

Ontologie zur baubegleitenden Qualitätssicherung

S. Seiß, J. Lünig, J. Melzner

ZUSAMMENFASSUNG Mangelhafte Bauleistungen sind eine dauerhafte Herausforderung, mit der die Bauwirtschaft konfrontiert ist. Dabei ließen sich Fehler in der Bauausführung durch die Anwendung von detaillierten Prüfplänen frühzeitig erkennen oder verhindern. Derzeitige Methoden zur Prüfplanung sind manuell, zeitaufwendig und von individueller Erfahrung abhängig, was zu einer unzureichenden Planung in Form von beschränkten Checklisten führt. Zur Planung und Beschreibung eines projektspezifischen Prüfplans bedarf es diverser heterogener Informationen sowie hinreichendem Prüfplanungswissen. Hierbei müssen individuell vertragliche Vereinbarungen, normative Regeln sowie firmenspezifische Anforderungen berücksichtigt werden. Bisher fehlt jedoch eine formalisierte und explizite Darstellung von Prüfplanungswissen und prüfplanungsrelevanten Informationen. Daher wird in diesem Beitrag die Ontologie für Bauqualitätssicherung (OCQA) vorgestellt. Die Entwicklung der OCQA dient dazu, Prüfplaner und Prüfer mit relevantem Prüfplanungswissen und -informationen zu versorgen. Die Funktionsweise der Ontologie wird anhand eines Fallbeispiels einer Trockenbauwand evaluiert.

An ontology for inspection planning in construction

ABSTRACT Poor construction quality is one of the most significant challenges facing the construction industry. Inspections based on detailed quality inspection plans are crucial for detecting and minimizing construction failures. Current inspection planning methods are often manual, time-consuming, and dependent on individual experience, leading to inadequate planning and limited checklists. Inspection planning relies on heterogeneous information and sufficient inspection knowledge. This knowledge is based on regulations or project- and company-specific inspection knowledge. However, a formalized representation in handling inspection-planning-related knowledge and information is missing. To address this issue, we introduce the Ontology for Construction Quality Assurance (OCQA). The OCQA supports inspection planners and inspectors with relevant planning knowledge and information. The ontology is evaluated using a case study of drywall installation.

STICHWÖRTER

Qualitätssicherung, Prüfplanung, Bauausführung, Wissensrepräsentation

1 Einleitung

„Pfusch am Bau“ ist auf vielen Baustellen mehr als nur eine Redewendung. Eine Studie des Bauherren-Schutzbund e.V. stellte in 100 Neubauten durchschnittlich 20 Mängel pro Neubau in der Bauausführung fest sowie 9 weitere bei der Abnahme [1]. Die Folge von Baumängeln und -fehlern sind kosten- und zeitintensive Nacharbeiten, die wiederum ein erhebliches Konfliktpotenzial zwischen den beteiligten Parteien bergen [2]. Nach einer Umfrage von BauInfoConsult schätzen deutsche Bauakteure ihre Fehlerkosten in eigenen Projekten für das Jahr 2022 auf 8,1 % bezogen auf den gesamten Jahresumsatz der Baubranche von 160 Mrd. Euro [3]. Zusätzlich führen mangelhafte Ausführungen auch zu Imageschäden des ausführenden Unternehmens sowie des gesamten Bauvorhabens.

Qualitätsmanagementsysteme bestimmen gemäß der DIN EN ISO 9000:2015 die notwendigen Prozesse und Ressourcen, die zur Erreichung geforderter Qualitätskriterien erforderlich sind [4]. Übertragen auf die Baubranche sollen die

geschuldeten Ausführungsqualitäten mittels Maßnahmen zur Qualitätssicherung wie Qualitätskontrollen oder -prüfungen gewährleistet werden. Ein hoher Konformitätsgrad erbrachter Bauleistungen erfordert eine sorgfältige Prüfplanung, in welcher die Anzahl, der Ort, die Prüfmethode sowie das jeweilige Prüfmittel bestimmt werden. Derzeitige Qualitätsplanungen sind von manuellen Prozessen und hohen Zeitaufwendungen geprägt sowie von der individuellen Erfahrung der Planenden abhängig [5, 6].

In der Baubranche stellen Ontologien seit jüngster Zeit einen Lösungsansatz für die Bereiche Datenintegration, Wissensmanagement und Informationsextraktion dar [7]. Ontologien stammen aus der Philosophie und werden in der Informatik zur formalen Definition von Begriffen und deren Beziehung bezogen auf eine Anwendungsdomäne verwendet [8]. Übertragen auf die digitale Planung von Qualitätsprüfungen bedarf es eines domänen spezifischen Wissensmodells, welches Vorgaben aus Normen und Richtlinien, Restriktionen der Prüftechniken sowie qualitätsbezogene Erfahrungen abbildet.

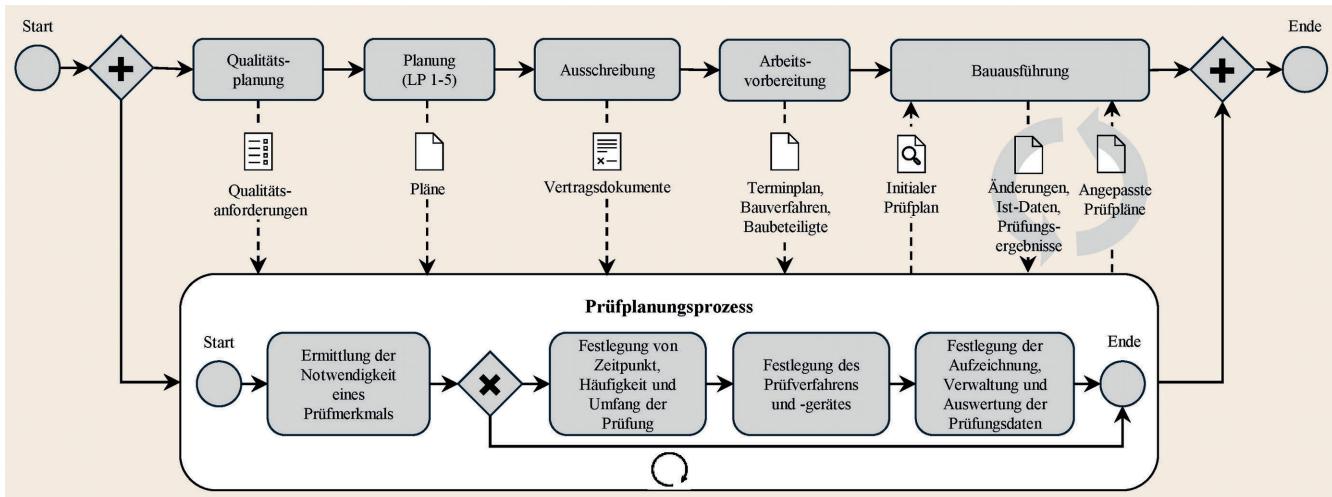


Bild 1. Parallelisierung des Prüfplanungsprozesses zu den Projektphasen. *Grafik: eigene Darstellung*
Fig. 1. Process of inspection planning in the project life cycle and required information. *Source: own representation*

Zur Reduzierung von Planungsaufwendungen bei gleichzeitiger Erhöhung von Planungsqualitäten in der Prüfplanung wird nachfolgend die Ontologie zur baubegleitenden Qualitätssicherung (OCQA engl.: Ontology for Construction Quality Assurance) entwickelt. Die OCQA dient 1) der Bereitstellung des heterogenen Informationsbedarfs der Prüfplanung, 2) der Beschreibung von Prüfplänen und 3) der geordneten Dokumentation von Wissen zur Planung von Prüfungen. Durch die Anwendung der OCQA werden Wissenssilos aufgebrochen und Informationen in Bezug auf die Bauausführung und Prüfplanung projektbezogen sowie firmenübergreifend bereitgestellt.

Der weitere Aufbau des Beitrags gliedert sich in fünf Kapitel. Zunächst erfolgt eine Einführung in die Grundlagen der Prüfplanung sowie der Semantic Web Technologie. Darauf aufbauend wird der Stand der Wissenschaft in Kapitel 3 dargestellt sowie das weitere methodische Vorgehen in Kapitel 4 aufgezeigt. Entsprechend der gewählten Methodik erfolgt die Entwicklung der Ontologie in Kapitel 5 und deren Evaluierung in Kapitel 6. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung sowie der Ausblick zur weiteren Forschung.

2 Grundlagen zur Konzeptionierung eines Wissensmodells

Für die Konzeptionierung eines Wissensmodells zur Planung von Prüfungen werden nachfolgend die Grundlagen der Prüfplanung sowie die technologischen Hintergründe von Ontologien und Semantic Web Technologien vorgestellt.

2.1 Einführung der Prüfplanung

Gemäß der DIN EN ISO 9000:2015 dienen Prüfungen sowohl der Bestimmung als auch dem Nachweis von Abweichungen oder Konformitäten gegenüber festgelegten Anforderungen [9]. Gemäß DIN 55350 werden die erforderlichen Prüfungen sowie die Details einer oder mehrerer Prüfungen in einem Prüfplan spezifiziert. Dieser Prüfplan ist das Ergebnis der Prüfplanung und enthält Spezifikationen, die zur Durchführung der Prüfungen

notwendig sind [10, 11]. Der Prüfplan fungiert als umfassender Leitfaden für die Prüfungsdurchführung und bildet somit die Grundlage für die Qualitätsbewertung [12]. Die Prüfplanung besteht aus vier Schritten. Jeder dieser Schritte dient dazu, die Charakteristiken einer Prüfung in Form von W-Fragen genau zu spezifizieren [12]. Wie in **Bild 1** dargestellt, erfolgt die Prüfplanung parallel zu den Projektphasen und muss dementsprechend iterativ durchgeführt werden. Darüber hinaus ist die Prüfplanung mit ständigen Änderungen in Bauprojekten konfrontiert. Folglich ist die Prüfplanung eine zyklische Aufgabe über das gesamte Bauprojekt hinweg. Insbesondere während der Bauausführung muss die Prüfplanung auf die Dynamik der Bauprozesse reagieren, dargestellt durch die zyklischen Kreise in Bild 1 [13, 14].

