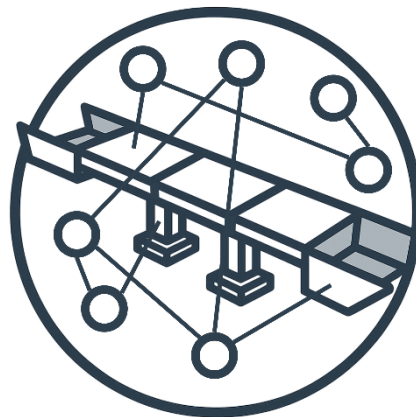


Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction



# Digitaler Zwilling zur Erhaltung einer Autobahnbrücke

## Ein Proof of Concept basierend auf Linked Data



Verfasser:

**Matteo Depoli**

Thesis-Begleiter:

**Prof. Lukas Schildknecht**

Thesis-Expert:

**David Bucher** (ETH Zürich)

Praxispartner: ASTRA

**“L’arte di costruire è un’arte logica, non mistica.”**

«Die Baukunst ist eine logische, keine mystische Kunst.»

*Pier Luigi Nervi, Scienza o arte del costruire? (1945)*

Heute erhält dieser Satz eine noch konkretere Bedeutung: Die Tragwerkslogik beruht nicht mehr nur auf theoretischen Annahmen, sondern kann sich auf reale Daten stützen, die über Sensoren erfasst und in digitale Zwillinge integriert werden.

Im Kontext der Brückenerhaltung, insbesondere bei der Ermüdung, stellt dies einen echten Paradigmenwechsel dar: Belastungen werden nicht mehr nur geschätzt, sondern gemessen, modelliert und im Laufe der Zeit mit realen Umweltbedingungen und tatsächlichen Materialeigenschaften korreliert. Auf diese Weise ist ein digitaler Zwilling kein statisches Abbild mehr, sondern ein auf zuverlässigen Daten basierendes Entscheidungsinstrument.

## Eigenständigkeitserklärung

"Ich erkläre hiermit,

dass ich die vorliegende Masterthesis mit dem Titel **«Digitaler Zwilling zur Erhaltung einer Autobahnbrücke – Ein Proof of Concept basierend auf Linked Data»** selbst und selbständig verfasst habe,

dass ich sämtliche nicht von mir selbst stammenden Textstellen bzw. Bestandteile eines Werkes (Bilder, Grafiken, Codes, etc.) gemäss gängigen wissenschaftlichen Zitierregeln korrekt zitiert und die verwendeten Quellen gut sichtbar erwähnt habe;

dass ich in einem Verzeichnis alle verwendeten Hilfsmittel (KI-Assistenzsysteme wie Chatbots [z.B. ChatGPT], Übersetzungs- [z.B. DeepL] Paraphrasier- [z.B. Quillbot]) oder Programmierapplikationen [z.B. Github Copilot] deklariert und ihre Art der Verwendung offenlege und bei den entsprechenden Textstellen angegeben habe,

dass ich sämtliche immateriellen Rechte an von mir allfällig verwendeten Materialien wie Bilder oder Grafiken erworben habe oder dass diese Materialien von mir selbst erstellt wurden;

dass das Thema, die Arbeit oder Teile davon nicht bei einem Leistungsnachweis eines anderen Moduls verwendet wurden, sofern dies nicht ausdrücklich mit der Dozentin oder dem Dozenten im Voraus vereinbart wurde und in der Arbeit ausgewiesen wird;

dass ich mir bewusst bin, dass meine Arbeit auf Plagiate und auf Drittautorschaft menschlichen oder technischen Ursprungs (künstliche Intelligenz) überprüft werden kann;

dass ich mir bewusst bin, dass die Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik einen Verstoß gegen diese Eigenständigkeitserklärung bzw. die ihr zugrundeliegenden Studierendenpflichten der Studien- und Prüfungsordnung der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik verfolgt und dass daraus disziplinarische (Verweis oder Ausschluss aus dem Studiengang) Folgen resultieren können.“

Vorname Nachname:

**Matteo Depoli**

Ort, Datum:

**Muttenz, 23.05.2025**

Unterschrift:

## Inhaltsverzeichnis

I	Abstract .....	7
II	Vorwort .....	8
	Glossar .....	9
III	Abkürzungen.....	11
IV	Abkürzungen der Ontologie .....	12
1	Einleitung.....	13
2	Theoretische Grundlage.....	14
2.1	Digital Twin.....	14
2.1.1	Abgrenzung zwischen « <i>Digital Twin</i> ».....	15
2.1.2	Digital Shadow.....	15
2.1.3	Konzept Digital Twin .....	16
2.2	Linked Data .....	17
2.2.1	Semantik und Interoperabilität .....	18
2.2.2	RDF – Flexible Datenrepräsentation .....	18
2.2.3	Abfragen mit SPARQL .....	19
2.3	Ontologie.....	20
2.3.1	Begriffsklärung.....	20
2.3.2	Anforderungen an Ontologien .....	21
2.3.3	<i>State of the Art</i> : Ontologie.....	22
2.3.4	Konzeptuelle Auswahl.....	25
2.4	Werkzeuge .....	27
2.4.1	Graphdatenbanken .....	28
2.4.2	Tools zur SPARQL .....	30
2.4.3	Visualisierung und Viewer.....	31
2.4.4	Werkzeugauswahl .....	32
3	Methodik .....	33
3.1	Literaturrecherche .....	33
3.1.1	Snowballing .....	34
3.2	Expertinterviews .....	35
3.3	Fallstudie .....	37
3.4	Prozess der Datenbeschaffung.....	38
3.5	Methodischer Ansatz .....	39
4	Datenbeschaffung.....	40
4.1	Wetterdaten .....	41
4.2	Verkehrsdaten .....	43
4.3	WIM-Daten .....	45
4.4	Dehnungsdaten .....	47
4.5	IFC-Datei.....	49

5	Resultaten.....	51
5.1	Grobkonzept OK.....	51
5.2	IFC für Brücke .....	52
5.2.1	IFC-Logik für Brücke.....	53
5.2.2	Brückenarten .....	54
5.2.3	IFC-Schemamodell.....	55
5.3	Mapping IFC-BROT.....	58
5.3.1	BROT-Framework.....	58
5.3.2	Logik des Mappings zu IFC .....	59
5.3.3	Integration Dehnungsfuge.....	61
5.3.4	Integration weiter Brückenkomponenten.....	63
5.4	Mapping IFC-Sensoren.....	65
5.5	ifcBridgeOWL .....	66
5.5.1	Klassenstrukturen.....	66
5.6	Proof of Concept.....	67
5.6.1	Validierung.....	69
6	Diskussion .....	73
7	Fazit / Ausblick.....	74
V	Literaturverzeichnis.....	75
VI	Abbildungsverzeichnis.....	79
VII	Tabellenverzeichnis.....	81
VIII	Hilfsmittelverzeichnis .....	82
IX	Anhänge.....	83
X.1	Ermüdung von Brücken .....	84
X.2	Digital Model.....	86
X.3	Digital Twin.....	86
X.4	Digitaler Zwilling im Brückenbau .....	87
X.5	LD: Wiederverwendung und Anreicherung .....	88
X.6	LD: Einsatz in der Schweiz .....	88
X.7	Forschungsfrage.....	89
X.8	Suchen und Resultaten .....	90
X.9	Interview 1 .....	91
X.10	Interview 2 .....	97
X.11	Interview 3 .....	103
X.12	Interview 4 .....	109
X.13	Analyse der Ontologie .....	114
X.14	WIM-Station Bözberg.....	115
X.15	Beispiel Dehnungsdaten.....	118
X.16	Materialien spezifizieren .....	119

---

X.17	Ontologische Eigenschaften .....	121
X.18	Temperaturintegration .....	123
X.19	Python-Skripte .....	125
X.20	TTL-File-Sensoren.....	129
X.21	SPARQL-Ergebnisse aus YASGUI .....	134
X.22	SPARQL-Abfrage in GraphDB .....	135

## I Abstract

Der Einsturz der Morandi-Brücke im Jahr 2018 und der Carolabrücke im Jahr 2024 haben die Aufmerksamkeit wieder auf die Anfälligkeit der Strasseninfrastruktur in Europa gelenkt.

In der Schweiz resultiert der zunehmende Schwerverkehr in einer höheren Belastung der Autobahnbrücken, was zu einer Zunahme des Risikos von Ermüdungserscheinungen führt. Es sind insbesondere Dehnungsfugen, die einem erhöhten Verschleiss unterliegen, betroffen.

Zur Lösung dieses Problems wird in dieser Masterthesis ein semantisch digitaler Zwilling (ein digitaler Schatten) vorgeschlagen, der auf *Linked-Data*-Technologien basiert und speziell für die Erhaltung von Autobahnbrücken entwickelt wurde.

