

Digitale Informationsmodelle für die Dachstühle des Aachener Doms

Von Fabian Rolke, Xinyu Yu, Shiyi Xie, Anne Göbels, Oliver Schulz, Jakob Beetz

Motivation und Anwendungsfall

Die Dächer des Aachener Doms bilden nicht nur den von Weitem sichtbaren, krönenden Abschluss des UNESCO-Welterbes, sondern sichern auch dessen strukturellen Erhalt. Regelmäßige Schadenskartierungen, Messungen und Sanierungen tragen zur Konservierung der Dachstühle des Bauwerks aus karolingischer Zeit bei.

Eine Teildisziplin des Methodenkanons zur langfristigen Instandhaltung der schiefer- und bleibedeckten Holzkonstruktionen liegt neben dem Einsatz moderner Mess- und Erfassungstechnologien in der Aufbereitung analoger sowie in der Strukturierung digitaler Ressourcen. Zeichnungen, Pläne, Prüfberichte, Fotografien, digitale Modelle und hochauflösende 3D-Scans aus verschiedenen zeitlichen Perioden existieren meist in Form disparater und

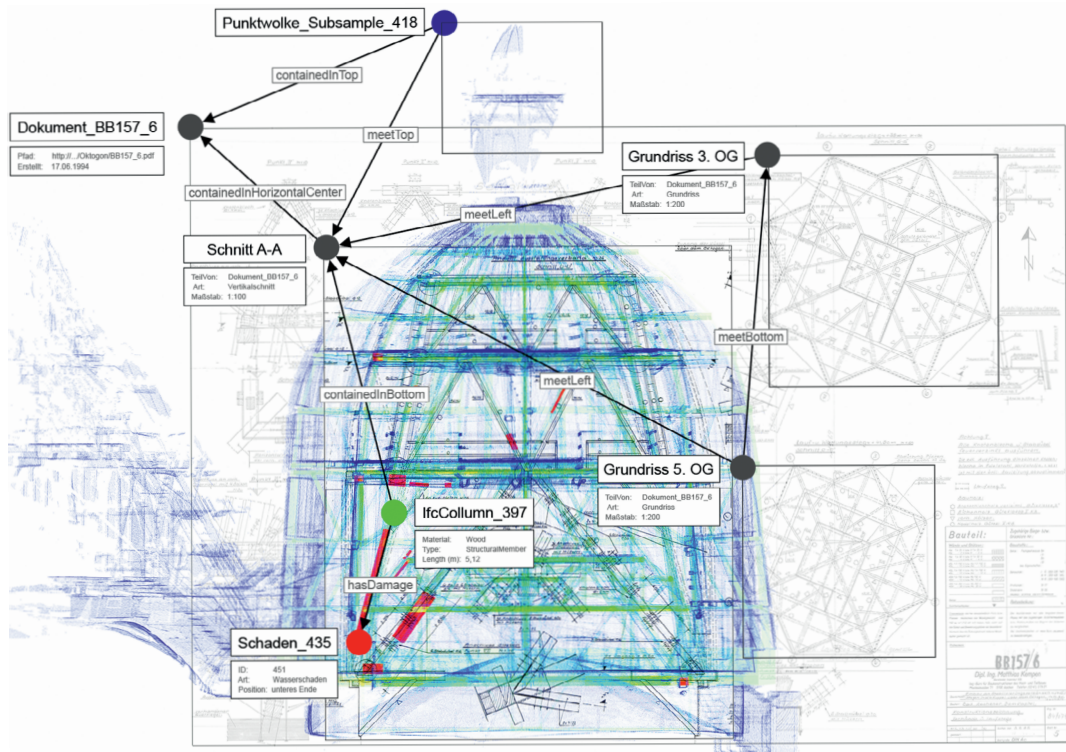


Abb. 1: Ausrichtung heterogener, räumlich annotierter Daten (Oktogon).

Foto: Fabian Rolke

oft nicht maschinenlesbarer Informationsfragmente in multimodalen, voneinander getrennten Silos. Diese Fragmente weisen durch ihren meist nur implizit angegebenen räumlichen und zeitlichen Kontext eine eingeschränkte Verknüpfbarkeit mit anderen Daten auf.

