

Jena4D – Ein virtuelles Stadtgeschichtsbuch zum Mitmachen

FERDINAND MAIWALD^{1,2}, CLEMENS BECK² & SANDER MÜNSTER²

Zusammenfassung: Jena4D ist der Versuch Bürgerinnen und Bürger an der Digitalisierung ihrer Heimatstadt mitwirken zu lassen. Dafür wird die webbrowserbasierte mobile VR-Anwendung 4DCity bereitgestellt, die 3D-Stadtmodelle, historische Fotografien und weitere Daten im Stadtraum anzeigen kann. Im Rahmen eines Wettbewerbes bekommen die Nutzenden die Möglichkeit eigene historische Stadtfotografien zu digitalisieren sowie historische Bilder nachzufotografieren (Refotografie). Besonders die Digitalisierung privater Bestände ist dabei ein voller Erfolg. Aus den digitalisierten Daten kann mittels angepasster Structure-from-Motion (SfM) Pipeline ein detailliertes historisches 3D-Stadtmodell erstellt werden, dessen Ergebnisse in die Anwendung transferiert werden können. Da die ermittelten Resultate für die Texturierung der Stadtmodelle noch teilweise zu ungenau sind, soll in Zukunft geprüft werden, ob Refotografie exaktere Ergebnisse liefert.

1 Einleitung

Um stadtgeschichtliche Informationen immersiver sicht- und erlebbar zu machen, sind vierdimensionale Darstellungen von Vorteil (vgl. TVERSKY 2005; MUENSTER 2022). Die vierte Dimension entsteht dabei durch die Verschmelzung von dreidimensionaler Information mit einer zeitlichen Komponente. Während bisherige Ansätze zumeist mit unterschiedlichen Modellen der Zeitschnitte operieren, erfolgt dies in unserer Anwendung durch die zeitveränderliche Texturprojektion historischer Fotografien auf dreidimensionale Geometriemodelle (MUENSTER et al. 2021b).

Die genaue Bestimmung der Kameraorientierungsparameter historischer Fotografien erfordert die Verwendung elaborierter Algorithmen (MAIWALD 2022). Bei einer geringen Anzahl an Aufnahmen sind die Ergebnisse noch ungenau und unzureichend verwendbar für Anwendungen in der Virtual Reality (VR) oder Augmented Reality (AR) (MAIWALD & SARDEMANN 2022).

Deshalb beschäftigt sich das Projekt Jena4D damit, wie historische Fotografien unter Zuhilfenahme einer VR-Umgebung exakter positioniert werden können. Dafür sind vor allem eine ausreichende Menge an historischen Fotos notwendig. Deswegen werden Bürgerinnen und Bürger der Stadt Jena in Rahmen eines Wettbewerbs motiviert, historische Motive nachzufotografieren (sog. Refotografie). Refotografie bezeichnet dabei den Prozess der Fotografie einer Szene, von der bereits zu einem früheren Zeitpunkt eine Aufnahme getätigt wurde. Um das zeitgenössische Bild im Folgenden möglichst genau zu überlagern ist das Ziel, die exakte Kameraposition der historischen Fotografie einzunehmen (SCHAFFLAND & VORNBERGER 2022). Die gestellte Aufgabe kann dabei komplett in der browserbasierten VR-Anwendung 4DCity (<https://4dcity.org>) gelöst werden (Abb. 1). Das gesammelte Wissen wird anschließend öffentlich zugänglich gemacht.

¹ TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, D-01069 Dresden, E-Mail: ferdinand.maiwald@tu-dresden.de

² FSU Jena, Juniorprofessur für Digital Humanities (Bild/Objekt), Schloßgasse 10, D-07743 Jena, E-Mail: [ferdinand.maiwald, clemens.beck, sander.muenster][@uni-jena.de](mailto:ferdinand.maiwald, clemens.beck, sander.muenster@uni-jena.de)