Das Ziel besteht darin, ein maschinenlesbares Wissensmodell (*Knowledge Graph*) zu erstellen, das geometrische Daten aus IFC-Modellen und Daten aus Sensoren integriert und als Grundlage für die Analyse von Dehnungsfugen sowie als Hilfsmittel für die Ermüdungsnachweise dient.

Im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche wurden bestehende Ontologien zum Thema Brücken analysiert und bewertet. Auf dieser Grundlage wurden BROT für die Beschreibung der strukturellen Topologie und SOSA für die Modellierung sensorischer Beobachtungen als grundlegende Elemente ausgewählt.

Ergänzend dazu wurde mit ifcBridgeOWL eine eigene Ontologie entwickelt, deren Ziel die formale Darstellung spezifischer Konzepte und Beziehungen aus IFC 4.3 (*IfcBridge*) im semantischen Modell ist. Die Realisierung erfolgt nach einem iterativen methodischen Ansatz, der schliesslich die Erstellung eines RDF-basierten Wissensgraphen (in GraphDB) und dessen Abfrage mittels SPARQL ermöglicht.

Die Validierung des entwickelten *Proof of Concept* erfolgte anhand einer Fallstudie an der Schwarzwaldbrücke in Basel. Zu diesem Zweck wurden sowohl reale als auch synthetische Sensordaten analysiert, wobei ein besonderer Fokus auf das Verhalten der Dehnungsfugen gelegt wurde. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anschliessend semantisch modelliert. Die Validierung erfolgte anhand SPARQL-Regeln, mit deren Hilfe (potenziell) kritische Zustände der Fugen automatisch erkannt werden konnten.

Die Ergebnisse der vorliegenden Masterthesis legen nahe, dass die Verwendung von *Linked Data* und semantischen Technologien im Brückenbau eine tiefergehende Analyse ermöglicht und eine solide Grundlage für ein realistischeres Erhaltungsmanagement bildet.

Das entwickelte *Proof of Concept* stellt einen ersten Schritt hin zu einem digitalen Zwilling dar, der auf mehreren heterogenen Daten basiert und fundiertere technische Entscheidungen unterstützt.

### Schlagworte

**Proof of Concept, Digital Twin, Linked Data, IfcBridge, Brückenerhaltung, Ermüdung**

### Zitiervorschlag

Depoli, M. (2025). *Digitaler Zwilling zur Erhaltung einer Autobahnbrücke. Ein Proof of Concept basierend auf Linked Data*. [Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik]

## II Vorwort

Nach dem Erwerb mehrjähriger Berufserfahrung im Bereich Bauingenieurwesen habe ich mich aus freien Stücken für eine neue Herausforderung entschieden. Die Entscheidung für den Masterstudiengang Virtual Design and Construction (MSc FHNW VDC) resultierte aus dem Bestreben, das Wissen über Building Information Modeling und die Digitalisierung der Baubranche zu vertiefen.

Für die Wahl des Themas war die Berücksichtigung verschiedener Faktoren von entscheidender Bedeutung, wobei insbesondere die Innovation sowie die Evaluation der Zukunftsaussichten im Vordergrund standen: Die Verwendung von Linked Data.

Ich bin überzeugt, dass semantische Technologien in den nächsten Jahren eine zentrale Rolle in Bauprojekten spielen werden, insbesondere in Bezug auf Interoperabilität und intelligente Entscheidungsprozesse.

Ein besonderer Dank gebührt meinem Begleiter Prof. Lukas Schildknecht, dessen Fachkompetenz und prägnantes Feedback einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Arbeit leisteten.

Des Weiteren möchte ich meinem Thesis-Experten David Bucher meinen aufrichtigen Dank aussprechen.

Ein besonderer Dank gebührt auch den Interviewpartnern Lien, Benedikt und Gianluca, die sich die Zeit genommen haben, ihre Perspektiven und Erfahrungen zum Thema zu äussern.

Abschliessend ist es mir ein Anliegen, meiner Familie meinen Dank für ihre Ermutigung und Unterstützung auszusprechen.

*Dopo aver maturato diversi anni di esperienza professionale nel settore dell'ingegneria civile, ho deciso di mia spontanea volontà di affrontare una nuova sfida. La scelta del master in Virtual Design and Construction (MSc FHNW VDC) è stata dettata dal desiderio di approfondire le mie conoscenze sul Building Information Modeling e sulla digitalizzazione del settore edile.*

*La scelta dell'argomento è stata determinata da diversi fattori, tra cui in particolare l'innovazione e la valutazione delle prospettive future: l'uso dei Linked Data.*

*Sono convinto che nei prossimi anni le tecnologie semantiche svolgeranno un ruolo centrale nei progetti di costruzione, in particolare per quanto riguarda l'interoperabilità e i processi decisionali intelligenti.*

*Un ringraziamento speciale va al mio relatore, il Prof. Lukas Schildknecht, la cui competenza professionale e il cui feedback conciso hanno contribuito in modo significativo al successo di questo lavoro.*

*Desidero inoltre esprimere la mia sincera gratitudine al mio relatore David Bucher.*

*Un ringraziamento speciale va anche agli intervistati Lien, Benedikt e Gianluca, che hanno dedicato il loro tempo per condividere le loro prospettive ed esperienze sull'argomento.*

*Infine, desidero esprimere la mia gratitudine alla mia famiglia per il loro incoraggiamento e sostegno.*

**Matteo**

## Glossar

### B

#### **BIM** (*Building Information Modeling*)

BIM ist eine modellbasierte Arbeitsmethode für die digitale Erfassung, Verwaltung und Nutzung von Bauwerksinformationen während ihres gesamten Lebenszyklus, vom Entwurf über die Bauausführung bis hin zum Betrieb (Borrmann et al., 2021).

### D

#### **Dezentralisierung** (*Decentralization*)

Die Übertragung der Kontrolle und Verwaltung von Daten von zentralisierten Systemen auf verteilte, oft interoperable Netzwerke (Bucher et al., 2024).

In der vorliegenden MTH wird der Begriff auf die Verwendung der Prinzipien von Linked Data bezogen, um auf föderierte Weise Informationen über Brücken (strukturelle Komponenten und Daten von Sensoren) bereitzustellen, ohne von einer zentralen Stelle abhängig zu sein.

#### **Dehnungsfuge** (Fahrbahnübergang)

Ein wesentliches Strukturelement von Brücken, das Bewegungen aufgrund von Temperaturschwankungen, dynamischen Belastungen oder Setzungen aufnimmt (Kaufmann, 2025a).

Im Vergleich zum allgemeineren Begriff «*Fahrbahnübergang*» ist der Begriff «*Dehnungsfuge*» technisch präziser und für die strukturelle und semantische Modellierung eines digitalen Zwillings relevanter.

### E

#### **Endpoint** (SPARQL-)

Ein Endpunkt ist definiert als eine standardisierte Schnittstelle, über die SPARQL-Abfragen an RDF-Daten gestellt werden können. Triple Stores fungieren beispielsweise als zielgerichtete Informationsquellen, deren Abruf oder Verknüpfung spezifische Ziele verfolgt (Bonduel et al., 2020b).

#### **Erhaltung**

Als Erhaltung wird die Gesamtheit der Aktivitäten bezeichnet, die darauf abzielen, die Funktionalität, Sicherheit und Langlebigkeit einer bestehenden Infrastruktur (z.B. einer Brücke) über einen bestimmten Zeitraum hinweg zu gewährleisten.

In dieser MTH bezieht sich das Erhaltungsmanagement auf die systematische Verwaltung von Instandhaltungs- und Sanierungsmassnahmen einer Strassenbrücke. Dabei wird ein digitaler Zwilling sowie Linked Data genutzt.

#### **Ermüdung** (Brücken-)

Die Brückenermüdung beschreibt die fortschreitende Verschlechterung der Baumaterialien einer Brücke, die durch zyklische und wiederholte Belastungen (Bianchi et al., 2021), wie z. B. starken Verkehr, verursacht wird.

## I

**IFC (Industry Foundation Classes)**

IFC ist ein offenes und standardisiertes Datenmodell für den herstellerunabhängigen Austausch digitaler Bauwerkmodelle während ihres gesamten Lebenszyklus. Es beschreibt sowohl die Geometrie als auch die Semantik der Komponenten und deren Beziehungen (Borrmann et al., 2021).

**Interoperabilität (in Bau)**

Interoperabilität bezeichnet in diesem Kontext die Fähigkeit verschiedener Systeme und Akteure der Baubranche, Informationen standardisiert auszutauschen und konsistent zu verarbeiten (Bucher et al., 2024).

**Instanz**

Eine Instanz bezeichnet ein konkretes Datenobjekt, das ein individuelles Exemplar einer Klasse darstellt, beispielsweise eine Komponente. In der RDF-Grafik wird eine Instanz als Subjekt mit den entsprechenden Eigenschaften modelliert (Borrmann et al., 2022).

