

Informationsintegration in der Betriebsphase von Bauwerken: Eine diagnostikspezifische Ontologie im ICDD

Paul-Christian Schuler¹ , Yannic Stark² and Mahsa Mirboland¹ 

¹Professur Intelligentes Technisches Design, Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystraße 13A, 99423 Weimar

²Marx Krontal Partner GmbH, Zum Hospitalgraben 2, 99425 Weimar

E-mail(s): paul-christian.schuler@uni-weimar.de, yannic.stark@marxkrontal.com, mahsa.mirboland@uni-weimar.de

Abstract: Während der Entwurfs-, Bau- und Betriebsphasen eines Bauwerks werden Daten in verschiedenen Formaten und Versionen produziert und zwischen den beteiligten Akteuren ausgetauscht. In der Betriebsphase ist es entscheidend, einen robusten und nachhaltigen Ansatz zur Integration und Speicherung von Daten zu haben. Linked-Data-Container (LDC) können genutzt werden, um Verbindungen und Beziehungen zwischen verschiedenen Datenquellen und Prozessen auf strukturierte und standardisierte Weise herzustellen. Das Ziel dieser Studie ist es, einen umfassenden Projektablauf durch die Entwicklung und Implementierung einer spezifischen Ontologie für Diagnostikprojekte zu modellieren und in einen LDC zu integrieren. Die vorgestellte Ontologie mit dem Namen Structural Information (SI)-Ontologie wurde auf Basis der diagnostischen Anforderungen an Datenerfassung -bereitstellung und -integration sowie der erforderlichen Informationsstrukturen in Bezug auf Prozessabläufe und die daraus resultierenden Daten konzipiert. Ein entwickeltes Framework ermöglicht die Integration dieser Ontologie in den Information Container for linked Document Delivery (ICDD) gemäß den bestehenden ISO 21597-Standards. Durch die Verlinkung von Dokumenten wird eine effiziente Nutzung der Ontologieinstanzen als Informationsgrundlage ermöglicht. Abschließend werden potenzielle Anwendungsbereiche diskutiert. Es wird aufgezeigt, wie bestehende Ontologien im Bauwesen sinnvoll an die entwickelte SI-Ontologie angegliedert werden können, um die Datenintegration und -nutzung weiter zu optimieren und zugänglicher zu machen.

Keywords: Building Information Modeling, Semantic Web, Linked Building Data, Building Diagnostics, Digital Twin



Erschienen in Tagungsband 35. Forum Bauinformatik 2024, Hamburg, Deutschland, DOI: 10.15480/882.13514

© 2024 Das Copyright für diesen Beitrag liegt bei den Autoren. Verwendung erlaubt unter Creative Commons Lizenz Namensnennung 4.0 International.

1 Einleitung

Die Erhaltung und Überwachung von Brückenbauwerken stellt eine zentrale Aufgabe im Ingenieurwesen dar. Sie erfordert die Durchführung von regelmäßigen visuellen Inspektionen, diagnostischen Untersuchungen und Monitoring-Techniken. Die Anwendung der Building Information Modeling (BIM)-Methodik, für die eine Digitalisierung der Structural Information (SI)-Daten erforderlich ist, bietet bedeutende Möglichkeiten. Diese Technologien ermöglichen eine effizientere Erfassung, Verarbeitung und Analyse der Daten sowie eine fundierte Entscheidungsfindung bezüglich der Instandhaltungsmaßnahmen. Die fortlaufende Weiterentwicklung und Anpassung dieser Technologien und Methoden sind entscheidend, um die Langlebigkeit und Sicherheit von Brückenkonstruktionen während ihres gesamten Lebenszyklus zu gewährleisten und zu optimieren. Aus diesem Grund befasst sich diese Arbeit mit der Integration der Daten, die während diagnostischer Untersuchungen erhoben werden.