Die Erstellung des Prüfplans erfolgt vor Beginn der Prüfungen unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des jeweiligen Prüfobjekts [15]. Im Bauwesen bedeutet dies, dass Prüfungen sowohl individuell durch die jeweiligen Projektteilnehmer als auch in gemeinsamer Abstimmung mit den Projektbeteiligten geplant werden müssen. Das Vier-Augen-Prinzip bildet hierbei eine wesentliche Grundlage, indem es die unabhängige Prüfung sicherstellt [16].

Die für die Prüfplanung erforderlichen Informationen variieren sowohl mit der Arbeitsvorbereitung, dem gewählten Bauverfahren sowie den örtlichen Gegebenheiten. Für eine vollständige Prüfplanung ist die Einbindung von Informationen aus internen und externen Dokumenten unabdingbar. Neben projektspezifischen Informationen müssen außerdem regulatorische Vorschriften aus Normen, Standards und Richtlinien berücksichtigt werden. Zu den Mindestanforderungen zählen hierbei die anerkannten Regeln der Technik. Dabei ist es entscheidend, dass Informationen aus den Planungs-, Ausschreibungs- und Arbeitsvorbereitungsphasen leicht zugänglich und systematisch der Prüfplanung bereitgestellt werden [12]. Derzeit werden die zahlreichen Projektdokumente jedoch in unterschiedlichen Datenformaten und an verschiedenen Orten in separierten Datensilos gespeichert. Dies erfordert technologische Lösungen, die eine Bereitstellung und Integration heterogener Daten für die Prüfplanung ermöglichen.

2.2 Einführung von Ontologien und Semantic Web

Die für die Prüfplanung notwendigen Daten stehen primär als unstrukturierte Dokumente zur Verfügung und sind über verschiedene Informationssilos verstreut. Eine maschinelle Verarbeitung ist aufgrund von fehlender Semantik und Datenzusammenhängen meist nicht möglich [17]. Zur Verknüpfung, Wiederverwendung und maschinenlesbaren Verarbeitung von Daten wurde das Konzept des Semantic Web entwickelt [18]. Das Semantic Web bietet offene Standards, Interoperabilität, Flexibilität und Erweiterbarkeit. Hierzu wurden durch das World Wide Web Consortium (W3C) standardisierte Spezifikationssprachen wie Resource Description Framework (RDF), RDF-Schema (RDF-S) und die Web Ontology Language (OWL) veröffentlicht [19]. In RDF werden Ausprägungen der realen Welt anhand von Tripeln aus Subjekt, Prädikat und Objekt beschrieben (Bild 2) [20, 21]. RDF-S erweitert RDF durch die Definition von Klassen und deren Beziehungen und wird durch OWL um eine ausdrucksstärkere Semantik erweitert [22, 23]. Zur Abfrage der in einem RDF hinterlegten Daten kann die durch W3C standardisierte Abfragesprache SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL) verwendet werden [21].

Ontologien sind ein wesentlicher Bestandteil des Semantic Web und dienen als Rahmen für die konzeptionelle Modellierung von Wissen innerhalb einer bestimmten Domäne. Unter einer Ontologie ist eine geordnete Wissensdarstellung anhand einer domänen spezifischen Semantik zu verstehen [24]. Ontologien bilden Wissen mithilfe von Informationen und deren Beziehungen ab und ermöglichen es, anhand von Axiomen und Regeln neues Wissen zu schlussfolgern. Einmal formuliertes Wissen wird dadurch projektübergreifend wiederverwendbar und ermöglicht zugleich die automatische Generierung neuen Wissens [25].

3 Stand der Wissenschaft

3.1 Allgemeine Ontologien im Bauwesen

Die Anwendung von Ontologien wurde in den letzten Jahrzehnten für die unterschiedlichen Bereiche des Bauwesens untersucht. Im Themenfeld der Planung wurden die Industry Foundation Classes (IFC) in die ifcOWL übertragen [26]. Aufgrund der Komplexität der ifcOWL wurde die Building Topology Ontology (BOT) entwickelt, um das semantische Modell zur Repräsentation von Gebäuden und räumlichen Informationen zu vereinfachen [27]. Des Weiteren existieren eine Vielzahl an Ontologien zur Beschreibung spezifischer Bauwerkstypen wie bspw. Brücken [28], Tunnel [29] oder Straßenbauten [30].

Die e-COGNOS und deren Erweiterung durch die Domain Ontology For Construction Knowledge (DOCK 1.0) sowie die Infrastructure and Construction PROcess Ontology (IC-PRO-Onto) bilden ein Kernkonzept zur Beschreibung von Bauprozessen und relevantem Bauausführungswissen [31, 32]. Auf Grundlage dieser Arbeiten wurden die Digital Construction Ontologies (DiCon) durch Zheng et al. [33] entwickelt, welche umfassende Entitäten und Relationen im Zusammenhang mit Bauabläufen definiert. Die Ontologie ermöglicht unter anderem die Darstellung und Integration baurelevanter Informationen aus heterogenen Systemen. Darüber hinaus modellieren die DiCon detailliertes Wissen zur Planung der Bauausführung. Aufgrund der Komplexität der DiCon wurde die ontology for production control of

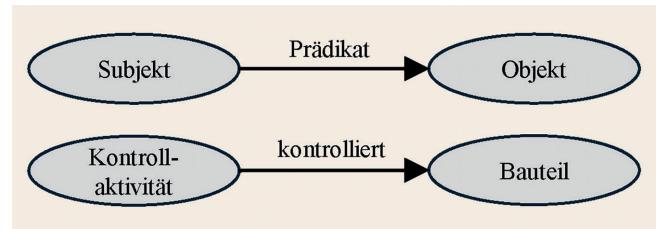


Bild 2. Darstellung eines Tripels (oben) sowie dessen beispielhafter Ausprägung als Klassen und deren Beziehung (unten). *Grafik: eigene Darstellung* Fig. 2. Visualization of a triple (top) and example instance of class and relationship (bottom). *Source: own representation*

construction sites (cSite) entwickelt, welche eine vereinfachte Version der DiCon darstellt [34]. Zusätzlich wurden die Internet of Construction Process Ontology (ioc) [35] sowie die Digital Twin Construction Ontology [36] veröffentlicht, die auf den Konzepten der DiCon aufbauen, jedoch nicht deren Umfang erreichen.

Allen vorgestellten Ontologien ist gemein, dass Prüfungen und wesentliche Aspekte der Prüfplanung vernachlässigt werden. Allerdings stellen die Ontologien wesentliche Grundlagen für die Entwicklung der OCQA bereit. In der weiteren Bearbeitung wird auf den DiCon aufgebaut, da sie die umfassendsten Bauprozessontologien darstellen, welche generische Konzepte bereitstellen, online verfügbar sind und darüber hinaus durch verschiedene Anwendungen evaluiert wurden.

3.2 Ontologien mit Bezug zur Prüfplanung

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden bestehende Ontologien im Bereich der Qualitätsprüfung im Bauwesen systematisch analysiert, um den aktuellen Stand der Forschung zu identifizieren und die Eignung der existierenden Modelle zu bewerten. Die Bewertung der Ontologien erfolgte auf Grundlage der Kriterien in Tabelle 1. Dabei ist entscheidend, dass Ontologien den Zugang zu vielfältigen und heterogenen Informationen gewährleisten, den einschlägigen Prüfplanungs- und Qualitätsnormen entsprechen und eine nicht-monolithische Struktur aufweisen, um die Wiederverwendung und Validierung von Wissen zu ermöglichen. Darüber hinaus sollten Ontologien allgemeines Prüfungswissen und Schlüsselmerkmale des Planungsprozesses unterstützen. Folglich ist die Veröffentlichung der Ontologien notwendig, um deren Wiederverwendung und die semantische Interoperabilität zu gewährleisten.

Die Untersuchung der Ontologien (Tabelle 1) zeigt, dass bestehende Ontologien mehrere Einschränkungen aufweisen: 1) unzureichende Informationsquellen, 2) inkonsistente Terminologie, 3) monolithisches Design sowie 4) eine Fokussierung auf spezifische Gewerke oder isolierte Aufgaben. Derzeit existiert keine angemessene Ontologie, die die Anforderungen der Prüfplanung im Bauwesen vollständig abdeckt und gemäß semantischen Webstandards veröffentlicht ist. Diese Arbeit schließt die bestehenden Lücken durch die Entwicklung der OCQA, welche eine strukturierte, maschinenlesbare Darstellung von Domänenwissen bietet, heterogene Informationssysteme integriert und Anwendungen wie die Informationsabfrage und Inferenz ermöglicht.

Tabelle 1. Zusammenfassung der analysierten Ontologien zur Prüfplanung in der Bauausführung.
Table 1. Summary of ontologies related to inspection planning in construction.

