

Entwicklung einer interaktiven, immersiven Virtual-Reality-Applikation des historischen Stadtmodells Stade 1620

THOMAS P. KERSTEN¹ & ALEXANDER P. WALMSLEY¹

Zusammenfassung: Virtual Reality wird durch die immer leistungsfähigeren 3D-Dokumentations- und Modellierungstechnologien ein erschwingliches und interessantes Werkzeug für Visualisierungen in Architektur, Planung, Denkmalpflege, u.v.m. Daher wird es immer wichtiger, kostengünstige Methoden für die Erstellung von immersiven virtuellen 3D-Umgebungen zu entwickeln. Somit wird diese Technologie für Institutionen wie Museen und andere kulturelle Bildungseinrichtungen, die oft innerhalb eines engen Budgets arbeiten, eine attraktive Form der Wissensvermittlung. In diesem Beitrag beschreiben wir einen Workflow zum Aufbau einer interaktiven, immersiven Virtual-Reality-Applikation für ein virtuelles 3D-Stadtmodell der Stadt Stade im Jahr 1620. Dieses virtuelle Stadtmodell basiert auf einem physischen 3D-Modell der Stadt, das im Stader Rathaus ausgestellt ist. Der Workflow beginnt mit der Digitalisierung des Modells mittels digitaler Photogrammetrie, gefolgt von der anschließenden Low- und High-Polygon-Modellierung der einzelnen Architekturobjekte in Autodesk Maya, führt weiter zum Texture Mapping mit Substance Painter und endet schließlich mit der Visualisierung in der Unreal Engine 4. Das Ergebnis dieses Workflows ist eine detaillierte, historische 3D-Umgebung mit einem hohen Maß an geometrischer Realität, in der Interaktivität später einfach hinzugefügt werden kann. Darüber hinaus verfolgt der Workflow einen sehr iterativen Ansatz, der es ermöglicht, die Leistung der virtuellen Umgebung in der Game Engine in jeder Phase des Prozesses zu überwachen und schnell anzupassen. Um das Potenzial und die Attraktivität der virtuellen Umgebung als Werkzeug für Bildung und Kommunikation zu erhöhen, werden zukünftig interaktive Elemente, Animationen und einfache Lernspiele integriert.

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich Virtual Reality zu einer günstigen und leistungsfähigen Technologie entwickelt, wodurch sie in einer viel breiteren Öffentlichkeit für Visualisierungszwecke und Spiele eingesetzt wird. Diese Entwicklung eröffnet kulturellen Bildungseinrichtungen, wie beispielsweise Museen, spannende neue Möglichkeiten, um ein neues und vor allem junges Publikum für die Besichtigung ihrer Sammlungen und Archive zu gewinnen. Insbesondere in Verbindung mit digitalen 3D-Rekonstruktionsverfahren kann Virtual Reality dem Publikum ermöglichen, historische Orte im Maßstab 1:1 in einer räumlich immersiven, visuellen und auditiven Umgebung zu erleben. Darüber hinaus fördert die Nutzung von Interaktion innerhalb dieser virtuellen Welten ein gewisses Maß an sensorisch-motorischer Immersion (HOLOPAINEN & BJÖRK 2005) und ist damit ein sehr mächtiges Werkzeug zum spielerischen Lernen. Infolgedessen hat dies ein zunehmendes Interesse an der Anwendung spiel-typischer Elemente (Gamification) für den Bildungsauftrag im Bereich des kulturellen Erbes geweckt. Die neue Form der Bildung und Wissensvermittlung wird heute mit dem Begriff "Edutainment" bezeichnet.

¹ HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Überseeallee 16, D-20457 Hamburg, E-Mail: [Thomas.Kersten, Alexander.Walmsley]@hcu-hamburg.de

In diesem Beitrag zeigen wir, dass diese Technologien kostengünstig eingesetzt werden können, um eine interaktive, immersive Virtual-Reality-Umgebung zu erschaffen. Auf der Grundlage der digitalen 3D-Rekonstruktion des historischen Stadtmodells der Stadt Stade im Jahr 1620 wurde eine VR-Applikation entwickelt. Dieses Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Museum Schwedenspeicher in Stade konzipiert, wo die VR-Applikation als pädagogisches Instrument zukünftig für Museumsbesucher und Schulklassen eingesetzt werden soll, um so spielerisch einen Einblick in die Geschichte Stades zu geben.

2 Verfügbare historische Stadtmodelle

Es gibt einen kleinen, aber wachsenden Bestand an digitalen historischen 3D-Stadtmodellen, der in den letzten Jahren durch die zunehmende Verfügbarkeit der notwendigen Soft- und Hardware entstanden ist. Physische und skalierte 3D-Gelände- und Stadtmodelle gewannen ab dem 16. Jahrhundert an Popularität, vor allem als Werkzeug für militärische Planungen (WARMOES 2018). Tatsächlich gibt es mehrere Beispiele für digitale 3D-Modelle, die von einem vorhandenen physischen 3D-Stadtmodell entwickelt wurden. Dazu gehören die Stadt Solothurn (Schweiz) von Nebiker et al. (2009), Duisburg von JEDRZEJAS & PRZYBILLA (2009), Prag (Tschechien) von SEDLACEK & ZARA (2009), Toul (Frankreich) von CHEVRIER et al. (2010), Hamburg in 4D von KELLER et al. (2011), Lüttich (Belgien) von PFEIFFER et al. (2013) und Genf (Schweiz) vom Auguste Magnin Relief Projekt, koordiniert von der Stadt Genf (http://making-of.geneve1850.ch/3D/FR/#Geneve_1850-3D). Die in diesen Projekten entwickelten digitalen Modelle haben ein breites Anwendungsspektrum. Während einige zur Dokumentation und Präsentation von Museumssammlungen gebaut wurden (z.B. CHEVRIER et al. 2010), wurden bei anderen das Potenzial als Forschungsinstrument genutzt (z.B. PFEIFFER et al. 2013). Selbstverständlich schließen sich diese beiden Ziele nicht gegenseitig aus.