2 Forschungsgrundlage

2.1 Instandhaltungsmanagement

Ingenieurbauwerke wie Brücken sind für eine Nutzungsdauer von bis zu 100 Jahren ausgelegt, wobei strukturelle Veränderungen langsam erfolgen. Um ihre Sicherheit und Funktionstüchtigkeit sicherzustellen, sind gemäß DIN 1076 [1] regelmäßige Inspektionen alle 3 bis 6 Jahre notwendig. Diese Inspektionen, meist visuell, dokumentieren sichtbare Schäden und Mängel, die zur Zustandsbewertung des Bauwerks herangezogen werden [2]. Ein definierter Algorithmus ermittelt daraus eine Zustandsnote, die für die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen entscheidend ist. Bei gravierenden Schäden werden weiterführende Untersuchungen wie Monitoringsysteme und diagnostische Verfahren eingesetzt. BIM unterstützt die digitale Transformation der Bauindustrie durch digitale Darstellungen der physischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks. Während Standards für BIM im Neubau etabliert sind, fehlen spezifische Anforderungen für die Integration von SI-Daten aus Bauwerksuntersuchungen zur Bestandsbewertung. Bauwerksdiagnostische Untersuchungen, die beispielsweise den inneren Aufbau und Materialeigenschaften eines Bauwerks liefern, sind entscheidend für die Erhaltung bestehender Infrastrukturen und werden mittels zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Prüfverfahren durchgeführt. Derzeit werden diese Informationen meist analog verarbeitet und in Berichtsform bereitgestellt, was zu einer fragmentierten Datenhaltung führt. Diagnostische Untersuchungen gehen über visuelle Inspektionen hinaus und nutzen verschiedene Methoden und Messverfahren zur Ermittlung realitätsnaher Zustandsinformationen. Sie werden anlassbezogen durchgeführt, um spezifische Fragestellungen zu klären oder umfassende Bestandsaufnahmen zu erstellen. Die Digitalisierung dieser Diagnostikdaten und deren Integration in ein BIM-Modell können die Bewertung und Planung von Instandhaltungsmaßnahmen erheblich verbessern [3].

2.2 Ontologien und Wissensgraphen

Ontologien stellen eine entscheidende Komponente in der modernen Informationswissenschaft sowie im semantischen Web dar. Sie sind nicht nur Instrumente zur systematischen Erfassung und Organisation von Wissen, sondern auch wesentliche Komponenten für die Interoperabilität zwischen verschiedenen Wissensdomänen. Die Definition von Klassen und Beziehungen innerhalb eines spe-

zifischen Gegenstandsbereichs erlaubt die Schaffung einer einheitlichen Terminologie, wodurch Ontologien die Grundlage für eine gemeinsame Sprache schaffen. Dies fördert die Auffindbarkeit und Wiederverwendung von Informationen und unterstützt die Datenintegration durch Bereitstellung eines gemeinsamen Verständnisses der Datenkategorien und -beziehungen.

Im Kontext des semantischen Webs ermöglichen Ontologien Computern die Verarbeitung und das Verständnis von Inhalten. Dieses Verständnis basiert auf der Fähigkeit, komplexe Zusammenhänge zu erkennen und automatisierte Schlüsse zu ziehen. Die Instanziierung von Ontologien resultiert in der Bildung von Wissensgraphen, welche Wissen in einer vernetzten Form darstellen und somit neue Einsichten und Entdeckungen ermöglichen.

Die Darstellung von Bauwerksmodellen als Wissensgraphen erweist sich als sinnvoll. Dies betrifft auch Ingenieurbauwerke, insbesondere Brücken [4], [5]. Forschende entwickeln Verfahren zur Verknüpfung von Structural Health Monitoring (SHM)-Daten mit Ontologien, wobei der Schwerpunkt auf der Integration kontinuierlicher Messungen an Bauwerken liegt [6], [7].

2.3 Linked Data Container (LDC)

Die wachsende Vielfalt digitaler Informationen in der Baubranche hat verstärkte Forschungsanstrengungen im Bereich der LDCs hervorgerufen. LDCs verknüpfen und integrieren Daten aus verschiedenen Quellen, um sie leichter auffindbar, zugänglich und nutzbar zu machen [8]. Sie ermöglichen die Zusammenführung von Informationen aus verschiedenen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes und erleichtern die Interoperabilität zwischen verschiedenen Informationsquellen und Datenformaten, was die Zusammenarbeit im Bauprozess unterstützt. LDCs basieren auf dem Linked-Data-Konzept, das durch Standards wie Resource Description Framework (RDF) und SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL) den semantischen Informationsaustausch ermöglicht [8]. Zwei Hauptausprägungen von LDCs im Bauwesen sind der Information Container for Linked Document Delivery (ICDD), auf Grundlage eines internationalen Standards nach ISO 21597 [9], [10], und der Multi-Model-Container nach DIN 18290 [11].

