

Ein Societal-XR-Konzept zur digitalen Erweiterung von Denkmälern

ROMMY LANG



Schriftenreihe Virtuelle Welten & Games | Nr. 1

HERAUSGEBER:
PROF. DR.-ING. DANIEL GÖRLICH



HOCH
SCHULE
OFFEN
BURG

DENKEN WIRD MACHEN.

SCHRIFTENREIHE
VIRTUELLE WELTEN & GAMES
NR. 1

Hrsg.:

Prof. Dr.-Ing. Daniel Görlich
Fakultät Medien, Hochschule Offenburg

Die **Deutsche Nationalbibliothek** verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie.
Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<https://portal.dnb.de/>
abrufbar.

<https://doi.org/10.60643/viw.v1i>



Dieses Werk ist lizenziert unter dieser
Creative Commons Lizenz:

Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitungen 4.0
International (CC BY-NC-ND 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Hochschule Offenburg
Badstraße 24
77652 Offenburg © Februar 2026
ISSN: 3054-4289

Vorwort des Herausgebers

Bei der vorliegenden Hausarbeit handelt es sich um eine Prüfungsleistung im Rahmen des Moduls „Virtuelle Welten“ des noch jungen Studiengangs „Virtuelle Welten & Game Technologies“. Er ist im Oktober 2023 an der Fakultät Medien der Hochschule Offenburg gestartet und wird zum Frühjahr 2027 die ersten Absolventen und Absolventinnen hervorbringen. Als interdisziplinärer Bachelorstudiengang vermittelt er im ersten bis dritten Semester Grundlagen zu Themengebieten wie virtuellen Welten, Extended Reality, Mediengestaltung und Medientechnologien, Game Development, Programmierung, 3D-Animation, Human-Computer Interaction, Projektmanagement und natürlich wissenschaftlichem Arbeiten. Obwohl Wahlpflichtmodule erst ab dem dritten Semester vorgesehen sind, erlaubt das breite Themenspektrum des Studiengangs seinen Studierenden, sich bereits ab Studienbeginn, etwa über die Themenwahl bei Projekt- und Hausarbeiten, individuell zu spezialisieren.

Rommy Langs Konzept einer digitalen Erweiterung von Denkmälern im Sinne eines Societal-XR-Erlebnisses ist ein herausragendes Beispiel einer solchen, individuellen Profilbildung. Ihr Ansatz, Erinnerungsorte im öffentlichen Raum zu gemeinsam interaktiv erlebbaren Erfahrungen zu erweitern, zeugt von einem bemerkenswerten Maß an Kreativität, Gestaltungskompetenz, gesellschaftlichem Verantwortungsbewusstsein und technologischer Neugier. Die Tatsache, dass es sich um eine Hausarbeit des ersten Semesters handelt, lässt erahnen, welches Potenzial im Studiengang und seinen Studierenden steckt.

Rommy Langs Hausarbeit bildet den Auftakt dieser neuen Schriftenreihe, die ich in meinen Funktionen als Leiter des Studiengangs und des zugehörigen XR/Games Labs herausgebe. Die Schriftenreihe „Virtuelle Welten & Games“ soll in den kommenden Jahren herausragende studentische Arbeiten ebenso wie Forschungsberichte, Tagungsbeiträge und relevanten Ereignisse aus dem Umfeld des Studiengangs umfassen. Dabei sollen wissenschaftliche und künstlerische Beiträge gleichermaßen ihren Platz finden – ganz im Sinne des interdisziplinären Charakters des Studiengangs.

Prof. Dr.-Ing. Daniel Görlich
Studiendekan „Virtuelle Welten & Game Technologies“

Abstract

This paper presents a concept for a potential application of Societal XR, envisaging the enhancement of monuments through projection mapping and audiovisual support. The aim is to digitally enrich physical monuments by projecting additional information—such as texts, images, videos and artistic content—without altering their material integrity. The supplementary audio component serves both barrier-free accessibility and atmospheric staging. In this way, cultural memory is to be strengthened and at the same time public interest in historical sites revitalized. As part of this work, the relevant technical components were researched and evaluated in terms of their practical feasibility. The proposed application scenario has a high creative and educational potential, but is confronted with challenges such as financing requirements and high energy consumption. Although its technical implementation appears feasible with currently available resources, broad implementation is likely to be limited without further technological innovations or structural support.

Zusammenfassung

Diese Hausarbeit präsentiert ein Konzept für eine potenzielle Anwendung im Bereich Societal XR, das die Erweiterung von Denkmälern durch Projection Mapping und audiovisuelle Unterstützung vorsieht. Ziel ist es, physische Denkmäler durch die Projektion zusätzlicher Informationen – etwa Texte, Bilder, Videos und künstlerische Inhalte – digital zu erweitern, ohne deren materielle Integrität zu verändern. Die ergänzende Audiokomponente dient sowohl der barrierefreien Zugänglichkeit als auch der atmosphärischen Inszenierung. Auf diese Weise soll das kulturelle Gedächtnis gestärkt und gleichzeitig das öffentliche Interesse an historischen Orten neu belebt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die relevanten technischen Komponenten recherchiert und hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzbarkeit evaluiert. Das vorgeschlagene Anwendungsszenario weist ein hohes gestalterisches und edukatives Potenzial auf, ist jedoch mit Herausforderungen wie Finanzierungsbedarf und hohem Energieverbrauch konfrontiert. Zwar erscheint die technische Umsetzung mit gegenwärtig verfügbaren Mitteln realisierbar, eine breite Implementierung dürfte jedoch ohne weitergehende technologische Innovationen oder strukturelle Förderung nur eingeschränkt möglich sein.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
1.1	Zielsetzung.....	6
1.2	Aufbau der Arbeit.....	7
2	Beschreibung der Anwendung.....	8
2.1	Anwendungsszenarien	8
3	State of the Art.....	10
3.1	Technische Ergänzung von Kulturerbe.....	10
3.2	Projection Mapping	11
3.3	Gestensteuerung.....	13
3.4	Abgrenzung der eigenen Lösung	13
4	Technische Umsetzung.....	14
4.1	Hardware	14
4.2	Software.....	15
4.3	Energieeffizienz.....	16
4.4	Finanzierung	16
5	User Interface	18
5.1	Anpassung an Nutzergruppen.....	19
5.2	Eine User Story.....	21
5.3	Inhaltserstellung.....	21
5.4	Herausforderungen	22
6	Konklusion.....	24
	Quellenverzeichnis.....	26
	Abbildungsverzeichnis.....	29

1 Einleitung

Denkmäler nehmen eine zentrale Rolle im kulturellen Gedächtnis ein. Sie dienen zumeist der Würdigung von bedeutsamen Ereignissen, gesellschaftlichen Entwicklungen oder historischen Persönlichkeiten. Dabei kann es sich um Objekte, Bauwerke, Stätten oder auch Naturgegebenheiten handeln, die aus künstlerischer, historischer, wissenschaftlicher oder kultureller Perspektive als erhaltenswert gelten. Der Erhalt und die Pflege dieser Zeugnisse in ihrer originalen Form sind von hoher Bedeutung für die Weitergabe kultureller Werte an zukünftige Generationen.