Die Nutzung von Virtual Reality zur Erforschung dieser Stadtmodelle in der First-Person-View (FPV) ist jedoch vergleichsweise seltener. Dies liegt vielleicht an der Herausforderung, Städte mit genügend Details zu modellieren, um innerhalb der virtuellen Umgebung überzeugend realistisch zu erscheinen, während gleichzeitig technische Kriterien streng eingehalten werden müssen, die die zu ladende Datenmenge für eine einwandfreie Visualisierung begrenzen. Das Potenzial von Virtual-Reality-Stadtmodellen, die im Maßstab 1:1 erlebt und erforscht werden können, ist dennoch groß, nicht nur für die Präsentation und Planung, sondern auch für die Bildung und die Wissensvermittlung (THOMPSON et al. 2006). Virtual Reality-Stadtmodelle bieten die Möglichkeit, extrem komplexe Informationen für Menschen mit unterschiedlichem Fachwissen durch Immersion und Interaktivität zu vereinfachen.

Insbesondere historische Architektur- und Kulturobjekte wie z.B. Monumente oder Städte sind ideal für eine interaktive Visualisierung in der virtuellen Realität, da sie heute oft als Wahrzeichen oder als touristische Attraktion in Ausstellungen thematisiert werden. Aus diesem Grund haben solche Websites bereits ein großes, interessiertes Publikum, das durch VR-Erfahrungen angesprochen werden kann. Mehrere Projektbeispiele von der HafenCity Universität Hamburg über VR-Visualisierungen von historischen Geodaten wurden bereits veröffentlicht. Das Alt-Segeberger Bürgerhaus wurde als eines der ersten virtuellen Museen mit dem VR-System HTC Vive vorgestellt (KERSTEN et al. 2017b). Darüber hinaus wurden zwei historische Städte (einschließlich der

umliegenden Landschaften) als VR-Anwendungen für Besuche in der Vergangenheit entwickelt: Duisburg im Jahr 1566 (TSCHIRSCHWITZ et al. 2019) und Segeberg im Jahr 1600 (KERSTEN et al. 2018a). Zwei religiöse Kulturdenkmäler stehen auch als VR-Erlebnisse zur Verfügung: die Seli-miye Moschee in Edirne, Türkei (KERSTEN et al. 2017a) und das Holzmodell des Salomonischen Tempels (KERSTEN et al. 2018b).

Ein weiteres historisches Beispiel in VR stellt der sanierte post-industrielle Standort der "Zeche Holland" in Bochum-Wattenscheid dar (EDLER et al. 2019). Einen etwas anderen Workflow zeigt EDLER et al. (2018) für den Aufbau einer interaktiven kartographischen VR-Umgebung zur Erforschung urbaner Landschaften.



Abb. 1: Das historische 3D-Stadtmodell von Stade im Jahr 1620 (links) und ein Ausschnitt des physikalischen Modells im Rathaus

3 Das historische Stadtmodell von Stade

Die Hansestadt Stade liegt im Bundesland Niedersachsen 45 km westlich von Hamburg. Die durch den Nebenfluss Schwinga mit der Elbe verbundene Stadt Stade war einst ein mächtiges Mitglied der Hanse, die vom 12. bis 16. Jahrhundert den Handel in Mittel- und Nordeuropa dominierte. Die Stadt, die 1601 aus dem Städtebund der Hanse ausgeschlossen wurde, befand sich ab 1645 unter schwedischer und ab 1712 unter dänischer Herrschaft. Das Museum Schwedenspeicher in Stade verfügt über zahlreiche Stadtpläne und Karten aus der Zeit, die einen Eindruck von der Ausdehnung der Stadt und ihrer Umgebung vermitteln. Im Foyer des Rathauses befindet sich ein physisches 3D-Modell der Stadt, basierend auf ihrem Grundriss aus dem Jahr 1620, das Auskunft über die zahlreichen Gebäude und Kirchen in Stade gibt. Viele davon existierten bis zum großen Brand von 1659 und zeugen vom reichen religiösen und kulturellen Leben der Stadt in der Frühen Neuzeit. In ihrer Blütezeit hatte die Stadt fünf Stadtteile mit jeweils einer eigenen Kirche: das Kloster-viertel mit der Kirche St. Georg, das Kaufmannsviertel mit St. Cosmas et Damiani, das Bischofs-viertel mit St. Wilhadi, das Fischerviertel mit St. Nicolai und das Schlossviertel mit St. Pankratii. Das physische 3D-Modell der Stadt (Abb. 1) hat Abmessungen von 2,1 m × 1,3 m und ist im Maßstab ca. 1:550 dargestellt.

Leider ist wenig über die Geschichte des physischen Modells und dessen Entstehung selbst bekannt. Es wurde 1977 für die Eröffnung des Schwedenspeichers in Auftrag gegeben und 2010, als das Museum im Umbau begriffen war, in das Foyer des Rathauses verlegt. Der Name des Künstlers

oder auch die genauen historischen Quellen, auf denen die Rekonstruktion basiert, sind nicht bekannt. Da es jedoch ursprünglich vom Museum in Auftrag gegeben wurde, kann man davon ausgehen, dass das Modell als interpretatives Hilfsmittel für Besucher gedacht war.

4 Die Unreal Game Engine und das VR-System HTC Vive Pro

Eine Game Engine ist eine Software-Entwicklungsumgebung, die entwickelt wurde, um Videospiele für Konsolen, mobile Geräte und PCs zu erstellen. Seine wichtigste Funktionalität umfasst typischerweise eine Rendering-Engine für 2D- oder 3D-Grafiken zur Visualisierung texturierter 3D-Modelle. Zusätzlich enthält sie unter anderem eine Physik-Engine oder eine Kollisionserkennung zur Interaktion mit Objekten, ein Audiosystem zur Ausgabe von Sound, Skripting, Werkzeuge für die Erstellung von Animationen, künstliche Intelligenz, Streaming und Performance Management. Eine Game Engine ist eine leistungsstarke Plattform zur Darstellung von 3D-Landschaftsdaten in VR, da sie dem Benutzer mit den notwendigen Funktionalitäten das Eintauchen in eine virtuelle Welt ermöglicht.