Der ICDD verwendet das komprimierte ZIP-Format (*.icdd) und enthält eine *Index.rdf*-Datei, die alle zu verlinkenden Dateien beschreibt. Der ICDD-Container nutzt zwei RDF-basierte Ontologie-Ressourcen:

- Die Container-Ontologie definiert die Struktur und Metadaten des Containers.
- Die Linkset-Ontologie definiert die semantischen Verknüpfungen zwischen den eingebetteten Dokumenten und Daten.

Die ISO 21597-1 [9] definiert die ICDD-Struktur, bestehend aus einer *Index.rdf*-Datei und drei spezifischen Ordnern:

- Ontology resources: Enthält alle im Container genutzten Ontologien.
- Payload documents: Speichert die von Nutzern erstellten Dokumente.
- Payload triples: Enthält die erzeugten Instanzen basierend auf den verfügbaren Ontologien.

Diese Struktur ermöglicht Verknüpfungen auf subdokumentarer Ebene, etwa von Objektattributen innerhalb einer IFC-Datei. Im Rahmen der Forschungstätigkeiten zum ICDD wird zunehmend dessen Anwendbarkeit im Bauwesen untersucht. Dies führte zu Erkenntnissen, die auch für die visuellen Brückeninspektionen und Straßenerhaltungsplanung von Nutzen sind [12].

3 Methodologie

Dieses Kapitel beschreibt die Methodik zur Implementierung eines graphbasierten Datenaustauschs in diagnostischen Projekten. Ziel ist die Erhebung, Speicherung und langfristige Bereitstellung von Informationen. Über die Lebensdauer von Bauwerken erzeugen und verarbeiten verschiedene Akteure zahlreiche Informationen. Ein wiederverwendbarer und maschinenlesbarer Datenstandard ist daher unerlässlich. Dieser Standard ermöglicht effiziente Erfassung und zukünftige Bereitstellung der Informationen. Diagnostische Untersuchungen an Bauwerken nutzen diverse Methoden, deren Ergebnisse in Form, Informationsgehalt und Nutzbarkeit variieren. Diese Studie zielt darauf ab, diese Informationen in einer Ontologie abzubilden, um sie langfristig nutzen zu können. Die Integration der Ontologie in den ICDD ermöglicht die Nutzung der standardisierten Dateistruktur und Verlinkungsmöglichkeiten. Es wird die Structural Information (SI)-Ontologie mit ihrer modularen Konstruktion und den implementierten diagnostischen Verfahren vorgestellt. Ein Framework zeigt die Einbindung in den ICDD, illustriert durch ein praxisbezogenes Anwendungsbeispiel. Abschließend erfolgt eine kritische Bewertung des Systems und die Darstellung möglicher Limitationen für zukünftige Verbesserungen. Diese Methodik bietet einen umfassenden Ansatz zur Implementierung eines graphbasierten Datenaustauschsystems für diagnostische Projekte, um Informationen effizient und langfristig zu verwalten.

4 Implementierung

Das System entstand aus der Notwendigkeit, heterogene Daten zwischen Fachplaner*innen während eines diagnostischen Projekts auszutauschen und diese langfristig nutzbar zu machen. Der ICDD nach ISO 21597 [9], [10] bildet eine gute Grundlage. Daher ist die Erstellung einer spezifischen Ontologie zur Speicherung von Informationen aus diagnostischen Projekten und deren Einbindung in den ICDD der nächste sinnvolle Schritt.

4.1 Ontologie

Der Aufbau einer Ontologie umfasst die präzise Definition des Anwendungsbereichs und der Ziele, einschließlich der Domäne und des Umfangs. Eine Ontologie besteht aus Klassen, deren Beziehungen und Attribute durch Datentypen definiert werden. Die in Abbildung 1 dargestellte Ontologie zeigt Klassen und deren Beziehungen. Sie gliedert sich in drei Hauptbereiche: projektspezifische Klassen, Klassen zur Verortung der Untersuchung und Klassen für die Untersuchungsverfahren. Dank der definierten Beziehungen in der Ontologie kann eine Untersuchung einem spezifischen Ort innerhalb eines Bauwerks zugeordnet werden. Jede Untersuchung enthält Informationen über den Durchführungsort, das Projekt und das Ziel. Eine Instanz der Klasse „Untersuchungsverfahren“ beinhaltet Details zur Zugehörigkeit des Durchführungsorts, des Projekts und zur Zusammenfassung von Instanzen in einem Untersuchungsbereich.

