

Bachelorarbeit

im Studiengang Medieninformatik

**Thema: Kuratorische und technische Anforderungsanalyse für museale
Augmented-Reality-Anwendungen**

eingereicht von: Lukas André Suthe
Matrikelnummer: 44439

eingereicht am: 7. April 2021

betreut durch: Prof. Dr. Marco Block-Berlitz
Dr. phil. Hendrik Rohland

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Einleitung	1
2	Theorie und verwandte Arbeiten	3
2.1	Forschungsgegenstand Augmented-Reality	3
2.1.1	Technologie	5
2.1.2	3D-Modelle für den AR-Einsatz	10
2.1.3	AR-Anwendungs-Entwicklung	11
2.2	Forschungsgegenstand Museen	12
2.2.1	Herausforderungen	13
2.2.2	Digitaler Wandel	13
2.3	UNESCO-Weltkulturerbe Orchontal	14
3	Museen als Anwendungsbereich für AR	19
3.1	AR als Mittel des digitalen Wandels	19
3.2	Kuratorische Sichtweise und Anforderungen	20
3.2.1	Ausstellungsgestaltung mit AR	20
3.2.2	Wissensvermittlung	22
3.2.3	3D-Rekonstruktionen	23
3.3	Technische Faktoren und Anforderungen	24
3.3.1	Wahl der AR-Gerätestrategie	24
3.3.2	Wahl des Trackingverfahrens	28
3.3.3	Ortsbezogene Faktoren	30
3.3.4	Beleuchtungskonzepte	31
4	AR-Anwendung Kharakhorum Museum	34
4.1	Grundkonzept	34
4.2	Anwendungsfall “Die große Halle”	35
4.3	Anwendungsfall “Schildkröte und Inschriftenstele”	36
4.4	Weitere Anwendungsmöglichkeit und Aussicht	38
5	Experimente und Auswertungen	40
6	Zusammenfassung und Ausblick	44

1 Motivation und Einleitung

Augmented-Reality (AR, deutsch: erweiterte Realität) wurde zunächst für einige wenige Bereiche wie für das Militär und die Industrie entwickelt. Heute weiten sich die Anwendungsgebiete für AR auf viele weitere Bereiche des gesellschaftlichen Lebens aus.

Museen entdecken zunehmend die Möglichkeiten von AR, um ihren Bildungsauftrag im Zeitalter des digitalen Wandels zeitgemäß zu erfüllen. Für Museen stehen neben den traditionellen analogen Vermittlungsformaten nun auch neue digitale Medien zur Verfügung, zu denen AR gezählt wird. Vor allem digital geprägte Generationen sind den Umgang mit digitalen Medien für die Gewinnung von Informationen gewohnt. Deshalb wird AR neben den traditionellen Schautafeln und Texten als unterstützendes Mittel gesehen, Museen als wichtigen, attraktiven Bildungsort zu gestalten und damit zu erhalten.

Für den Kurator entstehen durch AR neue interessante Möglichkeiten, bestehende oder neue Ausstellungen mit AR-Szenarien zu bereichern. Gleichzeitig stellt die richtige, der Museologie dienenden Anwendung von AR eine Herausforderung für den Kurator dar. Er muss die vielfältigen technischen Möglichkeiten und Grenzen von AR erfassen, um mit seiner fachlichen Expertise entscheiden zu können, welche Objekte und Szenarien sich in der Ausstellung für eine AR-Anwendung eignen bzw. an welcher Stelle AR sinnvoll unterstützend eingesetzt werden kann, um Wissen zu vermitteln.

Die Wissensvermittlung durch digitale Anwendungen sollte zugleich als sensibles Thema in der musealen Bildung behandelt werden. Es gilt einen Ausgleich zwischen wertvoller Wissensvermittlung und reiner Unterhaltung zu schaffen, weshalb der Einsatz von AR unter kuratorischen Gesichtspunkten auch kritisch zu betrachten ist.

Insgesamt gesehen ergeben sich für museale AR-Anwendungen vielschichtige Sichtweisen, die Museen analysieren und bewerten müssen. Entscheidungskriterien sollten definiert werden, anhand derer über den Einsatz von AR-Anwendungen entschieden werden kann. Diese Arbeit liefert Museen eine Hilfestellung und gibt Impulse für die fachliche Auseinandersetzung mit dem Thema AR unter musealen Aspekten. Es werden mögliche Entscheidungskriterien diskutiert, die für Museen berücksichtigt werden können. Da sich die Technik für AR-Anwendungen stetig weiterentwickelt und sehr vielfältig ist, wird in dieser Arbeit nur ein aktueller Ausschnitt aus den technischen Möglichkeiten gezeigt, die im Kontext „Anwendungsbereich Museum“ bedeutend sind. Es werden die wesentlichen Aspekte einer kuratorischen und technischen Anforderungsanalyse für museale AR-Anwendungen benannt.

In Kapitel 2 werden grundlegende Fachbegriffe und Theorien zu den Forschungsgegenständen AR und Museen erklärt, die zum weiteren Verständnis der Arbeit beitragen. Zudem wird

1 Motivation und Einleitung

das UNESCO-Weltkulturerbe Orchontal vorgestellt, das die Grundlage für die praxisnahe Betrachtung von AR-Anwendungen in Kapitel 4 und 5 bildet. Kapitel 3 wendet sich einer Anforderungsanalyse unter kuratorischen und technischen Aspekten zu. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass für jedes Museum eine eigene Analyse erstellt werden muss. Jedoch werden Grundüberlegungen zur Benennung kuratorischer Anforderungen beschrieben, die mögliche Entscheidungskriterien liefern. Ebenso verhält es sich mit der technischen Anforderungsanalyse, die ebenfalls für jede Anwendung individuell erstellt werden muss, aber auch für jedes Museum technische Grundüberlegungen beinhaltet. Diese beziehen sich auf die Aspekte AR-System, Trackingverfahren und ortsbezogene Faktoren des musealen Einsatzortes.

Die Erkenntnisse aus der aufgestellten Anforderungsanalyse unterstützen in Kapitel 4 die exemplarische Bewertung von AR-Anwendungsfällen im UNESCO-Weltkulturerbe Orchontal in der Mongolei. Diese Bewertung berücksichtigt nur speziell AR-bezogene Aspekte. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse aus dieser Bewertung für eine experimentelle Umsetzung eines Anwendungsfalls genutzt. Hierbei geht es nicht um die vollständig technische Umsetzung der AR-Anwendung, sondern darum, die in Kapitel 4 analysierte Herangehensweise zu prüfen.

2 Theorie und verwandte Arbeiten

Damit eine kuratorische und technische Anforderungsanalyse von AR-Anwendungen aufgestellt werden kann, bedarf es grundlegender Informationen, die in diesem Kapitel unter den Themen Forschungsgegenstand AR (Kap. 2.1) und Forschungsgegenstand Museen (Kap. 2.2) dargestellt werden. Anschließend erfolgt in Kapitel 2.3 ein kurzer Überblick über die historische und kulturelle Bedeutung des Orchontals, um einerseits die kuratorische Relevanz einer möglichen AR-Anwendung für das im selben Tal liegende Kharakhorum Museum (siehe Kap. 4) zu verdeutlichen und um andererseits die dort befindlichen Denkmäler zu beschreiben, für die in dieser Arbeit mögliche AR-Konzepte aufgestellt werden.

2.1 Forschungsgegenstand Augmented-Reality

Darstellungen der Realität können mithilfe computergestützter Technologien virtuell ersetzt oder ergänzt werden. Augmented-Reality gehört ebenso wie Virtual-Reality (VR, deutsch: virtuelle Realität) zu diesen Technologien, die zunehmend Einzug in unsere Gesellschaft finden. Sie sind Teil einer größeren Gruppe von Begriffen, die verschiedene Formen von computervermittelten, synthetischen oder hauptsächlich teil-synthetischen Realitäten beschreiben.

AR lässt sich gut im Vergleich zu VR beschreiben. Ein wichtiger Unterschied zwischen beiden Technologien ist die Art der Darstellung der realen Welt. Während der Nutzer bei VR diese nicht mehr optisch wahrnimmt, kann er bei AR die reale Welt noch sehen, zusätzlich erhält er virtuelle Inhalte und Informationen.

Virtual-Reality ist ein Computerinterface, das den Nutzer, meistens mittels eines Head-Mounted-Displays (HMD), eine vollständig computererzeugte Umgebung in Echtzeit wahrnehmen lässt. Die Wahrnehmung kann hierbei visuell, auditiv, taktil, olfaktorisch und gustatorisch sein (Burdea 2003). Nach den „Three I’s of virtual reality“ von Burdea (2003) ist VR zudem interaktiv, immersiv und hängt stark von der menschlichen Vorstellungskraft (*imagination*) ab. Durch Steuer (1992) wird eine Virtuelle-Realität als eine reale oder simulierte Umwelt, in welcher ein Wahrnehmer Telepräsenz erlebt, definiert. Telepräsenz beschreibt darin das Erleben von Anwesenheit in einer Umgebung mithilfe eines Übertragungsmediums (Steuer 1992).

Augmented-Reality hingegen versucht nicht wie VR eine vollständig simulierte Welt zu erzeugen, auch wenn einige der zu VR genannten Aspekte ebenfalls auf AR zutreffen. Ein AR-System verfügt nach Azuma (1997) über drei Charakteristiken:

1. Es kombiniert Realität und Virtualität,
2. es ist interaktiv in Echtzeit und

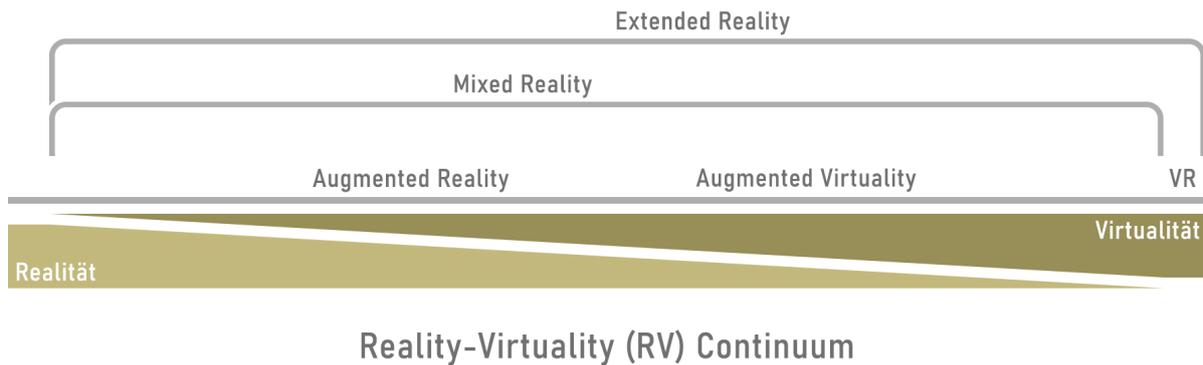


Abbildung 2.1: Eine vereinfachte Abbildung eines Reality-Virtuality-Continuum nach Milgram, Takemura u. a. (1995). ER wurde dem Kontinuum zur Veranschaulichung aller hier besprochenen Realitäts-Begriffe hinzugefügt, war aber ursprünglich kein Bestandteil dessen.

3. es ist in drei Dimensionen registriert.

Dadurch kann AR zu anderen Technologien abgegrenzt werden. Die Wahrnehmung der Realität beschreibt er im nachfolgend hervorgehobenen Zitat.

„AR allows the user to see the real world, with virtual objects superimposed upon or composited with the real world. Therefore, AR supplements reality, rather than completely replacing it. Ideally, it would appear to the user that the virtual and real objects coexisted in the same space“ (Azuma 1997).

Wichtigster Unterschied zwischen AR und VR ist nach Azuma (1997) demnach, dass AR die reale Welt, die der Nutzer weiterhin sehen kann, nicht vollständig ersetzt, sondern nur durch virtuelle Objekte ergänzt. Milgram, Takemura u. a. (1995) vergleichen die beiden Konzepte anhand eines Reality-Virtuality-Continuum (siehe Abb. 2.1), wessen Extrema auf der linken Seite eine aus ausschließlich realen Objekten und auf der rechten Seite eine aus ausschließlich virtuellen Objekten bestehende Umgebung kennzeichnen. Alle dazwischen liegenden Umgebungen, die somit reale und virtuelle Objekte gemeinsam innerhalb einer Darstellung präsentieren, werden als Mixed-Reality (MR) zusammengefasst (Milgram, Takemura u. a. 1995).

Neben VR, was das rechte Extremum darstellt und AR, was auf der linken Seite des Kontinuums eingeordnet ist, wird außerdem von Augmented-Virtuality (AV) gesprochen, wo einer hauptsächlich virtuellen Welt reale Objekte zugefügt werden (Milgram und Kishino 1994) und somit das Gegenteil zu AR bildet. Extended Reality (XR) ist ebenso wie MR als Oberbegriff zu sehen, bezieht aber anders als MR noch die VR mit ein und kann somit als Sammelbegriff für alle hier genannten Realitäten benutzt werden.

2.1.1 Technologie

Dieser Abschnitt verschafft einen Überblick über die grundlegenden Technologien für die Umsetzung von Augmented Reality. Dabei hat er keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden vornehmlich die für diese Arbeit relevanten und für den Anwendungsbereiche Museum und Freizeit meist genutzten Ansätze vorgestellt.

Nach Mark Billinghurst, Clark und Lee (2015) können die technischen Anforderungen eines AR-Systems anhand der drei von Azuma (1997) definierten AR-Charakteristiken (siehe Abschn. 2.1) bestimmt werden. Es bedarf

- eines Bildschirms, der reale und virtuelle Bilder kombiniert,
- eines Computersystems zur Generierung interaktiver Grafiken, die auf Benutzereingaben in Echtzeit reagieren und
- eines Trackingsystems, das die Position des Benutzerblickpunkts findet und die virtuellen Objekte in der realen Welt fixiert erscheinen lässt (Mark Billinghurst, Clark und Lee 2015).

Auch das erste AR-System, entwickelt 1968 von Ivan Sutherland (Sutherland 1968), kombinierte diese notwendigen Komponenten. Er entwickelte ein HMD mit Miniatur-Kathodenstrahlröhrenbildschirmen und einen an der Decke befestigten und mit dem Kopf verbundenen Positionssensor, der einem Computer die Position und Ausrichtung des Kopfes übermittelte (Sutherland 1968). War sein AR-System noch sehr prototypisch, teuer und stationär gebunden, vereinen heutige AR-fähige Geräte die drei Komponenten und sind zugleich handlich und leicht. Mittlerweile sind fast alle Smartphones und im Grunde jedes einigermaßen leistungsstarke Handheld-Gerät mit integrierten, diversen Sensoren als ein AR-System nutzbar und somit die Technologie für jeden erreichbar bzw. erschwinglich. Da mobile Geräte alle drei Komponenten vereinen, unterscheiden sich AR-Systeme im Wesentlichen in der Wahl des AR-Gerätes und des Trackingverfahrens, das sich der vorhandenen Sensoren als Trackingsystem bedient. Diese Unterscheidungen werden im Folgenden kurz erläutert.

AR-Bildschirme

AR-fähige mobile Geräte, oder genauer deren Komponente Bildschirm, können laut Milgram, Takemura u. a. (1995) in

- See-Through AR-Bildschirme, die wiederum optisch (Optical-See-Through – OST) oder videobasiert (Video-See-Through – VST) sind, und
- in Monitor-based AR-Bildschirme unterteilt werden.

Optical-See-Through AR-Displays (OST-AR) sind HMDs, mit welchen die unmittelbare Umgebung durch einen transparenten Bildschirm weiterhin gesehen werden kann (Milgram, Takemura u. a. 1995). Dabei werden die virtuellen Inhalte über verschiedene optische Elemente,



Abbildung 2.2: Beispiele von OST-HMDs: Die Magic Leap 1 (<https://www.magicleap.com/en-us/magic-leap-1>) und die HoloLens 2 von Microsoft.

wie Lichtleitern in das Blickfeld des Benutzers eingebettet. Ein bekanntes Beispiel für OST-AR ist die HoloLens von Microsoft, die mit durchsichtigen holografischen Linsen arbeitet¹ (siehe Abb. 2.2).

Werden statt optischer Elemente ein Bildschirm und in das HMD integrierte Kameras verwendet, so spricht man von Video-See-Through AR-Displays (VST-AR). Ein durch die Kameras aufgezeichneter Live-Videostream der umliegenden Realität wird hierbei zusammen mit den zu augmentierenden Inhalten auf dem Bildschirm vor den Augen des Nutzers wiedergegeben.

Bei Monitor-based-AR erfolgt im Gegensatz zu See-Through-AR die Ausgabe nicht über HMDs oder AR-Brillen, sondern hauptsächlich über Handheld-Geräte. Handheld-Geräte wie Smartphones und Tablets verfügen über alle Komponenten eines AR-Systems und sind heute das am meisten verwendete Display für AR-Anwendungen. Lässt sich AR mit OST-HMDs und VST-HMDs am immersivsten wahrnehmen, so ist die Immersion bei Monitor-based AR deutlich geringer und kann nie vollständig erreicht werden. Grund dafür ist das dort nicht konstant bleibende Positionsverhältnis von Kamera und Betrachter (Dörner u. a. 2019), wenn dieser seinen Kopf oder sein Handheldgerät während der AR-Erfahrung bewegt. Auch ersetzt ein solches Display, anders als bei fest über den Augen sitzenden HMDs, häufig nur einen kleinen Teil des Gesichtsfeldes, wodurch es durch bloßes Bewegen der Augen möglich wird, schnell zwischen realem und augmentiertem Gesichtsfeld zu wechseln, was den Grad der Immersion ebenfalls sinken lässt.

Neben den von Milgram, Takemura u. a. (1995) kategorisierten, mobilen AR-Bildschirmen gibt es immobile Bildschirme, wie Spatial-AR. Spatial-AR kann eine Form von OST-AR sein, bei dem ein transparenter Bildschirm wichtigster Bestandteil ist. Dieser kann entweder lichtemittierende Elemente besitzen oder als Projektionsfläche dienen und so die hinter dem Bildschirm liegenden realen Objekte mit virtuellen Überlagerungen ergänzen (Bimber und Raskar 2005).

Trackingsysteme

Als weitere Komponente eines AR-Systems sorgt das Trackingsystem für die Verortung der virtuellen Objekte in der realen Welt. Dabei werden über Ankerpunkte in der realen Welt in

¹<https://www.microsoft.com/de-de/hololens> [zuletzt aufgerufen am 07.02.2021]

einer initialen Registrierungsphase die Position und Orientierung der Kamera oder der Augen des Betrachters bestimmt und diese in einer weiterführenden Trackingphase laufend aktualisiert. Die Anker variieren hier je nach eingesetztem Trackingsystem, das auf verschiedenen Technologien beruhen kann. Am häufigsten kommen positionsbasierte und optische Trackingverfahren zum Einsatz, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Positionsbasierte Trackingverfahren nutzen die Signale globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS) wie z. B. GPS, GLONASS oder GALILEO als Anker zur Positionsbestimmung des AR-Systems. Anhand der GNSS-Koordinaten, die dem AR-System bekannt sind, können anschließend die virtuellen Objekte in Bezug zur Kamera oder der Augen platziert werden. Positionsbasiertes Tracking ist vornehmlich für mobile Anwendungen in weitläufigen Außenbereichen konzipiert, da die zur Positionsbestimmung nötige Verbindung zu mindestens vier Satelliten in Gebäuden teilweise nicht gegeben ist. Dies kann aber auch bei ungünstiger Topografie, in Wäldern oder in Städten der Fall sein. Die Genauigkeit bei reiner GNSS-Ortung liegt bei zwei bis dreizehn Metern, kann jedoch durch Differential GPS (DGPS), Satellite-based Augmentation Systems (SBAS), Assisted-GPS (A-GPS) oder WLAN-Ortung verbessert werden. Trotzdem ist die entstehende Abweichung für viele AR-Anwendungen zu hoch. Für die fehlende Lagebestimmung und genauere Positionsbestimmung eines AR-Systems werden die Daten weiterer Sensoren, wie Gyroskop, Magnetometer, Barometer oder Akzelerometer ausgewertet. Die aufgelisteten Sensoren sind standardmäßig in modernen Smartphones verbaut.