Ontologien	C3R ² -Ontology [37]	CQIEOntology [38]	Martinez et al. [39]	HCIOntology [40]
Beschreibung	Die C3R ² -Ontologie formalisiert und organisiert die Anforderungen an die Baukonformität und nutzt SPARQL-Abfragen zur Automatisierung der Konformitätsprüfung.	Die CQIEOntology konzentriert sich auf die Prüfung der Einhaltung von Qualitätsanforderungen, wobei die Planung von Inspektionen durch SWRL-Regeln und Axiome zur Bewertung der Bauqualität unterstützt wird.	Die Ontologie verwendet SPARQL-Abfragen, um Qualitätsspezifikationen zu extrahieren, die sich auf Bauobjekte, Prozesse und Materialien für die Herstellung von Stahlleichtbauwänden außerhalb der Baustelle beziehen.	Die HCIOntology unterstützt die Inspektionsplanung, indem sie über SPARQL-Abfragen vordefinierte Prüfgegenstände aus einem Katalog prüfungsrelevanter Lohnbestandteile abruft.
Anforderungen	Planungsdaten	X	X	X
	Planungsdaten unter Verwendung von BIM	X	-	X
	Vertrag	-	-	-
	Organisationsdaten	-	X	-
	Bauverfahren	-	X	-
	Änderungen im Bauprozess	-	-	-
	Regularien	X	X	X
	Terminologie gemäß den Qualitätsnormen	-	-	-
	Monolithischer Aufbau der Ontologie	X	X	X
	Projektspezifische Prüfplanung	-	X	-
	Gewerkebezogene Prüfplanung	-	-	X
	Vollständige Abbildung der Prüfmerkmale entsprechend den Aufgaben der Prüfplanung	-	-	-
	Ontologie ist veröffentlicht und dokumentiert	-	-	-

4 Forschungsmethodik

In diesem Beitrag wird die Linked Open Terms (LOT) Methodik von Poveda-Villalón et al. zur Entwicklung einer neuen Ontologie angewandt [41]. Der Ansatz wird sowohl im wissenschaftlichen als auch im industriellen Kontext verwendet, spiegelt die aktuellen Erkenntnisse der Ontologieentwicklung wider und wurde in einer Vielzahl von Projekten erfolgreich validiert [41]. Gemäß der LOT-Methode wird die Ontologieentwicklung in die vier Phasen der 1) Spezifikation, 2) Implementierung, 3) Veröffentlichung und 4) Wartung untergliedert (**Bild 3**) [41].

In der Phase der Spezifikation (1) werden Umfang, Zweck, Anwendungsfälle, Nutzer und Anforderungen an die Ontologie definiert. Der Wissenserwerb ist ein fortlaufender, iterativer Prozess während der gesamten Ontologiespezifikation [42]. Das Ergebnis der Spezifikationsphase ist das Ontology Requirements Specification Document (ORSD), welches Ziele, verfügbare In-

formationsquellen sowie potenzielle Mehrwerte der Ontologie beschreibt [43].

Im Anschluss der Spezifikation erfolgt gemäß Bild 3 die Implementierung (2) der Ontologie. Die Implementierung umfasst die Konzeptualisierung, die Recherche bestehender Ontologieansätze sowie die Kodierung des Konzepts. Die Evaluierung der entwickelten Ontologie schließt die Implementierung ab. Im Zuge der Evaluierung werden die formale Korrektheit und die Funktionalität bewertet [44]. Die Ontologieimplementierung stellt einen iterativen Prozess dar, in welchem identifizierte Unklarheiten oder Unvollständigkeiten zu einer Anpassung der Ontologie führen.

Nach der Implementierung erfolgt die Veröffentlichung (3) der Ontologie über eine feste URL sowie ein Dokument zur Erläuterung der Anwendung. Die Wartung (4) und Versionierung erfolgt auf Grundlage eines GitHub Repository, welche es Nutzern ermöglicht, Fehler, Verbesserungen und Anmerkungen direkt zu kommunizieren [49].

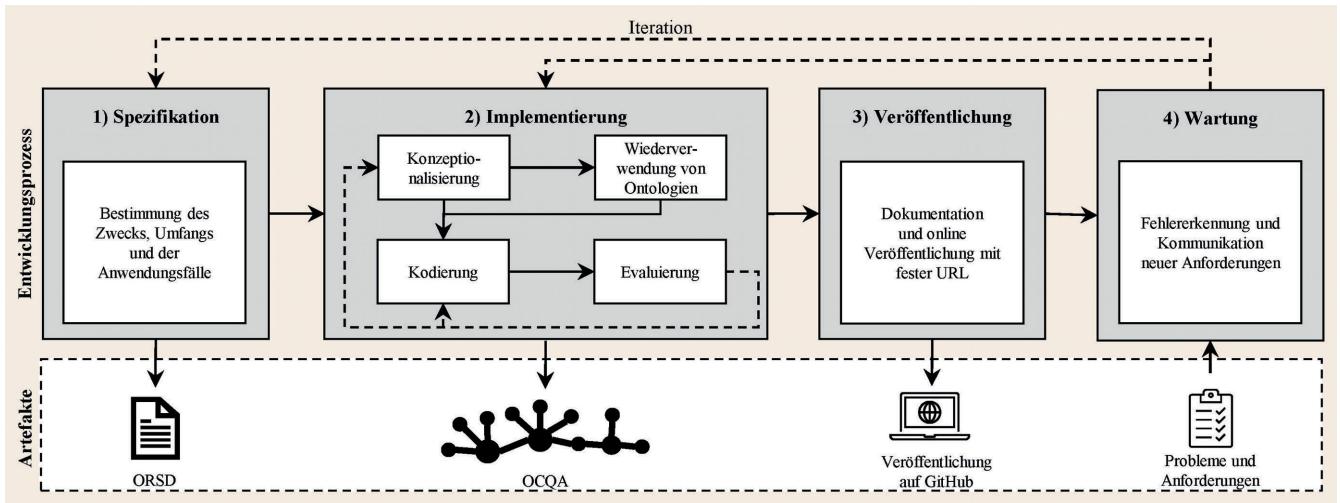


Bild 3. Forschungsmethode. *Grafik: eigene Darstellung in Anlehnung an Poveda-Villalón et al. (2022) [41]*

Fig. 3. Research methodology for ontology engineering. Source: own representation according to Poveda-Villalón et al. (2022) [41]

Tabelle 2. Nicht-funktionale und funktionale Anforderungen.

Table 2. Non-functional and functional requirements.

Nr.	Nicht-funktionale Anforderungen (NFA)	Funktionale Anforderungen (FA)	
		Kompetenzfragen für Anwendungsfall 1	Kompetenzfragen für Anwendungsfall 2
1	Abdeckung und Vollständigkeit	Was ist das zu prüfende Merkmal einer Prüfung?	Welche Prüfungstypen können eine Entität und deren Anforderungen prüfen?
2	Konsistenz	Wie oft wird geprüft und welchen Umfang hat die Prüfung?	Welche Entitäten werden für die Planung des Prüfungstyps benötigt?
3	Benutzbarkeit	Was ist der Start- und Endzeitpunkt einer Prüfung?	Was sind die Zeitbeschränkungen eines Prüfungstyps?
4	Erweiterbarkeit und Wiederverwendbarkeit	Wo soll die Prüfung durchgeführt werden?	Welche Prüfmerkmale können durch einen Prüfungstyp überprüft werden?
5	Klarheit und Prägnanz	Welche Prüfmethode und Prüfausrüstung werden verwendet?	
6		Wer führt die Prüfung aus?	
7		Wie werden die Prüfdaten hinterlegt und evaluiert?	

5 Entwicklung und Vorstellung der OCQA

5.1 Spezifikation

In der Phase der Spezifikation werden der Umfang, der Zweck sowie die potenziellen Anwendungsfälle der Ontologie erarbeitet. Auf Basis der Anwendungsfälle werden funktionale und nicht-funktionale Anforderungen beschrieben, die zur Erstellung und Evaluation der Ontologie dienen [42].

Zweck: Die OCQA verfolgt das Ziel einer digitalen, projekt-spezifischen und kollaborativen Planung von Qualitätsprüfungen in der Bauausführung. Hierzu bietet die OCQA eine Terminologie und Semantik zur Beschreibung von Prüfungen und Prüfplanungswissen. Die OCQA unterstützt die Koordination und den Austausch prüfplanungsrelevanter Informationen zwischen Projektbeteiligten.

Umfang: Die OCQA ist generisch und kann aufgrund der Modularität für jedes Gewerk beliebig erweitert werden. Hierfür wurde die Terminologie auf Grundlage der DIN 55350,

ISO 9000 und ISO 9001 verwendet. Zur Darstellung heterogener Daten verwendet die OCQA bauspezifische sowie allgemeine Ontologien.

Anwendungsfälle (Awf): Die Anwendungen der Ontologie in dieser Arbeit beschränkten sich auf:

1. Beschreibung von Prüfplänen und relevanten Informationen
2. Bereitstellung von Wissen zur Unterstützung der Prüfplanung

Anwender: Als Anwender werden alle Beteiligten der Arbeitsvorbereitung und Bauausführung betrachtet, die an der Planung und Durchführung von Prüfungen mitwirken.

Nicht-funktionale Anforderungen (NFA): Technische Anforderungen bezüglich des Verhaltens und Agierens des Gesamtsystems werden über NFA beschrieben [45]. In verschiedenen Studien wurden NFA für Ontologien im Bereich des Bauwesens bereits definiert [32, 33, 46, 47] und sollen hier wiederverwendet werden (Tabelle 2).

