



International Council on
Monuments and Sites
Conseil International
des Monuments et des Sites
Deutsches Nationalkomitee e.V.



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ UND DENKMALPFLEGE

KULTURERBE SCHÜTZEN · INNOVATION FÖRDERN

ICOMOS DEUTSCHES NATIONALKOMITÉE
ICOMOS GERMAN NATIONAL COMMITTEE
ICOMOS COMITÉ NATIONAL ALLEMAND

ELEKTRONISCHE PUBLIKATION XII
ELECTRONIC PUBLICATION XII
PUBLICATION ÉLECTRONIQUE XII



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ UND DENKMALPFLEGE. KULTURERBE SCHÜTZEN, INNOVATION FÖRDERN

Online-Workshop von
ICOMOS Deutschland
in Kooperation mit der Vereinigung
der Denkmalfachämter in den Ländern
(AG Denkmalinformationssysteme)
und dem Deutschen Nationalkomitee
für Denkmalschutz

6. Oktober 2025

ICOMOS DEUTSCHES NATIONALKOMITEE
ICOMOS GERMAN NATIONAL COMMITTEE
ICOMOS COMITÉ NATIONAL ALLEMAND

ELEKTRONISCHE PUBLIKATION XIII
ELECTRONIC PUBLICATION XIII
PUBLICATION ÉLECTRONIQUE XIII

Gefördert durch:



Titelgestaltung: *umbra + dor* – visuelle kommunikation
unter Verwendung einer Abbildung von Peter Kozub (siehe S. 19)
Redaktion: John Ziesemer
Grafische Gestaltung: *umbra + dor* – visuelle kommunikation
© 2025 ICOMOS Deutsches Nationalkomitee e.V.
Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, sowie Verbreitung durch Film, Funk und
Fernsehen, durch fotomechanische Wiedergabe, Tonträger und Datenverarbeitungssysteme jeglicher
Art, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und der Autoren.

ISBN 978-3-00-085269-5

Inhaltsverzeichnis

Grußworte

Gregor Hitzfeld, Generalsekretär ICOMOS Deutschland
Denise Bednorz, Sprecherin VDL, AG Denkmalinformationssystem

1. Monitoring und Qualitätssicherung

Stefan Müller
„LudwigOne“: KI-gestützte Assistenz zur formalen und inhaltlichen Vorprüfung
von Anträgen in der Denkmalpflege nach § 7i EstG

2. Datenschutz und Urheberrecht, Potenziale und Risiken

Pia Pillokat
Datenschutz und Urheberrechte in der digitalen Denkmalpflege und Archäologie

Peter Kozub

Computermacht und Vernunft: die Ambivalenz der Anwendung von KI in der Restaurierung

3. Künstliche Intelligenz als Vermittlerin

Kristina Fischer
Die KI in der terminologischen Lehre. Entwicklung eines maschinenlesbaren kontrollierten
Fachvokabulars für die archäologische Konservierung-Restaurierung

Thorsten Kubiak

KI-gestützte Konfliktmoderation in der Denkmalpflege: zwischen Bestand und Bedarf
am Beispiel eines industriellen Pionierbaus

4. Klimaschutz mithilfe von Künstlicher Intelligenz

Stefan Bichlmair, Jan Hagnberger, Timo Hevesi-Toth, Kristina Holl
KI-gestützte Risikobewertung von Klimadaten zur präventiven Konservierung

Daniel Broschart, Sabrina Sommer, Peter Zeile

Ein neuer geodatenbasierter Ansatz zur Entwicklung eines Solarrahmenplans

4. Digitale Zwillinge und Smart City

Simon Kunz, Christian Dominic Fehling
Erstellung Digitaler Zwillinge industrieller Kulturgüter mittels 3D Gaussian Splatting

Bernhard Strackenbrock, Birgit Tsuchiya, Gerd Hirzinger

Erforschen – Erhalten – Präsentieren: der Einsatz Digitaler Zwillinge in der Denkmalpflege

Anhang

Workshop-Programm
Lebensläufe der Autorinnen und Autoren

4

6

12

18

24

34

38

46

52

60

68

70

Grußworte

Liebe Kolleginnen und Kollegen,
sehr geehrte Damen und Herren,

ich darf Sie ganz herzlich im Namen des Deutschen Nationalkomitees von ICOMOS zu unserem heutigen Workshop mit dem Titel „Künstliche Intelligenz und Denkmalpflege – Kulturerbe schützen, Innovation fördern“ willkommen heißen.

An dieser Stelle hätte Sie jetzt gerne der Präsident von ICOMOS Deutschland, Dr. Tino Mager, begrüßt und in das heutige Thema eingeführt. Er musste aber leider aus privaten Gründen heute früh absagen und lässt sich daher entschuldigen. Er bat mich, seine Grüße auszurichten und wünscht uns eine erfolgreiche Tagung.

Mit dem heutigen KI-Workshop knüpfen wir an einen ersten ICOMOS-Workshop zu Künstlicher Intelligenz und Denkmalpflege an, den wir vergangenes Jahr als hybride Veranstaltung in der Kapelle der Kaiser-Wilhelm-Gedächtniskirche in Berlin veranstaltet haben, damals noch mit dem etwas verhalteneren Untertitel: „Potentiale nutzen, Risiken erkennen“.

Da war uns aber schon klar, dass das nur ein erster Aufschlag zum Thema KI sein kann, ein Thema, das sich rasend schnell entwickelt und immer neue Anwendungsbereiche eröffnet, aber auch immer neue Fragen aufwirft.

So war es auch diesmal nicht schwierig, die heutigen Rednerinnen und Redner mit ihren Vorträgen zu gewinnen. An dieser Stelle schon vorab ganz herzlichen Dank für die Ausarbeitung dieser Vorträge.

Es freut uns sehr, dass wir knapp 200 Anmeldungen zu diesem Online-Workshop erhalten haben. Das große Interesse bezeugt die Bedeutung oder die Möglichkeiten der Künstlichen Intelligenz für unser Arbeiten und Handeln bzw. die wir ihr in Zukunft zuschreiben oder uns erhoffen.

Die heutige Veranstaltung wurde federführend vom Deutschen Nationalkomitee von ICOMOS organisiert, mit tatkräftiger Unterstützung zweier Partner: der VDL, der Vereinigung der Denkmalfachämter in den Ländern, und dem DNK, dem Deutschen Nationalkomitee für Denkmalschutz.

Im Namen von ICOMOS Deutschland danke ich unseren Kooperationspartnern und allen Beteiligten, die den Call for Papers unterstützt haben sowie den Referierenden, welche mit ihren Beiträgen wichtige Aspekte zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der Denkmalpflege vorstellen werden.

Gregor Hitzfeld
Generalsekretär ICOMOS Deutschland

Liebe Kolleginnen und Kollegen,
sehr geehrte Damen und Herren,

auch ich möchte ein kurzes Grußwort an Sie richten und zunächst einmal alle herzlich zu unserem Workshop: „Künstliche Intelligenz und Denkmalpflege – Kulturerbe schützen, Innovation fördern“ willkommen heißen.

Als Geoinformatikerin und Sprecherin der VDL-AG Denkmalinformationssysteme stehe ich neuen Technologien wie z.B. KI von Grund auf zwar kritisch, aber auch stets offen und neugierig gegenüber. Künstliche Intelligenz verändert unsere digitale Welt, und die Menschen schwanken aktuell – überspitzt ausgedrückt – zwischen Furcht und Faszination.

Vor über 20 Jahren, als das Internet Einzug in unser Leben und in unsere Arbeitswelt hielt, war die Situation ganz ähnlich. Auch damals waren die Menschen weniger neugierig, sondern vor allem skeptisch gegenüber der damals neuen, revolutionären Technologie. Ob man KI verteufelt oder nicht – so wie die Digitalisierung und das Internet macht auch die KI vor der Denkmalpflege und vor den entsprechenden Behörden und Verwaltungsorganisationen nicht halt.

Natürlich ist es richtig und wichtig, kritisch zu hinterfragen, inwieweit man dieser neuen Technologie vertrauen kann:

- Wie viel Vertrauen können wir in automatisierte Entscheidungen setzen? Andererseits stellt sich die Frage, wieviel Vertrauen in menschliche Entscheidungen gesetzt werden kann.
- Wie viel Vertrauen können wir in automatisierte Entscheidungen setzen? Andererseits stellt sich die Frage, wieviel Vertrauen in menschliche Entscheidungen gesetzt werden kann.
- Wer bestimmt, welche Daten genutzt und wie sie interpretiert werden – die KI oder der Mensch hinter dem Algorithmus?
- Und wie verhindern wir, dass kulturelle Vielfalt durch Algorithmen verzerrt oder gar verdrängt wird?

Es ergeben sich durch den Einsatz von KI ganz klar neue ethische, rechtliche und fachliche Fragen. Genauso deshalb ist der interdisziplinäre Austausch, den wir heute pflegen, so wichtig. Der Einsatz Künstlicher Intelligenz kann und sollte meiner Meinung nach aber auch als Chance verstanden werden, denn KI eröffnet uns neue Perspektiven und Möglichkeiten, wodurch zum einen unser Fachwissen ergänzt wird, zum anderen aber auch Prozesse erheblich beschleunigt werden können:

- KI kann uns in der Verwaltung z.B. durch die Vorprüfung von Anträgen und durch die Implementierung von Textbausteinen unterstützen.
- KI unterstützt uns dabei, historische Bausubstanz präzise zu analysieren, Schäden frühzeitig zu erkennen und Restaurierungsmaßnahmen effizienter zu planen.
- KI hilft aber auch, basierend auf digitalen Zwillingen, Smarte Anwendungen zu generieren.

Der heutige Workshop bringt uns als Expertinnen und Experten aus Denkmalpflege, Wissenschaft, Technik und Verwaltung zusammen. Gemeinsam sollten wir ins Gespräch kommen, diskutieren, unsere Erfahrungen austauschen und überlegen, wie wir moderne Technologien gezielt und verantwortungsvoll einsetzen können – zum Schutz unseres kulturellen Erbes.

Ich wünsche uns einen wunderbaren Workshop, mit kritischen und auch inspirierenden Diskussionen rund um das Thema Künstliche Intelligenz und bedanke mich vorab für Ihr Interesse und Ihre Neugier.

Denise Bednorz
Sprecherin VDL AG Denkmalinformationssysteme

„LudwigOne“: KI-gestützte Assistenz zur formalen und inhaltlichen Vorprüfung von Anträgen in der Denkmalpflege nach § 7i EstG

Einleitung

Behörden stehen vor großen Herausforderungen. Auf der einen Seite werden bis 2039 rund 13,4 Millionen Erwerbstätige in den Ruhestand gehen und können nicht durch jüngere Altersgruppen kompensiert werden.¹ Im öffentlichen Dienst resultieren daraus 1,6 Millionen offenen Stellen.² Auf der anderen Seite legen die vorhandenen Nachwuchskräfte Wert auf die Bereitstellung von moderner IT-Ausstattung und anderer notwendiger Ressourcen, inkl. digitaler Workflows.³ Doch wie bereits der eGovernment Monitor 2024 zeigt, hat die öffentliche Verwaltung gerade hier ein Problem.⁴ Als wäre das nicht Aufgabe genug, sehen sich Behörden nun auch mit Künstlicher Intelligenz konfrontiert, einem technologischen Trend, der sich in Zukunft in jedem Bereich von Wissensarbeit manifestieren wird und deutliche Mehrwerte verspricht.⁵ Es handelt sich um Mehrwerte, die dringend benötigt werden. Die öffentlichen Träger ringen somit nicht nur um das Verständnis dieser Technologie⁶ oder mit der Notwendigkeit zur Modernisierung, sondern auch mit der Tatsache, dass 95 Prozent aller KI-Prozessintegrationen keinen messbaren Mehrwert bieten⁷ und darüber hinaus notwendiger Datenschutz Innovation erschwert.⁸

In dieser komplexen Gemengelage zeigt das Projekt „LudwigOne“ im Auftrag des Landesamts für Denkmalpflege in Bayern einen eleganten, kosteneffizienten Ausweg. Nicht nur, um die Behörden schrittweise zu modernisieren, sondern auch um Nachwuchskräften die Infrastruktur zu geben, nach der sie verlangen, ohne den Datenschutz dabei außer Acht zu lassen. Gleichzeitig wurde „LudwigOne“ mit den Mitarbeiter:innen des Landesamtes für Denkmalpflege konzipiert und eng abgestimmt, um am Ende tatsächlichen Mehrwert bieten zu können.

Was ist „LudwigOne“?

„LudwigOne“ ist ein Verbund aus drei Applikationen: zwei Webapplikationen, bestehend aus Nutzeroberfläche (Abb. 1) und Adminoberfläche (Abb. 2) sowie einer sogenannten API, also einer netzwerk-basierten technischen Schnittstelle, die beide Webapplikationen bedient. Infrastrukturell fußen die Webapplikationen auf gängiger, breit verfügbarer Serverhardware. Die API hingegen setzt auf lokale KI-Hardware, um sich für bestimmte Aufgaben generative KI zunutze zu machen. Unter KI-Hardware werden Server mit erweiterten Grafikkartenressourcen verstanden, die absolut notwendig für die Ausführung von KI-Modellen sind.⁹

Formale Vorprüfung und strukturierte IntakeStrecke

„LudwigOne“ nimmt große und heterogene Dateiarchive mit mehr als 500 MB und über hundert Fotos in unterschiedlichen Formaten entgegen, überführt sie in eine eindeutige, reproduzierbare Ordnung über ein inhaltlich begründetes Kategorienschema, versieht alle Dateien mit konsistenter, nachvollziehbarer Benennung und stellt das Ergebnis als sortiertes Archiv zum direkten Download bereit. Sehr umfangreiche PDFs werden in fachlich sinnvolle Dokumentenkategorien zerlegt, sodass anstelle von unsortierten Sammelkonvoluten eine klar strukturierte, prüffähige Aktenbasis entsteht. Diese kann sofort in die behördliche Vorgangsbearbeitung überführt werden, ohne dass Medienbrüche oder manuelle Umbenennungsarbeiten erforderlich sind. Die Technologie ist so konzipiert, dass sie theoretisch mit einer unbegrenzten Anzahl an Vorgängen und Dokumenten konfrontiert werden kann. KI-Systeme werden in diesem Vorgehen nur punktuell eingesetzt, wenn aus unstrukturierten Daten strukturierte Daten abgeleitet werden müssen.

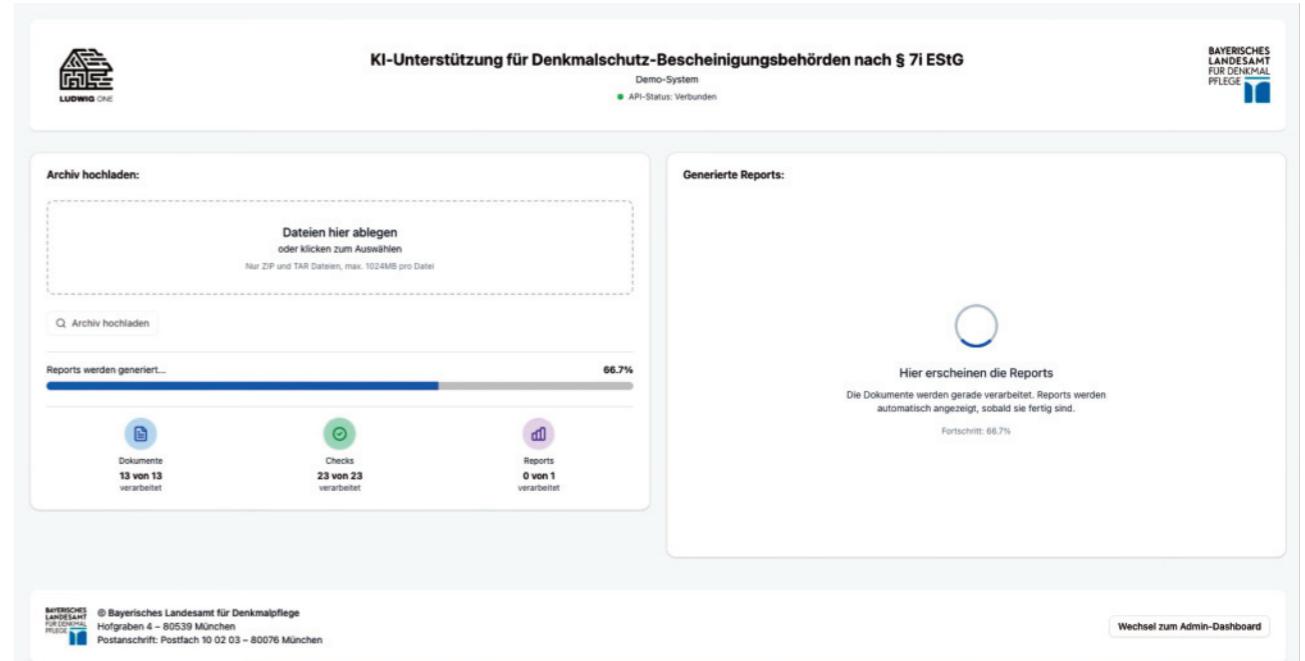


Abb. 1: Nutzeroberfläche von „LudwigOne“

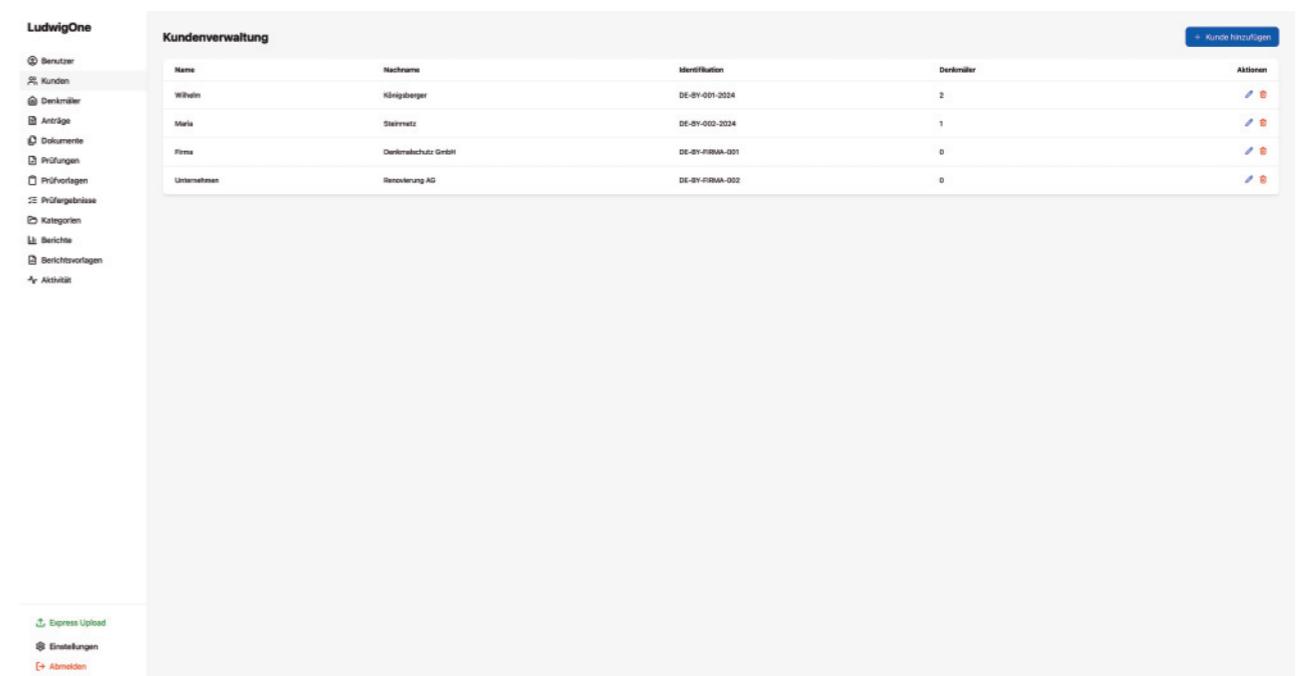


Abb. 2: Adminoberfläche von „LudwigOne“

Inhaltliche Vorprüfung auf Dokument und Vorgangsebene

Auf der Ebene einzelner Unterlagen werden fokussierte Prüfasppekte erzeugt, die sich an der jeweiligen Dokumentart orientieren und ohne didaktische Erläuterung an bestehende Prüfroutinen anschließen, etwa indem in Rechnungen solche Stichworte und Angaben hervorgehoben werden, die für die

Nachvollziehbarkeit der Maßnahmenzuordnung und der zeitlichen Verortung wesentlich sind, während auf der Gesamtebene des Vorgangs fehlende, unvollständige oder redundante Unterlagen kenntlich gemacht werden. Die Einzelergebnisse werden zu einem formalisierten Gesamtbericht mit nachvollziehbarem Prüfprotokoll verdichtet, wobei formale und inhaltliche Prüfprozesse unabhängig

voneinander laufen und damit einer fachlichen Bewertung nicht vorgreifen, sondern sie gezielt vorbereiten. Die teils dabei entstehenden enormen Datenmengen können mittels Chunking Stück für Stück von kleinen Sprachmodellen (SLM – Small Language Models¹⁰) verarbeitet werden. Dies geschieht nach dem Grundsatz der Kleinschrittigkeit, um einerseits Nachvollziehbarkeit und gleichzeitig Ressourceneffizienz zu gewährleisten. Mit diesem Vorgehen hat „LudwigOne“ Modellcharakter auch für andere Bereiche der öffentlichen Verwaltung und setzt einen Trend gegen den massiven Strom und Verarbeitungshunger großer Lösungen wie ChatGPT oder Gemini.¹¹

Berichtswesen, Protokollierung und Übergabe in Fachverfahren

Die aus der Vorprüfung gewonnenen Ergebnisse werden in einem Bericht zusammengefasst, der alle Einzelschritte protokolliert und damit einen revisionsfreundlichen AuditTrail bildet. Der Bericht wird automatisiert per EMail an ein definiertes Funktionspostfach übermittelt und die EMail enthält zusätzlich einen Link, über den das sortierte und strukturierte Dateiarchiv unmittelbar heruntergeladen werden kann. Parallel dazu stehen die extrahierten Stammdaten in einem standardisierten XML für die technische Weiterverarbeitung im Archiv-Download bereit. Sowohl ein organisatorischer Übergabekanal als auch ein technischer Pfad werden so zur Verfügung gestellt. Beide Wege sind medienbrucharm, integrationsfreundlich und für heterogene IT-Landschaften geeignet.

Architekturhinweise und Betrieb ohne Abhängigkeit von CloudLLMs

Die Benutzeroberfläche und das Administrationspanel sind in React/NextJS umgesetzt, die API basiert auf Flask. Es wurde darauf geachtet, keinerlei proprietäre, lizenzpflchtige Technologien einzusetzen. Alle verwendeten Komponenten entsprechen der Apache 2.0¹² bzw. MIT-Lizenz¹³. Das ermöglicht dem Auftraggeber, die Lösung bei Bedarf an Dritte weiterzugeben. In „LudwigOne“ arbeiten spezialisierte, schlanke Modelle mit klarer Aufgabenverteilung. Das Livesystem fundiert auf einem eigenen KI-Server, welcher ein kompaktes Sprachmodell für Textextraktion¹⁴ und einfache Prüfungen,

ein VisionModell¹⁵ für Bildbeschreibung sowie ein LogikModell¹⁶ für die Zusammenführung der Ergebnisse in Berichtsform beherbergt. Die Orchestrierung erfolgt containerisiert mit Docker und ermöglicht damit eine unkomplizierte Integration in vorhandene Systemumgebungen und eine bedarfsgerechte Skalierung. Das Design ist auf einen OnPremiseBetrieb beziehungsweise den Betrieb in einem kleinen Rechenzentrum ausgerichtet und vermeidet so problematische Datenflüsse in PublicCloudUmgebungen. Dennoch kann für Entwicklungs- und Testszenarien die Anwendung in einen Modus wechseln, der beispielsweise die kosteneffiziente Nutzung der internetbasierten API von Mistral erlaubt, sofern noch kein On-Premise Betrieb möglich sein sollte.

Datenschutz, Nachvollziehbarkeit und Rechtssicherheit als Leitplanken

Bei der Entwicklung neuer Applikationen tritt oft ein Henne-Ei-Problem beim Datenschutz auf. Applikationen müssen mit relevanten Testdaten entwickelt werden, damit diese nicht am Bedarf des Kunden vorbeigehen. Auf der anderen Seite handelt es sich dabei oftmals um hochsensible Daten, die im Rahmen einer Softwareentwicklung nicht preisgegeben werden dürfen, gerade nicht, wenn es sich um einen externen Dienstleister handelt, der die Software entwickelt. Dies kann elegant umschifft werden, indem man anonymisierte Echtdaten zur Verfügung stellt und synthetische Daten ohne echten Bezug generiert. Beides wurde für die Entwicklung von „LudwigOne“ angewendet. So konnte die Entwicklung der Applikation schnell voranschreiten, ohne Datenschutzbedenken auszulösen. Für „LudwigOne“ wurde die konsequente Entscheidung gegen proprietäre, datenschutzrechtlich sensible CloudLLMs wie von Google (Gemini 2.5¹⁷), OpenAI (GPT-5¹⁸) oder Anthropic (Sonne-4.5¹⁹) getroffen. Dies hat den Nachteil, dass auch deren dem OpenSource-Markt überlegenen Fähigkeiten nicht genutzt werden können. Stattdessen fußt das Design auf transparenten, kleinen, aufgabenspezifischen Modellen von europäischen Herstellern wie Mistral aus Frankreich. Mistral²⁰ adressiert mit seinen Sprachmodellen die öffentliche Verwaltung und unterwirft sich den hohen europäischen Anforderungen

an Datenqualität. Gleichzeitig liegen größere Modell-Varianten von Mistral im internationalen Vergleich gleichauf mit Modellen aus den USA und China.²¹ Die funktionale Zerlegung der Arbeitsschritte und das detaillierte Prüfprotokoll dienen dem Ziel, einen prüffähigen AuditTrail zu schaffen, der rechtskonformes Verwaltungshandeln unterstützt. Denn nachvollziehbar geordnete Unterlagen, eine klare Trennung von formalen und inhaltlichen Prüfbefunden und maschinenlesbare Stammdaten erleichtern interne Revision.

Einbindung in vorhandene Prozesse ohne Änderung der Zuständigkeiten

„LudwigOne“ fügt sich so in bestehende behördliche Abläufe ein, indem es unmittelbar an der Schnittstelle der Eingangsbearbeitung ansetzt, die Sichtung und Vorsortierung großer Konvolute übernimmt, die Dokumente in eine belastbare Struktur überführt. Es stellt dokumentenspezifische Hinweise bereit und hilft so den Sachbearbeiter:innen, ihre Aufmerksamkeit zielgerichtet in den jeweiligen Antrag zu investieren. „LudwigOne“ ist ein hilfreicher Assistent und gleichzeitig fachlicher Tippgeber. Die Verwendung von „LudwigOne“ führt somit zu einer höheren Einstiegshöhe in das vom Bürger bereitgestellte Material und spart so maßgeblich Zeit in der Anerkennung oder Nichtanerkennung von Ansprüchen. Vorhandene Prozesse werden so lediglich ergänzt und nicht vollkommen neu strukturiert. Dies führt wiederum zu einer höheren Akzeptanz einer solchen KI-Integration, da diese lediglich Routinearbeiten übernimmt und so rein unterstützend wirkt.

Projektstand und Roadmap

Das Projekt wurde am 1.1.2025 begonnen, die Laufzeit ist auf zwölf Monate ausgelegt und der Ziel-Rollout ist für März 2026 vorgesehen. Aktuell laufen erste Tests und Validierungen in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber. Als nächster Schritt ist die Vorbereitung des OnPremiseBetriebs mit eigenen KI-Ressourcen geplant, wobei der Entwicklungsstand am 6.10.2025 im Rahmen des ICO-MOSWorkshops „Künstliche Intelligenz und Denkmalpflege“ vorgestellt wurde.

Nutzen für die Denkmalverwaltung in der Vorprüfung nach § 7i EStG

Der unmittelbare Mehrwert liegt in der Zeitersparnis bei Sichtung und Ordnung, in der Vereinheitlichung der Unterlagenbasis und in der erhöhten Transparenz der Vorprüfung. Denn automatisiertes Vorsortieren, konsistentes Umbenennen und die Zerlegung umfangreicher PDFs beschleunigen nachweislich den Einstieg in die fachliche Prüfung. Prüfungen können dadurch noch gründlicher aber vor allem zielgerichtet vorgenommen werden, bei gleichzeitig personell engen Kapazitäten.

Übertragbarkeit und Kooperation

Die Grundprinzipien – strukturierte IntakeStrecke, SLMbasierte Vorprüfung, protokollierte Befunde und XMLSchnittstellen – lassen sich mit vertretbarem Anpassungsaufwand auf angrenzende Verwaltungsprozesse übertragen. Etwa dort, wo ähnliche Aktenlagen mit großen, heterogenen Dateiarchiven und formalen wie inhaltlichen Vorprüfbefunden auftreten. Behördenspezifische Prüflogiken sowie Formattanforderungen können in der Adminoberfläche gepflegt werden, sodass die Lösung gemeinsam mit interessierten Stellen auf ihre jeweilige Fachpraxis hin ausgerichtet werden kann, immer im Hinblick auf die Einhaltung der Datensouveränität. „LudwigOne“ erfordert keine doppelte Datenhaltung, sondern ist als One-Stop-Shop konzipiert. Darüber hinaus können zur kontinuierlichen Verfeinerung behördenspezifischer Prüflogiken auf Wunsch weitere fachliche Datenbanken als strikt kontrollierte und protokolierte, ausschließlich lesende Schnittstellen angebunden werden. Die eingesetzten LogikModelle (Mistrals Magistral) können so über klar definierte Werkzeugaufrufe (sog. Function Calling) situativ Zusatzinformationen hinzuziehen.

Fazit

„LudwigOne“ schließt die Lücke zwischen heterogenen Eingängen und einer prüffähigen, revisionsfreundlichen Entscheidungsgrundlage. Die Web-Applikation ist als vorbereitendes Werkzeug gedacht, welches von Mitarbeiter:innen der Behörde nach Bedarf eingesetzt werden kann. Das Projekt adressiert eine Vielzahl von Hürden im veraltungstechnischen Einsatz von KI, die vielerorts als

unüberwindbar gesehen werden. Mithilfe eines schlauen Designs werden diese Hürden zu Stärken transformiert und zeigen, dass Deutschland im Einsatz von KI den Weltvergleich nicht scheuen muss. Die fehlenden Funktionen proprietärer LLM fallen hier kaum noch ins Gewicht. Gleichzeitig zeigt die Applikation, wie eine Modernisierung der öffentlichen Verwaltung Schritt für Schritt erfolgen kann und wie auch Nachwuchskräfte mit innovativen Lösungen konsequenter angesprochen werden können.

Literatur

Anthropic (o. J.), System Card: Claude Sonnet 4.5 (PDF). URL: <https://assets.anthropic.com/m/12f214efcc2f457a/original/Claude-Sonnet-4-5-System-Card.pdf>. Zugriff: 05.10.2025.

Apache Software Foundation (o. J.), Apache License, Version 2.0. URL: <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>. Zugriff: 05.10.2025.

E. BRYNJOLFSSON, D. Li, L. R. RAYMOND (2025), Generative AI at Work, Quarterly Journal of Economics, 140(2). URL: <https://academic.oup.com/qje/article/140/2/889/7990658>. Zugriff: 05.10.2025.

C. DJEFFAL, L. MEHL (o. J.), Große Sprachmodelle in der öffentlichen Verwaltung, NEGZ. URL: <https://negz.org/publikation/grosse-sprachmodelle-in-der-oeffentlichen-verwaltung/>. Zugriff: 05.10.2025.

Google (o. J.), Gemini 2.5 Pro Model Card (PDF). URL: <https://modelcards.withgoogle.com/assets/documents/gemini-2.5-pro.pdf>. Zugriff: 05.10.2025.

Initiative D21 (2024): eGovernment MONITOR 2024. URL: <https://initiatived21.de/publikationen/egovernment-monitor/2024>. Zugriff: 05.10.2025.

R. JANSSEN, R. KESLER, M. KUMMER, J. WALDFOGEL (o. J.), GDPR and the Lost Generation of Innovative Apps, NBER Working Paper No. 30028. URL: <https://www.nber.org/papers/w30028>. Zugriff: 05.10.2025.

LMArena (o. J.), Leaderboard – Text (Overall, no style control). URL: <https://larena.ai/leaderboard/text/overall-no-style-control>. Zugriff: 05.10.2025.

Mistral AI (o. J.), Mistral Small 3. URL: <https://mistral.ai/news/mistral-small-3>. Zugriff: 05.10.2025.

Mistral AI (o. J.), Pixtral 12B. URL: <https://mistral.ai/news/pixtral-12b>. Zugriff: 05.10.2025.

Mistral AI (o. J.), Magistral. URL: <https://mistral.ai/news/magistral>. Zugriff: 05.10.2025.

Mistral AI (o. J.), Unternehmenswebseite. URL: <https://mistral.com>. Zugriff: 05.10.2025.

Mistral AI (o. J.), Function Calling (Dokumentation). URL: https://docs.mistral.ai/capabilities/function_calling/. Zugriff: 05.10.2025.

Nanda (o. J.), Survey/Sign-up Form. Google Forms. URL: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc8rU8OpQWU44gYDeZyINUZjBFwu--1uTbxixK_PRSVrfaH8Q/viewform. Zugriff: 05.10.2025.

next:public (o. J.): Nachwuchsbarometer Öffentlicher Dienst. URL: <https://nextpublic.de/studie/nachwuchsbarometer-oeffentlicher-dienst/>. Zugriff: 05.10.2025.

OpenAI (o. J.), GPT-5-Systemkarte. URL: <https://openai.com/de-DE/index/gpt-5-system-card/>. Zugriff: 05.10.2025.

S. SCHNEIDER, D. SMALLEY (o. J.), CPU vs. GPU for Machine Learning, IBM Think Blog. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/cpu-vs-gpu-machine-learning>. Zugriff: 05.10.2025.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025): Pressemitteilung PD25_N048_13. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/08/PD25_N048_13.html. Zugriff: 05.10.2025.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (o. J.): Themenportal „Öffentlicher Dienst“. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Staat/Oeffentlicher-Dienst/_inhalt.html. Zugriff: 05.10.2025.

