geführt und um ein leistungsfähiges LED-Flash ergänzt werden. Die Aufnahmen erfolgen mit 10 bis 30 Vollbildern pro Sekunde, so dass die aufzunehmenden Objekte gleichsam abgefilmt werden. Durch stufenweise Verkleinerung des Kameraabstandes zum Objekt kann die geometrische Auflösung dabei bis an die Abbildungsgrenze der verwendeten Objektive gesteigert werden. Wie in der klassischen Photogrammetrie, stellen auch hier die Messfilme und Messbilder das eigentliche digitale Original dar. Diese Bilddaten können beliebig oft in unterschiedlichen Auflösungen ausgewertet werden; dazu zählt auch, dass nach vielen Jahren mit dann aktuellen Methoden wieder auf das Material zugegriffen werden kann.

Für den 3D-Workflow zur Erstellung „begehbare“ 3D-Modelle werden zunächst alle Bilder mit einem *Structure from Motion* (SfM) Ansatz vororientiert. Anschließend werden die Kameraparameter und Aufnahmepunkte mit einer klassischen Bündelausgleichung - ergänzt um die Messungen aus den Laserbildern - optimiert. Danach wird für jedes Kamerabild auf der Basis von einer Vielzahl von Nachbarn mit dem Semi Global Matching (SGM) des DLR ein perspektivisches Tiefenbild berechnet. Die einzelnen Tiefenbilder werden vermascht, die Teilmeshes fusioniert und dann texturiert. Die fertigen Daten werden dann an 3D-Studio oder an eine „Gamingengine“ übertragen und können dort in Echtzeit animiert oder mit weiteren Informationen versehen werden. Mit anderen Workflows können Pläne oder Orthophotos erzeugt werden.

Bei gut texturierten Oberflächen, wie sie in der Archäologie, bei Steinrestaurierung oder an Freskogemälden üblicherweise anzutreffen sind, ist der beschriebene 3D-Aufnahmeprozess auch mit optimierten Systemkameras in hohen Qualitäten möglich, wobei Auflösungen ab 0,25 mm erzeugt werden können. Entsprechende Systemkameras können auch vom Multicopter eingesetzt werden. Der sichere Umgang mit professionellen Digitalen Kameras gehört bei Archäologen, Bauforschern, Restauratoren und Kunstgeschichtlern aber fast selbstverständlich zum Handwerk. So entstand die Idee, für diese Bereiche einen „3D-Koffer“ mit kalibrierter Kamera sowie einem Laptop mit den erforderlichen Programmen zu packen, mit dem alle Arbeiten vor Ort ausgeführt und kontrolliert werden

können. Zur Erstellung hochauflösender 3D-Scans oder 3D-Modelle können die Daten dann an illustrated architecture weitergeleitet werden. Erste Versuche in Ostia und an barocken Deckenmalereien erfolgen zurzeit, und sollen auf der Konferenz mit vorgestellt werden.

1. EINFÜHRUNG

Das Markgräfliche Opernhaus in Bayreuth aus der Hand des bedeutendsten Theaterarchitekten der Zeit, Giuseppe Galli Bibiena, steht in einzigartiger Weise für die Barocke Fest- und Opernkunst und ist ein Beleg für diese europaweit ausgeprägten und heute weitestgehend verschwundenen Höhepunkte barocker Inszenierung.

Während diese seinerzeit europaweit verbreitete und von vornherein auf kurze Lebensdauer ausgelegte Architekturgattung heute grundsätzlich nicht mehr im Original erhalten, sondern nur durch Stiche und Bilder überliefert ist, bietet das Logenhaus des Markgräflichen Opernhauses in seiner authentischen Materialität und in seiner Dekoration mit ihrem hohen Anteil illusionistischer Malerei eine heute singuläre, sozusagen „eingefrorene“ Momentaufnahme dieser ephemeren, für den Augenblick geschaffenen Festarchitektur.