Funktionale Anforderungen (FA): Die FA beschreiben die grundlegenden Aufgaben der Ontologie [45]. Kompetenzfragen (KF) dienen in diesem Kontext der Definition der betrachteten

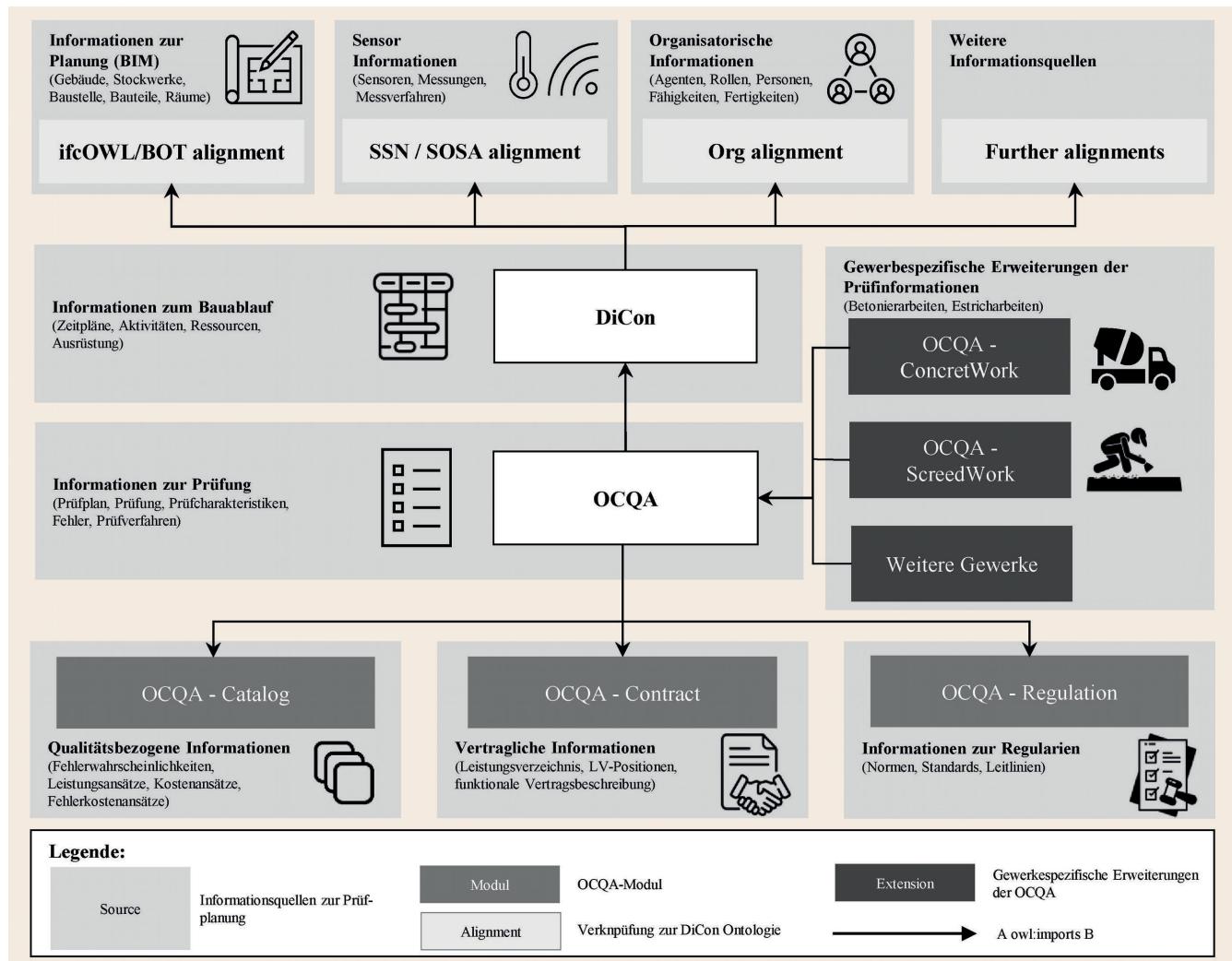


Bild 4. Übersicht zu den in der OCQA verwendeten Modulen, Erweiterungen und angebundenen Ontologien. *Grafik: eigene Darstellung*
Fig. 4. Overview of modules, extensions, and alignments of OCQA. *Source: own representation*

Anwendungsfälle [41]. Die Tabelle 2 listet die durch die Ontologie zu beantwortenden KF auf.

5.2 Implementierung

Die Prüfplanung erfordert eine umfassende Abbildung relevanter Informationen und Wissensbereiche [12]. Aus diesem Grund erfolgt die Umsetzung der OCQA anhand einer modularen Ontologiearchitektur [48], die in ihrer Gesamtheit die Informationen und das Wissen zur Prüfplanung bereitstellt. Dazu zeigt **Bild 4** eine Übersicht der integrierten Wissensdomänen in der OCQA. Die Modularisierung ermöglicht eine funktionale Trennung der für die Prüfplanung relevanten Wissensbereiche des Bauwesens, eine flexible Erweiterung von Domänenwissen und die Anpassung der Ontologie an spezifische Aufgaben [49]. Zudem reduziert die Modularisierung die Komplexität des Systems, indem kleinere, spezialisierte Subsysteme gebildet werden [50]. Aufgrund der Abhängigkeiten zwischen den Modulen ist ein einzelnes Modul in der Prüfplanung nicht funktionsfähig [51].

Das zentrale OCQA-Modul repräsentiert generische Konzepte der Prüfplanung im Bauwesen und bildet die Grundlage der Ontologie. Das OCQA-Catalog-Modul speichert qualitätsbezogene

ne Informationen, wie Parameter zu Fehlerwahrscheinlichkeiten, Leistungsdaten und Kostensätze, die zur Schätzung der Prüfkosten und -zeiten beitragen können [52]. Das OCQA-Regulation-Modul beinhaltet relevante Normen, Richtlinien und Standards für Prüfungen, während das OCQA-Contract-Modul detaillierte vertragliche Informationen bereitstellt.

Darüber hinaus wurden gewerkespezifische Erweiterungsmodulen entwickelt, die die bestehenden Entitäten der OCQA flexibel ergänzen. Diese Erweiterungen, wie bspw. OCQA-ConcreteWork oder OCQA-ScreedWork, ermöglichen es, Prüfungen und notwendiges Prüfplanungswissen für verschiedene Gewerke zu modellieren.

Zur Abbildung von ontologischem Wissen in der Bauausführung werden die DiCon in der OCQA wiederverwendet. Die DiCon bilden einen zentralen Bestandteil der OCQA, da sie umfassende Konzepte zur Beschreibung von Terminplänen, Geräten, Gebäuden, Personal, Sensorik und dem aktuellen Bau-Ist-Zustand liefert [33]. Außerdem ermöglichen die DiCon die Integration weiterer Ontologien, wie ifcOWL oder BOT zur Gebäudebeschreibung sowie Ontologien zur Beschreibung von Unternehmen und Sensoren. Diese Integration garantiert, dass die OCQA gelöste prüfungsrelevante Aspekte der Bauausführung einheitlich

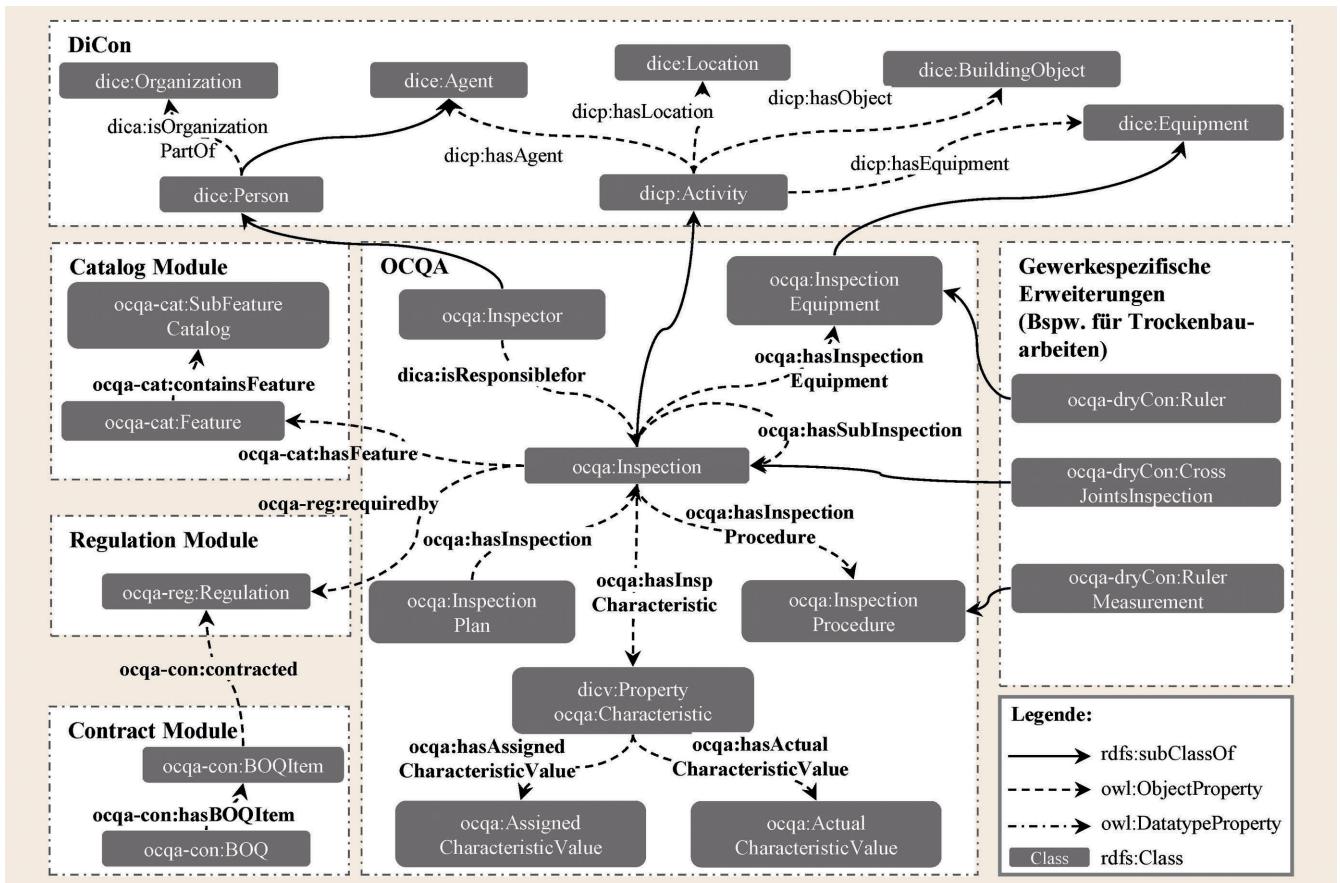


Bild 5. Übersicht des Kernkonzepts der OCQA. *Grafik: eigene Darstellung*
Fig. 5. Overview of OCQA. *Source: own representation*

und konsistent abbildet. Die Kompatibilität mit bestehenden Ontologien steigert die Wiederverwendbarkeit und sichert die Interoperabilität der OCQA über verschiedene Domänen hinweg [41].