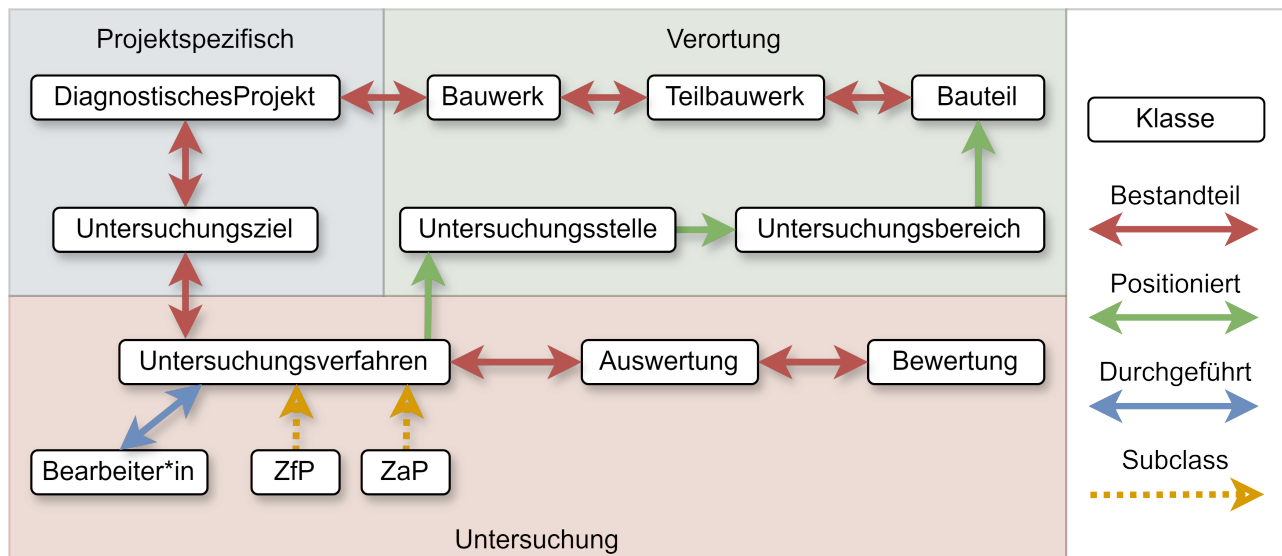


Abbildung 1: Übersicht des Strukturmodells der Ontologie

Die Untersuchungsverfahren sind als Subklassen modelliert und den Klassen zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) und zerstörungsarme Prüfung (ZaP) zugeordnet. Bereits modellierte Klassen sind Bohrung (untergliedert in Spiral- und Kernbohrung), Endoskopie, Sondierungsöffnung und Ultraschalluntersuchung. Laboruntersuchungen, welche zum Teil direkt am Bauwerk und zum Teil im Labor durchgeführt werden, bilden eine Unterklasse der Untersuchungsverfahren und sind in den einzelnen Verfahren weiter untergliedert. Dazu gehören derzeit die Chloridanalyse, die Carbonatisierungstiefenbestimmung, die Druckfestigkeitsprüfung, die Rohdichtebestimmung sowie die E-Modulbestimmung. Weitere Verfahren können als Subklassen hinzugefügt werden. Die Auswertungsklasse ist mit der Untersuchungsverfahren-Klasse verknüpft, sodass verschiedene Ergebnisse aggregiert werden können.

4.2 Anbindung an ICDD

Die zuvor vorgestellte Ontologie bietet ein Schema, um alle notwendigen Informationen, die bei einer diagnostischen Untersuchung entstehen, systematisch zu erfassen. Dies ermöglicht es, sowohl die Untersuchung selbst als auch die daraus gewonnenen Erkenntnisse jederzeit nachverfolgen zu können. Dennoch bleibt es teilweise erforderlich, mit Dateien in verschiedenen Datenformaten zu arbeiten. Diese sollen nicht nur über die *Linkset.rdf*-Ontologie miteinander verknüpft werden, sondern bei Bedarf auch mit indizierten Objekten der SI-Ontologie.