Nach den vielen Brandkatastrophen und mutwilligen Zerstörungen seit dem 19. Jahrhundert mutet es wie ein „Wunder“ an, dass hier in seltener Vollkommenheit diese eigentlich für die Vergänglichkeit gedachte Architektur erhalten ist. Daher scheint es in höchstem Maße gerechtfertigt, dass es für das UNESCO-Weltkulturerbe vorgeschlagen wurde.

Dieses aus seiner Bausubstanz begründete (Holz, Leinwand) „brandgefährliche“ Welterbe zu bewahren und auch den nächsten Generationen schadlos und trotzdem lebendig beispielbar zu übergeben, stellt eine besondere Herausforderung an Architekten, Denkmalpfleger und alle Beteiligten dar. Für die Bewahrung und Erforschung eines Bauwerkes von solch einmaligem Niveau müssen höchste Anforderungen an Planunterlagen und Dokumentation gestellt werden. Hierfür bietet sich besonders die millimetergenaue 3D-Modellierung auf der Basis photogrammetrischer Aufnahmen an. Bereits im 19ten

Jahrhundert wurde erkannt, dass photogrammetrische Aufnahmen die einzigartige Möglichkeit bieten, mit überschaubarem Aufwand am Objekt virtuelle Konserven von Denkmälern, Ausgrabungsstätten und Museumsstücken zu erstellen und zu archivieren. Dies wurde mit der Gründung der „königlich-preußischen Messbildanstalt“ 1885 erstmals institutionalisiert. In den folgenden 30 Jahren entstanden ca. 20.500 Meßbilder größtenteils auf Glasplatten im Format 40x40 cm, die noch heute ausgewertet werden können.

2. MOTIVATION

Die 3D-Erfassung im mm- oder submm-Bereich großer immobiler Kunstwerke, oder gleichsam begehrter Kunstwerke, wie sie uns in der Gattung der höfischen Prunkräume begegnet, stellt höchste Anforderungen an die Flexibilität der eingesetzten Sensorik. Vereinzelt gibt es zwar Ansätze, diese Aufgaben mit flächigen Lichtschnittsystemen (Streifenlichtprojektoren) zu lösen. Da bei dieser Technologie aber mehrere Lichtmuster nacheinander auf das Objekt projiziert werden und der Sensor sich während der gesamten Aufnahmezeit nicht bewegen darf, sind entsprechend robuste Aufstellungsmöglichkeiten erforderlich. Bei höheren Objekten sind dafür spezielle Baugerüste notwendig, die schnell die Kosten für die eigentliche Digitalisierung weit überschreiten können und in jedem Fall zu einer Gefährdung des Objektes führen.

Die am DLR Institut für Robotik und Mechatronik erarbeiteten photogrammetrischen Ansätze zur fotorealistischen 3D-Weltmodellierung für die robotische Umweltexploration und die Fernerkundung ließen es aber möglich erscheinen, diese Ansätze mit entsprechend kleinen und in der Hand führbaren Kameras auf Kunstwerke zu übertragen, wobei dem mehrfach ausgezeichneten Algorithmus des SemiGlobalMatching (SGM) als einer der

bedeutendsten Entwicklungen auf dem Feld der Photogrammetrie der letzten Jahre die zentrale Rolle zur Erzeugung von 3D-Daten zukommt.

