

Analyse der Echtzeit-Visualisierung für Virtual Reality-Anwendungen am Beispiel der Festung Al Zubarah in Katar

THOMAS P. KERSTEN¹, DANIEL DRENKHAN¹ & SIMON DEGGIM¹

Zusammenfassung: Die technologischen Fortschritte der letzten Jahre im Bereich der Virtuellen Realität (VR) haben das Potenzial, unser tägliches Leben immer stärker zu beeinflussen. VR ermöglicht es, eine digitale Welt mit einem Head-Mounted Display (HMD) als immersives Erlebnis zu erkunden. In Kombination mit Werkzeugen zur 3D-Dokumentation, Modellierung und Software zur Erstellung interaktiver virtueller Welten kann VR eine wichtige Rolle bei der Erhaltung und Visualisierung des kulturellen Erbes für Museen, Bildungseinrichtungen und andere kulturelle Bereiche spielen. Entsprechende Game Engines bieten Werkzeuge zur interaktiven 3D-Visualisierung von Kulturobjekten, was eine neue Form der Wissensvermittlung durch eine direkte Beteiligung der Anwender in der virtuellen Welt ermöglicht. Um eine reibungslose Echtzeit-Visualisierung der Daten im HMD zu gewährleisten, sollten VR-Anwendungen jedoch mit 90 Bildern pro Sekunde laufen. Diese Bildrate ist von verschiedenen Kriterien wie Datenmenge oder Anzahl der dynamischen Objekte abhängig. In diesem Beitrag wurden Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit einer VR-Anwendung anhand verschiedener digitaler 3D-Modelle mit unterschiedlichen Datenmengen des Forts Al Zubarah in Katar durchgeführt. Wir zeigen, welchen Einfluss die Datenmenge und die Hardware-Ausstattung auf die Performance der Echtzeit-Visualisierung haben und dass Entwickler von VR-Anwendungen daher einen Kompromiss zwischen Datenmenge und Leistungsfähigkeit der verfügbaren Computerhardware finden sollten, um eine flüssige Echtzeit-Visualisierung mit ca. 90 fps (frames per second) zu gewährleisten. CAD-Modelle bieten aufgrund des deutlich geringeren Datenvolumens eine bessere Leistung für die Echtzeit-VR-Visualisierung als vermaschte 3D-Modelle.

1 Einführung

Virtuelle Realität (VR) ermöglicht eine neue Form der Präsentation und Visualisierung von Kulturdenkmälern. Immersive Erlebnisse in VR bieten interessante Möglichkeiten in der Denkmalpflege, Informationen und Wissen so an ein breites Publikum zu vermitteln. Diese Entwicklung schafft somit spannende neue Möglichkeiten für Institutionen, die sich mit Kulturobjekten beschäftigen, wie z.B. Museen, mit ihren Sammlungen und Archiven neue Zielgruppen anzusprechen. Insbesondere mithilfe digitaler 3D-Rekonstruktionstechniken erlaubt VR dem Publikum, historische Orte im Maßstab 1:1 in einer räumlich immersiven visuellen und auditiven Umgebung zu erleben.

Es gibt verschiedene Definitionen von VR, die das Verständnis für diese Technologie erleichtern. VR ist die Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung der Realität und ihrer physikalischen Eigenschaften in einer in Echtzeit computergenerierten, interaktiven virtuellen Umgebung. Darüber hinaus ist die virtuelle Realität eine realistische und immersive Simulation einer dreidimensionalen

¹ HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Henning-Voscherau-Platz 1, D-20457 Hamburg, E-Mail: [Thomas.Kersten, Simon.Deggim]@hcu-hamburg.de, Daniel.Drenkhan@web.de

Umgebung, die mit interaktiver Software und Hardware geschaffen wird und durch Bewegungen des Körpers erlebt oder gesteuert wird. So verstanden ist VR eine künstliche Umgebung, die durch sensorische Stimuli (wie perspektivische Ansichten und Geräusche) erlebt wird, die von einem Computer bereitgestellt werden, wobei eigene Handlungen (teilweise) bestimmen, was in der Umgebung geschieht (MERRIAM-WEBSTER DICTIONARY 2023). Diese sehr weit gefasste Definition erlaubt es, die meisten modernen Anwendungen von VR zu berücksichtigen. Weitere Definitionen finden sich in der Literatur von DÖRNER et al. (2014), FREINA & OTT (2015), und PORTMAN et al. (2015). LANIER (1992) beschreibt die technische Ausstattung und die Anforderungen, die notwendig sind, um die Illusion zu erzeugen, sich in einer virtuellen Welt zu befinden. Der Begriff wurde erstmals vom Autor Damien Broderick in seinem 1982 erschienenen Science-Fiction-Roman „Das Judas-Mandala“ eingeführt. Bereits 1962 entwickelte Morton Heilig das Sensorama, eine Maschine, die eines der frühesten bekannten Beispiele für immersive, multisensorische (heute als multimodal bezeichnete) Technologie darstellt und somit als das erste VR-System bezeichnet werden kann. 1968 entwickelte Ivan Sutherland mit Unterstützung seiner Studenten Bob Sproull, Quintin Foster und Danny Cohen den ersten Prototyp eines VR-Systems, das an einen Computer angeschlossen wurde und modernen VR-Systemen ähnlich ist (RHEINGOLD 1992, DUBOSE 2020). Die VR-Technologie ist somit nicht neu, aber erst mit der Einführung kostengünstiger VR-Headsets - z. B. der Oculus Rift im Jahr 2014 und der HTC Vive im Jahr 2016 - ist diese Technologie für ein breiteres Publikum anwendbar geworden. Heutige VR-Anwendungen profitieren besonders von der Echtzeit-Visualisierung inklusive Interaktionsmöglichkeiten und Sensortracking mittels Head-Mounted Displays (HMDs), was den Grad der Immersion erhöht. Eine erste empirische Überprüfung HMD vs. Bildschirmdarstellung wurde von HRUBY et al. (2020) durchgeführt. Um diese Technologie für ein immersives Erlebnis nutzen zu können, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein: (a) eine virtuelle 3D-Umgebung muss in einer integrierten Entwicklungsumgebung (z. B. in einer Game-Engine) konstruiert und texturiert werden (können), (b) die entwickelte und ausführbare VR-Anwendung muss über eine geeignete Software (z. B. Steam VR) mit einem Head-Mounted Display (HMD) verbunden werden, und (c) die Bewegungen des Nutzers müssen über Controller und HMD gesteuert und verfolgt werden können.

Ein wichtiger Faktor in VR ist die Immersion, die den Effekt beschreibt, der durch eine VR-Umgebung erzeugt wird, die das Bewusstsein des Benutzers, illusorischen Reizen ausgesetzt zu sein, so weit in den Hintergrund treten lässt, dass die virtuelle Umgebung als real wahrgenommen wird. Um eine reibungslose, immersive Visualisierung der VR-Anwendung im VR-Headset zu gewährleisten, sollte die Anzahl der Bilder pro Sekunde (fps) jedoch idealerweise mindestens 90 betragen. Je niedriger die Bildrate der VR-Anwendung im HMD ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass der Nutzer aufgrund der Latenzzeit leichter Übelkeit oder Schwindel (Motion Sickness oder Cyber Sickness) erfährt, was zu allgemeinem Unwohlsein führen kann, während er die VR-Brille trägt. Eine große Herausforderung bei der Entwicklung einer VR-Anwendung ist daher, eine Balance zwischen qualitativ hochwertiger Darstellung der Daten und Visualisierung dieser in Echtzeit zu finden. In diesem Beitrag wird am Beispiel der Festung Al Zubarah die Leistungsfähigkeit von VR-Anwendungen untersucht. Zu diesem Zweck wurden 3D-Punktwolken aus terrestrischem Laserscanning (TLS) und Structure-from-Motion (SFM) Photogrammetrie verwendet, um vermaschte 3D-Modelle mit unterschiedlichen Auflösungen und ein CAD-Modell (Computer-Aided

Design) zu erstellen. Wichtige Faktoren, die sich auf die Leistung der VR-Anwendung (gemessen in gerenderten Bildern pro Sekunde) auswirken können, sind u.a. die Datenmenge und die Texturierung der erzeugten Modelle sowie die unterschiedliche Hardwareausstattung. Es stellt sich also die Frage, welchen Einfluss die Datenmenge und die Hardware-Ausstattung auf die Leistung einer VR-Anwendung bei der Echtzeit-Visualisierung haben.