Durch die Annotation expliziter, maschinenlesbarer räumlicher Angaben können diese einst fragmentierten Datenstücke Teil eines räumlichen Informationsnetzwerks werden (Abb. 1). Ein solches Netzwerk könnte PlanerInnen, IngenieurInnen und Maschinen das Abfragen komplexer räumlicher Zusammenhänge ermöglichen (Göbels & Beetz, 2024):

„Welche Elemente treffen auf das obere Ende der Stütze XY?“

„Welche Pläne bilden den Schaden XY ab?“

„Welche Rotation weist diese Wandscheibe XY relativ zur Längsachse des Gesamtbauwerks auf?“

Die Auseinandersetzung mit den Daten der vielgliedrigen, in sich gewundenen und komplexen Baustruktur der Dachstühle des Aachener Doms soll Antworten auf Fragen zur passgenauen Ausrichtung einzelner Datenstücke liefern. Dadurch sollen Informationsverluste durch Überlagerungen verschiedener Fragmente minimiert werden.

Engpässe des heutigen Informationsmanagements für Bestandsbauten

Die aktuell weitläufig eingesetzte Technologie Building Information Modelling (BIM) kann zur Modellierung von Bauteilen und zur Annotation ihrer semantischen Informationen wie Klasse, Materialität oder Kosten genutzt werden (Borrmann et al., 2018). Dabei wird die Gesamtgeometrie des Gebäudes durch die Modellierung der einzelnen Bauteile abgebildet. Man spricht daher von objektorientiertem Modellieren. Die Erstellung dieser Modelle erfolgt größtenteils manuell und erweist sich somit als zeitaufwändig und kostenintensiv. Zudem fehlen multimodale Werkzeuge, die die Integration zusätzlicher Datentypen wie 3D-Scans oder Sensordaten ermöglichen würden (Krijnen & Beetz, 2020).

Punktwolken bestehen oft aus mehreren hunderttausend oder mehreren Millionen einzelnen Punkten, die in einem

dreidimensionalen kartesischen Raum verteilt sind und mit den Farbwerten der gescannten Oberfläche angereichert werden können. Sie sind ein mittlerweile weit verbreitetes Medium zur Bestandsaufnahme, das kostengünstig mit Structure-from-Motion-Verfahren durch Kameras oder zunehmend günstigere Laserscanner bis hin zu Endgeräten wie Handys und Tablets erstellt werden kann. Außer Raumkoordinaten und Farben der einzelnen Punkte, die sich höchstens durch sogenannte Vermaschung noch in Oberflächenmodelle verwandeln lassen, besitzen Punktwolken jedoch keinerlei semantische Information, also Bedeutung. Objekte wie „Balken“, „Stütze“, „Wand“ oder „Schadensbereich“ liegen im Rohzustand nicht vor. Sie können bislang in der Regel nur durch menschliche Betrachter interpretiert werden.

Trotz einiger Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens zur automatisierten Erkennung von Gruppen von Punktwolken (Clustering) sind automatisierte Verfahren bislang nur sehr begrenzt verfügbar. Für historische und einzigartige Konstruktionen wie den Aachener Dom kommt erschwerend hinzu, dass kaum Trainingsdatensätze in ausreichender Menge erstellt werden können. Im Gegensatz dazu existieren bei alltäglichen Objekten des physischen Raums, etwa Personen, Fahrzeugen oder Möbeln, millionenfach annotierte Datensätze.

Darüber hinaus liefern Punktwolken selbst keinerlei Informationen über nicht sichtbare oder verdeckte Bauteile. Durch die Projektion eines scheibenförmigen, 1,5 m tiefen Punktwolken-Segments auf eine technische Zeichnung können verdeckte Bauteile und Schichten sowie semantische Informationen des Plans ergänzend mit den Kanten (projizierte Flächen) des 3D-Scans überlagert werden (Abb. 2). Gleichzeitig werden Differenzen zwischen geplanten und ausgeführten Bauzuständen sichtbar.