Bei **optischen Trackingverfahren** wird die reale Umgebung durch optische Sensoren (z. B. Infrarotkameras, Tiefensensoren, RGB-Kameras) erfasst, und die erhaltenen Daten werden mit Computer-Vision-Algorithmen analysiert. In der realen Umgebung befindliche, als Anker für die virtuellen Inhalte dienenden Objekte werden so als solche identifiziert. Durch die breite Nutzung von Smartphones und Tablets als AR-Systeme, ist die in diesen Geräten verbauten RGB-Kamera ein weit verbreiteter und sehr flexibel einsetzbarer optischer Sensor. Das Tracking verläuft entweder markerbasiert oder markerlos.

Bei **markerbasierten optischen Trackingverfahren** dienen in der realen Umgebung platzierte, vordefinierte und für die Kamera leicht erkennbare Marker als Anker zur Positions- und Orientierungsbestimmung. Als häufig genutzte Marker-Kategorie seien hier quadratische Schwarzweißmarken mit eindeutig erkennbaren Kanten und Ecken genannt, bei denen sich mit den im Videostream extrahierten Positionen der vier Eckpunkte die Position und Orientierung der Kamera im Verhältnis zur Marke berechnen lassen. Diese kommen beispielsweise im ARToolKit von Kato und Billinghurst vor (Kato und M. Billinghurst 1999). Nachteilig ist bei diesem leicht umsetzbaren Tracking die ständige Sichtbarkeit der Marker, die sich selten harmonisch in die Umgebung einfügen und die Immersion des Nutzers verringern. Zudem kann auch das Anbringen von Marken in der Umwelt nicht möglich oder nicht angemessen sein.

Markerlose, modell-basierte Trackingverfahren sind in der Lage diese Nachteile zu umgehen. Filmt die Kamera eines AR-Systems ihre Umgebung, erkennen für Echtzeitanwendungen geeignete *natural feature detection and description* Algorithmen wie SURF (Bay, Tuytelaars und Gool 2006), ORB (Rublee u. a. 2011) oder BRISK (Leutenegger, Chli und Siegwart 2011) besondere Merkmale in den von der Kamera aufgenommenen Bildern und beschreiben sie mit Deskriptoren. Zugleich liegen dem AR-System 2D- oder 3D-Modelle von realen, größenbe-

kannten Objekten in der Umgebung vor, die als Anker dienen und zu denen die detektierten Merkmale, zumeist nach Durchlaufen eines RANSAC-Verfahrens (Fischler und Bolles 1981) zum Aussortieren von Ausreißern, zugeordnet werden können. Durch die eben beschriebene Ankeridentifizierung kann mit einer ähnlichen Vorgehensweise wie beim markerbasierten Trackingverfahren die Kamera lokalisiert werden. Durch Transformation der Merkmalkoordinaten aus dem Weltkoordinatensystem in Bildschirmkoordinaten kann die relative Position und Orientierung der Kamera in Bezug zum gegebenen Weltkoordinatensystem berechnet werden. Das Verhältnis zwischen einem 3D-Punkt \vec{p}_w in der realen Umgebung und seiner Abbildung auf dem Bildschirm eines AR-Systems \vec{p}_s ist durch

$$\vec{p}_s = K [R \vec{t}] \vec{p}_w$$

gegeben (Zhang 2000). $[R \vec{t}]$, extrinsische Kameraparameter genannt, ist die Transformationsmatrix mit Rotation und Translation und bildet das Weltkoordinatensystem auf das der Kamera ab. Die Matrix K beinhaltet die intrinsischen Kameraparameter mit f_x und f_y für die Brennweite und c_x und c_y für das Kamerazentrum. Sie bildet das Kamerakoordinatensystem auf das des Bildschirms ab. Hier in der ausgeschriebenen Gleichung zu sehen:

$$\begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Die intrinsischen Kameraparameter in K können durch ein Kamerakalibrierungsverfahren berechnet werden (z. B. Zhang 2000). Die Bildschirmkoordinate \vec{p}_s muss anschließend mit der inversen Transformationsmatrix K^{-1} normiert werden. Anhand der Bildkoordinaten von analysierten Merkmalen und durch Anwendung weiterer Methoden (Marchand, Uchiyama und Spindler 2016) lassen sich jetzt R und \vec{t} bestimmen. Nach der Ankeridentifizierung und Kameralokalisierung können schließlich virtuelle Inhalte in der AR-Szene platziert werden, die für den Betrachter durch die Transformation $[R \vec{t}]$ an die reale Welt ausgerichtet erscheinen.

2D-Objekte wie Fotos oder Grafiken können relativ frei gewählt werden, solange sie reich an Merkmalen sind. Ist die reale Größe bekannt, wird das Tracking-Ergebnis noch besser. Gleiches gilt auch für 3D-Objekte, welche CAD-Modelle oder photogrammetrische Scans realer Objekte oder ganzer Bereiche sein können. *Natural-feature-detection-and-description*-Algorithmen und somit markerlose Trackingverfahren insgesamt können sehr rechenintensiv sein. Doch durch die immer größer werdende Rechenleistung von AR-Systemen, vor allem von mobilen Handheldgeräten, und durch beschleunigte Algorithmen werden markerlose Trackingmethoden leichter einsetzbar. Auch eine stärkere Robustheit des Trackings gegenüber Verdeckungen von Merkmalen spricht dafür.

Darüber hinaus sind noch die SLAM-Techniken (Simultaneous Localization and Mapping) zu erwähnen, die in der Lage sind, eine Karte einer vollständig unbekanntem Umgebung zu erstellen und darin den benutzten Sensor zur Raumerfassung zu lokalisieren. Bei Anwendung im Zusammenhang mit AR sind dadurch keine Anker nötig. Werden als Sensoren die verbauten

Kameras eines AR-fähigen Geräts verwendet, ist von Visual-SLAM die Rede. Das grundlegende Framework von Visual-SLAM-Algorithmen besteht aus Initialisierung, Tracking, Mapping und zusätzlich Relokalisierung und Global-Map-Optimization für stabilere und genauere Ergebnisse. Eine detailliertere Beschreibung ist dahingehend in Taketomi, Uchiyama und Ikeda (2017) zu finden.

Visual-SLAM kann durch RGB-D-Kameras oder LiDAR-Sensoren (Light detection and ranging) ergänzt bzw. ersetzt werden. Die zwei verschiedenen Sensoren ermitteln über die Laufzeit von Infrarot- bzw. Laser-Strahlen Tiefeninformationen der Umgebung und vereinfachen und verbessern AR deutlich. Noch verfügen nicht alle AR-Systeme wie Smartphones oder Tablets über solche Sensoren, aber gehören immer häufiger zur Ausstattung dazu.

Kombination von Trackingmethoden, Computer-Vision und anderen Sensoren (IMUs, in jedem Smartphone verbaut) führt zu verbessertem und robusterem Tracking.

Photometrische Registrierung und Verdeckungen

Weitere wichtige Faktoren, die zu einem deutlich höheren Realitätsempfinden und zu mehr Plausibilität bei einem AR-Erlebnis beitragen, sind die korrekte Beleuchtung der virtuellen Inhalte und die richtige gegenseitige Überlagerung bzw. Verdeckung realer und virtueller Objekte in der AR-Szene. Wird beides berücksichtigt, erhöht sich auch hier der Immersionsgrad für den Benutzer.

Durch die photometrische Registrierung der Umgebung wird die Beleuchtung der virtuellen Objekte an die realen Lichtverhältnisse angepasst und fortwährend aktualisiert. Ein häufig eingesetztes Verfahren ist beispielsweise die Schätzung realer Lichtquellen durch Analyse von reflektierenden Gegenständen in der Umgebung. Die sogenannten Light-Probes können extra platzierte reale, stark reflektierende Kugeln oder vorhandene Oberflächen, die über Tiefeninformationen ermittelt werden, sein. Das erlaubt somit auch eine korrekte Berechnung von Schatten. Damit sie realistisch abgebildet werden, ist die Kenntnis über die geometrische Zusammensetzung der Umgebung notwendig. Diese kann durch Visual-SLAM und Tiefensensoren erfasst werden oder ist bereits durch 3D-Anker oder Phantomobjekte (siehe nächster Absatz) teilweise bekannt.

Virtuelle Inhalte werden immer über die Realität oder über das Kamerabild gerendert. Für glaubwürdige Verdeckungen muss ebenfalls die Geometrie der Umgebung bekannt sein. Ist der Anwendungsbereich eines AR-Szenarios schon im Vornhinein bekannt, können bereits Phantomobjekte festgelegt und bei Laufzeit der Anwendung mitgerendert werden. Phantomobjekte entsprechen der Geometrie von realen Objekten, bei denen mit Verdeckungen mit den virtuellen AR-Inhalten gerechnet wird. Sie sind in der Regel mit einem transparenten Shader ausgestattet, der für das reale Kamerabild vollkommen transparent, für das virtuelle Bild aber vollkommen opak ist. Unbekannte Umgebungen, unvorhersehbare Verdeckungen können wieder über Visual-Slam oder Tiefensensoren realisiert werden.

2.1.2 3D-Modelle für den AR-Einsatz

Die bei AR der realen Umgebung virtuell hinzugefügten Inhalte belaufen sich je nach Anwendung meistens auf 3D-Objekte, 2D-Objekte oder auch akustische Elemente. Dabei ist die Wahl von geeigneten virtuellen Inhalten ein entscheidender Faktor für eine glaubhafte und robuste AR-Erfahrung. Die in Abschnitt 2.1 genannte zweite Charakteristik eines AR-Systems nach Azuma (1997) besagt, dass dieses interaktiv in Echtzeit ist. Die Anforderung nach Echtzeit kann eine Herausforderung bei dem Einsatz von bestimmten virtuellen Inhalten darstellen. Da moderne AR-Systeme hauptsächlich mobile Geräte sind (siehe Abschn. 2.1.1), ist die Rechenleistung vergleichsweise gering/begrenzt, weswegen es unumgänglich ist, virtuelle Inhalte zu wählen, die die echtzeitbasierte, flüssige Darstellung der AR-Szene weiterhin gewährleisten.

Die Techniken beim Erstellen der AR-Inhalte ähneln den Techniken zum Erstellen von 3D-Modellen für Computerspiele, die ebenso den Anspruch auf echtzeitfähiges Rendern haben. Die Geometrie von 3D-Objekten wird über Polygone beschrieben. Die Polygonanzahl einer AR-Szene sollte möglichst gering sein, ohne an zu viel Detailgenauigkeit und Realismus einbüßen zu müssen. Dazu können Normal-Maps oder Bump-Maps eingesetzt werden, wenn die AR-Entwicklungsumgebung diese unterstützt. Normal- wie Bump-Maps können leicht mit Texture-Baking an einem Modell mit hoher Polygonanzahl in einer 3D-Grafiksoftware erstellt und für dasselbe Modell mit niedriger Polygonanzahl benutzt werden.

Modelle sollten weiterhin ein geschlossenes Mesh, also keine Löcher oder offenen Kanten, besitzen, um ein gutes Tracking und eine gute Darstellung zu erlangen. Gleiches gilt für die Normalen der Polygone, die in die richtige Richtung, weg von der Oberfläche, zeigen müssen.

Texturen sollten an die Darstellungsgröße des Objektes in der AR-Szene angepasst werden, um Rechenleistung zu verringern. Werden die AR-Objekte von verschiedenen Abständen betrachtet, kann die Methode des Level-of-Details (LoD) angewandt werden. Je nach Abstand des Betrachters zum 3D-Objekt werden jeweils ausreichend detaillierte Modelle und Texturen geladen.

Generell können Entwicklungsumgebungen oder AR-SDKs mit ihren unterschiedlichen AR-Funktionalitäten verschiedene Anforderungen an 3D-Modelle haben, die berücksichtigt werden sollten.

Structure-from-Motion

Mit Structure-from-Motion (SfM) ist es möglich, aus einer Serie von Fotos hochdetaillierte und realistische 3D-Modelle der fotografierten Gegenstände, Gebäude oder ganzen Gebiete anzufertigen. Die benötigte Tiefeninformation wird dazu allein über die Bewegung der Kamera relativ zur Welt abgeleitet (Block-Berlitz 2020). Dies geschieht ähnlich wie bei einigen AR-Trackingverfahren, näher beschrieben in Abschnitt 2.1.1, durch Merkmalsextrahierung, Matching und Berechnung von Position und Orientierung, den extrinsischen Parametern, der Kamera. Die schrittweise Rekonstruktion des 3D-Modells mit Image-Registration, Triangulierung, Bundle-Adjustment und Filtrierung wird in Block-Berlitz (2020) oder in Ozyesil u. a. (2017) genauer behandelt.

Damit die Merkmalsextrahierung und das Structure-from-Motion-Verfahren gute Ergebnisse liefern, sollten einige wichtige Regeln bei der Aufnahme der Fotos beachtet werden (Block-Berlitz 2020):

- Ruhige Aufnahmen bei guter und gleichmäßiger Beleuchtung, damit viele Merkmale gefunden werden
- Aufnahmen von allen Seiten und Bereichen des Motivs, mit genügend Abstand zwischen den Aufnahmepositionen und so, dass jedes Merkmal in mindestens 3 Fotos vorkommt
- Gleichbleibende Kameraeinstellungen und hohe Schärfentiefe, da auch der Kontext des Motivs für die Bestimmung der Merkmale wichtig ist

Die finalen 3D-Modelle, die leicht mit kostenloser oder kommerzieller Software erstellt werden können, bestehen schnell aus vielen Hunderttausend bis Millionen Vertices und wären ohne weitere Bearbeitung für robuste, echtzeitfähige AR-Anwendungen schwer zu handhaben. Mit den schon weiter oben genannten Techniken können die 3D-Modelle in ihrer Komplexität verringert werden, ohne den hohen Realismus und Detailgrad groß zu verlieren. Danach können sie unter anderem ideal als 3D-Anker für markerlose, modellbasierte Trackingverfahren oder in stark vereinfachter Variante als Phantomobjekt für Verdeckungen in einer AR-Szene eingesetzt werden.

2.1.3 AR-Anwendungs-Entwicklung

Dieser Abschnitt soll keine ausführliche Beschreibung von Entwicklungsmöglichkeiten für AR-Anwendungen liefern, sondern knapp auf die grundlegenden Unterschiede zwischen üblicher Native-App-AR und zukunftsfähiger Web-AR eingehen, die wichtige Fortschritte für Einsatzmöglichkeiten und Benutzerfreundlichkeit mit sich bringen kann.

Native-App-AR

Eine AR-Anwendung kann als Native-App entwickelt werden, die vom Benutzer heruntergeladen und auf das AR-Gerät installiert wird. Sie ist abhängig von dessen Betriebssystem und somit auch von den AR-Funktionalitäten, die eine AR-Entwicklungsumgebung, AR-APIs (Application Programming Interface) oder AR-SDKs (Software Development Kit) für dieses bereitstellen. Je nach Art der Implementierung sind Native-AR-Apps ohne Internetverbindung nutzbar. Sie können leicht mit allen Komponenten, wie für AR wichtige Sensoren, kommunizieren und haben eine bessere Performance als betriebssystemunabhängige Anwendungen (Roberto u. a. 2016).

Web-AR

Im Vergleich zu recht unflexibler und teurer hardware-basierter AR und app-basierter AR, bei der betriebssystemabhängiges Herunterladen und Installieren notwendig ist, kann Web-AR ei-

ne überall verfügbare und plattformunabhängige Benutzererfahrung bieten (Qiao u. a. 2019). Aktuell wird die breite Nutzung von Web-AR noch durch vorhandene Herausforderungen wie hohe Rechenanforderung, hoher Energieverbrauch und echtzeitfähige Netzwerkkommunikation limitiert. Die Kompatibilität mit gängigen Browsern und Geräten ist ebenfalls wichtig, aber durch Technologien wie WebGL, WebAssembly oder in der Entwicklung steckenden APIs (application programming interface) wie WebXR² schon teilweise gegeben. Neue Technologien wie 5G-Netzwerke, wodurch beispielsweise Cloud-Computing für mehr Recheneffizienz besser umsetzbar wird, und stetig steigende Leistungen von Handheldgeräten und Sensoren sind weitere Schritte hin zur Beförderung von Web-AR (Qiao u. a. 2019).

2.2 Forschungsgegenstand Museen

Das International Council of Museums (ICOM), das in Zusammenarbeit mit der United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO) gegründet wurde, verabschiedete 2007 die letzte aktuelle Definition eines Museums, in der es dieses als eine für die Öffentlichkeit dienende und zugängliche, das Erbe der Menschheit und der Erde verwaltende Institution beschreibt:

„A museum is a non-profit, permanent institution in the service of society and its development, open to the public, which acquires, conserves, researches, communicates and exhibits the tangible and intangible heritage of humanity and its environment for the purposes of education, study and enjoyment“ (ICOM 2007).

„Museen sind relevante Bildungsorte und übernehmen Bildungsverantwortung für die Gesellschaft der Gegenwart und der Zukunft“ (Deutscher Museumsbund e.V. und Bundesverband Museumspädagogik e.V. 2020). Besuchern werden zu ausgewählten Themen Informationen vermittelt, dies soll wissenschaftlich und unterhaltend unter Nutzung verschiedener Vermittlungsformate, analog und digital, erfolgen (ebd.).

Traditionell nutzen Museen analoge Informationsquellen wie Schautafeln und Texte. Die Art der Informationsvermittlung wandelt sich, insbesondere unter dem Einfluss der Digitalisierung. Auch die gewohnte Art der Informationsaufnahme hat sich in der digitalen Welt verändert. Heute besitzen viele Menschen ein eigenes Smartphone und nutzen dieses für die Gewinnung von Informationen. Heute gibt es neben den klassischen analogen Informationsquellen deshalb auch digitale Möglichkeiten, Museumsbesuchern Informationen zu vermitteln. Eine Anpassung der musealen Vermittlungskultur an veränderte gesellschaftliche Bedürfnisse ist eine Möglichkeit, den Lernort Museum attraktiv zu gestalten, den Bildungsauftrag zu erfüllen und stabile Besucherzahlen zu sichern.

²<https://immersive-web.github.io/webxr/> [zuletzt besucht am 06.04.2021]

2.2.1 Herausforderungen

Im Wandel der Zeit müssen sich Museen ständig neuen Herausforderungen stellen, die entweder durch die Natur des Museums selbst oder durch wechselnde Bedürfnisse und Anforderungen ihrer Besucher entstehen.

Es ist schon immer eine Herausforderung, die Vielzahl und Diversität an Gegenständen einer Sammlung an einem zentralen Ort, dem Museum, richtig und gerecht zu präsentieren. Das Museum verfügt immer über einen „de- wie rekontextualisierenden Grundcharakter“ (Kohle 2018). In der konzentrierten Ansammlung verliert das einzelne Museumsobjekt seinen ursprünglichen Charakter und repräsentiert nur einen Ausschnitt aus seiner historischen und funktionalen Vielschichtigkeit. Gewinnen tut es insbesondere in Kunstmuseen im Gegenzug dazu einen neuen, primär ästhetischen Charakter (ebd.).