Aufbauend auf dem Überblick über die OCQA und deren Module werden nun die wesentlichen Konzepte der OCQA dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Terminologie der OCQA sowohl auf den Normen DIN 55350, ISO 9000 und ISO 9001 als auch auf den wiederverwendeten Ontologien basiert. Durch die Wiederverwendung von Begriffen aus etablierten Normen [53] sowie bereits evaluerter Ontologien ist sicher gestellt, dass die gewählten Begriffe eindeutig und für künftige Nutzer verständlich sind [33].

Bild 5 veranschaulicht vereinfacht die Struktur der OCQA mit der Klasse *ocqa:Inspection* im Zentrum. Die Prüfung steht mit den zugehörigen Prüfmerkmalen, wie *ocqa:InspectionEquipment*, *ocqa:Inspector*, *ocqa:InspectionPlan* und *ocqa:InspectionProcedure* in Beziehung. Eine Inspektion stellt in der OCQA eine Subklasse von *dicp:Activity* dar. Aus diesem Grund kann einer Prüfung entsprechend einer Aktivität ein Start- und Enddatum sowie eine Dauer zugeordnet werden. Ebenso können zu prüfende Entitäten, wie beispielsweise *dice:Location* (Prüfort), *dice:BuildingObject* (zu prüfendes Bauteil) oder *dicp:Activity* (zu prüfende Bauaktivität) zugeordnet werden. Das Ziel einer Prüfung stellt das zu prüfende Merkmal (*ocqa:Characteristic*) dar. Hierfür ist die Prüfung nicht nur auf eine Entität bezogen, sondern auch auf das Prüfmerkmal

(Ebenheit, Stärke etc.) dieser Entität. Die Abbildung des Prüfmerkmals erfolgt über *ocqa:Characteristic*, welche über *ocqa:hasInspCharacteristic* mit der Prüfung und der zu prüfenden Entität verbunden ist. Der zu erfüllende Wert des Merkmals wird über *ocqa:AssignedCharacteristicValue* beschrieben und der aufgenommene Wert über *ocqa:ActualCharacteristicValue* hinterlegt. Beide Werte können daraufhin über eine Abfrage verglichen und Fehler automatisiert abgeleitet werden. Als beispielhafte gewerkespezifische Erweiterung wurde das Gewerk Trockenbauarbeiten gewählt. Entsprechend wird die Klasse *ocqa:Inspection* durch die Subklasse *ocqa-dryCon:CrossJointsInspection* erweitert oder *ocqa:InspectionEquipment* durch *ocqa-dryCon:Ruler* (Bild 5).

Das vorgestellte Konzept wurde über Protégé in OWL implementiert und unter w3id.org/ocqa# veröffentlicht.

6 Evaluierung der Ontologie

Die Evaluierung der Ontologie erfolgt in zwei Schritten: Zunächst wird ein prototypisches Expertensystem auf Basis der Ontologie erstellt, um auf dessen Basis die Anwendung der OCQA verdeutlichen zu können. Anschließend wird die OCQA durch die Anwendung innerhalb des Prototyps einer umfassenden Evaluation unterzogen. Zur Evaluierung werden sowohl die funktionalen als auch die nicht-funktionalen Anforderungen herangezogen.

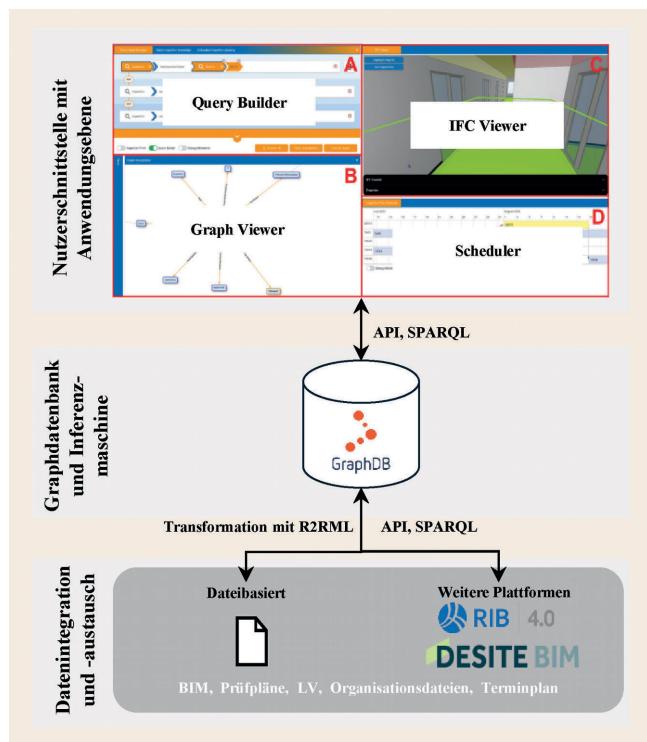


Bild 6. Technische Implementierung des prototypischen Expertensystems.

Grafik: eigene Darstellung

Fig. 6. Technical implementation of the expert system as prototype.

Source: own representation

6.1 Erstellung einer prototypischen Anwendung auf Basis der OCQA

Das prototypische Expertensystem dient dazu, Prüfenden notwendige Informationen und Prüfplanungswissen zur Entscheidungsfindung bereitzustellen. Die technische Implementierung ist in **Bild 6** dargestellt. Das System gliedert sich in drei Ebenen: 1) die Datenintegrations- und austauschebene, 2) die Graphdatenbank mit Inferenzmaschine und 3) die Nutzerschnittstelle mit Anwendungsebene.

Die Datenintegrationsebene ermöglicht es den Projektbeteiligten und Prüfplanenden, prüfplanungsrelevante Daten bereitzustellen oder mit diesen Daten verknüpfte Prüfpläne aus der Graphdatenbank abzurufen. Dieser Datenaustausch kann sowohl dateibasiert anhand einer Transformation der Daten über standardisierte Mappingdateien wie beispielsweise relational databases to RDF Mapping Language (R2RML) als auch direkt aus Softwarelösungen erfolgen. Die Daten werden in der Graphdatenbank verwaltet und über die Inferenzmaschine für das Schlussfolgern von neuem Wissen verwendet.

Die Daten können durch die Benutzeroberfläche (UI) abgerufen und dargestellt werden. Die Webanwendung ermöglicht die Kommunikation mit einer Graphdatenbank (GraphDB) mithilfe von HTTP und SPARQL, um relevante Informationen abzufragen und zu speichern. Das UI enthält vier Komponenten (Bild 6): In Abschnitt A kann der Nutzer Abfragen von prüfplanungsrelevanten Informationen oder Wissen mit dem visuellen SPARQL Query Builder Sparnatural erstellen [54]. In Abschnitt B werden die Abfrageergebnisse in einer Tabelle oder Grafik dargestellt. Der