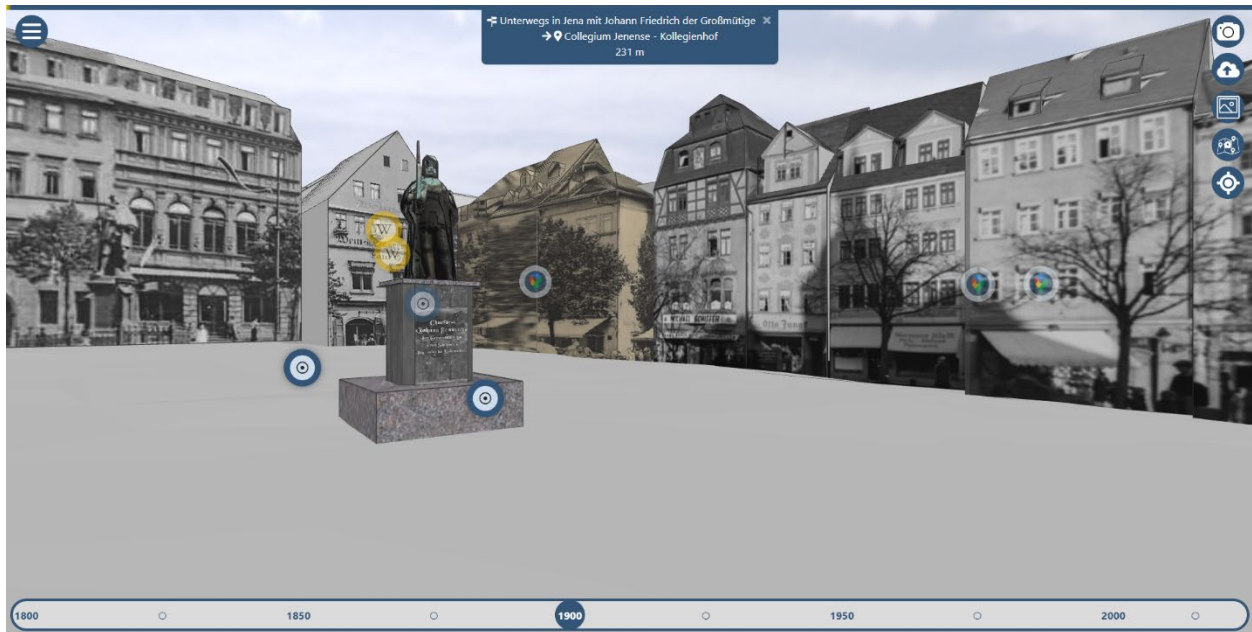


Abb. 1: 4D-Browseranwendung in VR, bei der historische Aufnahmen für die Texturierung dreidimensionaler Gebäudemodelle genutzt werden (abgerufen am 21.11.2022 unter <https://4dcity.org>).

2 Technische Basis und Funktionalitäten

Die vorgestellte Anwendung basiert auf zwei Anwendungen, die in vorangegangenen Projekten entwickelt wurden.

Die Struktur der Datenbank stammt aus dem 4D-Browser, der in der Nachwuchsforschergruppe HistStadt4D entwickelt wurde (MAIWALD et al. 2019). Der Kern des Backend ist eine *RESTful API* basierend auf *Node.js* und *Express.js*. Diese verwaltet nicht nur die Datenbankabfragen, sondern ermittelt auch automatisiert die Metadaten aus dem Originalrepositorium.

Die Daten selbst werden entsprechend des CIDOC Conceptual Reference Model (CRM) gespeichert. Daher werden die Daten nicht in einer relationalen Datenbank verwaltet, sondern in einer Graph-Datenbank. Im Falle des 4D-Browsers wird *Neo4j* verwendet (BRUSCHKE & WACKER 2014).

Diese bestehende Datenbank ermöglicht in der darauf aufbauenden VR-Anwendung Jena4D das Hinzufügen von 3D-Modellen, (historischen) Fotografien, digitalen Geländemodellen (DGM), (historischen) Karten und Points of Interest (POI).

Vorentwicklungen zur VR-Anwendung wurden bereits im Projekt Kulturerbe4D geleistet. Um die o.g. 3D-Modelle und Fotografien immersiver darzustellen, wurde eine eigenständige browser-basierte Lösung realisiert. Um die Installation einer App auf den Endgeräten der Nutzenden zu vermeiden, wird auf Grundlage von *Angular* und *three.js* entwickelt. Dies ermöglicht das Aufrufen der Anwendung im Browser sowohl auf dem für die Anwendung empfohlenen Mobilgerät als auch auf dem Desktop-PC. Dabei werden alle gängigen Browser und Betriebssysteme unterstützt.

Durch Nutzerabfrage wird der Zugriff auf die Sensoren des Mobilgerätes realisiert und infolgedessen kann der Nutzerstandort sowie die Orientierung des Gerätes ermittelt werden. Anschließend werden in einem kleinen Radius um den Nutzerstandort automatisiert 3D-Gebäudemodelle

aus OpenStreetMap (meist Level-of-Detail (LOD) 1-2) sowie das nähere digitale Geländemodell über die *Elevation API* geladen. Um städtebauliche Informationen zu erhalten, werden zudem automatisiert von nahegelegenen Gebäuden Informationen aus Wikipedia und weiteren Online-Portalen (Triposo, Yelp etc.) bereitgestellt (Abb. 2).