Im zweiten Kapitel wird ein Überblick über andere Arbeiten in diesem Themenbereich gegeben, während im dritten Kapitel die Festung Al Zubarah vorgestellt wird. Nach der Vorstellung der 3D-Modellierung im vierten Kapitel wird im fünften Kapitel die Erstellung der VR-Anwendung beschrieben. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der VR-Anwendung werden im sechsten Kapitel vorgestellt. Abschließend wird ein Fazit aus den Untersuchungen gezogen und ein Ausblick gegeben.

2 Vorherige Arbeiten

VR spielt bei der Entwicklung und Darstellung des virtuellen Kulturerbes eine entscheidende Rolle. Sie eröffnet eine neue Form der öffentlichen und wissenschaftlichen Kommunikation, insbesondere für historische Kulturobjekte und Denkmäler, die entweder bereits beschädigt oder zerstört oder zu weit von potenziellen interessierten Besuchern entfernt stehen (ADDISON 2000; STONE & OJIKI 2005; AFFLECK & THOMAS 2005). POLIMERIS & CALFOGLOU (2016) versuchen, die Wirkung des digitalen Mediums Virtual Reality näher zu beleuchten, indem sie in einer kleinen Studie die Auswirkungen verschiedener Präsentationsformen kulturtouristischer Produkte auf die Entscheidung der Befragten für ein kulturtouristisches Reiseziel vergleichen. MEDYŃSKA-GULIJ & ZAGATA (2020) bewerteten in einer Fallstudie anhand der Festung in Ostrów Lednicki (Polen) die Wirkung des Eintauchens in einen spezifischen historisch-geografischen virtuellen Raum für Experten und Spieler. BOZORGI & LISCHER-KATZ (2020) stellen das Virtual Ganjali Khan Project vor, eine laufende Forschungsinitiative, die 3D- und VR-Technologien einsetzt, um die Erhaltung der kulturellen Stätte des Ganjali Khan Gebäudeensembles zu unterstützen, einer großen historischen Sehenswürdigkeit in der Wüstenstadt Kerman, Iran. EDLER et al. (2019) stellen vor, wie VR-basierte 3D-Umgebungen (basierend auf der Spiel-Engine Unreal Engine 4) zur Unterstützung der Stadtteilentwicklung eines umstrukturierten postindustriellen Areals anhand des VR-Modells "Zechen Holland" in Bochum-Wattenscheid als repräsentatives ehemaliges Industriegebiet im deutschen Ruhrgebiet eingesetzt werden können.

An der HafenCity Universität Hamburg wurden bereits mehrere VR-Anwendungen für kulturelle Stätten und Objekte entwickelt. Das Museum in Bad Segeberg, das in einem Fachwerkhaus aus dem 16. Jahrhundert untergebracht ist, wurde digital in sechs Bauphasen (von 1541 bis 1963) als VR-Erlebnis mit der HTC Vive Pro konstruiert (KERSTEN et al. 2017). Drei historische Städte in Deutschland (sowie deren Umgebung) wurden als VR-Erlebnisse entwickelt: Duisburg im Jahr 1566 (TSCHIRSCHWITZ et al. 2019), Segeberg im Jahr 1600 (DEGGIM et al. 2017, KERSTEN et al. 2018), und Stade im Jahr 1620 (WALMSLEY & KERSTEN 2019). Darüber hinaus sind auch drei religiöse und kulturelle Denkmäler als VR-Erlebnisse verfügbar: die Selimiye-Moschee in Edirne, Türkei (KERSTEN et al. 2017), ein Holzmodell des Salomonischen Tempels (KERSTEN et al. 2018) und der Kaiserdom in Königslutter bei Braunschweig mit 360°-Panoramafotos in eine immersive

Echtzeit-Visualisierung integriert (WALMSLEY & KERSTEN 2020). Ein weiteres Beispiel für eine immersive und interaktive VR-Präsentation eines Monuments sind die İnceğiz-Höhlen im Istanbuler Stadtteil Çatalca, Türkei, die mithilfe von Punktwolken aus terrestrischen Laserscans in 3D modelliert und in die Unity 3D Game Engine integriert wurden (BÜYÜKSALIH et al. 2020).

Die Zahl der Arbeiten, die sich speziell mit der Echtzeit-VR-Visualisierung von Kulturdenkmälern befassen, wächst. Zu den jüngsten Museumsexponaten, die Echtzeit-VR zur Visualisierung des kulturellen Erbes nutzen, gehören u.a. auch Batavia 1627 im Westfries Museum in Hoorn, Niederlande (WESTFRIES MUSEUM 2023), und Viking VR, das als Begleitung einer Ausstellung im Britischen Museum entwickelt wurde (SCHOFIELD et al. 2018). Eine Reihe neuerer Forschungsprojekte befasst sich ebenfalls mit dem Einsatz von VR zur Visualisierung des kultureller Denkmäler (FASSI et al. 2016; SEE et al. 2016; SKARLATOS et al. 2016; RAMSEY 2017; DHANDA et al. 2019) sowie mit Aspekten, die über die Visualisierung hinausgehen, einschließlich der Nachbildung physischer Umweltreize (MANGHISI et al. 2016). Diese Literaturliste ist jedoch nicht vollständig.

Veröffentlichungen zu Studien über die Leistung von Echtzeit-VR-Visualisierungen sind eher begrenzt. KHARROUBI et al. (2019) haben den Einfluss der Größe der Punktwolke auf die VR-Leistung (in fps) unter Verwendung der Unity-Spielengine analysiert. Sie testeten ihren Ansatz an mehreren Datensätzen, darunter eine Punktwolke mit 2,3 Milliarden Punkten, die als Testobjekt das Schloss von Jehay (Belgien) darstellt. Ihre Ergebnisse unterstreichen die Effizienz und Leistungsfähigkeit ihrer Lösung zur Visualisierung klassifizierter massiver Punktwolken in virtuellen Umgebungen mit mehr als 100 Bildern pro Sekunde.

Die Darstellung digitaler Elemente in Virtual-Reality-Systemen erfordert sehr niedrige Latenzzeiten, um ein reibungsloses VR-Erlebnis frei von Motion Sickness und Übelkeit zu ermöglichen. Um die idealen Bedingungen für VR zu schaffen, wird eine "Motion-to-Photon-Zeit" (Zeit zwischen Sensorerkennung der Bewegung und der Reaktion auf dem Bildschirm) von weniger als 20 Millisekunden (ms), entsprechend 50 FPS (Frames per Second), angestrebt (MCCAFFREY 2017). Um die Leistung des Computers für die Echtzeit-VR-Anwendung zu untersuchen, wurden drei Szenen der Viermastbark Peking (ein historisches Segelschiff) aufgrund der unterschiedlichen Komplexität der Szenen als Beispiele ausgewählt (KERSTEN et al. 2020): Beim Rendering einer Hafensicht mit nur wenigen Umgebungsrequisiten und geringem Detailgrad wurden Spitzenwerte von bis zu 54 fps (19 ms) für die VR-Visualisierung erreicht. Mit zunehmender Anzahl von Modellen und Texturen sinkt die Leistung entsprechend, wie bei der Ansicht des gesamten Schiffes (\emptyset : 21 fps/48 ms). Durch die Simulation physikalischer Vorgänge (z. B. Wind in den Segeln) steigt die benötigte Rechenleistung stark an und die Visualisierung verzögert sich, so dass der Nutzer bei der Betrachtung der Segel (\emptyset : 15 fps/67 ms) die Latenzen aufgrund der dynamischen Vorgänge in der Szenerie im Nahbereich deutlich wahrnehmen kann. Daher wurden die Auswirkungen verschiedener Versionen der VR-Anwendung der Festung Al Zubarah auf die Leistungsfähigkeit näher untersucht, um die Auflösungsgrenzen von Modellen zu ermitteln, die für Echtzeitanwendungen wie VR momentan geeignet sind.