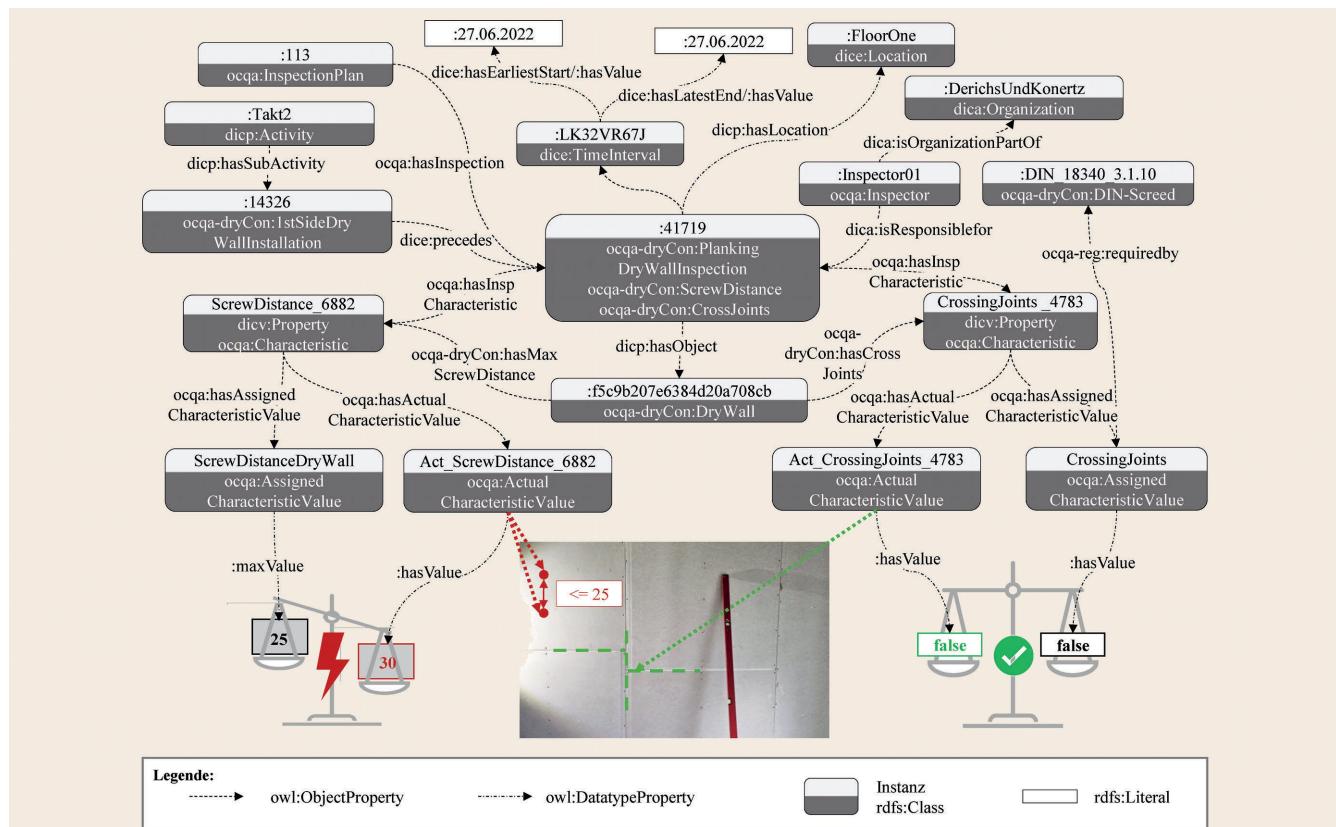


Bild 7. Darstellung der OCQA mit Instanzdaten zur Beantwortung der KF entsprechend Awf 1. Grafik: eigene Darstellung

Fig. 7. The OCQA in combination with related instance data according to Use Case 1. Source: own representation

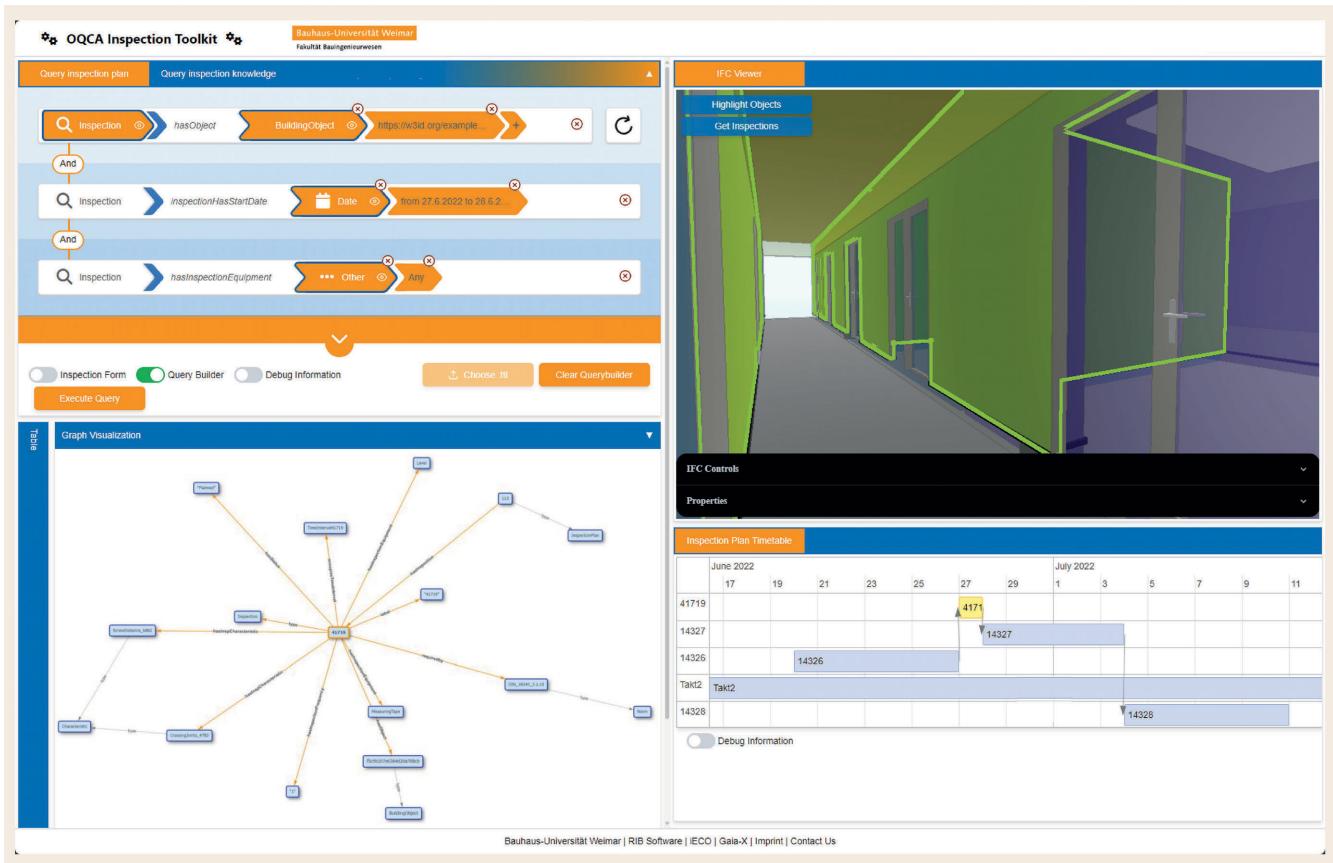


Bild 8. Darstellung der KF-basierten Abfrageergebnisse für den Awf 1 in einem visuellen Graph, BIM-Viewer und Balkenterminplan. *Grafik: eigene Darstellung*
Fig. 8. Visualization of CQ-based query results for Use Case 1 in a visual graph, BIM viewer, and schedule. *Source: own representation*

BIM-Viewer in Abschnitt C und der Terminplan in Abschnitt D visualisieren die zur Prüfung zugeordneten Bauobjekte und Aktivitäten. Diese Komponenten arbeiten zusammen und sind mit einer interaktiven Webanwendung verbunden, die über eine HTML-Schnittstelle bereitgestellt wird.

6.2 Fallbeispiel

Auf Basis der in der Spezifikation formulierten funktionalen (FA) und nicht-funktionalen Anforderungen (NFA) sowie des erstellten Expertensystems kann die Ontologie evaluiert werden. Die Evaluation erfolgt anhand einer Nutzer- und Entwicklerevaluation [32]. Im Rahmen der Entwicklerevaluation wird eine automatisierte Konsistenzprüfung und kriterienbasierte Evaluierung durchgeführt, um die Konsistenz, Klarheit und Erweiterbarkeit der OCQA sicherzustellen. Daraufhin erfolgt eine aufgabenbasierte Evaluierung auf Basis der FA in Form von Kompetenzfragen (KF) zur Bewertung der Benutzbarkeit und der Vollständigkeit der Ontologie.

Die Evaluierung durch Nutzer erfolgte über zwei Fokusgruppeninterviews. In diesen konnten Experten die Verständlichkeit der Terminologie, die Nachvollziehbarkeit, die Benutzbarkeit und die Vollständigkeit der OCQA bewerten. Zur besseren Erläuterung der OCQA wird im Folgenden auf die aufgabenbasierte Evaluation eingegangen, welche die Funktionalität der OCQA anhand der aufgestellten Kompetenzfragen aus Awf 1 und 2 validiert.

Bild 7 zeigt die geplante Prüfung zur Beplankung der Trockenbauwände als Instanz mit der ID :41719. Die Abbildung ver-

anschaulicht die mit der Prüfung in Beziehung stehenden Entitäten (KF 2-6 für Awf 1) sowie deren Prüfmerkmale. Die geforderten Prüfmerkmale umfassen in diesem Beispiel die Ermittlung eines ausreichenden Schraubenabstands von maximal 25 cm sowie die Vermeidung von Kreuzfugen. Diese können auf Basis eines automatisierten Vergleichs mit den gemessenen Merkmalswerten evaluiert werden (KF 1 und 7). Die in **Bild 8** dargestellte Benutzeroberfläche visualisiert die Beziehungen aus Bild 7 zwischen prüfplanungsrelevanten Entitäten und der Prüfung. Die Benutzeroberfläche umfasst die Lokalisierung sowie den Umfang der zu prüfenden Bauteile im BIM-Modell, das Start- und Enddatum der Prüfung sowie deren Beziehung zu anderen Aktivitäten im Terminplan (KF 2-4). Darauf hinaus werden detaillierte Informationen entsprechend Bild 7 über die Inspektion einschließlich des Verfahrens, der Ausrüstung und der Prüfverantwortlichen, in einem Graph bereitgestellt (KF 5-6).

Zur Unterstützung der Prüfplanung entsprechend des Awf 2 ist innerhalb des Prototyps eine Schaltfläche zum Abrufen von Prüfplanungswissen positioniert (**Bild 9**). Das Prüfplanungswissen für Trockenbauarbeiten wurde auf Basis des bereitgestellten Prüfkatalogs der Derichs u Konertz Baugesellschaft mbH u Co. KG sowie der DIN 18340 über OWL-Axiome modelliert. Dieses Wissen kann über vordefinierte SPARQL-Abfragen abgerufen werden. In dem vereinfachten Beispiel (**Bild 9**) fragt der Prüfplanende nach den Prüfungstypen für Trockenbauwände nach erfolgter einseitiger Beplankung (KF 1 für Awf 2). Die Abfrageergebnisse (unterer Teil von **Bild 9**) können direkt in ein Planungsformular übernommen und anschließend an die Graph-

The screenshot shows the OCQA Inspection Toolkit interface. At the top, there are tabs for 'Query inspection plan' and 'Query inspection knowledge'. The 'Query inspection knowledge' tab is active, showing a query builder with the following structure:

```

graph TD
    A[InspectionTypes] -- relatedTo --> B[BuildingObject]
    B -- relatedTo --> C[FirstDryWallInstallation]
    C -- hasDescription --> D[Description]
  
```

The query builder includes buttons for 'And' and 'Or' operations. Below the query builder are buttons for 'Inspection Form', 'Query Builder' (which is selected), and 'Debug Information'. There are also buttons for 'Choose .ttl', 'Clear Querybuilder', and 'Execute Query'.