## M

**Mapping**

Mapping bezeichnet die strukturierte Zuordnung von Elementen zweier Datenmodelle, beispielsweise von IFC zu OWL, mit dem Ziel, eine verlustfreie Transformation in semantische Darstellungen wie RDF zu ermöglichen (Borrmann et al., 2021).

## P

**Proof of Concept (PoC)**

Der Proof of Concept bezeichnet die initiale Phase, in der die technische Realisierbarkeit und der praktische Nutzen einer Idee evaluiert werden (Innosuisse, 2025).

In der vorliegenden Masterthesis wird ein PoC präsentiert, der die Anwendung von Technologien wie Linked Data zur Erstellung eines digitalen Zwillings einer Brücke demonstriert. Gemäss (Innosuisse, 2025) erlaubt diese Phase den Test der wissenschaftlichen Ergebnisse in einem Anwendungskontext).

## S

**Semantic Web**

Das Semantic Web stellt eine Erweiterung des World Wide Web dar, indem es Daten in einem für Computer lesbaren Format strukturiert. Infolgedessen können diese nicht nur angezeigt, sondern auch interpretiert, verknüpft und automatisch auf logische Weise verarbeitet werden.

Dies geschieht auf Basis von Standards wie RDF, OWL und SPARQL (Pauwels et al., 2017).

**State of the Art (Stand der Forschung)**

Ein *State of the Art* (STAR) ist definiert als ein systematischer und kritischer Überblick über den aktuellen Wissensstand, Technologien und Ansätze, die für eine spezifische Forschungsfrage von Relevanz sind (Felder, 2025).

Im Rahmen der vorliegenden Masterthesis wird der Versuch unternommen, die bereits existierenden Ontologien im Bereich der Brücken zu erfassen und zu systematisieren.

### III Abkürzungen

<b>ABox</b>	<i>Assertional <b>Box</b></i>
<b>ASTRA</b>	Bundesamt für Strassen
<b>BAR</b>	Schweizerisches <b>B</b> undes <b>a</b> rchiv
<b>BFS</b>	<b>B</b> undesamt für <b>S</b> tatistik
<b>bSDD</b>	<b>b</b> uilding <b>S</b> MART <b>D</b> ata <b>D</b> ictionary
<b>CORS</b>	<i>Cross-<b>O</b>rigin <b>R</b>esource <b>S</b>haring</i>
<b>DSS</b>	<b>D</b> ecision <b>S</b> upport <b>S</b> ystems
<b>DT</b>	<b>D</b> igital <b>T</b> win
<b>DTV</b>	<b>D</b> urchschnittlicher <b>T</b> ages <b>v</b> erkehr
<b>ETHZ</b>	<b>E</b> idgenössische <b>T</b> echnische <b>H</b> ochschule <b>Z</b> ürich
<b>I14Y</b>	Handbuch Interoperabilitätsplattform (Metadatenkatalog für die Schweiz)
<b>IFC</b>	<b>I</b> ndustry <b>F</b> oundation <b>C</b> lasses
<b>IoT</b>	<i><b>I</b>nternet <b>o</b>f <b>T</b>hings / Internet der Dinge</i>
<b>LBD</b>	<b>L</b> inked <b>B</b> uilding <b>D</b> ata
<b>LD</b>	<b>L</b> inked <b>D</b> ata
<b>LINDAS</b>	<b>L</b> inked <b>D</b> ata <b>S</b> ervices
<b>LKW</b>	<b>L</b> ast <b>k</b> raft <b>w</b> agen
<b>MTH</b>	Masterthesis
<b>OGD</b>	<b>O</b> pen <b>G</b> overnment <b>D</b> ata
<b>OWL</b>	<b>W</b> eb <b>O</b> ntology <b>L</b> anguage
<b>PoC</b>	<b>P</b> roof <b>o</b> f <b>C</b> oncept
<b>PSet</b>	<b>P</b> roperty <b>S</b> et
<b>RDF</b>	<b>R</b> esource <b>D</b> escription <b>F</b> ramework
<b>SASVZ</b>	<b>S</b> chweizerische <b>a</b> utomatische <b>S</b> trassen <b>v</b> erkehr <b>s</b> zählung
<b>SBS</b>	<b>S</b> patial <b>B</b> reakdown <b>S</b> tructure
<b>SPARQL</b>	<i>SPARQL Protocol and RDF Query Language / Protokoll- und RDF-Abfragesprache</i>
<b>STAR</b>	<b>S</b> tate of the <b>A</b> rt
<b>SWRL</b>	<b>S</b> emantic <b>W</b> eb <b>R</b> ule <b>L</b> anguage
<b>TBox</b>	<i><b>T</b>erminological <b>B</b>ox</i>
<b>TTL</b>	Turtle-File (.ttl)
<b>twinsb</b>	Strategie des Kantons Basel-Stadt für digitale Zwillinge
<b>URI</b>	<b>U</b> niform <b>R</b> esource <b>I</b> dentifier
<b>VSS</b>	<b>S</b> chweizerischer <b>V</b> erband der <b>S</b> trassen- und <b>V</b> erkehr <b>s</b> fachleute
<b>W3C</b>	<b>W</b> orld <b>W</b> ide <b>W</b> eb <b>C</b> onsortium
<b>WIM</b>	<b>W</b> eigh in <b>M</b> otion
<b>YASGUI</b>	<b>Y</b> et <b>A</b> nother <b>S</b> PARQL <b>G</b> UI

## IV Abkürzungen der Ontologie

<b>ASB-ING</b>	ASB-ING Ontology
<b>Blontology</b>	Bridge Inspection Ontology
<b>BMAT</b>	<b>B</b> uilding <b>M</b> aterial Ontology
<b>BMO</b>	<b>B</b> ridge <b>M</b> aintenance <b>O</b> ntology (2023)
<b>BMDO</b>	<b>B</b> ridge <b>M</b> aintenance <b>D</b> omain <b>O</b> ntology
<b>BOT</b>	<b>B</b> uilding <b>T</b> opology <b>O</b> ntology
<b>BRCOMP</b>	<b>B</b> ridge <b>C</b> omponents Ontology
<b>BriM</b>	<b>B</b> ridge <b>I</b> nformation <b>M</b> odel Ontology
<b>BrMontology</b>	<b>B</b> ridge <b>M</b> aintenance <b>O</b> ntology (2019)
<b>BROT</b>	<b>B</b> ridge <b>T</b> opology <b>O</b> ntology
<b>BSHM</b>	<b>B</b> ridge <b>S</b> tructure and <b>H</b> ealth <b>M</b> onitoring Ontology
<b>CBRPMO</b>	<b>C</b> oncrete <b>B</b> ridge <b>R</b> ehabilitation <b>P</b> roject <b>M</b> anagement <b>O</b> ntology
<b>DATEX II</b>	DATEX II Roadworks Ontology
<b>DCAT</b>	<b>D</b> ata <b>C</b> atalog Vocabulary
<b>EUROTL</b>	Basic European Road OTL
<b>FOAF</b>	<b>F</b> riend <b>O</b> f <b>A</b> <b>F</b> riend Ontology
<b>FOG</b>	<b>F</b> ile <b>O</b> ntology for <b>G</b> eometry formats
<b>GEOM</b>	Ontology for Geometry descriptions
<b>ifcOWL</b>	Ontologie, die das IFC-Schema darstellt
<b>ifcBridgeOWL</b>	Die in dieser Masterthesis entwickelte Ontologie
<b>INTO</b>	<b>I</b> nfrastructure <b>T</b> opology <b>O</b> ntology
<b>OMG</b>	<b>O</b> ntology for <b>M</b> anaging <b>G</b> eometry
<b>PRODUCT</b>	Product Ontology
<b>PROPS</b>	Properties Ontology
<b>SERAF</b>	Smart Applications REFerence Ontology
<b>SKOS</b>	<b>S</b> imple <b>K</b> nowledge <b>O</b> rganization <b>S</b> ystem Ontology
<b>SNN</b>	<b>S</b> emantic <b>S</b> ensor <b>N</b> etwork Ontology
<b>SODIA</b>	Structural Diagnostics Ontology
<b>SOSA</b>	<b>S</b> ensor, <b>O</b> bservation, <b>S</b> ample, and <b>A</b> ctuator Ontology

# 1 Einleitung

Brückeninfrastrukturen stellen einen essenziellen Bestandteil von Verkehrsnetzen dar und bedürfen aufgrund steigender Fahrzeugbelastungen und Alterungsprozesse einer regelmässigen Kontrolle sowie entsprechenden Instandhaltung, um die Nutzung zu gewährleisten (Justen et al., 2022).