3 Die Festung Al Zubarah in Katar

Um die Leistungsfähigkeit einer VR-Anwendung unter verschiedenen Datenmengen zu untersuchen, wurde die historische Festung Al Zubarah (Abb. 1) verwendet. Die Festung befindet sich in der Gemeinde Madinat ash Shamal an der nordwestlichen Küste der Halbinsel von Katar. Mit einer Fläche von 34 m × 34 m und einer Höhe von 9 m ist diese historische katarische Militäranlage eine der bekanntesten Sehenswürdigkeiten und Touristenattraktionen in Katar. Die Festung wurde ursprünglich 1938 von Scheich Abdullah bin Jassim Al Thani erbaut und diente als Küstenwache (WIKIPEDIA 2023). Wegen des ständigen Konflikts mit dem Nachbarstaat Bahrain erhielt die Festung aufgrund der geografischen Lage eine strategische Bedeutung. Die Festung besteht aus hohen, kompakten, einen Meter dicken Mauern aus Korallen- und Kalkstein. Ein schützendes Dach aus gepresstem Lehm spendet Schatten und eine kühle Umgebung für die damaligen Soldaten des Forts, das in drei Ecken massive Rundtürme mit verschiedenen Arten von Verteidigungsanlagen enthält. Die vierte Ecke wurde als prägnanter rechteckiger Turm mit exquisiten dreieckigen Gesimsen mit Schlitzen gebaut. Im Erdgeschoss wurden acht Räume für die Unterbringung der Soldaten eingerichtet. Im Inneren des Forts befinden sich Treppen, über die man die Galerie und die Türme des Forts erreichen kann. Im Jahr 1987 wurde es zu einem Museum umgebaut, in dem verschiedene Exponate und Kunstwerke ausgestellt werden, insbesondere zeitgenössische, aktuelle archäologische Funde aus der nahe gelegenen archäologischen Ausgrabung in der ehemaligen Stadt der Perlenfischer. Von dieser historischen Stadt Al Zubarah wurden vier bedeutende Gebäude (Moschee, Palast, Türme und Markt) von FERWATI & EL MENSRAWY (2021) virtuell rekonstruiert. Seit 2013 ist diese archäologische Stätte von Al Zubarah inklusive des Forts in die Liste des UNESCO-Welterbes aufgenommen worden (THUESEN & KINZEL 2011; UNESCO 2013; UNESCO 2021).

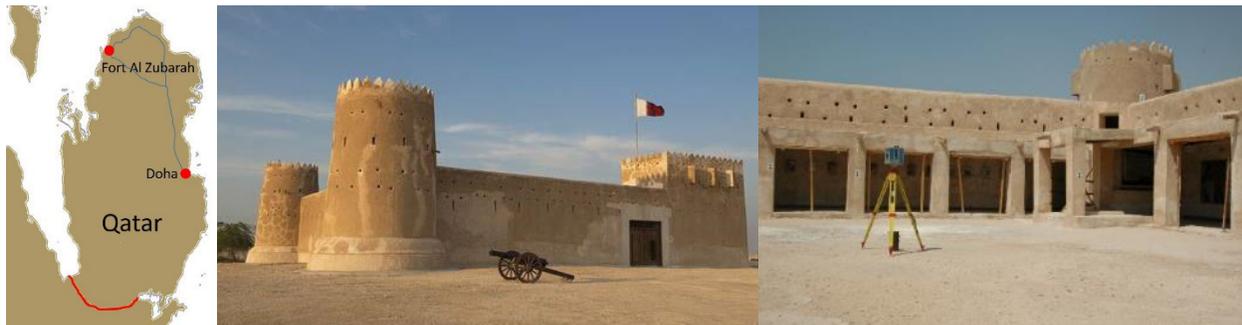


Abb. 1: Die arabische Festung Al Zubarah in Katar - die Lage auf der Karte (links), das Außenansicht (Mitte) und der Innenbereich mit terrestrischem Laserscanner (rechts)

4 3D-Modellierung

Die Festung Al Zubarah wurde im September 2011 durch terrestrisches Laserscanning mit einem IMAGER 5006h von Zoller + Fröhlich (Z+F) aus Wangen im Allgäu und SFM-Photogrammetrie als Teil des Qatar Islamic Archaeology and Heritage Project für die Qatar Museums Authority erfasst und dokumentiert (KERSTEN et al. 2015). Ziel war es, das Fort in 2D und 3D zu dokumentieren, um Pläne und Schnitte für die anstehende Renovierung zu erstellen und ein 3D-Modell zu

generieren. Die digitale Konstruktion und 3D-Modellierung der Festung Al Zubarah erfolgte anhand von 3D-Punktwolken, die sowohl durch Laserscanning als auch durch Photogrammetrie generiert wurden. Folgende Varianten von 3D-Modellen wurden erstellt: (1) ein vermaschtes 3D-Modell in drei verschiedenen Auflösungen (1, 5 und 10 Millionen Dreiecke, Abb. 2 links) auf der Grundlage von terrestrischen Laserscanning-Daten, (2) ein vermaschtes 3D-Modell, das aus der Photogrammetrie unter Verwendung von 395 Fotos einer Nikon D70 (Brennweite=35 mm) aus derselben Kampagne gewonnen wurde (Abb. 2 rechts) und (3) ein optimiertes CAD-Modell, das aus der Laserscanning-Punktwolke mit der höchsten Auflösung generiert wurde (Abb. 3 und 4).

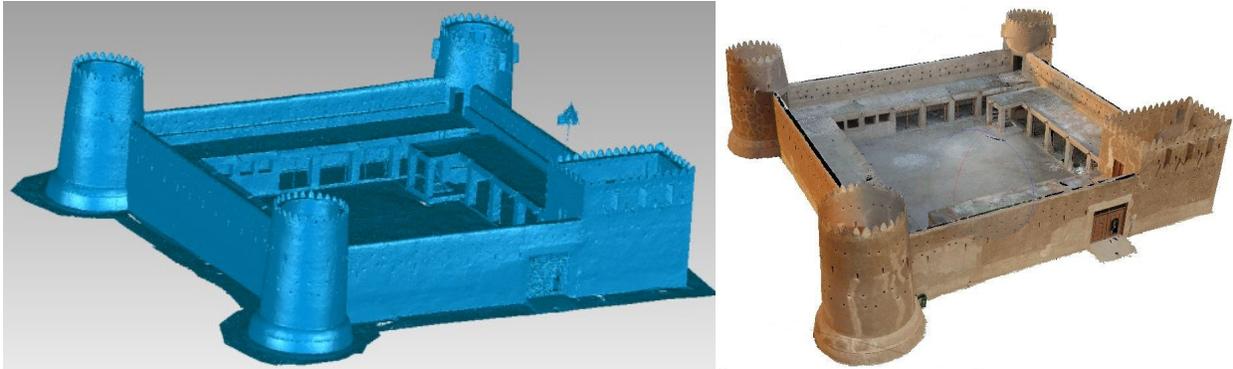


Abb. 2: 3D-Modelle der Festung Al Zubarah - Vermaschung mit 10 Millionen Dreiecken aus terrestrischem Laserscanning (links) und texturiertes 3D-Modell aus SFM-Photogrammetrie (structure-from-motion) mit 10 Millionen Dreiecken (rechts)

Die Erstellung einer Dreiecksvermaschung aus der TLS-Punktwolke wurde mit der Software Geomagic durchgeführt. Aus der Punktwolke wurden die Punkte, die die Festung repräsentieren, ausgeschnitten und alle Ausreißer eliminiert. Außerdem wurden alle Fenster und Türen ausgeschnitten, um später bewegliche Objekte wie sich öffnende Türen und Fenster in der VR-Anwendung zu berücksichtigen. Aus der Punktwolke wurde eine geschlossene Dreiecksvermaschung gerechnet, in der vorhandene Löcher manuell mit entsprechenden Funktionen in Geomagic gefüllt wurden. Von dieser ursprünglichen Vermaschung wurden drei Varianten mit verschiedenen Auflösungen von 1, 5 und 10 Millionen Dreiecken abgeleitet (Abb. 2 links). Als zweite Variante wurde aus den Fotos mit der Photogrammetrie-Software Agisoft Metashape eine Punktwolke erzeugt, aus der nach Eliminierung von Ausreißern ein RGB-farbige Dreiecksvermaschung mit 10 Millionen Dreiecken berechnet wurde. Die dritte Variante ist ein mit der Software AutoCAD konstruiertes CAD-Modell. Grundlage für die Konstruktion des CAD-Volumenmodells war die TLS-Punktwolke (Abb. 3 links). Für die Konstruktion des Grundrisses wurde zunächst in Geomagic ein horizontaler Querschnitt in der Punktwolke berechnet, der dann in AutoCAD importiert und als 2D-Linien digitalisiert wurde (Abb. 3 Mitte). Die Messungen für die Konstruktion der Festung in AutoCAD wurden in der Software Z+F LaserControl durchgeführt, in der einige der Funktionen Ebenen und Ecken erkennen können (Abb. 3 rechts). Für die Konstruktion der Festung war jedoch ein gewisses Maß an Generalisierung notwendig, da die Festung nicht immer exakt rechteckig ist und die Wände nicht immer ganz gerade sind oder die gleiche Dicke aufweisen.