Derzeit bieten mehrere Spiele-Engines wie die Unity-Engine von Unity Technologies, die CryEngine des deutschen Entwicklungsstudios Crytek und die Unreal Engine 4 (UE4) von Epic Games für Entwickler freien Zugang. Einen aktuellen Überblick und Vergleich verschiedener Game Engines findet sich in GAMESPARKS (2019). Die Auswahl einer geeigneten Engine für die Projektbearbeitung richtet sich nach den oben genannten Komponenten und der Anpassungsfähigkeit an einen bereits bestehenden Arbeitsprozess. Für dieses Projekt wurde UE4 gewählt, weil sie - im Gegensatz zu anderen Engines - eine visuelle Skriptsprache mit Blueprints implementiert hat. Diese visuelle Programmierung erfordert kein Schreiben von maschinenkonformem Quellcode und ermöglicht Anwendern mit geringen Programmierkenntnissen einen viel einfacheren Einstieg in die Entwicklungsumgebung. Darüber hinaus bietet Unreal ausreichenden Zugriff auf Dokumentationen, Tutorials und Asset Stores. Aufgrund der begrenzten Zeit für dieses Projekt wurde keine andere Engine getestet.

Als Virtual Reality System kommt die HTC Vive Pro zum Einsatz (Abb. 2 links). Die HTC Vive Pro (www.vive.com) ist ein Virtual-Reality-Headset für raumbezogene VR. Es wurde von HTC und Valve Corporation entwickelt. Die erste Version der HTC Vive wurde am 5. April 2016 auf den Markt gebracht. Basiskomponenten sind das Headset für das immersive Erlebnis, zwei Controller für Benutzerinteraktionen und zwei Lighthouse-Basisstationen zur Verfolgung der Benutzerbewegung durch Infrarotlaser. Das komplette HTC Vive Pro (Full Kit) ist derzeit für EUR 1199 (Januar 2020) auf dem Markt erhältlich. Die Lighthouse-Technologie erlaubt eine hochpräzise und zeitlich hochaufgelöste Positionsbestimmung des Nutzers innerhalb der $4,6 \text{ m} \times 4,6 \text{ m}$ großen Interaktionsfläche (Abb. 2 rechts). Das VR-System verwendet einen Gyroskop-, einen Beschleunigungs- und Laserinfrarotsensor, um die Bewegungen des Kopfes bis auf ein Zehntel Grad genau zu verfolgen (PAINTER, 2015). Die zwei im Raum diagonal positionierten Lighthouse-Stationen senden Laserlinien mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich aus, die von mehreren einfachen Fotosensoren in der VR-Brille und in den Controllern für deren 3D-Positionsbestimmung genutzt werden. Die Vive-Controller sind speziell für VR mit intuitiver Steuerung und realistischem haptischem Feedback konzipiert, um virtuelle Umgebungen frei zu erkunden und mit ihnen zu interagieren. Die visuelle Darstellung erfolgt in der VR-Brille mit einer Auflösung von 1440×1600

Pixel und einer Bildwiederholrate von 90 Hz. Der Datenaustausch zwischen Game Engine und der HTC Vive wird über SteamVR realisiert. Abb. 2 zeigt den Aufbau des VR-Systems HTC Vive Pro einschließlich des Interaktionsbereichs (blau).

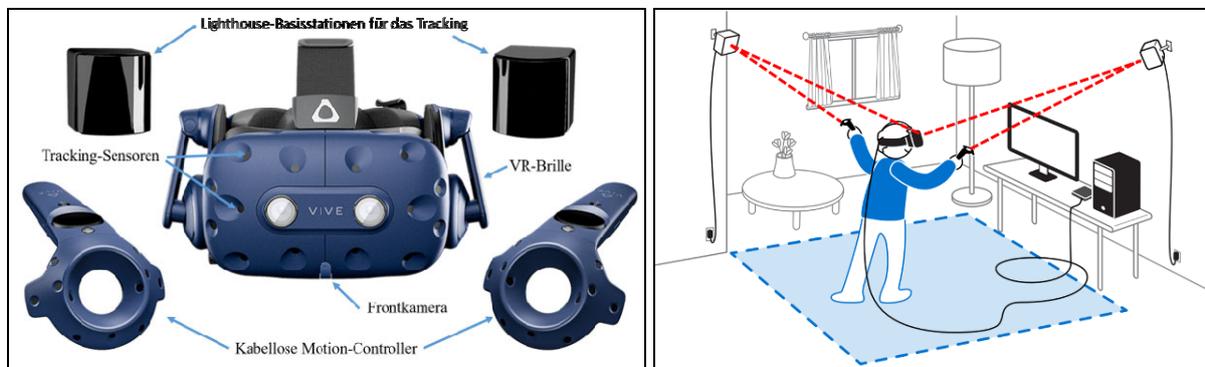


Abb. 2: HTC Vive Pro mit zwei Controllern und dem Lighthouse-Tracking-System (www.vive.com) (links) und Aufbau der HTC Vive Pro einschließlich der Lighthouse-Basisstationen (rechts), die die beweglichen zwei Controller und das Headset im blauen Interaktionsbereich in Echtzeit verfolgen (www.htc.com)

5 Der Workflow

Der folgende Workflow wurde entwickelt, um das virtuelle Stadtmodell zu erstellen: (1) Datenerfassung durch digitale Photogrammetrie, (2) Bildorientierung, dichte Punktwolkengenerierung (Abb. 3 links) und Dreiecksvermaschung (Abb. 3 rechts) mit der Software Agisoft PhotoScan/Metashape, (3) Erstellung einer Höhenkarte (Height Map) aus der photogrammetrischen Dreiecksvermaschung in Autodesk Maya (Abb. 4 links oben), (4) Laden der Höhenkarte als Grauwertbild in UE4 und Erstellen von einfachen Klötzchenmodellen der Objekte mit wenigen Polygonen (Abb. 4), (5) detaillierte 3D-Modellierung der Gebäude und Objekte mit Maya unter Verwendung der photogrammetrischen Dreiecksvermaschung (Mesh) und Referenzmaterial, (6) Texturierung der 3D-Modelle mit Maya und Substance Painter, (7) Einsetzen der texturierten, detaillierten 3D-Modelle in die Szene in UE4, (8) Modellierung und Texturierung der Landschaften mit den UE4-Landscape-Editor, (9) Integration von Bewegungssteuerungen und Interaktionen in UE4, und (10) immersive und interaktive Visualisierung des Stadtmodells im VR-System HTC Vive Pro mit SteamVR - als Schnittstelle zwischen der Game Engine und dem Head Mounted Display.