3. MULTI SENSOR ANSATZ

Im Rahmen einer langjährigen Zusammenarbeit zwischen der Bayerischen Schlösserverwaltung und dem DLR sind in den vergangenen Jahren Lösungskonzepte zur Modellierung höfischer Prunkräume mit Auflösungen zwischen 2 und 5 mm auf der Basis von ZF Laserscannern und diverser Kamerasysteme entwickelt und erprobt worden. Für eine authentische 3D-Dokumentation höfischer Prunkräume, insbesondere für das reichlich mit Figuren ausgestattete Markgräfliche Opernhaus in Bayreuth, ist aber eine Auflösung von 2 mm zu ungenau und die vielen komplexen Hinterschnidungen am Bauschmuck lassen sich mit Laserscannern auch nur unzureichend erfassen. Mit der Laserscannertechnologie kann aber ein Basismodell (Grob-Modell) des Objektes in einem globalen Koordinatensystem erstellt werden, das zur Verortung des handgeführten, hochauflösenden photogrammetrischen 3D-Sensors dient. Dieser für das Markgräfliche Opernhaus konzipierte und entwickelte miniaturisierte 3D-Kamerakopf wurde aus dem ebenfalls im DLR Robotik und Mechatronik-Zentrum RMC entwickelten Multi Airborn Camera System abgeleitet. Das MACS Kamerasystem wird seit 2010 als modulares 3D-Aufnahmesystem für unterschiedliche Flugzeugtypen und den photogrammetrischen Nahbereich am DLR eingesetzt.

4. HARDWARE

4.1 LASERSCANNERSYSTEM

Zur Erstellung der Basismodelle kommt der Z+F IMAGER 5010C-Laserscanner zum Einsatz. Durch das große vertikale Gesichtsfeld von 320° und einer 3D-Messpunktrate von mehr als einer Millionen Punkte/Minute ist das System hervorragend für komplexe Innenräume geeignet. Durch eine in den Scanner integrierte CMOS Kamera können zudem HDR (High Dynamic Range) Bilder der Szene erfasst werden. Dabei werden nach dem 3D-Scanvorgang 42 Kamerapositionen durch den IMAGER 5010C angefahren und auf jeder Position mehrere Bilder mit verschiedenen Belichtungszeiten aufgenommen. Diese 2D Farbbilder sind vollständig parallaxenfrei zu den 3D-Scan-Informationen und werden zur automatischen Einfärbung der

Laserscannerpunktwolke herangezogen. Für den weiteren photogrammetrischen Prozess ist das von besonderem Vorteil, da die Daten so direkt zur Verortung und Orientierung und der Kameradaten herangezogen werden können.

4.2 PORTABELES 3D-KAMERASYSTEM

Das Kernstück des 3D-Kamerasystemes sind die neuen scientific-CMOS (sCMOS) Bildsensoren der Kelheimer Firma PCO AG. Die Kamera kann bis zu 100 Bilder/Sekunde mit 5,5 Megapixeln erfassen. Das besondere an den sCMOS Sensoren ist aber die hohe Graustufendynamik der Pixel von mehr als 1:20.000, wobei gleichsam HDR Bilder mit einer Belichtung entstehen. Dies ist für die weitere 3D-Auswertung sehr nützlich, da so selbst auf schwierigen Oberflächen wie Naturstein, Stoffen oder Vergoldungen noch genügend Texturunterschiede erfasst werden können. Dies ist die Voraussetzung, um im erstem Schritt die Kamerastandpunkte sicher aus den Bildinhalten zu bestimmen ohne auf ein externes Trackingsystem zurückzugreifen, und dann, in einem zweitem Schritt, aus jeweils 10 bis 15 Partnern eines Bildes mit dem SGM Verfahren für jedes Pixel einer Aufnahme den Abstand zwischen Kamerastandpunkt und Objekt Oberfläche zu berechnen.

Maßgeblich beim Kameraaufbau war es, ein für die Führung mit der Hand entsprechend kleines und leichtes System aus Kamera, Licht und Rechner aufzubauen. Obwohl das Basismodell der PCO EDGE Kamera eine Datenrate von bis zu 1.100 MB/Sekunde erlaubt, haben wir uns für eine Datenübertragung via USB III zwischen Kamerakopf und Datenrecorder entschieden, um Gewicht zu sparen. Als Objektiv kommen lichtstarke Master Primes aus dem digitalen Kino zum Einsatz. Diese für den anspruchsvollen Markt des professionellen Kinos konzipierten Objektiv sind entsprechend robust und ausschließlich manuell zu bedienen, was eine exakte und über eine Aufnahmeserie stabile Kalibrierung ermöglicht.