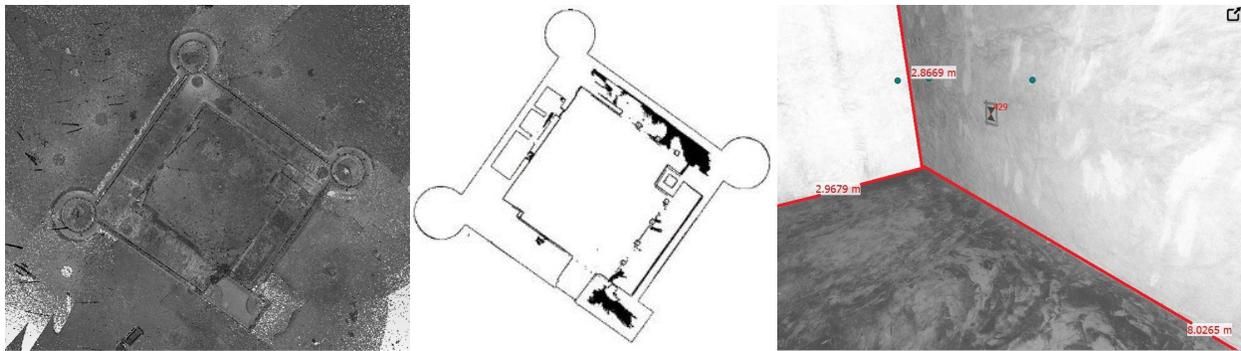


Abb. 3: TLS-Punktwolke der Festung Al Zubarah (links), der abgeleitete Grundriss (Mitte) und Messungen in der Punktwolke (rechts)

5 Entwicklung der VR-Applikation

Für die Entwicklung der VR-Anwendung wurden die in Kapitel 4 beschriebenen Modelle des Forts als fbx-Dateien in die Game Engine Unreal Engine Version 4.24 importiert. Eine Game Engine ist eine Simulationsumgebung, in der 2D- oder 3D-Grafiken durch entsprechenden Programmcode manipuliert werden können. Sie wurden in erster Linie für die Videospieleindustrie entwickelt, bieten aber auch ideale Plattformen für die Erstellung von VR-Erlebnissen, da viele der erforderlichen Funktionen bereits implementiert sind. Für dieses Projekt wurde die Unreal Engine gewählt, da sie den Vorteil einer implementierten visuellen Programmierung durch sogenannte Blueprints bietet, die den Anwendern ermöglichen, einfache Interaktionen und Animationen ohne Vorkenntnisse in der Programmiersprache C++ zu entwickeln. Der allgemeine Arbeitsablauf für die Erstellung und Visualisierung einer VR-Anwendung ist in Abb. 4 schematisch dargestellt. Allerdings wurden die 3D-Modelle nicht wie üblich in der 3DS-Software texturiert, sondern zunächst in der Game-Engine. Lediglich das vermaschte 3D-Modell aus den photogrammetrischen Daten wurde bereits in der Software Metashape texturiert.

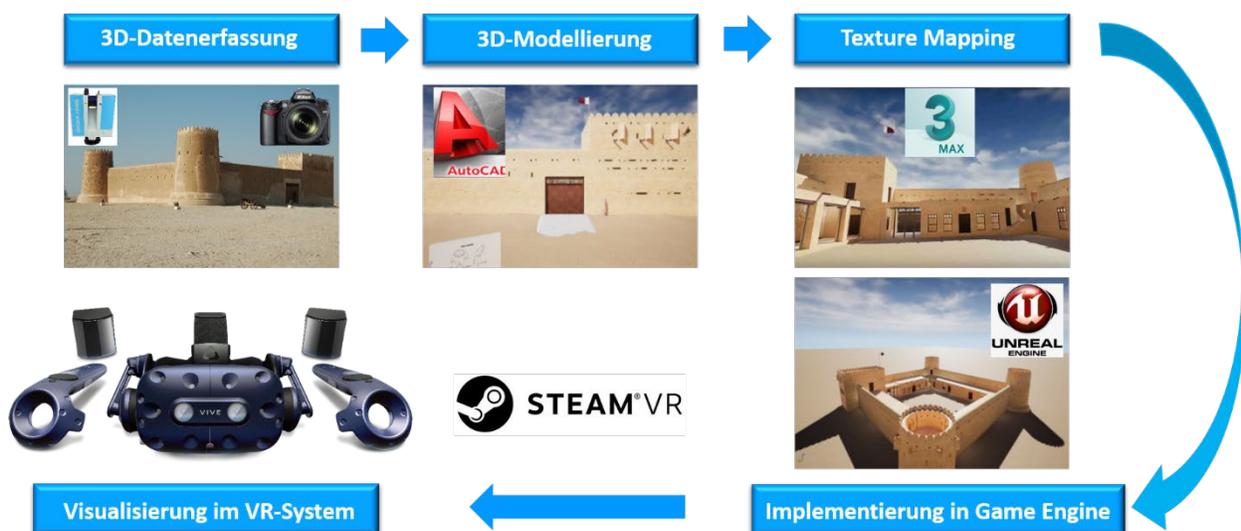


Abb. 4: Workflow für die Entwicklung der VR-Anwendung der Festung Al Zubarah

Das Gebiet um das Fort Al Zubarah besteht aus einer flachen Wüstenlandschaft. Daher wurde die Landschaft um das Fort in der Spiel-Engine als eine einfache flache Ebene konstruiert. Die Umgebung wurde mit einigen Büschen und Bäumen in einer Ecke des Forts ausgestattet. Die Bewegung und Navigation des Benutzers innerhalb der VR-Anwendung erfolgt durch Teleportation (Abb. 5 links und Mitte), die mit den Controllern gesteuert wird. Um die Bewegung des Benutzers in der Anwendung einzuschränken, wurde eine unsichtbare Grenze um das Fort gezogen, die es dem Benutzer erlaubt, sich nur innerhalb des Forts und in der unmittelbaren Umgebung zu bewegen. Um zu verhindern, dass sich der Benutzer durch die Festungsmauer teleportiert, wurde für jedes Element ein komplexes Kollisionsnetz erstellt. Bei beweglichen Objekten, wie z. B. Türen, ändert sich das Kollisionsnetz, so dass sich der Benutzer durch offene Türen teleportieren kann (Abb. 5 Mitte und rechts). Die Türen öffnen sich automatisch, wenn sich der Benutzer innerhalb einer Triggerbox bewegt, die sich vor und hinter der Tür befindet. Neben der eigenen Bewegung innerhalb der Anwendung hat der Benutzer mehrere Möglichkeiten, über die beiden programmierten Controller mit der Anwendung zu interagieren, z. B. das Schalten verschiedener Lichtquellen, die im Fort zum Betrieb entsprechender Lampen in den Innenräumen und über den Bildern in der Ausstellung genutzt werden können. Diese Interaktion wird durch das Bewegen des Controllers zum Lichtschalter ausgelöst. Eine weitere Interaktion innerhalb der VR-Anwendung ist die per Triggerbox ausgelöste Teleportation des Nutzers in jedem Turm über eine Leiter auf die darüber liegende Ebene.