6 Datenerfassung

Im Jahr 2011 digitalisierte das Labor für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg das physikalische 3D-Stadtmodell von Stade mittels Photogrammetrie. 106 Fotos wurden mit einer Spiegelreflexkamera Nikon D90 mit Nikkor-Objektiv 20 mm und Zoom-Objektiv (Brennweite 85 mm) aufgenommen. Alle Fotos wurden in Agisoft PhotoScan verarbeitet, um eine dichte Punktwolke von 20,7 Millionen Punkten mit hoher Qualität zu erzeugen (Abb. 3). Für die Skalierung der Punktwolke wurden die Distanzen von drei Maßstäben gemessen und in

PhotoScan mit einer Genauigkeit von 0,3 mm ermittelt. Schließlich wurde ein texturiertes 3D-Modell mit 4,1 Millionen Dreiecksflächen als Grundlage für die weitere 3D-Modellierung erstellt.



Abb. 3: Dichte 3D-Punktwolke des physikalischen Stadtmodells von Stade im Jahr 1620 (links) und perspektivische Ansicht des texturierten, vermaschten 3D-Modells (rechts)

7 3D-Modellierung, Texturierung und VR-Integration

Im Rahmen dieses Projektes wurde der Workflow für die Modellierung und Texturierung optimiert, um die Bearbeitungszeit zwischen verschiedenen Versionen des virtuellen Modells zu minimieren und um die genutzte Computerleistung bis zur endgültigen VR-Applikation laufend zu überprüfen.

Die Datenmenge der Dreiecksvermaschung (Abb. 3 rechts) war zu groß, um es direkt in die Game Engine zu integrieren. Aus diesem Grund wurde mit Autodesk Maya eine Höhenkarte aus der Dreiecksvermaschung erstellt, die anschließend als Verschiebungskarte in UE4 eingebracht wurde, um ein hochauflösendes (4K) Landschaftsnetz zu erzeugen. Mit den Modellierungswerkzeugen von UE4 wurden von den Gebäuden einfache Klötzchenmodelle (mit jeweils wenigen Polygonen bzw. Flächen) erstellt und an den entsprechenden Stellen in der Landschaft platziert (Abb. 4). Um die Zeit für die Modellierung zu verkürzen und gleichzeitig eine ausreichende Variabilität in den Gebäudetypen zu erreichen, wurden insgesamt 13 verschiedene Gebäudevarianten mit geringer Anzahl von Polygonen geschaffen, um alle 974 Stadthäuser von Stade darzustellen. Diese Varianten mit wenigen Polygonen wurden entwickelt, um die Variation der Haustypen im physischen Modell so genau wie möglich darzustellen, die sich je nach Variablen wie Größe und Form der Grundfläche, Gebäudehöhe, Anzahl der Stockwerke und Dachtyp unterscheiden. Neben den Häusern und anderen Wohnbauten wurden weitere Objekte mit wenigen Polygonen für die Verteidigungs- und Hafeninfrastrukturen der Stadt wie Stadtmauern, Brücken, Verteidigungstürme und Hafenkräne modelliert. Darüber hinaus wurde eine Reihe von Sonderbauten in der Stadt für eine individuelle Modellierung ausgewählt. Dazu gehören die Kirchen St. Pankratii, St. Nicolai, Cosmae et Damiani und St. Wilhadi, die Kloster St. Marien, das Kloster St. Johannis, das Rathaus Stade, ein historisches Kaufmannshaus und die Ruinen des Klosters St. Georg, die sich 1620 noch in der Stadtlandschaft befanden.



Abb. 4: Ansichten vom ersten Bearbeitungsschritt in der Unreal Engine: Platzierung von einfachen Gebäudeklötzchen auf die Höhenkarte, die aus der Dreiecksvermaschung der Punktwolke generiert wurde (links oben). Die verschiedenfarbigen Klötzchen stellen jeweils unterschiedliche Varianten des Stadthauses dar

Anschließend wurden diese einfachen Gebäudeklötzchen nach Autodesk Maya exportiert, um sie als Vorlagen für die Erstellung von detaillierten Architekturmodellen zu verwenden. Um die architektonischen Details für diese hochaufgelösten Modelle nachzubilden, war es notwendig, eine Menge an zusätzlichem Referenzdatenmaterial (Fotos, Abbildungen, Texte, usw.) zu sammeln. Die Details des physischen Stadtmodells selbst reichten nicht aus, um ein überzeugendes und realistisches, virtuelles Modell im Maßstab 1:1 zu erstellen. Darüber bot die Digitalisierung des Modells eine wertvolle Gelegenheit, das Modell durch zusätzliche historische Details zu ergänzen. Neben Fotos von der Stadtarchitektur, die in Stade und Lübeck aufgenommen wurden, wurden Referenzmaterial von Malern des niederländischen Goldenen Zeitalters (z.B. Jan van der Heyden, Cornelis Springer), von Online-Datenbanken (z.B. <http://www.fotografie-architektur.de/index.html>) sowie von weiteren digitalen 3D-Rekonstruktionen norddeutscher und niederländischer Architektur gesammelt. Archivmaterial, darunter alte Stadtpläne und Ansichten aus der Stadt des 16. und 17. Jahrhunderts, lieferte das Museum Schwedenspeicher (Abb. 5). Die Museumsausstellung selbst liefert zudem wertvolle Zusatzinformationen zu den architektonischen Stilen, die im 17. Jahrhundert in Stade präsent waren.