Im Alltagsgeschehen werden Denkmäler im urbanen Raum häufig übersehen (Deutsche Stiftung Denkmalschutz, o. J.-a). Außerdem weisen viele Denkmäler nur eine begrenzte Informationsdichte auf. Besucherinnen und Besucher ohne entsprechendes Vorwissen erhalten oftmals geringen Zugang oder gar keine Erläuterungen ihrer Relevanz. An vielen Denkmäler sind lediglich Tafeln oder Plaketten mit begrenzten Informationen angebracht, andere bieten zumindest QR-Codes mit Links oder direkte Links zu Webseiten.

Um Denkmäler sowohl als künstlerische als auch erinnerungskulturelle Objekte stärker in das öffentliche Bewusstsein zu rücken und ihrem Bedeutungsverlust entgegenzuwirken, erscheint eine mediale Erweiterung durch Projektionstechnologien vielversprechend. Mithilfe von Projection Mapping, ergänzt durch audiovisuelle und interaktive Elemente, kann nicht nur ergänzendes Wissen vermittelt, sondern auch ein immersives Erlebnis geschaffen werden. Dadurch erhalten Denkmäler die Sichtbarkeit und Attraktivität, die ihrer gesellschaftlichen Relevanz angemessen ist, ohne ihre materielle Integrität zu beeinträchtigen.

1.1 Zielsetzung

In dieser Arbeit wird ein hybrides System konzipiert, das physische Denkmäler im Sinne einer Societal XR (Görlich, 2022) mit interaktiven Projektionen von multimedialen, digitalen Inhalten kombiniert.

1.2 Aufbau der Arbeit

Nach einer initialen Beschreibung der Anwendung in Kapitel 2 folgt in Kapitel 3 eine Aufarbeitung des State of the Art rund um verwandte Anwendungsfelder, die technische Erweiterung von Kulturerbe sowie benötigter Technologien, speziell Projection Mapping und Gestensteuerung.

In Kapitel 4 wird die technische Umsetzung umrissen, in Kapitel 5 das User Interface entwickelt. Die Arbeit schließt mit Konklusionen unter anderem zu Vorteilen des vorgestellten Konzepts, aber auch zu Herausforderungen bei deren möglicher Umsetzung (Kapitel 6).

2 Beschreibung der Anwendung

Durch den Einsatz von Projection Mapping von multimedialen und interaktiven Elementen soll eine immersive Vermittlung historischer Inhalte direkt am Denkmal und gegebenenfalls in dessen unmittelbarem Umfeld ermöglicht werden. Die Erweiterungen sollen die Darstellung von Bildmaterial, Videosequenzen und mehrsprachigen Textinformationen sowie kontextualisierende Einblicke in die Bedeutung des jeweiligen Ortes oder Objekts ermöglichen.

Akustische Inhalte werden über ein Soundsystem vermittelt, das neben historischen Reden und Zeitzeugenberichten auch atmosphärische Klangkulissen umfasst. Diese dienen nicht nur der Schaffung eines emotionalen Rahmens, sondern unterstützen zugleich barrierefreie Zugänge – etwa durch die akustische Wiedergabe von Textinhalten für sehbeeinträchtigte Besucher*innen oder kindgerechte Erklärungen. Ziel ist es, die klassische Gestaltung von Denkmälern um eine multisensorische Erfahrung zu erweitern, um so eine tiefere inhaltliche Auseinandersetzung zu fördern.

Zusätzliche Interaktivität wird durch den Einsatz von Bewegungssensoren ermöglicht: Inhalte können bei Annäherung automatisch aktiviert werden. Eine intuitive Steuerung über Gesten erlaubt es den Nutzer*innen, individuell durch die Informationen zu navigieren – etwa durch Auswahl, Vertiefung oder Überspringen von Inhalten – und trägt so zu einer personalisierten und barrierearmen Nutzung bei.

2.1 Anwendungsszenarien

Ein mögliches Anwendungsszenario ist eine Gedenkstätte zur Erinnerung an Verstorbene. Neben traditionellen Ausdrucksformen wie Blumen oder persönlichen Gegenständen eröffnet sich hier die Möglichkeit, digitale Inhalte – etwa Bilder, Videos oder persönliche Nachrichten – einzureichen und über eine digitale Übersichtstafel individuell zugänglich zu machen. Dies ermöglicht eine emotionalere und zugleich strukturierte Form des Gedenkens.

Ein weiteres Szenario betrifft Statuen zur Ehrung historischer Persönlichkeiten, deren Identität und Bedeutung für unvorbereitete Besucher häufig nicht unmittelbar ersichtlich ist. Durch mehrsprachige Audiospuren sowie die Projektion ergänzender Medien – etwa Karten,

Fotografien oder zeitgenössischer Gemälde – kann ihre Geschichte kontextualisiert und erlebbar gemacht werden. Die Möglichkeit zur interaktiven Steuerung mittels Gesten erlaubt es, Inhalte je nach Interesse zu vertiefen oder gezielt auszuwählen. Besonders bildungsorientierte Zielgruppen, wie etwa Schulklassen, profitieren hier von der Kombination aus didaktischer Informationsvermittlung und multisensorischer Ansprache, was die Nachhaltigkeit des Lernprozesses fördert.

Ein drittes Szenario fokussiert sich auf ein denkmalgeschütztes Gebäude, dessen Geschichte durch die Projektion historischer Bilddokumente erzählt wird – beispielsweise Aufnahmen vom Bau des Gebäudes, seiner Nutzung sowie ggfs. seiner Zerstörung und seinem Wiederaufbau. Dessen Historie lässt sich direkt auf die Fassade projizieren und vermittelt somit Geschichte dort, wo sie tatsächlich stattgefunden hat.

Natürlich sind noch weitaus mehr Anwendungsszenarien denkbar.

3 State of the Art

Extended Reality (XR) ist die Erweiterung von der Realität durch virtuelle Elemente. Societal XR nach (Görlich, 2022) ist eine Weiterführung dieses Prinzips. Es strebt an, dass XR-Erlebnisse und die zu ihrer Nutzung benötigten Interaktionstechnologien beispielsweise in städtische oder kommunale Umgebungen integriert werden und öffentlich so verfügbar gemacht werden, dass sie für alle Menschen nutzbar werden, ohne dass sie dafür XR-Geräte am Körper tragen müssen.