Eine weitere Herausforderung besteht darin, junge Generationen und individuelle Zielgruppen für die Institution Museum zu begeistern. Dies zu erreichen, bedarf es einer Anpassung des Museums an die Bedürfnisse der gegenwärtigen Gesellschaft und den museumspädagogischen Zielgruppen aus dieser. Bedürfnisse der *Digital Natives* und der *Generation Z* oder spezieller den daraus Lernenden des 21. Jahrhunderts sind heute Unterhaltung, Interaktivität, eigene Mitbestimmung und die Manipulation von Gegenständen (Elmqaddem 2019). Häufig werden Museen diesen Bedingungen noch nicht gerecht. Ein digitaler Wandel des Museums, sprich seiner Vermittlungsformate, stellt eine Möglichkeit dar, sich an die veränderten Bedürfnisse anzupassen.

Museen in der Mongolei, die bis in die 1990er Jahre durch eine kommunistisch-sozialistische Ideologie diktiert wurden, betreffen oft noch weit grundlegendere Herausforderungen und Ziele, wie das Zusammentragen historisch und kulturell bedeutender Exponate, angemessene Erhaltung, Konservierung und Forschung und die allgemein öffentliche Befürwortung dieser Museumsziele (Lkhagvasuren 2016).

2.2.2 Digitaler Wandel

Mit der Digitalisierung können und wollen Museen den genannten Herausforderungen entgegenzutreten, um ihre Ausstellungen informativer und anpassungsfähiger zu gestalten und um so mehr museales Interesse der neuen Generationen und der gegenwärtigen Gesellschaft zu wecken. Seit ca. 25 Jahren haben Museen begonnen, die ihnen dadurch gebotenen Möglichkeiten für ihre Zwecke zu erforschen. In Deutschland geschieht dies zurückhaltender als in englischsprachigen Ländern, allen voran den USA (Kohle 2018).

In der statistischen Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2017 (Institut für Museumsforschung 2018) wurden Museen zu eingesetzten pädagogischen Medien befragt und die Ergebnisse mit Daten aus dem Jahr 2007 verglichen. Daraus zeigte sich, dass digitale Medien zwar häufiger eingesetzt werden, aber längst nicht in allen Museen vorhanden sind. Im Vergleich dazu sind die häufigsten Informationsquellen für Besucher im Museum weiterhin traditionelle Schautafeln und Texte (siehe Abb. 2.1).

Tabelle 2.1: Nutzung digitaler Medien und traditioneller Schautafeln/Texte in deutschen Museen 2017 im Vergleich zu 2007 (Daten aus Institut für Museumsforschung (2018) von 3723 Museen (etwas mehr als die Hälfte aller deutschen Museen 2017), Mehrfachangaben waren möglich)

Medien	2017 (in %)	2007 (in %)
Video- und Filminformationen	44,9	36,3
Audioguide	18,5	8,2
Neue Medien/Computerprogramme	18,2	10,9
Apps	7,1	*
Multi-Mediaguide/ Tablet-Führungsgeräte	5,7	1,0
Schautafeln/Texte	74,2	74,8

* in 2007 nicht erfragt

In derselben Erhebung wurde 2017 auch nach den Zielgruppen der museumspädagogischen Arbeit gefragt. Diese Abfrage nach den Zielgruppen hat bis heute nicht erneut stattgefunden, weshalb die Daten aus dem Jahr 2017 im Vergleich zur Erhebung aus 2007 betrachtet werden. Die museumspädagogische Arbeit nimmt seit 2007 zunehmend die Zielgruppen Kinder allgemein, Jugendliche und Familien in den Fokus. Die am häufigsten genannte Zielgruppe war 2017 weiterhin „Schulkinder in Schulklassen“ (Institut für Museumsforschung 2018). Dieses erhöhte Interesse an dieser Zielgruppe kann man im Kontext zum gestiegenen Einsatz digitaler Vermittlungsformate in Museen im gleichen Zeitraum gesehen werden. Museen sprechen mit digitalen Medien vor allem die neuen, jüngeren Generationen an und möchten bei Ihnen durch die Anpassung der Museumskultur an deren Bedürfnisse das Interesse wecken. Daraus leitet sich die Aufgabe der Museen ab, dass Besucher nicht als pauschale Zielgruppe gesehen werden sollten, sondern unterschiedliche Zielgruppen definiert werden müssen, um digitale Projekte erfolgreich zu entwickeln. Dafür ist eine „möglichst konkrete Vorstellung über die digitalen Bedarfe der gewünschten Zielgruppen und den intendierten Outreach“ (Gries 2020) nötig.

Die kuratorische Relevanz digitaler Anwendungen wird oftmals erkannt, jedoch sind häufig mit den aktuellen, knappen Museumsetats wichtige Projekte für den digitalen Wandel nicht umsetzbar (Kohle 2018). Deswegen braucht es gut durchdachte, günstig umsetzbare Konzepte und innovative Technologien, um möglichst vielen Museen die Chance der Digitalisierung zu ermöglichen.

2.3 UNESCO-Weltkulturerbe Orchontal

Eine UNESCO-Weltkulturerbestätte umfasst Werke des Menschen oder die kombinierten Werke von Natur und Mensch sowie Gebiete einschließlich archäologischer Stätten, die aus histo-

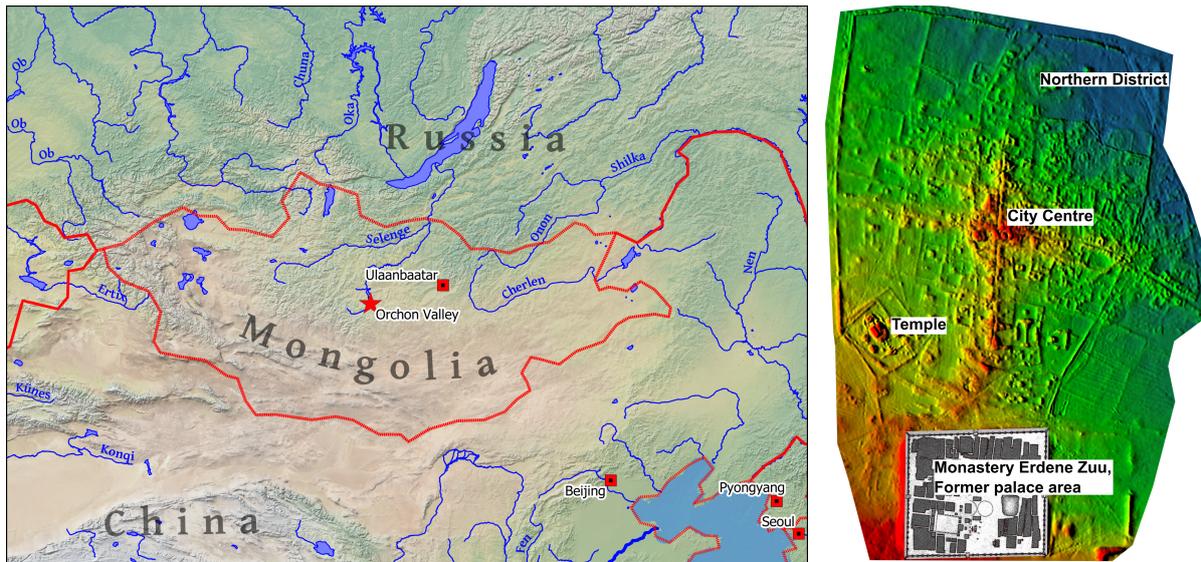


Abbildung 2.3: Links: Verortung des Orchontals innerhalb Zentralasiens und der Mongolei ca. 300 km westlich der Hauptstadt Ulaanbaatar (Karte von Hendrik Rohland, basierend auf freien Geodaten von www.naturalearthdata.com). Rechts: Digitales Geländemodell der Stadtanlage von Karakorum zur Verortung des Tempels (Karte von Hendrik Rohland, basierend auf Geländevermessungen von Andreas Rieger, FH Karlsruhe). Das Kharakhorum Museum befindet sich südlich des Klosters Erdene Zuu.

rischer, ästhetischer, ethnologischer oder anthropologischer Sicht von herausragendem universellem Wert sind (UNESCO 1972). Alle Vertragsstaaten, die sich der *World Heritage Convention* (UNESCO 1972) angeschlossen haben, sind dazu aufgefordert, die Werte des Welterbes der ihrer auf der UNESCO-Welterbeliste eingetragenen Objekte zu schützen. Sie erkennen die Pflicht der Identifikation, des Schutzes, der Erhaltung, der Präsentation und der Weitergabe an zukünftige Generationen dieser Welterbestätten an und werden zu diesem Zwecke alles nur Mögliche tun, es zu bewahren. 1990 trat die Mongolei, auf deren Gebiet das Orchontal liegt, der World Heritage Convention bei.

Das UNESCO-Weltkulturerbe Orchontal ist nach dem gleichnamigen Fluss Orkhon benannt, der im Zentrum der Mongolei im Osten des Changai-Gebirges entspringt und nördlich über den Fluss Selenge in den Baikalsee entwässert (siehe Abb. 2.3). In dem von weiten Steppen- und Wüstenlandschaften sowie Hochgebirgen und extremem Klima geprägten Land, bildete sich schon vor Jahrhunderten im Tal des Orkhons, in dem die nomadische Viehzucht bis heute ein wichtiger Wirtschaftsfaktor ist, eine reiche Kulturlandschaft. Sie umfasst ein ausgedehntes Weideland an beiden Ufern des Orkhon und enthält zahlreiche archäologische Überreste, die teilweise bis in die Bronzezeit zurückdatiert werden können (siehe Abb. 2.4). Auf dem Gebiet liegt auch Karakorum, im 13. und 14. Jahrhundert Hauptstadt des riesigen Reiches von Dschingis Khan. Insgesamt spiegeln die Überreste in diesem Gebiet die symbiotischen Verbindungen zwischen nomadischen, pastoralen Gesellschaften und ihren administrativen und religiösen Zentren sowie die Bedeutung des Orchontals in der Geschichte Zentralasiens wider. Das Grasland wird bis heute von mongolischen Pastoralisten beweidet³. Aufgrund die-

³<http://whc.unesco.org/en/list/1081> [zuletzt besucht am 07.04.2021]



Abbildung 2.4: Blick über das Orchontal mit der heutigen Stadt Kharkhorin. Mittig links, teilweise von den Hügeln verdeckt, ist der Orchon zu sehen. Weiter oben, zwischen Stadt und Feldern, liegt die Stadtwüstung von Karakorum und das Kloster Erdene Zuu (Foto von Hendrik Rohland)

ses herausragenden, universellen Wertes wurde die Kulturlandschaft Orchontal 2004 in die UNESCO-Weltkulturerbeliste aufgenommen.

Karakorum, der Legende nach 1220 als erste Hauptstadt des mongolischen Reiches von Dschingis Khan gegründet, diente bis zu ihrer vollständigen Zerstörung 1388 als wichtiges Verwaltungs- und Herrschaftszentrum, als Sammelpunkt für verschiedenste Religionen, Kulturen und Ethnien und als bedeutender Ort für Handel und Manufakturen (Franken u. a. 2019). Nach einem Wiederaufbau und erneuter kurzen Ernennung zur Hauptstadt im 16. Jahrhundert, fiel die Stadt schließlich wüst (ebd.).

Zu den wenigen erhalten gebliebenen Objekten Karakorums zählt eine große steinerne Schildkröte, welche auf dem Rücken eine ebenfalls steinerne, nur noch in Fragmenten erhaltene bilinguale Inschriftenstele aus dem Jahr 1346 trug (siehe Abb. 2.5). Auf der einen Seite befand sich eine mongolische Inschrift und auf der anderen eine chinesische. Mehrere Fragmente dieser Stele konnten wiederentdeckt werden und liefern ungefähr zwei Drittel des originalen Textes (Cleaves 1952). Die Inschrift schildert hauptsächlich den Bau und die spätere Sanierung eines gewaltigen Tempels und sollte dieses Ereignis verewigen. Sie ist damit eine einmalige Quelle für eine Beschreibung des großen Tempels des Aufstiegs der Yuan (Cleaves 1952), von welchem heute ausgegangen wird, dass ihn der mongolische Herrscher Möngke Khan⁴ um 1256 in Karakorum errichten ließ. Der Tempel wurde 1311 repariert und von 1342 – 1346 vollständig rekonstruiert. Er besaß eine Grundfläche von 38 × 38 Metern, war nach chinesischem Vorbild in hölzerner Skelettbauweise konstruiert (Franken u. a. 2019) und soll eine Höhe von 300 Fuß (ci) in fünf Etagen gehabt haben (Cleaves 1952). Im Inneren befand sich eine mit vier überlebensgroßen Buddhas umgebene Stupa, die zusammen mit archäologischem Fundmate-

⁴schriftliche, persönliche Mitteilung von Hendrik Rohland vom 05.03.2021



Abbildung 2.5: Links: Die steinerne Schildkröte (Foto von Hendrik Rohland). Rechts: Zwei Fragmente der originalen Inschriftenstele von 1346 mit einer Miniatur-Rekonstruktion der gesamten Stele (Foto aus Munkhzul (2020)).

rial und der Größe der Halle eindeutig auf eine sakrale Nutzung als buddhistischer Tempel hinweist (Franken u. a. 2019).

Archäologische Grabungen des russischen Archäologen Sergej Kiselev bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts und weiterführende Grabungen der Kommission für Archäologie und Außereuropäischer Kulturen (KAAK) zwischen 1998 und 2011 konnten in unmittelbarer Nachbarschaft der steinernen Schildkröte das Podium mit Säulenbasen und Fußbodenresten des 1388 mit zerstörten Tempels freilegen (Franken u. a. 2019). Dieses Podium konnte im Jahr 2014 im Rahmen der Feierlichkeiten zum 40-jährigen Jubiläum der diplomatischen Beziehungen zwischen Deutschland und der Mongolei in seiner ursprünglichen Form, auf der Grundlage der archäologischen Ergebnisse, wiedererrichtet werden. Den Tempel jedoch als Ganzes wiederzuerrichten „wäre unverhältnismäßig aufwändig, würde den Charakter des Ortes als archäologisches Denkmal in Frage stellen und ein überinszeniertes Geschichtsbild vermitteln“ (Rohland 2020).

In dem in Kapitel 4 ausgearbeiteten Konzept für eine mögliche AR-Anwendung des Kharakhorum Museums kann das gesamte Orchontal mit all seinen bedeutenden Orten einbezogen werden. Die oben genannte steinerne Schildkröte mit der Sino-Mongolischen Inschriftenstele von 1346 und die „Große Halle“ von Karakorum bilden Grundsteine zweier expliziter ausgearbeiteter und auch experimentell umgesetzter Anwendungsfälle und werden auf Grund dessen hier detaillierter behandelt.

Kharakhorum Museum

Der nachfolgende Abschnitt über das Kharakhorum Museum bezieht sich im Wesentlichen und wenn nicht anders angegeben auf Informationen von dessen Internetseite⁵.

Das Kharakhorum Museum wurde 2009 mit den Zielen der Erhaltung, der Untersuchung und Förderung der einzigartigen und wertvollen Denkmäler des UNESCO-Welterbes Orchontal

⁵<http://kharakhorummuseum.mn/> [zuletzt besucht am 07.04.2021]



Abbildung 2.6: Das Museumsgebäude des Kharakhorum Museums. Im Vordergrund eine von der Form wohl ähnliche Stele wie die nur noch in Fragmenten erhaltene Stele der Schildkröte (Foto von N. Batbayar aus Munkhzul (2020)).

gegründet. 2011 konnte das heutige Museumsgebäude mit finanzieller Unterstützung der japanischen Regierung eingeweiht werden (siehe Abb. 2.6). Die Dauerausstellung beinhaltet Exponate aus der Steinzeit, der Bronzezeit, der Antike und aus der Zeit des Großen Mongolischen Reiches. Um die 30 Mitarbeiter sind für Administration, Ausstellungsmanagement und Forschung zuständig, sowie weitere freiwillige Helfer für Museumsführungen und Dolmetschen. Ein weiteres wichtiges Ziel für das Museum ist die Erziehung und Bildung von Kindern und Jugendlichen. Dafür hat das Museum ein Programm für Bildung und kognitive Entwicklung aufgestellt, leistet Bildungsarbeit und bietet verschiedene Aktivitäten zu diesem Zweck an.

Das mediale Angebot des Kharakhorum Museums besteht aktuell zum einen aus einer Video-station, bei der ein Video einen vermuteten Aufbau der „Großen Halle“ auf Grundlage der archäologischen Forschungen zeigt. Zum anderen existiert ein Spatial-AR-Display, welches über realen Bruchstücken eines Tongefäßes, das virtuell wieder zusammengesetzte Tongefäß projiziert⁶.

Das Kharakhorum Museum gilt als das modernste der mongolischen Museen mit kleinem, digital-medialem Angebot. Dennoch leidet es unter dem gleichen pädagogischen Defizit wie viele andere mongolische und weltweite Museen: Ausstellungen sind auf Dokumentation und Präsentation fokussiert, Besucher werden nicht richtig involviert und angeleitet. Von vornherein wird davon ausgegangen, dass sich der Besucher für das ausgestellte Thema interessiert (Dierkes 2019). Gerade bei der Zielgruppe Kinder und Jugendliche, deren Erziehung und Bildung das erklärte Ziel des Museums ist, kann man jedoch dieses Interesse nicht voraussetzen. Hier gilt es, Motivation zu wecken, sich mit den musealen Themen auseinanderzusetzen, damit ein nachhaltiger Wissenserwerb möglich ist.

⁶mündliche Mitteilung von Hendrik Rohland vom 11.03.2021. Die Aufzählung enthält möglicherweise nicht alle medialen Angebote des Museums.

3 Museen als Anwendungsbereich für AR

AR-Systeme und ihre Anwendungen können, wie Kapitel 2 zeigt, unterschiedlich ausgelegt sein, was die Auswahl des AR-Geräts mit seinen verfügbaren Sensoren und des Trackingsystems betrifft. Zudem ist die Entwicklung einer AR-Anwendung abhängig von grundlegenden Gegebenheiten, Anforderungen und Bedarfen des jeweiligen Standortes, falls dieser festgelegt ist. Auf Museen als Anwendungsbereich für AR bezogen bedeutet das, die kuratorischen und technischen Anforderungen und Faktoren eines Museums mit seinen geplanten AR-Szenarien zu analysieren.

Die Analyse in den Abschnitten 3.2 und 3.3 nutzt einen Ausschnitt von wichtigen, möglichst allgemeingültigen Faktoren, wobei zu beachten ist, dass jedes Museum und Szenario individuelle Besonderheiten oder Verschiedenheiten aufweist und zusätzlich individuell zu prüfen ist. Der Hauptaspekt in diesem Kapitel liegt auf mobiler AR. Sie ermöglicht dem Besucher, sich frei mit dem Gerät von AR-Station zu AR-Station durch das Museum zu bewegen. Kapitel 3.1 begründet kurz AR als Mittel des digitalen Wandels.

3.1 AR als Mittel des digitalen Wandels

AR kann als unterstützendes Mittel gesehen werden, den musealen Bildungsauftrag im Zeitalter des digitalen Wandels zeitgemäß zu erfüllen. Die durch AR-Anwendungen erweiterten musealen Vermittlungsformate passen sich an die Bedürfnisse der digital geprägten Gesellschaft an.