Insbesondere im Kontext stark befahrener Autobahnbrücken, wie der Schwarzwaldbrücke in Basel (siehe auch Kap. 3.3), erweist sich eine systematische Überwachung und Instandhaltung als zwingend erforderlich, um die langfristige Funktionsfähigkeit und Sicherheit zu gewährleisten.

Der Einsturz der Morandi-Brücke in Genua (Dari, 2020) im Jahr 2018 verdeutlichte die Anfälligkeit veralteter Infrastrukturen, insbesondere aufgrund von Ermüdungserscheinungen, in signifikanter Weise. Dieses Ereignis hat zu einer grundlegenden Neubewertung der strukturellen Sicherheit in ganz Europa, aber auch in der Schweiz beigetragen.

Der jüngste Teilsturz der Carolabrücke (Höltschi, 2024) in Dresden im Jahr 2023 verdeutlicht, dass es sich hierbei nicht um isolierte Vorfälle handelt, sondern um Symptome eines strukturellen Mangels in Bezug auf die Überwachung und Instandhaltung einer Vielzahl von Brücken.

Die Nicht-Ergreifung geeigneter Massnahmen resultiert in einer Zunahme entsprechender Vorfälle in der Zukunft. Obwohl die für eine intelligente und vorausschauende Instandhaltung erforderlichen Technologien, wie digitale Zwillinge, bereits (partiell) vorhanden sind, fehlt es derzeit aufgrund offensichtlicher Interoperabilitätsprobleme an einem breiten und anwendungsorientierten Einsatz dieser Systeme.

Die Verwaltung von Brückendaten erfolgt derzeit überwiegend in getrennten Informationssystemen und proprietären Systemen. Die Herausforderung besteht in der Integration dieser heterogenen Datenquellen und der Strukturierung des Zugangs zu den Daten.

Ein vielversprechender Ansatz zur Überwindung dieser Fragmentierung ist der Einsatz semantischer Technologien in Form von Linked Data und insbesondere Ontologien. Diese Methodologie ermöglicht die formale Darstellung von Beziehungen zwischen Entitäten.

Dadurch wird die automatisierte Abfrage, Analyse und Interpretation dieser Beziehungen ermöglicht.

Ontologien für spezifische Bereiche der Brückeninstandhaltung sind bereits existent. Die konkrete Anwendung und Kombination dieser Ontologien in einem interaktiven digitalen Zwilling wurden jedoch bisher nur partiell realisiert.

Das Ziel dieser Masterthesis besteht folglich in der Entwicklung eines konzeptionellen und technischen *Proof of Concept* (PoC) auf Basis von Linked Data. Der folgende Beitrag hat zum Ziel, auf welche Art und Weise semantisch angereicherte Daten über Brücken für die Erhaltung genutzt werden können. Der Fokus der Betrachtung liegt auf der Dehnungsfuge und dem Ermüdungsproblem.

Zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage, *wie ein interaktiver digitaler Zwilling mithilfe von Linked Data aufgebaut werden kann, um die Erhaltung einer Brücke zu unterstützen*, werden in dieser Arbeit fünf aufeinander aufbauende Teilfragestellungen untersucht:

1. *Welche bestehenden Ontologien eignen sich für die Erhaltung von Autobahnbrücken?*
2. *Welche Technologien und Werkzeuge des semantischen Webs können zur Sicherstellung der Interoperabilität eingesetzt werden?*
3. *Welche spezifischen Daten sind relevant, um insbesondere Dehnungsfugen in den digitalen Zwilling zu integrieren?*
4. *Wie lassen sich diese Daten mit geeigneten Ontologien in Graphdaten transformieren und auswerten?*
5. *Wie können die Informationen aus der Graphdatenbank benutzerfreundlich visualisiert werden?*

## 2 Theoretische Grundlage

Für das Verständnis der Planung (des Konzepts) und der Umsetzung eines digitalen Zwillings für die Instandhaltung einer Autobahnbrücke ist eine solide theoretische Grundlage erforderlich. In diesem Kapitel werden die grundlegenden Konzepte und Technologien, darunter der digitale Zwilling, Linked Data, Ontologien und relevante Werkzeuge, erläutert und vor allem systematisch in einen Zusammenhang gebracht.

### 2.1 Digital Twin

Ein «*Digital Twin*» (DT), zu Deutsch digitaler Zwilling, bezeichnet ein virtuelles Abbild eines physischen Objekts, das kontinuierlich mit Daten aus der realen Welt aktualisiert wird. Dadurch ist es möglich, den aktuellen Zustand und das Verhalten des realen Objekts sowie dessen zukünftige Entwicklung abzubilden. Die Grundidee besteht in der Verbindung zwischen dem realen System und seinem digitalen Gegenstück, sodass ein kontinuierlicher Informationsfluss entsteht, der Analyse, Vorhersage und Optimierung ermöglicht (Kang et al., 2024).

Ursprünglich wurde das Konzept des DT im Kontext des *Product Lifecycle Management* (PLM) insbesondere von Michael Grieves Anfang der 2000er Jahre entwickelt. Später wurde das Konzept von Glassgen und Stargel (2012) im Rahmen von NASA-Projekten weiterentwickelt und als Schlüsseltechnologie für zukünftige Luft- und Raumfahrtsysteme positioniert, zitiert in (Abisset-Chavanne et al., 2024). Mittlerweile findet das Konzept breite Anwendung in vielen Bereichen - vom Maschinenbau und der Luftfahrt über die Medizin und urbane Systeme bis hin zur Baubranche und insbesondere der Instandhaltung von Infrastrukturen wie Brücken oder Strassen.

Auch (Mousavi et al., 2024) betonen diese Entwicklung und zeigen auf, dass insbesondere im Bereich der Brückenerhaltung die Kombination aus Digital Twin, Datenfusion und intelligenter Entscheidungsunterstützung neue Möglichkeiten für die ganzheitliche Lebenszyklusbetrachtung bietet.

Darüber hinaus haben die zunehmende Verfügbarkeit von IoT-Sensoren und die Weiterentwicklung der Webtechnologien das Potenzial von Digital Twins weiter vergrößert. Insbesondere (Relekar et al., 2021) betonen die Bedeutung der fortschrittlichen Visualisierung von Raum-Zeit-Daten und deren Kontextualisierung in 3D-basierten Umgebungen. Die Integration von 3D-Modellen, Sensordaten und Webschnittstellen ermöglicht eine verstärkte Interaktion zwischen Menschen und Daten (*Human-Data Interaction*) und führt so zu einem effizienteren Entscheidungsprozess für technische und nicht-technische Nutzer.



Abb. 1 : Was man idealerweise erreichen will, in Anlehnung an (Smolira, 2025)

Obwohl das Potenzial von DTs auf dem Markt (siehe auch Anhang X.4) zunehmend wahrgenommen wird, ist die Begriffsdefinition nach wie vor unklar. Um ein umfassendes Verständnis der Terminologie des DT zu erlangen, ist eine klare Unterscheidung unerlässlich, auf die in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

### 2.1.1 Abgrenzung zwischen «Digital Twin»

Der Begriff «Digital Twin» hat in den letzten Jahren eine zunehmende Präsenz in der Baubranche gezeigt. Allerdings fehlt es in der Praxis an einer eindeutigen Definition, was zu unterschiedlichen Interpretationen und Verwendung führt.

Wie im Rahmen der Geoinformationsstrategie *twinbs* (Moser & Michel, 2025) betont wird, handelt es sich um einen «*unscharfen Begriff*», dessen Bedeutung «*nicht ganz klar*» ist und der «*oft falsch verwendet*» wird. Dies verdeutlicht die Relevanz einer präzisen Abgrenzung zu verwandten Begriffen wie «*Digital Model*» und «*Digital Shadow*». (siehe auch Anhänge X.2 und X.3)

Eine der anerkanntesten Klassifikationen stammt von (Kritzinger et al., 2018), die diese drei Begriffe nach dem Grad der Integration und Interaktion mit der realen Welt unterscheiden.