3.1 Technische Ergänzung von Kulturerbe

Die Integration digitaler Technologien in die Präsentation und Vermittlung von Kulturerbe ist kein neues Phänomen. Zahlreiche Museen setzen heute Bildschirme ein, um ergänzende Informationen bereitzustellen oder interaktive Formate anzubieten. Auch der Einsatz moderner Technologien wie Projektionen erfreut sich zunehmender Beliebtheit in Kunstaussstellungen. Diese technischen Mittel ermöglichen eine immersive Erweiterung der Kunstwerke über die Leinwand hinaus in den gesamten Raum. Ein Beispiel hierfür ist die Ausstellung *MONET: SCHÖPFER DES IMPRESSIONISMUS*, in der Werke des bekannten Impressionisten auf die historischen Mauern der Carrières de Lumières projiziert werden (Culturespaces, 2023). Ein weiteres Beispiel von vielen ist *INSIDE VAN GOGH* (COFO, o. J.), eine immersive Ausstellung mit 360°-Multiprojektionen über den Menschen, den Künstler, das Leben und die Werke Vincent van Goghs.



Abbildung 1: Ausstellung *MONET: SCHÖPFER DES IMPRESSIONISMUS* (Culturespaces, 2023)

Darüber hinaus finden digitale Technologien zunehmend Eingang in die Gestaltung von Denkmälern und Grabstätten. So wurde etwa im Denkmal für die im Nationalsozialismus verfolgten Homosexuellen, das am 27. Mai 2008 in Berlin errichtet wurde, ein fest installierter Bildschirm integriert. Dieser zeigt in einer kontinuierlichen Schleife eine Filmszene, in der sich zwei Männer küssen, womit das statische Mahnmal um eine visuelle Ebene erweitert wird (Stiftung Denkmal für die ermordeten Juden Europas, 2025). Auch im Bereich der Sepulkralkultur finden sich innovative Ansätze: So gilt ein auf einem Kölner Friedhof errichteter Grabstein, der über einen eingebauten 10-Zoll-Bildschirm zur Wiedergabe von Bildern verfügt, als das erste digitale Grabmal in Deutschland (Pleiss, o. J.).

Auch der Einsatz von Audiosystemen zur Inszenierung kultureller Artefakte und Räume ist bereits erfolgreich umgesetzt worden. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die Kathedrale Notre-Dame in Paris, in der nach ihrer Wiedereröffnung im Dezember 2024 ein speziell entwickeltes Soundsystem installiert wurde. Dieses System, konzipiert von der französischen Firma L-ACOUSTICS, ermöglicht es, den Kirchenraum flexibel in verschiedenste akustische Umgebungen zu transformieren und dadurch immersive Klangwelten zu erzeugen (Marsden, 2025). Darüber hinaus gehören Audioguides mittlerweile zur Standardausstattung nahezu aller Museen. Sie dienen sowohl der barrierefreien Teilhabe als auch einer individualisierbaren Wissensvermittlung.

3.2 Projection Mapping

Projection Mapping ist eine Technologie, mit der digitale Bilder und Videos verzerrungsfrei auf unebene oder komplexe dreidimensionale Oberflächen projiziert werden können. Dabei entsteht der Eindruck einer erweiterten Realität (Augmented Reality), ohne dass Betrachter zusätzliche Geräte wie AR-Brillen verwenden müssen. Diese Methode eignet sich daher besonders gut für die Anwendung in größeren Besuchergruppen (Iwai, 2024). Über die reine Informationsvermittlung hinaus ermöglicht Projection Mapping auch die illusionäre Veränderung von Materialität, Form und Struktur eines Objekts. Voraussetzung dafür ist die präzise digitale Erfassung (3D-Scan) des Zielobjekts. Auf dieser Grundlage lässt sich mithilfe spezialisierter Software eine Projektion generieren, die sich exakt an die physische Geometrie der Oberfläche anpasst.

Die Ursprünge dieser Technik reichen bis ins Jahr 1969 zurück, als sie erstmals in DISNEYLAND angewendet wurde. Seither wurde die Methode kontinuierlich weiterentwickelt und insbesondere in den letzten zehn Jahren durch technologische Fortschritte stark popularisiert (Leonhardt-Schuster, 2020). Heutzutage lassen sich nahezu beliebige Objekte mithilfe von Projection Mapping bespielen und um komplexe 3D-Effekte erweitern.

Praktische Anwendungen finden sich insbesondere bei Festivals, Großveranstaltungen sowie im Bereich der Live-Performance. Häufig dienen historische oder architektonisch markante Gebäude als Projektionsfläche. So wird etwa der Burgpalast in Budapest jährlich zum Nationalfeiertag am 20. August mithilfe von 50 Projektoren auf einer Distanz von 250 Metern eindrucksvoll illuminiert (Panasonic Connect, 2025). Auch beim FESTIVAL OF LIGHTS in Berlin, das seit 2016 stattfindet, kommt Projection Mapping zum Einsatz: Der Berliner Fernsehturm wird dabei jährlich von verschiedenen Künstlern zur Projektionsfläche transformiert (Festival of Lights, 2019). Mittlerweile haben sich spezialisierte Studios wie MP-STUDIO etabliert, die Projection-Mapping-Lösungen für Gebäude (Abb. 2), Bühneninszenierungen und Innenräume anbieten (MP-STUDIO, o. J.).



Abbildung 2: THE BRIDGE OF TOMORROW (MP-STUDIO, 2021)

3.3 Gestensteuerung

Die Gestensteuerung hat in den vergangenen Jahren erhebliche technologische Fortschritte erzielt und ist unter geeigneten Rahmenbedingungen in der Lage, selbst feinste Handbewegungen zuverlässig zu erkennen. Wesentliche Einflussfaktoren sind dabei die Präzision der verwendeten Sensorik, die Leistungsfähigkeit der zugrunde liegenden Algorithmen sowie die jeweiligen Umgebungsbedingungen. Bei sachgerechter Implementierung lassen sich auch sicherheitsrelevante sowie datenschutzrechtliche Anforderungen erfüllen. Technisch basieren solche Systeme zumeist auf optischen Sensoren in Kombination mit bildverarbeitenden Verfahren (Fraunhofer IWU, 2020). Ein Beispiel hierfür ist die am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) entwickelte industrielle Gestensteuerung, die auf diesen Technologien aufbaut (Eichler, 2021).

3.4 Abgrenzung der eigenen Lösung

Obwohl alle benötigten Technologien bereits existieren und erprobt sind, wurden sie, soweit ersichtlich, nicht im Kontext der Augmentierung von Denkmälern eingesetzt, insbesondere nicht im Sinne einer Societal XR. Dies ist auf verschiedene Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung zurückzuführen, auf die im folgenden Kapitel eingegangen wird.

Gleichwohl eröffnen sich vielfältige Potenziale zur Erweiterung von Denkmälern durch den gezielten Einsatz digitaler Technologien. Insbesondere die Verbindung physischer Strukturen mit virtuellen Ergänzungen ermöglicht eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem jeweiligen Erinnerungsort. Darüber hinaus bieten interaktive digitale Inhalte in Echtzeit eine vielversprechende Möglichkeit, das kulturelle Gedächtnis zu festigen und historische Elemente oder Persönlichkeiten effektiv im öffentlichen Bewusstsein zu verankern.