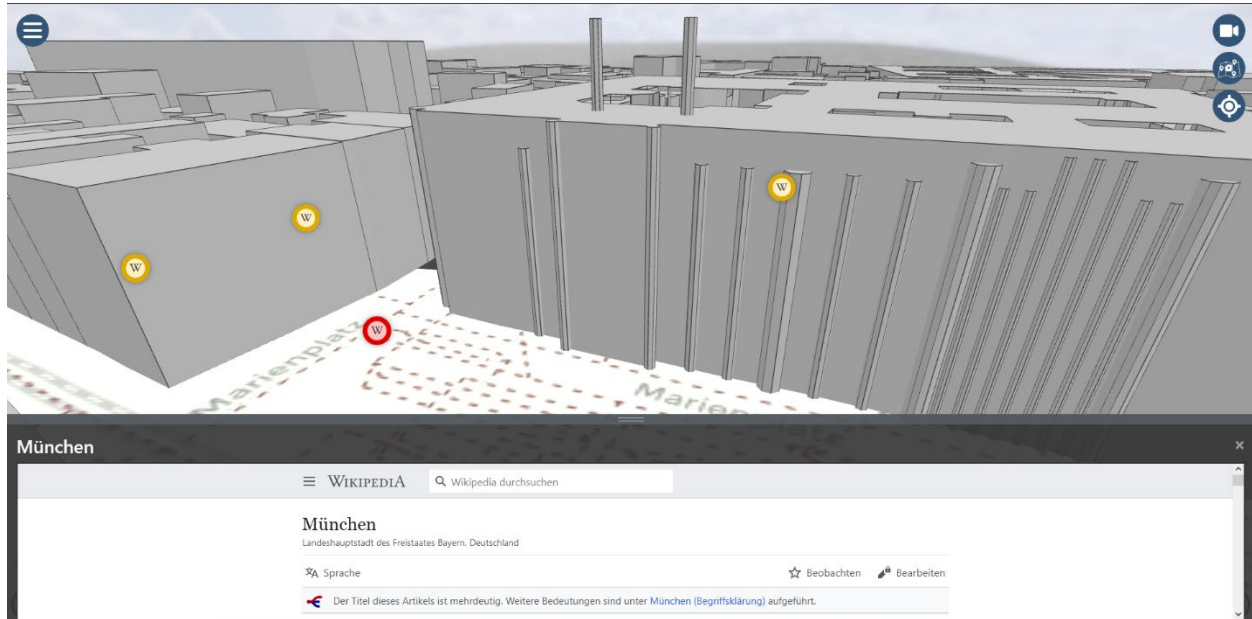


Abb. 2: 3D-Gebäudemodelle aus OpenStreetMap, digitales Geländemodell sowie Gebäude-informationen beim Öffnen der Anwendung in München

Das vorangegangene Projekt Kulturerbe4D konzentriert sich darauf die 3D-Szenen insbesondere in Jena und Dresden mit historischen Fotografien zu füllen. Die Fotografien werden automatisiert mittels eigens entwickeltem Shader direkt auf die Gebäudegeometrie projiziert, um die Gebäudemodelle in Echtzeit zu texturieren. (MÜNSTER et al. 2021a).

Ziel ist es Kulturgeschichte und baugeschichtliche Zusammenhänge in der Stadt zu vermitteln und erlebbar zu machen. Über das Hinzufügen von Stadttouren können Denkmäler und darauf wirkende anthropogene Einflussfaktoren interaktiv erforscht werden.

Im hier vorgestellten Projekt Jena4D wird die entwickelte Applikation als partizipative Wissensplattform zur 4D-Darstellung der Jenaer Innenstadt erweitert.

Dafür werden mehrere neue Funktionalitäten in die Anwendung integriert. Es ist nun möglich eigene historische Fotografien mit entsprechenden Metadaten in die Datenbank hochzuladen. Dafür können analoge Originale mittels der Kamera des Mobilgeräts digitalisiert werden. Um Missbrauch zu vermeiden, wird automatisiert geprüft, ob auf dem digitalen Bild Gebäude bzw. Stadtansichten zu sehen sind.

Des Weiteren wurde ein Refotografie Modul implementiert. Dieses erlaubt die Auswahl einer bereits in der Datenbank gespeicherten historischen Fotografie der Stadt Jena.

Ziel ist es das abgebildete Motiv in der Innenstadt Jenas zu finden. Vor Ort wird dann auf die Kamera des Nutzenden zugegriffen. Mittels transparenter Überlagerung des Originals in der Anwendung gilt es nun das Motiv so präzise wie möglich nachzufotografieren (Abb. 3).

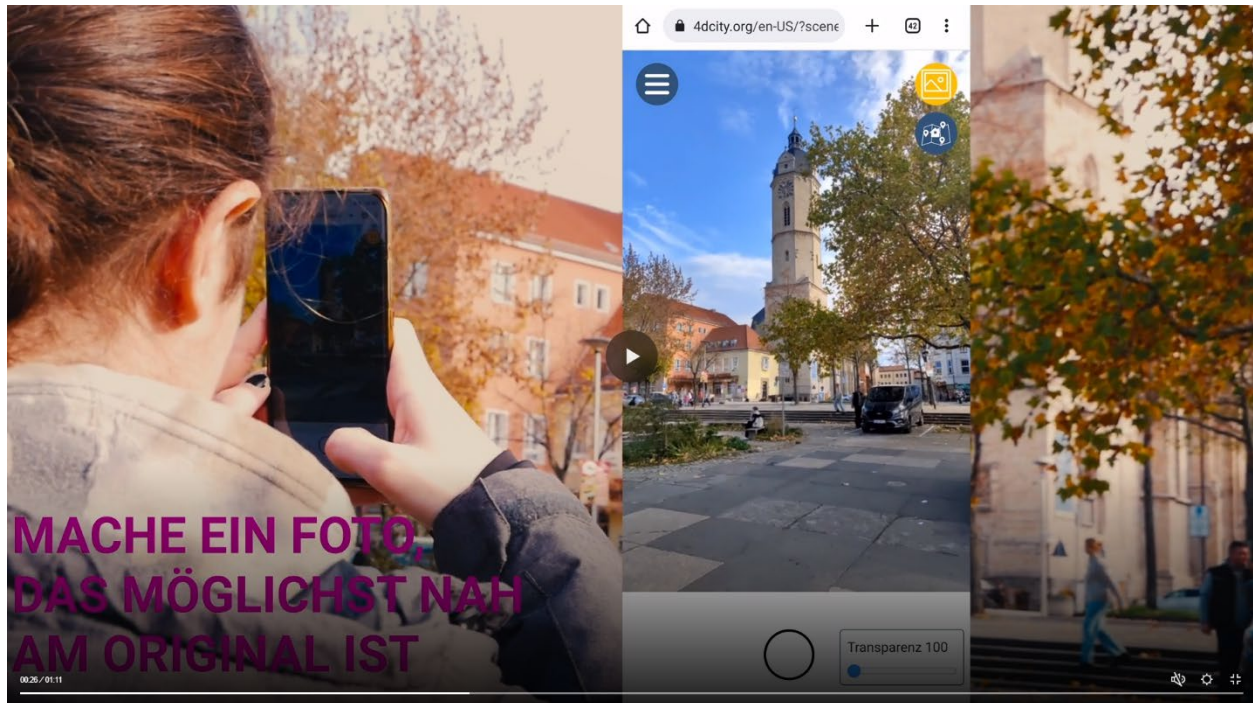


Abb. 3: Ausschnitt eines Erklärvideos zur Nutzung der Refotografie-Komponente der Anwendung im Rahmen eines Bürgerwettbewerbes.