Die folgende Abb. 2 veranschaulicht die wesentlichen Unterschiede zwischen den Begriffen:

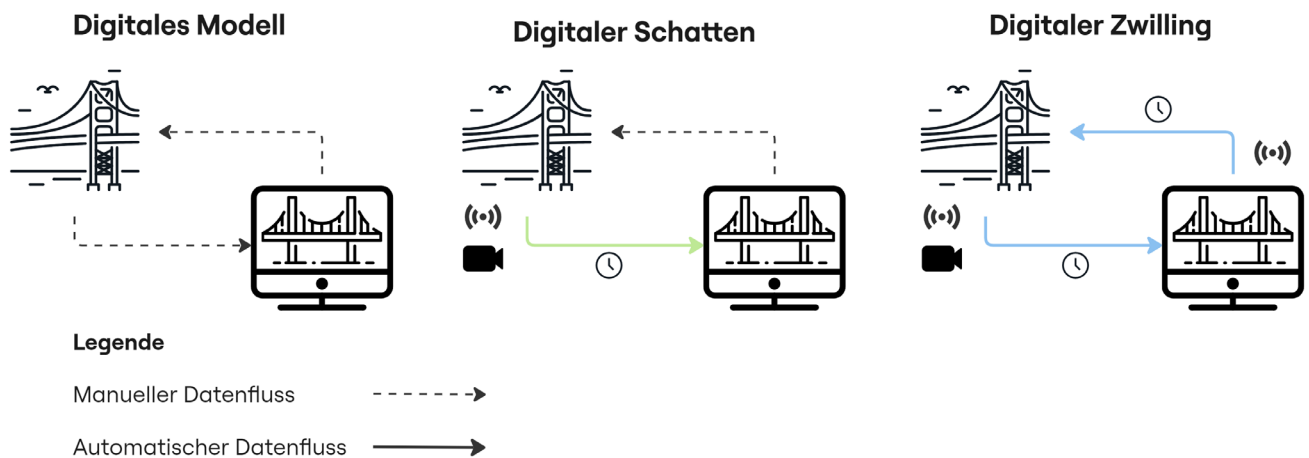


Abb. 2 : Abgrenzung zwischen Digitalem Zwilling

### 2.1.2 Digital Shadow

Ein «Digital Shadow» (digitaler Schatten) bezeichnet eine digitale Repräsentation eines physischen Objekts, die automatisch mit aktuellen Daten aus der realen Welt versorgt wird (Kritzinger et al.). Die Datenversorgung kann dabei beispielsweise durch Sensoren erfolgen.

Dabei erfolgt der automatische Datenfluss nur in eine Richtung, nämlich vom physischen Objekt zum digitalen Modell. Das digitale Abbild wird somit regelmässig aktualisiert, kann aber nicht selbstständig auf das reale Objekt zurückwirken. Es handelt sich also um eine passive Synchronisation.

Digitale Schatten finden häufig Anwendung in der Überwachung und Zustandsbewertung von Infrastrukturanlagen, beispielsweise bei der Erfassung von Temperatur- oder Vibrationsdaten von Brückenbauteilen. Die Datenerfassung erfolgt automatisch und die Visualisierung im digitalen Modell, ohne jedoch Einfluss auf die Steuerung oder den Betrieb der realen Anlage zu nehmen (Gao et al., 2024).

Ein typisches Beispiel ist ein sensorbasiertes Monitoring-System einer Brücke, das strukturelle Kenngrößen in Echtzeit aufzeichnet und im digitalen Modell abbildet, jedoch keine Entscheidungen trifft oder Aktionen auslöst. Das Modell fungiert folglich lediglich als Beobachtungsplattform, ohne über Interventionsfähigkeit zu verfügen (Jasiński et al., 2023).

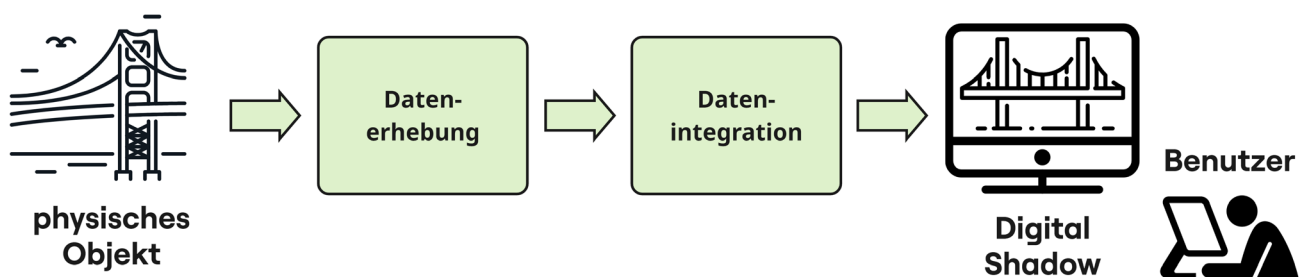


Abb. 3 : Aktuelle Interpretation eines digitalen Zwillings

### 2.1.3 Konzept Digital Twin

Wie von (Herle et al., 2020) und auch in (Heise et al., 2024) dargelegt, werden Techniken des *Semantic Web* häufig für die Implementierung von verknüpften Modellen (*linked models*) verwendet, um heterogene Informationssysteme flexibel und skalierbar zu integrieren.

Dieser Ansatz erweist sich insbesondere in infrastrukturellen Kontexten als vorteilhaft, in denen eine Koordination unterschiedlicher Datenquellen (strukturelle und sensorische) innerhalb eines kohärenten und abfragbaren Digital Twins erforderlich ist (Herle et al., 2020).

Auf dieser Grundlage wurde das Grundkonzept definiert, das der Digital Twin erfüllen muss (siehe folgende Abb. 4) und das weiter unten näher erläutert wird.

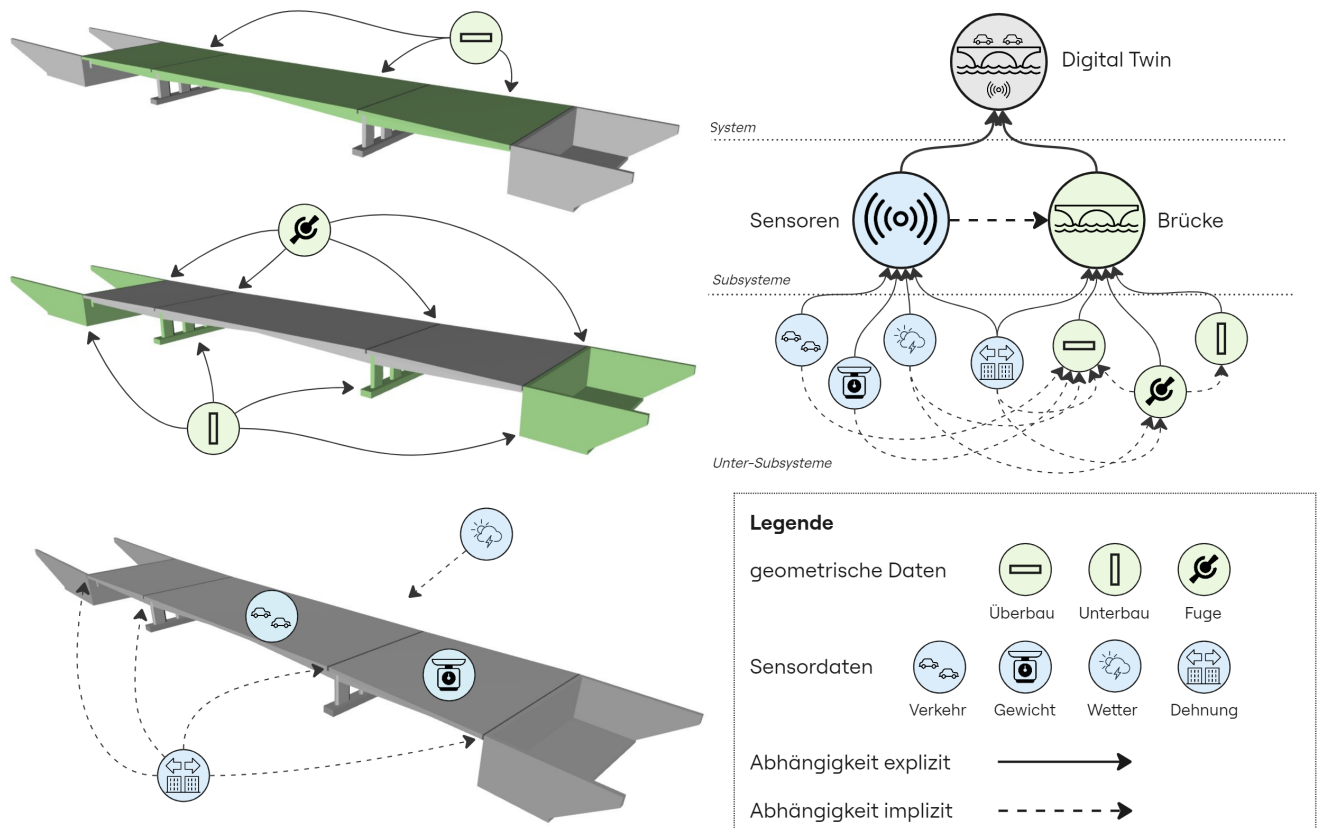


Abb. 4 : Grundkonzept des Digital Twin – semantische Ebene

Das entwickelte Konzept des Digital Twin zielt darauf ab, eine integrierte und mehrstufige Sichtweise auf eine physische Struktur – in diesem Fall eine Brücke – und ihre funktionalen und informativen Teilsysteme zu präsentieren. Die Architektur des DT ist in Abb. 4 dargestellt und gliedert sich die Architektur in drei Ebenen, die von den unteren Subsystemen (elementare Subsysteme) bis zur Ebene des eigentlichen DT reichen, in dem strukturierten und unstrukturierten Daten zusammenlaufen.