C. STONE (2024), Explore AI Models: Key Differences between Small and Large Language Models, Microsoft Cloud Blog. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-cloud/blog/2024/11/11/explore-ai-models-key-differences-between-small-language-models-and-large-language-models/>. Zugriff: 05.10.2025.

Wikipedia (o. J.): MIT-Lizenz. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/MIT-Lizenz>. Zugriff: 05.10.2025.

C. You (2025), How Much Energy Does ChatGPT Use, Epoch AI – Gradient Updates. URL: <https://epoch.ai/gradient-updates/how-much-energy-does-chatgpt-use>. Zugriff: 05.10.2025.

- 1 https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/08/PD25_N048_13.html
- 2 https://www.destatis.de/DE/Themen/Staat/Oeffentlicher-Dienst/_inhalt.html
- 3 Nachwuchsbarometer Öffentlicher Dienst – <https://nextpublic.de/studie/nachwuchsbarometer-oeffentlicher-dienst/>
- 4 eGoverment Monitor 2024 – <https://initiatived21.de/publikationen/egovernment-monitor/2024>
- 5 BRYNJOLFSSON, Li, RAYMOND, Generative AI at Work – <https://academic.oup.com/qje/article/140/2/889/7990658?login=false>
- 6 DJEFFAL, MEHL – <https://negz.org/publikation/grosse-sprachmodelle-in-der-oeffentlichen-verwaltung/>
- 7 Nanda – https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc8rU8OpQWU44gYDeZyINUZjBFwu--1uTbxixK_PRSVrfaH8Q/viewform
- 8 JANSSEN, KESLER, KUMMER, WALDFOGEL – GDPR and the Lost Generation of Innovative Apps, <https://www.nber.org/papers/w30028>
- 9 SCHNEIDER, SMALLEY, CPU vs. GPU for Machine Learning, <https://www.ibm.com/think/topics/cpu-vs-gpu-machine-learning>
- 10 STONE, Explore AI Models, <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-cloud/blog/2024/11/11/explore-ai-models-key-differences-between-small-language-models-and-large-language-models/>
- 11 You, How Much Energy Does ChatGPT Use, <https://epoch.ai/gradient-updates/how-much-energy-does-chatgpt-use>
- 12 License 2.0, <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>
- 13 MIT-Lizenz, <https://de.wikipedia.org/wiki/MIT-Lizenz>
- 14 Mistral Small, <https://mistral.ai/news/mistral-small-3>
- 15 Pixtral, <https://mistral.ai/news/pixtral-12b>
- 16 Magistral, <https://mistral.ai/news/magistral>
- 17 Gemini 2.5 Pro Model Card, <https://modelcards.withgoogle.com/assets/documents/gemini-2.5-pro.pdf>
- 18 GPT-5-Systemkarte, <https://openai.com/de-DE/index/gpt-5-system-card/>
- 19 System Card: Claude Sonnet 4.5, <https://assets.anthropic.com/m/12f214efcc2f457a/original/Claude-Sonnet-4-5-System-Card.pdf>
- 20 Mistral, <https://mistral.com>
- 21 LMArena, <https://larena.ai/leaderboard/text/overall-no-style-control>
- 22 Function Calling, https://docs.mistral.ai/capabilities/function_calling/

Abstract

“LudwigOne”: AI-supported Assistance for Preliminary Formal and Content-related Review of Applications for Monument Preservation in Accordance with § 7i EstG

“LudwigOne” addresses rising application numbers with limited resources and media breaks as an on-premise AI assistant for formal and content-related preliminary checks by receiving large file archives (including very extensive PDFs) in a structured manner, recognising applicants and monuments, categorises and consistently renames documents, generates a sorted download archive with review notes and gap analyses, sends logged reports to functional mailboxes, and provides master data as XML, whereby transparent small language and vision models in a modular architecture ensure cost efficiency, AI sovereignty, data protection, and traceability.

Bildnachweis:

Abb. 1 u. 2: Stefan Müller

Datenschutz und Urheberrechte in der digitalen Denkmalpflege und Archäologie

Künstliche Intelligenz („KI“) und der digitale Fortschritt haben längst ihren Weg in die Denkmalpflege und Archäologie gefunden. Stellen Sie sich die nachfolgenden Szenen vor, die so oder so ähnlich in der Denkmalpflege alltäglich geworden sind:

Szene 1: Ein Sommerabend im Innenhof eines Denkmals, jemand startet „nur kurz“ eine Drohne für ein spektakuläres Foto – die Bilder landen wenig später in den sozialen Medien.

Szene 2: Eine Fachfirma verwendet eine Drohne, um das Dach eines historischen Gebäudes zu kontrollieren und dokumentiert Risse, lose Ziegel und Anschlüsse; anschließend hilft eine KI, Hunderte Bilder zu sortieren, Schadstellen zu markieren und einen ersten Maßnahmenplan zu skizzieren. Dieselbe Technik, zwei völlig unterschiedliche Situationen – und beide berühren drei Konstanten: Datenschutz, Hausrecht und Urheberrecht. Rechtliche Themen werden auch bei der nächsten Szene behandelt:

Szene 3: Ein Forschungsverbund rekonstruiert einen antiken Tempel virtuell. Aus Punktfolgen, historischen Plänen, Fragmentfotos und Grabungsberichten erzeugt eine generative KI plausible Visualisierungen – nicht als ‘Wahrheit’, sondern als dateninformierte Hypothesen, die Forschende diskutieren, kuratorisch einordnen und für Vermittlung und Lehre aufbereiten. Der rote Faden in allen Szenarien bleibt gleich: KI hilft, Datenberge zu bewältigen und bewegt sich im Spannungsfeld mehrerer Rechtsgrundlagen. Eins darf jedoch nicht vergessen werden: Die Verantwortung, Qualitätssicherung und Einordnung bleiben eine menschliche Aufgabe, zumindest noch.¹

Warum brauchen wir Datenschutz – und warum ist das gerade mit KI zentral?

Weil KI eine Fülle an Informationen verarbeitet, die meist personenbezogene Daten sind. Als personenbezogene Daten werden alle Informationen bezeichnet, die sich auf eine identifizierte oder identifizierbare natürliche Person beziehen.² Diese dürfen nach dem Datenschutzrecht nicht einfach erhoben und gespeichert werden. Zu den personenbezogenen Daten zählen nicht nur Namen und Adressen, sondern auch Gesichter. Auch Metadaten, Kennzeichen, Standortdaten, die Kombination aus GIS-Layern und Fotos sowie Notizen zu Begehungen können eine Person identifizierbar machen. Rechtliche Grundlagen für die Verwendung von KI im Datenschutzrecht sind die Datenschutzgrundverordnung (DSGVO), der AI-Act (europäische Richtlinie 2024/1689) und das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG). Die DSGVO legt die grundlegenden Prinzipien für die Verarbeitung personenbezogener Daten fest, die auch für KI-Systeme gelten. Dazu gehören Rechtmäßigkeit, Zweckbindung, Transparenz, Datenminimierung sowie die Betroffenenrechte auf Auskunft, Berichtigung und Löschung (vgl. Art. 5 DSGVO). Das BDSG konkretisiert und erweitert die DSGVO an den Stellen, an denen europäisches Recht nationale Regelungen zulässt oder fordert. Dies ist beispielsweise beim Beschäftigtendatenschutz oder bei der Videoüberwachung der Fall.³

Jede Verarbeitung braucht eine Rechtsgrundlage (vgl. Art. 6 Abs. 1 und 3 DSGVO). Bei der Nutzung externer KI-Dienste wie ChatGPT, Gemini und Perplecty werden personenbezogene Daten an den Diensteanbieter übermittelt. Dafür ist eine Rechtsgrundlage nach Art. 6 DSGVO erforderlich. Beim Drohnenflug in Szene 2 bedarf es ebenfalls einer Rechtsgrundlage nach Art. 6 Abs. 1 DSGVO. Diese kann in Form einer Einwilligung des Eigentümers (vgl. Art. 6 Abs 1 a) DSGVO) eingeholt werden.

Wo Prozesse voraussichtlich ein hohes Risiko für Rechte und Freiheiten bergen – etwa großflächige Bildverarbeitung, Profilbildung oder biometrische Verfahren – ist vorab ggf. eine Datenschutz-Folgenabschätzung (DSFA) nötig (vgl. Art. 35 DSGVO).

Der räumliche Anwendungsbereich der DSGVO ist begrenzt. Dieser gilt in allen Ländern der Europäischen Union sowie in Island, Liechtenstein und Norwegen. Um zu verhindern, dass Unternehmen oder Behörden personenbezogene Daten einfach in Länder außerhalb dieses Raums weitergeben und damit strengere Datenschutzregeln umgehen, gibt es in der DSGVO Vorgaben zur Weitergabe in sogenannte Drittstaaten (vgl. Art 44 ff DSGVO). Nur wenn die Vorgaben eingehalten sind, bleibt das Schutzniveau der Betroffenen gewahrt.

Eine Datenübermittlung in die USA ist nicht so selten, wie man vielleicht auf den ersten Blick denken mag. Eine Übermittlung von Daten in ein Drittland im Sinne der DSGVO findet statt, wenn personenbezogene Daten auf einem Server in einem solchen Land gespeichert werden. Bei der Verwendung von ChatGPT ist daher besondere Vorsicht geboten. Ein oft unterschätzter Punkt hierbei ist die Vertraulichkeit: Interne oder sensible Inhalte gehören nicht in offene Tools – schon gar nicht über private Accounts. Der Datenschutzverstoß liegt hierbei darin, dass personenbezogene Daten eingegeben werden und diese dann auf Servern in den USA gespeichert werden. Daraus ist vor der Verwendung von KI und digitalen Tools zu überprüfen, welche Daten wo hochgeladen und gespeichert werden.⁴

Welche KI eingesetzt werden darf, bestimmt die EU-Richtlinie, die besser als AI Act bekannt ist. Seit dem 2. Februar 2025 ist die erste Stufe der Verordnung in Kraft. Danach gilt beispielsweise die Verpflichtung, Mitarbeitende über die im Unternehmen eingesetzten KI-Systeme nachweislich zu schulen. Weitere Verpflichtungen wie die Transparenzpflicht für generative KI-Systeme werden ab dem 2. August 2026 wirksam. Der AI Act verfolgt einen risikobasierten Ansatz, bei dem KI-Systeme je nach ihrem Gefährdungspotenzial in verschiedene Kategorien eingestuft werden. Verbotene KI-Praktiken (unannehmbares Risiko) dürfen nicht verwendet werden. Hochrisiko-KI-Systeme hingegen dürfen nur unter bestimmten Vorausset-

zungen verwendet werden. Anbieter generativer KI müssen ihre Systeme transparent gestalten und ausreichend dokumentieren.⁵ Das bedeutet, dass generative und interaktive KI-Systeme wie Chatbots den Nutzern offenlegen müssen, dass sie es mit einer KI zu tun haben. Wenn synthetische Inhalte (Text, Bilder, Videos) von der KI erstellt werden, müssen sie als KI-generiert gekennzeichnet werden.⁶

Was bedeutet das für unsere beiden Drohnenzenen?

Beim spontanen Social Post (Szene 1) ist – aus datenschutzrechtlicher Sicht – u.a. vor dem Post zu beachten, ob personenbezogene Daten unkenntlich gemacht sind. Personenbezüge liegen schnell vor (Gesichter, Kennzeichen etc.), ebenso sensible Ortsangaben, die wiederum zu Rückschlüssen auf die dort wohnhaften Personen führen können. Im Zweifel fehlt es für eine solche Datenerhebung und die Speicherung der personenbezogenen Daten an einem Zweck, wodurch die Erhebung und Speicherung unzulässig wären. Beim geplanten Dachflug (Szene 2) ist der Zweck hingegen klar: Es geht um eine Sanierungsvorbereitung. Die Einwilligung ist dennoch vom Hauseigentümer einzuholen und, falls externe Systeme genutzt werden, sollte vorab Drittlandübermittlungen (bspw. in die USA) überprüft werden.⁷

Und das Urheberrecht – was ist erlaubt, was müssen wir vorher klären?

Der Einsatz von KI hat Auswirkungen auf das Urheberrecht in mehrfacher Hinsicht: bei der Nutzung urheberrechtlich geschützter Quellen, beim Training von KI-Modellen sowie hinsichtlich der Rechte an KI-generierten Texten.

Wird KI verwendet, um etwas herzustellen, beispielsweise ein Bild, dann stellt sich die Frage, ob und wer Schöpfer im Sinne des Urheberrechts ist. Nach der herrschenden Auffassung des deutschen Urheberrechts kann nur ein Mensch als Schöpfer im Sinne des § 7 UrhG angesehen werden. Dies hat zur Konsequenz, dass rein KI-generierte Inhalte nicht schutzberechtigt sind.⁸

Beim Einsatz von KI ist das Risiko zu beachten, dass KI-Systeme urheberrechtlich geschützte Materialien (etwa Formulierungen aus Fachbeiträ-

gen) reproduzieren könnten. Dies hat unter Umständen Urheberrechtsverstöße zur Folge.⁹

Wo KI-Inhalte analysiert oder trainiert werden, rücken Text- und Data-Mining-Regeln („TDM“) in den Fokus. § 44b UrhG erlaubt TDM an rechtmäßig zugänglichen Werken, verlangt aber die Lösung nach Zweckende und respektiert Nutzungs- vorbehalte: Rechteinhaber können die Nutzung ausschließen.¹⁰ Für die Forschung privilegiert § 60d UrhG TDM: Berechtigt sind insbesondere Forschungsorganisationen, Bibliotheken, Museen und einzelne Forschende mit nicht-kommerziellem Zweck unter bestimmten – dann zu prüfenden – Voraussetzungen. Der Forschungsbegriff ist zunächst weit zu verstehen: Erfasst ist das methodisch-systematische Streben nach neuen Erkenntnissen – auch vorbereitende Schritte wie die Erstellung eines Datensatzes, der späteren Erkenntnis- gewinn ermöglicht, sind erfasst.¹¹

Viele Denkmalbehörden betreiben heute umfangreiche Fachregister. Hier schützt das Datenbankherstellerrecht (§§ 87a ff. UrhG) die Investition in Beschaffung, Überprüfung und Darstellung der Inhalte. Der Hersteller hat das ausschließliche Recht, die Datenbank insgesamt oder wesentliche Teile zu vervielfältigen, zu verbreiten und öffentlich wiederzugeben; „Entnahme“ und „Weiterverwendung“ sind weit auszulegen und erfassen jede An- eignung der Investition oder öffentliche Verfügbar- machung wesentlicher Teile – auch sukzessive.¹² Die Rechtsprechung hat etwa die nahezu vollständige Einbindung der Inhalte einer Mediathek in eine Drittplattform als unzulässige Weiterverwen- dung eines wesentlichen Teils gewertet.¹³ Für „amtliche“ Datenbanken kann § 5 UrhG analog durchgreifen – amtliche Werke sind gemeinfrei; das darf der Datenbankschutz nicht aushebeln.¹⁴

Wenn beispielsweise Texte mit KI geschrie- ben und veröffentlicht werden, stellt sich die Frage, ob die Werke mit einem Hinweis „erstellt durch KI“ oder ähnlichem gekennzeichnet werden müssen. Der AI Act sieht Transparenzpflichten vor: Nutzer sollen erkennen können, wenn sie mit einem KI- System interagieren; KI-generierte oder -manipulierte Bild-, Audio- oder Videoinhalte sind demnach zu kennzeichnen. Dort, wo Inhalte mit dem Zweck veröffentlicht werden, die Öffentlichkeit über An- gelegenheiten von öffentlichem Interesse zu infor-

mieren, ist offenzulegen, ob Inhalte künstlich ge- generiert oder manipuliert worden sind – es sei denn, es fand eine hinreichende menschliche redak- tionale Kontrolle statt. Anbieter müssen Transpa- renzangaben leicht wahrnehmbar, unmittelbar er- reichbar und ständig verfügbar machen. Die Kenn- zeichnungen sollen maschinenlesbar sein.¹⁵

Zusammengefasst heißt das: Wer Daten für KI-Analysen nutzt, klärt vorher die Rechte, respek- tiert Opt-outs und vermeidet systematische Entnah- men wesentlicher Teile und prüft, welchen eigenen Anteil er an der Erstellung des Werks hatte.

Der Droneneinsatz

In den eingangs erwähnten Szenen 1 und 2 wird eine Drohne zu unterschiedlichen Einsätzen ver- wendet. Neben dem Datenschutzrecht ist in diesen Beispielen auch das Urheberrecht zu beachten, und in diesem Kontext ist die sog. Panoramafrei- heit von Bedeutung. Die Panoramafreiheit erlaubt Abbildungen von Werken, die sich bleibend an öffentlichen Wegen, Straßen oder Plätzen befinden – bei Bauwerken nur die äußere Ansicht (vgl. § 59 UrhG). Privilegiert sind aber nur Aufnahmen, die den Blick wiedergeben, wie er sich einem Men- schen von solchen öffentlichen Orten aus bietet; besondere Hilfsmittel oder unzugängliche Per- spektiven sind nicht umfasst (vgl. § 59 UrhG).

Genau hier setzt die aktuelle Rechtsprechung zur Drohne an: Mithilfe einer Drohne ange- fertigte Luftaufnahmen fallen nicht unter die Panoramafreiheit, weil der Luftraum gerade keine Perspektive „von öffentlichen Wegen, Straßen oder Plätzen“ ist. Erfasst sind Orte, die Teil der Erdoberfläche sind oder fest mit ihr verbunden – nicht der Luftraum.¹⁶ Der BGH hat 2024 klarge- stellt: Die Veröffentlichung von Drohnen-Luftbil- dern urheberrechtlich geschützter Werke ist nicht durch § 59 Abs. 1 Satz 1 UrhG erlaubt; sie greift in Vervielfältigungs- und Verbreitungsrechte ein und kann Unterlassung, Schadensersatz und Ab- mahnkosten auslösen.¹⁷

Das übersetzen wir nun einmal in unsere zwei Szenen: Beim spontanen Hof-Überflug dro- hen urheberrechtliche Konflikte, sobald geschützte Werke aus einer unzulässigen Perspektive abge- bildet und veröffentlicht werden. Auf die Panora- mafreiheit kann sich der Ersteller des Bilds nicht

berufen, da es sich um einen Innenhof handelt. Bei der geplanten Dachsanierung ist vieles – im Vor- feld – steuerbar: Es braucht die Erlaubnis des Eigentümers (Hausrecht) und – soweit geschützte Baukunst oder integrierte Kunstwerke betroffen sind – eine Rechtsgrundlage für Luftaufnahmen jenseits der Panoramafreiheit. Die Voraussetzun- gen für den Droneneinsatz selbst (LuftVO, Geneh- migung etc.) sollten ebenfalls vorliegen.¹⁸

Was folgt daraus für Verantwortung und Haftung?

Digitale Werkzeuge und KI sind zulässig – wenn die rechtlichen Rahmenbedingungen geschaffen und eingehalten werden. Wer KI-gestützte Ergeb- nisse übernimmt, muss sie fachlich prüfen und dokumentieren. Denn in erster Linie ist die Haftung (noch) menschlich. Macht die KI Fehler, fällt dies grundsätzlich auf denjenigen zurück, der die KI anwendet. Das Haftungsverständnis wird sich daher in Zukunft noch anpassen und ändern. Bisher gilt:

Verstöße gegen das Urheberrecht können sowohl zivilrechtliche als auch strafrechtliche (vgl. §§ 106, 108a UrhG) Konsequenzen nach sich zie- hen. Zivilrechtliche Ansprüche gegen den Arbeit- nehmer als Täter sind in den § 97 ff UrhG geregelt. Darüber hinaus gilt, dass der Arbeitgeber neben dem Arbeitnehmer haftet, dies regelt § 99 UrhG.

Wenn eine Mitarbeiterin oder ein Mitarbei- ter gegen das Datenschutzrecht verstößt, kann dies für betroffene Personen spürbare Folgen ha- ben. Beispiel: Eine E-Mail mit sensiblen Personal- daten gelangt an den falschen Empfänger oder eine Datei mit Gesundheitsinformationen wird in einem frei zugänglichen Ordner abgelegt. Die be- troffene Person fühlt sich bloßgestellt, leidet un- ter Stress oder Rufschäden und hat womöglich fi- nanzielle Aufwendungen, etwa für Beratung oder Schutzmaßnahmen. Nach Art. 82 DSGVO kann sie dafür Schadensersatz verlangen. Der Anspruch richtet sich in der Regel gegen das Unternehmen als verantwortliche Stelle; der Fehler des Mitar- beitenden löst die Haftung aus. Erfasst sind ma- terielle Schäden wie Kosten und immaterielle Schäden wie seelische Belastungen. Datenschutz- verstöße können zudem zu behördlichen Sanktio- nen führen. Nutzt ein Mitarbeiter etwa ohne Freigabe ein Cloud-Tool und überträgt Kundenda-

ten dorthin, ohne einen Auftragsverarbei- tungs- vertrag zu schließen oder die Übermittlung aus- reichend abzusichern, prüft die Aufsichtsbehörde den Vorfall. Stellt sie fest, dass zentrale Vorgaben der DSGVO missachtet wurden – etwa fehlende Rechtsgrundlagen, unzureichende technische und organisatorische Maßnahmen oder mangelnde Dokumentation –, kann sie gegen den Arbeitge- ber Bußgelder nach Art. 83 DSGVO verhängen. Die Höhe richtet sich unter anderem nach Schwere und Dauer des Verstoßes, nach der Zahl der Betroffenen, der Art der Daten, dem Grad von Fahrlässigkeit oder Vorsatz sowie der Koopera- tion des Unternehmens. Die Geldbußen treffen das Unternehmen als Verantwortlichen, auch wenn der Auslöser ein einzelner Mitarbeiter war.¹⁹

Die eingesetzten Werkzeuge – ob Drohne, Punktwolken-Scanner oder KI – entbinden daher nicht von Sorgfalt, Kontrolle und Dokumentation: Der Architekt schuldet beispielsweise eine mangel- freie, funktionstaugliche Planung nach den allge- mein anerkannten Regeln der Baukunst und Tech- nik. Planungsfehler begründen eine Haftung, wenn sie zu Baumängeln führen.²⁰ Insoweit kann es eine interessante und in Zukunft durchaus rechtlich zu bewertende Frage sein, inwieweit Berufshaft- pflichtversicherungen den KI-Einsatz abdecken (werden). Allgemein dürfte sich die Rechtspre- chung in der Zukunft häufiger mit der Frage be- schäftigen, inwieweit der KI-Einsatz eine Pflicht- verletzung darstellt und wie mit fehlerhaften KI- Ergebnissen umzugehen ist.²¹

Für Behörden gilt: Ein KI-gestützter Be- scheid bleibt ein Behördenbescheid – mit allen Konsequenzen. Selbst wenn Teile des Verfahrens automatisiert sind, trägt die Behörde die Verant- wortung dafür, dass die Entscheidung rechtmäßig ist, die Voraussetzungen für Automatisierung vor- liegen und Betroffene angemessen informiert und geschützt werden.²² Das Verwaltungsverfah- ren lässt vollautomatisierte Verwaltungs- akte zu, verlangt aber, dass die rechtlichen Anfor- derungen eingehalten und Verantwortlichkeiten klar geregelt sind.²³

Und schließlich das Arbeits- und Dienst- recht: Der Dienstherr/ Arbeitgeber muss sichere Plattformen zur Verfügung stellen. Er kann den Einsatz von KI aber auch untersagen. Ist der Ein-

satz von KI untersagt oder fehlt eine Freigabe, kann die Nutzung nicht freigegebener IT-Tools, Cloud-Dienste oder Chatbots – je nach Schwere des Verstoßes und Datenbezug – arbeitsrechtliche Konsequenzen nach sich ziehen, von der Abmahnung bis zur außerordentlichen Kündigung (§ 626 BGB).²⁴ Sowohl für den Arbeitnehmer als auch für den Arbeitgeber stellen sich in dieser Konstellation wiederum mehrere Haftungsfragen.²⁵

Zusammengefasst sollten daher der KI-Einsatz klar geregelt, Freigabe- und Prüfprozesse eingeführt und eine Nachvollziehbarkeit der Datenherkunft und eine dokumentierte, menschliche Kontrolle in risikobehafteten Fällen beibehalten werden.

Lohnt sich dieser Aufwand?

Die digitale Denkmalpflege und Archäologie profitieren von KI-unterstützter Mustererkennung, Segmentierung, Textauswertung – und zunehmend von generativer Revisualisierung: Dateninformierte, kuratierte Rekonstruktionen erschließen neue Zugänge zur Forschung und Vermittlung. Rechtsmechanismen sind kein Bremsklotz, sondern der Qualitätsrahmen, der Nachnutzung ermöglicht und Vertrauen schafft. Wer Prozesse sauber aufsetzt, Rechte klärt, Transparenz wahrt und Ergebnisse fachlich prüft, nutzt KI als Beschleuniger – und bleibt sicher auf Kurs. Wenn wir sie beherzigen, wird aus der Drohne ein präzises Werkzeug für die Sanierung und aus der KI ein kluger Assistent. Die Drohne mag steigen, ChatGPT mag Formulierungen schärfen; entscheidend ist, dass wir vorher klären, wozu, auf welcher Grundlage, mit welchen Schutzmaßnahmen und wo Urheber-, Datenbank- oder Berufsrechte eine Grenze ziehen. So bleibt die digitale Denkmalpflege auf Kurs.

Abstract

Data Protection and Copyright in Digital Heritage Conservation and Archaeology

Digitalisation is fundamentally changing monument conservation and archaeology – from recording and management to the presentation of data and images. This leads to numerous data protection and copyright hurdles for private owners, authorities and archaeologists. This article focuses on uncertainties surrounding the collection and use of personal data, for example in connection with digital documentation, find data and owner data. It also raises the question of how copyright claims to photographs, 3D models or computer-generated visualisations should be assessed – especially when AI-based processing or new image narratives are created. Further risks exist, for example, in the publication of inventories and the re-identifiability of data subjects, in the use of external IT service providers, in cross-border data exchange, in access to sensitive sites and in the danger of looting. This article highlights legal uncertainties and conflicting goals arising from digitalisation in the area of tension between innovation, protection interests, legal certainty and preserving the authenticity of cultural heritage.

use of personal data, for example in connection with digital documentation, find data and owner data. It also raises the question of how copyright claims to photographs, 3D models or computer-generated visualisations should be assessed – especially when AI-based processing or new image narratives are created.

Further risks exist, for example, in the publication of inventories and the re-identifiability of data subjects, in the use of external IT service providers, in cross-border data exchange, in access to sensitive sites and in the danger of looting.

This article highlights legal uncertainties and conflicting goals arising from digitalisation in the area of tension between innovation, protection interests, legal certainty and preserving the authenticity of cultural heritage.

- 22 Vgl. HORNUNG, in: Verwaltungsrecht – VwVfG, Bd. III Kommentar, Hrsg. Schoch/Schneider, 7. EL Mai 2025 § 35a, Rn. 46 ff.
- 23 Vgl. SIEGEL, Digitalisierungsschleusen im Verwaltungsrecht und seine Offenheit für Künstliche Intelligenz, in: NVwZ, 2024, S. 1127.
- 24 Vgl. LINCK, in: Arbeitsrechts-Handbuch, 21. Aufl. 2025, Hrsg. Schaub/Ahrendt/Koch/Linck/Pessinger/Rennpferdt/Rinck/Spinner/Treber/Vogelsang, NZA, 2025, S. 960.
- 25 Vgl. ausführlich BECKER/ KLENGEL/ LAMERTZ/ LEBRO, Haftung beim Einsatz von KI und die Folgen im Arbeitsverhältnis, in: NZA, 2025, S. 960, 962 ff.

1 Vgl. auch GRAMS, Der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (Sprachmodelle) in bauvertraglichen Angelegenheiten, in: ZfBR, 2025, S. 421, 424.

2 Vgl. SARRE/PRUSS, in: Handbuch IT- und DatenschutzR, Hrsg. Auer-Reinsdorff/Conrad, 3. Aufl. 2019, § 2 Rn. 50.

3 Vgl. GRAMS, wie Anm. 1, S. 421.

4 Vgl. JUAREZ, in: BeckOK DatenschutzR, 53. Ed. 1.5.2025, DS-GVO Art. 44 Rn. 1.

5 Vgl. SCHAUB, Nutzung von Künstlicher Intelligenz als Pflichtverletzung?, in: NJW 2023, S. 2145, 2149.

6 Vgl. GRAMS, wie Anm. 1, S. 421–422.

7 Vgl. Fußnote Nr. 5.

8 Vgl. BGH, Urteil vom 30.04.2020 – I ZR 115/16, GRUR 2020, 843.

9 Vgl. auch BGH, Urteil vom 28.07.2016 – I ZR 9/15, GRUR 2016, 1157.

10 Vgl. LG Hamburg, Urteil vom 27.9.2024 – 310 O 227/23.

11 Vgl. LG Hamburg, Urteil vom 27.9.2024 – 310 O 227/23.

12 Vgl. LAG Mecklenburg-Vorpommern, Urteil vom 17.11.2020 – 5 SA 152/19.

13 Vgl. LG Köln, Urteil vom 15.4.2025 – 14 O 82/25.

14 Vgl. VGH Baden-Württemberg, Urteil vom 7.5.2013 – 10 S 281/12.

15 Vgl. VG Schleswig, Beschluss vom 30.6.2025 – 10 B 185/24.

16 Vgl. OLG Hamm, Urteil vom 27.4.2023 – 4 U 247/21.

17 Vgl. BGH, Urteil vom 23.10.2024 – I ZR 67/23.

18 Vgl. BGH, Urteil vom 23.10.2024 – I ZR 67/23.

19 Vgl. BECKER/ KLENGEL/ LAMERTZ/ LEBRO, Haftung beim Einsatz von KI und die Folgen im Arbeitsverhältnis, in: NZA, 2025, S. 960, 962.

20 Vgl. OLG Düsseldorf, Urteil vom 19.4.2016 – I-21 U 102/15.

21 Vgl. zur Fehleranfälligkeit von KI-Tools die am 22. Oktober 2025 veröffentlichte Studie „News Integrity in AI Assistants“ der Europäischen Rundfunkunion (EBU) https://www.ebu.ch/Report/MIS-BBC/NI_AI_2025.pdf.

Computermacht und Vernunft: die Ambivalenz der Anwendung von KI in der Restaurierung

Einführung

Der Begriff Künstliche Intelligenz (Artificial Intelligence) tauchte erstmals 1955 in einer Projektskizze auf, mit der sich unter anderem John McCarthy und Marvin Minsky um finanzielle Unterstützung für eine Forschungszusammenkunft am Dartmouth College in den USA bewarben. Dieses so genannte Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, das im Sommer 1956 stattfand, gilt heute als Gründungsmoment der KI-Forschung. Ziel der Konferenz war es, Möglichkeiten zu erproben, „Maschinen dazu zu bringen, Sprache zu verwenden, Abstraktionen und Konzepte zu bilden, Probleme zu lösen, die bisher dem Menschen vorbehalten waren, und sich selbst zu verbessern“.¹ Zwar brachte die Veranstaltung nicht sofort bahnbrechende Ergebnisse hervor, doch sie setzte den institutionellen und begrifflichen Rahmen für die weitere Entwicklung des Forschungsfeldes.

Weizenbaums Kritik im Kontext seiner Zeit

Zehn Jahre später, 1966, veröffentlichte Josef Weizenbaum das Programm ELIZA,² mit dem er demonstrierte, dass ein Computer in der Lage ist, einfache Formen der natürlichen Sprachverarbeitung zu leisten. ELIZA erlangte rasch große Aufmerksamkeit, wurde als Meilenstein in der Geschichte der KI gefeiert und gilt heute als Prototyp moderner Chatbots.

Trotz dieser eigenen Beiträge zur Informatik stand Weizenbaum der Euphorie seiner Fachkollegen von Beginn an skeptisch gegenüber. Diese Haltung formulierte er in seinem 1976 erschienenen Buch *Computer Power and Human Reason*,³ in dem er eindringlich vor einem unreflektierten Optimismus im Umgang mit KI warnte.⁴

Weizenbaums Kritik muss im gesellschaftlichen Klima der 1960er- und 1970er-Jahre verstanden werden. Diese Jahrzehnte waren von einem

starken Technikoptimismus geprägt: Raumfahrt, Computertechnik und Kybernetik schienen unbegrenzte Möglichkeiten zu eröffnen. Gleichzeitig wuchsen jedoch auch Zweifel am ungebremsten Fortschritt. Die beginnende Umweltbewegung sowie die kritische Auseinandersetzung mit Kernenergie führten zu einem breiteren gesellschaftlichen Bewusstsein für die ambivalenten Folgen technologischen Wandels. In diesem Spannungsfeld positionierte sich Weizenbaum. Seine Selbstbeschreibung als „Dissident“ und „Ketzer“ der Informatik⁵ spiegelt diese ambivalente Rolle wider und prägt bis heute die historische Wahrnehmung seiner Position. Weizenbaums oft zitiertes Diktum bringt diesen Zwiespalt auf den Punkt: „Der meiste Schaden, den der Computer potenziell zur Folge haben könnte, hängt weniger davon ab, was der Computer tatsächlich kann oder nicht kann, als vielmehr von den Eigenschaften, die das Publikum dem Computer zuschreibt.“⁶

Diese Zuschreibung nicht vorhandener Fähigkeiten an den Computer führte bereits in den Anfangszeiten der Computertechnik zu erheblichen Problemen. Schon in den 1960er- und 1970er-Jahren, als Großrechner in Verwaltungen, Banken und Unternehmen Einzug hielten, waren Computerabstürze und Datenverluste ein gefürchtetes Szenario. Die Abhängigkeit von diesen neuen Maschinen brachte nicht nur technische Unsicherheiten, sondern auch Ängste in der Arbeitswelt mit sich.

Vor diesem Hintergrund erscheint Weizenbaums Hinweis besonders vorausschauend. Auch die aktuelle Debatte um generative KI zeigt eine ähnliche Ambivalenz: Begeisterung für die neu eröffneten Möglichkeiten geht einher mit Unsicherheiten, Befürchtungen und übersteigerten Erwartungen. Damit wird deutlich, dass viele der Fragen, die Weizenbaum bereits in den 1970er-Jahren aufwarf, in modifizierter Form auch die gegenwärtige Diskussion prägen.