AR bietet viele Möglichkeiten, eine nachhaltige Wissensvermittlung zu unterstützen. Da AR interaktiv vom Benutzer angewandt wird, erhöht es die Aufmerksamkeit, die wichtig für die Aufnahme von Informationen ist. Zudem können für AR-Anwendungen Gamification-Elemente entwickelt werden und dadurch gerade junge Menschen besonders gut ansprechen, die aufgrund der spielerischen Lernmethode eine höhere Bereitschaft zeigen können, sich mit dem Thema zu beschäftigen. AR kann rekontextualisierend eingesetzt werden, um Besuchern den ursprünglichen Charakter eines Exponats zu vermitteln und dadurch ein besseres Verständnis für die Informationen zu erzielen. Der Museumsbesuch kann durch AR die hedonische Erfahrung erhöhen, Wissen mit Spaßfaktor und Freude zu vermitteln. Letztlich kann AR dazu beitragen, dass der Museumsbesuch als Erlebnis gewertet wird und sich dadurch die Chance bzw. Absicht, das Museum erneut zu besuchen, erhöhen (Jung und Dieck 2017).

3.2 Kuratorische Sichtweise und Anforderungen

Ein Kurator wählt die Kunstwerke und Objekte für Museen und für spezielle Ausstellungen aus, kümmert sich um die Pflege der Exponate und um eine richtige Präsentation der Kunstobjekte. Er unterstützt die wissenschaftliche Forschung und erklärt dem Laien durch ergänzende Informationen die Herkunft und Bedeutung der Objekte. „Kuratoren haben ein Auge und eine Leidenschaft für die Inszenierung von Kunstwerken in jeder Art und Weise, die letztendlich das Interesse der potenziellen Besucher an einer Ausstellung weckt“ (Schiele 2017).

Im Wandel der Zeit muss der Kurator gesellschaftlichen Veränderungen Rechnung tragen und diese in seiner Arbeit als Kurator berücksichtigen. Für die Integration und die Ausgestaltung der Ausstellung mit AR als Mittel des digitalen Wandels ist der Kurator zuständig. Er muss die kuratorischen Aspekte und die technischen Anforderungen und Entwicklungsmöglichkeiten berücksichtigen und gegeneinander abwägen. Eine nutzerfreundliche, attraktive und aus musealer Sicht geeignete AR-Anwendung kann nur im Dialog zwischen diesen beiden Anforderungen entwickelt werden.

3.2.1 Ausstellungsgestaltung mit AR

Die Anwendung von computergestützten Visualisierungen für die Verwaltung von archäologischem Erbe muss als ergänzendes und nicht ersetzendes Werkzeug zu anderen, traditionelleren aber gleich effektiven Instrumenten, behandelt werden (Seville Principles 2011).

Bei Betrachtung dieses Grundsatzes aus den Seville Principles (2011) für virtuelle Archäologie und bei Betrachtung der Definition für Augmented-Reality (siehe Abschn. 2.1), die besagt, dass AR die reale Welt nicht vollständig ersetzt, sondern nur durch virtuelle Objekte ergänzt, fällt auf, dass AR genau solch ein ergänzendes Werkzeug darstellt. Der Grundsatz kann auf Museen, die für Verwaltung und Ausstellung von archäologischen Artefakten maßgeblich zuständig sind, und auf ihre auch nicht-archäologischen Exponate übertragen werden. AR, eine Form der computergestützten Visualisierung, soll reale, verfügbare Exponate genauso wenig vollständig ersetzen, wie den gesamten Museumsbesuch an sich. Es ist daher wichtig, AR vor Ort als eine sinnvolle und bereichernde Unterstützung bereits bestehender Exponate oder Ausstellungen zu verstehen und einzusetzen.

Soll eine museale Ausstellung durch AR ergänzt und bereichert werden, stellt sich die Frage, wie sehr eine bestehende Ausstellung modifiziert werden muss und wie hoch der damit einhergehende Aufwand ist, damit AR bestmöglich angewandt werden kann. Kuratorisch gesehen sollten Veränderungen und Aufwand möglichst gering sein, da AR in erster Linie der Museologie dienen soll und die Museologie nicht der AR. Computerbasierte Visualisierungen, in diesem Fall AR, sollten normalerweise auch nur dann eingesetzt werden, wenn es das geeignetste verfügbare Werkzeug zur Umsetzung eines Ziels eines Museums ist (London Charter 2009). Dies berücksichtigt, kann AR beispielsweise ideal bei unvollständig erhaltenen Exponaten eingesetzt werden, die dem Besucher auf diese Weise wieder vollständig präsentiert werden können.

3 Museen als Anwendungsbereich für AR

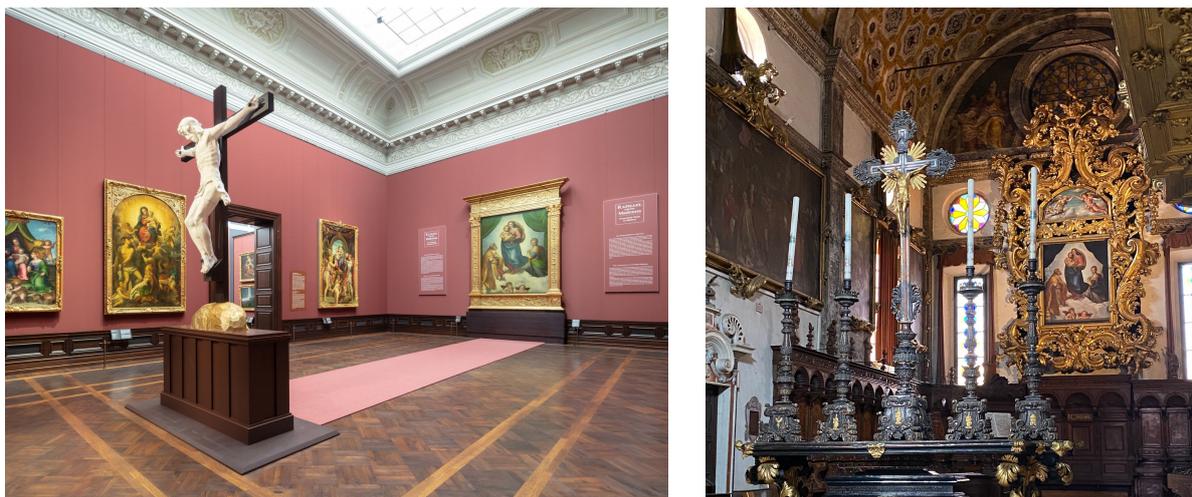


Abbildung 3.1: Links: Das zur Rekontextualisierung der Sixtinischen Madonna gegenübergestellte Kruzifix in der Gemäldegalerie Alte Meister in Dresden (Foto von Klemens Renner aus SKD (2020)). Rechts: Eine Kopie des Gemäldes im originalen Kontext als Hochaltarbild der Klosterkirche San Sisto in Piacenza, Italien (Foto aus silvanos180 (2020)).

Aus kuratorischer Sicht ist es sinnvoll, AR als rekontextualisierendes Werkzeug einzusetzen, um die Herausforderung der Musealisierung von Gegenständen zu erleichtern. Durch Einblenden einer virtuellen Umgebung kann der historische und funktionale Charakter eines Ausstellungsstückes, den es in seiner ursprünglichen Umgebung hatte, auf Wunsch wiedergewonnen werden. Trotzdem sollte das reale Museumsstück immer im Fokus liegen oder es sollte zumindest auf real vorhandene Objekte eingegangen werden.

Den Versuch der Rekontextualisierung haben z. B. die Staatlichen Kunstsammlungen Dresden in der Gemäldegalerie Alte Meister gewagt. Anlässlich der Sonderausstellung *Raffaël und die Madonna* wurde Raffaels Sixtinischer Madonna ein überlebensgroßes, reales Kruzifix auf einer angedeuteten Chorschranke gegenübergestellt und die Verbindung mit einem roten Teppich signalisiert. So sollte der ursprüngliche Kontext als Hochaltarbild, wie einst in der Klosterkirche von San Sisto in Piacenza, dem Besucher vermittelt werden (siehe Abb. 3.1).

Den wirklichen Zusammenhang zwischen dem Bild und dem Kreuz versteht der unwissende Besucher jedoch erst durch das Lesen von großen Texttafeln, nachdem er auf das weiße, fehl am Platz wirkende Kruzifix inmitten der goldgerahmten Gemälde aufmerksam geworden ist. Ansonsten verstellt das Kruzifix vor allem den Weg und den Blick durch die Enfilade und auf die anderen im Saal befindlichen Gemälde. AR wäre bei diesem Beispiel eine vorteilhafte Alternative für die Rekontextualisierung der Sixtinischen Madonna. Das Kruzifix mit Chorschranke könnte nach Scannen des Gemäldes virtuell in den Ausstellungsraum integriert werden, ohne den realen Raum zu verstellen und das Sichtfeld auf das Gemälde zu behindern. Der Gemäldekontext bleibt so nur für den speziell dafür interessierten Besucher sichtbar. Die Rekontextualisierung durch eine AR-Anwendung müsste sich auch nicht nur auf Kruzifix und angedeutete Chorschranke beschränken, sondern könnte noch deutlich mehr Objekte und vor allem Nachbildungen originaler Objekte aus San Sisto enthalten. Ein solches AR-Szenario wäre ebenso leicht in die normale Dauerausstellung integrierbar, sodass die Rekontextualisierung

nicht nur in einer Sonderausstellung erlebbar wäre.

Vorteil von AR gegenüber anderen museumspädagogischen Werkzeugen, ob digitale oder analoge, ist zusätzlich immer, dass direkt mit dem realen Exponat gearbeitet und sogar interagiert werden kann, was aus konservatorischen, ethischen oder physikalischen Gründen in der Realität nicht möglich wäre. Die für den Besucher wichtig zu verstehende Verbindung von Informationen und Virtuellen Visualisierungen zu den real vorhandenen Objekten kann damit erzeugt werden. Ebenso bleibt „die Faszination der Darstellung im Museum selbst“ erhalten (Kohle 2018). In einer Gemäldegalerie wird es so möglich, Beschreibungen zu den Kunstwerken mit virtuellen Textoverlays oder Grafiken in direkten Zusammenhang mit der beschriebenen Bildregion zu setzen, Kunstwerke durch Animationen lebendig werden zu lassen oder Gemälden eine dritte Dimension zu geben. In einer Antikensammlung könnte mit AR der Aufbau und das Innere einer originalen Mumie unmittelbar an einem originalen Exemplar visualisiert werden, ohne dass die Mumie modifiziert werden muss. An archäologischen Stätten könnten Gebäude rekonstruiert werden, ohne erhalten gebliebene Überreste antasten zu müssen, um so den archäologischen Charakter nicht durch eine reale Konstruktion zu verlieren und die Stätte damit zu schützen. Dies ist ein interessanter Aspekt für die archäologischen Stätten des Orchontals.

Bei den aufgelisteten Beispielen soll, wieder bezogen auf den zu Beginn genannten Grundsatz, die AR-Anwendung die traditionellen Werkzeuge wie Infotafeln nicht ersetzen, sondern unterstützen bzw. erweitern. Ähnlich wie Audioguides, die in vielen Museen ausleihbar sind und ergänzende Informationen bereithalten, soll AR für interessierte Besucher zusätzliches Wissen liefern oder eine von Grund auf andere Lernmethode und Wissensvermittlung anbieten. Das fundamentalste und wichtigste Wissen sollte dementsprechend weiterhin auch ohne AR abrufbar sein. So wird Rücksicht auf Besucher genommen, die das Museum ohne digitale Hilfe erleben und genießen möchten. Auf diese Weise können unterschiedliche Generationen einen ihren Lern- und Lesegewohnheiten angepassten Museumsbesuch erleben.

3.2.2 Wissensvermittlung

Museen haben die Aufgabe, Besucher kulturell zu bilden. Dieser Bildungsauftrag fordert gleichzeitig die sensible Behandlung der zu vermittelnden Informationen, die sich an den wissenschaftlichen Erkenntnissen orientieren sollten. In Abschnitt 3.1 ist AR als modernes Mittel für die Wissensvermittlung genannt worden, dass unterhaltenden Charakter haben kann. Es wird deutlich, dass bei AR ein Wechselspiel zwischen Unterhaltung und Wissensvermittlung stattfindet.

Eine gute Darstellung der Realität in einer AR-Anwendung erhöht die Immersion, sprich das Eintauchen des Benutzers in die dargestellte Umgebung. Aus kuratorischer Sicht ist zu hinterfragen, wie hoch der Immersionsgrad und damit der Entwicklungsaufwand für eine AR-Szene sein muss, um dem Auftrag der wahrheitsgemäßen Wissensvermittlung gerecht zu werden und diese attraktiv zu erfüllen. Im Fokus der Wissensvermittlung stehen bzgl. der technischen Anforderungen einer AR-Anwendung in erster Linie ihre Robustheit und Echtzeitfähigkeit, um dem Besucher eine ununterbrochen glaubwürdige und fesselnde Lernerfahrung zu bieten.

Diese Aspekte gilt es zu erfüllen, bevor Ressourcen für hochrealistische, aufwändige virtuelle Inhalte aufgewandt werden. Es gilt der museale Grundsatz, dass nur wahrheitsgemäße Informationen wiedergegeben werden und die AR-Szene nicht zugunsten von Unterhaltungszwecken mit falschen Informationen angereichert wird. Diese Prinzipien sollten vor allem bei der Entwicklung von den im folgenden Abschnitt dargestellten 3D-Rekonstruktionen berücksichtigt werden.

3.2.3 3D-Rekonstruktionen

Bei der Anwendung von AR können vielfältige virtuelle Inhalte, von einfachen Textoverlays bis hin zu komplexen 3D-Modellen eingesetzt werden. Im musealen Bereich spielen dabei virtuelle Rekonstruktionen eine größere Rolle. Rekonstruiert werden nicht mehr vollständig erhaltene oder gar nicht mehr erhaltene Objekte. Sie stellen gute Einsatzszenarien für AR dar und können z. B. gut für die virtuelle Archäologie angewendet werden. Da das auch auf das UNESCO-Weltkulturerbe Orchontal mit seinen archäologischen Stätten zutrifft, werden die 3D-Rekonstruktionen eingehender betrachtet.

Virtuelle 3D-Rekonstruktion oder allgemein 3D-Modelle können heute realistischer, schneller und einfacher denn je erschaffen werden. Durch die richtigen Methoden und die stetigen Weiterentwicklungen der AR-Systeme sind solche Modelle auch in immer größerem Umfang für AR einsetzbar. Der steigende Realismus birgt jedoch gerade bei Rekonstruktionen eine Gefahr, da er das Potential steigert, Authentizität und somit Fehlinformationen hervorzurufen (Hageneuer 2020). Rekonstruktionen sind immer vom Stand des Wissens und von Annahmen und Vermutungen beeinflusst (Hageneuer 2020), welche die Grenzen des Wissens nicht eindeutig erkennbar lassen. Sie funktionieren somit als visualisierte Theorie, die bei falscher Kommunikation in Entwicklung und Nutzung eine fiktionale Wirklichkeit der historischen Wirklichkeit abbildet (Quick 2020).

AR kann diese Gefahr durch noch mehr Authentizität der 3D-Rekonstruktionen weiter steigern, da die virtuellen Modelle hier nicht länger nur als Foto oder Video zu sehen sind, sondern im selben Raum zusammen mit realen Objekten koexistieren (Azuma 1997), von allen Seiten betrachtbar und im Fall der vollständigen Immersion sogar nicht mehr von den realen Objekten zu unterscheiden sind. Werden virtuelle Rekonstruktionen in Museen, die auf Fotos oder Videos zu sehen sind, oft ohne Zögern und ohne Diskussion von den Besuchern akzeptiert (Hageneuer 2020), so kann dies bei AR noch mehr der Fall sein.

Aus kuratorischer Sicht ist es deswegen wichtig, das Risiko von Fehlinformationen möglichst gering zu halten. Dazu gibt es Richtlinien, die Empfehlungen für eine virtuelle Entwicklung und Anwendung geben. Die London Charter (2009) schafft Prinzipien für die computergestützte Visualisierung von kulturellem Erbe. Darauf aufbauend stellen die Seville Principles (2011) erweiterte und speziellere Prinzipien für die virtuelle Archäologie bereit. Den AR-Benutzern sollte sorgfältig der Status des Wissens, den die Rekonstruktionen repräsentieren, übermittelt werden und es sollte klar gekennzeichnet werden, was historisch bewiesen ist und was Hypothesen sind. Der Benutzer muss weiterhin die Rekonstruktionen und auch andere 3D-Modelle sachlich richtig verstehen und selbst bewerten können. Eine von Beginn an

stattfindende Anleitung durch den Kurator und ein interdisziplinär aufgestelltes kooperierendes Team wissenschaftlicher Experten aus verschiedenen Fachgebieten tragen bei der AR-Anwendungsentwicklung zur Vermeidung von Fehlinformationen durch falsche Kommunikation zwischen Entwickler und Experten und zwischen Anwendung und Besucher bei.

Weitere Forschungen oder Funde können zu neuen Ergebnissen und einer Neubewertung der Rekonstruktionen führen, woraufhin diese angepasst oder ausgetauscht werden sollten. Es ist hilfreich, schon bei der Entwicklung auf diese Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Anwendung zu achten.

3.3 Technische Faktoren und Anforderungen

In diesem Abschnitt werden ausgewählte technische Anforderungen und Faktoren genannt, die die Entwicklung einer robusten und gut durchdachten AR-Anwendung an ein Museum stellt. Es wird erläutert, auf welche Aspekte das Museum Rücksicht nehmen sollte, was vor der Entwicklung und vor dem Nutzungsstart eingeplant werden muss und welche AR-Techniken (siehe Abschn. 2.1.1) sich für unterschiedliche museale Szenarien am geeignetsten präsentieren.

3.3.1 Wahl der AR-Gerätestrategie

Die richtige Wahl von benötigter Technik zur Umsetzung einer AR-Anwendung ist für ein Museum ausschlaggebend, um möglichst vielen und unterschiedlichen Besuchern ein spannendes, erinnerndes, aber auch komfortables AR-Erlebnis zu bieten und dadurch den Wert des Museumsbesuchs nachhaltig zu prägen. Anhand einiger wichtiger Kriterien sollte die richtige Option getroffen und ein geeignetes AR-System ermittelt werden.

Oft ist der Investitionsaufwand ein entscheidendes Kriterium. Mit dem Investitionsaufwand einher geht auch der Entwicklungsaufwand der AR-Anwendung. Dabei wird hier erst nur die rein technische Entwicklung, mit Aspekten wie virtueller Objekte, Marker, Referenzmodelle, Funktionalität, Interaktionsmöglichkeiten und User-Interface (UI) berücksichtigt. Die Zugänglichkeit aus Besuchersicht zu den AR-Systemen und somit zu den AR-Anwendungen sollte leicht und für möglichst viele Besucher gleichzeitig gewährleistet sein. Auch sind Mobilität und Komfort zu berücksichtigende Faktoren.

Bei der Wahl eines AR-Systems bzw. Displays können im Vornherein drei grundsätzliche Strategien in Betracht gezogen werden:

- Die Strategie der Anschaffung und Nutzung ausschließlich museums-eigener Geräte,
- die Bring-Your-Own-Device-Strategie (BYOD-Strategie), bei der ausschließlich besucher-eigene Geräte einbezogen werden und
- die hybride Strategie, bei der zusätzlich zur BYOD-Strategie museums-eigene Geräte angeboten werden.