Abb. 5. Teleportation des Nutzers in der VR-Anwendung (links und Mitte), das Öffnen der Tür als Interaktion (rechts)



Abb. 6. Perspektivische Ansichten der entwickelten VR-Anwendung anhand des CAD-Modells der Festung: Mauer mit rechteckigem und rundem Turm (links) und Innenhof (rechts)

Die endgültige VR-Anwendung (Abb. 6) ermöglicht es dem Benutzer, in Echtzeit zwischen den Versionen zu wechseln und sowohl den kulturellen Aspekt - die digitale Version der Festung - als

auch den technologischen Aspekt mit den Auswirkungen verschiedener Formen der Nutzung von 3D-Datensätzen und deren Arbeitsabläufen zur Erstellung digitaler Modelle zu erkunden.

6 VR-Performance-Tests und Ergebnisse

Um aussagekräftige Ergebnisse für die Leistungstests zu erhalten, wurden für die Leistungsanalyse fünf verschiedene Ansichten ausgewählt, die unterschiedliche Inhalte repräsentieren und darstellen (u. a. ein Überblick über die Festung, eine einfache Ansicht der Mauer, eine Ansicht mit wehender Flagge und eine detaillierte Innenansicht) (Abb. 7). Die Ansichten wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen Menge an Materialien und Polygonen ausgewählt. Wir gehen davon aus, dass die unterschiedlichen Inhalte der einzelnen Ansichten einen Einfluss auf die Leistung der Echtzeit-VR-Visualisierung haben, d. h. je mehr unterschiedliche Materialien, Texturen und Polygone, desto größeren Einfluss hat es auf die VR-Leistung.

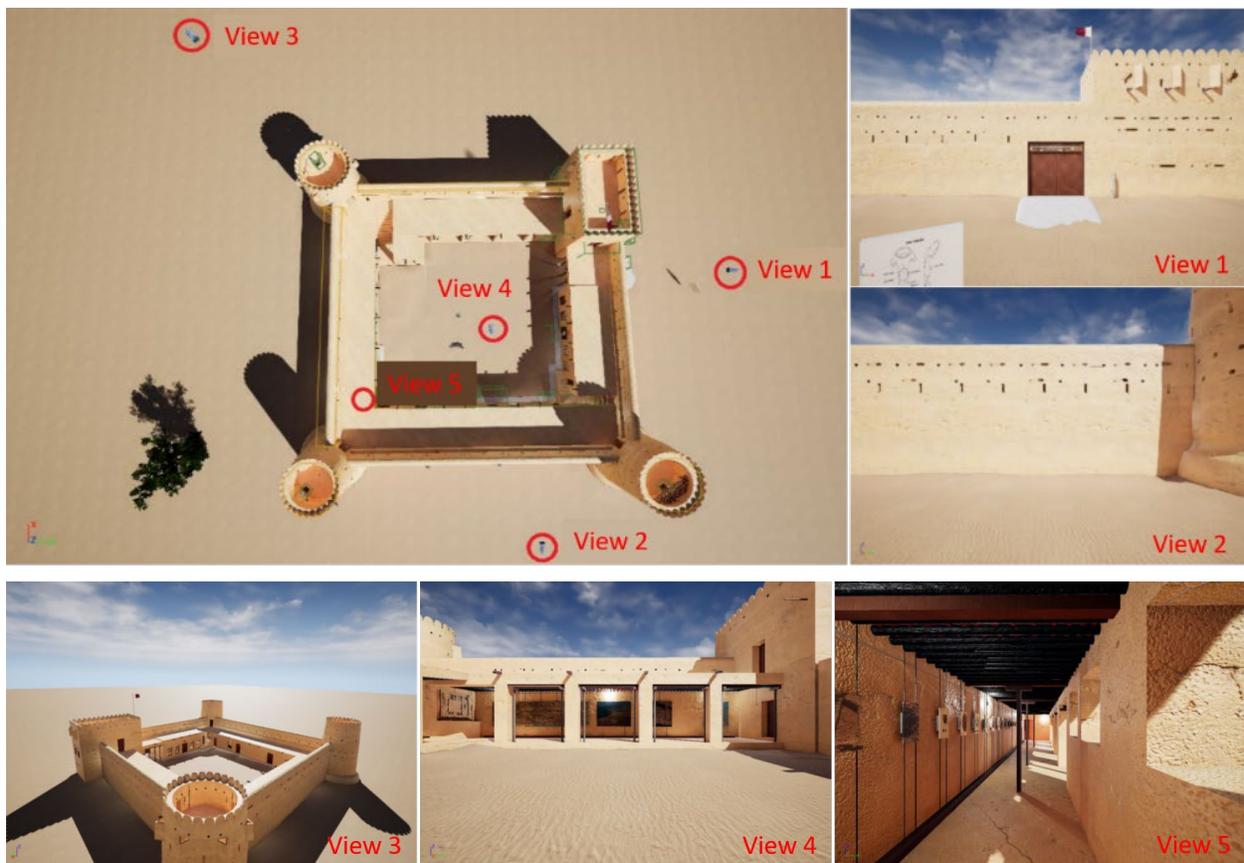


Abb. 7: Übersicht über fünf verschiedene Testszenen einschließlich ihrer perspektivischen Ansichten

Die erste Ansicht zeigt die Vorderseite des Forts mit dem einzigen Eingang und der katarischen Flagge, die auf dem rechteckigen Turm weht. Für die zweite Ansicht wurde ein Ausschnitt gewählt, in dem keine Veränderungen sichtbar sind und nur Boden, Himmel und Mauerwerk zu sehen sind. Um das gesamte Ausmaß des 3D-Modells zu erfassen, wurde eine weitere Ansicht (Ansicht 3) erstellt, die das gesamte Modell des Forts aus einem schrägen Winkel zeigt. Die vierte

Ansicht wurde in der Mitte des Innenhofs mit Blick auf die Ausstellung platziert, während die fünfte Ansicht eine Reihe von Gemälden für die Ausstellung auf der linken Seite innerhalb des schmalen Korridors zeigt.

Um den Einfluss der Hardware auf die VR-Leistung zu testen, wurden zwei VR-Anwendungen (CAD-Modell vs. vermaschtes Modell aus photogrammetrischen Bilddaten) auf drei verschiedenen Rechnern ausgeführt. Für alle anderen Tests wurde jedoch hauptsächlich der Rechner Labor 1 (Tabelle 1) verwendet, der an eine VR-Station im Labor der Hafencity Universität Hamburg angeschlossen ist und dem Nutzer ermöglicht, die Anwendung in einer virtuellen Umgebung zu erleben. Die folgenden technischen Spezifikationen der drei Computerhardware sind in Tabelle 1 zusammengefasst: CPU (Central Processing Unit), GPU (Graphics Processing Unit), und Random-Access Memory (RAM). Jede verwendete Nvidia-Grafikkarte hat eine Graphics Double Data Rate (GDDR) von acht Gigabyte.

Tab. 1: Technische Spezifikation der verfügbaren Computerhardware für die VR-Leistungstests

Computer	CPU	GPU	RAM
Labor 1	Intel Core i7 4 GHz	Nvidia GTX 1080	16 GB
Labor 2	Intel Core i7 3,4 GHz	Nvidia GTX 1080	32 GB
Home	Intel Core i5	Nvidia RTX 2060 Super	16 GB

Die Ergebnisse der VR-Leistungstests mit drei verschiedenen Computerhardware unter Verwendung einer Anwendung mit einem CAD-Modell und einem vermaschten Modell aus der SFM-Photogrammetrie sind in Abb. 8 dargestellt (hier stellen die Punkte die Messwerte dar). Aufgrund der geringeren Datenmenge des CAD-Modells im Vergleich zu den vermaschten Modellen erreichen alle drei Computer mehr als 100 fps für die VR-Anwendung bei der Verwendung der fünf verschiedenen perspektivischen Ansichten, was mehr als ausreichend ist, um die VR-Anwendung ruckelfrei auszuführen. Die leichten Unterschiede in der Leistung könnten auf die unterschiedlichen CPUs zurückzuführen sein. Bei der deutlich höheren Datenmenge der photogrammetrischen Dreiecksvermaschung zahlt sich jedoch die High-End-Grafikkarte (Nvidia RTX 2060 Super) des Home-Rechners aus, da hier immer noch über 100 fps erreicht werden. Dagegen reduziert die große Datenmenge (10 Millionen Dreiecke) die Leistung der beiden Laborrechner (Labor 1 und Labor 2), was sich in der Anzeige von jeweils nur 50 fps bei den vier Ansichten zeigt. Die Ansicht 5 war in dem aus der SFM-Photogrammetrie generierten vermaschten Modell nicht verfügbar.