Prototypen zur Einbindung externer Formate wie Punktwolken in BIM weisen allerdings meist unzureichende Übertragbarkeit, Dynamik oder Skalierbarkeit auf (Krijnen & Beetz, 2020). Daher besteht Bedarf an einer standardisierten Technologie zur Bereitstellung expliziter Verknüpfungen zwischen heterogenen Informationsträgern.

Lösungsansätze

HBIM oder Historisches Building Information Modelling, ist eine spezialisierte Form von BIM, die sich auf historische und denkmalgeschützte Bauwerke fokussiert (Ewert, 2024). Sie untersucht die Integration komplexer geometrischer Informationen, etwa Punktwolken, historischer Bauwerksdaten, Materialien und Zustände einzelner Bauteile in BIM. Die Erfassung und Integration der Bauwerksinformationen des Aachener Doms in ein BIM-Modell erfordert daher eine direkte Auseinandersetzung mit den Herausforderungen und Engpässen des aktuellen BIM-Standards.

Eine seit den frühen 1990er-Jahren bewährte Technologie zur Verknüpfung verschiedenster Daten ist die Linked-Data-Technologie (Borrmann et al., 2018). Dabei werden Ressourcen, also identifizierbare und verknüpfbare Datenobjekte, mit URLs versehen, die über Beziehungstypen

semantisch miteinander verbunden werden können. Werden mehrere Ressourcen in Beziehung gesetzt, spricht man von einem Wissensgraphen. Ähnlich dazu werden Ontologien, auch Vokabulare genannt, eingesetzt, um Wissen formal zu strukturieren. Sie definieren Konzepte eines bestimmten Fachbereichs sowie deren Eigenschaften und Beziehungen. In Kombination ermöglichen Wissensgraphen und Ontologien eine präzise dynamische Modellierung und Abfrage komplexer Datenbeziehungen. Linked Data bietet somit eine geeignete Lösung für die Problematik starrer und geschlossener Datenaustauschformate, die Informationen in disparaten Strukturen abspeichern. Bisherige Ontologien fokussieren auf die semantische Verknüpfung von Ressourcen, während die räumliche Verlinkung bisher weitgehend außer Betracht blieb (Schulz et al., 2023). Es besteht daher die Anforderung an eine Raumontologie, die verschiedene Datentypen räumlich kartieren kann, ohne die systemimmanenten Möglichkeiten von Linked Data zu überschreiten.