4 Technische Umsetzung

Die technische Umsetzung digitaler Erweiterungen von Denkmälern stellt besondere Anforderungen. Vor allem bei langfristig angelegten Installationen unter freiem Himmel müssen Aspekte wie Energieeffizienz, Witterungsbeständigkeit, Schutz vor Vandalismus sowie wirtschaftliche Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Da Software zum Einsatz kommt, muss diese vor unbefugtem Zugriff etwa durch Hacking geschützt werden.

4.1 Hardware

Die eingesetzte Hardware muss spezifische Anforderungen erfüllen, um den besonderen Bedingungen von Langzeitinstallationen im Außenbereich gerecht zu werden. Für eine hochwertige visuelle Darstellung sind Projektoren mit hoher Lichtstärke erforderlich, um auch bei Tageslicht oder wechselnden Lichtverhältnissen eine klare Bildqualität zu gewährleisten. Eine Auflösung von mindestens 4K, idealerweise 8K, ist empfehlenswert, um bei großflächigen Projektionen eine gute Lesbarkeit von Texten zu gewährleisten. Zum Einsatz kommen sollten moderne Laserprojektoren, die im Vergleich zu lampenbasierten Geräten eine höhere Farbtreue, geringeren Wartungsaufwand und längere Lebensdauer bieten (BenQ, 2022).

Der Projektor selbst muss entweder witterungsbeständig konstruiert oder in einem schützenden, lichtdurchlässigen Gehäuse untergebracht sein. Die Positionierung der Geräte ist dabei entscheidend, insbesondere um Schattenwürfe durch Besucher oder Verdeckungen bspw. durch umstehende Bäume zu vermeiden. Da es sich um eine dauerhafte Installation handelt, bietet sich die Montage an einer Trägerstruktur wie etwa einer Straßenlaterne mit ausreichendem Abstand zum Denkmal an. Direkte technische Eingriffe am Denkmal, vor allem Eingriffe in seine Substanz und sein Erscheinungsbild, sind in der Regel aus denkmalpflegerischen Gründen unzulässig und bedürfen einer gesonderten Genehmigung.

Soll die Projektion mehrere Perspektiven oder Seiten des Denkmals abdecken, müssen mehrere Projektoren zum Einsatz kommen. In diesem Fall ist auf ein präzises Edge-Blending zu achten – eine Technik, mit der sich überlappende Bildbereiche nahtlos miteinander verbinden lassen, um ein einheitliches Gesamtbild ohne sichtbare Übergänge zu erzeugen (Pedersen et al., 2016).

Eine kontinuierliche Live-Erfassung des Denkmals ist in der Regel nicht erforderlich, da es sich zumeist um statische Objekte handelt. Ein einmaliger hochpräziser 3D-Scan dürfte ausreichend sein. Allerdings kann es notwendig sein, die Projektion sowohl im Verlauf eines Tages als auch im Verlauf eines Jahres dynamisch an veränderte Lichtverhältnisse anzupassen, um visuelle Qualität und Wirkung konstant zu halten.

Im Vergleich zur visuellen Komponente stellt die akustische Umsetzung geringere Anforderungen an die Hardware. Für die Erzeugung eines räumlichen Klangerlebnisses (Spatial Sound) genügt in der Regel der Einsatz von drei bis vier handelsüblichen Lautsprechern. Durch deren gezielte Anordnung lässt sich beim Hörer der Eindruck erzeugen, dass Geräusche aus unterschiedlichen Richtungen und Entfernungen stammen (Spors et al., 2013). Um die Umgebung nicht zu stören, sollte die Lautstärke dezent gewählt werden.

Für gesprochene Inhalte empfiehlt sich der Einsatz gerichteter Audiotechnologie, etwa in Form von Richtlautsprechern. Diese ermöglichen eine gezielte Schallabstrahlung, sodass Inhalte für die Besucher des Denkmals gut verständlich bleiben, ohne die akustische Umgebung wesentlich zu beeinflussen (Roger, 2022). Da für räumliche Klangeffekte und gerichteten Schall unterschiedliche Technologien erforderlich sind, sollten jeweils spezialisierte Lautsprechertypen verwendet werden. Die Synchronisierung der Lautsprecher kann drahtlos über Bluetooth oder über verdeckt verlegte Kabel erfolgen. Eine Integration in bestehende Strukturelemente, beispielsweise die Trägerstange des Projektors, ist aus gestalterischen und sicherheitstechnischen Gründen empfehlenswert.

Zur Aktivierung der Installation bei Annäherung von Besuchern ist der Einsatz von Bewegungssensoren möglich. Soll die Installation darüber hinaus interaktive Funktionen bieten, etwa gestengesteuerte Inhalte, sind zusätzlich geeignete Sensoren zur Erkennung von Hand- oder Körperbewegungen zu integrieren.

4.2 Software

Eine interaktive Projection-Mapping-Installation stellt hohe Anforderungen an die verwendete Software, da mehrere komplexe Prozesse gleichzeitig und möglichst in Echtzeit koordiniert werden müssen. Insbesondere die Erkennung und Interpretation von Gesten muss latenzarm erfolgen, um eine intuitive Nutzererfahrung zu gewährleisten. Hierzu ist die Einrichtung einer

vordefinierten Gestenbibliothek erforderlich, die gängige Bewegungsmuster erkennt und zuverlässig zuordnet.

Darüber hinaus müssen visuelle Inhalte wie Bilder, Videos und Texte dynamisch austauschbar sein, um auf Nutzerinteraktionen flexibel reagieren zu können. Eine Echtzeitberechnung (Rendering) komplexer Animationen ist in der Regel nicht notwendig und wird aus Gründen der Energieeffizienz sowie zur Begrenzung der Hardwareanforderungen bewusst vermieden. Stattdessen kann auf vorgerenderte Inhalte zurückgegriffen werden.

Ein weiteres zentrales Kriterium ist die automatische Anpassung der Projektionen an sich verändernde Lichtverhältnisse im Außenraum. Die Software muss in der Lage sein, Helligkeit, Kontrast und ggf. Farbwerte in Abhängigkeit von Tageszeit und Umgebungslicht zu justieren. Für videobasierte Inhalte ist zudem die lückenlose Synchronisation von Bild- und Tonspur essenziell, um ein konsistentes und störungsfreies Nutzungserlebnis zu gewährleisten.

4.3 Energieeffizienz

Da es sich um eine dauerhaft angelegte Installation handelt, spielt die Energieeffizienz eine zentrale Rolle. Sowohl Hardware als auch Software sollten auf einen sparsamen Energieverbrauch optimiert sein. Vor diesem Hintergrund wird bewusst auf energieintensives Live-Rendering verzichtet. Alle wiedergegebenen Inhalte werden vorausberechnet. Denkbar ist auch, Inhalte nicht kontinuierlich, sondern erst bei Annäherung von Besuchern mit Hilfe von Bewegungssensoren zu aktivieren, was Energie und Kosten spart.