Abb. 1: Bild mit generativer KI Canva generiert mit Prompt: „Auch im Bereich der Restaurierung hat der Einzug Künstlicher Intelligenz inzwischen stattgefunden. [...] Sie beruht auf Erfahrungen, dass bestimmte Materialien oder Verfahren, die einst als innovativ galten, sich langfristig nicht bewährten und teilweise sogar neue restauratorische Probleme hervorgerufen haben.“

Chancen von KI in der Restaurierung

In den vergangenen Jahren hat die KI einen regelrechten Boom erlebt und entwickelt sich in einem Tempo weiter, das so rasant ist, dass man beinahe von einem modernen *Delirium furiosum*⁷ sprechen könnte.

Auch im Bereich der Restaurierung hat der Einzug Künstlicher Intelligenz inzwischen stattgefunden. Dies erscheint auf den ersten Blick überraschend, da die Restaurierung traditionell als eine Disziplin gilt, die gegenüber neuen Technologien eher zurückhaltend eingestellt ist und vielfach den bewährten handwerklichen Methoden den Vorzug gibt. Diese Zurückhaltung ist nicht unbegründet. Sie beruht auf Erfahrungen, dass bestimmte Materialien oder Verfahren, die einst als innovativ galten, sich langfristig nicht bewährten und teilweise sogar neue restauratorische Probleme hervorgerufen haben (Abb. 1).

Gleichzeitig zeigen zahlreiche Studien und Erhebungen in den letzten Jahren, dass die Zahl der Publikationen zur Anwendung von KI in der Restaurierung erheblich zunimmt.⁸ Neben theoretischen Überlegungen finden sich zunehmend auch konkrete Projekte, in denen KI-Systeme an realen Objekten eingesetzt werden. Dies über-

rascht wiederum nicht, da die Technologie offensichtlich eine Vielzahl an Vorteilen verspricht.

So können KI-Systeme große Datenmengen in kürzester Zeit verarbeiten und analysieren. Dadurch wird es möglich, effizienter und schneller auf restauratorische Fragestellungen zu reagieren. Prozesse, die zuvor durch zeitaufwendige Handarbeit oder komplexe Überlegungen von Fachleuten durchgeführt werden mussten, lassen sich nun mithilfe von KI automatisieren und in hoher Geschwindigkeit bewältigen. Besonders Deep-Learning-Ansätze erweisen sich dabei als leistungsfähig, da sie mit großen Mengen unstrukturierter Daten – wie etwa den Pixeln digitaler Bilddateien – umgehen können.⁹ Auf diese Weise können KI-gestützte Systeme Restauratorinnen und Restauratoren unterstützen, indem sie Muster sichtbar machen, die andernfalls möglicherweise übersehen oder fehlerhaft interpretiert würden.

Die bisherigen Anwendungsfelder sind breit gefächert: Sie reichen von der Schadens- und Materialkartierung über Vorschläge zur Rekonstruktion von Formen und Farben bis hin zum Zusammenfügen von Bruchstücken und Fragmenten sowie zur Entzifferung von Inschriften und sogar zur Erkennung von Fälschungen.



Abb. 2: Bild mit generativer KI Canva generiert mit Prompt: „Viertens neigen Sprachmodelle zu sogenannten Halluzinationen. [...] In der Restaurierung könnte dies schwerwiegende Konsequenzen haben, beispielsweise wenn falsche Angaben zur Materialzusammensetzung oder zu historischen Kontexten für wahr gehalten und in praktische Entscheidungen umgesetzt werden.“

Während sich in einigen dieser Bereiche bereits heute klare Vorteile des KI-Einsatzes abzeichnen, handelt es sich in anderen Fällen bislang um erste Versuche oder Machbarkeitsstudien. Dennoch verdeutlicht die aktuelle Entwicklung, dass die Restaurierung zunehmend Teil eines breiteren technologischen Transformationsprozesses wird, in dem auch Künstliche Intelligenz eine wachsende Rolle spielt.

Grenzen von KI in der Restaurierung

Den genannten Vorteilen steht jedoch eine Reihe von Problemen gegenüber, die den Einsatz von KI in der Restaurierung derzeit noch erheblich einschränken. Einige dieser Schwierigkeiten könnten durch zukünftige technische Weiterentwicklungen gelöst werden; andere sind grundsätzlicher Natur und hängen eng mit den Strukturen und Funktionsweisen der KI-Modelle selbst zusammen.

Erstens beruhen KI-Antworten auf Wahrscheinlichkeitsberechnungen und sind stark von Qualität und Quantität der Trainingsdaten abhängig. Da viele Systeme überwiegend mit Inhalten aus dem Internet trainiert werden, übernehmen sie unweigerlich auch darin enthaltene Verzerrungen und Fehler. Dieses Problem wird durch die

schiere Datenmenge verstärkt, da unzuverlässige Informationen in den Modellen reproduziert und weiterverbreitet werden. Das Internet und andere Medien werden mittlerweile buchstäblich mit billigen, qualitativ minderwertigen Texten überschwemmt, die als KI-Slops bekannt sind.¹⁰ In der Fachliteratur ist dieses Phänomen als *Garbage In, Garbage Out* (GIGO) bekannt.

Zweitens zeigen zahlreiche Studien, dass KI-Modelle ein Bias – also eine systematische Verzerrung – aufweisen können. Diese Verzerrung ist häufig das Ergebnis unausgewogener Trainingsdaten. Für die Restaurierung kann dies besonders problematisch sein, da Entscheidungen auf fehlerhaften oder einseitigen Datengrundlagen getroffen werden könnten.

Drittens sind KI-Systeme nicht deterministisch: Antworten auf identische Fragen können unterschiedlich ausfallen. Während diese Variabilität in alltäglichen Kommunikationsprozessen kaum stört, stellt sie in wissenschaftlichen Kontexten ein erhebliches Problem dar. Gerade in der Restaurierung sind Konsistenz und Reproduzierbarkeit von Ergebnissen entscheidend, etwa bei der Bewertung des Zustands eines Kunstwerks oder der Auswahl geeigneter Materialien.

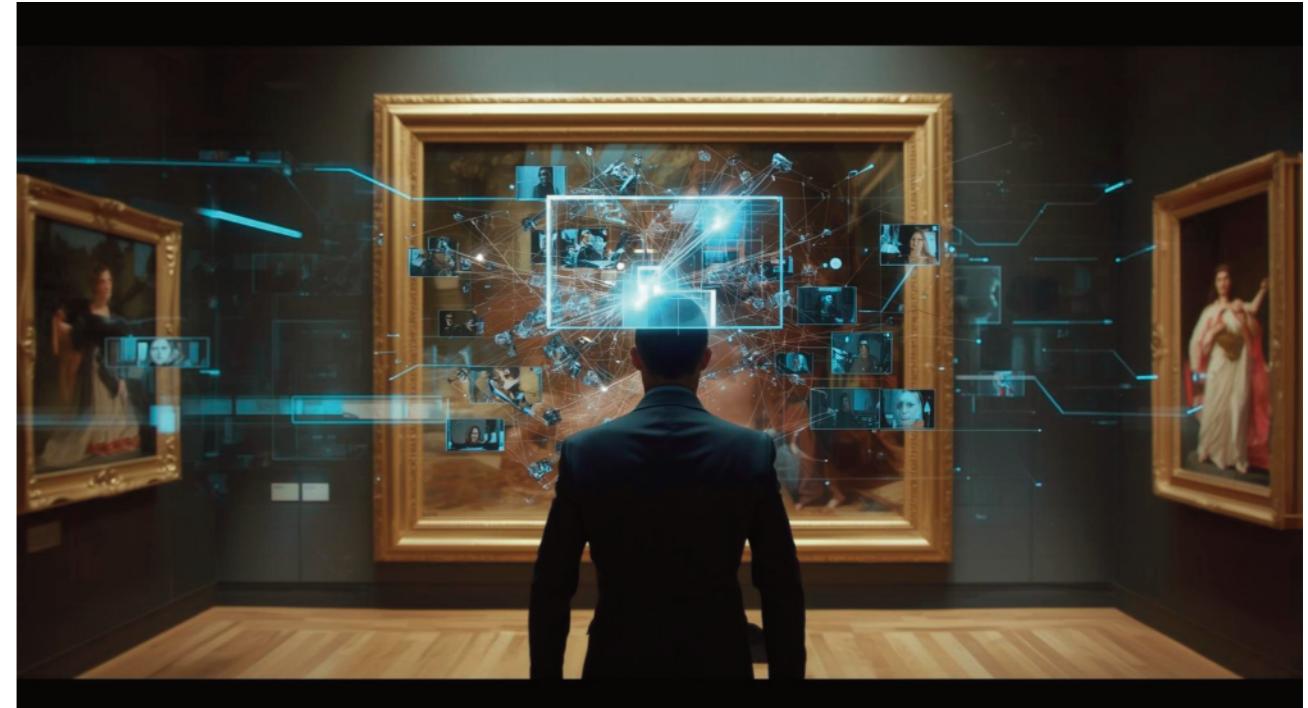


Abb. 3: Bild mit generativer KI Canva generiert mit Prompt: „Eine weitere, nicht minder bedeutsame Wirkung von KI-Technologien auf die Restaurierung betrifft die Rezeption der behandelten Objekte. Denn die Art und Weise, wie Eingriffe durchgeführt werden, beeinflusst entscheidend, wie ein Kunstwerk von Betrachterinnen und Betrachtern wahrgenommen wird.“

Viertens neigen Sprachmodelle zu sogenannten „Halluzinationen“. Dabei handelt es sich um inhaltlich plausible, aber faktisch falsche oder frei erfundene Aussagen. Da die Modelle so konzipiert sind, stets eine Antwort zu generieren, können sie auch in Situationen, in denen ihnen verlässliche Daten fehlen, irreführende Informationen produzieren.¹¹ In der Restaurierung könnte dies schwerwiegende Konsequenzen haben, beispielsweise wenn falsche Angaben zur Materialzusammensetzung oder zu historischen Kontexten für wahr gehalten und in praktische Entscheidungen umgesetzt werden (Abb. 2).

Fünftens zeigt sich ein weiteres Problem darin, dass KI zwar Fehler beheben kann, jedoch oft nicht über ein Verständnis der Ursachen verfügt. Diese instrumentelle Logik, wie sie bereits von Josef Weizenbaum kritisch beschrieben wurde, konzentriert sich auf Mittel und Wege, nicht aber auf die Angemessenheit der Handlung selbst. Im restauratorischen Kontext könnte dies zu pragmatisch brauchbaren, aber ethisch fragwürdigen Lösungen führen – etwa zur Empfehlung, ein Kunstwerk aufzugeben, anstatt es zu bewahren.

Sechstens verfügen die meisten Modelle über kein echtes Gedächtnis. Sie sind nicht in der

Lage, Fehler oder Kausalketten langfristig nachzuvollziehen. Für die Restaurierung bedeutet dies, dass komplexe zeitabhängige Prozesse – wie Alterung, Materialveränderungen oder Wechselwirkungen – von KI-Systemen nicht zuverlässig analysiert werden können.

Schließlich ist die Funktionsweise vieler Systeme nur begrenzt transparent. Diese sogenannten „Black-Box-Modelle“ erlauben keine vollständige Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsprozesse. Für die Wissenschaft im Allgemeinen und die Restaurierung im Besonderen ist dies problematisch, da Reproduzierbarkeit und Überprüfbarkeit der Ergebnisse zentrale Qualitätskriterien sind.

Ethische Dimensionen und aktuelle Debatten

Eine weitere, nicht minder bedeutsame Wirkung von KI-Technologien auf die Restaurierung betrifft die Rezeption der behandelten Objekte. Denn die Art und Weise, wie Eingriffe durchgeführt werden, beeinflusst entscheidend, wie ein Kunstwerk von Betrachterinnen und Betrachtern wahrgenommen wird (Abb. 3).

Besondere Aufmerksamkeit erregte jüngst die Meldung über die „schnellste Restaurierung der Welt“¹², die in *Spiegel Wissenschaft* vorgestellt



Abb. 4: Bild mit generativer KI Canva generiert mit Prompt: „Gerade in der Restaurierung sind solche Zweckmäßigkeitssfragen eng mit ethischen Grundsätzen verknüpft. [...] Sie erzeugen digitale Lösungen, die zwar effizient und präzise erscheinen, deren Eingriffe in die Wahrnehmung des Originals jedoch nicht ohne weiteres rückgängig gemacht werden können.“

wurde. Entwickelt wurde die Methode von Alex Kachkine, einem Maschinenbau-Doktoranden am Massachusetts Institute of Technology (MIT).¹³ Das Verfahren beruht darauf, ein beschädigtes Kunstwerk zu scannen, die Fehlstellen durch ein KI-System ergänzen zu lassen und diese Ergänzungen auf transparente Folien zu drucken, die anschließend auf das Original appliziert werden. Kachkines Vorschlag führte zu einer lebhaften Debatte innerhalb der Restaurierungs- und Konserverungsgemeinschaft.

Die Auseinandersetzung macht deutlich, dass die eigentliche Frage nicht in der technischen Machbarkeit liegt. Bereits Josef Weizenbaum formulierte 1976 in seinem Buch *Computer Power and Human Reason*: „Die Frage ist nicht, ob man so etwas kann [etwa die Rekonstruktion eines Kunstwerkes einer KI zu überlassen], sondern ob es zweckmäßig ist, diese bislang menschliche Aufgabe einer Maschine zu übertragen.“¹⁴

Gerade in der Restaurierung sind solche Zweckmäßigkeitssfragen eng mit ethischen Grundsätzen verknüpft. Prinzipien wie Nachhaltigkeit, Reversibilität und Bewahrung der Authentizität prägen seit Jahrzehnten die restauratorische Praxis. Sie sollen sicherstellen, dass Ein-

griffe am Original nachvollziehbar, umkehrbar und auf das Notwendige beschränkt bleiben. KI-gestützte Rekonstruktionen stellen diese Prinzipien jedoch auf die Probe: Sie erzeugen digitale Lösungen, die zwar effizient und präzise erscheinen, deren Eingriffe in die Wahrnehmung des Originals jedoch nicht ohne weiteres rückgängig gemacht werden können (Abb. 4).

Darauf verweist auch die Einschätzung des Restaurators Julian Baumgartner, der in einem Interview in der Online-Zeitschrift News betonte: „Bislang wurde die Konservierung von Menschen durchgeführt (...) Nimmt man das weg, verändert sich unsere Beziehung zur Kunst grundlegend.“¹⁵

Diese Beziehung zwischen Originalkunstwerk und Betrachter wurde von Walter Benjamin mit dem Begriff der *Aura* beschrieben¹⁶ – eine Kategorie, die trotz ihrer Unschärfe bis heute zentrale Bedeutung für die ästhetische und ethische Bewertung in der Restaurierung besitzt. Auch wenn Benjamins Konzept nicht unumstritten ist,¹⁷ ist doch unbestritten, dass jede Form der Rekonstruktion – sei es durch traditionelle handwerkliche Mittel oder durch digitale Verfahren – die Rezeption und Bedeutung eines Kunstwerks tiefgreifend verändert.



Abb. 5: Bild mit generativer KI Canva generiert mit Prompt: „Überträgt man diese Fragen auf die Restaurierung, zeigen sich frappierende Parallelen zu den klassischen Prinzipien des Fachs. [...] Gerade hier wird deutlich, dass KI nicht nur ein technisches Werkzeug ist, sondern auch ein ethisches Problemfeld eröffnet.“

Schlussbetrachtung

Vor diesem Hintergrund erscheinen Weizenbaums Überlegungen hochaktuell. Er forderte, Technik stets nüchtern zu betrachten: weder blind zu feiern noch ängstlich zu verdammten. Entscheidend sei, Nutzen und Risiken gegeneinander abzuwegen – und die letzte Entscheidungsgewalt immer beim Menschen zu belassen.

Bereits 1972 stellte er mit dem sogenannten *Weizenbaum-Test* Fragen, die auch heute erstaunlich aktuell wirken: Wer profitiert von einer Technologie? Wer trägt die Kosten? Welche Folgen hat sie für kommende Generationen, für Ethik und Gesellschaft? Ist sie reversibel – und wo müssen Grenzen gezogen werden?¹⁸

Überträgt man diese Fragen auf die Restaurierung, zeigen sich frappierende Parallelen zu den klassischen Prinzipien des Fachs: Nachhaltigkeit, Reversibilität, minimalinvasives Arbeiten und die Bewahrung der Authentizität. Gerade hier wird deutlich, dass KI nicht nur ein technisches Werkzeug ist, sondern auch ein ethisches Problemfeld eröffnet (Abb. 5).¹⁹

Angesichts der rasanten Entwicklung gilt es daher, Leitlinien zu formulieren, bevor die Technologie unumkehrbare Fakten schafft. In Anleh-

nung an Jack Stilgoe lässt sich sagen: „We need a Weizenbaum test for AI“²⁰ – gerade auch in der Restaurierung.

Literatur

- Hans D. BAUMANN, KI-Bilder. Künstlich oder auch künstlerisch?, Petersberg 2025.
- Walter BENJAMIN, Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit, Frankfurt am Main 2006 (erstmal erschienen 1936 unter dem Titel *L'œuvre d'art à l'époque de sa réproduction mécanisée*).
- Pinar DOGANTEKIN, Die schnellste Restaurierung der Welt, in: Der Spiegel 26/2025, https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/kuenstliche-intelligenz-in-der-kunst-die-schnellste-restaurierung-der-welt-a-ed0b3a64-4157-400d-aaa8-91c0e486e254?sara_ref=re-xx-cp-sh.
- Elie DOLGIN, Art Restoration Gets a High-Tech Makeover. AI Models and Digital Masks Spark Concerns among Conservators, in: News, 2025, S. 5–7.
- Marco FIORUCCI et al., Machine Learning for Cultural Heritage: A Survey, in: Pattern Recognition Letters, vol. 133, May 2020, S. 102–108; <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.02.017>.
- Nicola JONES, AI Hallucinations Can't be Stopped — but these Techniques Can Limit Their Damage, in: Nature, 21.01.2025, DOI: 10.1038/d41586-025-00068-5.
- Alex KACHKINE, Physical Restoration of a Painting with a Digitally Constructed Mask, in: Nature, Jg. 642, Heft 8067, 2025, S. 343–350.
- Jiaxin Lu et al., A Survey on Computational Solutions for Reconstructing Complete Objects by Reassembling Their

Fractured Parts, in: Computer Vision and Pattern Recognition, (cs.CV); Graphics (cs.GR), (2025), S. 1–27, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.14770>.

John McCARTHY et al., A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955; <http://jmc.stanford.edu/articles/dartmouth/dartmouth.pdf>.

Mayank MISHRA, Paulo B. LORENCO, Artificial Intelligence-assisted Visual Inspection for Cultural Heritage: State-of-the-art Review, in: Journal of Cultural Heritage, 66/2024, S. 536–550; <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.005>.

David OCÓN, Chunzhi YIN, Jose LUNA, Artificial Insights or Historical Fidelity? Crafting an Ethical Framework for the Use of GenAI in the Restoration, Reconstruction and Re-creation of Movable Cultural Heritage, in: AI & SOCIETY, London 2025, DOI:10.1007/s00146-025-02454-z.

Hannah RUSCHEMEIER, Neue Form der Machtausübung. Künstliche Intelligenz als soziotechnische Entwicklung, in: Forschung und Lehre, 9/2025, S. 20–22.

Jack STILGOE, We Need a Weizenbaum Test for AI, in: Science, Bd. 381, Nr. 6658, 11.08.2023, DOI: 10.1126/science.adk0176.

Christian STRIPPEL, Künstliche Intelligenz zwischen Mythos und Kritik. Joseph Weizenbaum (1923–2008), Berlin 2024.

Joseph WEIZENBAUM, Albtraum Computer. Ist das menschliche Gehirn nur eine Maschine aus Fleisch?, in: Die ZEIT, 01/1972.

Ders., Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft, Frankfurt am Main 1977 (Originalausgabe: Joseph Weizenbaum, Computer Power and Human Reason. From Judgment to Calculation, San Francisco 1976).

Ders., ELIZA—a Computer Program for the Study of Natural Language Communication between Man and Machine, in: Communications of the ACM 9, 1966, S. 36–45.

Ders., Kurs auf den Eisberg. Die Verantwortung des Einzelnen und die Diktatur der Technik, Zürich 1987.

Ders., Once More – a Computer Revolution, in: The Bulletin of the Atomic Scientists, September 1978, S. 12–19.

Ders., On the Impact of the Computer on Society: How Does One Insult a Machine?, in: Science, Bd. 176, Nr. 4035, 12.05.1972, S. 609–614, DOI: 10.1126/science.176.4035.609.

Abstract

Computer Power and Reason: The Ambivalence of Applying AI in Restoration

The application of artificial intelligence (AI) in restoration opens up transformative new possibilities for the preservation of cultural heritage. AI-supported systems can provide significant assistance to restorers, for example by uncovering patterns that would otherwise remain undetected and by analysing and comparing them. These systems are characterised by their ability to process and analyse large amounts of information in a very short time. This enables them to quickly and efficiently offer solutions that would otherwise require laborious manual and mental effort. Nevertheless, the challenges associated with AI should not be underestimated, and its introduction is not without controversy. The ambivalence of this technical development is reflected in the fears and uncertainties it provokes among both experts and society at large.

This essay examines the specific advantages and methodological challenges of implementing AI in restoration. It analyses the critical issues and potential risks associated with this advanced technology. Finally, the essay offers an outlook on the future development of the technology and provides recommendations for the responsible use of AI in restoration.

and efficiently offer solutions that would otherwise require laborious manual and mental effort. Nevertheless, the challenges associated with AI should not be underestimated, and its introduction is not without controversy. The ambivalence of this technical development is reflected in the fears and uncertainties it provokes among both experts and society at large.

This essay examines the specific advantages and methodological challenges of implementing AI in restoration. It analyses the critical issues and potential risks associated with this advanced technology.

Finally, the essay offers an outlook on the future development of the technology and provides recommendations for the responsible use of AI in restoration.

Bildnachweis

Abb. 1–5: © P. Kozub

- 1 McCARTHY et al., A Proposal, 1955, S. 2, Originaltext: "An attempt will be made to find how to make machines use language, form abstractions and concepts, solve Kinds of Problems now reserved for humans, and improve themselves".
- 2 WEIZENBAUM, ELIZA, 1966.
- 3 WEIZENBAUM, Computer Power, 1976.
- 4 STRIPPEL, Künstliche Intelligenz, 2024.
- 5 WEIZENBAUM, Kurs auf den Eisberg, 1987, S. 15.
- 6 WEIZENBAUM, Albtraum Computer, 1972.
- 7 Als im 19. Jahrhundert die Dampfmaschine die Fortbewegung beschleunigte, fürchteten Zeitgenossen ernsthafte gesundheitliche Schäden. Man war überzeugt, dass die schnelle Bewegung der Reisenden Gehirnerkrankungen hervorrufen könnte – eine vermeintliche Krankheit, die den Namen Delirium furiosum erhielt.
- 8 Siehe hierzu z.B. FIORUCCI et al., Machine Learning, 2020, Mishra/Lorenco, Artificial Intelligence-assisted, 2024.
- 9 BAJORATH, Black-Box-Charakter 2025, S. 14.
- 10 RUSCHEMEIER, Neue Form, 2025, S. 22.
- 11 JONES, AI Hallucinations, 2025.
- 12 DOGANTEKIN, Die schnellste Restaurierung, 2025..
- 13 KACHKINE, Physical Restoration, 2025.
- 14 WEIZENBAUM, Die Macht der Computer, 1977, S. 274.
- 15 DOLGIN, Art Restoration, 2025, S. 7.
- 16 BENJAMIN, Das Kunstwerk, 2006.
- 17 BAUMANN, KI-Bilder, 2025, S. 202ff.
- 18 WEIZENBAUM, On the Impact, 1972, S. 609ff; Weizenbaum, Once More, 1978, S. 12ff.
- 19 OCÓN/LUNA, Artificial Insights, 2025.
- 20 STILGOE, We Need, 2023.

Die KI in der terminologischen Lehre. Entwicklung eines maschinenlesbaren kontrollierten Fachvokabulars für die archäologische Konservierung-Restaurierung

Einleitung

Wie in nahezu allen Bereichen des alltäglichen Lebens werden auch in der Denkmalpflege immer häufiger digitale Dienste für die Erfassung, Verwaltung und Erforschung des kulturellen Erbes eingesetzt. Diese zunehmende Digitalisierung der denkmalpflegerischen Praxis bringt sowohl Chancen als auch Herausforderungen mit sich. Während künstliche Intelligenz (KI) in einigen Bereichen bereits erfolgreich eingesetzt wird, stoßen wir bei der automatisierten Datenverarbeitung fachlich explizierter Informationen häufig auf ein grundlegendes Problem. So liefern beispielsweise Large Language Model (LLM)-Systeme bei Abfragen zu geeigneten Konservierungs-Restaurierungsmaßnahmen für spezifische Schadensbilder bisher eher wenig zufriedenstellende Ergebnisse. Ein zugrundeliegendes Problem ist dabei die terminologische Inkonsistenz bei Daten, in denen Objektzustände sowie durchgeführte Erhaltungsmaßnahmen beschrieben sind.

Terminologische Vielfalt in der Konservierung-Restaurierung als Herausforderung

Die Konservierung-Restaurierung ist wie viele anderen Wissenschaften geprägt von einer Vielzahl spezifischer Fachbegriffe, die historisch gewachsen oder regional unterschiedlich verwendet werden. Ein Schadensbild kann je nach Material, institutionellen Gepflogenheiten oder schlicht menschlicher Sprachpräferenz unterschiedlich bezeichnet werden.

In der Linguistik verdeutlicht das semiotische Dreieck, wieso menschliche Sprache mehrdeutig und uneindeutig ist (Abb. 1). Ein Begriff existiert als geistig-gedankliche Abbildung, die sich auf eine Einheit unserer realen Welt bezieht und durch ver-

schiedene Benennungen¹ repräsentiert wird.² So kann ein Begriff durch verschiedene Benennungen beschrieben oder andersherum unterschiedliche Benennungen für den gleichen Begriff verwendet werden. In der restauratorischen Praxis bedeutet dies zum Beispiel, dass drei unterschiedliche Kolleg*innen von „Kleber“, „Klebstoff“ oder „Leim“ sprechen, gemeint ist dabei dasselbe Konzept – eine Substanz zum Verbinden von Materialien.

Diese sprachliche Varianz schafft eine Dokumentationslandschaft, die bereits für erfahrene Fachpersonen missverständlich sein kann. Für automatisierte Systeme ist sie jedoch nahezu un durchdringlich. KI wird heute häufig als eine Art digitales „Allheilmittel“ betrachtet, stößt im Umgang mit Fachsprache jedoch schnell an ihre Grenzen. In Bezug auf das oben genannte Beispiel würden KI-Systeme ohne fachliches Training bei der Suche nach Daten zu „Kleber“ nur solche Dokumente finden, in denen genau diese Bezeichnung verwendet wurde. Einträge mit synonymen Bezeichnungen „Klebstoff“ oder „Leim“ würden verborgen bleiben. KI kann zwar Muster erkennen, aber nicht automatisch Bedeutungen und Zusammenhänge verstehen. Die KI scheitert demnach dort, wo Nuancen und Kontext entscheidend sind. Die Verwendung heterogener Fachterminologie in den fachlichen Daten führt bei KI-Anwendungen zu eingeschränktem Zugang zu potenziell wertvollen Forschungsdaten und zu Fehlinterpretation bei deren Auswertung.

Kontrollierte Vokabulare als Lösungsansatz

Ein Ansatz für die Begegnung dieser Herausforderung ist die Verwendung maschinenlesbarer kontrollierter Vokabulare. Hierbei handelt es sich um organisierte Begriffssysteme, die unterschiedliche

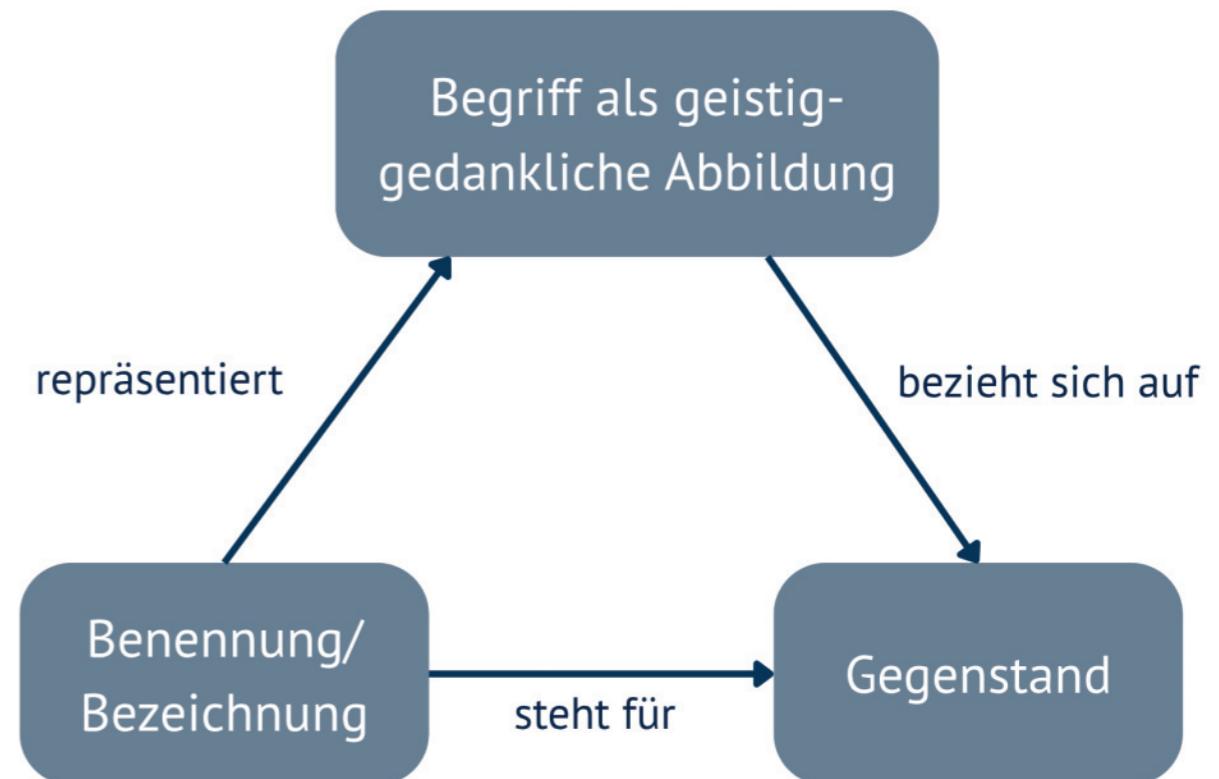


Abb. 1: Schematische Darstellung des semiotischen Dreiecks der menschlichen Sprache



Abb. 2: Arten kontrollierter Vokabulare, zunehmende multidimensionale Struktur und Funktion von links nach rechts

Benennungen und Zusammenhänge systematisch erfassen und die Mehrdeutigkeit der menschlichen Sprache auflösen können. Es existieren verschiedene Arten kontrollierter Vokabulare mit unterschiedlicher multidimensionaler Struktur und Funktion. Das Spektrum reicht von einfachen Glossaren, Wortlisten und Wörterbüchern über Gazetters, Klassifikationsschemata und Taxonomien

bis hin zu komplexen Thesauri und Ontologien (Abb. 2), die nicht nur begriffliche Hierarchien, sondern auch komplexere semantische Beziehungen zwischen Begriffen abbilden können.³

Je nach Komplexität und Funktion legen kontrollierte Vokabulare bevorzugte Benennungen und Schreibweisen fest, verknüpfen Synonyme, Abkürzungen oder andere Schreibweisen als alter-

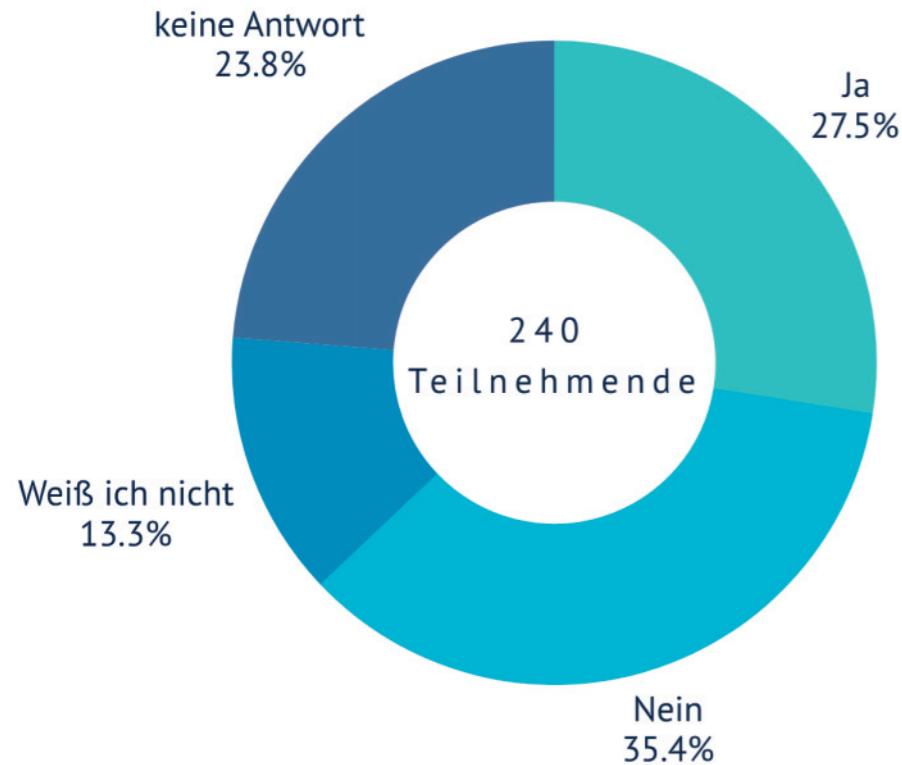


Abb. 3: Ringdiagramm, Umfrageergebnisse, Verwendung kontrollierter Vokabulare in der Konservierung-Restaurierung

native Bezeichnungen und beschreiben durch Formulierung von Definitionen das Verständnis im jeweiligen Fachkontext. Mehrdeutigkeiten von Begriffen (Homonyme, Polyseme) werden durch zusätzliche Begriffe („Qualifier“), die die spezifische Bedeutung eindeutig machen, disambiguiert. Fachliche Zusammenhänge zwischen den Begriffen eines Fachvokabulars können neben äquivalenten ebenfalls durch die Zuordnung hierarchischer und assoziativer Beziehungen modelliert werden. Durch diese semantischen Verknüpfungen werden Begriffe nicht isoliert betrachtet, sondern in ihrem fachlichen Kontext vernetzt. Maschinenlesbar wird das Vokabular dabei durch die Zuweisung eindeutiger Identifikatoren zu jedem Begriff. Dies bildet die Grundlage für automatische Klassifizierungen, leichtere Auffindbarkeit sowie intelligente Suchalgorithmen.⁴

NFDI4Objects Use Case am LEIZA zur Entwicklung eines datenbasierten kontrollierten Fachvokabulars

Eine im Rahmen des NFDI4Objects-Konsortiums⁵ durchgeführte nationale Community-Umfrage

zum Forschungsdatenmanagement (FDM) in der Konservierung-Restaurierung zeigt, dass die Verwendung kontrollierter Vokabulare in der restauratorischen Arbeit bisher kaum etabliert ist.⁶ Von 240 Teilnehmenden gaben lediglich 27,5 % an, in ihrer täglichen Arbeit kontrollierte Vokabulare zu nutzen, 48,7 % der Teilnehmenden verneinten die Frage oder gaben an, dies nicht zu wissen (Abb. 3).⁷ Diejenigen, die angaben, solche Systeme in ihrem Arbeits-alltag zu nutzen, verwiesen hauptsächlich auf allgemeinere Vokabulare aus dem Bereich des kulturellen Erbes oder gaben an, interne, unveröffentlichte Fachterminologien zu verwenden. Ein spezifisches, praxisnahes Fachvokabular für die archäologische Konservierung-Restaurierung, welches maschinenlesbaren Standards entspricht und frei zugänglich ist, scheint es im deutschsprachigen Raum bislang nicht zu geben.