Wenn der Knopf zum Auslösen der Kamera betätigt wird, wird zudem die globale Position sowie die Orientierung des Endgerätes gespeichert und mit übertragen.

Im Folgenden sollen dabei die photogrammetrischen Ansätze, der Bürgerwettbewerb und die Ergebnisse präsentiert werden.

3 Automatisierte Berechnung der Kameraparameter historischer Fotografien mittels photogrammetrischer Methoden

Die Bestimmung der Kameraparameter historischer Fotografien werden ausführlich in MAIWALD (2022) behandelt. Die wichtigsten Erkenntnisse und relevanten Weiterentwicklungen werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Historische Stadtfotografien unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer radiometrischen und geometrischen Qualität. Die Bilder sind nicht in homogenen zusammenhängenden Bildverbänden aufgenommen, sondern von verschiedenen Einzelpersonen zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten. Dadurch treten starke Unterschiede in Belichtung und Erscheinung der einzelnen Gebäude auf. Zudem können Bildartefakte im Digitalisierungsprozess entstehen.

Dies erschwert die automatisierte Bearbeitung (z.B. in einem Structure-from-Motion (SfM) Arbeitsablauf) enorm. Insbesondere die automatisierte Zuordnung homologer Punkte in historischen Bildern erweist sich als schwierig.

Graph Neural Networks wie SuperGlue (SARLIN et al. 2020) sind seit kurzem in der Lage zuverlässig korrekte Punktkorrespondenzen zwischen historischen Fotografien zu finden (MAIWALD et al. 2021; MORELLI et al. 2022). Dadurch wird ein kompletter SfM-Prozess möglich,

welcher es erlaubt die äußere und innere Orientierung historischer Fotografien automatisiert zu bestimmen. Zudem wird eine historische Punktwolke generiert (Abb. 4).

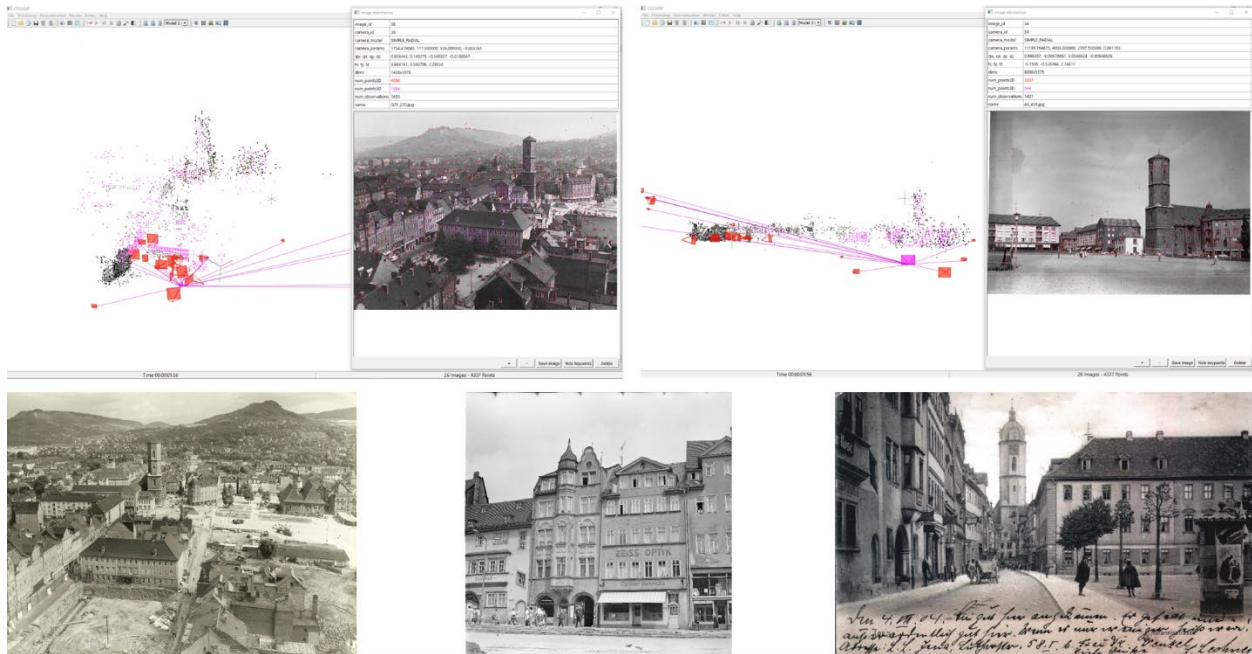


Abb. 4: Oben: SfM-Modell aus historischen Bildern der Stadt Jena welches mittels der Software COLMAP und dem Graph Neural Network SuperGlue erstellt wurde. Unten: Ausgewählte orientierte Fotografien zur Darstellung der radiometrischen und geometrischen Qualität historischer Bilder (MAIWALD 2022).

Ohne Referenzkoordinaten oder Passpunkte, die einen Maßstab festlegen, liegt die historische SfM-Punktwolke und die äußere Orientierung nur im lokalen Koordinatensystem vor.

Durch interaktive Auswahl geeigneter Punkte in der lokalen Punktwolke und im globalen LOD2-Stadtmodell kann eine Helmert-Transformation durchgeführt werden, die es erlaubt die äußere Kameraorientierung in die globalen Koordinaten zu überführen.