Die SI-Ontologie wird im Ordner *Ontology resources* abgelegt, während der durch die Instanziierung der Ontologie entstehende Knowledge Graph im Ordner *Payload triples* gespeichert wird. Alle anderen Dateien werden gemäß der ISO 21597 [9], [10] in einer geeigneten Struktur im Ordner *Payload documents* abgelegt.

Die Datei *Index.rdf* definiert den Inhalt des Containers und initiiert alle vorhandenen Dokumente, sodass diese durch eine Uniform Resource Identifier (URI) eindeutig identifizierbar sind. Um aus Klassen der SI-Ontologie Verlinkungen zu Dateien herzustellen, wird wie in der Abbildung 2 dargestellt

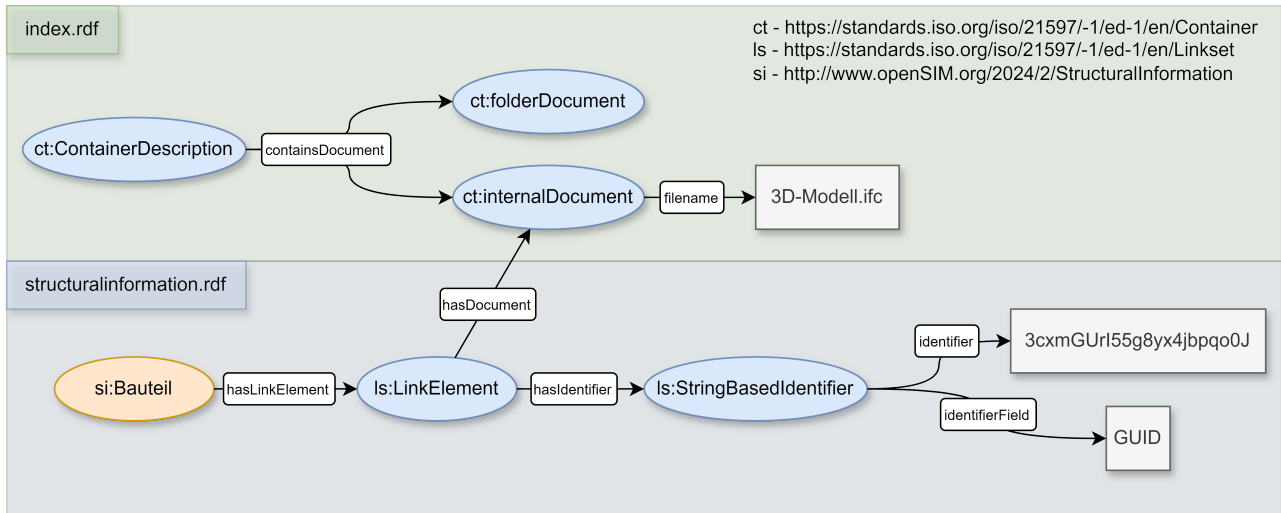


Abbildung 2: Darstellung der Anbindung der SI-Ontologie an den ICDD

das Objektattribut *hasLinkElement* verwendet, welches auf ein *LinkElement*-Objekt verweist. Die darauf folgende Struktur entspricht dem Schema, das in der ISO 21597 [9], [10] beschrieben ist.

5 Anwendungsbeispiel

Das Schema wurde in einem diagnostischen Projekt erprobt, das Bohrkernentnahme und Druckfestigkeitsprüfung einer Stahlbetonbrücke umfasste. Der Auftraggeber (AG) erstellt einen ICDD mit allen relevanten Dateien zum Bauwerk und zur Projektdurchführung. Bei einem vorhandenen Gebäudemodell können Bauwerks- und Teilbauwerksklasse aus der SI-Ontologie instanziiert und mit Dateien verknüpft werden (Abbildung 3a). Der vom AG erzeugte Container dient im Vergabeverfahren als Kalkulationsgrundlage und zur Einreichung von Bewerbungsunterlagen (Abbildung 3a/b).