Vor diesem Hintergrund wurde am Leibniz-Zentrum für Archäologie (LEIZA) im Rahmen der Task Area 4 von NFDI4Objects ein Use Case erarbeitet, der die Entwicklung eines restauratorischen, sowohl menschen- als auch maschinenlesbaren Fachvokabulars adressiert. Das LEIZA ver-

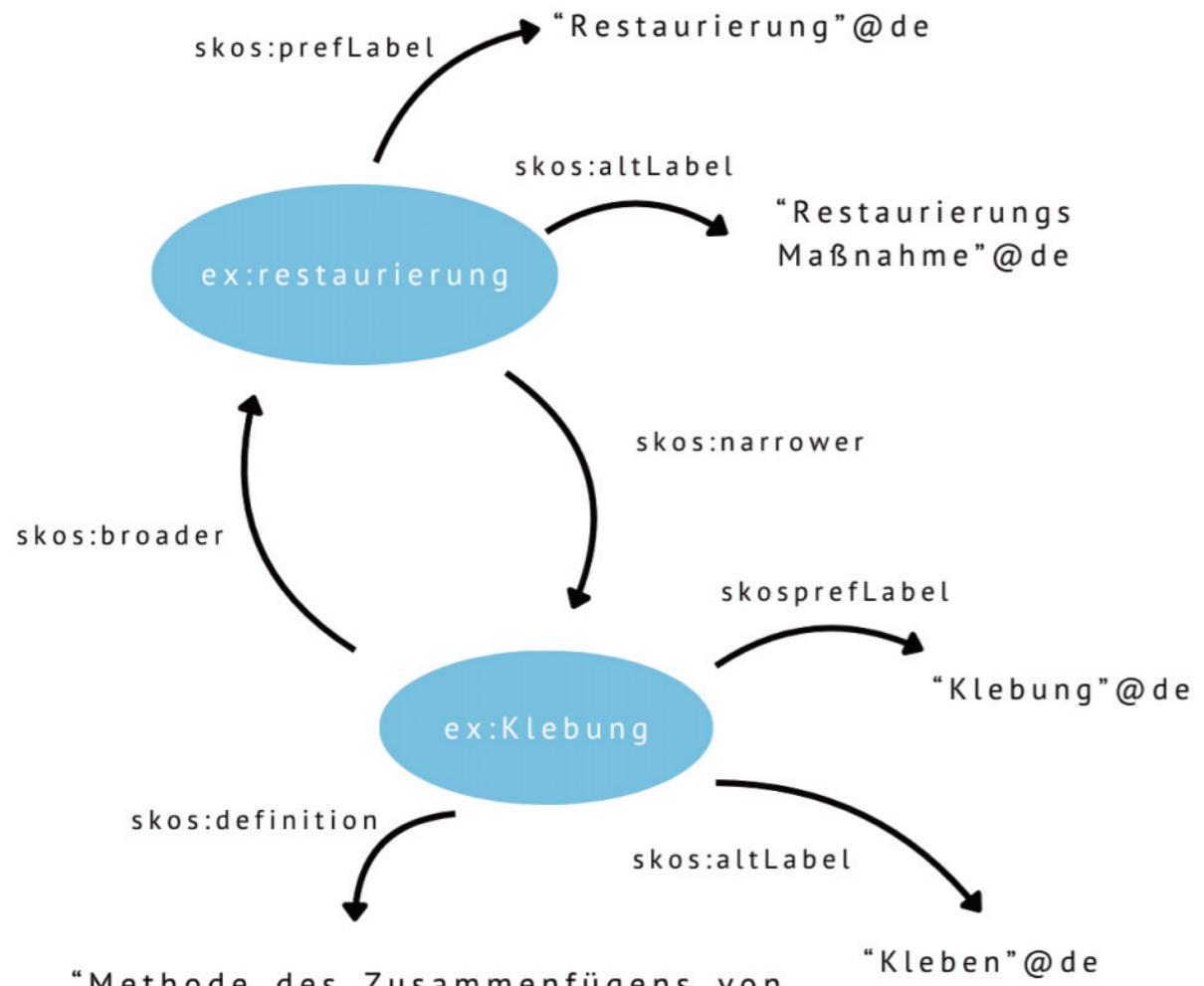
fügt über eine institutionelle Geschichte von über 170 Jahren in der restauratorischen Praxis und bietet damit eine große Datengrundlage für die Entwicklung eines umfassenden Fachvokabulars.⁸ Die Sammlung der Begriffe im Rahmen des Use Case erfolgte durch systematische Auswertung historischer und zeitgenössischer Restaurierungsberichte, Datenbankeinträge, Wortlisten und anderer Dokumente aus früheren Ansätzen zur Vereinheitlichung der Fachsprache. Mit Hilfe von Natural Language Processing (NLP)-Verfahren wurden verwendete Begriffe nach ihrer Häufigkeit aus den Daten herausgefiltert und ausgewertet. Besonders wertvoll erwiesen sich dabei auch persönliche Gespräche mit erfahrenen Fachkolleginnen und -kollegen zur Evaluierung und Erweiterung der Terminologie. Auf diese Weise wurden nicht nur wissenschaftliche Fachbegriffe erfasst, sondern auch der alltägliche, umgangssprachliche Fachjargon, Abkürzungen, Trivialnamen und terminologische Ungenauigkeiten, die allgemeines Verständnis in der internen Praxis gefunden haben, berücksichtigt. Diese Einbeziehung der gelebten Fachsprache fördert die spätere Akzeptanz und Anwendbarkeit des Thesaurus. Ziel ist nicht die Etablierung einer neuen Sprache oder die Verringerung der sprachlichen Vielfalt, sondern die Konzeptualisierung und Aufschlüsselung dieser Vielfalt für die maschinelle Verarbeitung. Entsprechend wurden nicht nur die verwendeten Bezeichnungen selbst erfasst, sondern auch ihre Verwendungskontexte und semantischen Beziehungen dokumentiert. Besondere Aufmerksamkeit galt der Identifikation von Oberbegriffen und fachlichen Zusammenhängen.

Technische Umsetzung des Vokabulars mit SKOS

Als technische Grundlage für die Modellierung des Fachvokabulars wurde das Simple Knowledge Organisation System (SKOS) gewählt. SKOS ist ein W3C-Standard, der als grundlegendes Schema dabei hilft, Wissensorganisationssysteme wie Taxonomien oder Thesauri für Maschinen lesbar zu machen. SKOS liefert dabei eine Reihe von Grundbausteinen, mit denen die Fachsprache modelliert werden kann. Kernelement ist das „skos:Concept“, das die geistig-gedankliche Abbildung einer Entität repräsentiert. Mehrere Concepts sind in einem übergeordneten „skos:ConceptScheme“ zusam-

mengefasst, d.h. in einer strukturierten Sammlung von Begriffen, die das Vokabular als Ganzes bildet.⁹ Die einzelnen Konzepte können in SKOS mit verschiedenen Eigenschaften („Properties“) weiter spezifiziert werden. Zum Beispiel erhält jedes Konzept einen eindeutigen Identifikator (z.B. URI), so dass unabhängig von der verwendeten Benennung klar ist, welcher Begriff/ welches Konzept gemeint ist. Dementsprechend bietet SKOS die Möglichkeit, jedem Konzept beliebig viele Benennungen („labels“) in verschiedenen Sprachen zuzuweisen, wobei pro Sprache eine bevorzugte Bezeichnung („skos:prefLabel“) und alternative Varianten („skos: altLabel“) festgelegt werden können. Zusätzlich können Konzepte mit Definitionen („skos:definition“) und Anmerkungen („skos:note“) vor dem Hintergrund des jeweiligen Fachkontextes näher beschrieben werden. Ein zentrales Merkmal von SKOS ist die Möglichkeit, Konzepte miteinander zu verknüpfen, einerseits durch Zuweisung hierarchischer Beziehungen als Ober- und Unterbegriffe („skos:broader/skos:narrower“) und andererseits durch assoziative Zusammenhänge als verwandte Begriffe („skos:related“). Außerdem lassen sich Konzepte unterschiedlicher Vokabularsysteme, also unterschiedlicher „ConceptSchemes“, über Mapping-Properties miteinander verknüpfen, etwa ob sie dasselbe bedeuten („skos:exactMatch“), einander ähnlich sind („skos:closeMatch“) und weitere Beziehungen.¹⁰

Für ein Beispiel-Konzept „ex:Klebung“ könnte eine vereinfachte Modellierung in SKOS, visualisiert als Graph, wie in Abb. 4 aussehen. Dem Konzept wird als Vorzugsbezeichnung „Klebung@de“ zugewiesen, während als alternative Benennungen „Kleben@de“ erfasst wird. Der Zusatz „@de“ zeigt dabei an, dass es sich um die deutsche Sprachversion handelt. Eine Definition beschreibt das Konzept in seinem Verständnis im restauratorischen Sprachgebrauch, während durch die Property „skos:broader“ die Zuordnung zum übergeordneten Konzept „ex:Restaurierung“ erfolgt. Mit weiteren Properties könnten das Verständnis und die Einordnung des Begriffs in der Praxis noch detaillierter beschrieben und z.B. auch eine Verwandtschaft (skos:related) zu spezifischen Schadensbildern, die mit der Methode „Klebung“ behandelt werden können, verknüpft werden.



prefix ex: <<http://www.example.com/concepts#>>
 prefix skos: <<http://www.w3.org/2004/02/skos/core#>>

Abb. 4: Visualisierung: Beispiel SKOS Modellierung als Graph

Vorgehensweise und Aufbau

Die praktische Anwendung des SKOS-Schemas auf die LEIZA-Terminologiesammlung erfolgte durch die Überführung der Sammlung in eine CSV-Tabelle, deren Spalten ausgewählten Properties des SKOS-Schemas entsprechen. Um anwendungs- und fachspezifische Bedürfnisse zu erfüllen, wurde das SKOS-Schema um ergänzende Eigenschaften erweitert. Eine numerische Einordnung der Hierarchieebenen ermöglicht die menschliche

(„dc:source“) für Bezeichnungen und Definitionen sowie die Erfassung der verantwortlichen Person oder Einrichtung („dc:creator“) für jeden Eintrag.

Die inhaltliche Ordnung der Fachbegriffe orientiert sich am praktischen Restaurierungsprozess. Die oberste Hierarchieebene folgt dabei den Aktivitäten, die an bzw. mit dem Objekt im Rahmen der Konservierung-Restaurierung durchgeführt werden, von der Zustandserfassung über die Erstellung des Konservierungskonzeptes sowie die Durchführung der entsprechenden Erhaltungsmaßnahme(n) bis hin zur Formulierung von Handlungsempfehlungen und zur Dokumentation aller dieser Schritte. Auch der weitere hierarchische Aufbau folgt mit Blick auf die Praxis und bestehende Dokumentationspraktiken. Der Thesaurus bleibt dabei ein konzeptuelles, lebendes Konstrukt, was steten Weiterentwicklungen und Veränderungen unterliegt. Zum aktuellen Zeitpunkt dieses Beitrags beinhaltet der Thesaurus rund 1000 deutschsprachige Fachbegriffe. Eine englische Sprachversion ist ebenfalls bereits angelegt und soll perspektivisch zunehmend erweitert werden. Hierfür ist unter anderem auch der fundierte Austausch mit muttersprachlichen Kolleg*innen angedacht.

Ein weiterer entscheidender Aspekt bei der Weiterentwicklung des Thesaurus liegt in der Verknüpfung („Mapping“) der enthaltenen Konzepte mit anderen Vokabularen. Solche Mappings för-

dern die Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen und den interdisziplinären Datenaustausch. Indem Begriffe des fachspezifischen Vokabulars mit Begriffen aus anderen fachspezifischen oder generischeren Vokabularen gemappt sind, können Daten, die mit diesem Vokabular annotiert sind, in übergreifenden Recherchesystemen besser aufgefunden werden. Gleichzeitig können die eigenen Daten dadurch mit Daten aus anderen disziplinären Kontexten, die möglicherweise ähnliche Inhalte enthalten, in Beziehung gesetzt werden, was neue Zusammenhänge erschließt. Auch fremdsprachlichen Unterschieden kann durch Mappings im Sinne einer Übersetzung begegnet werden.¹² Im hier vorgestellten Fachthesaurus wurden bereits erste Mappings zu relevanten Vokabularen aus dem Bereich des kulturellen Erbes, wie dem Getty Art & Architecture Thesaurus (AAT)¹³, der Gemeinsamen Normdatei (GND)¹⁴ sowie generischeren Linked Open Data (LOD)-Systemen wie Wikidata¹⁵ erstellt. Langfristig ist der weitere Ausbau dieser Verknüpfungen geplant, um den Thesaurus als Teil des globalen semantischen Netzwerks kultureller Begriffssysteme zu etablieren.

Um diese angestrebte Integration in übergeordnete Netzwerke zu realisieren und den Thesaurus als Linked Open Data bereitzustellen, wurde die ursprüngliche SKOS-strukturierte CSV-Tabelle in RDF überführt. Die Publikation erfolgt derzeit als

Abb. 5: Screenshot: publizierter Thesaurus als SkoHub-Page

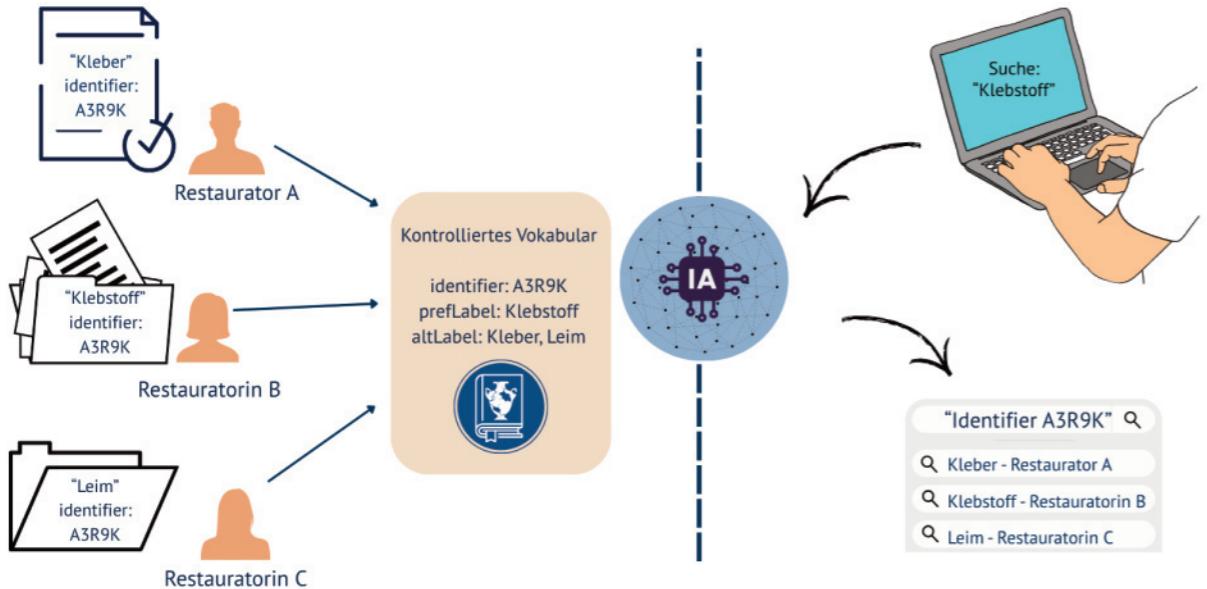


Abb. 6: Schematische Visualisierung: bessere Auffindbarkeit von Daten durch kontrollierte Vokabulare

statische SkoHub¹⁷-Seite über GitHub (Abb. 5), wo durch der Thesaurus unter CC-BY 4.0 Lizenz frei zugänglich und mensch- sowie maschinenlesbar im Web verfügbar ist. Parallel wird aktuell nach internen Abstimmungsprozessen an weiteren nachhaltigen Strategien zur langfristigen Bereitstellung über zentrale NFDI-Terminologiedienste gearbeitet.

Praktischer Nutzen in der restauratorischen Praxis
 Das entwickelte kontrollierte Fachvokabular eröffnet vielfältige Möglichkeiten in der automatisierten Datenverarbeitung und dem Einsatz KI-gestützter Anwendungen in der Konservierung-Restaurierung. Das zentrale Einsatzgebiet ist die standardisierte Erfassung der Restaurierungs dokumentation. Zweige des Fachvokabulars können direkt als Auswahlmöglichkeit mit Feldern einer Eingabemaske im Datenbanksystem verknüpft werden, was die Standardisierung und Qualitätssteigerung der restauratorischen Dokumentation fördert. Eine konsistente Fachsprache wird sichergestellt und auch Schreibfehler werden vermieden. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die eindeutige Annotation von Zustandskartierungen durch Integration des Vokabulars in Kartierungssysteme wie z.B. QGIS, wodurch Schadensbilder, Herstellungsspuren oder Bereiche, in denen Konservierungsmittel in ein Objekt eingebracht wurden, standardisiert beschrieben werden können.

Der wesentliche Mehrwert liegt in der Verbesserung des inter- und intradisziplinären Austausches und der Vergleichbarkeit von Daten. Die Verwendung standardisierter Vokabulare stellt sicher, dass inhaltlich verwandte Ressourcen auch bei unterschiedlicher Benennungspraxis zusammengeführt werden können. Durch Referenzieren auf eindeutige Identifikatoren in den Daten können unterschiedliche Bezeichnungen wie in dem oben erwähnten Beispiel mit „Kleber“, „Klebstoff“ oder „Leim“ demselben Konzept zugeordnet werden, sodass Suchabfragen nach einem dieser Wörter automatisch alle relevanten Einträge findet (Abb. 6). Dies überwindet die Barriere terminologischer Vielfalt, ohne diese einzuschränken, steigert die Nachnutzbarkeit der Daten erheblich und ermöglicht deren Integration in übergreifende Forschungsdateninfrastrukturen.

Perspektivisch bietet das maschinenlesbare kontrollierte Vokabular eine Grundlage für weiterführende KI-Anwendungen. Intelligente Assistenzsysteme könnten zukünftig nach entsprechendem Training über semantische Verknüpfungen zwischen Schadensbildern und erfolgreichen Erhaltungsmaßnahmen selbst geeignete Behandlungsmethoden vorschlagen. Der Thesaurus bildet demnach eine Brücke zwischen traditioneller Expertise der Restaurierungswissenschaft und den Möglichkeiten digitaler Informationsverarbeitung, wobei KI als hilfreiches Werkzeug dient,

ohne die fachliche Expertise und das handwerkliche Können des Menschen zu ersetzen.

Literatur

- David BIBBY, Kai-Christian BRUHN, Alexandra W. BUSCH, Frank DÜHRKOHP et al., NFDI4Objects – Proposal, Zenodo 2023.
- DARIAH-DE, Kontrolliert-Strukturierte Vokabulare, 2025. URL: <https://doc.de.dariah.eu/5.-Kontrolliert-Strukturierte-Vokabulare/> (Zugriff: 09.10.2025)
- DCMI USAGE BOARD, DCMI Metadata Terms, 2020. URL: <https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/dcmi-terms/> (Zugriff: 09.10.2025).
- Kristina FISCHER, N4O Community Survey Conservation – Data (v1.0). GitHub/Zenodo 2025.
- Kristina FISCHER und Nathaly WITT, Zusammenfassung des Status Quo im Forschungsdatenmanagement für den Bereich der Konservierung-Restaurierung (Version v1). Zenodo 2025.

Patricia HARPRING, Controlled Vocabularies. Terminology for Art, Architecture, and Other Cultural Works, Los Angeles 2010.

Philipp MAYR und Vivien PETRAS, Crosskonkordanzen: Terminologie Mapping und deren Effektivität für das Information Retrieval, in: 74th IFLA General Conference and Council, 2008, S. 1–21.

Alistair MILES und Sean BECHHOFER, SKOS Simple Knowledge Organization System Reference, 2009. URL: <https://www.w3.org/TR/2009/REC-skos-reference-20090818/> (Zugriff: 07.10.2025).

Winfried NÖTH, Handbuch der Semiotik, Stuttgart 2000.

Roland SCHWAB, Katja BROSCHAT, Rüdiger LEHNERT, Ingrid STELZNER, Jörg STELZNER, Über 170 Jahre Expertise. Das Leibniz-Zentrum für Archäologie, in: Archäologie in Deutschland, 2024, Heft 5, S. 26–29.

Abstract

AI in Terminology Teaching. A Machine-readable Controlled Vocabulary for Archaeological Conservation and Restoration

The increasing digitisation of monument conservation requires standardised terminology that can be understood by both humans and AI systems. The thesaurus project developed at the Leibniz-Zentrum für Archäologie (LEIZA) as part of NFDI4Objects addresses this challenge by creating a human- and machine-readable controlled vocabulary for the conservation and restoration of archaeological objects.

Based on the Simple Knowledge Organisation System (SKOS) schema, the thesaurus was developed through the systematic analysis of conservation reports from 170 years of conservation his-

tory at LEIZA. The controlled terminology enables precise semantic links between terms and their domain-specific contexts, e.g. between damage patterns and conservation methods.

This semantic structuring improves the exchange of data across institutes, promotes a common understanding of conservation knowledge and, in the long term, enables the development of intelligent assistance systems that can support conservation in diagnosis and treatment planning.

The presentation at the ICOMOS workshop introduces the systematic content-related and semantic-technical development of the thesaurus and shows initial examples of its application in monument conservation practice.

1 Für den sprachlichen Ausdruck der gedanklichen Abbildung werden in der Literatur die Wörter „Benennung“ und „Bezeichnung“ häufig synonym verwendet.

2 NÖTH, Semiotik, 2000, S. 140.

3 HARPRING, Controlled Vocabularies, 2010, S. 16–26.

4 HARPRING, Controlled Vocabularies, 2010, S. 27–48; DARIAH-DE, Vokabulare, 2025.

5 NFDI4Objects ist Teil der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur (NFDI) und adressiert datenorientierte Bedarfe aus Forschungsperspektiven rund um die materiellen Hinterlassenschaften aus rund 2,6 Millionen Jahren Menschheits- und Umweltgeschichte (Bibby et al., NFDI4Objects, 2023)

6 FISCHER und WITT, Forschungsdatenmanagement, 2025.

7 FISCHER, Community Survey, 2025.

8 SCHWAB et al., Leibniz-Zentrum für Archäologie, 2024, S. 26–29.

9 MILES und BECHHOFER, SKOS, 2009.

10 Ebd.

11 DCMI USAGE BOARD, Dublin Core, 2020.

12 MAYR und PETRAS, Crosskonkordanzen, 2008, S. 3–4; HARPRING, Controlled Vocabularies, 2010, S. 83–85.

13 <https://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/> (Zugriff: 09.10.2025).

14 <https://explore.gnd.network/> (Zugriff: 09.10.2025).

15 https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:Main_Page (Zugriff: 09.10.2025).

16 Der aktuelle Stand des Thesaurus ist abrufbar unter: <https://www.w3id.org/archlink/terms/conservationthesaurus> (Zugriff: 09.10.2025).

17 <https://skohub.io/> (Zugriff: 09.10.2025).

KI-gestützte Konfliktmoderation in der Denkmalpflege: zwischen Bestand und Bedarf am Beispiel eines industriellen Pionierbaus

1. Einleitung¹

Die Denkmalpflege steht im Spannungsfeld zwischen Bewahrung und Nutzung. Eigentümer:innen, Planer:innen und Denkmalbehörden erleben zunehmend komplexe Konflikte, die nicht allein rechtlich, sondern auch kommunikativ vermittelt werden müssen. Vor diesem Hintergrund bietet der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) neue Möglichkeiten, Denkmalprozesse zu dokumentieren, zu simulieren und zu moderieren. Der Vortrag untersucht, inwiefern KI in Konfliktlagen wirken und helfen kann – nicht als Ersatz für Expertise, sondern als Instrument der Verständigung.

2. Konflikte in der Denkmalpflege

Konflikte entstehen häufig aus Zielkonflikten zwischen Substanzerhalt, Nutzung und Gestaltung. Sie verlaufen rechtlich, kommunikativ und planerisch unterschiedlich, folgen aber ähnlichen Mustern: Informationsdefizite, Verständnislücken und emotionale Eskalationen (Abb. 1). KI kann diese Dynamiken sichtbar machen und Entscheidungstransparenz schaffen.

KI-gestützte Werkzeuge erfassen Gebäudezustände mittels 3D-Scans, Drohnen oder Photogrammetrie, erkennen Schadensbilder und integrieren heterogene Datenquellen zu digitalen Zwillingen. In der Konfliktmoderation kann KI historische, visuelle und rechtliche Informationen verknüpfen, Visualisierungen erzeugen und Varianten simulieren – von der statischen Sicherung bis zur denkmalverträglichen Anpassung.

3. Ein Haus in industrieller Bauweise erzählt

Der Fall eines Baudenkmals aus den 1930er Jahren (Abb. 2) zeigt die typische Spannung zwischen Nutzungswunsch und Substanzerhalt. Der Eigentümer

wollte den Grundriss ändern; die Behörde warnte vor Substanzerlust. Die Lösung: ein gesteuerter Eingriff. Durch das Aufschneiden der Wand und den Erhalt des Sturzes konnte der historische Wandaufbau sichtbar gemacht und zugleich eine funktionale Nutzung erreicht werden (Abb. 3).

Technisch beinhaltet dies:

- Erhalt des Wandkopfs als statisches Element
- Schnitt entlang vorhandener Fugen
- partielle Offenlegung mit Glasabdeckung
- digitale Dokumentation des Eingriffs per 3D-Scan und Raumbuch.

Der Eingriff demonstriert, dass „Sichtbarmachung statt Zerstörung“ eine vermittelnde Strategie sein kann. Eine KI hätte diesen Kompromiss mit Variante-Visualisierungen und Szenarien schneller und nachvollziehbarer unterstützt (Abb. 4).

4. KI als neutraler Dritter?

KI-Systeme können Daten aus Planunterlagen, Fotografien und Gutachten zusammenführen und daraus argumentativ neutrale Darstellungen erzeugen. Damit wird KI zu einem Mittler, der Emotionen reduziert und fachliche Abwägungen sichtbar macht. Besonders generative KI bietet Potenzial, Alternativen zu visualisieren, ohne zu bewerten. Risiken liegen in mangelnder Datenqualität, rechtlichen Grenzen (AI Act, DSGVO) und der Gefahr, dass Fachurteilskraft entwertet wird. Doch richtig eingesetzt, stärkt KI die Kommunikationskompetenz von Denkmalpflege und Verwaltung (Abb. 5). Dennoch: KI ist letztlich nie „neutral“.

5. Potenziale in Denkmalbehörden

Der Fachkräftemangel belastet viele Denkmalbehörden. KI kann hier Entlastung schaffen durch:



Abb. 1: Typische Konflikt- und Vermittlungssituationen in Denkmalschutz und Denkmalpflege

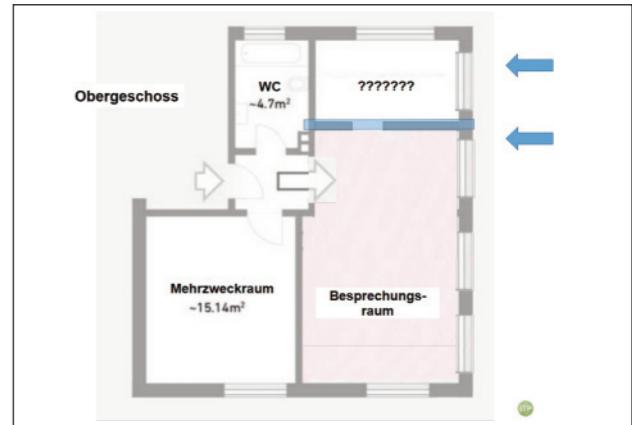


Abb. 3: Gefangener Raum im Bestand als Streitfall

6. Erkenntnisse und Übertragbarkeit

Das Beispiel des gesteuerten Eingriffs ist übertragbar:

- Auf Fenster- und Dachumbauten, barrierefreie Zugänge oder energetische Sanierungen
- Auf jede Situation, in der Nutzung und Bewahrung konkurrieren.

KI kann helfen, Eingriffe zu simulieren, Varianten zu zeigen und ihre Auswirkungen zu bewerten (Abb. 6 und 7). Damit wird Konfliktprävention möglich, bevor Eskalationen entstehen.

2.3. Ein Haus in industrieller Bauweise erzählt (hier: Denkmal mit Bauteilen aus industrieller Fertigung)

2.3.1. Der Fall: Eigentümerwunsch trifft auf Grundriss und Innenwand, original aus den 1930er Jahren

- Der Fall ereignete sich im Jahre 20XX*.
- „In dieser Stadt ist Denkmalschutz ein Schimpfwort.“
- Bauschein des Originals Anfang 1927 (plus spätere Änderung bzgl. Material)
- Errichtet bis 1930 durch Baugesellschafter A.
- Unter Denkmalschutz seit 1989.
- Geplante Nutzung als Anwaltskanzlei u. Notariat + Wohnnutzung
- (mir bekannter Notar)



Abb. 2: Schilderung eines Beispieldfalls

ERGEBNIS:



Abb. 4: Vermittlungslösung durch KI

Abstract

Between Inventory and Demand – AI-supported Conflict Mediation in Monument Preservation Using the Example of a Pioneering Industrial Building

The use of artificial intelligence in monument preservation promises more than just technical efficiency. It can be particularly effective where traditional mediation tools reach their limits – for example, in the area of conflict between property interests, usage expectations and the protection of historical monuments.

A practical example is presented from the perspective of a long-standing moderator of municipal negotiation processes: A house in industrial construction tells its story. This conflict concerning a 1920s architectural monument illustrates how hybrid analysis and visualisation tools can bridge gaps in understanding and reveal options – without prejudging decisions.

The thesis: AI cannot replace expertise or legal considerations, but it can contribute to the quality of



Abb. 6: Fallbeispiel Simulation einer Gebäudesanierung



Beispiel Wolfenbüttel „Prinzenpalais“

Abb. 7: Simulation einer beabsichtigten Denkmalsanierung

7. Fazit

KI ersetzt keine Fachleute, aber sie verändert ihre Arbeit. Sie verschiebt den Fokus von Kontrolle zu Kommunikation, von Verordnung zu Verständigung. Der denkmalpflegerische Diskurs gewinnt, wenn digitale Werkzeuge als Brückenbauer zwischen den Welten dienen.

Schlussgedanke: Die KI ist da. Die Frage ist, auf welcher Seite man selbst steht.

the argumentation as a neutral authority. It offers new ways of illustration – including for owners and the public – and can thus serve as a catalyst for viable compromises.

This article is not intended as a technology showcase, but rather as an invitation to the professional community to consider meaningful, context-appropriate applications of AI in the field of monument preservation – especially where communication and acceptance have been particularly challenging to date.

Bildnachweise

Abb. 1: Eigene Darstellung, erstellt mithilfe von ChatGPT

Abb. 2: Auszug aus der Präsentation; eigene Darstellung mithilfe von ChatGPT

Abb. 3: Eigene Darstellung

Abb. 4: Eigene Darstellungsergebnisse mithilfe verschiedener KIs

Abb. 5: Auszug aus der Präsentation, eigene Darstellung. Teil Transformer via Hannes Külz, Berlin

Abb. 6: Eigene Darstellung mittels KI

Abb. 7: Eigenes Ergebnis via Perplexity

1 Die Gliederung ist gegenüber der Vortragsgliederung leicht verändert.

4. Herausforderungen und Implikationen

4.1. Grenzen der KI und deren Anwendung im Arbeitsalltag

a) Daten- und Technik-Voraussetzungen

- a1) „Tagesaktueller“ Stand der KI-Technik
- a2) Halluzinieren, Verzerren
- a3) Transformation von Begrifflichkeiten (nach Hannes Külz, Berlin)
- a4) Datenverfügbarkeit und -qualität
- a5) Notwendigkeit interdisziplinärer Teams
- a6) Authentizität vs. KI-generierte Realität

b) Rechtliche Aspekte

- b1) Datenschutz (u.a. DschGVO, BDSG)
- b2) Urheber- und Bildrechte
- b3) AI Act
- b4) Arbeitsrecht (private Accounts)

c) Akzeptanzfaktoren

- c1) Vertrauen in Technik vs. BlackBox
- c2) Akzeptanzprobleme bei Fachleuten oder der Öffentlichkeit
- c3) Einsatzbereitschaft bei den Behörden und Entscheidungsträgern
- c4) Rolle des Menschen als Moderator

d) Bereitschaft und Möglichkeit zur KI-Nutzung

- d1) Aus- und Weiterbildungsgrad bei den Mitarbeitenden; „AI-Führerschein“ nach EU AI-Act Art. 4
- d2) Mittel und Ressourcen zum KI-Einsatz
- d3) Implementoren (besondere Situation bei Unteren Denkmalbehörden!)
- d4) Zeit



Abb. 5: Übersicht Grenzen der KI und deren Anwendung im Arbeitsalltag

KI-gestützte Risikobewertung von Klimadaten zur präventiven Konservierung

Hintergrund

Für die langfristige Erhaltung von Kunst- und Kulturgut im Innenraum ist das Raumklima ein entscheidender Faktor. Änderungen der relativen Feuchte und der Temperatur führen bei mobiler und immobiler Ausstattung, die häufig aus organischen Bestandteilen gefertigt sind, zu Quell- und Schrumpfprozessen. Die Materialverbünde (Träger, Grundierung, Malschicht) reagieren also immer auf Änderungen der klimatischen Bedingungen. Ist das Feuchte- oder Temperaturniveau zu hoch oder zu niedrig oder treten große Schwankungen auf, entstehen innerhalb der Schichten Spannungen, die dann zu Brüchen, Rissen, Lockrungen oder Substanzverlusten führen können (Abb. 1). Die Anwesenheit von Salzen stellt insbesondere für die Wandmalerei/ Architekturoberflächen ein großes Schadenspotenzial dar. Denn je nach Art und Mischungsverhältnis sind unterschiedliche klimatische Bedingungen für die Kristallisation von Salzen verantwortlich. Die sich daraus ergebende Volumenveränderung führt zwangsläufig zu hohen Substanzverlusten (Abb. 2).

Für die Beurteilung von bauphysikalischen und konservatorischen Fragestellungen in historischen Gebäuden ist die Erhebung von Klimadaten seit Jahrzehnten Standard.¹ Denn die Daten zu Temperatur und relativer Feuchte geben entscheidende Hinweise zu Problematiken, wie aufsteigende Feuchte, Sommerkondensation oder externe Feuchtequellen.

Für die Erstellung eines Messkonzepts und die Installation von Datenloggern gibt es solide Grundlagen,² die Auswertung erfolgt jedoch häufig anhand von Tools der Softwarehersteller. Meist werden Temperatur und relative Feuchte als Liniendiagramme für voreingestellte Zeiträume angezeigt, oder es erfolgt eine statistische Grundauswertung (Minimum, Maximum, Mittelwert etc.). Diese ist hilfreich für eine erste Einschätzung. Die

Beurteilung des Raumklimas in Hinblick auf konservatorische Anforderungen erfordert jedoch immer eine detaillierte Aus- und Bewertung der Daten. Für die Beantwortung spezifischer Fragestellungen gibt es spezielle Auswertetools. Einige dieser Schadfunktionen, etwa das Risiko für Schimmelbildung³ oder das Auskristallisieren von Salzen, sind gut geeignet für Prognosen. Für andere Schadfunktionen, wie die Beurteilung von mechanischen Belastungen an historischer Ausstattung,⁴ sind die Prognosen jedoch nur schwer interpretierbar.

Methode

Im Rahmen einer Pilotstudie wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP untersucht, inwieweit mit Künstlicher Intelligenz (KI) bzw. Machine Learning (ML) Raumklimadaten hinsichtlich konservatorischer Kriterien automatisch bewertet werden können. Zu diesem Zweck wurde die Software CERoC konzipiert und implementiert, die auf der Programmiersprache Python⁵ basiert.

Die Methodik bzw. CERoC unterteilt sich in zwei Teile. Im ersten Teil bewerten Experten das Raumklima anhand von realen Raumklimadaten (zeitliche Verläufe von Temperatur und relativer



Abb. 1: Salzkristallisation an Wandmalerei birgt großes Schadenspotenzial



Abb. 2: Madonna mit Riss im Gesicht, der aufgrund von zu geringer relativer Feuchte entstanden ist

Feuchte) aus Museen. Dadurch ergibt sich ein Datensatz, bestehend aus Temperatur- und Feuchteverläufen (Eingang) und einer Raumklimabewertung (Zielgröße). Das Bewerten wird durch die Software CERoC-Label mit einem teilautomatischen Prozess erleichtert. Der zweite Teil CERoC-ML deckt das eigentliche ML-Modell ab, welches auf dem erstellten Datensatz trainiert, um automatisierte Bewertungen auszugeben.

Problemstellung

Die Aufgabe besteht darin, eine Funktion f zu finden, die einen Temperatur- und Feuchteverlauf (Zeitreihe) auf eine Bewertung (z. B. gut/schlecht oder 0 % = gut bis 100 % = schlecht) abbildet (1):

$$f_{\theta} \left(\left[(t_1, h_1), \dots, (t_n, h_n) \right] \right) \rightarrow \{ \{ \text{gut} \}, \{ \text{schlecht} \} \} \quad (1)$$

wobei t_1 die Temperatur und h_1 die relative Feuchte zum Zeitpunkt i sind. Die Form der Funktion f (z. B. linear) wird vorgegeben und mit Parametern θ versehen. Ein trivialer Ansatz könnte die Bewertung anhand von vordefinierten Schwellenwerten für Temperatur und relative Feuchte vornehmen. Mit CERoC erproben wir einen anderen Ansatz, basierend auf ML, und lernen die Funktion bzw. deren Parameter θ aus den Daten. Dazu wird ein Trainingsdatensatz benötigt, der aus Eingangs- und Zielpaaren besteht und welchen wir mit CERoC-Label erstellen. Während des Trainings werden die Parameter θ optimiert, sodass der Fehler zwischen der tatsächlichen Zielgröße/ Label und der Ausgabe des Modells minimiert wird.

Bewertung Raumklima

Aus konservatorischer Sicht sind klimatische Schwankungen zu vermeiden, gleichzeitig sollte ein gewisser Korridor für die relative Feuchte eingehalten werden. Gemäß den Vorgaben eines erweiterten Klimazielkorridors des Deutschen Museumsbunds liegt dieser für die relative Feuchte bei 40 % – 60 % r.F.; für die Temperatur sollten die Werte zwischen 15 und 26 °C liegen, wobei ein saisonales Gleiten möglich ist.⁶ Gleichzeitig sollen tägliche Schwankungen 5 % r.F. nicht überschreiten. Für nicht klimatisierte historische Gebäude wird die Zielvorgabe etwas erweitert. Hier gilt die

Empfehlung, dass kurzfristige Schwankungen der relativen Feuchte unter 15 % r.F. bleiben sollten.⁷ Diese Vorgaben erfordern zwar kein ML, werden aber für das Labeling berücksichtigt.

In der herkömmlichen Auswertung werden in der Regel Zeiträume von einem Tag bzw. Schwankungen innerhalb von 24 Stunden betrachtet. Für die Beurteilung von mehrtägigen Feuchteschwankungen gibt es derzeit keine praktikablen Sollwertvorgaben bzw. definierte Auswertealgorithmen.⁸ Für die Bewertung dieser Schwankungen eignet sich ML. Da insbesondere Schwankungen der relativen Feuchte, die über einen längeren Zeitraum zwischen minimalem und maximalem Wert schwanken, schadensrelevant sind, werden diese durch die Experten über einen längeren Zeitraum evaluiert.

Die Bewertung der Klimadaten erfolgte zunächst mit der Bewertung 0 = gut und 1 = schlecht. Nach ersten Tests stellte sich heraus, dass diese Bewertung noch zu unpräzise ist. Um den Experten eine differenziertere Abstufung zu ermöglichen, wurde zwischen 0 und 1 eine frei wählbare Bewertung eingeführt: 0 % = gut und 100 % = schlecht.

Datenkennzeichnung (Labeln) mit CERoC-Label

Da es sich bei Klimadaten um Zeitreihen handelt und die Dynamik des Klimas im zeitlichen Verlauf bewertet werden soll, wird ein Labeln in Zeitschritten durchgeführt. Hierfür werden die Klimadaten mit der Software CERoC-Label in einem definierten Zeitraum dargestellt. Bewertet wird dabei jeweils ein Tag. Der restliche Zeitabschnitt dient dazu, die längerfristige Dynamik über einen Tag hinaus für den konkret zu bewertenden Tag vornehmen zu können. Die hier entwickelte Methode für das La-

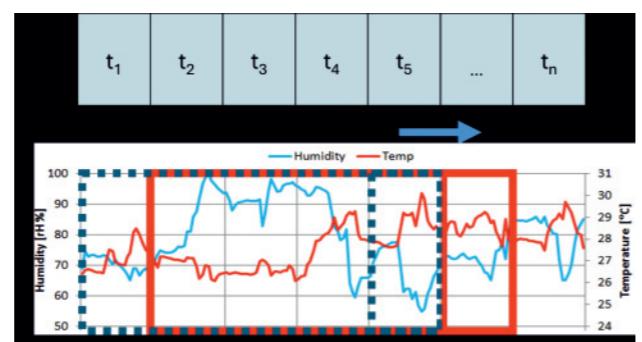


Abb. 3: Schematischer Ablauf Bewertung Temperatur relative Feuchte mit Zeitschritten t_n anhand eines Beispieldatensatzes

beling der Zeitreihe entspricht dem feed-forward control. Dadurch eignet sie sich auch zur Regelung anlagengesteuerter Gebäudetechnik. Der Ablauf der Bewertung mit Zeitschritten ist schematisch in Abb. 3 dargestellt. Durch die Software wird das Votum der Experten jedem Zeitschritt und damit dem Klimaverlauf zugeordnet.

Vergleich der Expertenbewertung

Wegen der nicht eindeutig beschreibbaren Bewertung, insbesondere der Abstufung zwischen 0 % (gut) und 100 % (schlecht), stellt sich die Frage, ob Experten zu einer ähnlichen Einschätzung kommen. Die Beurteilung stützt sich auf die individuelle Erfahrung der Bewertenden hinsichtlich der Einschätzung des Schadensrisikos von Klimadaten. Da jeder Experte eine individuelle Bewertung in die Software eingibt, werden die Label der Experten hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit analysiert. Dies wird durch eine statistische Überprüfung der Label über den MAE (Mean Absolute Error) durchgeführt.

Training und Test der Software CERoC-ML

Nach der Feststellung der Konsistenz der Expertenlabel erfolgt eine Konsolidierung für Temperatur- und Feuchtelabel. Die Paare, bestehend aus Zeitreihe und zugehörigem Label, werden danach durch einen Zufallsgenerator in einen Trainings-

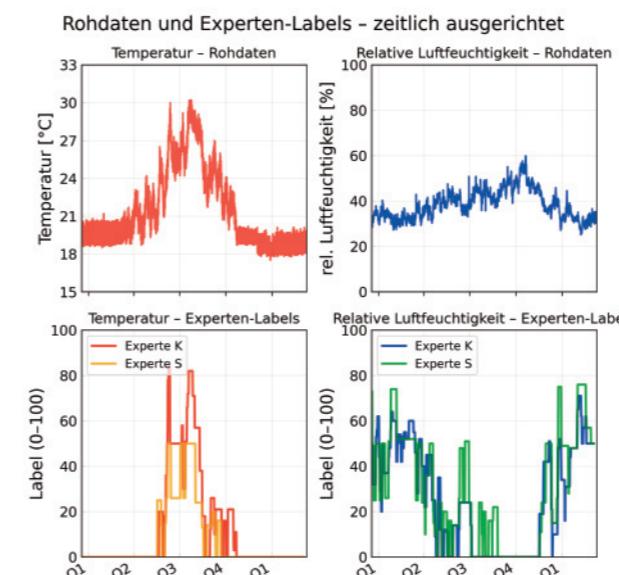


Abb. 4: Ergebnis Expertenbewertung Beispieldatensatz, oben: Liniendiagramm des zu bewertenden Datensatzes mit Temperatur (links) und relativer Feuchte (rechts), unten: Bewertung durch die Experten für Temperatur (links) und relative Feuchte (rechts)

und Testdatensatz aufgeteilt. Diese werden hinsichtlich der Verteilung der Label bzw. Bewertungen miteinander verglichen. Damit wird sichergestellt, dass in jedem Datensatz in etwa eine ähnliche Verteilung der Labels vorliegt. Zum Einsatz kommt ein 1D-Convolutional-Neural-Network (CNN)⁹ als ML-Modell bzw. Funktion f , deren Parameter optimiert werden. CNNs eignen sich für eine Vielfalt von Daten, wie z. B. zeitlich korrelierte Daten. Die Trainingsdaten werden zum Optimieren der Modellparameter verwendet. Dies erfolgt über einen vielfachen Durchgang des Trainingsdatensatzes (Epochen), bei dem in jedem Schritt die Modellparameter optimiert werden, sodass der Fehler zwischen Vorhersage und Label minimiert wird. Damit nähert sich die Vorhersage den Trainingsdaten an (Training Loss). Das Training wird so lange wiederholt, bis das Modell konvergiert oder der Fehler (MAE) der trainierten Antwort unter einem bestimmten Schwellenwert (z. B. MAE < 0,05) liegt.

Nach dem erfolgreichen Training wird das Modell anhand der Testdaten geprüft, um die Generalisierungsfähigkeiten des Modells zu evaluieren. Dazu wird die Vorhersage des Modells auf den ungesiehten Testdaten ebenfalls über den MAE bewertet (Test Loss).

Ergebnisse

Das Diagramm in Abb. 4 zeigt oben die Rohdaten als Zeitreihen (links Temperatur, rechts relative Feuchte) und darunter die zugehörigen Experten-Labels über denselben Zeitraum (0 = gut, 100 = schlecht). So lässt sich direkt erkennen, wie Ausschläge in den Messwerten mit höheren Labelwerten korrespondieren. Es führen beispielsweise Phasen mit hohen Temperaturen über 25 °C zu „schlechteren“ Bewertungen. Es zeigt sich, dass grundsätzlich eine ähnliche Einschätzung der Experten vorliegt, jedoch die Bewertung anhand der Zahlen unterschiedlich vorgenommen wurde. So zeigen sich in der Bewertung der relativen Feuchte in Q3 und Q4 unterschiedliche Labels.

Der Vergleich der individuellen Bewertung der Experten untereinander erfolgt über MAE (Mean Absolute Error). Für eine ausreichend gute Übereinstimmung der Experten sollte dieser unter 10 sein, eine sehr gute Übereinstimmung wird mit einem Wert unter 5 festgelegt. Für die Bewertung

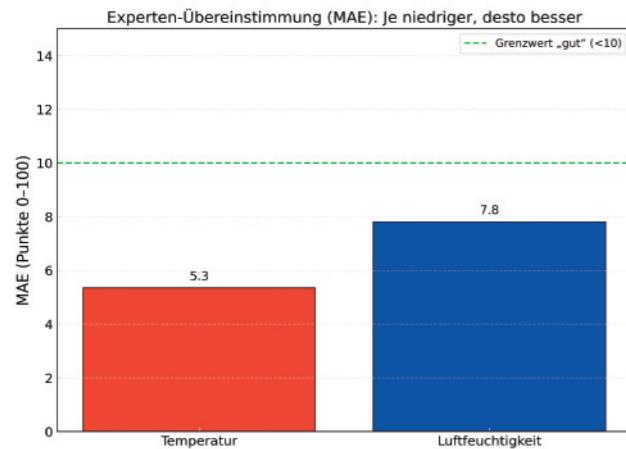


Abb. 5: Bewertung der Abweichung der Expertenlabel untereinander, getrennt nach Temperatur und relativer Feuchte

der Temperatur ergibt ein Wert von 5,3 für die relative Feuchte ein MAE von 7,8 (Abb. 5). Im Ergebnis liegt ein ausreichend gut vergleichbares Labeling der Experten vor. Somit kann die Datenbasis für das Training der Software CERoC-ML verwendet werden.

Die Label werden per Zufallsgenerator in Trainings- und Testdaten aufgeteilt. Aus der Gesamtheit der Label wurden ca. zwei Drittel als Trainingssatz eingesetzt und ca. ein Drittel zum Testen (Validieren) des Modells verwendet. Die ausgewählten Daten werden hinsichtlich der Verteilung der Bewertung (zwischen 0 und 100) überprüft

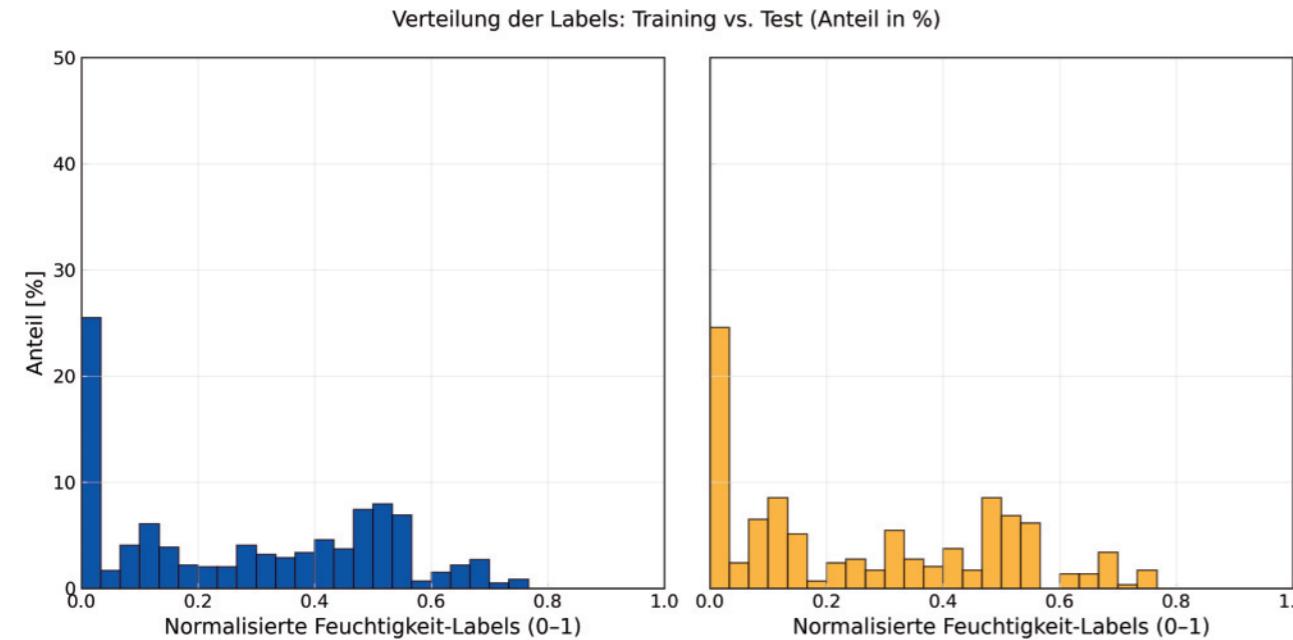


Abb. 6: Vergleich der Verteilung der Bewertung der Labels für den Trainingsdatensatz (links) und den Testdatensatz anhand der Label für die relative Feuchte

(Abb. 6). Das Diagramm bewertet am Beispiel der relativen Feuchte den ML-Ansatz anhand der relativen Häufigkeitsverteilung der normalisierten Feuchte-Labels (0-1) getrennt für Trainingsdaten (linkes Diagramm) und Testdaten (rechtes Diagramm). Jede Säule des Histogramms gibt in Prozent an, wie oft ein Labelwert aus der Gesamtheit der Label gewählt wurde. Sind die beiden Verteilungen ähnlich, ist der zufällige Split repräsentativ: Das Modell sieht im Training die gleichen Labelbereiche wie später im Test. Auffällige Unterschiede oder starke Schieflagen, z. B. fast ausschließlich niedrige Werte im Test, würden auf eine nicht ausbalancierte Aufteilung hinweisen und die Bewertung verzerren.

Beim Training werden die Modellparameter bzw. Modellgewichte durch einen Optimierungsalgorithmus (Gradientenverfahren) über mehrere Epochen automatisch angepasst. Nach jeder Epoche wird der MAE berechnet – einmal auf den Trainingsdaten (Training Loss) und einmal auf einem separaten Validierungsdatensatz (Validation Loss). Die Validierungsdaten dienen nur der Prüfung; dabei werden die Gewichte nicht aktualisiert. Fallen beide Kurven stetig ab und verlaufen dabei nah beieinander, generalisiert das Modell gut. Steigt der Validation Loss, während der Training Loss weiter sinkt, liegt ein Overfitting vor.



Abb. 7: Mittlerer absoluter Fehler (MAE) des trainierten CERoC-ML-Algorithmus im Vergleich zu den Trainingslabels (Training Loss) und den Testlabels (Validation Loss) nach mehreren Durchgängen (Epochen) für die relative Feuchte

Häufig wird das Training dann vorzeitig abgebrochen. Die endgültige Bewertung erfolgt erst am Ende auf einem separaten Testdatensatz, der während des Trainings unberührt bleibt (Abb. 7).

Die Qualität der Vorhersage des trainierten Modells ist als Streudiagramm in Abb. 8 dargestellt. Den True Labels (Bewertung der Messdaten durch Experten) der Testdaten sind die Predicted Labels (Vorhersage der CERoC-ML) gegenübergestellt. Liegen die Punkte auf der Geraden (rote Linie), entspricht die Vorhersage genau dem Label der Experten.

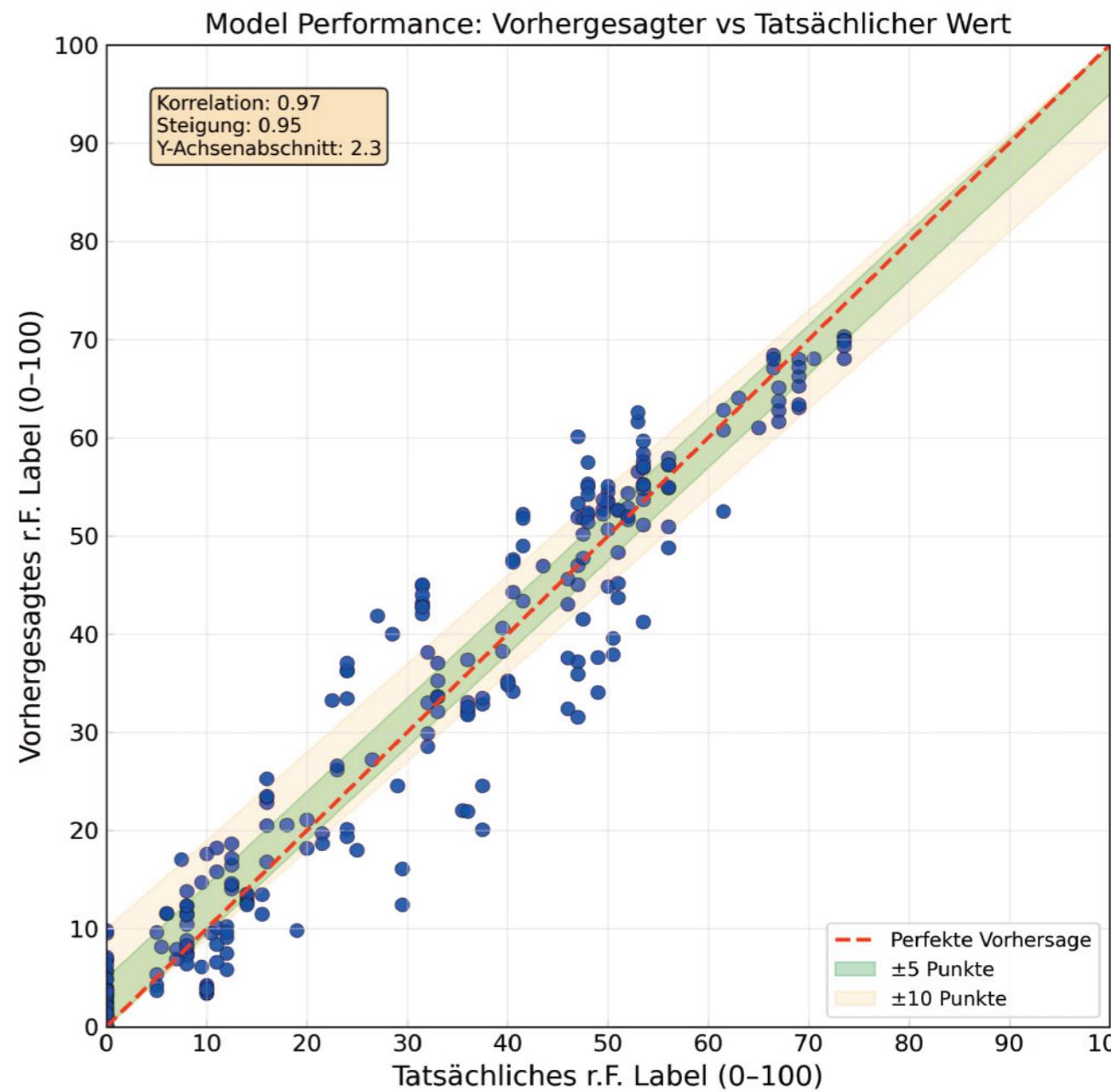


Abb. 8: Analyse der Qualität der Vorhersage (Predicted Label) durch den Vergleich der Bewertung der Experten (True Label) des trainierten CERoC-ML-Modells zu den Testdaten

Diskussion und Ausblick

Die Pilotstudie analysierte die Anwendbarkeit einer ML-Applikation zur Bewertung von Raumklimadaten aus konservatorischer Sicht. Hierfür wurde zunächst eine Methode entwickelt, mit der es möglich ist, für die ML-Applikation Trainingsdaten zu erstellen. Hierfür wurde in Python die Applikation CERoC-Label programmiert, welche es Experten ermöglicht, Raumklimadaten durch Bewertung (Labeln) zu klassifizieren. Um eine möglichst einheitliche Bewertung zu erhalten, wurden die Label der Experten verglichen. Die Bewertung ergab eine gute Übereinstimmung. Damit konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Experten zu einem ähnlichen Ergebnis kommen. Da es sich jedoch um einen eng umgrenzten Expertenkreis handelt, kann zwar der methodische Ansatz positiv bewertet werden. Für eine zuverlässige Aussage müsste der Expertenkreis jedoch noch erweitert werden. Zielführend wäre ggf. auch das Anlernen von Anwendern, die noch keine Experten der Klimadatenbewertung im Hinblick auf konservatorische Anforderungen sind.

In einem zweiten Schritt wurde die ML-Applikation CERoC-ML in Python entwickelt und mit den erstellten Labeln trainiert. Die Ergebnisse der ML-Applikation zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Expertenbewertung. Die Evaluation der trainierten ML-Applikation auf den Testdaten zeigt eine ähnlich gute Performance wie mit den Trainingsdaten. Bereits nach wenigen Testdurchgängen (20–30 Epochen) konvergierte die ML-Applikation auf einen niedrigen MAE von rund 0,05 und damit auf ein gutes Vorhersageniveau im Vergleich zur Expertenbewertung. Diese Pilotstudie zeigt das Potenzial, das in der ML-Applikation steckt. Als nächster Schritt sollte die Datenbasis erhöht und anhand von weiteren Klimadatensätzen trainiert und geprüft werden. Ziel ist eine (teil-)automatisierte Bewertung von Raumklimadaten basierend auf Expertenwissen, die eine zeit- und kostensparende Datenanalyse ermöglicht. Die Methode eignet sich nicht nur für eine nachträgliche Datenbewertung, sondern auch für eine fortlaufende Analyse von Klimadaten aus einer Klimaüberwachung.

Literatur

- Shaojie BAI, J. Zico KOLTER, Vladlen KOLTUN, An Empirical Evaluation of Generic Convolutional and Recurrent Networks for Sequence Modeling, 2018.
- Stefan BICHLMAIR, Kristina HOLL, Ralf KILIAN, The Moving Fluctuation Range – a New Analytical Method for Evaluation of Climate Fluctuations in Historic Buildings, in: Climate for Collections. Klima und Kulturgut – Wissen und Unwissen, München 9.–11. November 2012, London 2013, S. 429–440.
- Dario CAMUFFO, Microclimate for Cultural Heritage. Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments, 2019, <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02191-2>.
- Kristina HOLL, Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext: Untersuchung des Schadensrisikos anhand von restauratorischer Zustandsbewertung, Laborversuchen und Simulation. Dissertation Technische Universität München, 2016.
- Jan HOLMBERG, Environment Control in Historical Buildings, Dissertation Royal Institute of Technology Stockholm, 2001.
- Marco H. J. MARTENS, Climate Risk Assessment in Museums: Degradation Risks Determined from Temperature and Relative Humidity Data, Dissertation Eindhoven University of Technology, 2012.
- Klaus SEDLBAUER, Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Dissertation Universität Stuttgart, 2001.
- Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. – WTA (Hrsg.), WTA-Merkblatt Klima und Klimastabilität in historischen Gebäuden I: Einführung, Merkblatt 6-12, 07/2011.
- Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. – WTA (Hrsg.), Klima und Klimastabilität in historischen Gebäuden II: Klimazielwert, 10-3-22/D, 02/2022.

Webseiten

- <https://herie.pl/>, Stand 30.10.2025
- www.python.org, Stand 30.10.2025
- Museumsbund empfiehlt neue Richtlinien für die Museumsklimatisierung – Deutscher Museumsbund e.V., <https://www.museumsbund.de/energiekrise-museumsbund-empfiehlt-neue-richtlinien-fuer-die-museumsklimatisierung/>, Stand 16.10.2025.

Abstract

AI-supported Risk Assessment of Climate Data for Preventive Conservation

The indoor climate is crucial for the long-term conservation of artworks and cultural assets in indoor spaces. Until now, temperature and humidity measurement data have been predominantly visualised and evaluated graphically, limited to simple parameters such as upper and lower limits. The dynamics of the indoor climate are often not analysed in detail or are only examined in a simplified manner using daily fluctuation ranges. In

particular, humidity fluctuations over several days are not evaluated satisfactorily.

This pilot study investigates the extent to which machine learning can be used for the automated evaluation of climate data with regard to conservation requirements. To this end, a two-part software solution was designed: CERoC-Label for the creation of training data by experts and CERoC-ML, a 1D convolutional neural network for automated predictions. The results show good agreement between expert assessments and a high accuracy of the trained model on unseen test data. The ML model converges after only a few calculation cycles.

The pilot study demonstrates the potential of ML-based approaches for time- and cost-saving automated data analysis. The next steps are to expand the database and test and validate it in cultural heritage institutions.

Bildnachweise

- Abb. 1, 3-8: Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Abb. 2: Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg

- 1 WTA-Merkblatt Klima und Klimastabilität in historischen Gebäuden I: Einführung; Klima und Klimastabilität in historischen Gebäuden II: Klimazielwert.
- 2 CAMUFFO, Microclimate for Cultural Heritage, 2019.3 W
- 3 SEDLBAUER, Schimmelpilzvorhersage, 2001.
- 4 MARTENS, Climate Risk Assessment in Museums, 2012; HOLL, Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke, 2016; vgl. auch <https://herie.pl>.
- 5 <https://python.org>
- 6 <https://www.museumsbund.de/energiekrise-museumsbund-empfiehlt-neue-richtlinien-fuer-die-museumsklimatisierung/>, Stand 16.10.2025.
- 7 HOLMBERG, Environment Control in Historical Buildings 2001.
- 8 BICHLMAIR et al., The Moving Fluctuation Range, 2013, S. 429–440.
- 9 BAI et al., Empirical Evaluation of Generic Convolutional, 2018.

Daniel Broschart, Sabrina Sommer, Peter Zeile

Ein neuer geodatenbasierter Ansatz zur Entwicklung eines Solarrahmenplans¹

Einführung

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist ein zentraler Bestandteil der Energiewende und zugleich eng mit den Klimaschutzz Zielen der Europäischen Union, des Bundes und der Länder verknüpft. Photovoltaik (PV) gilt dabei als Schlüsseltechnologie für eine dezentrale, nachhaltige Energieversorgung. Die Installation von PV-Anlagen steht jedoch oftmals in einem Spannungsfeld zu Belangen der Stadtgestaltung und insbesondere zum Schutz von Denkmälern und historischen Stadträumen.²

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Entwicklung von Planungsinstrumenten an Bedeutung, die eine differenzierte Abwägung zwischen Klimaschutz, Energiegewinnung und Denkmalpflege ermöglichen. Das Konzept eines Solarrahmenplans setzt an dieser Schnittstelle an: Es soll Kommunen und Fachbehörden ein transparentes, datenbasiertes Werkzeug bieten, um Flächenpotenziale für PV-Anlagen systematisch zu identifizieren, zu bewerten und zugleich gestalterische wie denkmalpflegerische Anforderungen zu berücksichtigen.

Der Beitrag stellt einen neuen geodatenbasierten Ansatz zur Entwicklung eines Solarrahmenplans vor. Im Zentrum steht die Nutzung von Geoinformationssystemen (GIS), 3D-Stadtmodellen und Künstlicher Intelligenz (KI), um Potenziale für PV-Anlagen präzise und im Hinblick auf den Schutz historischer Bauwerke differenziert zu bewerten.

Gesetzliche Rahmenbedingungen und Spannungsfelder

Die politische Rahmensetzung für den Ausbau von PV ist durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) sowie eine Vielzahl weiterer bundes- und landesrechtlicher Regelungen geprägt.³ Seit 2023 werden verstärkt Vorgaben zur PV-Nutzung auf Neubauten und Bestandsgebäuden eingeführt.⁴ Kommunen sind somit zunehmend gefordert, nicht nur Genehmigungsverfahren zu begleiten,

sondern auch proaktiv planerische Steuerungsinstrumente zu entwickeln.⁵

Im Bereich des Denkmalschutzes bestehen oftmals Zielkonflikte:⁶ Während Klimaschutzgesetze einen beschleunigten Ausbau der Solarenergie einfordern, schreiben Denkmalschutzgesetze eine umfassende Erhaltung der baulichen Substanz und des Erscheinungsbildes vor.⁷ Besonders in Altstädten, bei Kirchen, Burgen oder Villenensembles können PV-Anlagen das historische Ortsbild empfindlich stören.⁸

Vor diesem Hintergrund besteht ein erheblicher Bedarf an Verfahren, die diese Konfliktlinien frühzeitig sichtbar machen, Optionen aufzeigen und eine transparente Entscheidungsgrundlage schaffen.⁹

Konzept Solarrahmenplan – Grundideen und Anforderungen

Ein Solarrahmenplan ist ein strategisches Planungsinstrument, das folgende Ziele verfolgt:¹⁰

- Identifikation geeigneter Flächen auf Dächern, Fassaden und ggf. Freiflächen im Stadtgebiet,
- Berücksichtigung denkmalpflegerischer Kriterien sowie städtebaulicher Gestaltungsanforderungen,
- Bewertung der Potenziale hinsichtlich Energieertrag, technischer Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit,
- Visualisierung und Kommunikation der Ergebnisse in Karten, Szenarien und interaktiven Tools.

Die Entwicklung eines Solarrahmenplans erfordert somit eine systematische Integration unterschiedlicher Datenquellen und Bewertungsmaßstäbe. Geodaten, Katasterinformationen, 3D-Modelle und Denkmaldatenbanken bilden die Grundlage für die räumliche Analyse. Ergänzt werden diese durch Simulationsverfahren zur Ermittlung der so-

laren Einstrahlung sowie durch Regeln und Leitbilder der Denkmalpflege.

Ein zentrales Prinzip ist die Skalierbarkeit von Digitalen Zwillingen: Der Plan muss sowohl auf Gesamtstadt-Ebene Orientierungsinformationen bereitstellen als auch auf Gebäude-Ebene konkrete Hinweise zu Objekten oder Planungen geben.¹¹

Datengrundlagen

Die Grundlage bildet ein 3D-Stadtmodell (LOD2/LOD3) der Landesvermessungssämter in Deutschland, in dem Gebäudegeometrien, Dachformen und -neigungen sowie dadurch auch Informationen enthalten sind, über welche Verschattungssituationen abgeleitet werden können.¹² Für die Anfertigung des Solar-Rahmenplanes konnte zusätzlich auf folgende Datensätze zurückgegriffen werden:¹³

- Digitales Geländemodell 1m (DGM1) als Punktwolke im ASCII-Format,
- OSM-Datensatz der Stadt Landsberg am Lech,
- Fotogrammetrisch identifizierte Dachformen als geschlossene Polygonzüge, inklusive Neigungswinkel und Orientierung im SHP-Format. Die Daten wurden im Rahmen des TwinCity-Projekts mit KI-Algorithmen erstellt,

- Zugriff auf den WebClient von TwinCity3D zur visuellen Sichtbarkeitsanalyse,
- Zugriff auf den infra3D-Client zur Anfertigung von Straßenquerschnitten und Arbeiten mit Vor-Ort-Bildmaterial sowie Zugriff auf die LiDAR-Punktwolke im LAS-Format,
- Ensemble-Daten / Baudenkmal-Daten des Bayerischen Denkmal-Atlas im SHP-Format,
- Aus Denkmalschutz-Gründen wichtige Stadtbausteine in SHP-Format.

Methodischer Ansatz

Die denkmalpflegerische Bewertung erfolgt durch die Integration amtlicher Denkmallisten und Schutzgebietsabgrenzungen. Zusätzlich können Sichtfeldanalysen durchgeführt werden, um zu prüfen, inwieweit PV-Anlagen auf historisch sensible Sichtachsen einwirken würden.

Für die Erstellung des Solarrahmenplans zur Klassifikation von Gebäudedächern im Hinblick auf ihre Eignung für Photovoltaikanlagen wird ein mehrstufiges methodisches Vorgehen definiert. Ausgangspunkt bildet eine Grundlagenprüfung, in der die relevanten Rahmenbedingungen erfasst werden. Dazu zählen die Analyse rechtlicher Festsetzungen sowie des Schutzstatus der betroffenen

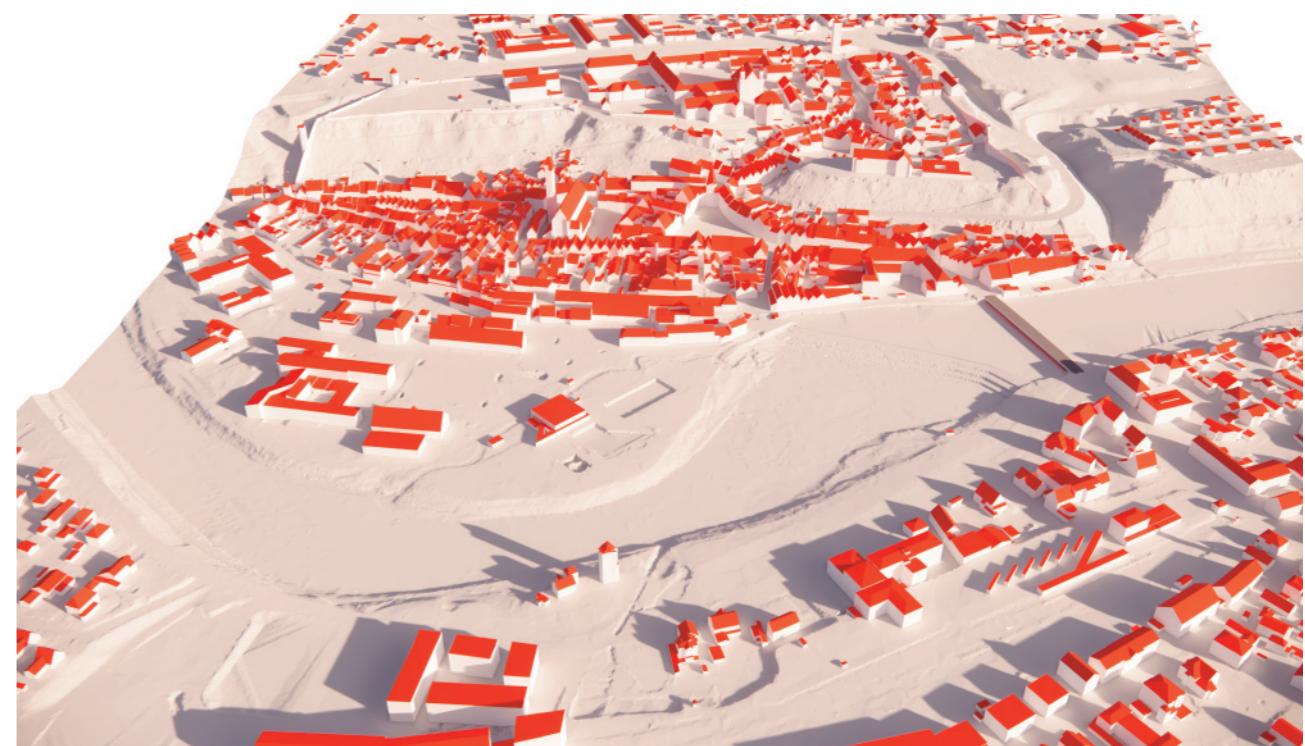


Abb. 1: LOD2-Modell, inklusive DGM1 der Stadt Landsberg Lech mit offener Datengrundlage der bayerischen Vermessungsverwaltung

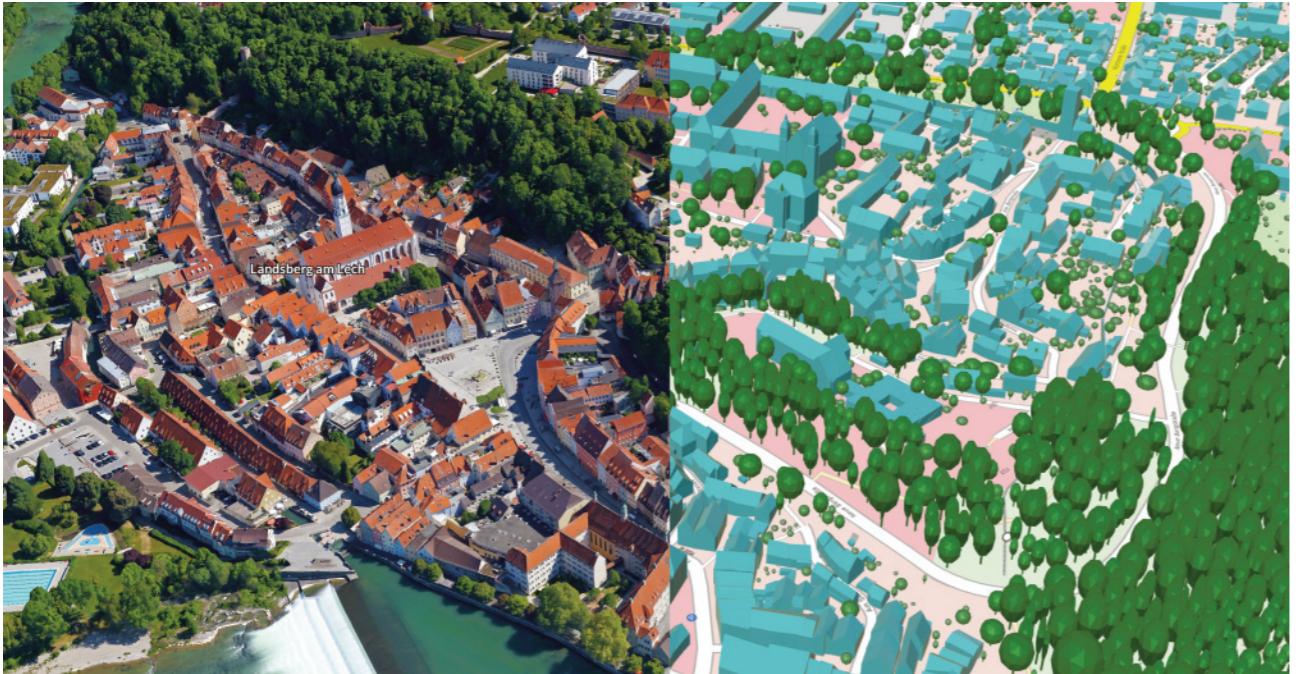


Abb. 2: Ausschnitt aus dem TwinCity3D-Client mit dem CityGML-LOD2-Modell auf der rechten und dem kongruenten texturierten Mesh-Modell aus den Befliegungsdaten auf der linken Seite

Denkmäler, die Bewertung der Dachneigung und -ausrichtung sowie eine Sichtbarkeitsprüfung. Letztere dient der Feststellung, ob Dachfarbe und -form im Umkreis von 800 beziehungsweise 400 Metern wahrnehmbar ist und was für die Integration von PV-Modulen von besonderer Bedeutung ist.

Auf dieser Basis erfolgt die Kategorisierung der Gebäude. Hierbei spielen sowohl der denkmalpflegerische Schutzstatus – also die Unterscheidung zwischen Ensemble- und Einzeldenkmalschutz – als auch die Ergebnisse der Solarpotenzialanalyse und der Sichtbarkeitsprüfung eine Rolle. Entsprechend werden die Dachflächen, in manchen Fällen sogar einzelne Teildachflächen, in vier Kategorien eingeordnet, die von „individuelle Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege erforderlich“ (Kategorie 0) über „höchste Anforderungen“ (Kategorie 1) bis „geringe Anforderungen“ (Kategorie 3) reichen.

Darauf aufbauend wird eine Konfiguration der Photovoltaik-Module vorgeschlagen. Diese umfasst Empfehlungen zu Modulgrößen, Farben und Oberflächen, die eine optimale Nutzung der vorhandenen Flächen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der gestalterischen Anforderungen ermöglichen. Den Abschluss bildet ein Gestaltungsvorschlag, der als eine Art „Fliesenpiegel Solar“ in den digitalen Zwilling integriert wird. Auf diese

Weise können die verschiedenen Varianten unmittelbar auf den Dachflächen visualisiert und ihre Wirkung im Stadtbild überprüft werden.

Ein zentraler Aspekt der Gestaltungsplanung ist die Sichtbarkeitsprüfung, besonders im Denkmalschutz. Methoden wie „Line of Sight“ in 3D-Stadtmodellen¹⁴ oder Isovist-Technologien¹⁵ ermöglichen die Berechnung von Sichtachsen. Eine einfache Klassifikation erfolgt über Radiusberechnungen um historische Beobachtungspunkte, stößt jedoch bei stark einsehbaren Ensembles an Grenzen. Abb. 3 zeigt 2D-Radien und Lichtsimulationen mit Nah-, Fern- und Kombibereichen. Ein innovativer Ansatz nutzt Flächenlichter: Durch Anheben des Straßenraumpolygons und der Lichtquellen werden einsehbare Dachflächen simuliert. Schattenbereiche gelten als PV-Potenzialflächen ohne Gestaltungsbedarf.

Ein wesentliches Innovationspotenzial liegt in der Kombination dieser Analysen mit KI-gestützten Verfahren: Maschinelles Lernen könnte in Zukunft genutzt werden, um Dachtypen automatisch zu klassifizieren, Gestaltungsrichtlinien zu operationalisieren oder Konfliktfälle zu identifizieren.

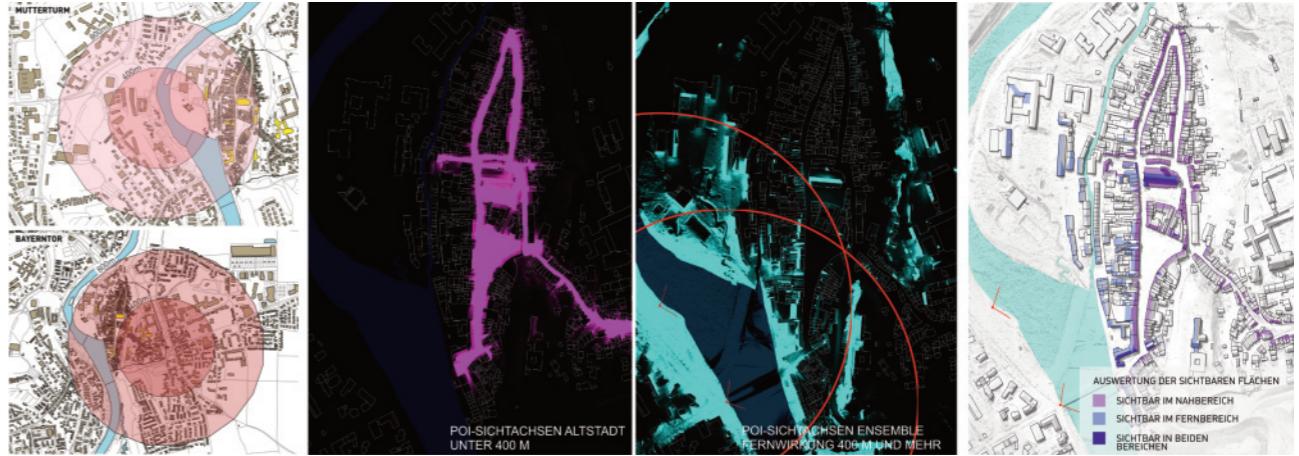


Abb. 3: Berechnung der sichtbaren Bereiche mithilfe von 2D-Radien um einen bestimmten Beobachtungspunkt (links) und mithilfe von Lichtberechnungen in den rechten drei Bildern, inklusive der Sichtbarkeitsklassifikation in Nah-, Fern- und kombinierter Nah-und-Fernbereich

Varianten der Weiterentwicklung des Solarrahmenplans

Wie im vorigen Kapitel angesprochen, wurden teilweise Dachflächen mit verschiedenen Kategorien aufgrund der Sichtbarkeiten belegt. Aus Sicht der Festsetzung in einem Plan und zur Vereinheitlichung ETCC wurde hier nochmals Wert auf eine klare Kategoriezuweisung gelegt. Insbesondere bei Dachflächen, die sowohl aus der Nähe als auch aus größerer Entfernung einsehbar sind und deren Teilstücken daher unterschiedlichen Kategorisierungen unterliegen, würde eine unmittelbare Übertragung dieser Klassifizierung in die Praxis dazu führen, dass verschiedene Dachsegmente mit unterschiedlichen Systemen belegt werden. Eine derartige Teileigabe – etwa durch den Einsatz einer Indach-Anlage in den visuell dominanten Nahwirkungsbereichen und einer farblich angepassten Aufdach-Anlage in den aus der Ferne wahrnehmbaren Bereichen – wäre jedoch aus planerischer und technischer Sicht mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden. Darüber hinaus ist ein Systemwechsel auf einer Dachfläche nicht als denkmalverträglich einzustufen, sofern die Systeme gemeinsam in der Fernwirkung wahrzunehmen sind. Ziel ist eine homogene und visuell ruhige Belegung der Dachflächen, z.B. in Form einer zusammenhängenden, rechteckigen Modulfläche pro Dachseite unter Verwendung eines einheitlichen Systems.

Durch die Analyse des Flächenpotenzials je Dach und Kategorie lässt sich bereits eine praktikable Lösung für die Belegung ableiten. In der praktischen Umsetzung wird aus Gründen der Komplexitätsreduktion und der Wirtschaftlichkeit

bei ausreichendem Flächenangebot im Fernwirkungsbereich in der Regel auf den Einsatz von Indach-Systemen verzichtet, sodass lediglich die entsprechenden Teilstücken im Fernwirkungsbereich belegt werden (vgl. Abb. 4).

Im Rahmen der Analyse wurden daher die abgeleiteten Kategorien auf den Teildachflächen gemäß den flächenstatistischen Anteilen ausgewertet. Um eine sinnvolle und wirtschaftlich vertretbare Belegung von Teildachflächen sicherzustellen, wurde jeweils ausgewertet, welche Gestaltungskategorie die Teildachfläche anteilig mit dem höchsten Prozentsatz repräsentiert. So wird sicher gestellt, dass der Solarrahmenplan bereits eine optimierte Balance zwischen technischer Umsetzbarkeit, Ertragssteigerung und Wirtschaftlichkeit aufzeigt und somit eine gezielte Ausweisung geeigneter Potenzialflächen ermöglicht.

Diskussion

Die Verbindung von Klimaschutz und Denkmalschutz erfordert neue Planungsansätze, die beide Belange integrieren, anstatt sie gegeneinander auszuspielen. Der geodatenbasierte Solarrahmenplan ist hierfür ein geeignetes Instrument, da er Konfliktlagen sichtbar macht, Alternativen aufzeigt und die Entscheidungsfindung auf eine transparente Basis stellt. Die Analysemethodik trägt dazu bei, eine objektive Beurteilungsbasis für bisher subjektiv empfundene räumliche Situationen zu schaffen. Dem Gleichbehandlungsgrundsatz als zentralem Bestandteil des Verwaltungshandelns wird bei jedem Schritt der geodatenbasierten Auswertung Rechnung getragen.

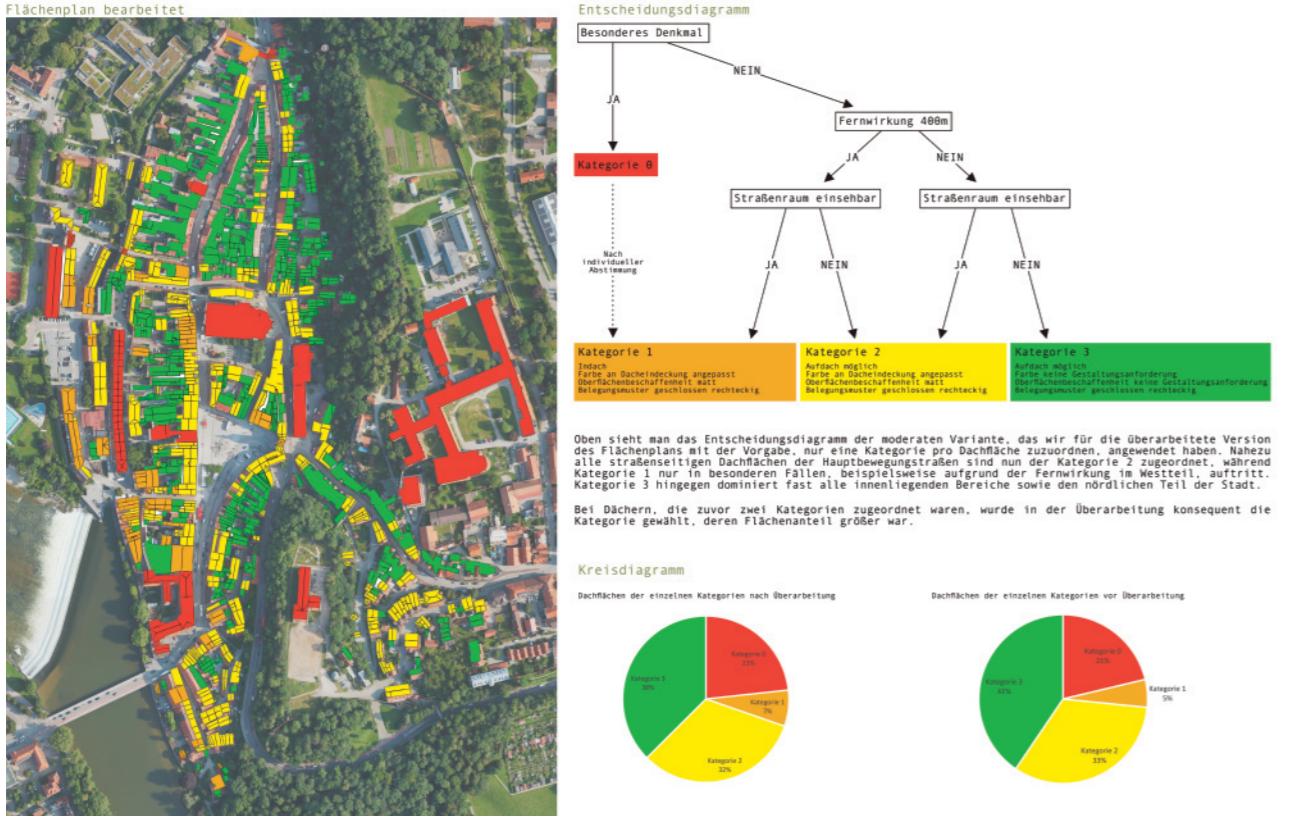


Abb. 4: Auswertung der Teildachflächen nach den Gestaltungsanforderungen „Eine Anlagenart je Teildachfläche zulässig“ sowie „Die Gesamtanlage soll eine geschlossene rechteckige Form aufweisen“ und der resultierenden flächenstatistischen Auswertung und Verschiebung der Gestaltungskategorie-Anteile

Gleichzeitig bestehen Herausforderungen:

- Datenqualität und -verfügbarkeit sind nicht in allen Kommunen gegeben.
- Datenhandling ist noch vielfach nicht erprobt. Austausch der Daten ist momentan nur über kostenintensive Schnittstellen möglich.
- Rechtliche Verbindlichkeit: Der Rahmenplan ist bisher vor allem ein informelles Instrument.
- Akzeptanz: Sowohl Eigentümer als auch Denkmalbehörden müssen Vertrauen in die Methodik entwickeln.

Die Integration von KI eröffnet neue Möglichkeiten, birgt aber auch Fragen hinsichtlich Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Verantwortung.

Ausblick

Der vorgestellte Ansatz zeigt, wie Geodaten und KI in der Stadtplanung eingesetzt werden können, um Klimaschutzziele und Denkmalpflege in Einklang zu bringen. In der Weiterentwicklung gilt es, die Verfahren zu standardisieren und ihre Anwendung in unterschiedlichen kommunalen Kontexten zu erproben und rechtlich-administrativ zu veran-

kern. Zudem eröffnet die Verknüpfung mit Beteiligungsplattformen neue Perspektiven: Bürgerinnen und Bürger könnten über interaktive Karten eigene Potenziale prüfen und Feedback geben. Dies steigert Transparenz und Akzeptanz und macht den Solarrahmenplan zu einem lebendigen Instrument der kommunalen Energiewende.

Literatur

- Michael BATTY, Digital Twins, in: Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science 45, 2018, S. 817–820.
- Bayerisches Denkmalschutzgesetz (BayDSchG), Art. 6 Maßnahmen an Baudenkmälern, 2023, online verfügbar unter: <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayDSchG-6> (Zugegriffen: 13. Januar 2025).
- Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Das Kommunale Denkmalkonzept – Den historischen Ortskern gemeinsam gestalten und entwickeln, Denkmalpflege Themen, München 2017.
- Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, Änderungen im Denkmalschutz (FAQs), 2023, online verfügbar unter: <https://www.stmwk.bayern.de/kunst-und-kultur/denkmalsschutz/aenderungen-im-denkmalsschutz-faqs.html> (Zugegriffen: 11. Februar 2025).
- Daniel BROSCHART / Marina FISCHER / Juilson JUBANSKI / Florian SIEGERT, Luftbildaufnahmen, KI-Algorithmen und ein 3D-Mesh-Modell – wie im MFUND-Forschungsprojekt

„TwinCity3D“ in Landsberg am Lech ein „Smart City“-Ansatz für Klein- und Mittelstädte entwickelt wird, in: gis.Science – Die Zeitschrift für Geoinformatik 2024, S. 19–26.

Michael GRIEVES, Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, White Paper 1, 2014, S. 1–7.

Delphine HOLZWARTH, Isabelle NÜRGE und Julia WILKE, Urbane Digitale Zwillinge als Planungsgrundlage für Solarpotenziale und Denkmalschutz (Stegreif-Entwürfe an der Professur Stadtquartiersplanung) [Stegreif], KIT | STQP <https://stqp.iesl.kit.edu/1711.php> (Zugegriffen: 11. November 2025).

Thomas KOLBE / Andreas DONAUBAUER, Semantic 3D City Modeling and BIM, in: Michael F. Goodchild / Michael Batty / Mei-Po Kwan / Anshu Zhang / Wenzhong Shi (Hrsg.), Urban Informatics, Singapore 2021, S. 609–636.

Chris LONERGAN / Nick HEDLEY, Unpacking Isovists: a Framework for 3D Spatial Visibility Analysis, in: Cartography and Geographic Information Science 43, 2016, S. 87–102.

Peter ZEILE / Daniel BROSCHART / Sabrina SOMMER / Judith SANDMEIER / Franziska HAAS, Digitaler Zwilling x Denkmalschutz – ein neuer Ansatz zur Vorbereitung eines Solarrahmenplans für eine denkmalgeschützte Altstadt, in: URBAN INNOVATION: TO BOLDLY GO WHERE NO CITIES HAVE GONE BEFORE. Medium-sized Cities and Towns as a Major Arena of Global Urbanisation. Proceedings of REAL CORP 2025, 30th International Conference on Urban Development, Regional Planning and Information Society, Wien 2025, S. 325–333.

Until now, the development of a solar framework plan required intensive on-site inspections and assessments. Using the example of the old town of Landsberg am Lech, this article presents a new geodata-based approach that focuses on the analysis of sightlines and the identification of sensitive areas. Through the use of the prototypical Urban Digital Twin (UDZ) and freely available geodata, individual steps can be partially automated. The article provides methodological approaches, key findings and an outlook on implementation.

Bildnachweise

- Abb. 1: Broschart / Sommer / Zeile
 Abb. 2: 3D RealityMaps 2024
 Abb. 3: Bürkle & Bauder 2025, Herm & Benkeser 2025, in: Zeile et al., Digitaler Zwilling x Denkmalschutz, 2025
 Abb. 4: HOLZWARTH, NÜRGE, WILKE, Urbane Digitale Zwillinge, 2025

1 Der Beitrag orientiert sich an Zeile et al., Digitaler Zwilling x Denkmalschutz, 2025, S. 325 und stellt eine verkürzte und adaptierte Version dar.

2 BATTY, Digital Twins, 2018, S. 817–820.

3 Bayerisches Denkmalschutzgesetz, Maßnahmen an Baudenkmälern, 2023.

4 Ebd.

5 Ebd.

6 Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Kommunales Denkmalkonzept, 2017 und Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, Änderungen im Denkmalschutz, 2023.

7 Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Kommunales Denkmalkonzept, 2017.

8 Ebd.

9 Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Kommunales Denkmalkonzept, 2017.

10 ZEILE et al., Digitaler Zwilling x Denkmalschutz, 2025, S. 325.

11 BROSCHART, FISCHER et al., TwinCity3D, 2024, S. 19.

12 Z.B bei Bayerische Vermessungsverwaltung, 3D-Gebäude-Modelle, 2025.

13 ZEILE / BROSCHART et al., Digitaler Zwilling x Denkmalschutz, 2025, S. 325.

14 KOLBE / DONAUBAUER, Semantic 3D City Modeling, 2021, S. 610.

15 LONERGAN / HEDLEY, Unpacking Isovists, 2016, S. 87.

Abstract

A New Geodata-based Approach to Developing a Solar Framework Plan

Thanks to an amendment to the Bavarian Monument Protection Act, it is now possible to protect monuments and promote renewable energies in the field of monument preservation. Article 6 (2) BayDSchG allows owners of historic buildings to use renewable energies, provided that there are no overriding reasons for monument protection. In order to further develop the roof landscape as a ‘fifth façade’, the focus is on monument-compatible energy supply that combines monument protection and climate protection.

A solar framework plan is a planning tool for municipalities with historic buildings that defines the potential and design requirements for renewable energies. It is based on an analysis of visibility, historical spatial qualities and design criteria. The aim is to create transparency and support decision-making.

Simon Kunz, Christian Dominic Fehling

Erstellung Digitaler Zwillinge industrieller Kulturgüter mittels 3D Gaussian Splatting

Einleitung

Die Digitalisierung des kulturellen Erbes stellt eine zentrale Herausforderung für Museen und Denkmalpflege dar, weil viele Objekte komplex, empfindlich oder schwer zugänglich sind. In diesem Kontext erschließt digitale Erfassung einen Weg, das „Objekt“ virtuell zum Publikum zu bringen, indem es in virtuelle Räume übertragen wird, ohne physische Präsenz zu benötigen. Für die Forschung, Restaurierung und Dokumentation entstehen damit stabile Datenplattformen für Vergleich, Langzeitvergleich und virtuelle Zugänglichkeit. 3D-Modelle ermöglichen die Dokumentation von Befunden und Kontexten und machen diese für Analyse, Vermittlung und Langzeitarchivierung nutzbar.

Motivation

Industrielle Kulturgüter bilden in dieser Landschaft ein besonders anspruchsvolles Einsatzfeld. Ihre Formen sind oft geometrisch komplex, ihre Oberflächen vielfältig beschaffen, und ihre Dimensionen können von kleinen Bauteilen bis zu großen Anlagen reichen. Solche Motive stellen hohe Anforderungen an klassische Arbeitsweisen wie Photogrammetrie oder Laserscanning, enthalten häufig arbeitsintensive manuelle Prozesse, und es werden Ergebnisse produziert, die oft langwierig aufbereitet werden müssen, um z. B. in Webanwendungen eingesetzt zu werden. In vielen Sammlungen wie im Montanhistorischen Dokumentationszentrum montan.dok des Deutschen Bergbau-Museums Bochum bleiben viele Bestände unsichtbar.¹ Seit etwa 2020 wird dort verstärkt 3D-Digitalisierung eingesetzt, um auch diese verborgenen gehaltenen Objekte sichtbar und zugänglich zu machen.

Vor diesem Hintergrund setzt das Projekt Just Scan It 3D an.² Gemeinsam arbeiten die Bergische Universität Wuppertal, das Deutsche Bergbau-Museum Bochum, die schnaq GmbH und die ControlExpert GmbH daran, einen anwender-

freundlichen KI-gestützten Workflow zu schaffen, der auf 3D Gaussian Splatting (3DGS) basiert. Ziel ist es, mit handelsüblichen Smartphones, Kameras oder Drohnen automatisierte und präzise 3D-Rekonstruktionen zu erzeugen, die aufwändige manuelle Nachbearbeitungen minimieren. Die Methode soll für Fachleute und Laien gleichermaßen nutzbar sein und Rückmeldung zur Abdeckung und Bildqualität in Echtzeit geben.

Dieser Beitrag verfolgt vier zentrale Ziele: erstens die Motivlage für digitale Verfahren in der Denkmalpflege und die spezifischen Herausforderungen der Industriekultur zu verdeutlichen, zweitens den technologischen Ansatz von Just Scan It 3D und 3DGS zu erläutern, drittens anhand von Fallstudien aus dem DBM aufzuzeigen, wie 3DGS im Museumsumfeld wirkt und welche Grenzen und Chancen bestehen. Schließlich werden im Beitrag die Potenziale von 3DGS für den musealen Kontext und die Denkmalpflege diskutiert.

Herausforderungen bei der Digitalisierung von Kulturgütern

Die Einordnung von industriellen Kulturgütern in den digitalen Raum bringt nicht nur technologische Möglichkeiten, sondern auch tiefgreifende Herausforderungen mit sich. Folgende Problemfelder zeigen sich wiederholt in der Praxis:

Heterogenität der Objekte

Kulturgüter unterscheiden sich stark in Form, Material und Maßstab. Ob Gusseisen, Porzellan oder komplexe Maschinenbauteile, jedes Material stellt eigene Anforderungen an Beleuchtung, Reflexion und Detailauflösung. Klassische Verfahren wie Photogrammetrie oder Laserscanning stoßen dabei insbesondere bei reflektierenden, transparenten oder filigranen Objekten an Grenzen. Bei großmaßstäbigen Szenen entstehen zudem Probleme durch eingeschränkte Sichtlinien und unvollständige Abdeckung.

Fehlende CAD / BIM-Daten

Viele Bestände verfügen über keine oder nur fragmentarische digitale Pläne. Besonders bei historischen oder industriellen Objekten erschweren fehlende oder ungenaue Daten die Rücküberführung in BIM-Strukturen. Im Bereich des Historic Building Information Modelling (HBIM) fehlen zudem standardisierte Prozesse zur Integration historischer Quellen und Geometrien.

Limitierte Zugänglichkeit

Zahlreiche Kulturgüter sind schwer erreichbar oder aus konservatorischen Gründen nicht begehbar. Gerüste und Hebebühnen sind kostenintensiv und Drohnenaufnahmen oft genehmigungspflichtig. In Krisenregionen oder bei gefährdeten Stätten, etwa im Projekt „Scanning for Syria“,³ wurden alternative Verfahren genutzt, etwa das Gießen von Abformungen zur späteren 3D-Rekonstruktion. Unter dem Hashtag #SaveUkraineHeritage bündeln Initiativen in der Ukraine die Notfalldokumentation gefährdeter Stätten, u. a. durch verteilte 3D-Erfassung, standardisierte Metadaten und sichere, redundante Speicherung außerhalb von Gefahrenzonen.⁴ Die Rechtslage zu Bild- und Digitalisat-Nutzungsrechten spielt ebenfalls eine Rolle bei der Veröffentlichung und Nutzung von Modellen (z. B. Museumsrechte, Urheberrechte).

Herausforderungen konventioneller 3D-Methoden

Photogrammetrie erfordert zahlreiche manuelle Arbeitsschritte von der Bildauswahl und Maskierung bis zur Netz- und Texturerstellung. Diese Pro-

zesse sind zeitintensiv, fehleranfällig und setzen Fachwissen voraus. Besonders reflektierende oder transparente Materialien führen häufig zu Qualitätsverlusten. Der hohe Schulungs- und Nachbearbeitungsaufwand begrenzt die Effizienz und Skalierbarkeit klassischer 3D-Erfassungen.

Methodik: 3D Gaussian Splatting als KI-basierte Rekonstruktionsmethode

3D Gaussian Splatting (3DGS) stellt eine punktbasierte Darstellung dar, bei der ein Motiv durch eine große Anzahl von 3D-Gaussian-Primitiven (einfache Gauss-Funktionen mit Position, Kovarianz, Dichte und Farbe) modelliert wird, die häufig ellipsoid sind. Im Gegensatz zu klassischen, aus Polygonnetzen bestehenden 3D-Modellen werden diese Gaussians (die namensgebenden „Splats“ der Methode) während der Rekonstruktion kontinuierlich mit den Eingabebildern verglichen und deren Parameter optimiert. So entsteht eine dichte Wolke aus zahlreichen Splats, die die aufgezeichnete Szene kontinuierlich beschreibt, inklusive blickrichtungsabhängiger Farb- und Reflektions-eigenschaften. Es entsteht eine robuste Visualisie- rung, die auch solche visuellen Eigenschaften wiedergibt, die sich mit konventionellen Verfahren nicht erfassen lassen. Die Erstellung konventioneller Polygonnetze ist hierbei nicht notwendig, da 3DGS-Szenen problemlos auf mobilen Endgeräten, im Browser, in nativen Anwendungen oder in immersiven Medien wiedergegeben werden können (Abb. 1).

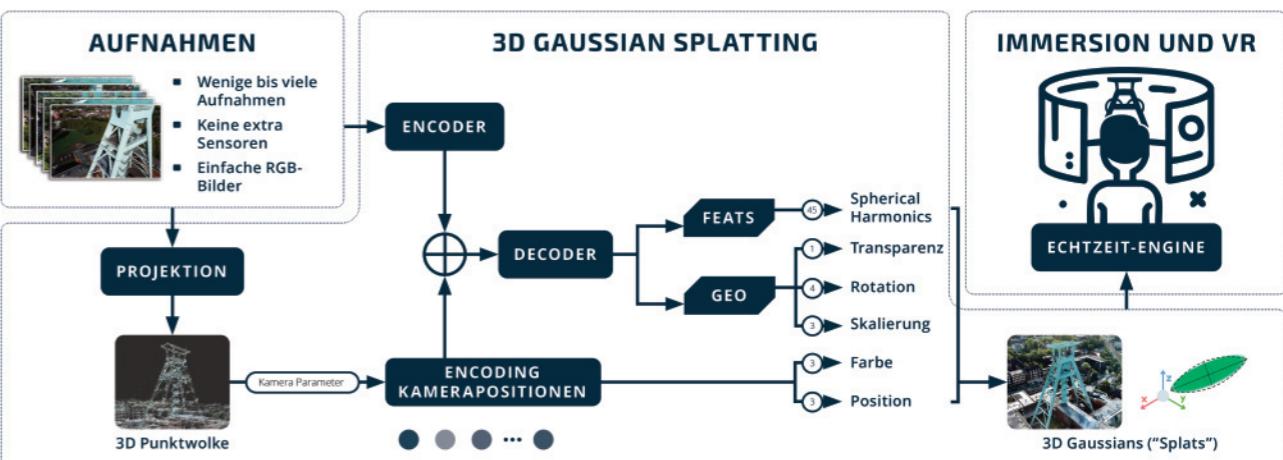


Abb. 1: Workflow der 3D-Rekonstruktion mittels 3DGS von der Aufnahme bis zur Wiedergabe in Virtual Reality, eigene Darstellung

Erstellung von 3D-Rekonstruktionen

mit 3D Gaussian Splatting

Die Erzeugung eines digitalen Zwillings mittels 3D Gaussian Splatting (3DGS) folgt einem mehrstufigen Prozess, der von der Bildaufnahme bis zur immersiven Darstellung in Echtzeit reicht. Die Methode nutzt ausschließlich RGB-Bilder, die aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen wurden, und rekonstruiert daraus ein fotorealistisches, volumetrisches Modell.

Aufnahmen

Am Beginn stehen fotografische Aufnahmen des Objekts oder der Szene, aufgenommen mit handelsüblichen Kameras, Smartphones oder Drohnen. Die Besonderheit von 3DGS besteht darin, dass keine speziellen Sensoren oder Tiefendaten benötigt werden: Einfache RGB-Bilder reichen aus, um die Szene später in 3D zu rekonstruieren.

Für die Aufnahmen sollten, wenn möglich, alle Parameter fixiert werden: Brennweite bzw. Zoom bleiben während des gesamten Scans konstant; die Blende wird für große Schärfentiefe auf etwa f/8 bis f/16 eingestellt, sodass auch der Hintergrund scharf ist; die Belichtung wird ausschließlich über Zeit und ISO geregelt (ISO möglichst niedrig), außerdem sollten Belichtung und Weißabgleich fixiert und der Fokus nach Möglichkeit manuell gesetzt oder gesperrt werden. Eine ausreichende Bildüberlappung von idealerweise 70 Prozent, mindestens jedoch 30 Prozent, ist entscheidend. Es sind Film- oder Einzelaufnahmen möglich; bei Filmsequenzen ist eine langsame, erschütterungsarme Kameraführung wichtig, um Bewegungsunschärfe zu vermeiden. In beiden Fällen sollten Übersichts- und Detailaufnahmen kombiniert werden. Geeignete Scan-Pfade sind etwa Kleeblatt-Muster oder konzentrisch kleiner werdende Kreise; je nach Objektgröße empfiehlt es sich, den Pfad in mehreren Höhen mit variierenden Neigungswinkeln zu wiederholen. Der Unterschied zwischen aufeinanderfolgenden Neigungswinkeln sollte höchstens 30 Grad betragen; größere Sprünge können eine manuelle Nachjustierung der Ausrichtung (Alignment) erforderlich machen.

3D Gaussian Splatting

Aus den Bilddaten werden zunächst die Kamera-parameter berechnet (Position, Orientierung, Brennweite). Dies geschieht typischerweise mit Verfahren der Structure-from-Motion (SfM), z. B. über Tools wie COLMAP oder RealityScan. Anschließend wird eine initiale grobe 3D-Punktfolke erzeugt, die die initiale Position der Splats vorgibt und somit das Training beschleunigt. Diese Punktfolke enthält die räumliche Struktur der Szene, allerdings neben der Position einzelner Punkte nur deren Farbwerte.

Ausgehend von der initialen Punktfolke werden in dieser Phase zahlreiche Splats erzeugt, die neben Position und Farbe zusätzliche Parameter wie Größe, Form, Transparenz, Orientierung und blickrichtungsabhängige Variablen enthalten. Der KI-basierte Trainingsansatz folgt nun dem Encoder-Decoder-Prinzip:

- Der Encoder verarbeitet die Eingabebilder und die Kameraparameter zu einem Merkmalsraum (Features), der geometrische und radiometrische Informationen der Szene enthält.
- Der Decoder nutzt diese Merkmale, um die Parameter der Gaussians iterativ anzupassen, die Rekonstruktion also so zu optimieren.

Das Ziel dieser Optimierung ist, dass ein synthetisch gerendertes Bild aus denselben Kamerapositionen möglichst genau den Originalaufnahmen entspricht. Dieses Verfahren nennt man rückprojektionsbasierte Differenzoptimierung: Das Modell wird so lange angepasst, bis der Unterschied zwischen berechneten und echten Bildern minimiert ist oder ein vorab definiertes Limit an Optimierungsschritten erreicht ist. Das Ergebnis ist kein klassisches Netz aus Dreiecken, sondern eine dichte „Wolke“ aus Splats mit kontinuierlichen Übergängen, die Licht, Farbe und Transparenz realistisch wiedergibt. Nach der Optimierung können einzelne Gaussians gefiltert, komprimiert oder farblich korrigiert werden.

Bereitstellung und Visualisierung

Tools wie Supersplat oder SplatTransform erlauben es, Modelle zu bearbeiten, Metadaten zu integrieren oder für Web- und XR-Anwendungen zu exportieren. Die resultierenden Rekonstruktionen lassen sich in Entwicklungsumgebungen, in Web-

viewer und in eigene Produkte einbinden. Das Anwendungsspektrum kann aufgrund der Echtzeitfähigkeit der resultierenden Daten von Visualisierungen über HBIM und Monitoring bis zu immersiven Virtual Reality Anwendungen reichen, in denen Anwender*innen die digitalisierten Denkmäler begehen, untersuchen und vergleichen können.

Anforderungen an Hardware und Rechenleistung

Die Berechnung von 3DGS-Modellen stellt Anforderungen an Rechenleistung und Speicher, die vergleichbar zu konventionellen Verfahren wie Photogrammetrie sind. Im Projekt Just Scan It 3D erfolgt das Training typischerweise auf GPU-Workstations mit mindestens 24 GB VRAM (z. B. NVIDIA RTX 4090 oder A6000). Die aktuellen Zwischenergebnisse aus dem Projekt zeigen, dass sich die Verarbeitungszeit von Rohdaten zu einem interaktiven 3DGS-Modell, abhängig von Datensatzgröße und GPU-Kapazität, auf wenige Stunden KI-Training reduziert. Damit wird ein zentraler Projektanspruch erfüllt: die Erstellung hochwertiger, immersiver 3D-Rekonstruktionen industrieller Kulturgüter mit minimalem manuellem Aufwand und hoher Reproduzierbarkeit.

Fallstudien aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum

Im Rahmen des Projekts Just Scan It 3D wurden in enger Kooperation zwischen den Projektpartnern und montan.dok exemplarische Fallstudien durchgeführt, um die Eignung von 3D Gaussian Splatting für die Digitalisierung industrieller Kulturgüter zu evaluieren. Ziel war es, anhand realer Objekte aus den Sammlungen des montan.dok den gesamten 3DGS-Prozess unter praxisnahen Bedingungen zu testen und zu dokumentieren.

Die Fallstudien konzentrieren sich auf zwei zentrale Aspekte: (1) die technische Umsetzbarkeit und Robustheit der 3DGS-Methode bei unterschiedlichen Aufnahmeszenarien und (2) das Potenzial für eine nachhaltige Integration in die Dokumentations- und Vermittlungspraxis des Museums. Durch die gezielte Auswahl von Objekten mit komplexen Geometrien, reflektierenden Materialien und konservatorischen Restriktionen konnten typische Problemfelder der Denkmal- und Museumsdigitalisierung systematisch adressiert werden.

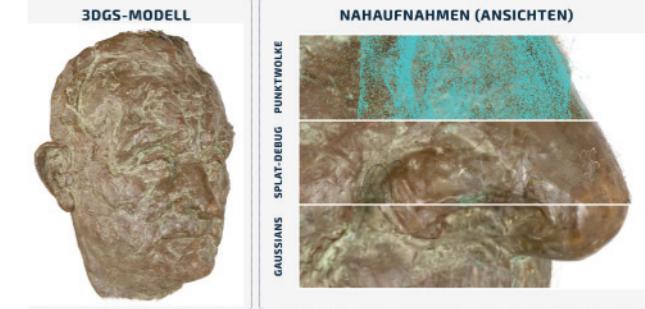


Abb. 2: Bronzefigur auf Natursteinsockel: Herbert Schelberger (1908–1980), Erfasser*in: Birgit Borchert (montan.dok, DBM), 3D-Rekonstruktion: Dominic Fehling (TMDT, BUW)

Die im Folgenden dargestellte Fallstudie veranschaulicht diesen Ansatz exemplarisch: Anhand der digitalisierten Bronzefigur auf Natursteinsockel „Herbert Schelberger (1908–1980)“, erfasst von Birgit Borchert (montan.dok, DBM) und rekonstruiert von Dominic Fehling (TMDT, BUW), wird der 3DGS-Workflow von der Punktfolke bis zum finalen Rendering nachvollzogen (Abb. 2).

In der in Abbildung 2 dargestellten Sequenz werden unterschiedliche Stufen des 3DGS-Workflows sichtbar:

- Die Punktfolke bildet die geometrische Basis der Erfassung.
- Der Splat-Debug-Modus zeigt die volumetrische Verteilung der Gaussians im Raum.
- Das finale 3DGS-Modell vermittelt eine photorealistische Darstellung, in der selbst kleinste Materialspuren, Patina und Oberflächenstruktur erkennbar bleiben.

Diese Darstellungsweise verdeutlicht, wie 3DGS im Vergleich zu konventionellen Polygonmodellen eine kontinuierliche, nahezu rauschfreie Oberfläche erzeugt.

Die folgenden Beispiele aus den Sammlungen des Deutschen Bergbau-Museums Bochum (Abb. 3) verdeutlichen die Unterschiede zwischen klassischen photogrammetrischen Verfahren und der 3D-Rekonstruktion mittels 3D Gaussian Splatting. Während konventionelle Methoden durch hohen manuellen Aufwand und materialabhängige Grenzen geprägt sind, zeigt sich 3DGS als effizientere und robustere Alternative, insbesondere bei schwierigen Oberflächen und heterogenen Materialien.

Objekt	Eigenschaft	Konventionelle Photogrammetrie	3D Gaussian Splatting	Erkenntnisse
Hüftgelenkprothese (Modell)	Titanlegierung, Kunstharz, teils transparente und spiegelnde Bereiche	<ul style="list-style-type: none"> • 164 Aufnahmen • Rekonstruktion nicht möglich • Tools: Agisoft Metashape & Artec Studio 	<ul style="list-style-type: none"> • 51 Aufnahmen • 20 Minuten KI-Berechnung (Vorschau) • Realistisch: 4 Stunden KI-Berechnung in voller Auflösung • Tools: Reality Scan & Brush 	<ul style="list-style-type: none"> • Photogrammetrie scheitert an Reflexionen und Transparenz • 3DGS ermöglicht Rekonstruktion
Kernfänger nach Zobel	Metall mit beweglichen Teilen, feine Bohrungen, glatte Oberflächen	<ul style="list-style-type: none"> • 257 Aufnahmen • 48 Arbeitsstunden • Tools: Agisoft Metashape & Artec Studio 	<ul style="list-style-type: none"> • 63 Aufnahmen • 10 Minuten KI-Berechnung • Realistisch: 4 Stunden KI-Berechnung in voller Auflösung • Tools: Reality Scan & Supersplat 	Konsistente Formrekonstruktion auch mit wenigen Bildern

Diese Vergleichsstudie zeigt, dass 3D Gaussian Splatting vor allem den manuellen Aufwand bei der digitalen Erfassung komplexer Objekte deutlich reduziert. Zwar bleibt der gesamte Verarbeitungsprozess abhängig von Datenmenge und Hardwareleistung, doch der Anteil an zeitintensiven Nachbearbeitungsschritten verringert sich erheblich. Gleichzeitig wird deutlich, dass photogrammetrische Verfahren insbesondere bei stark reflektierenden oder transparenten Materialien an ihre Grenzen stoßen, während 3DGS auch bei unvollständigen oder heterogenen Datensätzen robuste Ergebnisse liefert.



Abb. 3: Vorläufige 3DGS-Rekonstruktionen Kernfänger (oben) und Prothese (unten), Erfasser*in: Birgit Borchert (montan.dok, DBM), 3D-Rekonstruktion: Dominic Fehling (TMDT, BUW)

Übertragbarkeit und Mehrwert

Skalierbarkeit auf größere Szenen

Je nach örtlichen Gegebenheiten und verfügbarer Ausrüstung können prinzipiell auch große Denkmäler erfasst werden; bei Drohnenaufnahmen sind dabei Genehmigungen, UASGeozonen/Flugbeschränkungen, Wetter, Sichtflug (VLOS) und Sicherheitsabstände zu beachten.

Beispielhaft wurde das etwa neun Meter hohe Kriegerdenkmal Germania auf dem Karl-Marx-Platz in Witten mit einer Drohne (DJI FC3582, 7 mm Brennweite) aufgenommen (Abb. 4): Geflogen wurde auf konzentrischen Kreisen um das Denkmal in Höhenabständen von zwei Metern, mit Kameraneigungen von 0°, 30° und 60°; eine weitere Sequenz erfolgte als Nadir-Überflug direkt über dem Objekt. Insgesamt entstanden 167 Bilder, von denen mit Sharp Frames 95 Prozent (159 Aufnahmen) für die weitere Verarbeitung ausgewählt wurden. Anschließend wurde das Alignment in RealityScan (Feature Matching und Bundle Adjustment) durchgeführt und mit PostShot (Grundeinstellungen) das 3D-Modell berechnet. Die Nachbearbeitung erfolgte in Supersplat, insbesondere durch Freistellen des Denkmals und Entfernen schwiegender Splats. Der Gesamtaufwand lag bei etwa einer Stunde Dronenscan, rund vier Stunden Rechenzeit und 60 Minuten Vor- und Nachbearbeitung.



Abb. 4: Ausschnitt des Kriegerdenkmals Germania: Originalaufnahme mit Drohne (links) und finales 3D Modell (rechts), Erfassung und 3D-Rekonstruktion: Simon Kunz

Anwendungsfelder

Monitoring und Citizen Science profitieren von der inzidentellen Erfassung durch Besucher*innen, die ihre Aufnahmen für die fortlaufende Beobachtung des Objektzustands bereitstellen. Durch App-Integration mit Gamification-Ansätzen lassen sich Beiträge motivieren, standardisieren und qualitativ sichern; zugleich entstehen dichte, zeitlich gestaffelte Datensätze für die Auswertung. Digitale Zwillinge und virtuelle Ortsbegehungen erhöhen die Zugänglichkeit schwer erreichbarer Orte und ermöglichen risikofreie, ortsunabhängige Inspektionen. Sie unterstützen Planungsprozesse, Ausschreibungen und Restaurierungsentscheidungen, indem sie präzise Maße, Zustandsinformationen und Variantenvergleiche bereitstellen und so Kosten, Zeit und Eingriffsrisiken reduzieren.

Für Langzeitdokumentation und Frühwarnsysteme dienen wiederholte Erfassungen als belastbare Referenzreihen. Auf dieser Grundlage lassen sich nachhaltige Erhaltungsstrategien ableiten, die Ressourcen gezielt einsetzen, Eingriffe minimieren und den Schutzbedarf datenbasiert priorisieren.

Diskussion

Die vorgestellten Arbeiten verdeutlichen das Potenzial von 3D Gaussian Splatting (3DGS) als innovativen Ansatz zur Digitalisierung und Vermittlung von kulturellem Erbe. Ausgehend von den Herausforderungen klassischer 3D-Erfassungsverfahren, die insbesondere bei heterogenen Materialien, komplexen Geometrien und eingeschränkten Aufnahmebedingungen an ihre Grenzen stoßen, zeigt sich 3DGS als zukunftsweisende Ergänzung innerhalb bestehender Digitalisierungsstrategien.

Im Vergleich zu etablierten Verfahren wie Photogrammetrie oder Laserscanning überzeugt 3DGS durch seine Effizienz und Zugänglichkeit. Die Methode reduziert den manuellen Aufwand bei der Nachbearbeitung erheblich und erlaubt die Nutzung handelsüblicher Kameras oder Smartphones, ohne dass spezielle Messsysteme erforderlich sind. Dadurch sinken sowohl Kosten als auch Eintrittshürden für den Einsatz in Museen, Archiven und Forschungsinstitutionen.

3DGS liefert visuell konsistente und detaillierte Ergebnisse, die sich für Dokumentation,

Visualisierung und Vermittlung gleichermaßen eignen. Dennoch sind Grenzen und offene Fragen zu erkennen. Da 3DGS keine geschlossene Oberfläche im geometrischen Sinne erzeugt, sondern Punktdarstellungen verwendet, ist die metrologische Genauigkeit bislang eingeschränkt. Zudem bestehen noch Defizite hinsichtlich der Standardisierung und Archivierung: Dateiformate sind bislang nicht in etablierte Metadaten- und Archivsysteme (z. B. CIDOC CRM, Europeana) integriert.

Langfristig liegt das Potenzial von 3DGS jedoch in seiner offenen und skalierbaren Struktur. Die Methode lässt sich nahtlos in bestehende Museums- und Forschungsinfrastrukturen einbinden, von Webviewern bis zu XR-Anwendungen, und unterstützt kollaborative oder partizipative Formen der Datenerhebung. Damit trägt sie nicht nur zur technischen Weiterentwicklung der 3D-Digitalisierung bei, sondern auch zu einer neuen Form der kulturellen Teilhabe.

Literatur

Bernhard KERBL et al., 3D Gaussian Splatting for Real-time Radiance-field Rendering, in: ACM Trans. Graph. 42.4 (2023), Artikel 139, S. 1–14.

Fabio REMONDINO, Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning, in: Remote Sensing 3.6 (2011), S. 1104–1138.

Abstract

Creation of Digital Twins of Industrial Cultural Assets Using 3D Gaussian Splatting

The digitisation of cultural heritage faces the challenge of capturing complex and often fragile objects efficiently, accurately, and with minimal resources. Industrial heritage in particular – with its wide range of materials, scales, and surface properties – places high demands on conventional 3D acquisition methods such as photogrammetry or laser scanning. Within the Just Scan It 3D project, the University of Wuppertal, the German Mining Museum Bochum, and the partners schnaq GmbH and ControlExpert GmbH are developing an innovative, AI-driven workflow based on the 3D Gaussian Splatting (3DGS) method.

This approach enables fully automated 3D reconstructions from photo and video data captured with standard cameras, smartphones, or

drones. It significantly reduces the effort required for data acquisition and post-processing while producing highly detailed, photorealistic models. These reconstructions are suitable for documentation, condition monitoring, and virtual presentation of industrial heritage.

Using case studies from the German Mining Museum Bochum, the paper demonstrates that 3DGS reduces manual processing steps and makes it possible to digitise materials that are difficult to capture with conventional techniques. Finally, the transferability of the approach to monuments is discussed in the context of monitoring and citizen science.

1 Siehe hierzu <https://www.bergbaumuseum.de/news-detaileseite/3d-digitalisierung-im-montandok>.

2 www.just-scan-it.de.

3 Siehe hierzu <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/archaeology/scanning-for-syria>.

3 Siehe als Beispiel hierzu: <https://poly.cam/ukraine>, <https://skeiron.com.ua/en>, <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-software/backup-ukraine-3d-scanning-kulturgueter-ukraine-27854493/>.

4 KERBL et al., 3D Gaussian, 2023.

Erforschen – Erhalten – Präsentieren: der Einsatz Digitaler Zwillinge in der Denkmalpflege

Ebenen-Modell des digitalen Zwilling

Illustrated architecture pflegt seit seiner Gründung 2002 umfangreiche 3D-Datensätze für seine Kunden; der Begriff digitaler Zwilling war zu der Zeit in der Denkmalpflege noch unbekannt. Erst seit den 2010er-Jahren hat er sich nach und nach etabliert, ist aber bis heute unscharf definiert. Unsere Datensätze können näher als Fachschale oder Informationsebene hochauflösender 3D-Punktwolken des digitalen Zwilling charakterisiert werden. Im Zuge einer umfangreichen Denkmalsanierung werden an diese Daten von vielen Gewerken unterschiedliche Anforderungen gestellt. Die einzelnen Gewerke kann man unter den Begriffen „Erforschen, Erhalten, Präsentieren und Managen“ zusammenfassen. Im Gegensatz zur Industrie und zur Privatwirtschaft sind aber die öffentlichen Denkmaleigentümer sowie die Bau- und Denkmalämter meist nicht in der Lage, diese Daten zu bearbeiten oder zu archivieren.

Basismodell – Feinmodell

Bei diesem Vorgehen handelt es sich um einen Multiscale-Multi Sensor-Ansatz zur Erstellung hochauflösender 3D-Modelle. Der Ansatz wurde von illustrated architecture und dem Institut für Robotik und Mechatronik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in enger Zusammenarbeit mit der Bayerischen Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen am Beispiel des Markgräflischen Opernhauses in Bayreuth entwickelt.

Für das Basismodell werden in Innenräumen farbige Laserscans in hoher Auflösung und Dichte aufgenommen. Dabei wird in der Regel eine 3D -Auflösung von drei Millimeter mittlerem Punktabstand angestrebt. Die Laserscans werden mit den üblichen Methoden des 3D-Scannens untereinander und gegebenenfalls auch auf Passpunkte der Ingenieurvermessung registriert. Für

die Modellverfeinerung werden dann Tausende bis einige 10.000 digitale fotogrammetrische Aufnahmen erstellt. Um Auflösungen im Bereich unter einem Millimeter zu ermöglichen, müssen diese Kameras meist über 40 MP oder mehr verfügen und mit entsprechend hochwertigen Objektiven ausgerüstet werden. In einem zweiten Gang der Registrierung werden dann alle Bilder und alle Scans in einer gemeinsamen Bündelausgleichung orientiert. Üblicherweise werden die Scans dazu in sechs Bilder einer synthetischen Kamera mit je 90° Öffnungswinkel umgeformt. Jedem farbigen Pixel der synthetischen Bilder ist der korrespondierende Tiefenwert hinterlegt, sodass für die Bündelausgleichung mehrere 100 Millionen bis einige Billionen Passpunkte-Koordinaten mäßig bekannt sind, die automatisiert aufgefunden werden. Die hohe Zahl der Passpunkte ermöglicht einen Ansatz mit bildinvarianten Kameras, sodass man Autofokus oder Zoomfunktionen der Kamera nutzen kann.

Danach erfolgt die Berechnung eines dichten Dreiecksfeldes. Bei großen Objekten können dabei wiederum mehrere 100 Millionen bis zu einigen Billionen 3D-Stützpunkte entstehen. Durch die vorgeschaltete Dreiecksvermaschung sind diese Punktwolken auch frei von Schwebungen, die durch kleinste Abweichungen in der Orientierung entstehen, und für die 3D-Punkte kann ein Mindestabstand vorgegeben werden, so dass eine homogene Punktwolke entsteht, die einem Voxel-feld ähnlich ist.

Alle Berechnungsschritte werden von uns mit dem Programmpaket RealityCapture durchgeführt und können auf Gaming-Rechnern oder auch Notebooks ausgeführt werden, da diese über entsprechend leistungsfähige Grafikkarten verfügen. Für die Weiterverarbeitung übertragen wir die Punktwolken auf den 3D-PointHub-Server von PointCloud Technology. Ausgedünnte oder geteilte

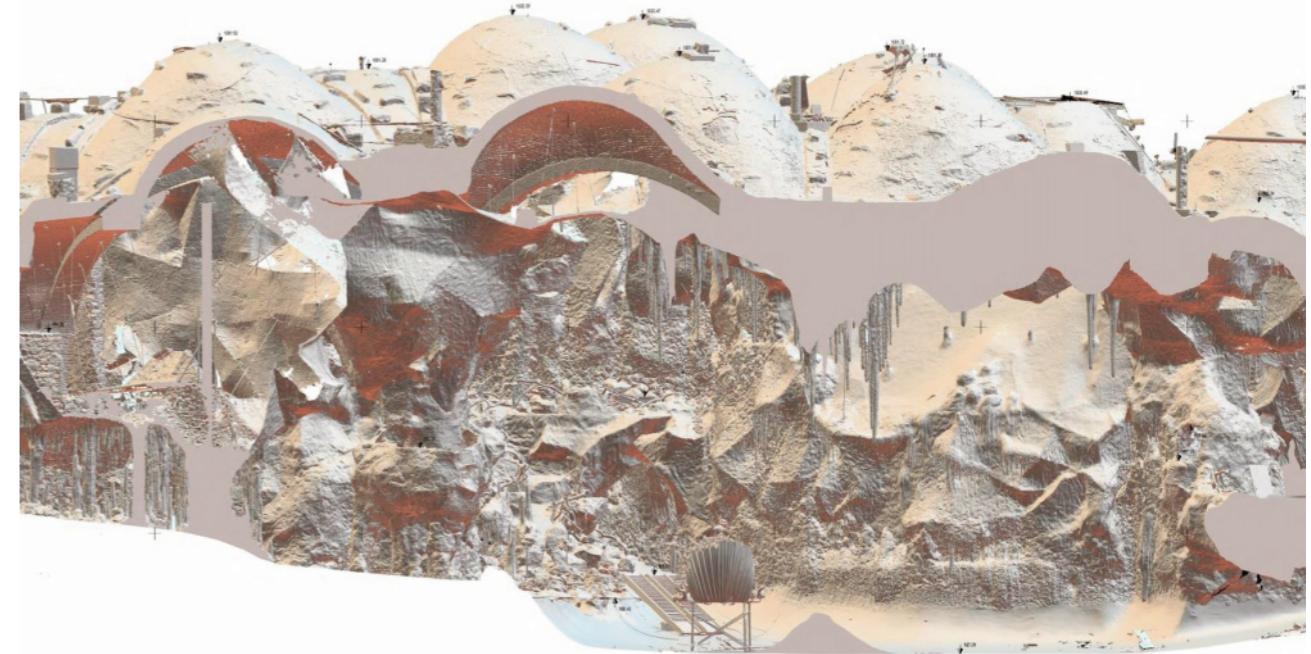


Abb. 1: CAD-Ausarbeitung eines Orthophotos für den Bauforscher

3D-Punktwolken können auch an alle gängigen CAD-Systeme übergeben werden. Für Offline-Visualisierungen müssen die Daten in der Regel auf zwei bis drei Prozent der Originaldaten und für Online-Visualisierungen auf Werte um 0,1% der Originaldaten reduziert werden.

Bei Drohnenbefliegungen wählt man unterschiedliche Abstände oder Höhen bei der Objektaufnahme. Aus den sich daraus ergebenden verschiedenen Bildmaßstäben kann eine homogene BA ohne Modellverbiegungen berechnet werden. Die weitere Auswertung erfolgt wie für die Innenräume beschrieben

Beispiele aus der Denkmalpflege, für die eine hohe 3D-Auflösung erforderlich ist
Für umfangreiche Restaurierungen oder Sanierungen im Denkmal sind nach wie vor verformungsgerechte Zeichnungen, wie sie von Eckstein bereits in den 1980er-Jahren definiert wurden, Stand der Technik. Die Zeichnungen werden meist durch Orthophotos z.B. von Fassaden ergänzt. Orthophotos können zuverlässig aus 3D-Punktwolken oder Modellen abgeleitet werden; für Zeichnungen in den höheren Stufen nach Eckstein ist allerdings immer der direkte Rückgriff auf die Original-Laserscans erforderlich.

Venusgrotte König Ludwig II. im Schlosspark Linderhof

Bei der Venusgrotte handelt sich es um eine künstliche Grotte aus dem späten 19. Jahrhundert, bei der eine Drahtputzschale in einen Gewölbekeller eingehängt ist. Ursprünglich waren die Gewölbe von außen mit Erde überdeckt, um einen möglichst natürlichen Eindruck der Grotte zu erzeugen. Allerdings wurde diese Konstruktion schon kurz nach der Fertigstellung 1877 undicht, was den Bau eines Notdachs erforderlich machte, das dann bis 2018 stand.

In der Venusgrotte konnten wir erstmals im Winter 2006 im Rahmen eines Projektes des DLR einige Laserscans aufnehmen. Mit der Unterstützung des Staatsbauamtes in Weilheim und der Bayerischen Schlösserverwaltung wurde dann im Winter 2007/2008 die gesamte Innenschale des Bauwerks mit 150 Laserscans aufgenommen. Dabei wurden je Scan 5000x10.000 oder 10.000x20.000 3D-Punkte mit einem ZF-Laserscanner erfasst, was einem mittleren Punktestand von drei Millimeter an der Gebäudemasse entspricht. Diese beiden Auflösungsstufen wurden bis heute beibehalten. Nach einer mehrjährigen Pause wurden dann während der Sanierungsarbeiten in allen Bereichen der Grotte ca. 1350 weitere Laserscans erstellt, wobei viele

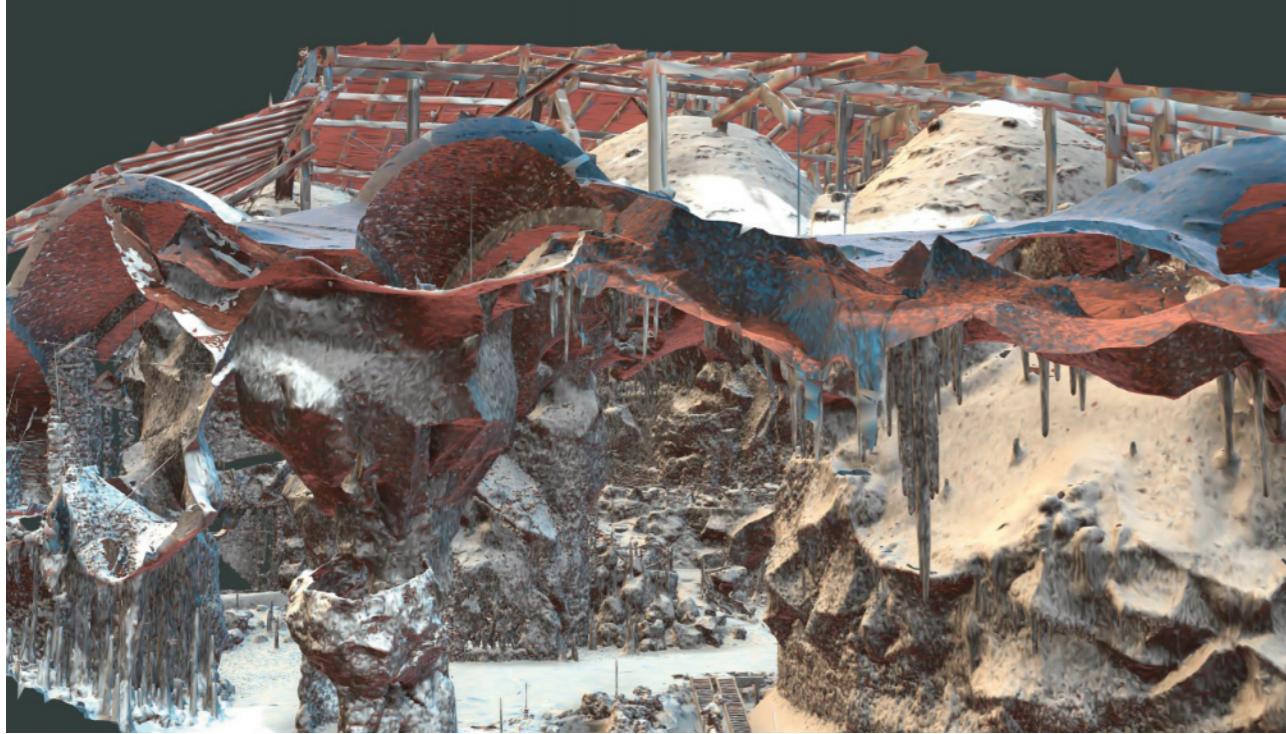


Abb. 2: Das dem Orthophoto hinterlegte 3D-Modell

Bauteile mehrfach in verschiedenen Bearbeitungszuständen erfasst wurden. Bis heute wurden im Projekt drei Generationen von Laserscannern der Firma ZF und ein System der Firma Faro eingesetzt. Die Registrierung der Scans erfolgte in den Softwarepaketen der Hersteller, wobei möglichst große Gruppen von Scans gebildet wurden. Jede Scangruppe wurde dann über fest im Bauwerk angebrachte Passmarken in das Gebäudekoordinatensystem überführt und an das Programm Paket RealityCapture übergeben.

Ab 2018 haben wir an besonders schwer zugänglichen Stellen zusätzlich zu den Laserscans einige Tausend photogrammetrische Aufnahmen erstellt. Seit dem ersten Corona-Ausbruch hat auch der Bauforscher Reinhold Winkler photogrammetrische Aufnahmen vor Ort erstellt und an uns zur Auswertung weitergeleitet.

Ausgewertet wurden Zeichnungen und Orthophotos für die Bauforschung, die Architekten, den Bauherrn, die Restauratoren und den Statiker. Für die Bauforschung wurde zudem die Kombination zwischen Orthophoto und 3D-Modell entwickelt (Abb. 1 und 2).

Hauptkirche St. Jacobi in Hamburg

Die Jacobikirche ist eine vier schiffige Hallenkirche der norddeutschen Backsteingotik. Die Kirche ist ca. 70 Meter lang und ca. 40 Meter breit, die Höhe im Mittelschiff beträgt ca. 21 Meter. Der Kirchturm ist über 120 Meter hoch. Im Zweiten Weltkrieg gab es umfangreiche Zerstörungen an der Kirche. Vom mittelalterlichen Kirchturm steht heute nur noch ein ca. 42m hoher Sockel, auf dem eine moderne Stahlbeton-Konstruktion bis zur ursprünglichen Höhe aufsitzt.

Zur Vorbereitung der Generalsanierung wurden verformungsgerechte Pläne 1:100/1:50 und Orthophotos aller Fassaden benötigt, wofür im Frühjahr 2023 ca. 1200 Laserscans und 4000 Bilder für ein 3D-Modell in hoher Auflösung aufgenommen wurden. Für die Erstellung eines idealisierten BIM-Modells durch das Architekturbüro wurde diese Punktwolke auf zehn Millimeter ausgedünnt.

Während der Vorbereitungsarbeiten haben sich gravierende statische Probleme (wahrscheinlich Kriechbruch) am mittelalterlichen Turmstumpf gezeigt, die sofortige Sicherungsarbeiten über alle Turmgeschosse erforderlich machten und zur Sperrung der Kirche seit Weihnachten 2024 führten. Es sollte daher versucht werden, Veränderungen am Turmstumpf im Bereich der Westfassade



Abb. 3: 3D-Punktwolken von 2023 und 2025 sowie Soll-Ist-Vergleich

vom Frühjahr 2023 bis zum Frühjahr 2025 zu detektieren. Dazu wurden 2025 zwölf weitere Laserscans und 3.000 Drohnenbilder aufgenommen und ein weiträumiges hochgenaues Passpunktfeld durch einen Ingenieurvermesser im Bereich der Westfassade angelegt, das auch die Nachbarbebauung einschließt. Im ersten Schritt haben wir dann die Laserscans und Bilder von 2023 im Bereich der Westfassade aus dem gesamten Datensatz isoliert. Die Daten von 2023 (Soll) und 2025 (Ist) wurden dann zunächst jeweils in einem eigenen System orientiert und anschließend in das gemeinsame System der Ingenieurvermessung überführt. Danach konnte eine Soll-minus-Ist-Analyse der Westfassade des Turmstumpfes erfolgen. Die Ergebnisse dieser Analyse haben gezeigt, dass sich im Bereich des Glockenstuhles Änderungen im Bereich bis zu sechs Millimeter ergeben haben (Abb. 3 und 4).



Abb. 4: Abweichungen im Bereich des Glockenstuhls bis 6 mm in Rottönen

Beispiele mit reduzierter Auflösung: Visualisierung des ehemaligen Schaubergwerks im Deutschen Museum in München

Im Zuge der laufenden Sanierungsarbeiten wurde das Schaubergwerk im Deutschen Museum in München ausgebaut und eingelagert. Bei dem Bergwerk handelt es sich wie bei der Venusgrotte um eine Drahtputz-Konstruktion, die in Teilbereichen von drei Untergeschossen des Museums seit den 1920er-Jahren eingebaut wurde. Auf einem ca. 500 Meter langen Besucherweg wurden dabei ver-



Abb. 5: Visuelle Kontrolle des 3D-Modells mittels Gaming-Software

schiedene historische Bergwerkssituationen nachgestellt, wobei es sich bei den ausgestellten Maschinen um Originalexponate aus verschiedenen Gruben handelt. Kurz vor dem Rückbau des Schaubergwerkes konnte noch auf hartnäckiges Betreiben von Gerd Hirzinger ein digitaler Zwilling mit 500 farbigen Laserscans und 30.000 Bildern aufgenommen werden. Der Zwilling soll in erster Linie der virtuellen Präsentation des Bergwerkes dienen, da der weitere Umgang mit dem eingelagerten Original noch nicht geklärt ist. Das Schaubergwerk

wurde in fünf Teilen berechnet, die über eine vorhandene Bauwerksvermessung für die Sanierung zusammengefügt werden konnten. Zur visuellen Kontrolle der Vollständigkeit der Erfassung wurde ein auf ca. 100.000 Polygone ausgedünntes Modell in die Gaming-Software „Unreal“ übertragen, wo es mittels eines Avatares inspiert werden kann.

Danach erfolgte eine Datenreduktion für VR-Brillen oder Internetmodelle. Um bei der Datenreduktion optimale Ergebnisse zu erhalten, ist es sinnvoll, zunächst ein 3D-Modell in sehr hoher Auflösung,

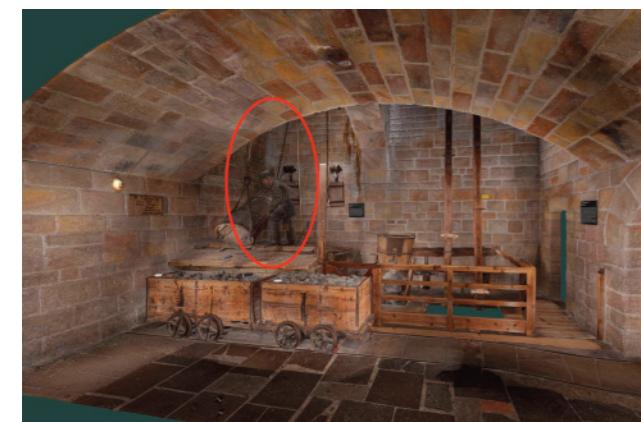


Abb. 6: Ausgedünntes Modell auf der Basis eines dichten Dreiecksnetzes



Abb. 7: Ausgedünntes Modell aus reduziert berechneten 3D-Punkten

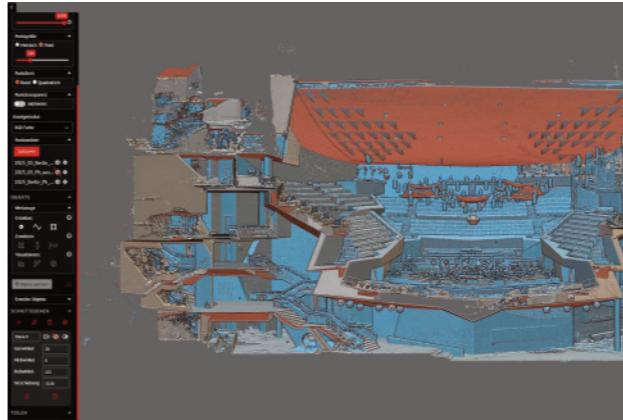


Abb. 8: 3D-Punktwolken der Berliner Philharmonie mit 10 mm 3D-Auflösung

lösung, hier drei Millimeter, zu berechnen und es dann in Stufen auszudünnen. Mit diesem Vorgehen bleiben auch feine Details im Modell erhalten. Wird das Ursprungsmodell schon in einer geringeren Auflösung – im Beispiel zwölf Millimeter – berechnet, gehen alle Details unterhalb dieser Grenze verloren. Der komplette „finale“ Digitale Zwilling des Schaubergwerks mit dem aufwändigen Reverse Engineering, das die statischen Bergarbeiter-Figuren und ihre Maschinen „zum Leben erweckt“ und so den großen Mehrwert einer dynamischen

VR-Visualisierung demonstriert, wurde vom Partner VR-Dynamix <https://vr-dynamix.com/> unserer Arbeitsgemeinschaft ARGE 3D (Virtuelles Bayern) für das Deutsche Museum erstellt (Abb. 5, 6 und 7).

BIM-Teilmodell der Berliner Philharmonie

Die Berliner Philharmonie haben wir 2008 aufgenommen, 2010 folgte der Kammermusiksaal. Insgesamt wurden 1.800 Laserscans erstellt, von denen ca. ein Drittel die Auflösung von 10.000x20.000 3D-Punkten haben. Im ersten Schritt entstanden aus den Daten verformungsgerechte Pläne im Maßstab 1:100. Ab 2012 wurden dann verschiedene Unterlagen für kleinere Umbauten und unter anderem genaue Volumenberechnungen der Säle für eine Covid-konforme Publikumsverteilung erstellt. Die Berliner Philharmonie ist momentan unser einziger öffentlicher Auftraggeber, der die 3D-Daten in seinem Rechenzentrum langfristig archiviert.

Als neueste Aufgabe wurde 2024 die Erstellung eines BIM-Informationsmodells für eine Evakuierungssimulation der Philharmonie-Besucher:innen an uns herangetragen, und zwar in Zusammenarbeit mit der Berliner Firma Eve-risk <https://eve-risk.de/>

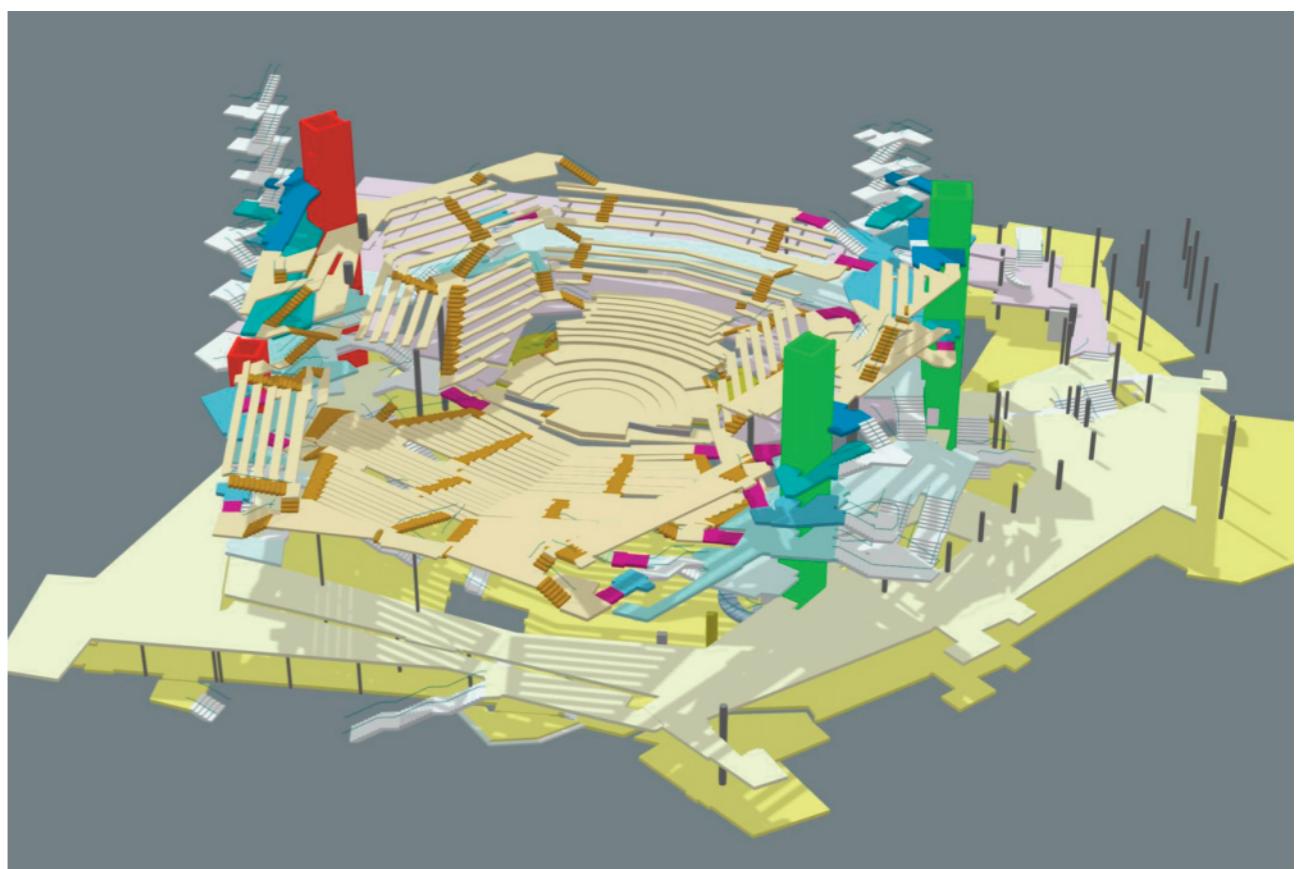


Abb. 9: BIM Modell

eve-risk.com/, welche die BIM-Modelldaten (IFC-Daten) des Modells für die Evakuierungssimulation nutzen. Für eine Evakuierungssimulation werden alle Plätze eines Veranstaltungssaals mit Avataren besetzt, die dann das Gebäude innerhalb einer vorgegebenen Zeit verlassen können müssen. Im Neubau kann man das durch breite und viele Fluchtwägen entsprechend den aktuellen Bauordnungen erreichen, im Denkmal ist es oft nicht möglich, nachträglich baulich die aktuellen Anforderungen an Fluchtwägen zu erfüllen; es müssen entsprechend andere Maßnahmen getroffen werden.

Für BIM-Informationsmodelle ist immer eine enge Abstimmung aller Beteiligten erforderlich. Dazu gehört die genaue Definition der zu erstellenden Bauteile und eine Probe der Datenübergabe, insbesondere wenn spezielle Softwarelösungen zum Einsatz kommen. Bei BIM-Informationsmodellen können die Bauteilabmessungen gegenüber der „Architektur“ abweichen: So werden für eine Evakuierungssimulation nur alle Flächen erstellt, auf denen sich Besucher bewegen können, wobei auch nur die lichten Maße zum Beispiel zwischen den Handläufen einer Treppe und Hindernissen berücksichtigt werden.

Für die Erstellung eines BIM Modells einer komplexen Denkmalgeometrie wird neben guten Plänen immer eine 3D-Punktwolke benötigt, um Informationen, die in den Plänen nicht enthalten sind, ergänzen zu können. Natürlich sollten Pläne und Punktwolke genau zusammenpassen. Anders als bei der Planerstellung, bei der auch immer eine direkte Auswertung von Laserscans mit entsprechenden Softwaremodulen erfolgt, können BIM-Programme für unsere Herangehensweise nur begrenzt große Punktwolken laden. Eine Ausdünnung der kompletten 3D-Punktwolke, die wir mit drei Millimeter oder mehr 3D-Auflösung erstellen, ist daher erforderlich. Da BIM- oder CAD 3D-Modelle eine Generalisierung der Wirklichkeit darstellen, kommt es nicht auf die feinen Details wie bei der Visualisierung an, und man kann direkt eine 3D-Punktwolke mit verringriger Auflösung berechnen. Das spart erheblich an Rechenzeit und Speicherplatz. Nach unserer Erfahrung hat sich ein mittlerer Punktabstand von zehn Millimetern für BIM als guter Kompromiss zwischen Datenmenge und Erkennbarkeit am Objekt herausgestellt.

Die so erstellten 3D-Punktwolken können an den 3D PointHub <https://3dpointhub.com/> übertragen werden, wo sie für alle am Projekt Beteiligten mittels Browser einsehbar und im Ganzen oder in Teilen herunterladbar sind.

Eingesetzte Hard- und Software

- Laserscanner und Software der Firmen ZF Laser Wangen im Allgäu und Faro Deutschland
- <https://www.zofre.de/en/laser-scanners>
- <https://www.faro.com/de-DE/Products/Hardware/Focus-Laser-Scanners>
- Alle photogrammetrischen Auswertungen, inkl. Modellberechnungen und Orthophotoerstellung, wurden mit RealityCapture (jetzt neu RealityScan) ausgeführt.
- <https://www.realityscan.com/en-US>
- Digitale Kameras von Leica, Canon und Sony sowie Drohnen von DJI
- CAD und BIM-Programme von Autodesk
- Scanauswertung für verformungsgerechte Pläne mit Programm Scalypso
- <https://www.scalypso.com/de/start/>
- Visualisierung und Analyse von hochauflösenden Punktwolken mit dem 3D-PointHub von PointCloud Technology
- <https://www.pointcloudtechnology.com/de>
- <https://3dpointhub.com/>

Literatur

- Günter ECKSTEIN, Empfehlungen für Baudokumentationen, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Arbeitsheft 7, Stuttgart 1999.
- Bernhard STRACKENBROCK, Gerd HIRZINGER, Jürgen WOHLFEIL, Multi-Scale / Multi-Sensor 3DDokumentation und 3D-Visualisierung höfischer Prunkräume, in: Andreas Bienert und Pedro Santos (Hrsg.), Konferenzband EVA Berlin 2014. Elektronische Medien & Kunst, Kultur und Historie: 21. Berliner Veranstaltung der internationalen EVA-Serie: Electronic Media and Visual Arts, Heidelberg 2018, S. 110–116.
- Bernhard STRACKENBROCK, Birgit TSUCHIYA, Multi KAMERA Photogrammetrie, in: Andreas Bienert, Eva Emenlauer-Blömers und James R. Hemsley (Hrsg.), Konferenzband EVA Berlin 2019. Elektronische Medien & Kunst, Kultur und Historie: 26. Berliner Veranstaltung der internationalen EVA-Serie Electronic Media and Visual Arts, Heidelberg 2020.
- Bernhard STRACKENBROCK, Birgit TSUCHIYA, Let's Play from Buildings, Exhibitions and Museum Pieces, to be published in the proceedings of EVA conference on Electronic Media and Art, Culture, History held in Berlin, Germany, November 30th–December 1st, 2023.

Jürgen WOHLFEIL, Bernhard STRACKENBROCK, Ingo Kossyk, Automated High-resolution 3D Reconstruction of Cultural Heritage Using Multi-scale Sensor Systems and Semi-global Matching, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-4/W4, 2013, S. 37–43.

Abstract

Exploring – Preserving – Presenting: the Use of Digital Twins in Monument Conservation

The first section deals with the creation of high-resolution, homogeneous 3D point clouds. The basic procedure for this was developed in the MuSe Bayreuth research project on 3D documentation of Baroque state rooms, using the example of the Margravial Opera House in Bayreuth, and continued in many subsequent projects. This workflow is based on the first step of creating a basic model of a building (3 mm resolution) using coloured laser scans, which can then be supplemented and refined photogrammetrically in further steps, usually producing resolutions between 0.5 and 1 mm.

The use of digital twins is then presented on the basis of two thematic groups and different questions: In practical monument preservation, very high-resolution 3D point clouds are used as a direct application of the twin. This allows extensive questions to be investigated in the areas of structural reinforcement, building research and restoration. This is demonstrated using the example of Ludwig II's Venus Grotto in the Linderhof Palace Park, where a basic model of the existing structure was created in the winter of 2007–2008 and continued until 2024. Using the tower of the main church of St. Jacobi in Hamburg, change analyses are presented and the use of AI is discussed.

In the field of visualisation and BIM models, on the other hand, heavily thinned 3D point clouds are used to create appropriately generalised and interpretable 3D models that can be edited with the selected tools. Two projects are presented here using the example of the now demolished exhibition mine of the Deutsches Museum in Munich and the Berlin Philharmonic Hall.

Bildnachweis

Alle Abbildungen von den Verfassern

Workshop „Künstliche Intelligenz und Denkmalpflege. Kulturerbe schützen, Innovation fördern“

(6. OKTOBER 2025, ONLINE)

PROGRAMM

9:00 Uhr	Begrüßung Tino Mager (Präsident ICOMOS.DE) Denise Bednorz (Sprecherin VDL, AG Denkmalinformationssysteme) Ulrike Wendland (Geschäftsführerin DNK)	14:00 Uhr	Pause
9:15 Uhr	Sektion 1: KI-Einsatz in der Denkmalverwaltung <i>Moderation: Franziska Klemstein (Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz Hochschule Mainz)</i> Stefan Müller (StefanAI-Research & Development): LudwigOne: KI-gestützte Assistenz zur formalen und inhaltlichen Vorprüfung von Anträgen in der Denkmalpflege Clemens Kieser (Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg): Schutzgründe massenhaft	14:15 Uhr	Sektion 4: Klimaschutz mithilfe von Künstlicher Intelligenz <i>Moderation: Denise Bednorz (Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt)</i> Kristina Holl (Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg), Stefan Bichlmair, Timo Hevesi-Toth (Fraunhofer-Institut für Bauphysik), Jan Hagenbauer: KI-gestützte Risikobewertung von Klimadaten zur präventiven Konservierung Daniel Broschart (Stadtverwaltung Landsberg am Lech), Sabrina Sommer (Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege), Peter Zeile (Karlsruher Institut für Technologie): Sonne trifft Denkmalschutz – Ein neuer geodatenbasierter Ansatz zur Entwicklung eines Solarrahmenplans
10:30 Uhr	Pause	15:30 Uhr	Pause
10:45 Uhr	Sektion 2: Datenschutz und Urheberrecht, Potenziale und Risiken <i>Moderation: Gregor Hitzfeld (Landesdenkmalamt Berlin)</i> Pia Pillokat (CLP Rechtsanwälte): Datenschutz und Urheberrecht in der digitalen Denkmalpflege und Archäologie Peter Kozub (Technische Hochschule Köln): Computermacht und Vernunft: Die Ambivalenz der Anwendung von KI in der Restaurierung	15:45 Uhr	Sektion 5: Digitale Zwillinge und Smart City <i>Moderation: Georgios Toubekis (Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT)</i> Christian Brandt (GISA GmbH, Berater im Projekt Digitaler Zwilling der MITNETZ Strom): Infrastruktur digital denken: Der Digitale Zwilling im Einsatz Simon Kunz (Deutsches Bergbau-Museum Bochum), Christian Dominic Fehling (Bergische Universität Wuppertal): Erstellung digitaler Zwillinge industrieller Kulturgüter mittels 3D Gaussian Splatting
12:00 Uhr	Pause	17:30 Uhr	Birgit Tsuchiya, Bernhard Strackenbrock (illustrated architecture), Gerd Hirzinger: Erforschen – Erhalten – Präsentieren. Der Einsatz digitaler Zwillinge in der Denkmalpflege
12:45 Uhr	Sektion 3: Künstliche Intelligenz als Vermittlerin <i>Moderation: Jörg Schindler (Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege)</i> Kristina Fischer (Leibniz-Zentrum für Archäologie, NFDI4Objects): Die KI in der terminologischen Lehre. Ein maschinenlesbares kontrolliertes Fachvokabular für die archäologische Konservierung-Restaurierung Thorsten Kubiak (Institut für Europäische Themenpartnerschaften): Zwischen Bestand und Bedarf – KI-gestützte Konfliktmoderation in der Denkmalpflege am Beispiel eines industriellen Pionierbaus		Ende des Workshops

Curricula Vitae

Stefan Bichlmair

Dr., leitet am Fraunhofer-Institut für Bauphysik die Gruppe Feuchtemanagement und Materialkennwerte. Die Analyse von Raumklimadaten im Kontext von historischen Gebäuden und in Kombination von hygrothermischen Simulationen ist eine seiner Kernkompetenzen.

Daniel Broschart

Dr., leitet das Referat „Digitaler Zwilling, Klimaschutz und Mobilität“ bei der Stadtverwaltung Landsberg am Lech. Er hat Raumplanung (B.Sc.) und Stadt- und Regionalentwicklung (M.Sc.) im Fachbereich Raum- und Umweltplanung an der Technischen Universität Kaiserslautern studiert und promovierte anschließend zum Thema „Mobile Geoweb-Methoden für die Planung“.

Er befasst sich mit dem Aufbau und den Einsatzmöglichkeiten von urbanen digitalen Zwillingen, der geodatenbasierten Untersuchung von Fragestellungen im urbanen Kontext sowie der Fortentwicklung von Visualisierungs- und Kommunikationsmethoden in städtebaulichen Entscheidungsprozessen.

Christian Dominic Fehling

ist Forscher im Immersive Education Lab der Bergischen Universität Wuppertal und spezialisiert in der Anwendung immersiver Medien in Bildungsprozessen. Mit langjähriger Erfahrung hat er zahlreiche innovative Projekte geleitet, die sich auf immersives Lernen konzentrieren. Seine Forschung legt den Schwerpunkt auf den Einsatz offener und freier Werkzeuge, um den Zugang zu 3D-Rekonstruktionen, Virtual Reality und fortschrittlichen Bildungstechnologien zu demokratisieren.

Kristina Fischer

staatl. geprüfte Goldschmiedin (2017, ZA Hanau) und studierte Restauratorin für archäologische Kulturgüter (B.A. 2021, JGU Mainz). Aktuell Hauptbeschäftigung als Restauratorin am Leibniz-Zentrum für Archäologie (LEIZA), zusätzlich wissenschaftliche Mitarbeiterin in Task Area 4 Protecting des NFDI4Objects-Konsortiums tätig.

Jan Hagnberger

arbeitete am Fraunhofer-Institut für Bauphysik als studentischer Hilfswissenschaftler an der Programmierung der App CERoC-ML und der Auswertung der Datensätze. Derzeit absolviert er seinen Master in Künstlicher Intelligenz und Datenwissenschaft an der Universität Stuttgart.

Timo Hevesi-Toth

ist technischer Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik und mit der Entwicklung von Programmen zur Auswertung von Klimadaten beauftragt. Darüber hinaus erstellt er Messprogramme in unterschiedlichen Softwarelösungen und implementiert messtechnische Versuchseinrichtungen.

Gerd Hirzinger

Prof., hat an der TU München Elektrotechnik studiert und auf dem Gebiet der Regelungstechnik promoviert. Danach hat er im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR über viele Jahre an Aufbau und Leitung des am Ende weltweit größten Instituts für angewandte Roboterforschung gearbeitet, dem DLR-Robotik- und Mechatronik-Zentrum RMC unter Einbeziehung der Berliner Dependence Optische Informationssysteme. Basierend auf einem für die Mars-Orbiter-Kamera bei ihm entwickelten Stereo-Algorithmus SGM arbeitet er nach wie vor daran, als Kopf einer ARGE 3D mit der 3D-Modellierung von Landschaften, Städten Residenzen, Klöstern und Schlössern die Baukultur- und Technik-Geschichte mit „digitalen Zwillingen“ voranzutreiben.

Kristina Holl

Dr., leitet seit 2024 das Fachgebiet Restaurierung am Landesamt für Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Zuvor war sie am Fraunhofer-Institut für Bauphysik im Bereich der Kulturerforschung tätig, wo sie unter anderem zum vorgestellten Thema gearbeitet hat.

Peter Kozub

1986–1991 Studium an der Nicolaus-Copernicus-Universität in Thorn, Institut für Denkmalpflege und Denkmalkunde an der Fakultät der Schönen

Künste; 1997–2013 Leiter der Restaurierungs werkstatt in der Studienrichtung Steinrestaurie rung an der Fachhochschule Potsdam; 2005 Pro motion an der Humboldt-Universität zu Berlin; seit 2008 zusätzlich Lehrbeauftragter im Fach „Theoretische Grundlagen der Restaurierung“ an der Europa-Universität Viadrina Frankfurt (Oder); seit 2013 Professor in der Studienrichtung Kon servierung und Restaurierung von Wandmalerei und Kulturgut aus Stein, in der Spezialisierung Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein am Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft (CICS) der Technischen Hochschule Köln.

Thorsten Kubiak

(*1966) ist Stadtplaner und war viele Jahre in leitender Funktion als Stadtbaudrat für kommunale Bau- und Denkmalbehörden tätig. Er bringt umfangreiche Erfahrung aus Konfliktmoderation und Entscheidungsprozessen im Spannungsfeld zwischen Planung, Eigentum und Denkmalschutz mit. Heute ist er als freiberuflicher Berater und Lehrbeauftragter tätig, unter anderem in den Bereichen Bau-, Planungs- und Denkmalrecht. In seiner Arbeit verbindet er praxisnahe Perspektiven mit strategischem Denken – auch im Blick auf den verantwortungsvollen Einsatz digitaler Werkzeuge wie KI in der kommunalen Planungskultur.

Simon Kunz

ist seit 2018 Konservierungswissenschaftler in der Materialkunde am Deutschen Bergbau-Museum Bochum. Er erforscht das Alterungsverhalten von Kunststoffen im musealen Kontext. Erfahrung sammelte er u. a. am Rathgen-Forschungslabor und als Scholar in Residence am Deutschen Museum. Sein Fokus liegt auf historischen Kunststoffen und der Analyse mittels FTIR-Spektroskopie (ATR, 2Dcorr) sowie (py-)GCMS.

Stefan Müller

Dipl.-Informationswirt (FH, Jg. 1982) und ausgebildeter Technischer Assistent, leitete langjährig IT-Support und Softwareentwicklung, ist seit 2019 selbstständig als Referent, Berater und Entwickler für KI, schult jährlich über 2.500 Teilnehmende aus mehr als 200 Organisationen in Kommunen, Län

dern und Bund und entwickelt maßgeschneiderte On-Prem-Lösungen für Verwaltungen – von Anforderungsanalyse und Prototyping bis zum produktiven Betrieb, inklusive Datenschutz, Governance und Schnittstellenkonzepten.

Pia Pilokat

ist Rechtsanwältin mit den Schwerpunkten Bau- und Architektenrecht, Immobilienrecht und Vertragsrecht. Sie berät zu sämtlichen immobilienbezogenen Fragestellungen, einschließlich des Denkmalschutzrechts, und übernimmt die Gestaltung und Prüfung von Verträgen. Im Rahmen ihrer Promotion beschäftigt sie sich wissenschaftlich mit einem Thema zum illegalen Handel mit Kulturgütern und Raubgrabungen.

Sabrina Sommer

ist Referentin für Nachhaltigkeit und Denkmalpflege und stellvertretende Referatsleiterin des Referats Bürger-Denkmal-Gesellschaft im Bereich der Bau- und Kunstdenkmalfpflege beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD). Sie begleitet bayerische Kommunen bei der Erstellung von Solarrahmenplänen im Rahmen von Kommunalen Denkmalkonzepten (KDK).

Sabrina Sommer hat Energieeffizientes Planen und Bauen (B.Eng.) und Energie Effizienz Design (M.Eng.) an der Technischen Hochschule Augsburg studiert und ist bis heute Lehrbeauftragte an der Fakultät Architektur und Bauwesen. Mit ihrer beruflichen Erfahrung als selbstständige Planerin engagiert sie sich für die zukunftsgerechte Transformation von Gebäuden und Städten im denkmalgeschützten Bestand. Ihr Ziel ist es, die Energie- und Wärmewende mit dem Erhalt schützenswerter Bausubstanz in Einklang zu bringen.

Bernhard Strackenbrock

Studium der Vermessung und Fotogrammetrie an den Fachhochschulen in Mainz und Berlin; Abschluss 1982. Seitdem freiberuflich tätig in den Bereichen 3D-Vermessung in der Archäologie, Denkmalpflege und Industrie. Auslandsaufenthalte in Italien, Syrien, Marokko und Sudan. Freier wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Bergbaumuseum und am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt. 2002 Mitbegründer von illustrated architecture.

Birgit Tsuchiya

Studium der Architektur an der Technischen Fachhochschule Berlin mit Abschlüssen 1987 und 1988. Anschließend bis 2001 angestellt tätig für alle Leistungsphasen der Architektur, seit 1995 in leitender Position. Der Schwerpunkt der Tätigkeit verlagerte sich im Laufe der 1990er-Jahre parallel mit den wachsenden Möglichkeiten und Herausforderungen der Datentechnik und CAD auf das Bauen im Bestand und in der Denkmalpflege. 2002 Gründung des Büros illustrated architecture.

Peter Zeile

Dr., ist Senior Researcher und Forschungscoordinator am Fachgebiet Stadtquartiersplanung der Fakultät für Architektur am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Er leitet unter anderem arch.lab, die Plattform für Forschung und Lehre an der Fakultät für Architektur und die Urban Emotions Initiative.

Peter Zeile hat sein Diplom in Raum- und Umweltplanung an der Technischen Universität Kaiserslautern erworben, wo er auch zum Thema „Echtzeitplanung“ promovierte. Seine berufliche Leidenschaft gilt der urbanen Sensorik und Geodatenverarbeitung, der Visualisierung und Simulation komplexer Projekte im Städtebau sowie Geoweb- und mobilen Lösungen für die Raumplanung.