Museums-eigene Geräte

Bei der Anschaffung von museums-eigenen Geräten stehen HMDs oder Handheldgeräte zur Verfügung (siehe Abschn. 2.1.1). OST-HMDs können unter passenden Bedingungen aufgrund desselben Blickfeldes von Kamera und Betrachter und durch fast vollständige Abdeckung des Betrachter-Gesichtsfeldes das immersivste und realistischste AR-Erlebnis bieten. Gleichzeitig haben diese Art von AR-Systemen die derzeit noch höchsten Anschaffungskosten. Da ein Museum darauf abzielen sollte, möglichst vielen Besuchern einen niedrighwelligen Zugang zu dessen AR-Anwendungen zu geben, kommen bei dieser Option hohe Investitionen auf das Museum zu. Geringere Hardware-Investitionen sind bei Handheldgeräten zu erwarten, da leistungsstarke und für AR geeignete Smartphones oder Tablet-PCs zu immer günstigeren Preisen erhältlich sind. Tablets haben gegenüber Smartphones den Vorteil, dass der Bildschirm größer ist und somit auch einen größeren Teil des Gesichtsfeldes abdecken kann. Dies führt zu einer leicht gesteigerten Immersionswirkung und kann auch gerade bei augmentierten Textinhalten oder wichtigen, kleineren Details von virtuellen Inhalten nützlich sein.

Verschiedene AR-Features und -Funktionalitäten sowie Trackingverfahren sind nicht immer in allen gängigen SDKs implementiert und die SDKs wiederum sind nicht immer mit allen Betriebssystemen oder Entwicklungsumgebungen kompatibel. Die Nutzung museumseigener Geräte mit nur einem bekannten Betriebssystem erleichtert deshalb die Entwicklung der auf dem AR-System laufenden AR-Anwendungen, gleichzeitig kann sie diese aber auch einschränken. Denn wurde ein geeignetes Ausgabegerät ausgewählt, kann die Anwendung (nur) maßgeschneidert dafür entwickelt und die maximale Kompatibilität dafür erreicht werden. Analog dazu kann Flexibilität hinsichtlich der evtl. später nötigen Anschaffung neuer bzw. weiterer Endgeräte oder bei einem Strategiewechsel verloren gehen. Die technischen Merkmale, wie Rechenleistung, Bildschirmgröße und -auflösung, verbaute Sensoren und Kameraqualität sind genau bekannt und die Anwendung muss nur auf einem Betriebssystem laufen. Dadurch kann auch sichergestellt werden, dass jeder Besucher die gleiche qualitative AR-Erfahrung geboten bekommt.

Damit Besucher einen komfortablen Museumsbesuch genießen können, sollte auch Gewicht und Größe der Geräte bei der Wahl bedacht werden. Monitor-based-AR über Handheldgeräte erfordert meistens, dass das Gerät vor den Körper oder das Gesicht gehalten wird, was bei größeren Tablets bei längerer Nutzungs- oder Verweildauer im Museum anstrengend werden kann. Zudem können sie nicht komfortabel, wie z. B. Audio-Guides umgehängt oder wie Smartphones eingesteckt werden. Bei größeren Distanzen im Museum oder in weitläufigen Freilichtmuseen könnte das bei Anwendungen, bei denen sich der Besucher frei mit dem AR-Gerät bewegen kann, unkomfortabel werden. Sind die Hände über die Dauer des Museumsbesuches nicht frei, kann der Besucher auch beispielsweise mit anderen interaktiven museumspädagogischen Werkzeugen evtl. nur eingeschränkt interagieren.

Museums-eigene Geräte bedingen eine höhere Bindung personeller Kapazitäten im Museum. Personal muss zum einen die Geräte-Ausgabe und -Anleitung an die Besucher übernehmen, zum anderen über die gesamte Zeit des Museumsbesuchs als Ansprechpartner und Betreuer für die Besucher fungieren. Zudem müssen die AR-Geräte regelmäßig gewartet werden. Je nach Größe eines Museums und seinen bereits vorhandenen medialen Angeboten wie Audio-

Guides und aufbringbaren personellen und finanziellen Kapazitäten, kann dieser Punkt ebenso für die Wahl der Gerätestrategie entscheidend sein. Durch Schulung bereits vorhandenen Museumspersonals, wie Aufseher, aber vor allem durch ein geschicktes, selbsterklärendes und anleitendes Anwendungs-UI kann dieses Kriterium weniger stark gewichtet werden.

Die Zugänglichkeit bzw. die Barrierearmut der AR-Anwendung ist bei museums-eigenen Geräten hoch. Unabhängig von der Verfügbarkeit privater Geräte ist es praktisch für jeden Besucher möglich, AR zu erleben, sofern das Museum eine an seine Besucherzahlen angepasste ausreichend hohe Anzahl an AR-Geräten zur Verfügung stellt. Download und Installation und damit verbundene mögliche Komplikationen mit Internetverbindung und Gerätespeicherplatz können zudem vermieden werden.

Besucher-eigene Geräte

Die meisten Besucher besitzen ein Smartphone, seltener auch ein Tablet, das sie beim Museumsbesuch ohnehin mit sich führen und somit für das Museum als AR-System genutzt werden kann (BYOD-Strategie). Das Museum spart sich dadurch die kosten-, wartungs- und personalintensive Anschaffung und Verwaltung eigener Geräte. Im Gegenzug müssen unterschiedlichste Handheldgeräte bei der Anwendungsentwicklung berücksichtigt werden, und es sollten Anreize und Hilfestellungen geleistet werden, die den Besucher motivieren, sein eigenes Smartphone oder Tablet zu gebrauchen.

Anreize und Hilfestellungen im Museum können gut sichtbare Informationstafeln mit QR-Codes sein, die den Besucher auf die Möglichkeit aufmerksam machen, sein eigenes Smartphone für AR im Museum zu nutzen und diesen direkt zur Anwendung leiten. Über ein öffentlich zugängliches WLAN-Netzwerk im Museum kann der Besucher die Anwendung gegebenenfalls herunterladen oder ausführen, ohne dabei sein mobiles Datenvolumen zu nutzen. Ist ein Download der Anwendung erforderlich, erfolgt dieser durch den Besucher idealerweise schon vor dem Museumsbesuch. Anreize und Hilfestellungen sollten also schon auf der Internetseite des Museums gegeben werden.

Die genauen technischen Merkmale der Handheldgeräte der Besucher sind bei der Anwendungsentwicklung nicht bekannt, weswegen auf deutlich mehr Geräte und Faktoren Rücksicht genommen werden muss, um möglichst vielen Besuchern ein gleichwertiges AR-Erlebnis bieten zu können. Wie schon im Abschnitt über museums-eigene Geräte genannt, variieren Merkmale wie Rechenleistung, Bildschirmgröße und -Auflösung, verbaute Sensoren und Kameraqualität.

Unterschiedliche Betriebssysteme, vorwiegend Android und iOS, müssen ebenso berücksichtigt werden. So verfügen beispielsweise noch längst nicht alle Smartphones oder Tablets über eine ToF-Kamera oder einen LiDAR-Sensor für Tiefenermittlung der Umgebung (siehe Abschn. 2.1.1). Anhand solcher Faktoren müssen Mindestanforderungen festgelegt und AR-Szenarien entwickelt werden, die ein breites Spektrum an Besucher-Endgeräten einschließen.

Die Funktionen des eigenen privaten Handheldgeräts sind den meisten Besuchern gut bekannt, was deshalb auch die Bedienung der AR-Anwendung vereinfachen und verbessern kann.

3 Museen als Anwendungsbereich für AR

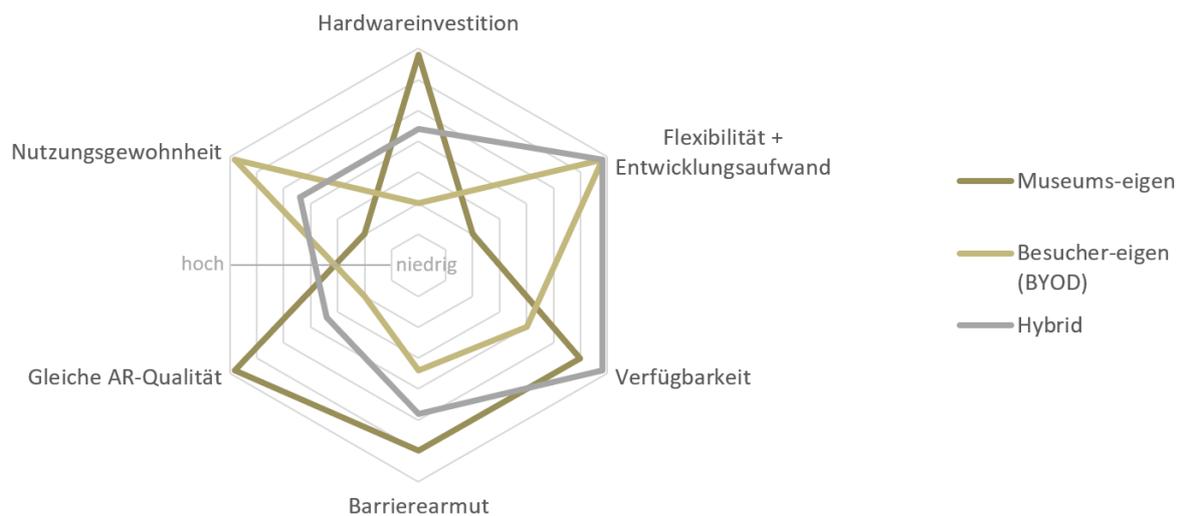


Abbildung 3.2: AR-Gerätestrategie: Vergleich und Gegenüberstellung der drei AR-Gerätestrategien untereinander anhand von sechs Auswahlkriterien. Hardwareinvestition berücksichtigt die Kosten für die Anschaffung von Geräten und die Einrichtung der Nutzungsinfrastruktur. Je mehr verschiedene Endgeräte einbezogen werden, desto höher ist der Entwicklungsaufwand, aber auch die Flexibilität der AR-Anwendung. Die Verfügbarkeit sagt etwas darüber aus, wie viele Besucher Zugriff auf die AR-Anwendung haben könnten. Die Barrierearmut beschreibt, wie schnell und einfach Benutzer den AR-gestützten Museumsbesuch durchschnittlich starten können. Unterschiedlich leistungsstarke und ausgestattete Endgeräte bedingen Qualitätsunterschiede der AR. Das Kriterium Nutzungsgewohnheit berücksichtigt den Komfort der gewohnten Bedienung eines privaten mitgeführten Gerätes. Die Gewichtung der Kriterien ist nicht immer gleich stark zu betrachten und hängt teilweise von den zur Verfügung stehenden Ressourcen und Kapazitäten des Museums ab.

Trotzdem gilt wie bei museums-eigenen Geräten, dass neben Ansprechpartnern im Museum vor allem ein gut anleitendes und den Benutzer führendes UI die Nutzung der AR-Anwendung sichert und erleichtert. Durch Nutzung eigener Geräte können Besucher Erfahrungen und Informationen über den Museumsbesuch durch gewohnte Mittel wie Screenshots oder Videoaufnahmen speichern und jederzeit wieder aufrufen. Auch hier kann das UI unterstützen, indem es explizit auf diese Funktion hinweist oder diese bereitstellt.

Hybride Gerätestrategie

Wählt ein Museum die reine museums-eigene Gerätestrategie, so ist diese nur mit einem vergleichsweise hohen Investitionsaufwand zu bewältigen. Bei der reinen besucher-eigenen Gerätestrategie werden Besucher, die kein eigenes bzw. für die AR-Anwendung nutzbares Endgerät besitzen, ausgeschlossen.

Deshalb ist, wenn möglich, eine hybride Nutzung der beiden Strategien zu bevorzugen, um die Zugänglichkeit für einen AR-gestützten Museumsbesuch zu erhöhen. Besucher sollten weiterhin motiviert werden, hauptsächlich ihr eigenes Handheldgerät für die AR-Anwendung zu nutzen, um möglichst vielen Besuchern den Zugang zur AR-Anwendung zu ermöglichen. Museums-eigene Geräte stehen so Besuchern zur Verfügung, die kein oder kein nutzbares

Handheldgerät mit sich führen. In Abbildung 3.2 werden die drei vorgestellten Strategien anhand erläuterter Kriterien miteinander verglichen.

Bei der hybriden Gerätestrategie wie auch bei der Strategie mit besucher-eigenen Geräten könnte in Zukunft alternativ zu Native-App-AR Web-AR angewandt werden (siehe Abschn. 2.1.3). Web-AR kann betriebssystemunabhängig entwickelt werden, wodurch sich der Entwicklungsaufwand verringert. Eine Installation, potenzielle Hemmschwelle für Besucher, ist nicht notwendig und Speicherplatzkomplikationen können umgangen werden, was die Zugänglichkeit zur AR-Anwendung weiter erhöht. Zu berücksichtigen ist, dass bei Web-AR fast im gesamten Ausstellungsbereich eine sehr gute Internetverbindung zur Verfügung stehen muss.

Bei heute gängiger Native-App-AR ist je nach Entwicklung nur für den Download durch den Besucher eine Internetverbindung nötig. Die Installationsgröße sollte dabei möglichst gering gehalten werden, damit die App und damit der AR-gestützte Museumsbesuch schnell gestartet werden kann und eine niedrigere Hürde für der Benutzung darstellt. Weniger Speicherbedarf bedeutet gleichzeitig eine höhere Zugänglichkeit durch besucher-eigene Geräte, bei denen die Speicherplatzverfügbarkeit stark variiert.

Bei der Strategie museums-eigener Geräte müssen für Web-AR sprechende Aspekte nicht zwingend berücksichtigt werden und Vorteile von Native-App-AR überwiegen.

3.3.2 Wahl des Trackingverfahrens

Die Auswahl des geeignetsten Trackingverfahrens hängt stark von dem jeweiligen musealen AR-Szenario und der Umgebung, in dem es angesiedelt werden soll, ab und stellt aus technologischer Sichtweise einen entscheidenden Faktor dar.

Museale AR-Szenarien sollen bestehende Ausstellungen unterstützen und gleichzeitig reale Exponate nicht vollständig aus dem Fokus rücken. Sie sind somit oft mit realen Objekten und festen Standorten verknüpft. Visual-SLAM ist ein vielversprechendes Trackingverfahren für AR. Da die Umgebung der musealen Anwendung durch die eben genannten Punkte aber bekannt ist, findet diese leistungsintensive Methode in der Museologie weniger Anwendungsmöglichkeiten bzw. ist deren Einsatz als reines Trackingverfahren nicht notwendig. Trotzdem kann Visual-SLAM durch die dreidimensionale Erfassung des Raumes einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung einer glaubwürdigen AR-Szene leisten.

Markerbasierte Trackingverfahren haben den Nachteil, dass reale Marker in der Umgebung der AR-Anwendung platziert werden müssen. Das ist gerade im musealen Kontext an den Objekten selbst, die im AR-Fokus liegen, oft aus konservatorischen Gründen nicht angemessen. Weiterhin sollten die Marker weder auf den AR-Benutzer noch auf andere nicht-AR-nutzende Besucher einen störenden Einfluss auf das AR-Erlebnis oder die ästhetische Museumserfahrung ausüben. Andererseits müssen Marker gut sichtbar und groß genug sein, damit der AR-Nutzer diese leicht und schnell zur Initialisierung des Trackings scannen kann. Es entsteht somit ein Konflikt zwischen möglichst unauffälligem Platzieren der Marker und hoher AR-Benutzerfreundlichkeit und guter User-Experience. Auch hier kann ein intuitives und

anleitendes User-Interface den Konflikt entschärfen und den Nutzer zu den Markern führen. Diese können so beispielsweise unter Berücksichtigung anderer Leser in bereits bestehende Infotafeln integriert werden.

Mit markerlosen-modellbasierten-Trackingverfahren kann der genannte Konflikt verhindert werden. Für den Besucher ist es noch intuitiver möglich, das Tracking und somit AR zu starten, indem er sein AR-Gerät direkt auf das im AR-Fokus liegende Objekt richtet. Die bestehende museale Umgebung muss nicht modifiziert werden und beeinflusst nicht das Museumserlebnis anderer Besucher. Die 3D- oder 2D-Modelle, die als Anker dienen, können unter anderem Structure-from-Motion-Scans realer Exponate oder schon vorhandene Abbildungen anderer museumspädagogischer Werkzeuge sein.

Positionsbasierte Trackingverfahren können empfangsbedingt in den meisten Fällen nur in Freilichtmuseen, in denen es aber auch Einschränkungen gibt (siehe Abschn. 2.1.1), robuste Ergebnisse liefern. Denkbar ist der Einsatz bei musealen AR-Szenarien, bei denen eine exakte Platzierung nicht unbedingt notwendig ist, um dem Besucher das zu vermittelnde Wissen trotzdem noch plausibel und immersiv zu zeigen. Beispielsweise ist es bei virtuellen Gebäuderekonstruktionen mit AR nicht immer entscheidend, wenn sie um wenige Meter verschoben sind, aber sich trotzdem gut und unter Berücksichtigung real vorhandener Objekte in die Umgebung einfügen. AR-Szenarien, die Objekte in größerer Entfernung platzieren, wie Annotierungen von Points-of-Interest in weitläufigen archäologischen oder musealen Parks, eignen sich ebenfalls aufgrund der nicht notwendigen exakten Genauigkeit für positionsbasierte Trackingverfahren. Ein nicht-museales Beispiel ist die Anwendung PeakFinder, welche anhand von GPS-, Höhen- und GIS-Daten Berge in der Umgebung des Nutzers annotiert¹.

Für Trackingverfahren die mit realen Ankern, ob Markern, 2D- oder 3D-Modellen arbeiten, ist es wichtig, dass ausreichend Merkmale für Registrierung und Tracking identifiziert werden. Dazu ist die Materialität und bei 3D-Objekten auch die Form von Bedeutung. Nicht jedes Objekt eignet sich als AR-Anker, sowie aber auch unterschiedliche Natural-feature-Algorithmen unterschiedlich robust Merkmale extrahieren und beschreiben. Stark glänzende, spiegelnde oder transparente Objekte eignen sich oft wenig als Anker und würden auch bei einem SfM-Scan oder Visual-SLAM Probleme bereiten. Je matter die Oberfläche, desto besser ist demnach das Ergebnis. Museumsobjekte mit monochromer Farbgebung und geringer farblicher Varianz zu ihrem Hintergrund können ebenfalls schwieriger getrackt werden. Auch wechselnde Beleuchtungen der Anker können Auswirkung haben.

3D-Anker sollten geometrisch komplex genug sein, um sie leichter von anderen Objekten in der Umgebung unterscheiden zu können. Einfache Formen können leicht verwechselt werden. Ebenso kann die Ausrichtung eines 3D-Ankers verwechselt werden, wenn dieser viel Symmetrie beinhaltet. Abwechslungsreiche Geometrie sorgt für besseres Tracking. Jedoch muss, wie schon in Abschnitt 2.1.2 erwähnt, die Polygonanzahl überwacht werden, um eine angemessene Datenmenge und Rechenleistung zu erhalten.