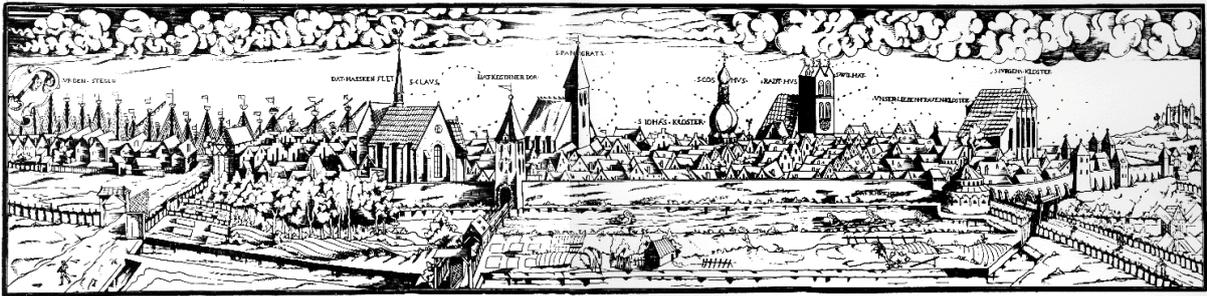


Abb. 5: Blick auf die Stadt Stade im Jahr 1550, nach einem Holzschnitt von Martin Weigel (Wirtgen & Bohmbach 1974)

Ein modularer Workflow wurde zur Modellierung der Stadthäuser und Verteidigungsstrukturen der Stadt (einschließlich der Mauern und der Verteidigungstürme) umgesetzt. Dieser Workflow beinhaltet die Zerlegung von Architekturobjekten in kleine, wiederholbare Elemente, die dann auf verschiedene Weise neu kombiniert werden können, um so mehrere Varianten von 3D-Modellen als Prototypen schnell zu erstellen. Nach der Modellierung der einzelnen Elemente können verschiedene Kombinationen für komplette Gebäude schnell getestet und fertig gestellt werden. Die Modellierung der oben aufgeführten Sondergebäude erfolgte individuell mit begrenzter Verwendung von verschiedenen Objektelementen, um die charakteristischen Besonderheiten dieser Gebäude herauszustellen. Nach und nach wurde jedes der detaillierten 3D-Modelle wieder in UE4 importiert, wobei die Modelle mit geringer Auflösung an den entsprechenden Stellen im Stadtmodell durch diese ersetzt wurden. Bei jedem Schritt der detaillierten Modellierung wurde darauf geachtet, dass die VR-Szene weiterhin die in der UE4-Dokumentation (<https://docs.unrealengine.com/en-US/Platforms/VR/DevelopVR/Profiling/Overview/index.html>) beschriebenen Performance-Benchmarks in Form von Frames per Second erfüllt.

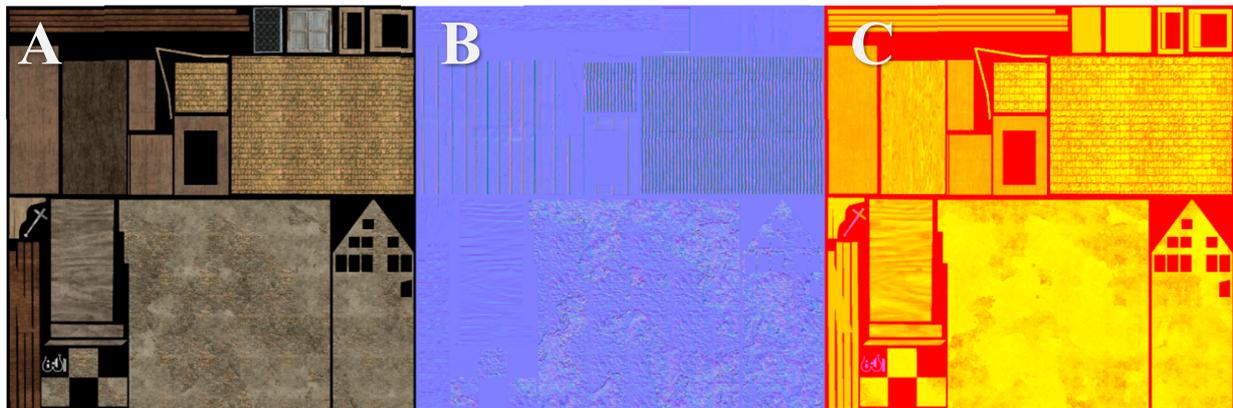


Abb. 6: Texturatlanen für ein Stadthaus: (A) Diffuse Map mit den Farbinformationen der Texturen; (B) Normal Map für den Tiefeneffekt; (C) Ambient Occlusion Map für die Umgebungsverdeckung, Metallic Map für glänzende metallische Objekte und Roughness Map für die Steuerung der Schärfe der Reflexionen

Nachdem die detaillierten 3D-Modelle in die Szene integriert worden waren, wurden die Modellflächen in Maya auf eine 2D-Bildfläche projiziert und in Substance Painter, einer Texturierungssoftware für 3D-Objekte, strukturiert. Substance Painter ermöglicht die Kombination von Bildtex-turen und prozeduralen Designalgorithmen, um komplexere Texturen zu erstellen. Alle Texturen wurden für jedes Objekt in 4K-Texturatlanen zusammengefasst, um die Effizienz für die Renderzeit innerhalb der UE4 zu erhöhen. In den Texturatlanen sind folgende Informationen enthalten: Diffuse Map mit den Farbinformationen der Texturen (Abb. 6a), Normal Map für den Tiefeneffekt (Abb. 6b), Ambient Occlusion Map für die Umgebungsverdeckung, Roughness Map für die Steuerung der Schärfe der Reflexionen und Metallic Map für glänzende metallische Objekte (hier alle in einem Texturatlas zusammengefasst – Abb. 6c). Jedes Architekturmodell in der Szene erhielt ein Material (in UE4 wird ein Material verwendet, um sich auf die Kombination von 2D-Texturen und die Abfolge von Operationen zu beziehen, die der Game-Engine sagen, wie die Texturen dargestellt werden sollen), einschließlich der drei oben gezeigten Texturatlanen (Abb. 6). In Bereichen, in denen wiederholte Texturen offensichtlich vorlagen, wurden mehrere Texturen übereinandergelegt (Vertex Painting), um eine zusätzliche Variationsebene hinzuzufügen und um die Umgebung realistisch darzustellen. Für jedes Mesh wurden vier Level of Detail (LOD)-Modelle mit den entsprechenden UE4-Funktionen generiert, um die Computerperformance (Prozessorleistung) anzupassen, indem die Anzahl der Dreiecke in den Modellen reduziert wurde, die sich in einem bestimmten Bereich weiter entfernt von der Kamera befinden. Abb. 7 zeigt vier verschiedene Ansichten der Stadt Stade in der VR-Applikation, die mit dem Unreal-Editor erstellt wurden und die die Qualität der Modellierung und Texturierung der verschiedenen Stadtlandschaften zeigen.