Um das 3D-Kamerasystem auch Netzstrom-unabhängig zu betreiben, wurde darauf geachtet, dass alle Komponenten der Kamera, insbesondere auch das Kamerakopflicht aus insgesamt 8 Gruppen zu je 16 LED in 4 Gehäusen, mit einer

ebenfalls vom Kameramann zu tragenden Akku-Stromversorgung auskommen.

5. WORKFLOW ZUR ERFASSUNG VON RAUM-KUNSTWERKEN UND GROßEN MUSEUMSOBJEKTEN

Im ersten Arbeitsschritt wird ein 3D-Laserscanaufmaß, wie beim verformungsgerechten Aufmaß von Bauwerken und baulichen Anlagen mittlerweile üblich, angefertigt. Dabei ist zweckmäßigerweise ein Laserscanner mit parallaxenfreier Farbkamera zu verwenden und eine genügend hohe Abtastrate des Scanners zu wählen, um später die Verortung von photogrammetrischen high Resolution Modellen zu erleichtern. Die Laserscans werden in das vom DLR für unterschiedliche Sensoren eingesetzten T3C Format, bestehend aus einem TIFF Bild für den sichtbaren Anteil des 3D-Scans und einem TIFF Bild für die Tiefenwerte sowie einer Parameterdatei mit den erforderlichen Beschreibungen, umgewandelt und mittels klassischer geodätischer Ausgleichung orientiert. Anschließend werden die T3C Daten in das Projektarchiv zur Berechnung des Basismodells und/ oder in ein Langzeitarchiv übertragen.

Für die Bestimmung des Basismodells werden dabei zuerst aus den T3C Daten Teilmeshes erzeugt, die mit dem Softwarepaket aus dem DAVID Laserscanner fusioniert werden, wobei die endgültigen Meshes entstehen. Als letzter Schritt erfolgt dann die Texturierung der Modelle mit dem sichtbaren Anteil der 3D-Scans oder den orientierten Digitalbildern. Der gesamte Workflow ist im Programmsystem *ScanBox* abgebildet, die auch verschiedene Fremdprogramme einbinden kann.

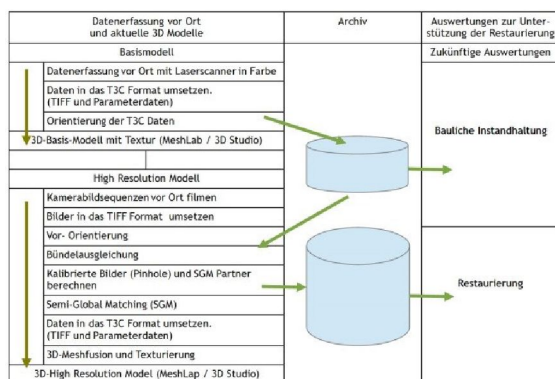


Abb. 1: Workflow Diagramm

Im Markgräflichen Opernhaus wurden zu Beginn des MuSe Projektes ab Frühjahr 2012 ca. 120 Laserscans zu je 10.000 x 20.000 3D-Pixeln von der Parkett-Ebene und aus den 3 Logen-Ebenen heraus erfasst. Weitere ca. 100 Scans zu je 5.000x10.000 3D-Pixeln wurden in den Logen selbst aufgenommen. Da zu diesem Zeitpunkt noch kein Farbscansystem mit Beleuchtung zu Verfügung stand, wurden zusätzlich ca. 1.200 hochauflösende Digitalbilder (36 MP) mit einer professionellen Spiegelreflexkamera aufgenommen. Alle Scans im T3C Format und Bilder im TIFF Format wurden in einem gemeinsamen Koordinatensystem orientiert. Aus diesen Daten wurde dann für die weitere Projektplanung ein verformungsgerechter Grundriss des Logenhauses erstellt und darauf aufbauend das 3D-Basismodell mit 2-3 mm Auflösung als Mesh Modell in 5 Abschnitten berechnet, texturiert und für die virtuelle Besichtigung aufbereitet. Die für das 3D-Basismodell erfassten Daten dienen ebenfalls als Referenzgeometrie zur Verortung der mit dem handgeführten Kamerasystem aufzunehmenden Details.