Ein weiterer Faktor, der berücksichtigt werden muss, sind mögliche physische Veränderungen der realen Anker eines Trackingsystems, welche die erfolgreiche Registrierung und das

¹<https://www.peakfinder.org/de/mobile/> [zuletzt besucht am 07.04.2021]

anschließende Tracking negativ beeinflussen können. Das betrifft vor allem Objekte, die als 3D-Anker dienen sollen. Bei vielen Exponaten in Museen sind physische Veränderungen aus konservatorischen und ethischen Gründen nicht oft der Fall, es kann jedoch Ausnahmen geben, wenn Objekte noch aktiv genutzt werden oder beweglich sind. Nicht starre Exponate sollten in einer gleichbleibenden Pose ausgestellt werden und bewegliche Teile können, wenn möglich, vor einem 3D-Scan entfernt werden, damit hauptsächlich der starre Teil eines Objektes sicher registriert und getrackt wird. Insgesamt betrachtet, sollte die Übereinstimmung des realen Ankers mit der dem Trackingsystem bekannten Referenz so hoch wie möglich sein, um ein zuverlässiges Tracking zu gewährleisten.

Neben diesen genannten physischen Veränderungen eines Ankers, wirken sich auch Verdeckungen durch andere Besucher oder Gegenstände auf das Tracking aus. Marker sind anfälliger für Verdeckungen als Merkmalsextrahierungen. Je nach eingesetztem Algorithmus muss ein gewisser Anteil des Ankers zu sehen sein, um ihn registrieren zu können. Damit das der Fall ist, können dazu weitere ortsbezogene Faktoren einbezogen werden.

3.3.3 Ortsbezogene Faktoren

In erster Linie ist zu sagen, dass AR auf mobilen Geräten, ob museums-eigen oder besucher-eigen, im Allgemeinen ortsungebunden ist. Durch SLAM-Ansätze können vollkommen unbekannte Umgebungen gescannt und AR-Inhalte somit fast überall platziert werden. Da museale Anwendungsszenarien aber häufig spezifische reale Objekte mit festem Standort ansprechen, ob Ausstellungsstücke, archäologische Stätten, oder Architektur, bindet es auch die AR-Anwendungen an diese Standorte, welche wiederum unterschiedliche Besonderheiten aufweisen können.

Diese Besonderheiten oder Faktoren beeinflussen später die Wahl des AR-Geräts, des eingesetzten Trackingverfahrens und die Entwicklung der Anwendung. Zudem kann generell entschieden werden, wie geeignet ein Ort innerhalb eines Museum ist, um das größtmögliche Potenzial von AR auszuschöpfen und somit die Vorteile gegenüber anderen Präsentationsmöglichkeiten deutlich werden zu lassen. Allgemein ist bezüglich des Raumbedarfs zunächst zu sagen, dass AR einen Raumgewinn darstellt, da Informationen ergänzend zum realen Objekt virtuell gezeigt werden können, sprich keinen zusätzlichen realen Raum benötigen. Dennoch ist ein entscheidender Faktor für die Einrichtung einer AR-Anwendung, der zur Verfügung stehende reale Raum bzw. die Umgebung, z. B. hinsichtlich der Bewegungsfreiheit um das mit AR zu bereichernde Objekt oder Gebiet.

AR registriert die virtuell hinzugefügten Objekte im dreidimensionalen Raum, was den Benutzer dazu animiert, sich zu bewegen und die Objekte und die Szene von allen Seiten und aus allen Perspektiven zu betrachten. Je freier ein Objekt platziert ist, ob real oder virtuell, desto besser kann sich die Wirkung von AR entfalten und desto sicherer kann sich ein Besucher um das Objekt herumbewegen. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, auch die Laufwege zu prüfen und der eventuellen verminderten Aufmerksamkeit bzw. durch die AR-Anwendung teils abgelenkten Aufmerksamkeit anzupassen und Hindernisse auszuschließen.

Neben dem Platz und der Bewegungsfreiheit ist auch die reale Zusammensetzung der Umgebung von Bedeutung. Dabei muss beachtet werden, ob reale Elemente die AR-Anwendung durch Verdeckungen beeinträchtigen. Verdeckungen und Überlagerungen sind wichtige Kriterien für eine immersivere und glaubwürdigere AR-Erfahrung. Elemente mit gleichbleibenden Standorten, wie Ausstellungsstücke, Ausstellungsmöbel, Architektur oder die mit AR angereicherten Objekte selber, sind vorhersehbare, planbare Verdeckungen. Sie können bereits bei der Anwendungsentwicklung mit eingeplant werden. Durch beispielsweise fest verortete Phantomobjekte, die den realen Elementen entsprechen, können so Verdeckungen bewerkstelligt werden. Verdeckungen durch andere, sich bewegende Besucher oder den Benutzer selbst sind nicht exakt vorhersehbar und dementsprechend schwieriger umsetzbar. Solche Verdeckungen können auch Marker oder Anker betreffen und die Wahl und Umsetzung des Trackingverfahrens beeinflussen (siehe Abschn. 3.3.2).

AR kann auch bewusst auf Verdeckungen verzichten, um dem darzustellenden Objekt mehr Raum zu geben und dem Besucher einen freien Blick auf das Objekt zu bieten. Da bei AR virtuelle Inhalte stets über den aufgenommenen Videostream gelagert werden, liegen sie ohne weitere Tiefenanalyse der Umgebung, und sofern sie sich nicht gegenseitig verdecken, immer im Vordergrund. Dem AR-Benutzer ist es also möglich, die virtuellen Inhalte störungsfrei zu betrachten. Auch wenn es nützlich klingt, büßt die AR-Anwendung dadurch an Glaubwürdigkeit ein. Im Allgemeinfall sollten Verdeckungen durch Besucher daher in einem bestimmten Umfang beachtet werden, aber eine individuelle Betrachtung jedes musealen AR-Szenarios kann eine Ausnahme bestätigen.

Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass zum einen geprüft werden muss, wie sehr der Standort und seine Umgebung Veränderungen unterworfen ist und was genau sich ändert und Einfluss auf die AR-Anwendung haben könnte. Zum anderen und analog dazu muss kontrolliert werden, welche Bestandteile der Umgebung mit in die Anwendung integriert werden müssen.

Unterschiede für AR-Anwendungen ergeben sich auch bzgl. der realen Beleuchtung, genauer gesagt, ob diese Tageslicht oder künstliche Lichtquellen beinhaltet. Standorte können danach unterteilt werden in „Standorte im Außenbereich“ und in „Standorte im Innenbereich mit und ohne Tageslicht“. Gerade bei im Außenbereich liegenden AR-Szenarien in Freilichtmuseen, Museumsinnenhöfen oder sonstigen im Außenbereich liegenden Orten können weitere zu beachtende Herausforderungen auftreten. Vor allem wechselnde Lichtverhältnisse spielen dabei eine wichtige Rolle und werden deshalb im nächsten Abschnitt detaillierter behandelt.

3.3.4 Beleuchtungskonzepte

Museen haben und brauchen gute Beleuchtungskonzepte, um die ästhetischen Erlebnisse der Besucher zu optimieren, ohne dabei die Erhaltung der Exponate zu beeinträchtigen (Scuella u. a. 2004). Natürliches Licht hat einen wesentlichen Strahlungsanteil ultraviolett Lichts, das einen schädlichen Effekt z. B. auf die Farben von Exponaten haben kann und deren Erhaltung gefährdet (Hoyo-Meléndez, Mecklenburg und Doménech-Carbó 2011). Deshalb sollte

3 Museen als Anwendungsbereich für AR

der Einfluss natürlichen Lichts zum Schutz der Exponate möglichst gering gehalten und z. B. in musealen Innenräumen mit lichtempfindlichen Exponaten ausgeblendet werden.

Ein gutes Beleuchtungskonzept ist ebenso für AR mit ihren virtuellen Exponaten und Inhalten wichtig. Es erklärt sich von selbst, dass auf den Aspekt „Schädigung von Exponaten durch natürliches Licht“ bei virtuellen Objekten keine Rücksicht genommen werden muss. Während die ästhetischen Erlebnisse auch hier optimiert werden sollen, ist statt Erhaltung der Exponate vor allem eine an die Umgebung angepasste Beleuchtung von hoher Bedeutung. Dies steigert die Glaubwürdigkeit und immersive Wirkung der AR-Anwendung.

Die wichtigsten Bedürfnisse eines Besuchers, welche die Beleuchtung und die ästhetischen Erlebnisse betreffen, sind die Klarheit der Exponatformen und die Genauigkeit der Exponatfarben (Kesner 1993). Gleiches betrifft dementsprechend auch die virtuellen AR-Inhalte. Trotzdem sind museale Beleuchtungskonzepte verschieden und werden auf die gewünschte Betrachtungsatmosphäre und an die Dramatik zur Rezeptionsunterstützung der Ausstellung angepasst (Schielke 2019). Ist ein Konzept entwickelt, bleiben die Lichtquellen meistens konstant an derselben Position und Abweichungen in der Beleuchtung sind selten, solange das wechselnde natürliche Licht nicht mit integriert wurde. Solch konstante Lichtverhältnisse sind vorteilhaft für AR-Anwendungen, da das virtuelle Beleuchtungskonzept der Szene das Reale kopieren kann und die rechenintensive Lichtschätzung der Umgebung in Echtzeit eingespart wird. Andersherum muss bei gravierend ausfallenden Änderungen des realen Beleuchtungssetups das Virtuelle manuell mit angepasst werden.

Weniger konstante und somit schlechter kontrollierbare Lichtverhältnisse bestehen, wenn die reale Szene durch natürliches Licht beleuchtet wird. Das ist bei Szenarien der Fall, die sich unter freiem Himmel befinden oder die in Innenräumen Exponate präsentieren, die dem natürlichen Tageslicht ausgesetzt werden dürfen. Die bedingt durch das natürliche Licht auftretenden Schwankungen sollten im virtuellen Beleuchtungskonzept berücksichtigt und die virtuelle Beleuchtung an die Umgebung angepasst werden. Das kann durch verschiedene Verfahren der Lichtschätzung erfolgen, wie in Abschnitt 2.1.1 kurz beschrieben.

Lichtschätzung ist nicht bei allen augmentierten Inhalten sinnvoll. Virtuelle Objekte, die nicht reale Objekte abbilden sollen, sondern als didaktische und pädagogische Mittel hinzugefügt werden (z. B. Text-Overlays, Pfeile, Grafiken), benötigen dementsprechend auch keine an die Realität angepasste Beleuchtung. Diese könnte durch Schattenwürfe oder überbelichtete Stellen sogar nachteilig sein und didaktische Ziele verfehlen.

Das reale museale Beleuchtungskonzept hat Einfluss auf die Qualität der AR-Erfahrung. Mangelhafte Ausleuchtung und ungünstige Schatten, welche die Merkmalsextraktion und Formwahrnehmung verfälschen können, beeinträchtigen die Stabilität der meisten Trackingverfahren. Es kann gesagt werden, je besser die im AR-Fokus liegenden Objekte und Umgebungen ausgeleuchtet sind, desto robuster ist die AR-Anwendung.

Die Abbildung 3.3 gibt eine inhaltliche Übersicht zum Kapitel 3 und zeigt wesentliche Entscheidungskriterien für museale AR-Anwendungen.



Abbildung 3.3: Wesentliche Entscheidungskriterien für museale AR-Anwendungen.

4 AR-Anwendung Kharakhorum Museum

Es wurde erläutert, wie AR als museumspädagogisches Werkzeug eingesetzt werden kann, um alten und neuen Herausforderungen entgegenzutreten und das Museum gegenwartstreuer zu gestalten. Am Kharakhorum Museum ist solch ein AR-Einsatz für die weitläufige museale Landschaft ebenfalls ein geeignetes Mittel. Die kuratorische Skizze von Rohland (2020) enthält Überlegungen zu verschiedenen potenziellen AR-Anwendungsfällen für das UNESCO-Welterbe Orchontal, die anhand der im vorherigen Kapitel analysierten kuratorischen und technischen Anforderungen an museale AR-Anwendungen diskutiert werden.

4.1 Grundkonzept

Die verschiedenen Anwendungsfälle sollten Teil einer vereinenden AR-Anwendung sein, die das Museum seinen Besuchern für eine intensivere und informativere Museumserfahrung anbieten kann. Für einen guten Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten und für eine einfache Navigation zwischen ihnen, ist eine über positionsbasierte AR realisierbare Verortung der AR-Standorte in Kombination mit einer standortbasierten Karte nützlich und sorgt für Benutzerfreundlichkeit. Dies bietet gleichzeitig die Basis für einen nach Rohland (2020) denkbaren Anwendungsfall, bei dem bedeutende archäologische Fundorte und Landmarken des Orchontals mittels AR und GPS in der Umgebung verortet und beschrieben werden. Eine zusätzlich aufrufbare Karte sorgt für mehr Übersichtlichkeit.

Bei der Wahl der AR-Systeme sprechen einige Punkte für besucher-eigene Geräte. Der Außenbereich des ersten Freilichtmuseums der Mongolei (Rohland 2020) mit Tempel und Schildkröte ist jederzeit zugänglich und auch ohne Besuch des Museumshauptgebäudes kostenlos zu besichtigen. Eine nur im Museumsgebäude mögliche Ausleihe von museums-eigenen AR-Geräten ist dahingehend ungünstig und würde nicht alle Besucher erreichen. Gleichzeitig bedingt dieselbe Gegebenheit eine Bewerbung der AR-Anwendung direkt an den Standorten der einzelnen AR-Szenarien, um ebenfalls ein breites Publikum anzusprechen. Das kann über weitere Informationstafeln oder eine Ergänzung bestehender Schautafeln und QR-Codes, die zur Internetseite des Museums oder direkt zum Download führen, erreicht werden. Die aktuelle Internetseite des Museums müsste dazu noch deutlich besser für die Nutzung auf mobilen Geräten angepasst werden.

Damit die Realisierbarkeit des AR-Projekts im Rahmen des Museumsetats bleibt, ist die Wahl von besucher-eigenen Geräten erneut zu bevorzugen. Möglich wäre auch die hybride Form

mit einem kleinen Angebot von museums-eigenen Geräten nur für die Anwendungsfälle im Museumshauptgebäude.

Entscheidend für das Kharakhorum Museum ist die Bereitstellung von flächendeckend kostenlosem Internetzugang, um die Barrierearmut der AR-Benutzung zu erhöhen. Gerade Touristen, die oft auf WLAN angewiesen sind, bleibt der Zugriff auf die AR-Anwendung über ihr privates Endgerät sonst verwehrt.

4.2 Anwendungsfall “Die große Halle”

Der Anwendungsfall befasst sich mit der wiedererrichteten Plattform des großen Tempels von Karakorum (siehe Abschn. 2.3). Da eine reale Rekonstruktion des Tempels nicht in Frage kommt, soll mit AR eine virtuelle Rekonstruktion auf die Plattform gerendert werden. Dem Besucher und AR-Nutzer soll dadurch ein vermutetes Aussehen und die ursprüngliche Monumentalität des Gebäudes vermittelt werden (Rohland 2020).

Weitere kuratorische Anforderungen bestehen nach Rohland (2020) in der Wissensvermittlung. Sie soll neben den visuellen Informationen noch durch aufrufbare AR-Text-Overlays mit zusätzlichen Erklärungen ergänzt werden. Ebenso wäre eine Animation, die das Innere des Bauwerks und die gesamte Konstruktionsweise mit Außenwänden und Dach zeigt, wünschenswert.

In der Ausstellung des Kharakhorum Museums und vor Ort an der Tempelplattform sind bereits Informationen zu dem Tempel abrufbar. Die vorhandenen museumspädagogischen Werkzeuge in Form von Schautafeln und „Geschichtsfenstern“ müssen wie die Informationen, die der Besucher möglicherweise bereits im Museum erhalten hat, von der AR-Anwendung berücksichtigt werden. Neuere archäologische Erkenntnisse lassen vermuten, dass der Tempel anders ausgesehen hat, als in der auf archäologischen Forschungen basierenden visualisierten Theorie im Kharakhorum Museum gezeigt. Die Unterschiede zur Tempel-Rekonstruktion in der AR-Anwendung müssen dem Besucher deutlich erklärt werden, um Verwirrung und Fehlinformationen zu vermeiden. Auch die neue Rekonstruktion ist weiterhin nur eine teilweise gesicherte Annahme und kann sich mit dem Forschungsstand ändern, was ebenso dem Besucher klar gekennzeichnet werden muss.

Technologische Herausforderungen sind die Größe der gesamten AR-Szene und die genaue Platzierung des virtuellen Tempels auf der Plattform. Die Größe des Tempels und die freie Lage im Orchontal mit durchgängig sehr gutem GPS-Empfang sprechen für den Einsatz von positionsbasiertem Tracking. Der AR-Radius, in dem der Tempel virtuell gesehen werden kann, wäre deutlich größer als bei anderen Trackingverfahren, da kein realer Anker an einer bestimmten Position von der Kamera des AR-Geräts gescannt werden muss. Denn gerade aus etwas Entfernung zur Plattform verdeutlicht sich dem Besucher noch mehr die Monumentalität des Tempels und es wäre überhaupt erst möglich ihn vollständig zu sehen. Problematisch bei einem positionsbasierten Ansatz ist die ziemlich exakte Platzierung, die durch die Plattform vorgegeben wird. Verschiebungen des Modells auf oder von der Plattform könnten gerade aus der Nähe betrachtet die immersive Wirkung der AR deutlich reduzieren.



Abbildung 4.1: Nahansicht der rekonstruierten Tempelplattform mit einem der „Geschichtsfenster“, das rechts im Bild zu sehen ist. Bei einem vor-Ort-Test muss die Eignung als 3D-Anker geprüft werden (Foto von Hendrik Rohland).

Alternativ ist die Nutzung von markerlosem-modellbasiertem Tracking denkbar, sowohl mit 2D- wie auch mit 3D-Anker. 2D-Anker könnten auf den Schautafeln gezeigte Bilder oder Grafiken sein. Nachteilig bei 2D-Ankern ist der beschränkte Zugang zur AR, die nur dort an den Schautafeln gestartet werden könnte. Probleme können auch auftreten, wenn sich der Benutzer frei um die gesamte Plattform bewegt, wozu die Anwendung ausdrücklich anregt. Der Anker bleibt damit nicht im Sichtfeld der Kamera und führt leichter zu Trackingverlust. Für erneute Registrierung müsste der Besucher immer wieder zurück zur Schautafel, was nicht der angestrebten Benutzerfreundlichkeit entspricht.

Als 3D-Anker kommt die Tempel-Plattform in Frage und könnte die Probleme der 2D-Anker ausgleichen. Sie befindet sich im Zentrum der AR-Szene und wäre bei Betrachtung der virtuellen Rekonstruktion deutlich häufiger im Sichtfeld der Kamera. Bei erfolgreichem Tracking, das von allen Richtungen gestartet werden könnte, würde so die höchste Genauigkeit der Platzierung erreicht werden. Das benötigte 3D-Modell der Plattform kann mit einem SfM-Scan bei bedecktem Himmel, um schattige und überbelichtete Flächen zu vermeiden, erstellt werden. Wie zuverlässig das Tracking der Plattform arbeitet, muss direkt vor Ort getestet werden. Die wenig komplexe, flache aber breite Form, die gleichmäßige helle Farbgebung und vorhandene transparente, reflektierende Elemente stellen keine optimalen Bedingungen für einen 3D-Anker dar und müssen getestet werden, um über das Trackingverfahren abschließend entscheiden zu können (siehe Abb. 4.1).

Zur Realisierung der gewünschten Animation würde der Bereich AR verlassen werden.