Zur weiteren Reduzierung des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Betriebskosten ist der Einsatz von Solarpanels in Kombination mit einem geeigneten Akkuspeicher denkbar. Diese Lösung ermöglicht einen weitgehend autarken Betrieb und ist insbesondere bei Außeninstallationen sinnvoll, bei denen ein Anschluss an das Stromnetz nicht oder nur eingeschränkt möglich ist.

4.4 Finanzierung

Die Betriebskosten eines digital erweiterten Denkmals liegen deutlich über den üblichen Aufwendungen für dessen klassische Instandhaltung. Aufgrund des zusätzlichen technischen Aufwands – etwa für Stromversorgung, Wartung und Systempflege – ist kurzfristig nicht mit

einer breiten Implementierung derartiger Installationen zu rechnen, sofern keine grundlegenden technologischen Innovationen zur Kostenreduktion erfolgen.

Die Finanzierung von Denkmälern erfolgt in der Regel über öffentliche Mittel von Bund, Ländern und Kommunen oder durch private Träger, etwa Stiftungen, Vereine, Unternehmen oder Eigentümer (Deutsche Stiftung Denkmalschutz, o. J.-b). Diese Akteure wären entsprechend auch für die Installation, den Betrieb und die langfristige Finanzierung digitaler Erweiterungen verantwortlich.

5 User Interface

Das primäre Ziel eines Denkmals liegt in seiner sichtbaren Präsenz und Wirkung im öffentlichen Raum. Digitale Erweiterungen wie Projektionen sollen dieses Anliegen unterstützen, jedoch nicht dominieren. Sie sind so konzipiert, dass sie keine aktive Interaktion seitens der Besucher erfordern, sondern automatisch durch Bewegungssensoren aktiviert werden. Je nach thematischem Kontext können dabei verschiedene audiovisuelle Inhalte zur Anwendung kommen – etwa eine Bilderserie, ein Video oder gegebenenfalls eine künstlerische Animation.

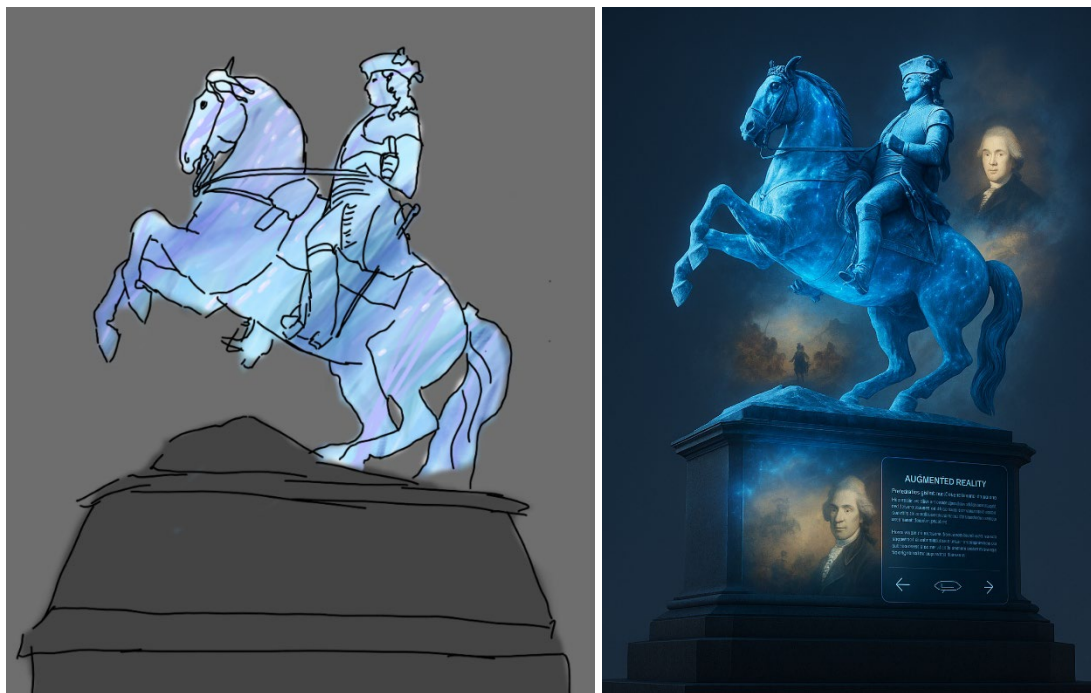


Abbildung 3: Skizze und KI-generierte Darstellung eines virtuell erweiterten Denkmals, angelehnt an das Reiterstandbild bzw. Prinz-Eugen-Reiterdenkmal in Wien (Robert, 2013)

Insbesondere bei geschichtlichen oder erinnerungskulturellen Themen wird auf eine angemessene visuelle Sprache geachtet. Hierzu zählen dokumentarische Bilder oder historische Aufnahmen. Bei geeigneten Anlässen kann das Denkmal auch durch abstrakte oder symbolische Animationen künstlerisch erweitert werden – etwa durch die Projektion fließender Texturen oder sich bewogender Muster, wie exemplarisch in Abbildung 3 dargestellt. Vorhandene Inschriften oder Textelemente am Denkmal lassen sich durch gezielte Projektion zusätzlich hervorheben und visuell betonen.

Bei Annäherung erhalten Besucher unaufdringliche Hinweise am Rand des Bildfelds, die mögliche Interaktionen signalisieren, ohne die zentralen Inhalte zu überlagern. Über einfache Gesten – etwa das Wischen von links nach rechts – kann durch Bildserien navigiert werden. Eine Auseinanderbewegung der Hände erlaubt das Vergrößern von Texten oder Abbildungen, während eine vertikale Handbewegung nach unten ein Inhaltsverzeichnis öffnet. Dort können zusätzliche Inhalte abgerufen oder Einstellungen zur Barrierefreiheit angepasst werden. Je nach Installation kann das Verzeichnis auch Audiospuren mit ergänzenden Informationen oder Zeitzeugenberichten enthalten. Eine exemplarische Umsetzung dieser Funktionen ist in Abbildung 4 dargestellt.