Für das 3D-High-Resolution-Modell wurden einzelne von den Restauratoren bereits vorgereinigte Masken und Figuren im Markgräflichen Opernhaus mit dem handgeführten Kamerasystem aufgenommen. Durch eine langsame Bewegung der Kamera und einer Bildrate von mindestens 5 Hz werden dabei alle Oberflächen eines Objektes aus vielen unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen. Damit bei der Kamerabewegung keine unscharfen Bilder entstehen, muß eine entsprechend kurze Belichtungszeit im Bereich einer 1/1000 Sekunde gewählt werden. In den aufgenommenen Bildfolgen werden dann mit modernen *Structure from Motion* (SfM) Verfahren je Bild einige 1000 Feature Points gesucht und deren korrespondierende Partner in den anderen Bildern des selben Objektausschnittes identifiziert. Dazu wird der robuste *Scale invariant feature transformation* (SIFT) Algorithmus eingesetzt, der auch bei größeren perspektivisch verzerrten Abbildungen korrespondierende Eigenschaften noch eindeutig zuordnen kann, wobei das bestehende Programm VisualSfM eingesetzt wird. Damit kann eine ungefähre äußere Orientierung und ein vorläufiges Punktwolkenmodell direkt

nach den Aufnahmen erzeugt werden, um die Vor-Ort-Arbeiten zu kontrollieren.

Für die Erzeugung der endgültigen Tiefenbilder mit dem SGM Verfahren zur Ableitung des 3D-High-Resolution-Modells sind diese Informationen aber noch zu ungenau und werden nur als Eingabe-Daten in ein am DLR entwickeltes Bündelausgleichungssystem benutzt, das neben der Kalibrierung und Orientierung aller Bilder auch die Verortung im Basismodell und die Zusammenstellung der SGM Daten übernimmt. Die Ergebnisse der SGM Berechnung werden als T3C Datensätze in das ScanBox System übernommen und analog zum Basismodell in ein Mesh 3D-Modell umgesetzt.

6. 3D-BASISMODELLE HÖFISCHER PRUNKRÄUME



Abb. 2: 3D-Modell des Prunkschlafzimmers Ludwig II. in Herrenchimsee. Aufgenommen mit Z+F Laserscanner und Systemkamera



Abb. 3: Prunkschlafzimmer Ludwig II. im Schloss Linderhof

Das DLR Institut für Robotik und Mechatronik befasst sich seit 2004 intensiv mit der 3D-Dokumentation höfischer Prunkräume, wobei diese Arbeiten in erster Linie der Erprobung von im Institut entwickelter Hard- und Software-Komponenten in einem ansprechenden Ambiente dienen.

Zunächst wurde dabei der Laserscanner der Firma Z+F (Zoller+Fröhlich mbH Wangen im Allgäu) in Kombination mit einer am Institut entwickelten Zeilenkamera erprobt. Später wurde die Zeilenkamera durch eine digitale Systemkamera in Kombination mit einer Pan-Tilt Einheit ersetzt. Seit 2010 war das Verfahren so weit vorangeschritten, dass die komplexen Schlafzimmer König Ludwigs II. in den Schlössern Linderhof und Herrenchimsee, parallel zu laufenden Reinigungsarbeiten, in authentische 3D-Modelle umgesetzt werden konnten. Daraus entstand die Idee zum MuSe Bayreuth Projekt, das durch eine Förderung der Bayerischen Forschungsstiftung und der Hauptsponsoren PCO AG Kelheim, Z+F Zoller+Fröhlich mbH Wangen im Allgäu und der Time in The Box mbH München von Sommer 2012 bis Sommer 2014 durchgeführt werden konnte. Time in The Box übernahm dabei auch dankenswerterweise die Aufbereitung des 3D-Basismodells für eine interaktive Besichtigung mittels Stereoprojektion oder 3D-Brille (Oculus Rift) in einer vollständig web-fähigen Umgebung.