4.3 Anwendungsfall “Schildkröte und Inschriftenstele”

Das Hauptelement dieses Anwendungsfalls ist die in Abschnitt 2.3 beschriebene steinerne Schildkröte mit ihrer nur noch in Fragmenten erhaltener Inschriftenstele. Durch AR soll dem Besucher das ursprüngliche Volumen und die Form der Stele verdeutlicht werden. Dazu wird

4 AR-Anwendung Kharakhorum Museum



Abbildung 4.2: Die rekonstruierte Tempelplattform mit Schautafeln (rechts) und die frei von allen Seiten zugängliche Schildkröte im Vordergrund (Foto von T. Batbayar).

die Stele digital rekonstruiert und als 3D-Modell in der Anwendung wieder auf dem Rücken der Schildkröte platziert (Rohland 2020).

Aus kuratorischer Sicht ist es hier wünschenswert, zusammen mit der Stele über AR zusätzliche Informationen und eine Übersetzungsmöglichkeit der Inschrift für den Besucher bereitzustellen (Rohland 2020), da sich außer im 1,5 km entfernten Kharakhorum Museum selbst, vor Ort bis jetzt sonst keine Hinweise oder Informationen zu der Schildkröte und ihrer Bedeutung befinden. Da nicht vollständig geklärt ist, wie die Stele wirklich aussah, ist es wichtig, sie eindeutig als hypothetische Rekonstruktion zu kennzeichnen und den Besucher über den aktuellen Stand der Forschung zu informieren. Dies könnte über unterschiedliche Visualisierungen der bereits gefundenen Stelen-Fragmente und der noch fehlenden erreicht werden. Sollten fehlende Fragmente in Zukunft gefunden werden oder andere Forschungsergebnisse zu neuen Ansichten führen, muss die Visualisierung angepasst werden.

Aus technologischer Sicht bietet dieser Anwendungsfall gute Bedingungen für den Einsatz von AR. Die Schildkröte steht einzeln und ohne nennenswerte Objekte in direkter Nachbarschaft in der Weite des Orchontals. Die nächsten größeren Strukturen sind die Tempelplattform und ihre Informationstafeln, liegen aber außerhalb des für die Anwendung relevanten AR-Radius (siehe Abb. 4.2).

Durch die exponierte Lage ist es für den Benutzer möglich, sich in einem 360°-Radius um die Schildkröte mit virtueller Stele zu bewegen und sie von jeder Seite zu betrachten. Bis auf die Schildkröte selbst müssen zudem keine stationären Verdeckungen berücksichtigt werden, welche die User-Experience beeinträchtigen würden. Verdeckungen können hier wie bei vielen anderen Anwendungen durch andere Menschen oder den Benutzer selbst auftreten.

Sensorbasiertes Tracking kann schnell als geeignetes Verfahren ausgeschlossen werden, da

die Anwendung eine bis auf den Zentimeter hohe Genauigkeit aufweisen muss, bei der die Stele exakt in das quadratische Loch auf dem Rücken der Schildkröte platziert wird. Normale GPS-basierte Methoden können diese Genauigkeit nicht erbringen. Durch die wetterausgesetzte Lage unter freiem Himmel und fehlenden, angebrachten Möglichkeiten zur Anbringung von Markern, erweisen sich auch markerbasierte Trackingverfahren als nachteilig. Stattdessen eignet sich der markerlose, modellbasierte Ansatz deutlich besser, bei dem die Schildkröte als Anker genutzt werden kann und keine Modifizierung des AR-Standortes notwendig ist.

Wird die Schildkröte als 3D-Anker für AR genutzt, können an ihr auftretende, temporäre Veränderungen dazu führen, dass sie nicht mehr robust als Anker zu erkennen ist und die gewünschte Trackingstabilität beeinträchtigt wird. Da die Schildkröte noch immer Ort von Verehrungen und Opfern der einheimischen Bevölkerung ist, werden häufig farbige Stoffbänder um ihren Hals gebunden oder Steine auf ihr abgelegt¹. Farbabweichungen durch Opfern sind auch mögliche Veränderungen.

Diese temporären Veränderungen sind auch bei der Anfertigung eines detailgetreuen 3D-Modells der Schildkröte durch ein Photogrammetrie-Verfahren zu beachten, welche bei Wahl des markerlosen, modellbasierten Trackingverfahrens notwendig wird. Für die Aufnahme des Bildmaterials sollten alle hinzugefügten Objekte respektvoll entfernt werden, damit nur die Schildkröte selbst im 3D-Modell inbegriffen ist. Der matte Stein begünstigt die Anfertigung ebenso wie ein tagsüber bedeckter Himmel, um direktes Licht und harte Schatten zu vermeiden.

4.4 Weitere Anwendungsmöglichkeit und Aussicht

Drei weitere Anwendungsfälle sind aus kuratorischer Sichtweise nach Rohland (2020) wünschenswert, von denen hier noch einer knapp auf seine Anforderungen und Umsetzungsmöglichkeiten überprüft wird.

Zur Dauerausstellung des Kharakhorum Museums gehört ein etwa 4 × 4 Meter großes Modell der ehemaligen Stadt Karakorum (siehe Abb. 4.3), bei dem bestehende didaktische Schwächen mit AR kompensiert werden könnten. Beschriftungen am Rand des Modells sind schwer zuzuordnen und das Modell ist nicht auf dem aktuellen Stand der Forschungen (Rohland 2020).

Aus technologischer Sicht bietet das Stadtmodell gute Bedingungen für AR. Nicht vorhersehbare Verdeckungen treten kaum auf und vorhersehbare können durch Phantomobjekte bewerkstelligt werden. Herausfordernd kann allerdings die gläserne Umzäunung des Modells sein, wofür ein spezieller Shader notwendig wird, um virtuelle Objekte weiterhin immersiv erscheinen zu lassen, falls sie durch das Glas betrachtet werden. Weiterhin ist die Beleuchtung konstant und ein Großteil der zu augmentierenden Inhalte würde ohnehin keine Lichtschätzung benötigen, weswegen auf diese verzichtet werden kann.

¹Mündliche Mitteilung von Hendrik Rohland vom 11.03.2021

4 AR-Anwendung Kharakhorum Museum



Abbildung 4.3: Stadtmodell von Karakorum im Kharakhorum Museum mit Glasumrandung und Infoschild in der vorderen Ecke (Foto aus DAI Berlin (2020)).

Für exaktes Tracking ist ein markerloser-modellbasierter Ansatz sinnvoll und würde auch die Ästhetik des Stadtmodells nicht durch Marker beeinträchtigen. 3D-Anker müssen einen Mindestanteil des Bildschirms ausfüllen, um erkannt zu werden. Dies erfordert einen 3D-Scan des gesamten Stadtmodells und nicht nur von einzelnen, AR-relevanten Gebäuden oder Flächen, die auf Grund der Größe des Modells zu weit vom Benutzer entfernt liegen könnten. Die Glaswände sowie bewegliche Infoschilder sollten vorher entfernt werden und können anschließend manuell und simpel als Phantomobjekte nachmodelliert werden.

Neben den zwei in diesem Kapitel ausführlicher analysierten, dem eben kurz angesprochenen und den weiteren von Rohland (2020) denkbaren Anwendungsfällen für das UNESCO-Welterbe Orchontal, hat die geschichtsträchtige Region und das Kharakhorum Museum noch weiteres Potenzial für AR. Das Orchontal bietet aus technischer Sicht aufgrund der Diversität seiner kulturhistorischen Schätze eine Vielfalt an Möglichkeiten für AR-Anwendungen, die für das Kharakhorum Museum ein geeignetes Mittel darstellen, das kulturhistorische Erbe sichtbar werden zu lassen und zu bewahren. Das erklärte Ziel des Museums, Kinder und Jugendliche zu bilden, kann mit AR als zusätzliches museumspädagogisches Werkzeug unterstützt werden.

5 Experimente und Auswertungen

Die in Kapitel 4 auf ihre kuratorischen und technischen Anforderungen analysierten Anwendungsfälle müssen praktisch getestet werden, um daraus erkannte individuelle Herausforderungen zu prüfen und so die Nutzungsfähigkeit und Robustheit für eine mögliche AR-Anwendung des Kharakhorum Museums festzustellen. Für gültige Ergebnisse ist es gerade bei individueller und ortsbezogener musealer AR entscheidend, diese direkt vor Ort zu entwickeln, zu testen und zu bewerten. Da dies aufgrund der entfernten Lage im Ausland nicht realisierbar war, wurde versucht, eines der vorgestellten AR-Szenarien, „Schildkröte und Inschriftenstein“, mit ähnlichen Bedingungen experimentell nachzustellen.

Bei Testobjekten musste auf verfügbare Gegenstände zurückgegriffen werden. Als Ersatz für die originale Steinschildkröte diente eine deutlich kleinere Schildkröte, die aber wie das Original mit dem ganzen Körper auf dem Boden aufliegt und ebenso einen hervortretenden Kopf besitzt, was für das Trackingergebnis entscheidend sein kann. Wichtigste Unterschiede, die Tracking und Benutzererfahrung beeinflussen, sind das fehlende rechteckige Loch auf dem Rücken und das Material, welches statt Stein ein glatterer und somit glänzenderer Ton ist. Gleichzeitig besitzt das Testobjekt aber mehr farbliche Variationen als das Original.

Das Bildmaterial für den Photogrammetrie-Scan der Schildkröte wurde unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1.2 genannten Regeln aufgenommen. Die Rekonstruktion des Schildkröten-Modells mit der Open-Source-Software Meshroom von Alicevision¹ lieferte dementsprechend ein gutes Ergebnis. Aus 97 Fotos konnten im SfM-Schritt 83.181 Punkte ermittelt werden, mit einem verbleibende RMSE von 0,960781 Pixel (siehe Abb. 5.1). Das Meshing ergab ein Modell mit 1.273.738 Vertices und 2.547.334 Faces in Form von Dreiecken. Das Texturing erzeugte 4 Texturen mit einer Auflösung von jeweils 4096×4096 Pixel.

Die Optimierung des 3D-Modells für den AR-Einsatz erfolgte in der ebenfalls als Open-Source vorliegenden Software Blender². Nach einem vollständigen Remeshing, einer Säuberung des Meshs durch Entfernen von überflüssigen Teilen (wie in diesem Fall den Holzstamm, der als Ständer diente) und dem Verschließen von Löchern, damit das Mesh *watertight* ist, besitzt das 3D-Modell der Schildkröte noch 7.875 Vertices und 15.746 Faces.

Durch Texture-Baking entstand eine einzelne Textur mit einer Auflösung von 2048×2048 Pixel. Damit die hohe Detailgenauigkeit des ursprünglichen Modells aus Meshroom visuell erhalten bleibt, wurde mit Normal-Baking eine Normalmap der Schildkröte berechnet (siehe Abb. 5.2).

Die anschließende Entwicklung der Anwendung wurde mit der Game-Engine Unity³ für das

¹<https://alicevision.org/#meshroom> [zuletzt besucht am 07.04.2021]

²<https://www.blender.org/> [zuletzt besucht am 07.04.2021]

³<https://unity.com/> [zuletzt besucht am 07.04.2021]

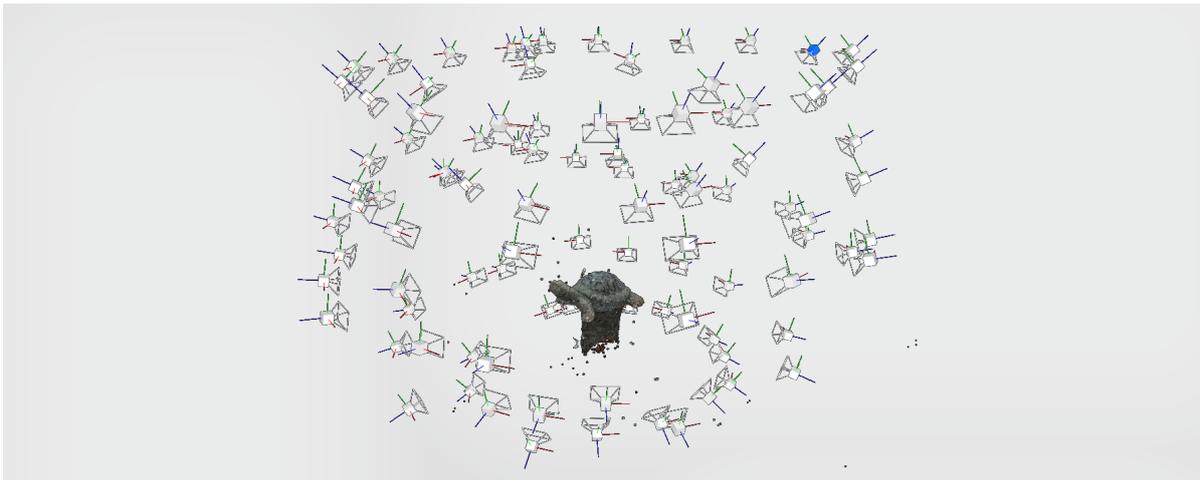


Abbildung 5.1: Ergebnis des SfM-Schritts in Meshroom, mit Ermittlung der 3D-Punkte und der extrinsischen Parameter der Kameras.

Betriebssystem Android realisiert. Für die AR-Funktionalität wurde das SDK Vuforia Engine gewählt, um die darin enthaltene Funktion für markerloses-modellbasiertes Tracking zu nutzen. Mit Vuforias Model-Target-Generator (MTG) ist es möglich, das entwickelte 3D-Modell der Schildkröte in eine Vuforia-Engine-Datenbank zu konvertieren und diese als 3D-Modell-Anker für das Trackingverfahren einzusetzen. Dort kann über einen cloud-basierten deep-learning-Prozess eine Advanced-Datenbank für 360°-Erkennung des Ankers trainiert werden⁴. Letzteres ist bei diesem Anwendungsfall entscheidend, da die Besucher die Schildkröte von allen Seiten erreichen und das Tracking von überall starten können sollten.

Für die experimentelle Anwendung wurde ein einfaches Modell der Inschriftenstele in Blender modelliert. Die Rekonstruktion der Stele von 1346 orientiert sich an einer Replik der Orchon-Inschriften aus dem 8. Jahrhundert, auch Khöshöö-Tsaidam-Denkmäler genannt. Sie wurde nicht in Zusammenarbeit mit fachlichen Experten entworfen und dient hier lediglich als reines Testobjekt. Gleiches gilt für Info-Highlights, die der Benutzer aufrufen kann und deren Texte hier lediglich als Lückenfüller zu sehen sind (siehe Abb. 5.3).

Da die Geometrie und die Position der Schildkröte feststehen, wurde von ihr ein Phantomobjekt hinzugefügt. Die reale Schildkröte verdeckt somit erfolgreich die virtuelle Stele. Am originalen Anwendungsschauplatz tritt diese Verdeckung jedoch erst auf, wenn der Benutzer die Schildkröte von vorne und weit unten betrachtet und sich der Kopf der Schildkröte vor der Stele befindet. Eine größere Rolle spielen die Verdeckungen durch Menschen, die aber zu diesem Zeitpunkt noch nicht für die Anwendung hinzugefügt wurden.

Weitere Tests sollten ergeben, wie robust die Anwendung gegenüber den Veränderungen ist, die an der originalen Schildkröte auftreten. Folgende Veränderungen wurden berücksichtigt: Stoffbänder um den Schildkrötenhals, Steine auf ihrem Rücken, Farb- und Beleuchtungsveränderungen. Getestet wurde die Anwendung auf einem Huawei P20 Pro mit der Androidversion

⁴<https://library.vuforia.com/articles/Solution/model-target-generator-user-guide.html> [zuletzt besucht am 07.04.2021]

5 Experimente und Auswertungen

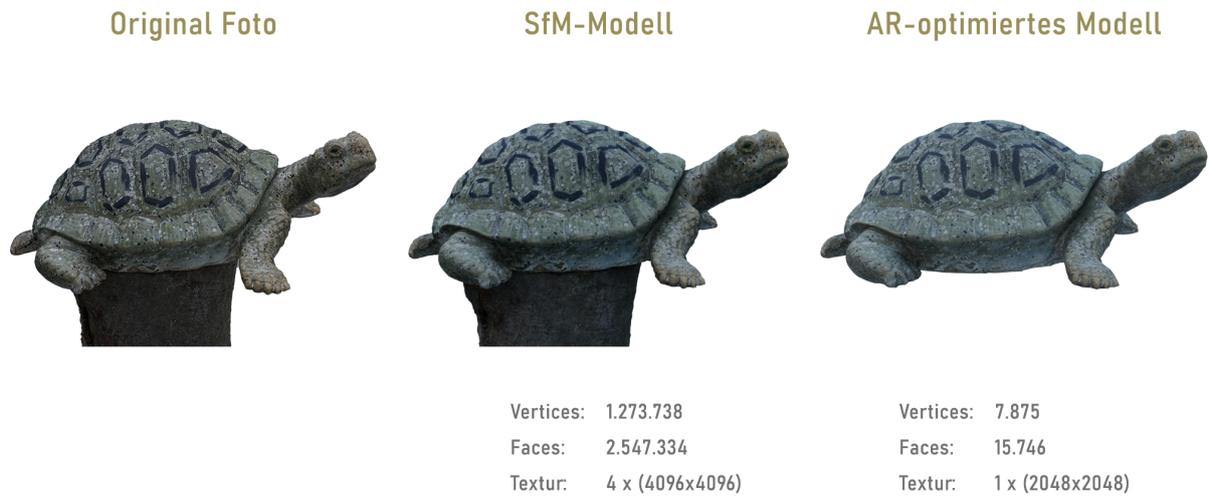


Abbildung 5.2: Vergleich eines ursprünglichen Fotos mit dem fertigen Modell aus der Photogrammetrie-Pipeline von Meshroom und dem mit Blender für AR optimierten Modell.

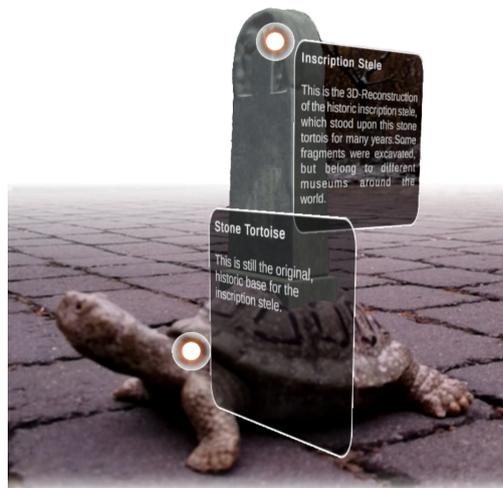


Abbildung 5.3: Platzierung der virtuellen, zu Testzwecken dienenden Stelen-Rekonstruktion auf dem Rücken der Schildkröte. Zusätzlich eine mögliche Umsetzung von Text-Overlays, die der Benutzer zu wichtigen Bereichen des Denkmals aufrufen kann.

5 Experimente und Auswertungen

+ Bänder um den Hals



weiterhin stabiles
Trackingergebnis

+ Farbunterschiede



weiterhin stabiles
Trackingergebnis

+ Steine und starkes,
direktes Licht



weiterhin stabiles
Trackingergebnis

Abbildung 5.4: Ergebnis des Trackingtests. Trotz diverser Veränderungen der Schildkröte, bleibt diese jedes Mal gut als 3D-Anker identifizierbar und das Tracking bleibt stabil.

10. Die Ergebnisse werden in Abbildung 5.4 präsentiert. Die Auswertung der dargestellten Tests zeichnet ein positives Bild bezüglich der Trackingstabilität der Anwendung trotz an der Schildkröte vorgenommener Veränderungen.