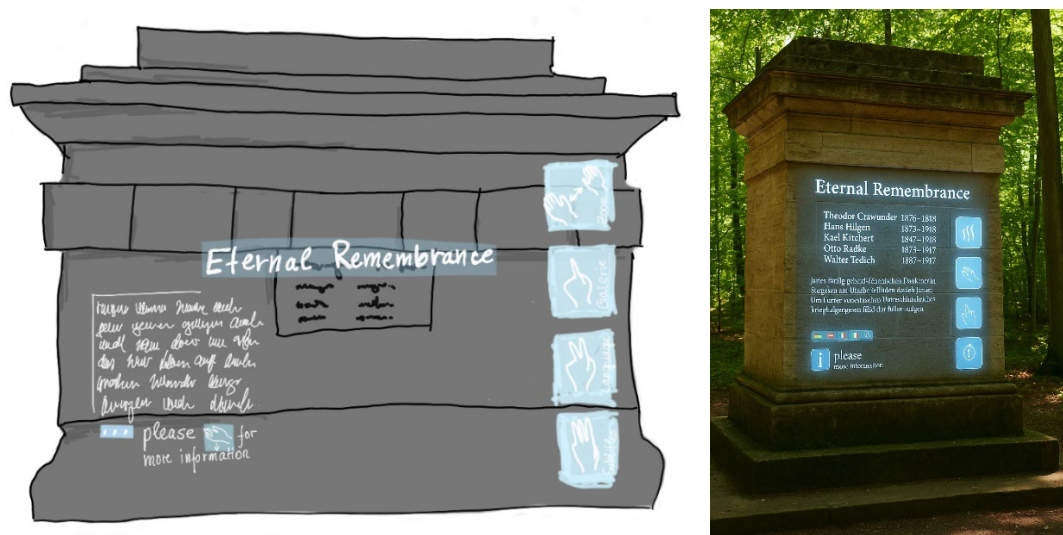


Abbildung 4: Skizze und KI-generierte Darstellung eines User Interface, angelehnt an das Kriegerdenkmal für die Gefallenen des Ersten Weltkrieges in Grünheide bei Berlin von 1922 (golocal, 2020)

5.1 Anpassung an Nutzergruppen

Die Projektionen sollen ein möglichst breites Publikum ansprechen und müssen daher an unterschiedliche Nutzergruppen adaptierbar sein. Eine zentrale Anforderung ist die kontextabhängige Anpassung der Inhalte, insbesondere im Hinblick auf Alter, Vorwissen und individuelle Bedürfnisse der Besucher. Wird beispielsweise ein Kind als Nutzer erkannt – etwa über eine KI-gestützte Altersschätzung – können altersgerechte Inhalte bereitgestellt werden. Diese Option ist nur für Denkmäler vorgesehen, bei denen eine pädagogisch sinnvolle und verantwortbare Vermittlung kindgerechter Inhalte möglich ist. Das Benutzerinterface für Kinder sollte stark vereinfacht und weitgehend symbolbasiert gestaltet sein. Textinhalte werden vorzugsweise auditiv über Lautsprecher vermittelt, wobei die sprachliche Komplexität

an das vermutete Alter angepasst wird. Zur Umsetzung bedarf es vorab empirischer Tests, welche Altersstufen durch künstliche Intelligenz zuverlässig differenziert werden können. Darauf aufbauend lassen sich abgestufte Inhaltsangebote entwickeln.

Auch für erwachsene Nutzer sollte ein differenziertes Informationsangebot vorgesehen sein. Ein Standardmodus präsentiert grundlegende Informationen in übersichtlicher Form. Ergänzend kann ein Hilfemenü aktiviert werden, das weiterführende Erläuterungen sowie Unterstützung für weniger vertraute Nutzer bietet. Für fachlich versierte oder besonders interessierte Besucher ist ein Expertenmodus denkbar, der vertiefte historische, kulturelle oder kontextuelle Inhalte bereithält.

Darüber hinaus bietet die digitale Erweiterung von Denkmälern erhebliche Potenziale im Bereich der Barrierefreiheit. Text- und Audioinhalte können auf einfache Weise an die bevorzugte Sprache des Nutzers angepasst werden – etwa durch ein System aus Handgesten in Kombination mit Symbolen wie Landesflaggen. Die Zahlenzeichen null bis vier könnten dabei den gängigsten Sprachen entsprechen, während die Geste „fünf“ zu einem erweiterten Auswahlmenü führt. Die Herausforderung liegt hierbei insbesondere in der zuverlässigen Übersetzung und Anpassung komplexer Inhalte in mehrere Sprachen. Der Einsatz aktueller KI-Technologien kann jedoch maßgeblich dazu beitragen, diesen Prozess zu automatisieren und zu skalieren.

Für Nutzer mit Seh- oder Hörbeeinträchtigungen sind ebenfalls spezifische Anpassungen vorgesehen. So kann beispielsweise beim Abspielen von Audioinhalten gefragt werden, ob Untertitel oder ein Transkript gewünscht wird. Nutzer, die sich über einen längeren Zeitraum vor dem Denkmal aufhalten, könnten zudem automatisiert gefragt werden, ob sie zusätzliche Unterstützung – etwa in Form einer akustischen Zusammenfassung – in Anspruch nehmen möchten. Über die zuvor beschriebenen Gesten kann diese Audiowiedergabe dann aktiviert werden. Auch hier eröffnet der gezielte Einsatz von KI erhebliche Einsparpotenziale bei der Entwicklung, Pflege und Erweiterung barrierefreier Inhalte.

Eine zentrale Herausforderung liegt darin, trotz der Vielzahl möglicher Inhalte und Interaktionsoptionen ein klar strukturiertes, intuitives User Interface bereitzustellen. Da die Steuerung über Gesten nur begrenzt schnelle und komplexe Inhaltswechsel erlaubt, ist eine einfache, logisch gegliederte Navigation mit klar definierten Informationshierarchien essenziell.

5.2 Eine User Story

B. läuft abends wie jeden Tag auf dem Heimweg durch den Park. Er geht an einem Denkmal vorbei. Plötzlich erstrahlen darauf Gemälde eines Mannes. B. tritt näher, um sich die neue Installation anzusehen. Der Text, der sonst auch auf dem Denkmal zu sehen war, leuchtet hell. In der Dämmerung hätte er ihn sonst nicht lesen können. Symbole erscheinen auf dem Denkmal. Er befolgt die Gesten und kann durch die Gemälde blättern. Er führt die Geste für nähere Informationen aus, und es erscheint ein kurzer Text. Seine Augen sind müde, also faltet er die Hände und zieht sie langsam auseinander. Der Text wird größer. Nun kann er ihn bequem lesen. Er ist überrascht: Obwohl er jeden Tag hier vorbeiging, wusste er nie wirklich, wer der Mann dieses Denkmals war. Er wischt den Text zur Seite. Die Gemälde erscheinen wieder. Ihm fällt eine leise Hintergrundmusik auf, die von überallher zu kommen scheint. *Das war also seine Musik*, denkt er sich und macht sich auf den Nachhauseweg. Die Musik erlischt – genau wie die Lichter auf dem Denkmal.