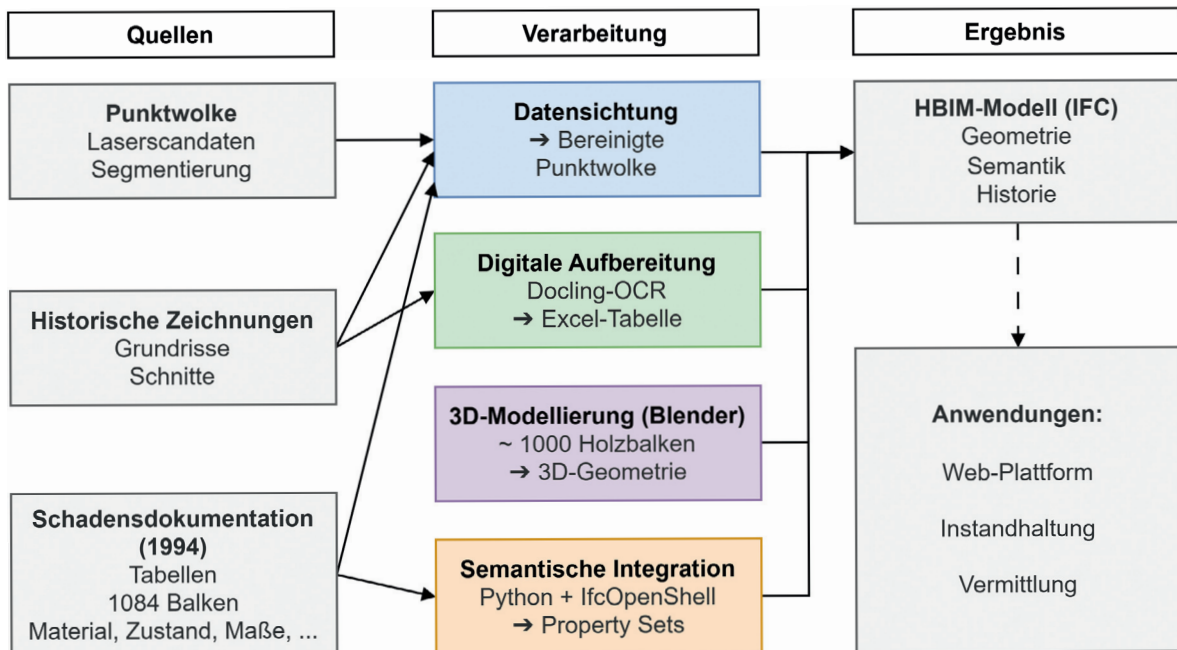


Abb. 3: Prozess der HBIM-Modellerstellung.

Foto: Xinyu Yu, Shiyi Xie

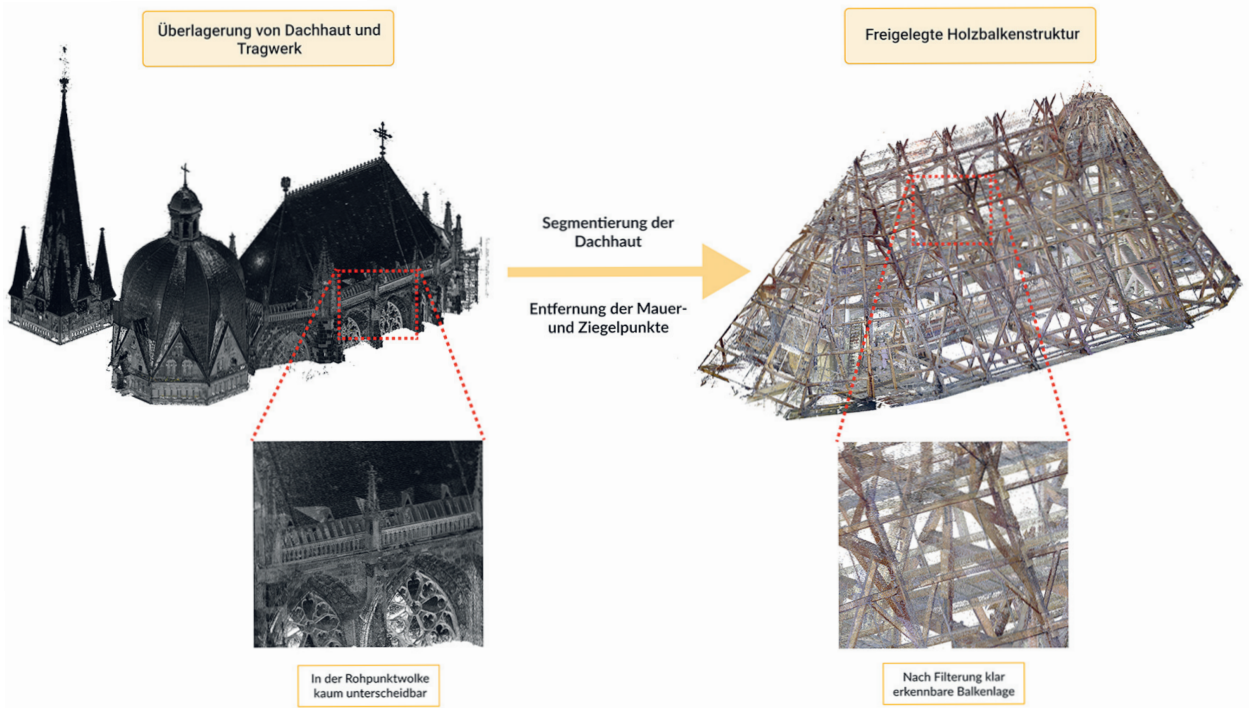


Abb. 4: Punktwolken-Segmentierung der Chorhalle.