Visuell sind die Ergebnisse akzeptabel in der Überlagerung von historischer Fotografie und 3D-Modell, jedoch zeigt die Transformation (je nach Modell) eine Standardabweichung im Dezimeter bzw. kleinen Meter-Bereich, die auch am Modell sichtbar wird (Abb. 5) (MAIWALD 2022). Diese Abweichung ist v.a. durch die geometrische Ungenauigkeit von LOD2-Gebäudemodellen zu erklären. In einem realistischen Szenario liegen der Stadtverwaltung aber oft nur diese Gebäudedaten flächendeckend vor. Laserscanner-Daten sind meist nicht vorhanden.

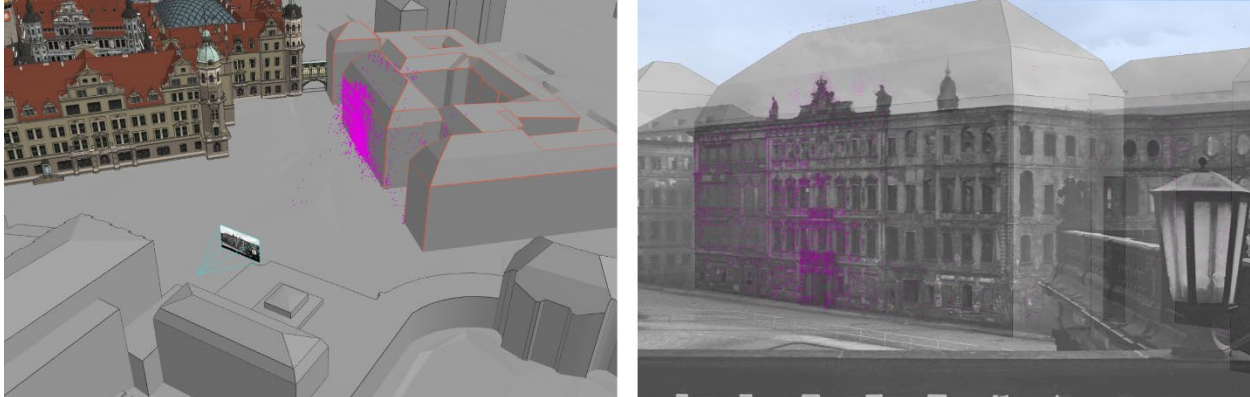


Abb. 5: Links: Visualisierung der Punktwolke im 4D-Browser. Rechts: Überlagerung der Fotografie mit dem 3D-Modell. Es handelt sich dabei um ein Gebäude in Dresden für welches umfassende Experimente durchgeführt wurden (MAIWALD 2022).

Auch die Hinzunahme zeitgenössischer Fotografien mittels kalibrierter Kamera sowie die Referenzmessung von Passpunkten am Gebäude verbessert die geometrische Qualität der äußeren Kameraorientierung nur begrenzt (MAIWALD & SARDEMANN 2022).

Während die Ergebnisse in der 4D-Browser Anwendung zur Überlagerung von Fotografien verwendbar sind, sind diese für eine immersive Darstellung in VR/AR (zur Texturprojektion) noch zu ungenau. Im Folgenden soll u.a. kritisch geprüft werden, ob die Ergebnisse des Bürgerwettbewerbes für eine genauere Überlagerung verwendet werden können.

4 Bürgerwettbewerb “Das schönste Jena aller Zeiten“

Vom 25. Oktober 2022 – 04. Dezember 2022 konnten Jenaer Bürgerinnen und Bürger mit der VR-Anwendung eigene historische Bilder in die Datenbank hochladen sowie die Refotografie-Komponente der Anwendung nutzen, um bei der Lokalisierung historischer Bilder zu unterstützen. Um die Nutzerinnen und Nutzer an das Thema heranzuführen, wird die Anwendung der Refotografie mittels eines Videos erklärt.

Dazu werden 20 Bilder, die zufällig aus der Datenbank ausgewählt werden in der Browser-Anwendung angezeigt. Anschließend kann eines der Fotos auf denen man das Motiv erkennt, ausgewählt werden, um es in der heutigen Zeit nachzufotografieren. Ziel ist es möglichst genau den Aufnahmewinkel zu treffen und anschließend den Auslöser in der Anwendung zu betätigen. Nach Bestätigung wird das Foto mit den zugehörigen Metadaten, gespeicherter Position und Orientierung des Gerätes in der Datenbank abgelegt.

Am Ende des Wettbewerbes wurden über 4000 Bilder digitalisiert sowie 67 Bilder refotografiert. Aufgrund der geringen Anzahl an nachfotografierten Bildern sind die Ergebnisse für die Refotografie-Komponente leider nur teilweise aussagekräftig.

5 Ergebnisse

Für ein Konvolut von 3112 Bildern von Jena, die im ersten Wettbewerbszeitraum von Bürgerinnen und Bürger digitalisiert wurden, wird getestet, ob mit der Methode aus MAIWALD (2022) ein SfM-Modell der Innenstadt errechnet werden kann. Dazu werden die Bilder vorgefiltert, um v.a. Innenstadtsichten und Schrägluftbilder zu erhalten (Abb. 6).