On the right side, there is a 'Graph Visualization' button. Below the query builder is a table titled 'Table' with the following data:

InspectionTypes	Description
...filter InspectionTypes	...filter InspectionTypes
https://w3id.org/ocqa/dryconstruction#BoardTypes	"Check if rights boards are used according to design. (impregnated, fire-resistant or sound-absorbing mounting boards; single-layer, double-layer planking)"
https://w3id.org/ocqa/dryconstruction#ScrewDistance	"Check whether the screw connection has been carried out at the correct distances"
https://w3id.org/ocqa/dryconstruction#CrossJoints	"Check that there are no cross joints and that the edge offset has been observed"
https://w3id.org/ocqa/dryconstruction#JointsCutting	"Check whether the cut edges of the board have been set at a 45° angle"

Bild 9. Darstellung der Abfrage und deren Ergebnisse für KF 1 aus Awf 2 innerhalb des Expertensystems als Tabelle. *Grafik: eigene Darstellung*
 Fig. 9. Visualization of query results for CQ1 from Use Case 2 within the expert system using a table. *Source: own representation*

datenbank übergeben werden. Diese Art von Wissensabfragen ermöglicht es, das diverse Prüfplanungswissen aus heterogenen Quellen zugänglich zu machen. Dabei können in den Abfragen unterschiedliche Prüfcharakteristika wie Bauteil, Bauaktivität oder Herstellverfahren berücksichtigt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die OCQA wurde entwickelt, um eine formale und umfassende Wissensdarstellung sowie Terminologie für Prüfpläne in der Bauausführung zu bieten. Die Ontologie basiert auf standardisiertem Wissen aus qualitätsbezogenen Normen, um ihre Benutzerfreundlichkeit, Konsistenz und Wiederverwendbarkeit sicherzustellen. Der generische und modulare Aufbau der OCQA ermöglicht es, neues Wissen beispielsweise aus weiteren Gewerken zu adaptieren und die Ontologiekomplexität zu reduzieren. Die OCQA erleichtert die Integration prüfungsrelevanter Daten aus heterogenen Quellen, was die Interoperabilität verbessert und eine vernetzte und projektbezogene Prüfplanung zwischen den Projektbeteiligten über alle Projektphasen ermöglicht.

Dadurch legt die OCQA den Grundstein für zukünftige Forschungen und Endanwendungen im Bereich der Prüfplanung unter Verwendung von Semantic Web Technologien und

Ontologien. Aufbauend auf den gezeigten Ergebnissen gilt es, die OCQA zu erweitern und in anderen Gewerken einzusetzen. Die vollständige Automatisierung der Prüfplanung stellt eine vielversprechende Richtung für zukünftige Forschungsarbeiten dar. Durch deren Einsatz kann der Aufwand zur Erzeugung projekt-spezifischer Prüfpläne reduziert und Prüfpläne unabhängig vom individuellen Erfahrungswissen erzeugt werden.

D A N K S A G U N G

Wir möchten uns bei Derichs u Konertz Baugesellschaft mbH u Co. KG und condatex GmbH für die Bereitstellung der Beispiel-daten und die Beratung durch Martin Anhut bedanken. Ebenso gilt unser Dank Yuan Zheng und Hannes Heitzhausen, die einen maßgeblichen Beitrag bei der Entwicklung der Ontologie und des prototypischen Expertensystems geleistet haben.

L I T E R A T U R

- [1] Stange, E.: 29 Mängel pro Hausbau. Bauherrenschutzbund e.V., 2019, www.bsb-ev.de/politik-presse/presse-service/pressemitteilungen/29-maengel-pro-hausbau [Zugriff am: 31.12.2024].
- [2] Kalleja, H.: Besser hoheitlich. *In: Bauingenieur* 94 (2019), Heft 03, A3.
- [3] Faust, A.: Baubranche: Fehlerkosten betragen 2022 mindestens 13 Milliarden Euro. BauInfoConsult, 2023, bauinfoconsult.de/baubranche-fehlerkosten-betrugen-2022-mindestens-13-milliarden-euro/ [Zugriff am: 31.12.2024].
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015.
- [5] Helmus, M.; Offergeld, B.: Qualität des Bauens – BERICHT 44 Eine Studie über den Begriff und die Wahrnehmung von Bauqualität bei privaten und öffentlichen Bauherren und Bauunternehmen (2012).
- [6] Wiemer, H.; Zierold, K.; Panzer, J. et al.: Datentreibene Methoden zur Qualitätssicherung für Produkte aus Carbonbeton. *In: Bauingenieur* 95 (2020), Heft 03, S. 105-113.
- [7] Pauwels, P.; Farias, T.M. de; Zhang, C. et al.: A performance benchmark over semantic rule checking approaches in construction industry. *In: Advanced Engineering Informatics* 33 (2017), S. 68-88. doi.org/10.1016/j.aei.2017.05.001.
- [8] Busse, J.; Humm, B.; Lübbert, C. et al.: Was bedeutet eigentlich Ontologie? *In: Informatik-Spektrum* 37 (2014), Heft 4, S. 286-297. doi.org/10.1007/s00287-012-0619-2.
- [9] DIN EN ISO 9000:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO_9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_9000:2015.
- [10] DIN 55350:2021-10, Begriffe zum Qualitätsmanagement.
- [11] VDI/VDE/DGQ 2619:1985-06, Prüfplanung. *In: 03.100.50, Heft 03.100.50*, 1985.
- [12] Linß, G.; Linß, E.K.: Qualitätsmanagement für das Ingenieurwesen – Aufbau und Zertifizierung von Managementsystemen, Metrologie, Messtechnik. Carl Hanser Verlag. Hanser, Carl, München, 2023.
- [13] Toteva, P.; Vasileva, D.: Tasks in planning of quality inspection. *In: Proceedings in Manufacturing Systems*, Vol. 8 (2013), Iss. 3, S. 183-188.
- [14] Boukamp, F.; Akinci, B.: Automated processing of construction specifications to support inspection and quality control. *In: Automation in Construction* 17 (2007), Heft 1, S. 90-106. doi.org/10.1016/j.autcon.2007.03.002.
- [15] Brüggemann, H.; Bremer, P.: Grundlagen Qualitätsmanagement. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [16] Katzenbach, R.; Leppa, S.: Underground structures in urban areas. *In: Structural engineering, mechanics and computation: Proceedings of the sixth*. CRC Press [Place of publication not identified], 2016, S. 2066-2071.
- [17] Schäufler, C.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen komplexer Informationssysteme: eine strukturalistische Semantik empirischer und terminologischer Informationen. Jena, 2017.
- [18] Ege, B.; Humm, B.; Reibold, A. (Hrsg.): Corporate Semantic Web – Wie semantische Anwendungen in Unternehmen Nutzen stiften, X.media.press, Springer Vieweg, Berlin, 2015.
- [19] Brickley, D.; Guha, R.V.: RDF Schema 1.1, 2023 www.w3.org/TR/rdf-schema/ [Zugriff am: 06.12.2024].
- [20] Hitzler, P.; Krötzsch, M.; Rudolph, S. et al.: Semantic Web – Grundlagen, SpringerLink Bücher, Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [21] Kemper, A.; Eickler, A.: Datenbanksysteme – Eine Einführung. De Gruyter Oldenbourg, De Gruyter Oldenbourg Studium, De Gruyter Oldenbourg, Berlin, 2015.
- [22] Allemang, D.; Hendler, J.; Gandon, F.: Semantic Web for the Working Ontologist. ACM, New York, USA, 2020.
- [23] Hitzler, P.; Krötzsch, M.; Rudolph, S. et al.: Semantic Web: Grundlagen, eXamen.press, Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [24] Synak, M.; Dabrowski, M.; Kruk, S.R.: Semantic Web and Ontologies. *In: Semantic Digital Libraries*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 41-54.
- [25] Mertens, P.; Bodendorf, F.; König, W. et al.: Grundzüge der Wirtschaftsinformatik, Springer-Lehrbuch, Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [26] Pauwels, P.; Krijnen, T.; Terkaj, W. et al.: Enhancing the ifcOWL ontology with an alternative representation for geometric data. *In: Automation in Construction* 80 (2017), S. 77-94. doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.001.
- [27] Rasmussen, M.H.; Lefrançois, M.; Schneider, G.F. et al.: BOT: The building topology ontology of the W3C linked building data group. *In: Semantic Web* 12 (2020), Heft 1, S. 143-161. doi.org/10.3233/SW-200385.
- [28] Hamdan, A.-H.; Kozak, T.: Ontology that defines the topology of zones and components of bridge constructions , 29th 2022, alhakam.github.io/brot/ [Zugriff am: 28.12.2024].
- [29] Stepien, M.; Jodehl, A.; Vonthron, A. et al.: An approach for cross-data querying and spatial reasoning of tunnel alignments. *In: Advanced Engineering Informatics* 54 (2022), S. 101728. doi.org/10.1016/j.aei.2022.101728.
- [30] France-Mensah, J.; O'Brien, W.J.: A shared ontology for integrated highway planning. *In: Advanced Engineering Informatics* 41 (2019), S. 100929. doi.org/10.1016/j.aei.2019.100929.
- [31] El-Diraby, T.E.; Osman, H.: A domain ontology for construction concepts in urban infrastructure products. *In: Automation in Construction* 20 (2011), Heft 8, S. 1120-1132. doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.014.
- [32] El-Gohary, N.M.; El-Diraby, T.E.: Domain Ontology for Processes in Infrastructure and Construction. *In: Journal of Construction Engineering and Management* 136 (2010), Heft 7, S. 730-744. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000178.
- [33] Zheng, Y.; Törmä, S.; Seppänen, O.: A shared ontology suite for digital construction workflow. *In: Automation in Construction* 132 (2021), S. 103930. doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103930.
- [34] Farghaly, K.; Soman, R.; Whyte, J.: cSite ontology for production control of construction sites. *In: Automation in Construction* 158 (2024), S. 105224. doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105224.
- [35] Kirner L.; Oraskari J.; Wildemann, P. et al.: Internet of Construction Process Ontology (ioc) v 0.5, zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10592282, 2024.
- [36] Schlenger, J.; Yeung, T.; Vilgertshofer, S. et al.: A Comprehensive Data Schema for Digital Twin Construction. *In: Proceedings of the 29th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering. EG-ICE*, 2022, S. 34-44.
- [37] Yurchyshyna, A.; Faron-Zucker, C.; Thanh, N. et al.: Towards an Ontology-enabled Approach for Modeling the Process of Conformity Checking in Construction – 1. *In: Proceedings of the Forum at the CAiSE'08 Conference*, 2008, S. 21-24.
- [38] Zhong, B.T.; Ding, L.Y.; Luo, H.B. et al.: Ontology-based semantic modeling of regulation constraint for automated construction quality compliance checking. *In: Automation in Construction* 28 (2012), S. 58-70. doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.006.
- [39] Martinez, P.; Ahmad, R.; Al-Hussein, M.: Automatic Selection Tool of Quality Control Specifications for Off-site Construction Manufacturing Products: A BIM-based Ontology Model Approach. *In: Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings* (2019), S. 141-148. doi.org/10.29173/MOC87.
- [40] Xu, X.; Jeon, J.; Zhang, Y. et al.: Automatic Generation of Customized Checklists for Digital Construction Inspection. *In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2675 (2021), Iss. 5, pp. 418-435. doi.org/10.1177/0361198121995825.
- [41] Poveda-Villalón, M.; Fernández-Izquierdo, A.; Fernández-López, M. et al.: LOT: An industrial oriented ontology engineering framework. *In: Engineering Applications of Artificial Intelligence* 111 (2022), S. 104755. doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104755.
- [42] Fernández-López, M.; Gómez-Pérez, A.; Juristo, N.: METHONTOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering. *In: AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 1997, S. 33-40.
- [43] Suárez-Figueroa, M.C.; Gómez-Pérez, A.; Villazón-Terrazas, B.: How to Write and Use the Ontology Requirements Specification Document. *In: On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2009*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 966-982.
- [44] Gómez-Pérez, A.: Ontology Evaluation. *In: Handbook on Ontologies*. Springer Berlin Heidelberg, 2004, S. 251-273.
- [45] Balzert, H.: Nichtfunktionale Anforderungen. *In: Lehrbuch der Softwaretechnik*, Lehrbücher der Informatik. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, 2011, S. 109-133.
- [46] Costin, A.; Eastman, C.: Need for Interoperability to Enable Seamless Information Exchanges in Smart and Sustainable Urban Systems. *In: Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 33 (2019), Iss. 3. doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000824.
- [47] Zhou, Z.; Goh, Y.M.; Shen, L.: Overview and Analysis of Ontology Studies Supporting Development of the Construction Industry. *In: Journal of Computing in Civil Engineering* 30 (2016), Heft 6. doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000594.
- [48] Parent, C.; Spaccapietra, S.: An Overview of Modularity. *In: Modular Ontologies, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 5-23.
- [49] Shimizu, C.; Hitzler, P.; Krishnadh, A.: Modular Ontology Modeling: A Tutorial. *In: Applications and Practices in Ontology Design, Extraction, and Reasoning, Studies on the Semantic Web*. IOS Press, 2020.
- [50] Simon, H.A.: The Architecture of Complexity. *In: Proceedings of the American Philosophical Society* 106 (1962), Heft 6, S. 467-482.
- [51] Kopp, M.: Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden. Universität Stuttgart, 2013.
- [52] Seiß, S.; Lünig, J.; Melzner, J.: Supporting appraisal cost estimation by linked data. *In: Proceedings of the 2023 European Conference on Com-*