Foto: Xinyu Yu, Shiyi Xie

Forschungsprototypen

Zur Evaluation der Lösungsansätze wurde ein digitaler Raum benötigt, in dem heterogene Daten räumlich angeordnet werden können. Blender ist eine Open-Source-Modellierungssoftware mit einer breiten Palette an Importfunktionen für verschiedene Dateiformate, unter anderem auch Punktwolken. Seit einigen Jahren ist sie durch die Bonsai-Erweiterung zudem für die Erstellung und Bearbeitung von BIM-Modellen einsetzbar. Diese Eigenschaften machen die Software zu einem leistungsfähigen Werkzeug für die Erstellung eines HBIM-Modells und die Umwandlung räumlicher Bauwerksdaten in ein Linked-Data-Format.

Im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Studierende und Mitarbeitende des Lehrstuhls für computergestütztes

Entwerfen an der Fakultät für Architektur der RWTH Aachen beide Ansätze anhand der Dachstühle der Chorhalle und des Oktogons als strukturierte digitale Informationsmodelle des Aachener Doms.

Blender als HBIM-Werkzeug (Chorhalle)

Der Prozess der Erstellung des HBIM-Modells des Aachener Doms gliederte sich wie folgt (Abb. 3):

1. Umfassende Sichtung der Daten.
2. Digitale Aufbereitung des Schadensberichts aus dem Jahr 1994 mittels Texterkennung (OCR).
3. Segmentierung der Punktwolke des Dachstuhls der Chorhalle (Abb. 4).
4. Manuelle Modellierung der Balkengeometrien.
5. Umwandlung der Geometrien und semantischen Informationen in das standardisierte BIM-Format IFC (Industry Foundation Classes).

Datentyp	Geometrietyp	Entitäten	Eckpunkte	Kanten	Flächen
Technische Zeichnungen	Fläche	19	76	76	19
Schadensmarker	Würfel	17	136	204	102
Bauteile	Flächen, Würfel, Quad-basierte Polygone	507	7236	11620	5820
Fotografien	Fläche	3	12	12	4
Punktwolke	Punkt	1	2,041,562	0	0
Kamera	Punkt	22	22	0	0
Gesamt	-	569	2,049,044	11,912	5,945

Tab. 1: Daten- und Geometrietypen des heterogenen Datenmodells des Oktogons.

Foto: Fabian Rolke

Bauteilgeometrien und 3D-Scans durch eine einheitliche geometrische Kodierung als Instanzen von SPOT zu exportieren (Tab. 1). Ein iterativer Prozess aus Geometrie-exporten in ein Linked Data-Format und dem anschließenden Reimport als Geometrien offenbarte noch auszubauende geometrische Angaben des Vokabulars für eine präzise, bauteilscharfe Ausrichtung.

Rück- und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, durch die strukturierte Verarbeitung und den gezielten Zugriff auf heterogene Bestandsdaten mittels räumlicher Kartierung einen Beitrag zu einem besseren Verständnis des langfristigen Verhaltens bestehender Bauwerke zu leisten. Im ersten Schritt wurde durch Göbels et al. die SpaceType-Ontologie entwickelt, die das maschinelle Verständnis räumlicher Konzepte und Klassen stärken soll. Diese Ontologie wurde nun durch konkrete Anwendungsfälle evaluiert und weiterentwickelt. Der Fokus lag dabei auf der Funktionalität mit verschiedenen Ressourcen, der Ermittlung topologischer Zusammenhänge und der Eingliederung der Ressourcen und ihrer Subelemente in Hierarchien.

Die strukturelle Komplexität des Aachener Doms sowie die Heterogenität der verfügbaren Daten lieferten nicht nur wertvolle Beiträge zur Struktur und zum notwendigen Informationsgehalt von SPOT, sondern auch zum theoretischen Rahmen der übergeordneten Systemarchitektur.