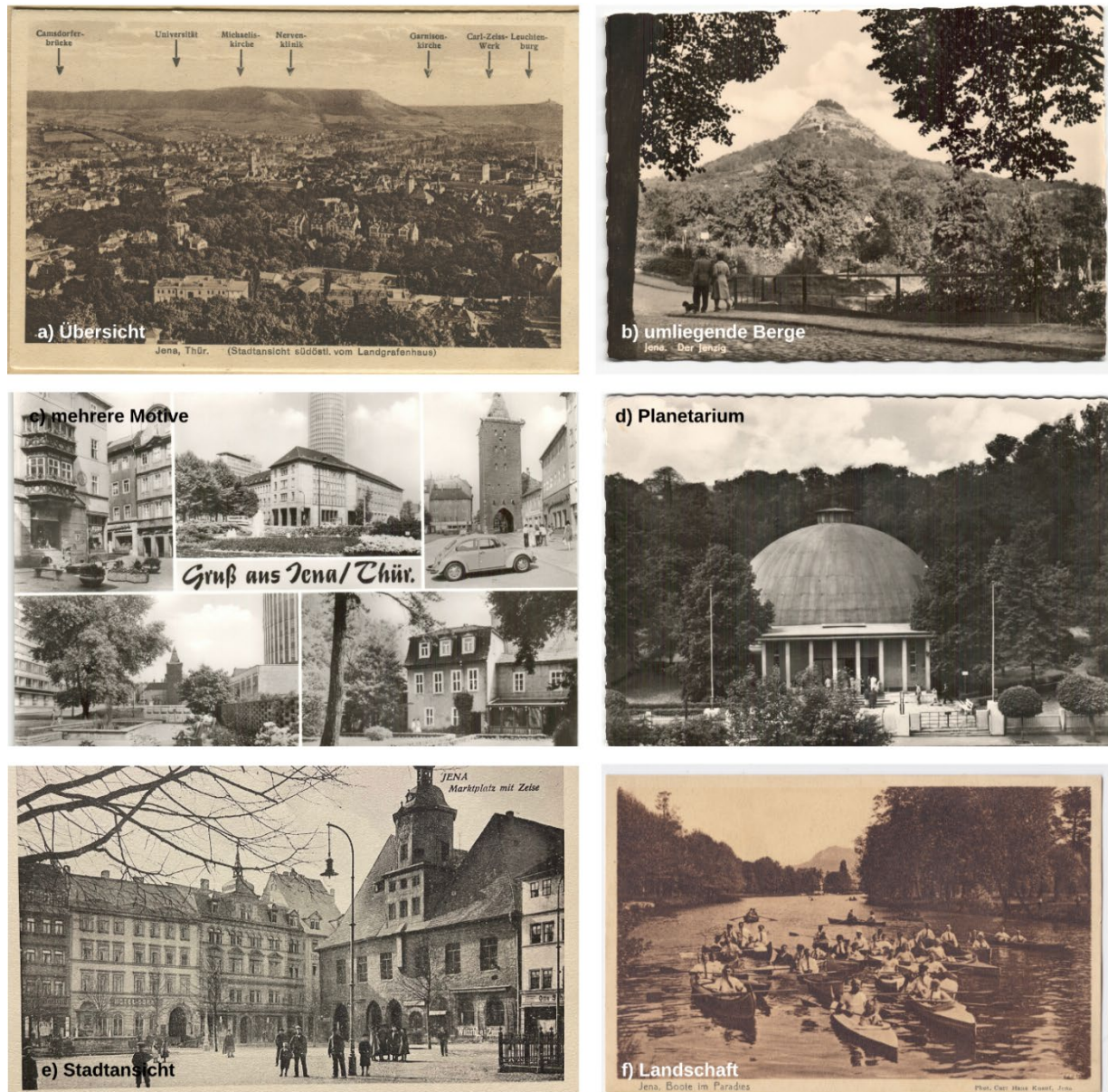


Abb. 6: Beispiel für Bilder, die im Rahmen des Wettbewerbes digitalisiert wurden

Bei diesem Datensatz geschieht das teilautomatisiert. Bilder, die mehrere Motive enthalten (v.a. auf Postkarten) sowie die Rückseiten von Postkarten werden mittels inhaltsbasierter Suche gefiltert (MAIWALD et al. 2021). Bei den ca. 1000 verbleibenden Digitalisaten werden Ansichten der

umliegenden Berge, weitere Landschaftsfotografien, Innenräume (keine urbanen Fotografien) und des Planetariums (als extra SfM-Modell) händisch entfernt.

Es verbleiben 635 Bilder was eine enorme Steigerung zum bereits berechneten Modell mit 26 Bildern (Abb. 4) bietet. Ergebnis der SfM-Prozessierung ist die innere und äußere Kameraorientierung der historischen Fotografien sowie die berechnete Punktwolke (Abb. 7).

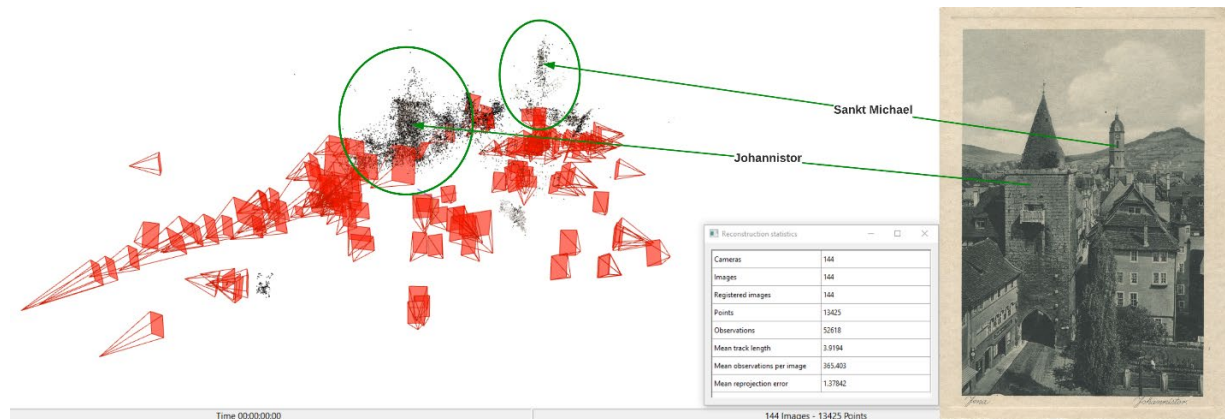


Abb. 7: Größtes berechnetes SfM-Modell der Stadt Jena bestehend aus 144 historischen Fotografien und Postkarten