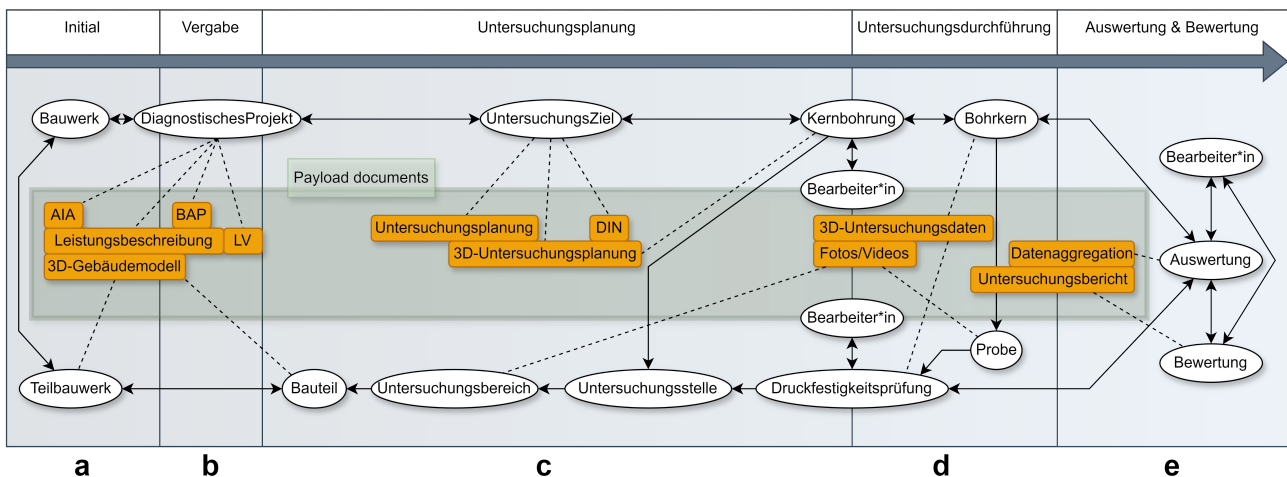


Abbildung 3: Integration von SI-Daten anhand der Bestimmung der Druckfestigkeit von Bohrkernen

Nach Vertragsabschluss erstellen Diagnostik-Fachplaner*innen eine Untersuchungsplanung aus der die in Abbildung 3c dargestellten SI-Klassen zur Abstimmung mit allen Fachplaner*innen instanziiert werden und Verknüpfungen zu Dokumenten entstehen können. Nach der Freigabe der Planung führen

Diagnostiker*innen die Untersuchungen durch, wobei gewonnene Informationen als Attribute den Entitäten in Abbildung 3d zugeordnet werden. Abweichungen in der Versuchsdurchführung können auftreten und anhand der Entitäten in Abbildung 3c/d dokumentiert werden. Nach Auswertung und Bewertung der Untersuchungen (Abbildung 3e) entstehen Textdokumente, die mit Objekten verknüpft und dem AG sowie Fachplaner*innen als Arbeitsgrundlage dienen. Die abschließende Übergabe des Containers stellt die Nachvollziehbarkeit des Projektverlaufs sicher und macht alle Informationen langfristig nutzbar.

6 Diskussion & Ausblick

Die SI-Ontologie ist eine spezialisierte Ontologie zur Strukturierung und Darstellung von zerstörungsfreien und zerstörungswarmen Prüfverfahren bei Brückenbauwerken. Sie umfasst projektspezifische Klassen und Attribute, die sowohl das Bauwerk als auch die diagnostischen Aspekte beschreiben. Diese Strukturierung ermöglicht die systematische Erfassung, nachvollziehbare Speicherung und Analyse detaillierter Untersuchungsinformationen. Die Integration der SI-Ontologie in den ICDD schafft eine solide Datengrundlage für Fachplaner*innen, wodurch alle Projektbeteiligten den aktuellen Stand eines Projektes einsehen können. Die Verlinkung von Dateien, die nicht als semantische Tripel dargestellt werden, ermöglicht eine kontextbezogene Interpretation. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass neben dem Bericht auch alle notwendigen Details übermittelt werden, was zu einer zentralen Sammlung detaillierter Informationen führt. Langfristig ist jedoch eine Integration in eine Datenbank erforderlich, da separierte Container keine dauerhafte Lösung zur Datenhaltung darstellen. Zudem ist die Nutzung des ICDD durch verfügbare Anwendungen zum Schreiben und Lesen der Container sowie durch die Integration in Common Data Environments begrenzt. Zukünftig werden der SI-Ontologie weitere Untersuchungsverfahren hinzugefügt, um ein breiteres Spektrum der Fachdomäne Bauwerksdiagnostik abzudecken. Zudem wird geprüft, wie die SI-Ontologie mit anderen Ontologien verknüpft werden kann, um robuste Knowledge Graphs pro Bauwerk zu erstellen, einschließlich der verlustfreien Integration verschiedener Koordinatenreferenzsysteme. Der vorgeschlagene Workflow und die entwickelte Ontologie führen zu einer übersichtlicheren und nachvollziehbaren Bearbeitung diagnostischer Projekte. Die Erstellung solcher Container ermöglicht die semantische Anreicherung und langfristige Speicherung großer heterogener Datenmengen, was für zukünftige Vorhaben wie die Erstellung eines Digitalen Zwillings von großer Bedeutung ist.