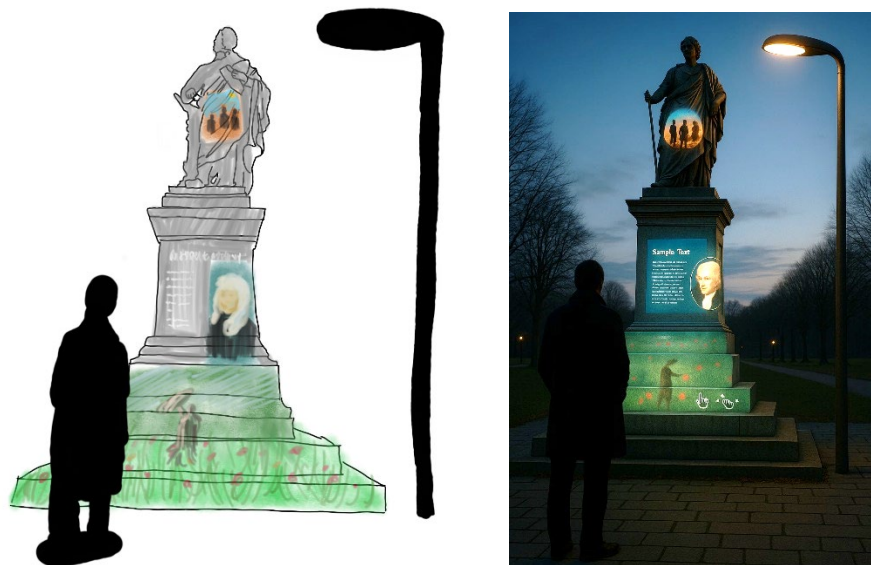


Abbildung 5: Skizze und KI-generierte Darstellung eines erweiterten Denkmals

5.3 Inhaltserstellung

Die in den Projektionen dargestellten Inhalte – darunter Texte, Fotografien, Videos und Audioelemente – müssen inhaltlich fundiert und kontextsensibel von fachkundigen Experten kuratiert werden. Hierzu zählen insbesondere Historiker, Kulturwissenschaftler oder Fachexperten des jeweiligen Themengebiets. In einem interdisziplinären Prozess arbeiten

diese mit Gestaltern, Softwareentwicklern und Interaktionsdesignern zusammen, um die Inhalte für die digitale Projektion aufzubereiten und gestalterisch sowie technisch umzusetzen.

Aus Gründen der inhaltlichen Integrität und Sicherheit ist sicherzustellen, dass die projizierten Inhalte nicht durch Besucher verändert oder manipuliert werden können.

5.4 Herausforderungen

Bei näherer Betrachtung zeigt sich eine zentrale Herausforderung solcher interaktiver Denkmalprojektionen: Das User Interface ist möglicherweise nur von einer Person gleichzeitig bedienbar. Da die projizierten Inhalte für alle umstehenden Personen oder Passanten sicht- und hörbar sind, lassen sich die Inhalte – etwa in Sprache, Informationsdichte oder Darstellung – nicht zeitgleich für beliebig viele Personen individualisieren. Insbesondere die Sprachauswahl ist hierbei ein begrenzender Faktor: Während das Projizieren mehrerer Anzeigen des gleichen Textes in unterschiedlichen Sprachen räumlich versetzt (z.B. nebeneinander) möglich ist, ist eine zeitgleiche Audioausgabe von Inhalten in mehreren Sprachen problematisch. Hier könnte ein zeitlicher Versatz helfen. Ebenso stellt die Gestenerkennung bei hohem Besucheraufkommen eine technische Schwierigkeit dar, wenn das System nicht mehr zuverlässig zwischen mehreren gleichzeitig interagierenden Personen differenzieren kann. Bei mehreren interagierenden Besuchern ist zudem mit der überlappenden Eingabe widersprüchlicher Kommandos zu rechnen.

Eine Lösung für diese Problematik muss kontextsensitiv und standortspezifisch erfolgen. In eher ruhig gelegenen oder weniger frequentierten Bereichen kann davon ausgegangen werden, dass Besucher einzeln oder in kleinen Gruppen interagieren. In solchen Fällen bietet sich eine weitgehende Individualisierung der Inhalte an, einschließlich detaillierter Informationen, personalisierter Sprachwahl und interaktiver Tiefenebenen.

An stark frequentierten Standorten hingegen ist eine solche Individualisierung nur eingeschränkt sinnvoll. Hier sollten die Inhalte allgemeiner und klar fokussiert gestaltet sein. Anpassungen können in begrenztem Umfang ermöglicht werden, ohne dass ein einzelner Besucher die Interaktion vollständig dominiert oder andere Besucher ausschließt.

Bei großflächigen Denkmälern besteht zudem die Möglichkeit, Inhalte räumlich zu verteilen und dadurch zu differenzieren. In diesem Fall können mehrere Besucher zeitgleich von

verschiedenen Positionen um das Denkmal herum mit diesem interagieren. Die akustische Umsetzung erfordert dabei besondere Aufmerksamkeit: Atmosphärische Audioinhalte – etwa Musik oder Klanglandschaften – können für alle hörbar gestaltet werden. Sollen jedoch gezielte Informationen wie Interviews oder Übersetzungen vermittelt werden, empfiehlt sich der Einsatz fokussierter Audiotechnologien (z. B. Richtlautsprecher), um die akustische Wahrnehmung gezielt auf einzelne Besucher zu beschränken.

6 Konklusion

Die digitale Erweiterung von Denkmälern durch Projektions- und Audiosysteme bietet ein erhebliches Potenzial zur inhaltlichen und gestalterischen Weiterentwicklung erinnerungskultureller Praktiken. Inhalte können dynamisch konzipiert und nahezu unbegrenzt erweitert werden, wodurch eine Integration alternativer Perspektiven, Zeitzeugenberichte, Forschungsergebnisse oder statistischer Daten möglich wird. Solche Inhalte lassen sich situativ anpassen – etwa im Rahmen von Gedenkveranstaltungen – und auf dem neuesten Stand halten. Darüber hinaus eröffnet die Technologie neue Wege der Barrierefreiheit: Durch die Integration von Audiodeskriptionen, Untertiteln und mehrsprachigen Angeboten können die Denkmäler einem deutlich breiteren Publikum zugänglich gemacht werden.

Ein weiteres Ziel ist die Steigerung der gesellschaftlichen Relevanz und Sichtbarkeit von Denkmälern – insbesondere für jüngere Zielgruppen. Die innovative mediale Umsetzung kann helfen, historisch bedeutsame Orte neu zu kontextualisieren und ihre Attraktivität zu steigern. Eine innovative Darstellung kann insbesondere die jüngeren Generationen auf Denkmäler aufmerksam machen.

Gleichzeitig bestehen jedoch technische und infrastrukturelle Herausforderungen, insbesondere bei Installationen im Außenraum. So erfordert etwa direkte Sonneneinstrahlung den Einsatz besonders lichtstarker Projektoren mit hohem Kontrast. Wetterbedingte Einflüsse wie Regen, Schnee oder starke Temperaturschwankungen stellen zusätzliche Anforderungen an die Robustheit und Schutzmechanismen der Hardware. Auch der erhöhte Energiebedarf solcher Installationen ist zu berücksichtigen – insbesondere an Orten, die bislang nicht über entsprechende Versorgung verfügen. Hier bietet sich die Entwicklung nachhaltiger Betriebskonzepte an, beispielsweise durch den Einsatz von Solarpanelen in Kombination mit leistungsfähigen Akkuspeichern.

Ebenso zentral ist die enge Abstimmung mit den zuständigen Denkmalbehörden. Jegliche technische Erweiterung muss so gestaltet werden, dass sie die Substanz des Denkmals nicht beeinträchtigt. Reversibilität und denkmalpflegerische Verträglichkeit sind als übergeordnete Leitprinzipien zu beachten.