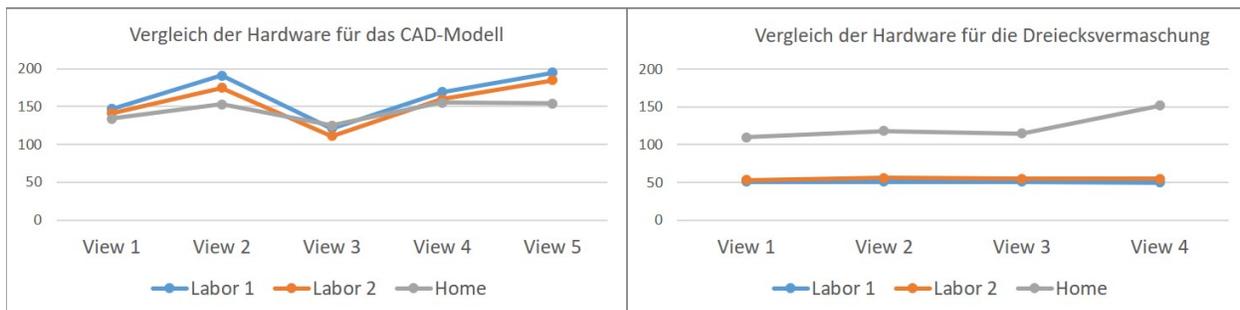


Abb. 8: Leistung der Hardware als Frames pro Sekunde (fps) in der VR-Anwendung für die verschiedenen 3D-Modelle

Der zweite Teil der Tests bestand aus einem Leistungsvergleich der verschiedenen VR-Modelle unter Verwendung derselben Computerhardware (Labor 1). Um den Einfluss anderer Faktoren so weit wie möglich auszuschließen, wurden die fps-Messungen ohne Texturen und vor der Berechnung der Beleuchtung der Szenen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Leistungstests sind in Abb. 9 zusammengefasst (Punkte= Messwerte). Die VR-Anwendungen mit dem CAD-Modell und dem TLS-Vermaschung mit 1 Million Dreiecken laufen mit mehr als 120 fps, während die anderen vermaschten Modelle deutlich schlechtere Leistungen bringen. Allerdings gibt es zwei interessante Aspekte in Abb. 9: (1) die TLS-Vermaschung (Mesh) mit 1 Million Dreiecken erzielt eine höhere fps-Rate als das CAD-Modell und (2) das photogrammetrisch vermaschte Modell (10 Millionen Dreiecke) von Metashape schneidet etwas besser ab als das TLS-Modell mit 10 Millionen Dreiecken. Die Gründe für beide Ergebnisse sind nicht klar. Außerdem verringert die Komplexität von Ansicht 3 die Leistung der VR-Anwendung auch bei den beiden Datensätzen mit der geringen Datenmenge (CAD-Modell und TLS 1M Mesh).

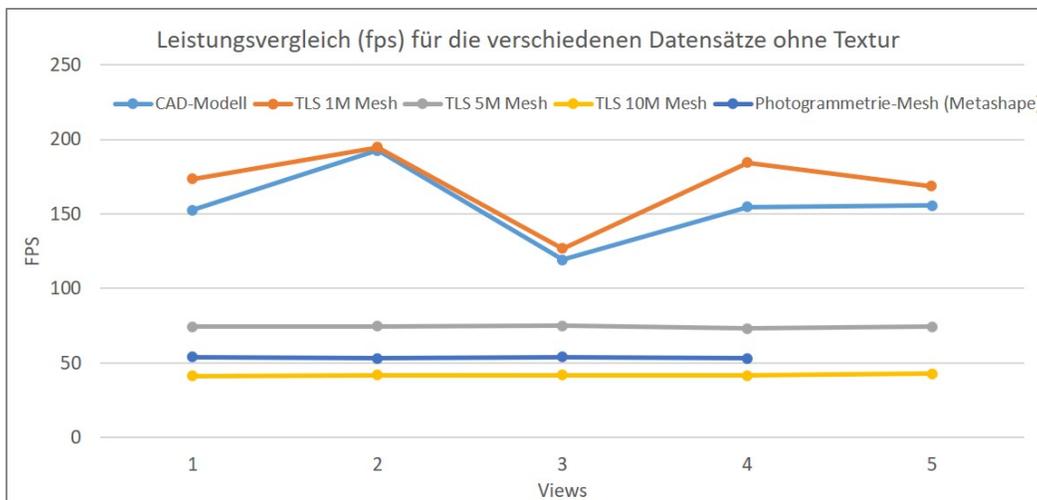


Abb. 9: Leistungsvergleich (in fps) der verschiedenen Datensätze ohne Textur (für Ansichten 1-5)

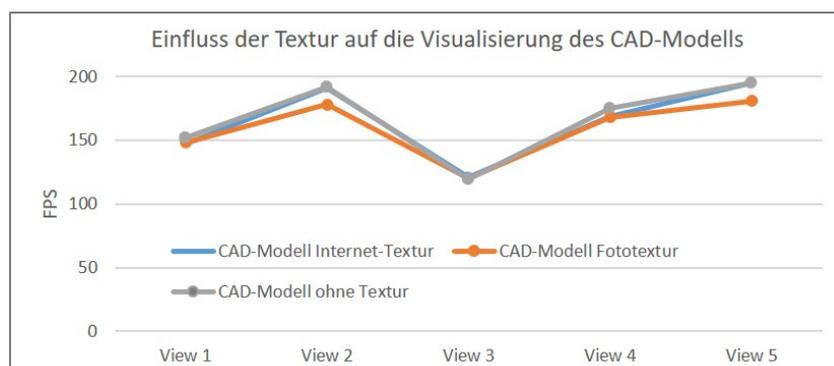


Abb. 10: Einfluss der Textur auf die Computerleistung bei der Visualisierung des CAD-Modells für die Ansichten 1-5

Aufgrund der hohen Computerleistung hat die Textur hier nur sehr geringen Einfluss auf die Visualisierung des CAD-Modells, da die Bildraten für alle fünf Ansichten jeweils deutlich über 100 fps liegen (Abb. 10) und da die Differenzen zwischen der Verwendung von Fototextur und keiner

Textur bei maximal 14 fps. Dagegen zeigt Abb. 11 den Einfluss der Datenmenge in Form der vermaschten TLS-Modelle mit Variation in Millionen von Dreiecken auf die fps-Rate für die beiden komplexeren Ansichten 1 und 3. Für diese Analyse wurde die Datenmenge in der VR-Anwendung künstlich erhöht, um den Effekt des Datenwachstums in den Ansichten 1 und 3 deutlich zu visualisieren. So konnte gezeigt werden, dass es derzeit eine Begrenzung der Datenmenge von ca. 5 Millionen Dreiecken in der Game-Engine Unreal 4 gibt, um eine reibungslose Echtzeit-Visualisierung der VR-Anwendung mit der verwendeten Computerhardware und den entsprechenden Einstellungen zu gewährleisten.