Die ursprüngliche Landschaft in der 4K-Auflösung, die für die Platzierung der 3D-Modelle mit wenig Polygonen in der Szene verwendet wurde, wurde durch eine Landschaft mit geringerer 2K-Auflösung als endgültige Szene ersetzt, um die Geschwindigkeit für das Rendering zu erhöhen. Diese Landschaft wurde manuell mit dem UE4-Landscape-Editor bemalt bzw. texturiert, um so die Straßen, Wege und freien Vegetationsflächen zu gestalten. Zusätzlich wurden Pflanzen, darunter Laubbäume und Wiesengräser, ebenfalls manuell mit dem UE4-Editor Laubwerk in die Landschaft integriert. Eine zweite, niedrigpolare Landschaft wurde mit SRTM 1-Bogen-Sekunden-DEM-Daten erstellt, um der Stadt als niedrigpolare Kulisse zu dienen.

Um die Effizienz für das Rendering zu verbessern, wurde die Beleuchtung innerhalb der Engine in Vorberechnungen durchgeführt („Light Baking“) und sogenannte Lightmaps erstellt. Informationen über Licht- und Schattenverteilung auf einer Textur können somit schnell abgerufen werden und müssen nicht in Echtzeit berechnet werden, was die Rechenauslastung der Engine durch das Echtzeit-Rendering reduziert.

Schließlich wurde der Navigationsbereich in der virtuellen Umgebung erstellt, in dem sich der Anwender bewegen darf. Dazu wurden die grundlegende Bewegungssteuerung und Interaktionen über die knotenbasierte Programmierschnittstelle in UE4 durch Blueprints programmiert. Durch eine einfache Point-and-Click-Funktion am HTC Vive-Controller ist der Besucher dann in der Lage, sich durch Teleportation in der virtuellen Stadt selbstbestimmt fortzubewegen (Abb. 8).

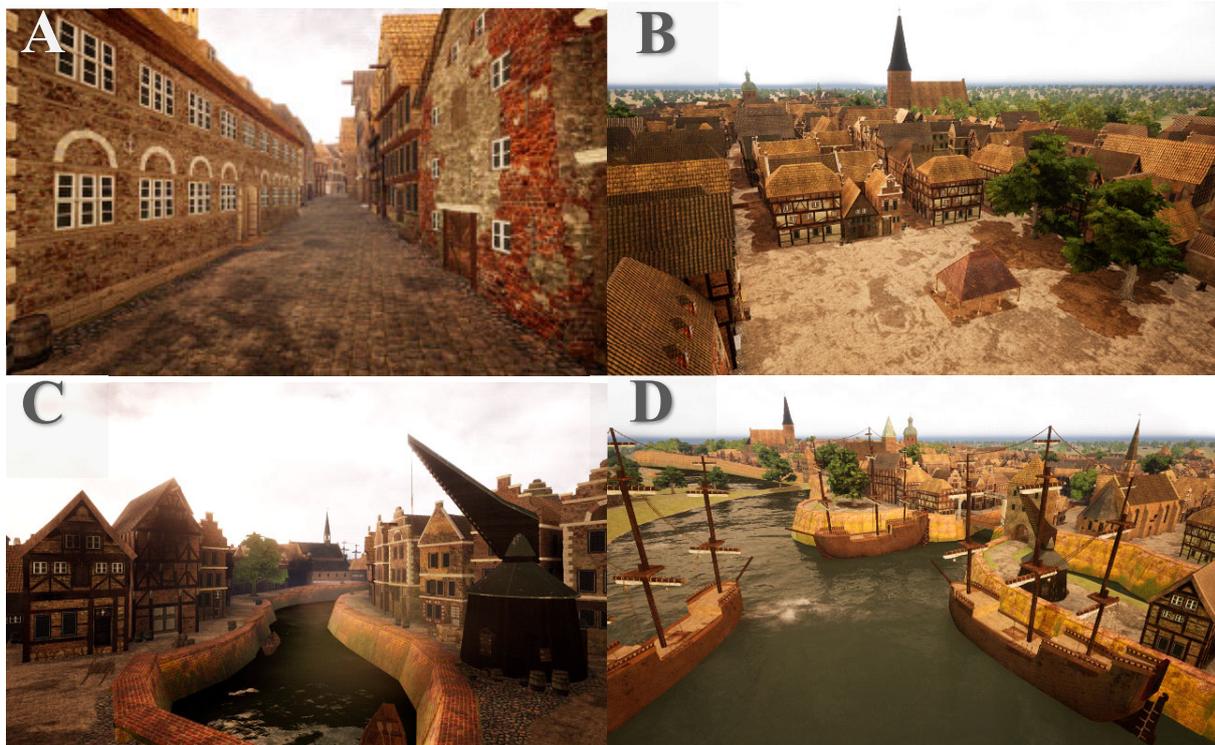


Abb. 7: Ansichten des aktuellen Zustands der virtuellen Umgebung: (A) Blick in die Hökerstraße mit Rathaus auf der linken Seite; (B) Stadtsilhouette mit Platz am Sande im Vordergrund; (C) Stader Hafen mit Ladekran; (D) Stadtsilhouette mit Schiffen (Blickrichtung Südosten)

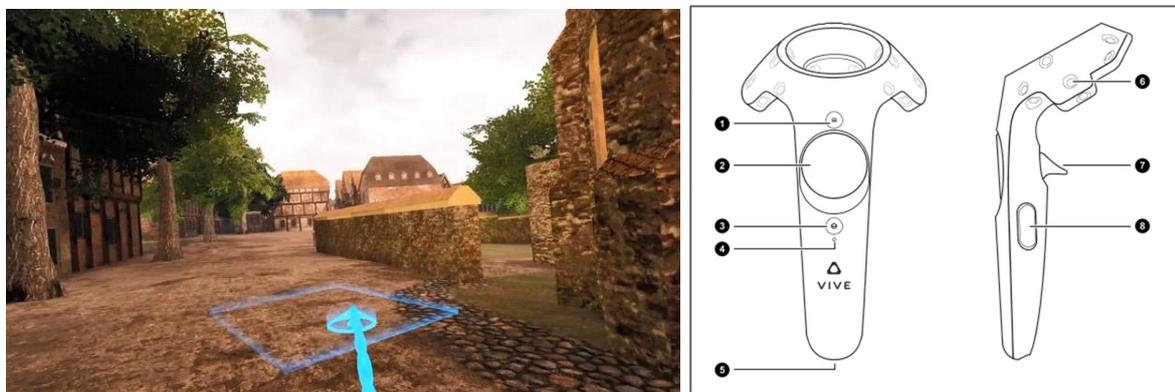


Abb. 8: Teleportation in der VR-Applikation durch Point-and-Click-Funktion am Controller (links) und programmierbare Tasten an den Controllern (rechts)