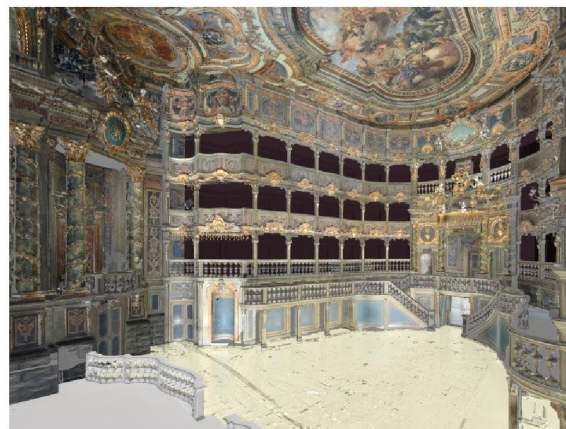


Abb. 4: Markgräfliches Opernhaus in Bayreuth, digitale Baustelle des Basismodells



Abb. 5: 3D-Präsentation mit Oculus Rift

7. 3D-HIGH RESOLUTION MODELLE

Historische Prunkräume zeichnen sich oft dadurch aus, dass der Bauschmuck, fest mit dem Bauwerk verbundene Gemälde (Fresko) oder Wandbespannungen und die Raumausstattung, eine künstlerische Einheit, gleichsam ein begehbares Kunstwerk bilden. Ist ein Basismodell vorhanden, können momentan alle Objekte mit opaken Oberflächen, ausgenommen Spiegel, freihändig mit dem beschriebenen Verfahren aufgenommen werden, wobei die Auflösungen theoretisch nur durch die Abbildungsleistung der eingesetzten Objektivs begrenzt ist. Praktisch sollte man jedoch eine Auflösung ab 0,1 mm bei den genannten Objekten anstreben, um die Datenmenge überschaubar zu halten. Mit dem selben Vorgehen können auch große Museumsobjekte direkt in den Schauräumen oder im Depot aufgenommen werden, ohne dass sie berührt oder verschoben werden müssen.



Abb. 6: Markgräfliches Opernhaus in Bayreuth. Filmausschnitt zur 3D-Dokumentation einer Maske.

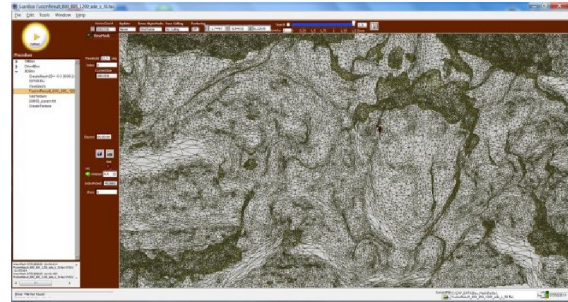


Abb. 7: Markgräfliches Opernhaus in Bayreuth. 3D-Teilmodell (ScanBox)

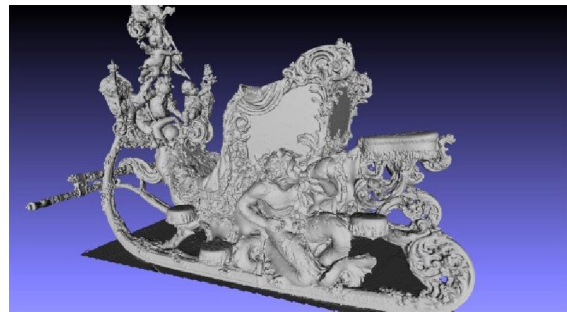


Abb. 8: Prunkschlitten Ludwig II. im Marstallmuseum der BSV in München; 3D-Modell auf der Basis von zwei Z+F Laserscans und 3.500 Bildern mit der PCO Kamera. Auflösung 0,5 mm, Aufnahmezeit ca. 60 Minuten