Acknowledgements

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des OpenSIM-Forschungsprojekts durchgeführt, welches durch die mFUND-Initiative des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) unter dem Förderkennzeichen 19F2217F gefördert wurde.

Literatur

- [1] »DIN 1076:2024-02, Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen –Überwachung und Prüfung«,

- [2] B. für Digitales und Verkehr (BMDV), *Digitaler Zwilling von Brücken - Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen*. Berlin: Eigenverlag, 2023.
- [3] C. Fritsch, C. Voigt, J. Burkhardt, R. Arndt und S. Marx, »Digitale Bauwerksdiagnose—ein Projekt zur digitalen Transformation«, *Bautechnik*, 2024.
- [4] J. Beetz, J. v. Leeuwen und B. d. Vries, »IfcOWL: A case of transforming EXPRESS schemas into ontologies«, *AI EDAM*, Jg. 23, Nr. 1, S. 89–101, Feb. 2009. DOI: 10.1017/S0890060409000122.
- [5] A. Göbels und J. Beetz, »Conversion of legacy domain models into ontologies for infrastructure maintenance«, *Proceedings of the 9th Linked Data in Architecture and Construction Workshop*, S. 20–31, 2021. DOI: 10.18154/RWTH-2021-07330.
- [6] G. P. Tsialiamanis, D. J. Wagg, I. Antoniadou und K. Worden, »An Ontological Approach to Structural Health Monitoring«, in *Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 8*, B. Dilworth und M. Mains, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 51–59. DOI: 10.1007/978-3-030-47717-2_6.
- [7] R. Li, T. Mo, J. Yang, S. Jiang, T. Li und Y. Liu, »Ontologies-Based Domain Knowledge Modeling and Heterogeneous Sensor Data Integration for Bridge Health Monitoring Systems«, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Jg. 17, Nr. 1, S. 321–332, Jan. 2021. DOI: 10.1109/TII.2020.2967561.
- [8] J. Beetz, P. Pauwels, K. McGlenn und S. Tormä, »Linked Data im Bauwesen«, in *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021, S. 223–242. DOI: 10.1007/978-3-658-33361-4_11.
- [9] »DIN EN ISO 21597-1:2021-07, Informationscontainer zur Datenübergabe_- Austausch-Spezifikation_- Teil_1: Container (ISO_21597-1:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_21597-1:2020«, Beuth Verlag GmbH, Techn. Ber. DOI: 10.31030/3137795.
- [10] »DIN EN ISO 21597-2:2021-07, Informationscontainer zur Datenübergabe_- Austausch-Spezifikation_- Teil_2: Dynamische Semantik (ISO_21597-2:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_21597-2:2020«, Beuth Verlag GmbH, Techn. Ber. DOI: 10.31030/3192763.
- [11] R. J. Scherer und S.-E. Schapke, Hrsg., *Informationssysteme im Bauwesen 1: Modelle, Methoden und Prozesse*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-40883-0.
- [12] A.-H. Hamdan, *Ein ontologiebasiertes Verfahren zur automatisierten Bewertung von Bauwerkschäden in einer digitalen Datenumgebung* (Berichte des Instituts für Bauinformatik Heft 19), 1. Auflage. Dresden: Institut für Bauinformatik, Fakultät Bauingenieurwesen, TU Dresden, 2023.