Nachdem die Grundlagen für die Visualisierung und Interaktionen gelegt wurden, bestand der nächste Schritt in diesem Projekt darin, Interaktionen zu entwickeln, mit denen Wissen spielerisch (Serious Games) und durch Animationen vermittelt werden kann, um in einer immersiven und interaktiven Welt Bildungsaspekte in das virtuelle Stadtmodell einzubringen. Ein Aspekt, der derzeit in der Erprobung ist, ist die Integration von 360°-Panorama-Fotos der heutigen Stadt Stade in die VR-Applikation, die in der virtuellen Realität durch Betreten einer Kreismarkierung an bestimmten Orten der Stadt und Klicken einer dafür vorgesehenen Taste am Controller zu betrachten

sind. Dieses Nebeneinander von historischer und heutiger Stadt lädt den Nutzer ein, die unterschiedlichen Stadtansichten direkt zu vergleichen und so die historischen Szenarien, die die Stadt prägten, zu erforschen.

Um diese Funktion zu testen, wurden am 9. September 2019 an verschiedenen Orten in der Stadt insgesamt acht 360°-Panoramafotos mit einer Kamera Samsung Gear 360 aufgenommen (Abb. 9 links). Um die Aufnahmeposition zu bestimmen, wurde die Gear 360 mit einem Smartphone verbunden, um so die GPS-Koordinaten als Geo-Tag zu erhalten. Damit wurde die spätere Platzierung der Panoramen in der virtuellen Umgebung erleichtert. Aus den Fotos wurde mit der Samsung Gear App für iOS je Standpunkt ein Panorama erzeugt und in UE4 importiert. Diese Panoramen wurden dann als Texturen auf die Innenseite von acht Hohlkugeln projiziert und an entsprechender Stelle in der Umgebung platziert. An jeder dieser Positionen wurde auch eine 3D-Animation (in diesem Fall ein animierter Kreis am Boden) platziert, der dazu dient, den Benutzer auf das Gebiet aufmerksam zu machen und ein verfügbares Panorama anzuzeigen (Abb. 9 rechts).



Abb. 9: 360°-Panoramafoto im Stader Hafen (links oben) und vom Stader Rathaus (links unten) mit der jeweiligen kreisförmigen 3D-Animation (rechts), als Information für den VR-Besucher über ein verfügbares Panoramafoto vom selben Ort zum Vergleich mit der heutigen Zeit

Die interaktiven Elemente dieser Funktion wurden mit Hilfe der visuellen UE4-Programmierschnittstelle als Blueprint implementiert. Sobald Benutzer den inneren Bereich des virtuellen Kreises betreten und anschließend die Trigger-Taste am Controller drücken (Nr. 7 in Abb. 8 rechts), wird auf das heutige Panorama umgeschaltet. Der Betrachter befindet sich dann in der 360°-Panoramakugel, die durch erneutes Drücken der Taste verlassen werden kann und anschließend wieder ausgeblendet wird. Zukünftig werden diese Panoramafotos, die nur zu Testzwecken aufgenommen und implementiert wurden, durch Panoramas mit höherer Auflösung ersetzt und ergänzt.

Darüber hinaus ist eine Reihe von Erweiterungen geplant, deren Umsetzung bereits in Zusammenarbeit mit der Stadt Stade begonnen hat:

- Integration von geschichtlich-korrekten Schiffen im Hafen und vor der Stadt
- Entwicklung eines in der VR-Applikation integrierten Tutorials zur Einweisung in die VR-Anwendung
- Integration einer Übersichtskarte von der Stadt (Abb. 10) mit der aktuellen Positionsanzeige des Anwenders zur besseren Orientierung innerhalb des Modells
- Integration von (aktuellen und/oder historischen) Straßennamen zur besseren der Orientierung
- Integration von Informationstafeln mit Text und Fotos für entsprechende Sehenswürdigkeiten bzw. Gebäude/Objekte
- Integration von Personen und Tieren (z.B. Pferde, Kühe, Schweine, Hühner, etc.) ggf. mit Audio sowie weitere Objekte (z.B. bewegliche Kisten, Fässer, Kutschen, etc.)
- Integration von Videos und/oder Hörtexten (MP3)
- Virtuell geführte Touren zu bestimmten Sehenswürdigkeiten des Stadtmodells als Stadtrundgang oder -führung
- Entwicklung eines Serious Games zur Entdeckung und Erkundung der Stadt in der Frühen Neuzeit (z.B. Handwerkerberufe, geschichtliche Aspekte zum 30-jährigen Krieg, etc.)



Abb. 10: Übersichtskarte der Stadt Stade im Jahr 1620 (als zukünftige Navigationshilfe für den Anwender)

8 Fazit & Ausblick

Die entwickelte VR-Applikation Stade 1620 wird im Jahr 2020 zum 400-jährigen Jubiläum der Stadtansicht mit der HTC Vive Pro als Head Mounted Display im Museum Schwedenspeicher in Stade integriert und auf der Plattform SteamVR für Präsentationen im Museum laufen. Mit diesem Projekt konnte ein Workflow entwickelt werden, der eine detailgetreue Visualisierung virtueller Stadtmodelle ermöglicht. Der hohe Detaillierungsgrad ist einerseits entscheidend für die Immersion sowie für eine hochauflösende Visualisierung und realistische Wiedergabe der virtuellen Umgebung, aber andererseits beansprucht die Modellierungs- und Texturierungsphase einen hohen zeitlichen Arbeitsaufwand. Für die erste Phase des Projektes bis zur Erstellung der ersten Version der VR-Applikation sind rund 450 Arbeitsstunden eingeflossen, von denen 275 Stunden für die detaillierte 3D-Modellierung und Texturierung verwendet wurden. Ein besonderer Fokus lag auf der manuellen Modellierung der individuellen Architektur-Objekte, um die Vielfalt in der räumlichen Stadtstruktur, die 1620 in der historischen Stadt Stade zu finden waren, besser wiederzugeben.