Insgesamt zeigt sich, dass eine Umsetzung digital erweiterter Denkmäler mit dem heutigen Stand der Technik realisierbar ist. Die vorgeschlagenen Konzepte und Lösungsansätze stellen

Konklusion

eine vielversprechende Ergänzung zur bisherigen Denkmalpraxis dar und eröffnen neue Perspektiven für die Vermittlung kulturellen Erbes. Die praktische Eignung der technischen Maßnahmen bedarf jedoch einer systematischen Erprobung, um ihre Wirksamkeit und Nachhaltigkeit im konkreten Anwendungskontext zu validieren.

Quellenverzeichnis

- BenQ. (2022, November 3). *Lampe, LED oder Laser: Welche Beamer-Lichtquelle ist empfehlenswert?* BenQ. <https://www.benq.eu/de-de/knowledge-center/knowledge/lamp-led-laser-light-source.html>
- COFO. (o. J.). *INSIDE VAN GOGH – Das immersive Ausstellungserlebnis I Erfurt*. INSIDE VAN GOGH. Abgerufen 1. Februar 2025, von <https://inside-vangogh.com/>
- Culturespaces. (2023). *Carrières des Lumières de Baux-de-Provence*. <https://www.carrieres-lumieres.com/en>
- Deutsche Stiftung Denkmalschutz. (o. J.-a). *Aufgaben & Ziele*. Deutsche Stiftung Denkmalschutz. Abgerufen 31. Januar 2025 von <https://www.denkmalschutz.de/ueber-uns/die-deutsche-stiftung-denkmalschutz/aufgaben-ziele.html>
- Deutsche Stiftung Denkmalschutz. (o. J.-b). *Organigramm und Geschäftsbereiche*. Deutsche Stiftung Denkmalschutz. Abgerufen 4. Februar 2025 von <https://www.denkmalschutz.de/ueber-uns/die-deutsche-stiftung-denkmalschutz/organisation.html>
- Eichler, P. (2021, August 30). Industrielle Gestensteuerung – Der Mensch als Maschinen-Dirigent in der kollaborativen Fertigung. *zukunftsfabrik*. <https://www.fraunhofer-zukunftsfabrik.de/?p=3084>
- Festival of Lights. (2019, September 4). *3D Projection-Mapping*. <https://magazin-festival-of-lights.de/3d-projection-mapping>
- Fraunhofer IWU. (2020). *Mehrwert Industrielle Gestensteuerung*. Fraunhofer-Gesellschaft. https://www.iwu.fraunhofer.de/content/dam/iwu/de/documents/Infoblatt/Infoblatt-Mehrwert-industrielle-Gestensteuerung_de.pdf
- golocal. (2020). Denkmal für die Opfer von Krieg, Faschismus und Gewaltherrschaft / Deutsches Kriegerdenkmal Grünheide, <https://www.golocal.de/gruenheide/>

- freizeitanlagen/denkmal-fuer-die-opfer-von-krieg-faschismus-gewaltherrschaft-deutsches-kriegerdenkmal-gruenheide-YViLO/
- Görlich, D. (2022). Societal XR—A Vision Paper. *ParadigmPlus*, 3(2), Article 2. <https://doi.org/10.55969/paradigmplus.v3n2a1>
- Iwai, D. (2024). Projection mapping technologies: A review of current trends and future directions. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 100(3), 234–251. <https://doi.org/10.2183/pjab.100.012>
- Leonhardt-Schuster, S. (2020, Oktober 28). *Projection Mapping kurz erklärt*. <https://www.mds.eu/blog/projection-mapping-auf-deutsch>
- Marsden, R. (2025, Januar 13). Want your home to sound like Notre-Dame? Here’s the secret to its speakers. *Financial Times*. <https://www.ft.com/content/3aa3e8e3-b46c-4b38-8cbd-3d8c3ef75477>
- MP-STUDIO. (o. J.). *About us*. Abgerufen 4. Februar 2025 von <https://mp-studio.eu/about-us>
- Panasonic Connect. (2025). *Projection mapping with 50 laser projectors in Hungary | Panasonic Connect*. <https://eu.connect.panasonic.com/gb/en/case-studies/projection-mapping-50-laser-projectors-hungary>
- Pedersen, M., Suazo, D., & Thomas, J.-B. (2016). Seam-Based Edge Blending for Multi-Projection Systems. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 9(4), 11–26. <https://doi.org/10.14257/ijsp.2016.9.4.02>
- Pleiss, K. (o. J.). *Fotoshow auf dem Friedhof: Erstes digitales Grabmal*. Abgerufen 1. Februar 2025, von <https://www.mz.de/leben/fotoshow-auf-dem-friedhof-erstes-digitales-grabmal-2552274>
- Robert, K.F. (2013, Mai 6). Gesamtansicht des Denkmals auf dem Heldenplatz. https://de.wikipedia.org/wiki/Prinz-Eugen-Reiterdenkmal#/media/Datei:Krcal-0001-110330_-_Wien_-_008.jpg

Roger, T. (2022, Januar 21). Direktionaler Ton und andere Richtlautsprecher -. *Waves system*.

<https://waves-system.com/actualites/direktionaler-ton-richtlautsprecher/?lang=de>

Spors, S., Wierstorf, H., Raake, A., Melchior, F., Frank, M., & Zotter, F. (2013). Spatial Sound

With Loudspeakers and Its Perception: A Review of the Current State. *Proceedings*

of the IEEE, 101(9), 1920–1938. Proceedings of the IEEE.

<https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2264784>

Stiftung Denkmal für die ermordeten Juden Europas (2025, März 30). *Denkmal für die im*

Nationalsozialismus verfolgten Homosexuellen. [https://www.stiftung-denkmal.de/](https://www.stiftung-denkmal.de/denkmaeler/denkmal-fuer-die-im-nationalsozialismus-verfolgten-homosexuellen/)

[denkmaeler/denkmal-fuer-die-im-nationalsozialismus-verfolgten-homosexuellen/](https://www.stiftung-denkmal.de/denkmaeler/denkmal-fuer-die-im-nationalsozialismus-verfolgten-homosexuellen/)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausstellung MONET: SCHÖPFER DES IMPRESSIONISMUS	10
Abbildung 2: THE BRIDGE OF TOMORROW.....	12
Abbildung 3: Skizze und KI-generierte Darstellung eines virtuell erweiterten Denkmals, angelehnt an das Reiterstandbild bzw. Prinz-Eugen-Reiterdenkmal in Wien	18
Abbildung 4: Skizze und KI-generierte Darstellung eines User Interface, angelehnt an das Kriegerdenkmal für die Gefallenen des Ersten Weltkrieges in Grünheide bei Berlin von 1922.....	19
Abbildung 5: Skizze und KI-generierte Darstellung eines erweiterten Denkmals	21



Hochschule Offenburg

Badstraße 24
77652 Offenburg

+49 781 205-0

info@hs-offenburg.de
hs-offenburg.de