Durch die Analyse verschiedener Projektionspaare, etwa Punktwolke und Plan oder Schaden und Geometrie, wurde die Notwendigkeit deutlich, neben relativen Ortsangaben auch absolute Abstands- oder Versatzwerte zu integrieren, um passgenaue Überlagerungen zu ermöglichen. Diese Werte führen allerdings zu komplexeren Datenstrukturen und Abfragen, die derzeit eigens entwickelte Funktionen erfordern (Zhang et al., 2018).

Bei der Umsetzung und Pflege dieser Funktionen könnte der Einsatz künstlicher Intelligenz künftig unverzichtbar sein. Neben der Problematik einer bauteilscharfen, aber Linked Data-nativen räumlichen Indexierung muss die Überführung von 3D-Scans und Kamerapositionen als Ursprünge und positionelle Rückführungen von Fotografien in SPOT erprobt werden. Die Auseinandersetzung mit diesen und weiteren komplexen räumlichen Datentypen fördert die Robustheit und gleichzeitig Flexibilität des Vokabulars.

Die aus dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse flossen in die kommenden Lehrinhalte des Lehrstuhls ein. Die Erstellung von HBIM-Modellen mithilfe von Blender soll mit den Studierenden weitergehend erprobt und ausgereift werden. Eine Integration einer zeitlich und visuell nachvollziehbaren Inspektionshistorie aus unterschiedlichen Datentypen in der Open-Source-Software wäre ein nützlicher Beitrag für die HBIM-Community.

In einem nächsten Schritt sollen die erarbeiteten Strukturen und SPOT genutzt und weiterentwickelt werden, um Schadensmuster und Degradationsprozesse mittels KI aus einem Satz heterogener Daten semi- oder vollautomatisch zu erkennen. PlanerInnen und IngenieurInnen könnten somit frühzeitig Zustandsindikatoren und statische Prognosen als Grundlage für Handlungsempfehlungen erhalten.

Eine vertiefte Analyse und räumliche Kartierung der Schadensdaten des Aachener Doms würde sowohl dieses Forschungsvorhaben stärken als auch eine strukturierte Dokumentation der historischen und aktuellen Inspektionsdaten ermöglichen. Wenn die Ergebnisse dieser Forschung Entscheidungsprozesse zur Instandhaltung des Aachener Doms über die nächsten 150 Jahre maßgeblich unterstützen, wird das grundlegende Ziel dieser Arbeit erreicht: die Lebensdauer von Architekturen als Bedeutungsträger durch räumliche Datenstrukturen und Wissensmodellierungen zu verlängern.

Danksagung: Die Arbeit wurde durch die großzügige Verfügbarmachung von Laserscandaten und anderen Datensätzen durch den Lehrstuhl für Architekturgeschichte, Prof. Dr.-Ing. Anke Naujokat und Yannick Ley, M.Sc., sowie den Dombaumeister Herrn Dr. Jan Richarz unterstützt. Bei ihnen möchten wir uns herzlich bedanken.

Literaturverzeichnis

Borrmann, A. (Ed.), König, M. (Ed.), Koch, C. (Ed.), & Beetz, J. (Ed.). (2018). Building information modeling: Technology foundations and industry practice. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3>

Ewert, E. (2024). Heritage-BIM – die Nutzung digitaler Modelle in der Baudenkmalpflege (Dissertation, Technische Universität Dresden & Fachhochschule Erfurt).

Göbels, A., & Beetz, J. (2024). Relative Location Ontology: An ontological model for representing directional topological relationships between spatial entities in oriented space. LDAC 2024 – 12th Linked Data in Architecture and Construction Workshop, Bochum, Germany.

Göbels, A., Schulz, O., & Beetz, J. (2024). Towards a Common Digital Space: Proposing a Schema for Spatially Linking Heterogeneous Resources. Proceedings of the 41st International Conference of CIB W78.

Krijnen, T., & Beetz, J. (2020). An efficient binary storage format for IFC building models using HDF5 hierarchical data format. Automation in Construction, 113, 103134.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103134>

Schulz, O., Werbrouck, J., & Beetz, J. (2023). Towards Scene Graph Descriptions for Spatial Representations in the Built Environment. 30th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering, EG-ICE, 2023.