Die Grundlage des Modells bildet die explizite Modellierung der Geometrie der physischen Struktur, welche Elemente wie Unterbau, Überbau und Dehnungsfugen umfasst. Diese werden im Digital Twin durch dreidimensionale Modelle repräsentiert. Wie von (Gao et al., 2024) betont, stellen diese Modelle den räumlichen Referenzkern dar, der für die korrekte Platzierung und Interpretation der Sensordaten essenziell ist.

Zusätzlich zu der geometrischen Komponente integriert der Digital Twin ein Netzwerk von Sensordaten, die von Teilsystemen gesammelt werden, die mit in der Struktur verteilten Geräten verbunden sind. Beispiele für solche Teilsysteme sind Verkehrssensoren, Gewichtssensoren - auch als WIM bezeichnet, Wetterstationen, und Dehnungsmessgeräte. Wie von (Kang et al., 2024) betont wird, ist dieses Überwachungssystem essenziell, um ein digitales Modell in einen digitalen Schatten und in einer späteren Phase in einen echten Digitalen Zwilling zu transformieren, der in der Lage ist, dynamisch auf Veränderungen des physikalischen Zustands zu reagieren.

## 2.2 Linked Data

In der heutigen Zeit wird es immer wichtiger, Informationen nicht nur maschinenlesbar, sondern auch maschinenverstehbar zu machen, zunehmend an Bedeutung – ein zentrales Ziel von *Open Data* in der Schweiz (BFS, 2020). Zudem ist die zunehmende Vernetzung von Informationssystemen mit dem Erfordernis neuartiger Ansätze für die semantische Verknüpfung von Daten verbunden.

Insbesondere in der Baubranche, wo Informationen aus diversen Quellen, Fachgebieten und Softwarelösungen stammen, stellt die Integration dieser heterogenen Daten eine signifikante Herausforderung dar. In diesem Kontext spielt das Konzept der *Linked Data* (LD) eine entscheidende Rolle.

LD bezeichnet eine Methode zur strukturierten Veröffentlichung und Verknüpfung von Daten im Web. Dabei ist jedes Datenelement durch eine eindeutige Webadresse – eine URI (*Uniform Resource Identifier*) – identifizierbar (Riegelning et al., 2023).

Die Daten werden in Form von Tripeln dargestellt: Die klassische Trias der Satzstruktur, bestehend aus Subjekt, Prädikat und Objekt, findet Anwendung. In der Abb. 5 wird ein Beispiel dargestellt:

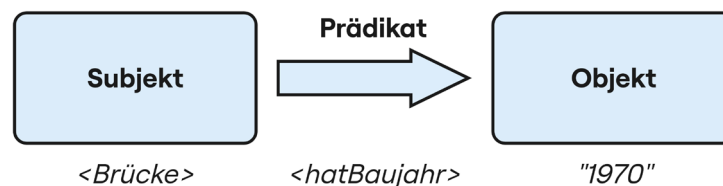


Abb. 5 . Ein Beispiel für ein Triple

Die zugrunde liegende Datenstruktur ist dem *Resource Description Framework* (RDF) zuzuordnen, dem Fundament des sogenannten *Semantic Web*. Die Verbindung dieser Triple resultiert in der Entstehung eines vernetzten Graphen des Wissens, der sich über einzelne Dateien, Systeme und sogar Organisationen hinweg erstrecken kann (Borrmann et al., 2021).

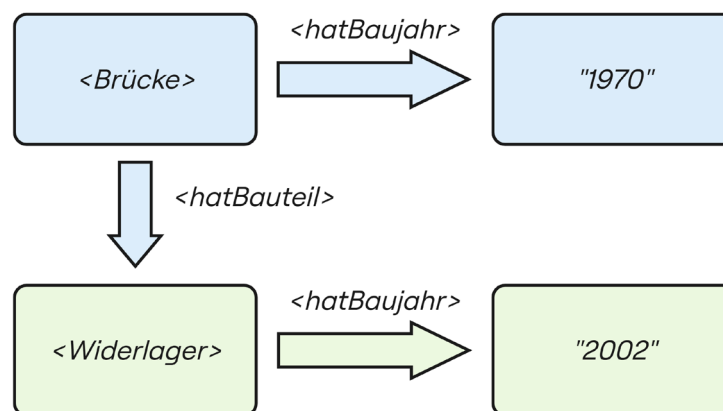


Abb. 6 : Ein Beispiel von einem Graph

Eine weitere Technologie ist SPARQL - die SPARQL Protocol and RDF Query Language - mit der RDF-Datenbanken (*Triplestore*) effizient abgefragt werden können. SPARQL ermöglicht nicht nur einfache Suchanfragen, sondern auch komplexe Auswertungen über verknüpfte Datenquellen hinweg (Riegelning et al., 2023).

So können z.B. über eine zentrale Abfrage alle semantisch verknüpften Bauteile in verschiedenen Teilmodellen gefunden werden, ohne dass eine zentrale Datenhaltung notwendig ist (Borrmann et al., 2021).

Zur formalen Beschreibung von Konzepten und deren Beziehungen wird die *Web Ontology Language* (OWL) verwendet. OWL ermöglicht die Erstellung strukturierter Wissensmodelle (Ontologien), die z.B. Klassen, Eigenschaften, Einschränkungen und Hierarchien enthalten. Damit können Daten nicht nur dargestellt, sondern auch logische Schlüsse daraus gezogen werden - eine zentrale Fähigkeit für automatisierte Prüfungen, Klassifizierungen oder Regelanwendungen im digitalen Planen und Bauen (Borrmann et al., 2021).

## 2.2.1 Semantik und Interoperabilität

In der kontemporären Zeit ist Interoperabilität von essenzieller Signifikanz, um den Austausch und die Wiederverwendung von Informationen über Software-, Disziplin- und Phasengrenzen hinweg zu ermöglichen (siehe auch Anhang Interview X.9).

In der praktischen Anwendung stellt jedoch die Semantik eine signifikante Herausforderung dar: Die Bedeutung von Informationen ist für Maschinen oft schwer erfassbar (Riegelning et al., 2023).

Einerseits fehlt den Maschinen der für das Verständnis notwendige Kontext, andererseits können Begriffe aufgrund ihrer Mehrdeutigkeit unterschiedlich interpretiert werden.

Zum Beispiel: «Eine Bogenbrücke ist eine Brücke mit einem oder mehreren Bogentragwerken, die typischerweise durch Druckkräfte getragen werden» (Gotsch, 2025). Der Bogen kann unter, über oder durch die Fahrbahn verlaufen, wie in Abb. 7 dargestellt.

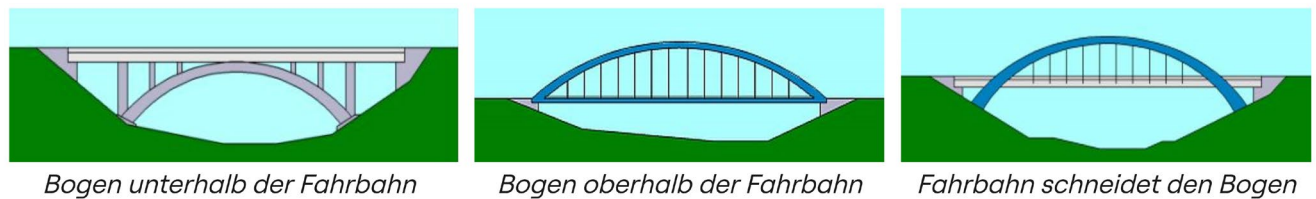


Abb. 7 : Drei Varianten der Bogenbrücke, in Anlehnung an (Gotsch, 2025)

LD bietet einen neuen Ansatz zur Verbesserung der Interoperabilität, indem es ein semantisches, web-basiertes Datenmodell zur Verfügung stellt, das auf denselben bestehenden Daten aufbaut. Durch die Vergabe eindeutiger Identifikatoren (URIs) und die explizite Modellierung von Beziehungen werden vorhandene Informationen vernetzt, angereichert und maschinenverständlich gemacht, ohne sie duplizieren (Redundanz) oder zentralisieren zu müssen (Bucher et al., 2024).

In der Baubranche ermöglicht LD insbesondere die Erstellung semantischer Verknüpfungen zwischen verschiedenen Modellen. Ein Beispiel hierfür ist die Verknüpfung von Architektur-, Statik- und HLKS-Modellen (Borrmann et al., 2021).

Im Rahmen der Interviews mit Experten aus dem Bereich LD (Anhänge Interviews X.9 und X.10) wurde zudem deutlich, dass der LD-Ansatz zur Verbesserung der in 3D/BIM-Modellen enthaltenen Informationen wirksam sein kann. Dieser Ansatz ermöglicht die Verwaltung grosser Datenmengen, die miteinander verknüpft werden können, wodurch Redundanzen vermieden werden.