- puting in Construction and the 40th International CIB W78 Conference, Computing in Construction. European Council for Computing in Construction, 2023.
- [53] Matthews, J.; Love, P.E.D.; Porter, S. et al.: Curating a domain ontology for rework in construction: challenges and learnings from practice. In: Production Planning & Control (2023), S. 1-16. doi.org/10.1080/09537287.2023.2223566.
- [54] Francart, T.: *Sparnatural*: A Visual Knowledge Graph Exploration Tool. In: The Semantic Web: ESWC 2023 Satellite Events: Hersonissos, Crete, Greece, May 28 – June 1, 2023, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science Heft 13998. Springer Nature Switzerland and Imprint Springer, Cham, 2023, S. 11-15.

**S e b a s t i a n S e i ß , M . S c .**

sebastian.seiss@uni-weimar.de

Foto: Fotograf Matthias Eckert

Professur Baubetrieb und Bauverfahren,
Bauhaus-Universität Weimar
Marienstraße 7, 99423 Weimar**J a n N i k l a s L ü n i g , M . S c .**

jan-niklas.luenig@tu-braunschweig.de

Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb
Technische Universität Braunschweig
Schleinitzstraße 23A, 38106 Braunschweig**P r o f . D r . - I n g . J ü r g e n M e l z n e r**

juergen.melzner@uni-weimar.de

Professur Baubetrieb und Bauverfahren,
Bauhaus-Universität Weimar
Marienstraße 7, 99423 Weimar**I M P R E S S U M****Bauingenieur**
ISSN 0005-6650, 0. Jahrgang 2025**Herausgeber**

Prof. Dr.-Ing. Christian Glock (Sprecher)
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion,
Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau (RPTU)
Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dietmar Adam
Institut für Geotechnik, TU Wien
Prof. Dr.-Ing. habil. Sven Klinkel
Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik
RWTH Aachen
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Melzner
Professur Baubetrieb und Bauverfahren,
Bauhaus-Universität Weimar
Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak
Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau
Brandenburgische Universität (BTU)

Alle Hauptaufsätze sind durch die
Herausgeber begutachtet und rezensiert.**Organschaft**Der Bauingenieur ist offizielle Organzeitschrift
der VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik.**Redaktion**

Heike van Ooyen, Chefredakteurin
Melanie Schulz, Redakteurin
Telefon: +49 211 6103-508
mschulz@vdi-fachmedien.de
Dipl.-Phys.-Ing. Udo Schnell
Redaktionsleitung VDI Fachmedien
Telefon: +49 211 6103-104
uschnell@vdi-fachmedien.de
Anne Katrin Sarrazin, Redaktionsassistentin
Patricia Blömers, Redaktionsassistentin
Telefon: +49 211 6103-172
pbloemers@vdi-fachmedien.de

Autorenhinweise/Veröffentlichungsgrundlagen:
www.bauingenieur.de**Pressemitteilungen bitte an**
bauingenieur@vdi-fachmedien.de**Verlag**
VDI Fachmedien GmbH & Co. KG
Unternehmen für Fachinformationen
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
Postfach 10 10 22, 40001 Düsseldorf
Commerzbank AG
SWIFT/BIC-Code: DRES DE FF 300,
IBAN: DE69 3008 0000 0212 1724 00**Geschäftsführung**
Beatrice Gerner**Layout**
Alexander Reiß**Leitung Media Sales**
Petra Seelmann-Maedchen
Telefon: +49 211 6188-191
pmaedchen@vdi-nachrichten.com**Anzeigenverkauf**
Verlagsbüro Siegfried Pachinger
Telefon: +49 521 977998-80
Fax: +49 521 977998-90
sven.pachinger@verlagsbuero-pachinger.deEs gilt der Anzeigentarif Nr. 55
vom 1. Januar 2025.**Vertrieb und Leserservice**
Leserservice VDI Fachmedien
65341 Eltville
Telefon: +49 6123 9238-202
Fax: +49 6123 9238-244
vdi-fachmedien@vuservice.de**Bezugspreis**

10 Ausgaben jährlich
(davon 1/2 und 7/8 als Doppelausgabe)
Jahresabonnement: € 556,- (E-Paper € 477,-)
VDI-Mitglieder: € 500,40 (E-Paper € 429,30)
nur für persönliche Mitglieder
Studenten: € 138,- (E-Paper € 119,-)
gegen Studienbescheinigungen
Preise Inland inkl. MwSt., Ausland exkl. MwSt.
zzgl. Versandkosten (Inland: € 17,-,
Ausland: € 38,-, Luftpost auf Anfrage)
Einzelheft: € 57,- inkl. MwSt. zzgl. Versandkosten

Die Mindestlaufzeit beträgt 12 Monate.
Im Anschluss an die Mindestlaufzeit ist das
Abonnement jeweils zum Monatsende
kündbar.

Druck

KLIEMO AG, Hütte 53, 4700 Eupen, Belgien

Copyright

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen
Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich
geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen
Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne
Zustimmung des Verlages unzulässig und
strafbar. Das gilt insbesondere für Verviel-
fältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen
und die Einspeicherung und Verarbeitung in
elektronischen Systemen. Für unverlangt
eingesandte Manuskripte kann keine Gewähr
übernommen werden.

Weitere Informationen:
www.bauingenieur.de

Auflage IVW-geprüft