Es ist schwierig, die Ergebnisse des AR-Experiments an dem Testobjekt auch auf das Original im Orchontal zu beziehen, da es bei diesem individuellen Anwendungsfall kaum möglich ist, die vor Ort geltenden Bedingungen für AR exakt nachzustellen. Das wäre für eine ausgereifte, benutzertaugliche Anwendung wichtig, da jeder Unterschied neue, andere Einflüsse auf die AR haben kann. Dies betrifft hier vor allem die verschiedene reale Umgebung und den verschiedenen AR-Anker mit dessen Skalierung.

Trotzdem konnten wichtige Erkenntnisse zum Anwendungsfall bezüglich seiner kuratorischen und technischen Anforderungen gewonnen werden, die eine Basis und eine grundlegende erste Vorgehensweise für die Entwicklung einer nicht nur experimentellen Anwendung mit Einbezug der originalen archäologischen bzw. musealen Objekte am originalen Standort bilden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dem Museum steht mit AR ein geeignetes digitales Vermittlungsformat für die Gestaltung von Ausstellungen zur Verfügung. Daraus ergibt sich für das Museum die vielschichtige Aufgabe, kuratorische und technische Möglichkeiten für AR-Anwendungen zu analysieren und gegenüberzustellen, um AR an geeigneten Stellen im Museum vorteilhaft einsetzen zu können. Dieses stellt aufgrund der Komplexität des Themas eine Herausforderung für das Museum dar.

Die Arbeit beschreibt zentrale, auf museale AR-Anwendungen bezogene Aspekte einer kuratorischen und technischen Anforderungsanalyse und definiert Entscheidungskriterien, anhand derer Museen den Einsatz von AR-Anwendungen für ihre Ausstellungen bewerten können. Kapitel 2 stellte verschiedene AR-Geräte und Trackingverfahren vor. Es wurden Methoden benannt, die dazu beitragen, dass AR-Anwendungen robuster, echtzeitfähiger und immersiver werden.

Der Forschungsgegenstand Museum wurde unter dem Aspekt der Dekontextualisierung im Museum und einer sich im Zuge des digitalen Wandels veränderten Gesellschaft betrachtet. Daraus ergeben sich Herausforderungen, denen sich Museen stellen müssen, um auch zukünftig der Aufgabe dienen zu können, als Orte der Bildung und der Vermittlung des Erbes der Menschheit und deren Umwelt aufzutreten.

Abschließend wurde in Kapitel 2 das UNESCO-Weltkulturerbe Orchontal in der Mongolei geografisch und kulturhistorisch eingeordnet. Dieser besondere und geschichtsträchtige Ort verdient eine größere, museale Beachtung und eine gut gestaltete Darstellung und Erläuterung seines wertvollen, kulturhistorischen Erbes. Das im Orchontal liegende Kharakhorum Museum verwaltet und schützt die Kulturerbestätte. Die Exponate und archäologischen Stätten, auch „Die Große Halle“ und die „Schildkröte mit Inschriftenstele“, besitzen Potenzial für den Einsatz von AR.

In Kapitel 3 wurde eine kuratorische und technische Anforderungsanalyse für museale AR-Anwendungen durchgeführt, die Entscheidungskriterien diskutierte, anhand derer museale AR-Anwendungen bewertet und ausgewählt werden können. Es wurde dargestellt, dass AR die Bedürfnisse der digital geprägten Generation erfüllt und deshalb ein geeignetes Mittel zum Erreichen museumspädagogischer Ziele sein kann.

Die kuratorische Analyse beschreibt den Grundsatz, dass AR als ergänzendes und nicht ersetzendes Informationsmedium verwendet werden und in erster Linie der Wissensvermittlung dienen soll. Der unterhaltende Charakter soll nicht dazu führen, dass Wissen falsch vermittelt oder das Museumsobjekt aus dem Fokus gerückt wird, sondern soll vor allem der Motivation und der leichteren Wissensaufnahme dienen. Pädagogisch-Didaktische und wissenschaftliche Aspekte sind also in den Entscheidungs- und Entwicklungsprozess mit einzubeziehen.

AR wurde als geeignetes Werkzeug für die Rekontextualisierung von Objekten beschrieben. AR ermöglicht eine neue Art der Interaktion mit dem musealen Objekt und die wichtige Verbindung zwischen Realität und zusätzlichen virtuellen Inhalten bleibt erhalten. Es kann Rücksicht auf andere Besucher und die bestehende Ausstellung genommen werden.

Die technische Analyse diskutierte vier Aspekte, die den Entscheidungsprozess, sowie die Auswahl und Entwicklung der AR-Anwendung wesentlich beeinflussen: Die Wahl der AR-Systeme, die Wahl des Trackingverfahrens, ortsbezogene Faktoren und Beleuchtungskonzepte.

Bei der Wahl der AR-Systeme wurden die Vor- und Nachteile des Einsatzes museums-eigener und besucher-eigener Geräte sowie der hybriden Form, bei der beide Gerätestrategien vereint werden, erörtert. Die Wahl einer Gerätestrategie hängt u. a. von den finanziellen Möglichkeiten eines Museums ab. Da viele Besucher eigene AR-fähige Geräte besitzen und mit sich führen, ist die besucher-eigene Gerätestrategie für Museen bzgl. der Anschaffungskosten vorteilhaft. Der Vorteil der museums-eigenen Gerätestrategie liegt u. a. in einer einfacheren Anwendungsentwicklung. Beide Strategien haben Nachteile, die man teilweise mit der hybriden Gerätestrategie ausgleichen kann. Jedes Museum muss die Vor- und Nachteile der jeweiligen Gerätestrategie im Kontext seiner individuell zur Verfügung stehenden Ressourcen und Kapazitäten gewichten.

Hinsichtlich der Wahl des Trackingverfahrens wurde analysiert, wie die verschiedenen Trackingverfahren im musealen Kontext eingesetzt werden können, welche Verfahren sich am besten eignen und welche Limitierungen sich ergeben. Wichtig ist, dass nicht jeder Standort und nicht jedes Objekt für eine stabile AR-Anwendung gleich geeignet ist.

Die Analyse des Standortes bzw. der vorhandenen Umgebung sowie der Beleuchtung erfolgte unter dem Aspekt, wie Verdeckungen und Licht die AR-Entwicklung und -Anwendung beeinflussen. Je konstanter die Umgebung und das Licht der realen Szene ist, desto einfacher ist es, eine AR-Anwendung glaubwürdig umzusetzen.

Kapitel 4 analysierte anhand der in Kapitel 3 diskutierten Entscheidungskriterien potenzielle AR-Anwendungsfälle im UNESCO-Weltkulturerbe Orchontal exemplarisch im Hinblick auf die Wahl des Trackingverfahrens und die Wahl des AR-Systems. Für das Kharakhorum Museum spricht der Einsatz von besucher-eigenen Geräten. Denkbar ist auch die hybride Strategie mit einem kleinen Angebot von museums-eigenen Geräten nur für die Anwendungsfälle im Museumshauptgebäude. Für den Anwendungsfall „Die Große Halle“ konnte keine abschließende Aussage zur Wahl eines Trackingverfahrens getroffen werden. Praktische Experimente vor Ort sind hierfür nötig. Für den Anwendungsfall „Schildkröte und Inschriftenstele“ wird markerloses-modellbasiertes Tracking als geeignetes Verfahren begründet.

Die Ergebnisse der Analyse in Kapitel 4 waren Grundlage für eine AR-Umsetzung, wie sie exemplarisch in Kapitel 5 vorgenommen wurde. Dort wurde der Anwendungsfall „Schildkröte und Inschriftenstele“ experimentell umgesetzt. Getestet wurde, ob sich das Ergebnis der theoretischen Analyse auch in der Praxis bestätigt und ob das Tracking trotz Veränderungen an der Schildkröte stabil bleibt. Dies kann in der Auswertung bestätigt werden.

Beides, die Analyse und die experimentelle Umsetzung, hilft, eine reale Umsetzung vor Ort zu planen und eine Basis dafür zu schaffen. Nur eine Anwendungsentwicklung, die das originale

6 Zusammenfassung und Ausblick

Objekt und die originale Umgebung vor Ort einbezieht, kann ein aussagekräftiges Ergebnis liefern.

Zusätzlich zu der in dieser Arbeit aufgestellten Anforderungsanalyse sollte zur Entwicklung, Bewertung und Weiterentwicklung von musealen AR-Anwendungen die Sichtweise des Benutzers bzw. des Museumsbesuchers erfasst und berücksichtigt werden.

Letztlich erfordert die Auseinandersetzung mit dem Thema der musealen AR-Anwendungen eine interdisziplinäre Analyse für jedes Museum, um die Entscheidungskriterien für AR-Anwendungen bezogen auf die technische Qualität, den Bildungsauftrag und die gegebenen Ressourcen individuell gewichten zu können.

Literatur

- Block-Berlitz, Marco (2020). *Warum sich der Dino furchtbar erschreckte Lehrbuch zu Beleuchtung und Rendering mit Java, LWJGL, OpenGL, OpenCV und GLSL*. Berlin: vividus Wissenschaftsverlag.
- DAI Berlin (9. Sep. 2020). *Was geschieht nach der Ausgrabung? Kulturerhalt und Restaurierung*. URL: <https://www.dainst.blog/was-geschieht-nach-der-ausgrabung-kulturerhalt-und-restaurierung/> (besucht am 05.04.2021).
- Deutscher Museumsbund e.V. und Bundesverband Museumspädagogik e.V. (Okt. 2020). *Vision. Bildungsort Museum*. URL: <https://www.museumsbund.de/wp-content/uploads/2020/10/bildungsvision.pdf> (besucht am 04.04.2021).
- Gries, Christian (Dez. 2020). “Digitale Strategien in wissenschaftlichen Sammlungen”. In: *Objekte im Netz*. transcript Verlag, S. 71–78. DOI: 10.14361/9783839455715-005.
- Hageneuer, Sebastian (Feb. 2020). “The Challenges of Archaeological Reconstruction: Back Then, Now and Tomorrow”. In: *Communicating the Past in the Digital Age: Proceedings of the International Conference on Digital Methods in Teaching and Learning in Archaeology (12th-13th October 2018)*. Ubiquity Press, S. 101–112. DOI: 10.5334/bch.h.
- Munkhzul, A. (22. Okt. 2020). *Feature exhibits of Kharakhorum Museum*. Montsame. URL: <https://montsame.mn/en/read/240396> (besucht am 21.03.2021).
- Quick, Stephan (Feb. 2020). “Using Digital Media to Mediate Archaeology in the LVR-Archaeological Park Xanten / LVR-RömerMuseum”. In: *Communicating the Past in the Digital Age: Proceedings of the International Conference on Digital Methods in Teaching and Learning in Archaeology (12th-13th October 2018)*. Ubiquity Press, S. 73–84. DOI: 10.5334/bch.f.
- Rohland, Hendrik (Juli 2020). “Kuratorische Skizze für eine Augmented Reality-Applikation für das Weltkulturerbe Orchontal und Karakorum, Mongolei”.
- silvanos180 (2. Juni 2020). *Da visitare - Review of Chiesa di San Sisto*. URL: <https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-m/1280/1b/5f/05/56/photo8jpg.jpg> (besucht am 06.04.2021).
- SKD (2020). *Raffael und die Madonna. Vom Frühwerk bis zur Meisterschaft*. URL: <https://gemaeldegalerie.skd.museum/ausstellungen/raffael-und-die-madonna/> (besucht am 05.04.2021).

- Dierkes, Julian (24. Juli 2019). *National Pride Without Museums*. English. URL: <http://blogs.ubc.ca/mongolia/2019/proud-mongolia-few-museums-show/> (besucht am 24.03.2021).
- Dörner, Ralf, Wolfgang Broll, Paul Grimm und Bernhard Jung, Hrsg. (2019). *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-58861-1.
- Elmqaddem, Noureddine (Feb. 2019). “Augmented Reality and Virtual Reality in Education. Myth or Reality?” In: *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)* 14.03, S. 234. DOI: 10.3991/ijet.v14i03.9289.
- Franken, Christina, Hendrik Rohland, Ulambayar Erdenebat und Tumurochir Batbayar (2019). “Ergrabene Welten: 40 Jahre archäologische Spurensuche auf vier Kontinenten”. In: Deutsches Archäologisches Institut, KAAK. Kap. Karakorum – Die alte mongolische Hauptstadt im Tal des Orkhon, S. 126–135. URL: <https://books.google.de/books?id=n0vKzQEACAAJ> (besucht am 07.04.2021).
- Qiao, Xiuquan, Pei Ren, Schahram Dustdar, Ling Liu, Huadong Ma und Junliang Chen (Apr. 2019). “Web AR: A Promising Future for Mobile Augmented Reality—State of the Art, Challenges, and Insights”. In: *Proceedings of the IEEE* 107.4, S. 651–666. DOI: 10.1109/jproc.2019.2895105.
- Schielke, Thomas (Jan. 2019). “Interpreting Art with Light: Museum Lighting between Objectivity and Hyperrealism”. In: *LEUKOS* 16.1, S. 7–24. DOI: 10.1080/15502724.2018.1530123.
- Institut für Museumsforschung (2018). *Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2017*. 72.
- Kohle, Hubertus (2018). “Museen digital”. In: DOI: 10.17885/HEIUP.365.515.
- Jung, Timothy Hyungsoo und M. Claudia tom Dieck (Juni 2017). “Augmented reality, virtual reality and 3D printing for the co-creation of value for the visitor experience at cultural heritage places”. In: *Journal of Place Management and Development* 10.2, S. 140–151. DOI: 10.1108/jpmd-07-2016-0045.
- Ozyesil, Onur, Vladislav Voroninski, Ronen Basri und Amit Singer (Jan. 2017). “A Survey of Structure from Motion”. In: arXiv: 1701.08493 [cs.CV].
- Schiele, Marisa (18. Sep. 2017). *Was macht eigentlich ein Kurator?* URL: <https://museums.wissenschaft.de/was-macht-eigentlich-ein-kurator/> (besucht am 03.04.2021).
- Taketomi, Takafumi, Hideaki Uchiyama und Sei Ikeda (Juni 2017). “Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016”. In: *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications* 9.1. DOI: 10.1186/s41074-017-0027-2.
- Lkhagvasuren, Ichinkhorloo (2016). “The Current Status of Mongolia’s Museums: Changes Taking Place in the Practical Activities of Museums Since the 1990s”. In: *New Horizons for*

- Asian Museums and Museology*. Springer Singapore, S. 37–55. DOI: 10.1007/978-981-10-0886-3_3.
- Marchand, Eric, Hideaki Uchiyama und Fabien Spindler (Dez. 2016). “Pose Estimation for Augmented Reality: A Hands-On Survey”. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 22.12, S. 2633–2651. DOI: 10.1109/tvcg.2015.2513408.
- Roberto, Rafael Alves, João Paulo Lima, Roberta Cabral Mota und Veronica Teichrieb (2016). “Authoring Tools for Augmented Reality: An Analysis and Classification of Content Design Tools”. In: *Design, User Experience, and Usability: Technological Contexts*. Springer International Publishing, S. 237–248. DOI: 10.1007/978-3-319-40406-6_22.
- Billinghamurst, Mark, Adrian Clark und Gun Lee (2015). “A Survey of Augmented Reality”. In: *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction* 8.2-3, S. 73–272. DOI: 10.1561/11000000049.
- Hoyo-Meléndez, Julio M. del, Marion F. Mecklenburg und María Teresa Doménech-Carbó (März 2011). “An evaluation of daylight distribution as an initial preventive conservation measure at two Smithsonian Institution Museums, Washington DC, USA”. In: *Journal of Cultural Heritage* 12.1, S. 54–64. DOI: 10.1016/j.culher.2010.05.003.
- Leutenegger, Stefan, Margarita Chli und Roland Y. Siegwart (Nov. 2011). “BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints”. In: *2011 International Conference on Computer Vision*. IEEE. DOI: 10.1109/iccv.2011.6126542.
- Rublee, Ethan, Vincent Rabaud, Kurt Konolige und Gary Bradski (Nov. 2011). “ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF”. In: *2011 International Conference on Computer Vision*. IEEE. DOI: 10.1109/iccv.2011.6126544.
- Seville Principles (2011). *The Seville Principles. International Principles of Virtual Archaeology*. URL: <http://smartheritage.com/wp-content/uploads/2015/03/FINAL-DRAFT.pdf> (besucht am 06.04.2021).
- London Charter (2009). *The London Charter for the Computer-Based Visualisation of Cultural Heritage*. URL: <https://www.londoncharter.org/downloads.html> (besucht am 06.04.2021).
- ICOM (2007). *Museum Definition*. URL: <https://icom.museum/en/resources/standards-guidelines/museum-definition/> (besucht am 04.04.2021).
- Bay, Herbert, Tinne Tuytelaars und Luc Van Gool (2006). “SURF: Speeded Up Robust Features”. In: *Computer Vision – ECCV 2006*. Springer Berlin Heidelberg, S. 404–417. DOI: 10.1007/11744023_32.
- Bimber, Oliver und Ramesh Raskar (Aug. 2005). *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. A K PETERS LTD (MA). 392 S. URL: https://www.ebook.de/de/product/5530329/oliver_bimber_ramesh_raskar_spatial_augmented_reality_merging_real_and_virtual_worlds.html (besucht am 07.04.2021).

- Scuella, Michael, Israel Abramov, James Gordon und Steven Weintraub (2004). “Museum lighting: Optimizing the illuminant”. In: *Color Research & Application* 29.2, S. 121–127. DOI: 10.1002/col.10231.
- Burdea, Grigore (2003). *Virtual reality technology*. eng. Second edition..
- Zhang, Z. (2000). “A flexible new technique for camera calibration”. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22.11, S. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718.
- Kato, H. und M. Billinghurst (1999). “Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system”. In: *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR’99)*. IEEE Comput. Soc. DOI: 10.1109/iwar.1999.803809.
- Azuma, Ronald T. (1997). “A survey of augmented reality”. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 6.4, S. 355–385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355.
- Milgram, Paul, Haruo Takemura, Akira Utsumi und Fumio Kishino (Dez. 1995). “Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum”. In: *Telemanipulator and Telepresence Technologies*. Hrsg. von Hari Das. SPIE. DOI: 10.1117/12.197321.
- Milgram, Paul und Fumio Kishino (1994). “A taxonomy of mixed reality visual displays”. In: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77.12, S. 1321–1329.
- Kesner, C.W. (Jan. 1993). “Museum Exhibition Lighting: Visitor Needs and Perceptions of Quality”. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 22.1, S. 45–54. DOI: 10.1080/00994480.1993.10748017.
- Steuer, Jonathan (Dez. 1992). “Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence”. In: *Journal of Communication* 42.4, S. 73–93. DOI: 10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x.
- Fischler, Martin A. und Robert C. Bolles (Juni 1981). “Random sample consensus”. In: *Communications of the ACM* 24.6, S. 381–395. DOI: 10.1145/358669.358692.
- UNESCO (Nov. 1972). *CONVENTION CONCERNING THE PROTECTION OF THE WORLD CULTURAL AND NATURAL HERITAGE*. UNESCO. URL: <https://whc.unesco.org/archive/convention-en.pdf> (besucht am 07. 04. 2021).
- Sutherland, Ivan E. (1968). “A head-mounted three dimensional display”. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I on - AFIPS ’68 (Fall, part I)*. ACM Press. DOI: 10.1145/1476589.1476686.
- Cleaves, Francis Woodman (Juni 1952). “The Sino-Mongolian Inscription of 1346”. In: *Harvard Journal of Asiatic Studies* 15.1/2, S. 1. DOI: 10.2307/2718274.

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift