

Digitaler Zwilling x Denkmalschutz – ein neuer Ansatz zur Vorbereitung eines Solarrahmenplans für eine denkmalgeschützte Altstadt

Peter Zeile, Daniel Broschart, Sabrina Sommer, Judith Sandmeier, Franziska Haas

(Dr.-Ing. Peter Zeile, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Stadtquartiersplanung, Englerstraße 11, 76131 Karlsruhe, peter.zeile@kit.edu)

(Dr.-Ing. Daniel Broschart, Stadt Landsberg am Lech, Referat Digitaler Zwilling, Klimaschutz und Mobilität, Katharinenstraße 1, 86899 Landsberg am Lech, daniel.broschart@landsberg.de)

(Sabrina Sommer, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Hofgraben 4, 80539 München, sabrina.sommer@blfd.bayern.de)

(Prof. Judith Sandmeier, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Hofgraben 4, 80539 München, judith.sandmeier@blfd.bayern.de)

(Franziska Haas, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Schloss Seehof, 96117 Memmelsdorf, franziska.haas@blfd.bayern.de)

1 ABSTRACT

Durch die Änderung des Bayerischen Denkmalschutzgesetzes ist es in der Denkmalpflege nun möglich, Denkmäler zu schützen und erneuerbare Energien zu fördern. Der Art. 6 (2) BayDSchG (Bayerisches Denkmalschutzgesetz BayDSchG 2023) erlaubt es Eigentümern von Baudenkmalern, erneuerbare Energien zu nutzen, sofern keine überwiegenden Gründe des Denkmalschutzes entgegenstehen. Das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege betont dabei die Bedeutung einer denkmalverträglichen Energieversorgung, die Denkmalschutz und Klimaschutz vereint.

Ein Solarrahmenplan ist ein Planungsinstrument für Kommunen mit historischer Bausubstanz, das Potenziale und Anforderungen für erneuerbare Energien definiert. Grundlage ist eine Analyse von Einsehbarkeit, historischen Raumqualitäten und Gestaltungskriterien. Ziel ist es, Transparenz zu schaffen und die Entscheidungsfindung zu unterstützen.

Der Beitrag stellt die Erarbeitung eines Solarrahmenplans für die Altstadt Landsberg am Lechs vor. Der Digitale Zwilling des mFUND-Projekts „TwinCity3D“ wird genutzt, um Sichtachsen zu analysieren und sensible Bereiche zu identifizieren. Die Studie liefert methodische Ansätze, zentrale Erkenntnisse und einen Ausblick auf die Umsetzung.

Keywords: Simulation, Denkmalschutz, Solarkataster, Digital Twin, Photovoltaik

2 HINTERGRUND

Am 01.07.2023 ist eine Änderung des Bayerischen Denkmalschutzgesetzes in Kraft getreten. Mit dieser Änderung will das Gesetz Denkmäler schützen, Energiepotenziale nutzen und Kommunen unterstützen. In Art. 6 (2) BayDSchG heißt es „Dient die Maßnahme der Gewinnung erneuerbarer Energien überwiegend für den Energiebedarf im Baudenkmal oder zu einer energetischen Verbesserung, kann die Erlaubnis [...] nur versagt werden, soweit überwiegende Gründe des Denkmalschutzes entgegenstehen und diesen nicht durch Nebenbestimmungen zur Art der Umsetzung Rechnung getragen werden kann.“ Der Gesetzgeber möchte also Eigentümern von Baudenkmalern grundsätzlich die Möglichkeit geben, erneuerbare Energien zu nutzen. Auf der Homepage des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege ist hierzu Folgendes aufgeführt: „Solarenergie im Ensemble und im Baudenkmal: Eine in denkmalfachlicher Sicht verträgliche Versorgung von Baudenkmalern mit bezahlbarer regenerativer Energie dient auch dem Denkmalerhalt und ist gerade heute von ganz besonderer Bedeutung. Denkmalschutz und Klimaschutz sollen Hand in Hand gehen und ihre Belange verantwortungsvoll verbunden werden. Denkmäler sollen dabei aber natürlich ihre besondere Eigenheit als einzigartige, identitätsstiftende und höchst wertvolle Zeugnisse der bayerischen Geschichte behalten. Für die Vereinbarkeit von Denkmalpflege und Solarenergienutzung bietet das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege Lösungen für städtebauliche Konzepte zur Energieversorgung im Ensemble und Möglichkeiten am oder in der Nähe eines Baudenkmal an.“

Ein Solarrahmenplan ist ein informelles Planungswerkzeug, das sich speziell an Kommunen mit einem umfangreichen historischen Baubestand richtet. Solch ein Rahmenplan soll die Möglichkeiten der Nutzung erneuerbarer Energien im Ensemble differenziert betrachten. Dafür wird der öffentliche Raum auf der Grundlage einer städtebaulich-denkmalflegerischen Analyse kategorisiert, um für die einzelnen Bereiche abgestimmte Gestaltungsanforderungen formulieren zu können. Der Plan kann so als Werkzeug für die Verwaltung dienen, um entsprechende Anträge auf Solaranlagen im Denkmalbereich zu bearbeiten und eine Transparenz für die Eigentümer herzustellen. Ziele der Stadt bei der Erstellung eines solchen Plans sind:

- Klarheit und Transparenz für den Umgang mit Solaranlagen für alle Beteiligten
- Definition von Gestaltungsqualitäten für die Dachflächen als 5. Fassade im historischen Kontext
- Informelle Planung als Werkzeug für die Untere Denkmalschutzbehörde (UDB)

Für die Erstellung eines Rahmenplans sind drei Fragestellungen denkmalfachlich zu untersuchen und zu bewerten:

- Einsehbarkeit und Sichtachsen
- Analyse der historischen Bedeutung von städtischen Räumen
- Gestaltungsanforderungen für die Anlagen

Als Ergebnis soll eine digitale Karte entstehen, die Auskunft über die denkmalpflegerischen Werte und Qualitäten von Räumen, Einzelgebäuden, Straßen- und Platz-, sowie Stadtansichten gibt, die Einsehbarkeit vom öffentlichen Raum beschreibt sowie die Potenziale und Anforderungen zur Integration von EE-Anlagen darstellt.

Mithilfe des virtuellen 3D-Stadtmodells von Landsberg am Lech sollen diese Arbeitsschritte durchgeführt werden. Mithilfe der Sichtachsenanalyse werden die betroffenen (Teil-)Dachflächen abgeleitet und kategorisiert. Durch die Auseinandersetzung mit der historischen Bedeutung des Stadtraums findet eine weitere Einstufung sensibler Bereiche innerhalb des Altstadtgefüges statt. Aus der Überlagerung der angefertigten Analysen werden anschließend Gestaltungsanforderungen abgeleitet, die dachflächengenau Aussagen zur möglichen Verwendung von PV-Modulen liefert.

Im Rahmen eines Forschungsseminars an der Professur für Stadtquartiersplanung des KIT wurden diese Arbeitsschritte 2024/2025 in Zusammenarbeit mit dem BLfD und der Stadt Landsberg am Lech mit den zuständigen Referaten der Technischen Bauaufsicht als Untere Denkmalschutzbehörde und dem Referat Digitaler Zwilling, Klimaschutz und Mobilität (DZKM) durchgeführt, die nachfolgend näher beschrieben werden.

3 STAND DER FORSCHUNG

3.1 PV-Anlagen und Denkmalschutz bisher

Vor der Gesetzesänderung 2023 konnten gewichtige Gründe für den Erhalt des bestehenden Zustands die Genehmigung erneuerbarer Energien verhindern. Nun müssen überwiegende Denkmalschutzgründe vorliegen, sofern diese nicht durch Auflagen zur Umsetzung berücksichtigt werden können (Bayerisches Denkmalschutzgesetz BayDSchG 2023). Dies bedeutet, die Frage lautet nun nicht mehr „ob“ erneuerbare Energien am Denkmal erlaubnisfähig sind, sondern „wie“. Dabei soll die Substanz des Baudenkmals soweit wie möglich erhalten bleiben während eine möglichst denkmalverträgliche Integration in das Erscheinungsbild angestrebt wird. Maßgebend ist, dass vorrangig der Energiebedarf im Baudenkmal abgedeckt werden soll.

Das Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (STMWK) hat hierzu das Stufenmodell als Handlungsanweisung herausgegeben, wonach zunächst Nebengebäude und nicht einsehbare Flächen zu Belegen belegen sind. So sind auf Flächen, welche nicht vom öffentlichen Raum einsehbar sind, regelmäßig auch herkömmliche Anlagen erlaubnisfähig (Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst 2023).

Bei vom öffentlichen Raum aus einsehbaren Dachflächen wird unterschieden in Ensemble und Einzeldenkmäler. Bei Ensembles gilt: Mit dem Erscheinungsbild denkmalfachlich vereinbare Anlagen, z. B. in die Dachfläche integrierte Anlagen, sind regelmäßig erlaubnisfähig. Bei Einzeldenkmälern gilt analog zu den Ensembles zusätzlich der Substanzschutz. So sind aufwendige Ertüchtigungen eines Dachtragwerks zur Installation einer Anlage nicht im Sinne des Denkmalschutzes.

Die immer effizienter werdende Zelltechnologie sowie die steigenden Produktionsraten der Zellen begünstigen den kostengünstigen Erwerb von Solarprodukten. So hat sich der Wirkungsgrad seit 2002 von durchschnittlich 13% auf 23% fast verdoppelt und der Preis pro kWp ist nunmehr ein Fünftel im Vergleich zum Jahr 2006 (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK 2021; Lackner et al. 2024).

Produktinnovationen in Art, Form und Farbe ermöglichen heutzutage wirtschaftliche und gestalterisch anspruchsvolle Lösungen.

Photovoltaik-Indachanlagen sind im Falle einer Dachsanierung preislich konkurrenzfähig zu einer herkömmlichen Aufdachanlage und bringen weitere Vorteile mit sich. Die geringere Auflast und geringere Wind-Soglasten vermeiden Ertüchtigungen im Dachstuhl und die witterungsgeschützte Verlegung der Installationen trägt zu einer längeren Lebensdauer der elektrischen Bauteile bei. Mindererträge durch eine geringere Hinterlüftung können bei kleinteiligen Anlagen durch eine höhere Flächenausnutzung kompensiert werden.

Farbliche Anpassungen können durch die Verwendung von farbigen Rückgläsern, die Bedruckung mit wetterbeständigem keramischem Siebdruck oder die Verwendung von Farbfolien erfolgen und ermöglichen damit eine farbliche Annäherung an beispielsweise naturrote Ziegel oder patinierte Kupferdächer. Die Produktpalette bietet neben farblich angepassten Aufdachmodulen auch kleinteilige Indachlösungen, wie Solarziegel in verschiedenen Formen und Farben, spezielle Lösungen für Schiefer und Blechdächer, sowie PV-Folien, welche sich flexibel an bestehende Dachformen anpassen können. So können für die meisten Denkmäler individuell verträgliche Lösungen zur Integration von Photovoltaikanlagen gefunden werden.

Innovationen hinsichtlich Materialität und Oberflächen wie beispielsweise die Verwendung von satinierten Gläsern, welche die Reflexion der Deckgläser reduziert, versprechen weitere Verbesserungen hinsichtlich einer denkmalverträglichen Integration in das Erscheinungsbild der Denkmäler.

3.2 Erscheinungsbilder und Ensembles – Orte öffentlicher Aushandlung

Neben der baulichen Substanz zählt das Erscheinungsbild von Denkmälern zu den zentralen Schutzgütern der Denkmalpflege und ist als solches auch in allen deutschen Denkmalschutzgesetzen verankert (Eidloth et al. 2019). Besonders facettenreich ist dieses Erscheinungsbild in den Ensembles historischer Stadt- und Ortskerne überliefert, die nicht allein durch die Erhaltungsbestrebungen der Denkmalpflege, sondern vor allem den Gestaltungsansprüchen einer seit mehr als 100 Jahre andauernden kommunalen Planungskultur geprägt werden. Städte, Märkte und Dörfer, die ihre Kernbereiche im Sinne der Daseinsvorsorge attraktiv und lebendig halten wollen, haben dafür schon seit dem Ende des 19. Jahrhundert Regularien und Leitbilder in Form von Bebauungsplänen über Gestaltungssatzungen bis hin zu Werbeanlagensatzungen erlassen (Sandmeier 2023). Dem Erscheinungsbild eines Ortes scheint daher nicht nur im denkmalpflegerischen, sondern auch in gesellschaftlichen Wertbildungsprozessen eine besondere Rolle zuzukommen. Idealerweise soll es den Bewohnerinnen oder Besuchern durch Beständigkeit und Wiederholung von Strukturen Orientierung geben und zugleich offen sein für Innovation, Erneuerung und individuelle Zuschreibungen (Meier 2010, 2013). Aufgrund ihrer Komplexität und Geschichte bilden insbesondere denkmalschützte Orts- und Stadtkerne intuitive Bedeutungs- und Erfahrungsräume, die den Betrachtern leicht zugänglich erscheinen. Um diese Vielschichtigkeit und Aneignungsfähigkeit zu erhalten, setzen viele Kommunen darauf in der Entwicklung ihrer Ortskerne eine Brücke zwischen Zukunft und Vergangenheit zu schlagen und beispielsweise die Anpassung der Gesellschaft an gegenwärtige Bedürfnisse im baulichen oder strukturellem Bestand umzusetzen. Dabei investieren sie in der Regel viel Zeit und Geld in partizipative Aushandlungs- und Planungsprozesse, profitieren aber langfristig von diesen Bemühungen und den darin gesammelten Erfahrungen.

3.3 Solarrahmenpläne (in Bayern)

Der Solarrahmenplan will als sektorale, informelle Planung der Denkmalpflege Kommunen und ihren Bürgerinnen und Bürgern Hilfestellung in Mitten eines solchen Transformationsprozess geben. Ziel ist es, die spezifischen Werte und Potenziale des historischen Ortes zu erkennen und auf dieser Grundlage Handlungsräume für die energetische Erneuerung zu eröffnen. Die Grundzüge dafür wurden in einem ersten umgesetzten Solarrahmenplan für die kleine Stadt Lichtenberg in Oberfranken festgesetzt: Die Zonierung des Ensembles in eine Kernzone als die „Gute Stube“ des historischen Ortes – dazu zählen beispielsweise der Stadtplatz oder die Marktstraße, der Schlossplatz oder der Promenadenpark – und eine Nebenzone mit untergeordneten Straßen oder (halb-)privaten Bereichen, die als dienende Räume gesehen werden (Sandmeier und Fischer 2023). Neben dem Erscheinungsbild der Kernzone prägen vor allem die Fernsichten von besonders prominenten Aussichtspunkten ein historisches Ortsbild, das bedingt die Festlegung einer entsprechenden weiteren Zone. Zusätzlich gibt es eine Verständigung auf sogenannte Stadtbausteine, das

heißt Gebäude, die für den Ort aus kulturellen, gesellschaftlichen und geschichtlichen Gründen von maßgeblicher Bedeutung sind, das können beispielsweise das Schloss, die Pfarrkirche oder das Rathaus sein. Meist handelt es sich um Einzeldenkmäler oder ikonischen Bauwerke, so dass Solaranlagen hier gänzlich vermieden werden sollen beziehungsweise einer intensiven, auf den Einzelfall zugeschnittenen Planung bedürfen.

Inzwischen konnten für mehr als 20 Kleinstädte und Märkte, zunehmend auch für größere und komplexere Altstadtensembles nach dem Vorbild von Lichtenberg Solarrahmenpläne erarbeitet werden. Dabei wird die genaue Ausformulierung immer wieder neu dem Baubestand, der besonderen städtebaulichen Struktur und den verwaltungstechnischen Vorstellungen der Kommune angepasst. In Haßfurt, einer Kleinstadt in Unterfranken wurde die Nebenzone beispielsweise weiter ausdifferenziert, um der unterschiedlichen Wertigkeit und Bedeutung für das Stadtbild gerecht zu werden (Stadt Haßfurt 2023). In Bad Windsheim in Mittelfranken führten die Bearbeiter für die Gebäude im Bereich des ehemaligen Stadtgrabens als „Vorzone“ des Ensembles eine eigene Kategorie ein (Stadt Bad Windsheim et al. 2025).

In die Betrachtungen werden dabei in der Regel nur jene Dachflächen einbezogen, die aus dem öffentlichen Raum einsehbar sind, um damit den neuen gesetzlichen Regelungen Rechnung zu tragen. Die stadträumliche Analyse für den Solarrahmenplan in Weißenburg stellte in dieser Hinsicht eine besondere Herausforderung dar, da nahezu jede Dachfläche von einer der umliegenden Straßen und Plätze zu sehen ist. So wurden innerhalb der einzelnen ausdifferenzierten Zonen besondere Sichtachsen und Blickbeziehungen definiert, die sich aus der Morphologie der Stadt ableiten ließen (Stadt Weißenburg in Bayern et al. 2024).

Der Solarrahmenplan Bayreuth basiert ebenfalls auf der Zonierung des Ensembles in der beschriebenen Form, wird aber zusätzlich verschritten mit einer Entscheidungsmatrix, in der Kriterien wie eine exponierte Lage oder die Angrenzung an eine Platzsituation abgefragt werden (Stadt Bayreuth und RHA Reicher Haase Assoziierte 2024).

Die Erstellung eines Solarrahmenplanes für das ausgedehnte Ensemble der Altstadt Würzburg wiederum startete zunächst mit einer topographischen Analyse. Anhand des 3D-Gebäudemodells wurden automatisiert Dachflächen ermittelt, die aus dem jeweiligen Straßenraum nicht, bzw. nur geringfügig einsehbar sind. Überlagert wurde diese Erhebung mit einer Fernsichtstudie vom Würzburger Burgberg, dem prägnantesten Aussichtspunkt auf das Stadtensemble. Erst in einem nächsten Schritt wurde die räumliche Sichtanalyse mit denkmalpflegerischen Werten verschritten (Büro G.A.S. planen bauen forschen 2024).

Die dicht bebauten Mittel- und Großstädte stehen vor der Herausforderung, über eine Solaranlagensatzung hinaus vielfältige weitere Interessen und teilweise widerstreitende Belange der städtebaulichen Planung ausgewogen in die Betrachtung einzubeziehen. In Bayern bietet sich dafür die Bearbeitung in einem Kommunalen Denkmalkonzept (Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege 2017) an, dass Kommunen, Fachplaner und Behörden in einen gemeinsamen Aushandlungsprozess bringt und in dem die Bedürfnisse der Bürgerinnen und Bürger besondere Beachtung finden. Ein erstes Modellprojekt dieser Art konnte für die Stadt Wasserburg zur Vereinbarkeit von Denkmalschutz und regenerativer Energie im Altstadtensemble bereits seit 2021 umgesetzt werden. Hier wurde die stadträumliche Analyse parzellenscharf vertieft, um für einzelne Gebäude- und Dachtypologien angepasste Energieplanungen der Strom- und Wärmeversorgung anzubieten. In Modellprojekten wurde die Machbarkeit der Fallstudien demonstriert, innovative Produkte ausprobiert und Erfahrungen für die praktische Umsetzung gesammelt, um dieses Wissen auf weitere Solarplanungen in der Altstadt übertragen zu können (Solfrank 2024).

Unverzichtbarer Bestandteil eines jeden Solarrahmenplanes ist die Formulierung von abgestuften Gestaltungsleitlinien für die einzelnen Zonen. Ausgehend von der Bewertung der Ortsräume und –bauten, mitunter auch unter Einbeziehung der jeweiligen Dach- und Haustypologien, wird eine Aussage zu Lage, Maß, Materialität und Farbigkeit von Solarenergieanlagen getroffen. Im Zusammenspiel mit der kartografischen Fassung steht den Kommunen damit ein Planungswerkzeug zur Verfügung, das Transparenz gegenüber den Bürgern schafft.

3.4 Digitale Zwillinge

3D-Stadtmodelle stellen seit Jahrzehnten ein zentrales Werkzeug für die visuell ansprechende Vermittlung von Planungsinhalten dar – sei es analog oder seit den 1990er Jahren zunehmend digital. Bereits frühe Projekte wie das Stadtmodell Graz (Luser & Lorber, 1997) oder das 3D-Stadtmodell von Bamberg (Zeile et

al. 2005) verdeutlichen das Potenzial der Wissensvermittlung als auch der Planung im dreidimensionalen, digitalen Kontext. Die Entwicklung von CityGML und der darin enthaltenen Level-of-Detail (LOD) Spezifikation als universelles Austauschformat für 3D-Stadtmodelle (Kolbe und Gröger 2004; Brüggemann und von Both 2015; Benner et al. 2016) beschleunigten und standardisierten diese Entwicklung: Durch CityGML wurde es möglich, eine standardisierte Modellierung urbaner Strukturen und ihre Anwendbarkeit für verschiedenste Szenarien, etwa Energiebedarfsanalysen (Benner et al., 2016) durchzuführen. Offene Werkzeuge wie der KIT-ModelViewer für IFC als auch CityGML (KIT – IAI 2024) erleichtern mittlerweile die Arbeit und den Austausch der Dateien.

Parallel dazu etablierte sich das Konzept des digitalen Zwillings, das aus der Produktentwicklung stammt (Grieves 2014). Es beschreibt die virtuelle Replikation physischer Objekte und ermöglicht eine ganzheitliche Modellierung. Diese Idee wurde später in die Stadtplanung übertragen (Batty 2018). Digitale Zwillinge finden insbesondere Anwendung in großmaßstäblichen Modellen und Simulationen, wie etwa beim Projekt Herrenberg in Deutschland. Dieses nutzte immersive virtuelle Umgebungen zur Analyse urbaner Herausforderungen und zur Einbindung von Verkehrssimulationsmodellen (Dembski et al. 2019, 2020).

4 PROJEKT LANDSBERG AM LECH

Nachfolgend werden die durchgeführten Arbeitsschritte von der Datensichtung, die Ideen für eine Methodenentwicklung, Vorschläge für einen Solar-Rahmenplan sowie die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse auf Beispielgebäude näher beschrieben.

4.1 Datenverfügbarkeit

Im Rahmen des mFUND-Forschungsprojekts „TwinCity3D“ entwickelt die Stadt Landsberg am Lech zusammen mit 3D RealityMaps GmbH aus München aktuell eine Grundlage für einen digitalen Zwilling. Auf der Basis von Befliegungen des Stadtgebietes mit einem Multisensorkamerasystem (bestehend aus insgesamt fünf RGB-, einer Multispektral-, sowie einer Thermalkamera) werden verschiedene Luftbildprodukte zur späteren Analyse erzeugt. Das Multisensorsystem befindet sich dabei an dem elektrisch betriebenen Ultraleichtflugzeug „Elektra One Solar“ der Landsberger Firma Elektra Solar GmbH. Die realisierbare Flughöhe von 300m über Grund ermöglicht eine hohe Auflösung und sichert in der Folge einen hohen Informationsgehalt für die Anwendungsbereiche aus Klimaschutz, Mobilität und Stadtentwicklung. Das nach fotogrammetrischem Prinzip erstellte 3D-Meshmodell des Stadtgebietes bildet das Kernelement der prototypischen „TwinCity3D“-Plattform (Abb.1 rechts), welche zukünftig weiter ausgebaut werden soll. Aufgrund des niedrigen Abstraktionsgrades und der intuitiv angelegten Bedienoberfläche kann das Stadtgebiet – auch ohne Vorkenntnisse – nach kurzer Einarbeitungszeit virtuell erkundet werden (Broschart et al. 2024).

Zudem verfügt die Stadt Landsberg am Lech bereits über einen digitalen Zwilling des Straßenraum. Im Jahr 2023 wurde zuletzt eine Straßenbefahrung durch die in Baden (CH) ansässige Firma iNovitas AG durchgeführt. Dabei wurden die Straßen und Wege ebenfalls mit einem Multisensorsystem befahren. Dieses setzt sich aus drei stereoskopisch gerichteten RGB-Kameraeinheiten, einer hemispherischen „Ladybug“-RGB-Kamera, sowie einem ergänzenden LIDAR zusammen.

Diese „veredelten“ Geodaten werden ergänzt um die, von Seiten des Bayerischen Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) bereitgestellten Geobasis- und Geofachdaten im Rahmen der OpenData-Strategie.

Für die Anfertigung des Solar-Rahmenplanes konnte auf folgende Datensätze zurückgegriffen werden:

- 3D-Gebäudemodelle (LoD2) im CityGML-Format mit ALKIS®-konformen Standarddachformen und beschreibenden Attributen (Abb. 1 links)
- 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-Projektes erstellt.
- Zugriff auf den WebClient von TwinCity3D zur visuellen Sichtbarkeitsanalyse

- Zugriff auf den infra3D-Client zur Anfertigung von Straßenquerschnitten und Arbeiten mit Vorort-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

Abb. 1: Ausschnitt aus dem TwinCity3D-Client mit dem CityGML-LOD2-Modell auf der linken und des kongruenten texturierten Mesh-Modell aus den Befliegungsdaten auf der rechten Seite (RealityMaps)

4.2 Methodik

Im Rahmen eines Solarrahmenplans werden Untersuchungen durchgeführt, anhand derer beurteilt werden kann, wie eine PV-Anlage auf einem Gebäudedach zulässig ist und welche technischen und gestalterischen Kriterien aus denkmalpflegerischer Sicht einzuhalten sind. Die Sichtbarkeit aus öffentlichen Bereichen werden digital analysiert und validiert (Abb 2).

Für die Erstellung des Solarrahmenplans zur Klassifikation von Gebäudedächern für Photovoltaikanlagen werden folgende Arbeitsschritte definiert:

1) Grundlagenprüfung, bei der relevante Rahmenbedingungen aufgenommen werden. Dies sind im Einzelnen die Analyse von allgemeinen, rechtlichen Festsetzungen und Schutzstatus des Denkmals, die Bewertung der Dachneigung und -ausrichtung sowie die Prüfung der Sichtbarkeit – einer Identifizierbarkeit von Dachfarbe und -form im Radius von 800 m und 400 m – für eine potenziell stärker zu integrierende Form der PV-Module.

Daraufhin werden in 2) die Gebäude für den Solarrahmenplan kategorisiert. Ausschlaggebende Attribute sind aus dem Bereich des Denkmalschutzes ob ein Ensemble- oder Einzeldenkmalschutz vorliegt. Zusätzlich zu einer Solarpotenzialprüfung und der o.g. Sichtbarkeitsprüfung werden die Dachflächen, teilweise sogar Teildachflächen in vier Kategorien eingeordnet (von „höchste Anforderungen“ – Kategorie 0 bis „geringe Anforderungen“ Kategorie 3.3) Die PV-Modulkonfiguration schlägt dann Modulgrößen, Farben und Oberfläche für eine optimale Flächennutzung und visuelle Integration vor. 4) Der abschließende Gestaltungsvorschlag integriert als eine Art „Fliesenspiegel Solar“ den Vorschlag als Textur auf die Dachflächen im digitalen Zwilling.

Abb.2: Methodisches Ablaufschema der einzelnen Untersuchungsschritte (Bürkle & Bauder 2025)

4.2.1 Grundlagenprüfung mit Sichtbarkeitsanalyse und Dachformen – Alles was Licht berührt

Ein besonderer Punkt von Gestaltungsplanung ist nicht nur im Denkmalschutz die Überprüfung von Sichtbarkeiten. Methoden wie „Line of Sight“ in 3D-Stadtmodellen (Kolbe und Donaubaue 2021) oder Isovist-Technologien (Lonergan und Hedley 2016) stehen hier als neue Arten der Berechnung von Sichtbarkeiten im dreidimensionalen Kontext. Ein einfacher Weg der ersten Klassifikation von Sichtbarkeiten ist eine Radius-Berechnung um einen bestimmten, historisch wichtigen Beobachtungspunkt in Form eines Puffers. Diese Berechnung funktioniert allerdings nur bei wenigen wichtigen Punkten, ist das Ensemble / das Denkmal stark einsehbar, stößt diese generelle Berechnung an seine Grenzen bzw. muss auf Gebäudeebene nochmals über die o.g. Viewer überprüft werden.

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 Nah-und-Fernbereich (Bürkle & Bauder 2025, Herm&Benkeser 2025)

Ein in der Studie vielversprechender Ansatz ist die Sichtbarkeitsberechnung mithilfe von Flächenlichtern. Durch das Anheben des Flächenpolygons des öffentlichen Straßenraums auf 180cm über Bodenlevel und Setzen einer über die Gesamtfläche ausstrahlenden Lichtquelle werden an jeder Stelle des Polygons die Einsehmöglichkeiten eines Beobachters simuliert. Alle Dachflächen, die direktes Licht von dieser Lichtquelle aufnehmen, sind einsehbar. Im Umkehrschluss sind die Schattenbereiche Potenzialbereiche für PV-Anlagen, in denen aufgrund der fehlenden Einsehbarkeit KEINE besonderen Gestaltungsmaßnahmen formuliert werden müssen.

4.2.2 Kategorisierung der Gebäude als Grundlage des Solarrahmenplans

Aus den Aspekten der stadthistorischen Bedeutung, dem Schutzanspruch des Denkmals und der Einsehbarkeit findet im nächsten Schritt eine Kategorisierung statt. Dabei wurden vier Kategorien gebildet, die sich nach der Strenge der Anforderungen von „Kategorie 0 – Höchste Anforderungen“, über „Kategorie 1 – Hohe Anforderungen“ und „Kategorie 2 – Mittlere Anforderungen“ bis zur „Kategorie 4 – Geringe Anforderungen“ erstrecken. Die höchsten gestalterischen Anforderungen zur Nutzung von Solarenergie werden bei den Dachflächen derjenigen Gebäude formuliert, die aufgrund ihrer stadthistorischen Bedeutung und als Einzeldenkmal besonders sensibel zu behandeln sind. Für diejenigen Gebäude, die aufgrund ihrer Präsenz eine wichtige Bausteinwirkung innerhalb des denkmalgeschützten Ensembles haben, werden hohe Anforderungen formuliert werden müssen. Für Gebäude, die selbst keine oder nur eine geringe Raumwirkung aufweisen, im Hinblick auf die Dachlandschaft des Ensembles jedoch leicht einsehbar sind, werden später mittlere Anforderungen formuliert. Dachflächen von Gebäuden, die keine Einsehbarkeit aus dem öffentlichen Raum aufweisen, können mit geringen gestalterischen Anforderungen um eine solarenergetische Nutzung erweitert werden. Abb. 4 zeigt die exemplarische Kategorisierung eines zu beurteilenden Gebietes in der Altstadt Landsberg am Lech, das anhand des o.g. Ablaufschemas / Datenworkflows beurteilt und kategorisiert wurde.

Abb.4: Solarrahmenplan des Gebietes östlich des Hauptplatzes in Landsberg am Lech inklusive der Kategorieeinteilung sowie Dachflächenbilanzierung (Heim & Mink 2025)

4.2.3 Geopositionierte Bearbeitung am Objekt – auf dem Dach

Mithilfe der in den vorigen Arbeitsschritten erstellten Datensätze kann nun relativ einfach ein hausbasierter Steckbrief erstellt werden, der wie in einer Art Steckbrief sämtliche für die Installation von PV-Modulen benötigten Informationen enthält. Neben der formalen Einteilung in den Kategorietypos sind dies Informationen zur potenziell installierbaren PV-Fläche nach Modultypus inklusive eines Muster-Vorschlages, eine Sichtbarkeitsüberprüfung des installierten Moduls sowie eine grobe Ertragsrechnung aus den, in der GIS-Analyse ermittelten, räumlichen Werten.

Im Rahmen der Studie wurden für verschiedene Kategorien auch Belegungspläne für die jeweiligen Module in der zugeordneten Kategorie erstellt, die ähnlich eines Fliesenspiegels den räumlichen Eindruck vermitteln. Dieser Belegungsplan wird wiederum als Textur ausgegeben und kann später, im Idealfall georeferenziert als optionale Dachinformation in das kommunale GI-System zurück gespiegelt werden – CityGML liefert in der LOD3-Beschreibung hierfür eine Möglichkeit des Speicherns. Diese Textur kann auch für eine Fotomontage in der Ansicht des infra3D-Clients oder TwinCity3D zur schnellen visuellen Prüfung überlagert werden. Ein Beispiel für diese Möglichkeiten ist in Abbildung zu sehen.

Abb.5: Informationen zum PV-Modul, der Belegungsplan als Rohzeichnung und mit Textur, sowie die Fotomontage in TwinCity3D und der gerenderten Ausgabe im LOD2-Stadtmodell der Stadt Landsberg (Bauder & Bürkle 2025)

5 FAZIT

Innerhalb der Forschungsstudie konnten die für die Aufstellung eines Solarrahmenplans geforderten Aspekte in Kombination mit den vorhandenen Geodatenbeständen und unter Zuhilfenahme von Werkzeugen des digitalen Zwillinges nicht nur erfolgreich bearbeitet werden, sondern die methodischen Ansätze für die Erstellung eines Solarrahmenplanes gehen über die bisher erfolgreich umgesetzten Projekte wie in Wasserburg, Würzburg oder Bayreuth einen Schritt weiter. Die konsequente Einbeziehung der dreidimensionalen Morphologie und der Gestalt der Dachflächen im Einzelfall bei einer gleichzeitigen Möglichkeit der Automatisierung einzelner Klassifikationsschritte könnte in Zukunft die Aufstellung von Solarrahmenplänen erleichtern, beschleunigen, teilweise automatisierten und bauteilorientierter (dachflächenorientierter) verständlicher gestalten. Die getesteten Methoden helfen, örtliche Begebenheiten ohne zeitaufwändige Ortsbegehungen im Vorfeld zu analysieren, ersetzen jedoch im Einzelfall nicht die zielgerichtete Expertise von Experten am Objekt – denn, wie bei allen digitalen Methoden: Das Online geht nicht ohne das Offline.

6 AUSBLICK

In den nächsten Schritten sind Verschneidungen von (theoretischem) Solarpotenzial und den Möglichkeiten nach denkmalpflegerischer Beurteilung vorstellbar. Desweiteren ist vorgesehen, die exemplarisch angefertigten Steckbriefbewertungen einzelner Gebäude auf die verbleibenden Altstadtgebäude auszuweiten. Der resultierende Solarrahmenplan als Ganzes soll schließlich in den TwinCity3D-Viewer integriert werden, so dass Bauinteressenten sich vorab darüber informieren können, was auf den eigenen (Teil-)Dachflächen unter Berücksichtigung denkmalschutzfachlicher Aspekte zur Nutzung von Solarenergie möglich ist.

Durch die weitere, konsequente Einbeziehung von CityGML bzw. sogenannte „City Information Modelling (CIM)“-Ansätze, die Eigenschaften von GIS und BIM/IFC komprimiert verbinden, sollten auch fehlende Dimensionen wie Energiebedarfe, Aussagen über Fassaden und weitere Parameter (eine DSGVO-Konformität vorausgesetzt) über ein Schnittstelle wie z.B. OpenFOAM in den digitalen Zwilling überführt werden können.

7 LITERATUR

- Batty, Michael. 2018. Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 45: 817–820.
- Bayerisches Denkmalschutzgesetz BayDSchG. 2023. Art. 6 Maßnahmen an Baudenkmalern. <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayDSchG-6>. Zugegriffen: 13. Januar 2025.
- Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege. 2017. Das Kommunale Denkmalkonzept – Den historischen Ortskern gemeinsam gestalten und entwickeln. *Denkmalpflege Themen*.
- Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst. 2023. Änderungen im Denkmalschutz (FAQs). <https://www.stmwk.bayern.de/kunst-und-kultur/denkmalschutz/aenderungen-im-denkmalschutz-faqs.html>. Zugegriffen: 11. Februar 2025.
- Benner, Joachim, Andreas Geiger, und Karl-Heinz Häfele. 2016. Virtual 3D City Model Support for Energy Demand Simulations on City Level-The CityGML Energy Extension. *REAL CORP 2016. 21st International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society*.
- Broschart, Daniel, Marina Fischer, Juilson Jubanski, und Florian Siegert. 2024. Luftbilddaufnahmen, 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. *gis.Science – Die Zeitschrift für Geoinformatik* 2024: 19–26.
- Brüggemann, Thilo, und Petra von Both. 2015. 3D-Stadtmodellierung: CityGML. In *Building Information Modeling*, VDI-Buch, Hrsg. André Borrmann, Markus König, Christian Koch und Jakob Beetz, 177–192. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK. 2021. BMWK Newsletter Energiewende – Solarzellen werden immer effizienter. https://www.bmwk-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2021/05/Meldung/direkt-erfasst_infografik.html. Zugegriffen: 11. Februar 2025.
- Büro G.A.S. planen bauen forschen, Stuttgart. 2024. Solarrahmenplan der Stadt Würzburg .
- Dembski, Fabian, Uwe Wössner, und Mike Letzger. 2019. The Digital Twin – Tackling Urban Challenges with Models, Spatial Analysis and Numerical Simulations in Immersive Virtual Environments. In *eCAADe 37 / SIGRaDi 23*, Hrsg. JP Sousa, JP Xavier und G Castro Henriques, 795–804. Porto.
- Dembski, Fabian, Uwe Wössner, Mike Letzger, Michael Ruddat, und Claudia Yamu. 2020. Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 2307 12: 2307.
- Eidloth, Volkmar., Gerhard Ongyerth, und Heinrich Walgern. 2019. *Händbuch Städtebühnen Denkmalschutz*: im Auftrag der Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland.
- Grieves, Michael. 2014. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper 1: 1–7.
- KIT – IAI, Karlsruhe Institute of Technology Institute for Automation and Applied Informatics. 2024. KIT – IAI – Downloads – KITModelViewer.
- Kolbe, Thomas, und Andreas Donaubaue. 2021. Semantic 3D City Modeling and BIM. In *Urban Informatics*, Hrsg. Michael F. and Batty Michael and Kwan Mei-Po and Zhang Anshu Shi Wenzhong and Goodchild, 609–636. Singapore: Springer Singapore.
- Kolbe, Thomas, und Gerhard Gröger. 2004. Towards unified 3D city models. In *Proc. of the ISPRS Comm. IV Joint Workshop on Challenges in Geospatial Analysis*.
- Lackner, Anna, Carolin Monsberger, und Gustav Resch. 2024. *Kostenprognose von PV-Systemen und Stromspeichern bis 2040*. Wien, Aachen.
- Lonergan, Chris, und Nick Hedley. 2016. Unpacking isovists: a framework for 3D spatial visibility analysis. *Cartography and Geographic Information Science* 43: 87–102.
- Luser, Hansjörg, und Günther Lorber. 1997. 3D-Stadtmodell Graz: Anforderungen, Ansprüche, Anwendungen. In *Computergestützte Raumplanung*, Hrsg. Manfred Schrenk. Wien: Selbstverlag des Instituts für EDV-gestützte Methoden in Architektur und Raumplanung der Technischen Universität Wien.
- Meier, Hans-Rudolph. 2010. Harmonie und Differenz oder: Von der Anmut des Denkmals und den Zumutungen der Denkmalpflege. In *DENKMALWERTE Beiträge zur Theorie und Aktualität der Denkmalpflege*, Hrsg. Hans-Rudolph Meier, 47–58. Berlin, München: Deutscher Kunstverlag.
- Meier, Hans-Rudolph. 2013. Werte : Begründungen der Denkmalpflege in Geschichte und Gegenwart. In *Werte : Begründungen der Denkmalpflege in Geschichte und Gegenwart*, Jovis Diskurs, Hrsg. Hans-Rudolf Meier, Ingrid Scheuermann und Wolfgang Sonne, 14–5. Berlin: Jovis.
- Sandmeier, Judith. 2023. *Die Erfindung des Ortsbildes Malerischer Städtebau, Ortsbildpflege und Heimatschutz in Bayern um 1900*.

- Sandmeier, Judith, und Susanne Fischer. 2023. Denkmal Information Bayern. In Klimaschutz und Denkmalpflege, Bd. 181, Hrsg. Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, 5–14. München .
- Solfrank, Peter. 2024. Modellprojekt in Wasserburg: Photovoltaik in historischer Altstadt. BR | Schwaben + Altbayern. <https://www.youtube.com/watch?v=CdAwLWWEhkc>. Zugegriffen: 11. Februar 2025.
- Stadt Bad Windsheim, Büro G.A.S. planen bauen forschen, und Referat A VII BLfD. 2025. Solarrahmenplan der Stadt Bad Windsheim (in Aufstellungsphase/vor. VÖ 5/2025).
- Stadt Bayreuth, und RHA Reicher Haase Assoziierte. 2024. Rahmenplanung Solaranlagen für Denkmalensembles in Bayreuth. <https://www.bayreuth.de/rathaus-buergerservice/planen-bauen/rahmenplanung/solaranlagen-denkmal-ensembles/>. Zugegriffen: 11. Februar 2025.
- Stadt Haßfurt. 2023. Solarrahmenplan Altstadt Haßfurt Erläuterung der Zonierung (erweitert). www.blfd.bayern.de. Zugegriffen: 11. Februar 2025.
- Stadt Weißenburg in Bayern, plan&werk Büro für Stadtplanung, und BLfD. 2024. Änderung der Satzung über besondere Anforderungen an die Baugestaltung in der Altstadt von Weißenburg i. Bay. (Baugestaltungssatzung) – Solaranlagen auf Dächern.
- Zeile, Peter, Ralph Schildwächter, und Tony Poesch. 2005. 3D-Stadtmodell-Generierung aus kommunalen Geodaten und benutzerspezifische Echtzeitvisualisierung mithilfe von Game-Engine-Techniken. In CORP 2005 & Geomultimedia05, Hrsg. Manfred Schrenk, 479–485. Wien https://www.corp.at/archive/CORP2005_ZEILE.pdf.