Darüber hinaus wurde wegen des hohen Detaillierungsgrades in der virtuellen Umgebung laufend die Prozessorleistung mit der eingesetzten Hard- und Software überprüft. Epic Games empfiehlt für UE4 eine Bildfolge rate von 90 Frames per Second (FPS) für das Rendering in Echtzeit für die HTC Vive Pro und SteamVR, um dem Benutzer beim Tragen der VR-Brille keine Unannehmlichkeiten (z.B. Motion Sickness) durch Latenzen zu bereiten. Eine hohe Bildrate für VR-Anwendungen ist sehr wichtig, um eine angenehme VR-Visualisierung ohne Latenz für die Benutzer zu ermöglichen. Animationen, Interaktionen und dynamische Elemente in der virtuellen Umgebung erhöhen die Prozessorleistung und reduzieren die Bildfolge rate, so dass die Nachführung der Bildsequenzen nicht flüssig genug ist und nicht zu den eigenen Kopfbewegungen passt. Dieser Effekt kann zum Unwohlsein des Betrachters führen. Um eine hohe Bildrate zu erreichen, wurden die Gebäudetexturen auf einen einzigen Texturatlas pro Gebäude mit 4K-Auflösung beschränkt, vier LoD-Modelle für jedes Mesh generiert und die Umgebung so gestaltet, dass die Anzahl der sichtbaren Gebäude in einem einzigen Frame reduziert wird. Dieser Workflow wird in Zukunft für ähnliche Projekte wieder angewendet, optimiert und weiterentwickelt.

9 Dank

Die Autoren danken dem Museum Schwedenspeicher in Stade, insbesondere Dr. Sebastian Möllers, sowie der Stadt Stade, insbesondere Dr. Andreas Schäfer, für ihre Unterstützung bei der Entwicklung der VR-Applikation Stade 1620. Darüber hinaus möchten die Autoren die finanzielle Unterstützung der Nico-Rüpke-Stiftung in Hamburg würdigen.

10 Literaturverzeichnis

- CHEVRIER, C., JACQUOT, K. & PERRIN, J.P., 2010: 3D Modelling of a Town Scale Model. EuroMed2010, 3rd International Conference dedicated on Digital Heritage, Short Papers, 99-107, Archaeolingua, Budapest.
- EDLER, D., HUSAR, A., KEIL, J., VETTER, M. & DICKMANN, F., 2018: Virtual Reality (VR) and Open Source Software: A Workflow for Constructing an Interactive Cartographic VR Environment to Explore Urban Landscapes. *Kartographische Nachrichten – Journal of Cartography and Geographic Information*, **68**(1), Bonn, Kirschbaum Verlag, 5-13.
- 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. *Kartographische Nachrichten – Journal of Cartography and Geographic Information*, **69**(4), Bonn, Kirschbaum Verlag, 267-284.
- GAMESPARKS, 2019: Game Engine Analysis. <https://www.gamesparks.com/blog/game-engine-analysis/>, letzter Zugriff 21. Oktober 2019.
- HOLOPAINEN, J. & BJÖRK, S., 2005: *Patterns in Game Design*. Charles River Media Inc., Hingham, Massachusetts.
- JEDRZEJAS, T. & PRZYBILLA, H.-J., 2009: Aufbau historischer 3D-Szenarien am Beispiel der mittelalterlichen Stadt Duisburg. *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, (3), 195-204.
- KELLER, F., SÄNGER, J., KERSTEN, T. & SCHIEWE, J., 2011: Historisches 4D-Stadtmodell der Freien und Hansestadt Hamburg - Automatisierte Generierung und Darstellung innerhalb der Google Earth Engine. *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, (3), 155-169.
- 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. & HINRICHSSEN, N., 2018a: Segeberg 1600 - Eine Stadtrekonstruktion in Virtual Reality. *Kartographische Nachrichten*, **68**(4), 183-191.
- KERSTEN, T., TSCHIRSCHWITZ, F., LINDSTAEDT, M. & DEGGIM, S., 2018b: 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>.
- NEBIKER, S. & BARMETTLER, A., FISCHER, B., WEBER, E., 2009: Vom physikalischen Stadtmodell zum historischen 3D-GIS - Anforderungen und Lösungsansätze am Beispiel des historischen Solothurns. *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, (3), 205-219.
- PAINTER, L., 2015: Hands on with HTC Vive virtual reality headset. <http://www.pcadvisor.co.uk/feature/gadget/hands-on-with-htc-vive-virtual-reality-headset-experience-2015-3631768/>, letzter Zugriff 21.10.2019.

- PFEIFFER, M., CARRÉ, C., DELFOSSE, V., HALLOT, P. & BILLEN, R., 2013: Virtual Leodium: From an Historical 3D City Scale Model to an Archaeological Information System. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **II-5/W1**, 241–246, <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-241-2013>.
- SEDLACEK, D. & ZARA, J., 2009: Graph Cut Based Point-Cloud Segmentation for Polygonal Reconstruction. *Lecture Notes in Computer Science* 5876, 218-227, SpringerLink, https://doi.org/10.1007/978-3-642-10520-3_20.
- THOMPSON, E. M., HORNE, M. & FLEMING, D., 2006: Virtual Reality Urban Modelling - an Overview. *CONVR2006: 6th Conference of Construction Applications of Virtual Reality*, 3-4 August 2006, Florida, USA.
- 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 – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, **87**(1-2), 47-56.
- WARMOES, I., 2018: Le musée des Plans-reliefs. Diversité des collections (1668-1940) et enjeux contemporains. *Artefact* 7, 223-230.
- WIRTGEN, B. & BOHMBACH, J., 1974: Blick auf Stade. Ansichten und Pläne aus sieben Jahrhunderten. *Stadt-Sparkasse Stade*.