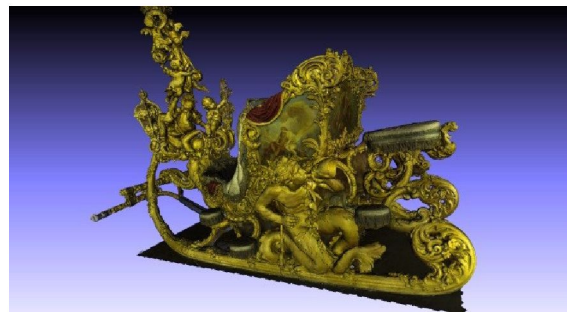


Abb. 9: Prunkschlitten Ludwig II. mit Textur

8. AUSBLICK

In der Archäologie, Restaurierung und in den historischen Wissenschaften sind langfristige Forschungsarbeiten, bei denen Objekte gleichsam Schicht für Schicht aufgedeckt und dokumentiert werden müssen, häufig anzutreffende Aufgabenstellungen. Diese können ideal durch die einmalige Erstellung eines 3D-Basismodells zu Beginn der Arbeiten und durch wiederholte Aufnahme von 3D-High Resolution-Modellen unterstützt werden.

9. DANKSAGUNG

An dieser Stelle gilt unser Dank der Bayerischen Forschungsstiftung für die Unterstützung des MuSe Bayreuth Projektes. Ebenfalls möchten wir uns bei der Bayerischen Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen für die Arbeitsmöglichkeiten in den höfischen Prunkräumen bedanken.

10. LITERATURHINWEIS

- [1] Bauer, N.: Der DAVID-Laserscanner: *Erprobung und Analyse geeigneter 3D-Messprinzipie zur berührungslosen optischen Messung anthropometrischer Daten*. Bachelor-Thesis at Technische Universität Ilmenau 2013.
- [2] Ernst, I. and Hirschmüller, H.; *Mutual Information based Semi-Global Stereo Matching on the GPU*. International Symposium on Visual Computing, Las Vegas. 2008.
- [3] Hirschmüller, H., *Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 30 pp. 328–341, 2 2008.
- [4] Hirschmüller, H.: and Bucher, T., *Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching*. DGPF Vienna 2010.
- [5] Hirschmüller, H.: Buder, M. and Ernst, I., 2012. *Memory Efficient Semi-Global Matching*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I(3), pp. 371–376. 2012.
- [6] Hirzinger, G. und Bodenmüller, T. und Hirschmüller, H. und Liu, R. und Sepp, W. und Suppa, M. und 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.
- [7] Hirzinger, G. and B.Strackebrock, in Günthner W., Borrmann A.: *Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter ausführen* Springer 2011 pp. 50–59.
- [8] Holst, Gerhard: *sCMOS – Die eierlegende Wollmilchsau der Bildsensorik* In: Optik & Photonik Oktober 2009.
- [9] Holst, Gerhard und Strackebrock, Bernhard: *Präzise 3D-Messung im Vorübergehen* In: Optik & Photonik Juni 2014.
- [10] F. Lehmann et al.: *MACS – Modular Airborne Camera System for generating photogrammetric high-resolution products*, Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation pp 435 – 446, 6, 2011.
- [11] Scheibe, Karsten: *Design and Test of Algorithms for the Evaluation of Modern Sensors in Close-Range Photogrammetry*. Dissertation, Universität Göttingen. 2006.
- [12] 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.
- [13] Wu, C.: *Towards Linear-time Incremental Structure from Motion*. Proc. of International Conference on 3DTV-Conference pp. 127 – 134. 2013.
- [14] Wu, C., Agarwal, S., Curless, B. and Seitz, S. M.: *Multicore Bundle Adjustment*. In: In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, pp. 3057–3064, 2011.