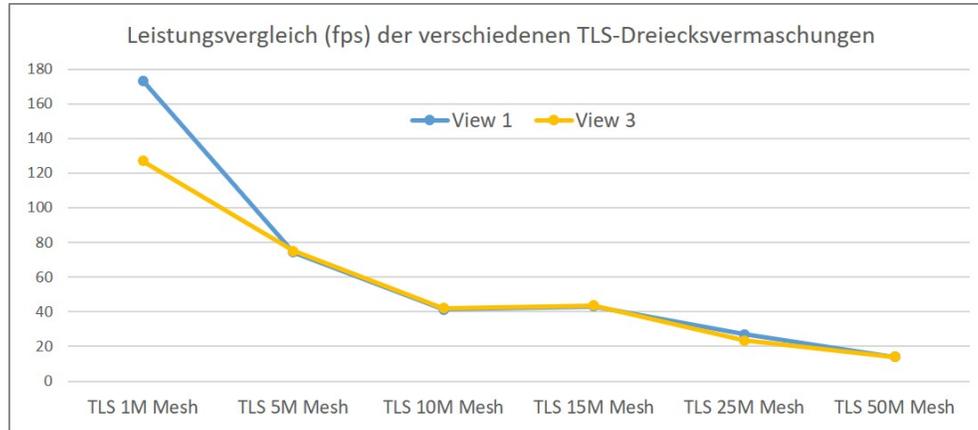


Abb. 11: Frames pro Sekunde (fps) als Messpunkte für die verschiedenen TLS-Modelle (Meshes), die in VR-Anwendungen verwendet werden

7 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wird die Entwicklung einer VR-Anwendung der katarischen Festung Al Zubarah in der Game Engine Unreal 4 als Grundlage für eine Performance-Analyse vorgestellt. Damit wurde die Leistungsfähigkeit der VR-Anwendung anhand verschiedener Kriterien untersucht, wobei die Leistung von ca. 90 Bildern pro Sekunde für eine optimale Echtzeit-Visualisierung im HMD vorausgesetzt wurde. Für diesen Test wurden fünf verschiedene 3D-Modelle generiert und in eine VR-Anwendung integriert: drei vermaschte 3D-Modelle in verschiedenen Auflösungen (1, 5 und 10 Millionen Dreiecke), die auf terrestrischen Laserscanning-Daten basieren, ein vermaschtes 3D-Modell, das aus Daten der Photogrammetrie gewonnen wurde, und ein optimiertes CAD-Modell, das aus der Laserscanning-Punktwolke konstruiert wurde. Bei den Leistungstests wurden folgende Aspekte untersucht: Leistung der Computerhardware und die fünf verschiedenen 3D-Modelle mit unterschiedlicher Dreiecksanzahl. Die Leistungsuntersuchungen in der Spiele-Engine Unreal Engine 4 zeigten, dass es immer wichtig ist, einen Kompromiss zwischen der Datenmenge und der verfügbaren Computerhardware zu finden, um eine flüssige Echtzeit-Visualisierung mit mehr als 90 fps zu gewährleisten. Daher ist es von Vorteil, CAD-Modelle anstelle von vermaschten Modellen zu verwenden, da die Datenmenge signifikant geringer ist. Bei der Verwendung eines vermaschten Modells liegt die Obergrenze für eine optimierte Echtzeit-VR-Visualisierung mit der verwendeten Hard- und Software sowie den Einstellungen jedoch bei 5 Millionen Dreiecken. Je

höher die Auflösung der vermaschten Modelle ist, desto geringer ist die Leistung der VR-Anwendungen in Form von Geschwindigkeit (Bilder pro Sekunde). Diesem Effekt kann durch eine Hardware-Ausstattung mit leistungsfähiger Grafikkarte und höherem Computerspeicher (Random-Access-Memory) entgegengewirkt werden. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass die unterschiedlichen Inhalte der einzelnen generierten perspektivischen Ansichten der Festung einen erheblichen Einfluss auf die Performance der VR- Echtzeit-Visualisierung haben.

Darüber hinaus gibt es verschiedene andere Elemente, die die Leistung einer VR-Anwendung stark beeinflussen können, z. B. die Qualität der generierten und der dynamischen Schatten, die Unterteilung großer 3D-Modelle in viele kleinere, die Detailgenauigkeit (Level of Detail LOD), die Lichteinstellungen, die Umgebungseinstellungen, die Rendering-Pipeline der gewählten Spiel-Engine usw. Dieser Beitrag konzentriert sich jedoch auf die Unreal Engine und auf den Vergleich mit aus Punktwolkendaten abgeleiteten vermaschten Modelle (Meshes). Die übliche vermaschte Punktwolke ist ein einziges großes Mesh, was für Echtzeitanwendungen ungewöhnlich ist und eigene Herausforderungen hinsichtlich der Leistung mit sich bringt, z. B. das große Datenvolumen einer hochauflösenden vermaschten Punktwolke. Optimierungsmethoden für eine ähnliche Anwendung werden z. B. von LÜTJENS et al. (2019) vorgestellt, die zeigen konnten, dass große, hochauflösende Geländedatensätze in einer Virtual-Reality-Anwendung durch die Einbeziehung von Kacheln, Level-Streaming und LOD-Algorithmen visualisiert werden können. Für die Zukunft ist zu erwarten, dass die Leistung der Computerhardware und der Game-Engines deutlich zunehmen wird, so dass auch die flüssige Darstellung größerer Datenmengen in VR möglich wird.

8 Literaturverzeichnis

- ADDISON, A.C., 2000: Emerging Trends in Virtual Heritage. *IEEE MultiMedia*, 7(2), 22-25.
- AFFLECK, J. & THOMAS, K., 2005: Reinterpreting Virtual Heritage. 10th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, 1, 169-78.
- BOZORGI, K. & LISCHER-KATZ, Z., 2020: Using 3D/VR for Research and Cultural Heritage Preservation: Project Update on the Virtual Ganjali Khan Project. *Preservation, Digital Technology & Culture*, 49(2), 45-57, <https://doi.org/10.1515/pdte-2020-0017>.
- BÜYÜKSALIH, G., KAN, T., ÖZKAN, G. E., MERİÇ, M., İSYN, L. & KERSTEN, T., 2020: Preserving the Knowledge of the Past Through Virtual Visits: From 3D Laser Scanning to Virtual Reality Visualisation at the Istanbul Çatalca İnceğiz Caves. *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88, 133-146, <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00091-3>.
- DEGGIM, S., KERSTEN, T., TSCHIRSCHWITZ, F. & HINRICHSSEN, N., 2017: Segeberg 1600 - Reconstructing a Historic Town for Virtual Reality Visualisation as an Immersive Experience. *Inter. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 42(2/W8), 87-94, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-87-2017>.
- DHANDA, A., REINA ORTIZ, M., WEIGERT, A., PALADINI, A., MIN, A., GYI, M., SU, S., FAI, S. & SANTANA QUINTERO, M., 2019: Recreating cultural heritage environments for VR using photogrammetry. *Int. Arch. Photogrammetry, Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 42(2/W9), 305-310, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-305-2019>.