Der LD-Ansatz, bei dem Daten in *Triple* (Subjekt -> Prädikat -> Objekt) organisiert werden, vermeidet derartige Probleme und gewährleistet eine grössere Interoperabilität, wodurch zuvor unbekannte Daten integriert werden können. Im vorliegenden spezifischen Kontext ermöglicht dieser Ansatz nicht nur die Generierung präziserer Daten, sondern auch die Optimierung des Ermüdungsberechnungsprozesses.

## 2.2.2 RDF – Flexible Datenrepräsentation

Das *Resource Description Framework* (RDF) konstituiert das Kernmodell für LD und beschreibt Informationen mittels strukturierter Aussagen – sogenannter Triple. Diese ermöglichen eine flexible, erweiterbare Datenrepräsentation. Dabei ist jede Ressource eindeutig identifizierbar und wird in einen Graphen eingebettet (Borrmann et al., 2021).

In einem RDF-Graphen (oder einer generellen Graphdatenbank) werden mehrere dieser Triples zu einem Graphen zusammengefasst, wobei Subjekte und Objekte als Knoten und Prädikate als gerichtete Kanten dargestellt werden. Dadurch wird die Modellierung komplexer Beziehungen zwischen Entitäten ermöglicht, ohne dass eine starre, vordefinierte Struktur wie bei klassischen relationalen Datenbanken erforderlich ist (Borrmann et al., 2021).

Graphdaten ermöglichen eine dynamische Erweiterung, bei der neue Informationen flexibel integriert und bestehende Wissensstrukturen kontinuierlich angepasst werden können, ohne das Gesamtsystem zu destabilisieren. Diese Eigenschaft erweist sich insbesondere im Kontext domänenübergreifender Anwendungen, wie sie in der Baubranche bei digitalen Zwillingen zum Einsatz kommt, als von Relevanz.

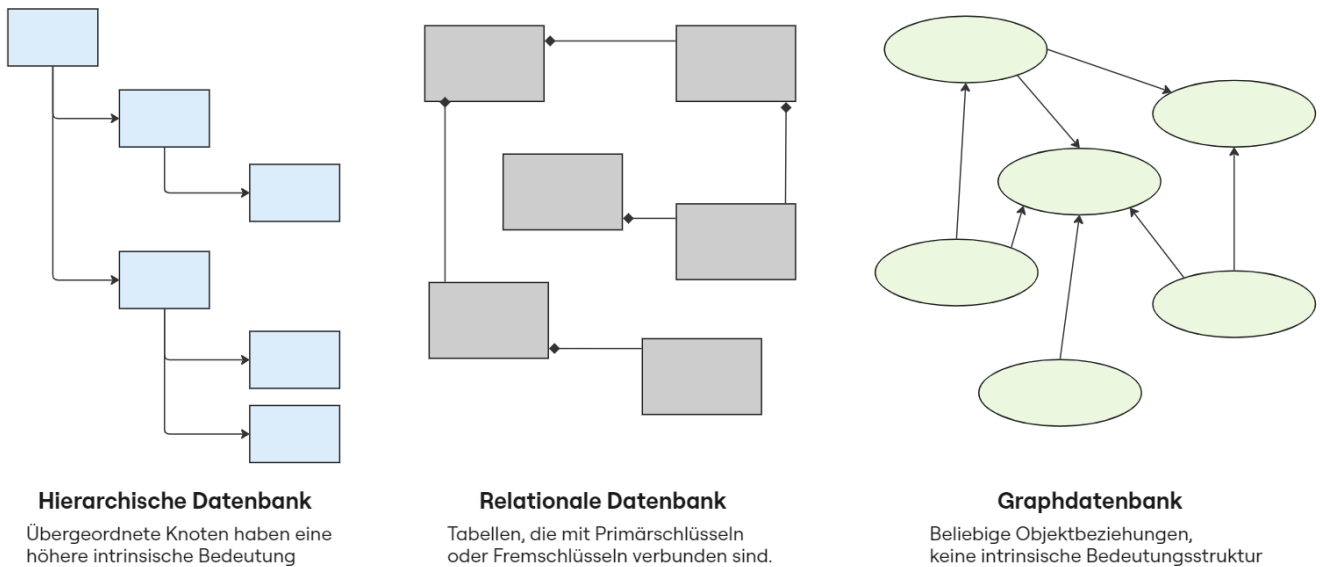


Abb. 8 : die 3 verschiedene Datenbanktypen

Im Gegensatz zu herkömmlichen Autorendateiformaten, insbesondere IFC-STEP, die oft schwer aufzuschlüsseln oder flexibel anzupassen sind, bieten RDF-basierte Darstellungen wie ifcOWL oder modulare *Linked Building Data* (LBD)-Ontologien eine deutlich höhere Flexibilität (Bucher et al., 2024). Sie ermöglichen eine dezentrale Modellierung, bei der Datenquellen aufgeteilt, neu kombiniert und auch semantisch durch Dritte erweitert werden können, beispielsweise durch zusätzliche Klassen, Eigenschaften oder Domänenansichten (Borrmann et al., 2021).

Des darüber hinaus besteht die Grundlage zur Speicherung von RDF-Daten in diversen Serialisierungsformaten, zu denen unter anderem Turtle (.ttl), RDF/XML oder JSON-LD zählen. Dies gewährleistet eine umfassende maschinelle Verarbeitbarkeit und Integration in Webtechnologien (Borrmann et al., 2021).

### 2.2.3 Abfragen mit SPARQL

SPARQL ist die standardisierte Abfragesprache für RDF-Daten und ermöglicht die gezielte Extraktion von Informationen aus einem semantischen Graphen (Riegelning et al., 2023). Es besteht die Möglichkeit, komplexe Datensätze zu definieren, Filter zu setzen und Daten über verschiedene verlinkte Graphen hinweg zu kombinieren. Dieser Vorgang ähnelt dem der *Joins* (Schildknecht, 2024) in relationalen Datenbanken, ist jedoch wesentlich mächtiger und flexibler.

Im Gegensatz zu SQL bietet SPARQL erweiterte Möglichkeiten, um Beziehungen zwischen verteilten Datenquellen aufzudecken – selbst dann, wenn deren genaue Struktur im Voraus nicht bekannt ist (Es handelt sich um eine Sprache, die genau für solche Szenarien entwickelt wurde).

SPARQL erweist sich als eine geeignete Technologie für dynamische und heterogene Datenumgebungen und Anwendungsfälle, wie sie typischerweise in der Baubranche vorliegen (Bucher et al., 2024).

Gemäss (Borrmann et al., 2021) kann SPARQL in der Baubranche genutzt werden, um aus einem verknüpften Modell gezielt Informationen zu extrahieren. Dies umfasst beispielsweise alle Bauteile, die mit einem bestimmten Materialtyp, einer Funktion oder einem Prüfvermerk assoziiert sind. Dies fördert datengetriebene Prozesse wie die Erhaltung einer Brücke auf semantischer Ebene.

Die konsequente Anwendung von SPARQL bei der Veröffentlichung von strukturierten Daten sowie die Nutzung semantischer Verknüpfungen resultiert in der Generierung eines intelligenten Informationsraumes. In diesem Kontext erfolgten eine kontextbezogene Kombination und Analyse von Inhalten aus diversen Quellen.

## 2.3 Ontologie

Der Einsatz semantischer Technologien ist eine zentrale Voraussetzung für den Aufbau eines digitalen Zwillinges für das Erhalten einer Brücke im Sinne von LD und Ontologien bilden dabei die grundlegende Struktur, auf der semantische Modelle aufbauen.

Eine Ontologie (im Kontext von Linked Data) ist eine strukturierte Repräsentation von Wissen, die es erlaubt, Konzepte und ihre Beziehungen in einer Domäne formal zu definieren.

Gemäss Gruber (1993), zitiert in (Getuli, 2020), werden Ontologien definiert als «*a specification of a conceptualization*», womit sie als eine explizite Beschreibung einer Konzeptwelt zu verstehen sind.

Aus diesem Grund bildet die Ontologie die Grundlage für die Modellierung von Wissen in einer für Maschinen lesbaren und verständlichen Form.