Das größte berechnete Modell umfasst 144 verortete Fotografien, die v.a. den Innenstadtbereich um das Johannistor abdecken. Zudem berechnet COLMAP 20 weitere Modelle von einzelnen Gebäuden der Innenstadt bestehend aus weniger Fotografien (Abb. 8).

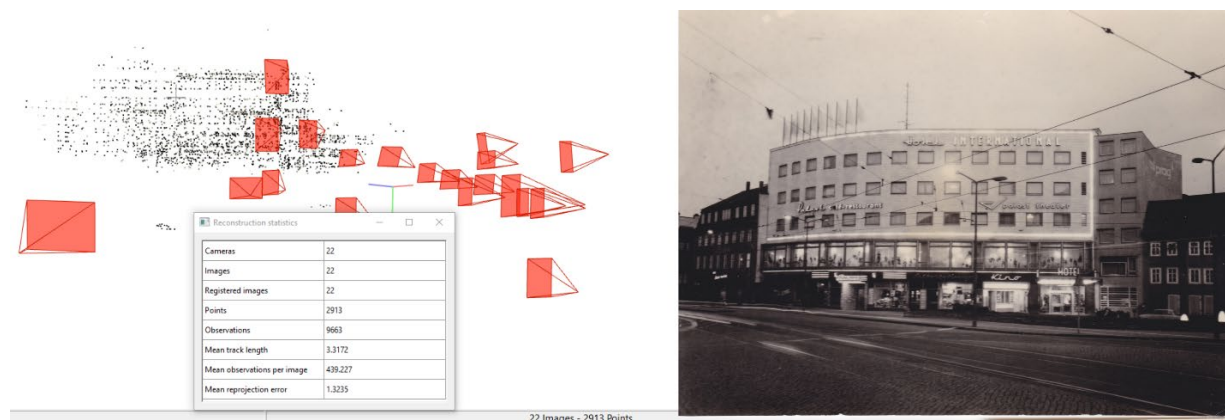


Abb. 8: Weiteres beispielhaftes Modell aller verorteten Bilder des Hotel International in Jena, das zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht mit dem Innenstadtmmodell verknüpft werden kann

Gegenwärtig können noch nicht alle Modelle miteinander verknüpft werden, da die Ausrichtung der Fotografien im Rahmen der Digitalisierung noch nicht berücksichtigt wurde. Das erschwert die Merkmalsuche, da das gewählte Verfahren nicht rotationsinvariant ist (SARLIN et al. 2020). Dies soll in nachfolgenden Experimenten verbessert werden um ein gesamtes Modell der Stadt zu erhalten.

Des Weiteren soll versucht werden die Bilder, die im Refotografie-Modul aufgenommen wurden mit der 3D-Szene zu überlagern, um einen Vergleich zur bisher erreichten visuellen Genauigkeit

(siehe Abb. 5) zu erhalten. Erste Ergebnisse zeigen die Überlagerung der Refotografie mit dem historischen Original (Abb. 9).

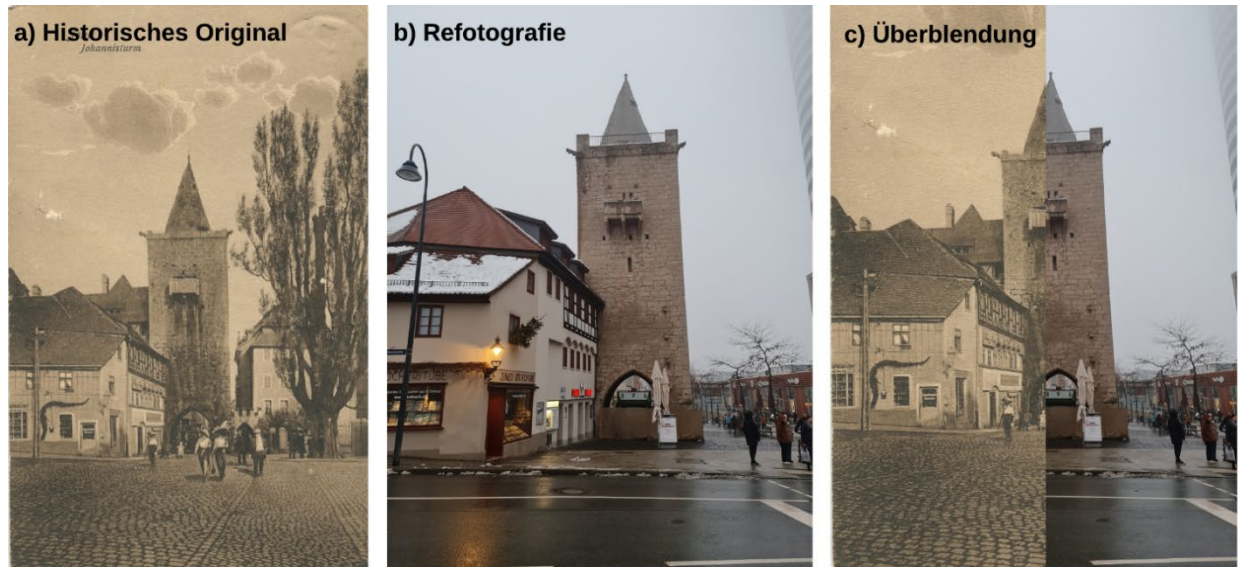


Abb. 9: Refotografie des Johannistors (Mitte) eines historischen Originals (links), welches ein Nutzer im Rahmen des Wettbewerbes erstellt hat. Rechts wird die überblendete Fotografie dargestellt