- DÖRNER, R., BROLL, W., GRIMM, P. & JUNG, B., 2014: Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität; Springer-Verlag: Berlin.
- DUBOSE, J., 2020: The Case for VR. *Journal of Electronic Resources Librarianship*, **32**(2), 130-133, <https://doi.org/10.1080/1941126X.2020.1739851>.
- EDLER, D., KEIL, J., WIEDENLÜBBERT, T., SOSSNA, M., KÜHNE, O. & DICKMANN, F., 2019: Immersive VR Experience of Redeveloped Post-industrial Sites: The Example of “Zeche Holland” in Bochum-Wattenscheid. *KN J. Cartogr. Geogr. Inf.*, **69**, 267-284, <https://doi.org/10.1007/s42489-019-00030-2>.
- FASSI, F., MANDELLI, A., TERUGGI, S., RECHICHI, F., FIORILLO, F. & ACHILLE, C., 2016: VR for Cultural Heritage. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics 2016, Lecture Notes in Computer Science*, **9769**, 139-157, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40651-0_12.
- FERWATI, M.S. & EL MENSRAWY, S., 2021: Virtual reconstruction of the historic city of Al-Zubarah in Qatar. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, **21**, e00177, <https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00177>.
- FREINA, L. & OTT, M., 2015: A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State of The Art and Perspectives; *eLearning & Software for Education*. Available online: <https://ppm.itd.cnr.it/download/eLSE%202015%20Freina%20Ott%20Paper.pdf>, last access 11 January 2023.
- HRUBY, F., SÁNCHEZ, L.F.Á., RESSL, R. & ESCOBAR-BRIONES, E.G., 2020: An Empirical Study on Spatial Presence in Immersive Geo-Environments. *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, **88**, 155-163, <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00107-y>.
- KERSTEN, T., BÜYÜKSALIH, G., TSCHIRSCHWITZ, F., KAN, T., DEGGIM, S., KAYA, Y. & BASKARACA, A. P., 2017: The Selimiye Mosque of Edirne, Turkey - An Immersive and Interactive Virtual Reality Experience using HTC Vive. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **42**(5/W1), 403-409, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-403-2017>.
- KERSTEN, T., DEGGIM, S., TSCHIRSCHWITZ, F., LINDSTAEDT, M. & HINRICHSSEN, N., 2018: Segeberg 1600 - Eine Stadtrekonstruktion in Virtual Reality. *KN J Cartogr Geogr Inf* **68**(4), 183-191, <https://doi.org/10.1007/BF03545360>.
- KERSTEN, T., MECHELKE, K. & MAZIULL, L., 2015: 3D Model of Al Zubarah Fortress in Qatar - Terrestrial Laser Scanning vs. Dense Image Matching. *Inter. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, **40**(5/W4), 1-8, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-1-2015>.
- KERSTEN, T., TRAU, D. & TSCHIRSCHWITZ, F., 2020: The Four-masted Barque Peking in Virtual Reality as a New Form of Knowledge Transfer. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **V-4-2020**, 155-162, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-4-2020-155-2020>.
- KERSTEN, T., TSCHIRSCHWITZ, F., DEGGIM, S., 2017: Development of a Virtual Museum including a 4D Presentation of Building History in Virtual Reality. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* **42**(2/W3), 361-367, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-361-2017>.

- KERSTEN, T., TSCHIRSCHWITZ, F., LINDSTAEDT, M. & DEGGIM, S., 2018: The historic wooden model of Solomon's Temple: 3D recording, modelling and immersive virtual reality visualisation. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, Special Issue: Digital workflows for the conservation and sustainability of historic places*, **8**(4), 448-464, <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-09-2017-0067>.
- KHARROUBI, A., HAJJI, R., BILLEN, R. & POUX, F., 2019: Classification and Integration of Massive 3D Points Clouds in a Virtual Reality (VR) Environment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **42**(2/W17), 165-171, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-165-2019>.
- LANIER, J., 1992: Virtual reality: The promise of the future. *Interactive Learning International*, **8**(4), 275-279.
- LÜTJENS, M., KERSTEN, T., DORSCHER, B. & TSCHIRSCHWITZ, F., 2019: Virtual Reality in Cartography: Immersive 3D Visualization of the Arctic Clyde Inlet (Canada) Using Digital Elevation Models and Bathymetric Data. *Multimodal Technol. Interact.*, **3**(9), <https://doi.org/10.3390/mti3010009>.
- MANGHISI, V.M., FIORENTINO, M., GATTULLO, M., BOCCACCIO, A., BEVILACQUA, V., CASCELLA, G.L., DASSISTI, M. & UVA, A.E., 2018: Experiencing the sights, smells, sounds, and climate of southern Italy in VR. *IEEE Computer Graphics and Applications 2018*, **37**(6), 19-25, <https://doi.org/10.1109/MCG.2017.4031064>.
- MCCAFFREY, M., 2017: *Unreal Engine VR Cookbook: Developing Virtual Reality with UE4*. Addison-Wesley Professional, 1st edition, 288 p.
- MEDYŃSKA-GULIJ, B. & ZAGATA, K., 2020: Experts and Gamers on Immersion into Reconstructed Strongholds. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **9**(11), 655, <https://doi.org/10.3390/ijgi9110655>.
- MERRIAM-WEBSTER DICTIONARY, 2023: Definition of virtual reality, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/virtual%20reality>, last access 11.01.2023.
- POLIMERIS, S. & CALFOGLOU, C., 2016: Cultural Tourism Destinations and the Power of Virtual Reality. In: Katsoni V., Stratigea A. (eds) *Tourism and Culture in the Age of Innovation*. Springer Proceedings in Business and Economics. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-319-27528-4_39.
- PORTMAN, M.E., NATAPOV, A. & FISHER-GEWIRTZMAN, D., 2015: To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Comput. Environ. Urban Syst.*, **54**, 376-384.
- RAMSEY, E., 2017: Virtual Wolverhampton: Recreating the historic city in virtual reality. *ArchNet International Journal of Architectural Research* **2017**, **11**(3), 42-57, <http://dx.doi.org/10.26687/archnet-ijar.v11i3.1395>.
- RHEINGOLD, H., 1992: *Virtual Reality: The Revolutionary Technology of Computer-Generated Artificial Worlds - and How It Promises to Transform Society*. New York: Simon & Schuster
- SCHOFIELD, G., BEALE, G., BEALE, N., FELL, M., HADLEY, D., HOOK, J., MURPHY, D., RICHARDS, J. & THRESH, L., 2018: Viking VR: Designing a Virtual Reality Experience for a Museum. *DIS 2018 – Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference, ACM DIS Conference on Designing Interactive Systems 2018*, Association for Computing Machinery (ACM), 805-816, <https://doi.org/10.1145/3196709.3196714>.

- SEE, Z.S., SANTANO, D., SANSOM, M., FONG, C.H. & THWAITES, H., 2018: Tomb of a Sultan: A VR Digital Heritage Approach. 3rd Digital Heritage International Congress (Digital HERITAGE) held jointly with 24th IEEE International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018), 1-4.
- SKARLATOS, D., AGRAFIOTIS, P., BALOGH, T., BRUNO, F., CASTRO, F., PETRIAGGI, B.D., DEMESTICHA, S., DOULAMIS, A., DRAP, P., GEORGOPOULOS, A., KIKILLOS, F., KYRIAKIDIS, P., LIAROKAPIS, F., POUILLIS, C. & RIZVIC, S., 2016: Project iMARECULTURE: advanced VR, iMmersive serious games and augmented REality as tools to raise awareness and access to European underwater CULTURAl heritagE. Euro-Mediterranean Conference 2016, Springer, Cham, 805-813.
- STONE, R. & OJKA, T., 2000: Virtual Heritage: what next? IEEE MultiMedia, **7**(2), 73-74.
- THUESEN, I. & KINZEL, M., 2011: Al-Zubarah Archaeological Park as a UNESCO World Cultural Heritage Site - a master plan for its site management, preservation, and presentation (poster). Proceedings of the Seminar for Arabian Studies, **41**, 371-376.
- TSCHIRSCHWITZ, F., RICHERZHAGEN, C., PRZYBILLA, H.-J. & KERSTEN, T., 2019: Duisburg 1566: Transferring a Historic 3D City Model from Google Earth into a Virtual Reality Application. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, **87**(1-2), 47-56, <https://doi.org/10.1007/s41064-019-00065-0>.
- UNESCO, 2013: Qatar and Fiji get their first World Heritage sites as World Heritage Committee makes six additions to UNESCO List. <https://whc.unesco.org/en/news/1045>, last access 11.01.2023.
- UNESCO, 2021: Al Zubarah Archaeological Site. <https://whc.unesco.org/en/list/1402>, last access 11.01.2023.
- WALMSLEY, A. & KERSTEN, T., 2019: Low-cost development of an interactive, immersive virtual reality experience of the historic city model Stade 1620. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., **42**, 405-411, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-405-2019>.
- WALMSLEY, A. & KERSTEN, T., 2020: The Imperial Cathedral in Königslutter (Germany) as an Immersive Experience in Virtual Reality with Integrated 360° Panoramic Photography. MDPI Journal Applied Sciences, Special Issue Augmented Reality, Virtual Reality & Semantic 3D Reconstruction, **10**, 1517; <https://doi.org/10.3390/app10041517>.
- WESTFRIES MUSEUM, 2023: Batavia 1627 in virtual reality. Hoorn, Netherlands. <https://wfm.nl/batavia-1627vr>, last access 11.01.2023.
- WIKIPEDIA, 2023: Al Zubara Fort. https://en.wikipedia.org/wiki/Al_Zubara_Fort, last access 11 January 2023.