Die Ermittlung der Kameraparameter und die daraus resultierende Überlagerung in der 3D-Szene sind aufgrund der Verlängerung des Bürgerwettbewerbes noch nicht abgeschlossen. Generell sind auch zu wenige Bilder refotografiert worden, so dass sich noch keine statistischen Aussagen treffen lassen.

6 Fazit und Ausblick

Das Projekt Jena4D ist der Versuch Bürgerinnen und Bürger an der Digitalisierung ihrer Heimatstadt mitwirken zu lassen. Über die bereits weit entwickelte und stabil laufende Webanwendung konnten viele neue Nutzerinnen und Nutzer gewonnen werden. Das generelle Feedback zur Anwendung inklusive Stadttouren und Informationen zur Stadtgeschichte ist durchweg positiv. Während die Digitalisierung eigener (privater) analoger Fotografien aufgrund der hochgeladenen Anzahl ein voller Erfolg ist, sind womöglich die technischen Hürden für die Bedienung der Refotografie-Komponente trotz Erklärvideos noch zu hoch. Es hat sich gezeigt, dass die intuitive Benutzung von VR-Anwendungen noch nicht für die breite Masse zugänglich ist. Deshalb besteht immer noch ein Bedarf an lösungsorientierten Strategien, um VR simpler und intuitiver zu gestalten. Nichtsdestotrotz konnten die Digitalisate für photogrammetrische Prozesse verwendet werden. Obwohl diese nicht professionell photogrammetrisch digitalisiert wurden, konnten die Kameraparameter der digitalisierten Fotografien in einem vollautomatischen SfM-Prozess berechnet werden. Aufgrund der geringen Anzahl an Refotografien und die Verlängerung des Wettbewerbes sind die Ergebnisse zur visuellen Genauigkeit leider noch nicht aussagekräftig. In ersten Experimenten zeigen einige Aufnahmen bessere Ergebnisse als im vollautomatischen Prozess während andere deutlich schlechter überlagert sind. Statistische Aussagen darüber sind noch nicht zu treffen. Da das

Refotografie-Modul weiterhin in der Anwendung bestehen bleibt, werden weitere Tests zeigen, ob z.B. eine Mittelung der Kameraorientierungsparameter sinnvoll ist und die Genauigkeit über Nutzerdaten verbessert werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- BRUSCHKE, J. & WACKER, M., 2014: Application of a Graph Database and Graphical User Interface for the CIDOC CRM. Access and Understanding–Networking in the Digital Era. Session J1. The 2014 annual conference of CIDOC, the International Committee for Documentation of ICOM, 1-3.
- MAIWALD, F., 2022: A window to the past through modern urban environments – Developing a photogrammetric workflow for the orientation parameter estimation of historical images. Technische Universität Dresden, Qucosa.
- MAIWALD, F., BRUSCHKE, J., LEHMANN, C. & NIEBLING, F., 2019: A 4D information system for the exploration of multitemporal images and maps using photogrammetry, web technologies and VR/AR. *Virtual Archaeology Review*, **10**(21), 1-13.
- MAIWALD, F., LEHMANN, C. & LAZARIV, T., 2021: Fully Automated Pose Estimation of Historical Images in the Context of 4D Geographic Information Systems Utilizing Machine Learning Methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **10**(11), 748.
- MAIWALD, F. & SARDEMANN, H., 2022: Accuracy Analysis Of Estimated Camera Orientation Parameters Of Historical Images – Case Study of Georg-Schumann-Bau In Dresden (Germany). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **43**(B2-2022), 823-829.
- MORELLI, L., BELLAVIA, F., MENNA, F. & REMONDINO, F., 2022: Photogrammetry Now And Then – From Hand-Crafted To Deep-Learning Tie Points. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **48**(2/W1-2022), 163-170.
- MUENSTER, S., 2022: Digital 3D Technologies for Humanities Research and Education: An Overview. *Applied Sciences*, **12**(5), 2426.
- MUENSTER, S., BRUSCHKE, J., MAIWALD, F. & KLEINER, C., 2021a: Software and Content Design of a Browser-based Mobile 4D VR Application to Explore Historical City Architecture. *Proceedings of the 3rd Workshop on Structuring and Understanding of Multimedia heritAge Contents*, 13-22.
- MUENSTER, S., LEHMANN, C., LAZARIV, T., MAIWALD, F. & KARSTEN, S., 2021b: Toward an Automated Pipeline for a Browser-Based, City-Scale Mobile 4D VR Application Based on Historical Images. *Communications in Computer and Information Science*, 106-128.
- SARLIN, P.-E., DETONE, D., MALISIEWICZ, T. & RABINOVICH, A., 2020: SuperGlue: Learning Feature Matching with Graph Neural Networks. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4938-4947.
- SCHAFFLAND, A. & HEIDEMANN, G., 2022: Heritage and Repeat Photography: Techniques, Management, Applications, and Publications. *Heritage*, **5**(4), 4267-4305.
- TVERSKY, B., 2005: Visuospatial Reasoning. *The Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning*, 209-240.