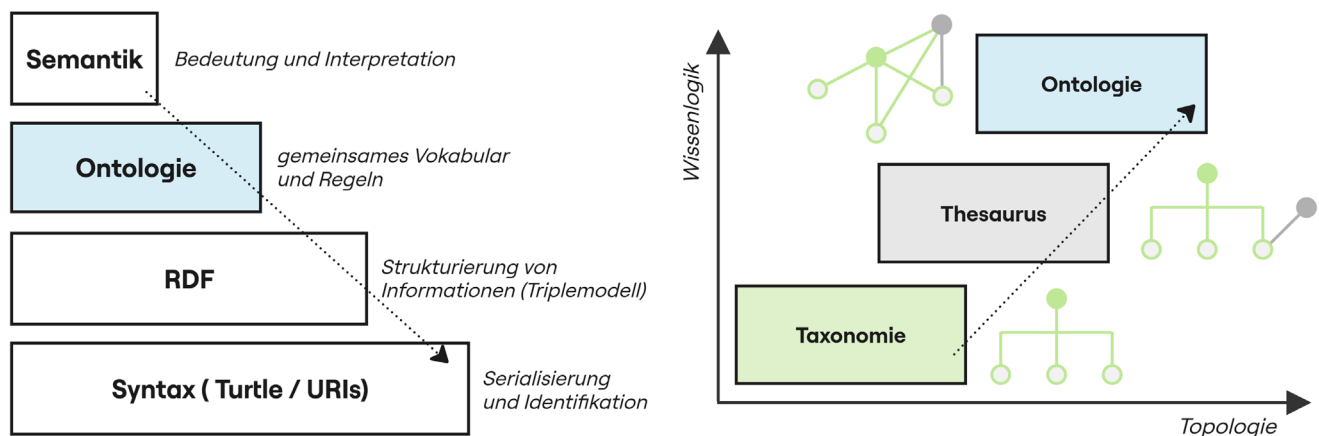


Abb. 9 : Zusammenhang zwischen Ontologien und semantischen Strukturen

Ontologien sind auch zentral für die semantische Interoperabilität, da sie sowohl die Bedeutung (Semantik) von Begriffen als auch deren Beziehungen und logische Einschränkungen maschinenlesbar machen.

In Kapitel 2.2.1 wurde bereits auf die Problematik der semantischen Mehrdeutigkeit eingegangen, insbesondere in der Baubranche. Der Begriff «*Bogenbrücke*» ist mit einer Varietät an potenziellen Interpretationen assoziiert. Zur Lösung dieser Problematik eignen sich Ontologien besonders gut, da sie durch die Definition expliziter Beziehungen und einer klar strukturierten Taxonomie eine eindeutige Bedeutung der verwendeten Begriffe sicherstellen.

### 2.3.1 Begriffsklärung

Im Vorfeld der Analyse spezifischer Ontologien ist es von essenzieller Bedeutung, die Schlüsselbegriffe in den entsprechenden Kontext zu setzen. Dies umfasst insbesondere die Taxonomie, das Thesaurus, die Ontologie selbst und die Topologie. In ontologischen Modellen werden die ersten drei Begriffe synonym verwendet und verwechselt, jedoch weisen sie signifikante Unterschiede auf.

Eine Taxonomie ist ein System der Klassifizierung, bei dem Konzepte in eine reine Hierarchie von Ober- und Unterklassen unterteilt werden (Getuli, 2020). Ein Thesaurus erweitert diese Struktur durch die Erfassung von Synonymen und verwandten Begriffen, bleibt aber weniger formal als eine Ontologie. Eine Ontologie formalisiert demnach Konzepte, ihre Eigenschaften und logischen Beziehungen und definiert sie in einer maschinenlesbaren Form (vgl. COGITO Project, 2022).

Ontologien stellen somit nicht nur eine Sammlung von Begriffen und deren Klassifikation dar, sondern ein vollständiges logisches Modell, das semantische Beziehungen explizit beschreibt und maschinell interpretierbar macht (Borrmann et al., 2021).

Im Zusammenhang mit Digitalen Zwillingen bilden Ontologien die Grundlage für die Beschreibung realer Brückenbauwerke (einschliesslich ihrer Struktur, ihres Zustands und ihrer funktionalen Beziehungen) und sind ideal für das in Kapitel 2.1.3 beschriebene DT-Konzept.

### 2.3.2 Anforderungen an Ontologien

Die Effektivität einer Ontologie ist dabei abhängig von ihrer Eignung für den jeweiligen Anwendungsfall sowie von der Erfüllung der entsprechenden Anforderungen.

Im Rahmen der Analyse von Brückenkonstruktionen manifestieren sich die zuvor genannten Anforderungen in der hohen Komplexität und Vielschichtigkeit der realen Szenarien, die im Rahmen der Reproduktion zu berücksichtigen sind.

Eine ausschliesslich auf der Struktur der Komponenten und deren Attributen basierende Modellierung erweist sich als unzureichend. Stattdessen müssen die dynamischen Sensordaten, die funktionalen und kausalen Beziehungen zwischen den Entitäten und das branchenspezifische Fachwissen (z.B. Ermüdungsnachweis) explizit und maschinenlesbar modelliert werden (Ren et al., 2019).

Darüber hinaus resultieren aus der Notwendigkeit, heterogene Datenquellen zu verknüpfen und interoperabel zu machen, weitere Anforderungen wie Dateninterpretation. Ein Verständnis für die Interdependenzen der Daten ist daher essenziell.

Ein Beispiel ist die gemeinsame Interpretation von Temperatur- und Dehnungsdaten über den gesamten Lebenszyklus einer Brücke.

Das Ziel besteht darin, bestehende Ontologien zu identifizieren, die sich durch ihre technische Robustheit, konzeptionelle Erweiterbarkeit und Praxistauglichkeit für diesen speziellen Anwendungsfall anhand der entsprechenden Anforderungen auszeichnen.

Tab. 1 : Anforderungen an Ontologien

	Anforderungen	Beschreibung	(Quelle)
1	<b>Interoperabilität</b>	Kompatibilität und semantische Verknüpfung mit dem IFC-Standard, um die Integration von Bauwerksinformationen zu erleichtern.	(COGITO Project, 2022)
2	<b>Semantische Eindeutigkeit</b>	Eindeutige Definition von Klassen und Relationen, um semantische Mehrdeutigkeiten (siehe Kap. 2.2.1) zu vermeiden.	(Getuli, 2020)
3	<b>LD-Kompatibilität</b>	Verwendung von RDF als Datenmodell und bevorzugte Serialisierung in Turtle (.ttl) für eine benutzerfreundliche Linked-Data-Integration.	(Bonduel et al., 2020b)
4	<b>Modularität</b>	Aufteilung der Ontologie in unabhängige Module (weitere kleine Ontologien), die flexibel erweitert werden können.	(COGITO Project, 2022)
5	<b>Brückenspezifische Fachlichkeit</b>	Die Ontologie muss spezifisches Domänenwissen (Brücke, Dehnungsfuge) abbilden	(Ren et al., 2019)
6	<b>Integration Sensordaten</b>	Einbindung von Sensordaten (z.B. Dehnung, Temperatur, Verkehrslasten) zur Zustandsüberwachung.	basierend auf Konzept DT, Kap. 2.1.3
7	<b>Verfügbarkeit (online)</b>	Die Ontologie musste öffentlich zugänglich, versioniert und maschinenlesbar publiziert sein.	(COGITO Project, 2022)

Die zuvor genannten Anforderungen fungieren als Fundament für die anschliessende Evaluation der in Kapitel 2.3.3 analysierten Ontologien und evaluieren, welche davon für die Verwendung im in Kapitel 2.1.3 definierten Konzept geeignet sind.

### 2.3.3 State of the Art: Ontologie

In den letzten Jahren hat die Entwicklung semantischer Modelle in der Baubranche erheblich an Bedeutung gewonnen (COGITO Project, 2022). Insbesondere im Bereich der Brückenerhaltung bieten sie neue Möglichkeiten, Informationen strukturiert, interoperabel und maschinenlesbar darzustellen.

Im Rahmen dieser MTH wurden daher verschiedene Ontologien identifiziert und bewertet, die in einem digitalen Zwilling für die Brückenerhaltung eingesetzt werden können. Die Auswahl basiert auf den zuvor definierten Anforderungen (siehe Kapitel 2.3.2) und konzentriert sich auf Ontologien, die Konzepte für den Anwendungsfall wie Bauteile, Sensoren und Dehnungsfugen abbilden. Ziel ist es, deren Eignung für den Einsatz im geplanten zukünftigen PoC systematisch zu analysieren.

Ontologien wie BROT (Hamdan & Scherer, 2020) und die untergeordnete Ontologie BRCOMP (Hamdan & Kozak, 2020a) bieten ein gut strukturiertes Modell zur Beschreibung der Brückenkomponenten (z.B. Überbau, Unterbau e auch Dehnungsfuge) und ihrer topologischen Beziehungen. Aufgrund ihrer Modularität und der Möglichkeit der direkten Verknüpfung mit der IFC-Struktur ist eine Integration in die gegenwärtigen (BIM-)Arbeitsabläufe möglich.

Während BROT die statische Struktur der Brücke beschreibt, adressiert die Ontologie BMDO (Zhang et al., 2023) die semantische Modellierung von Zustandsinformationen, Bewertungskriterien und Instandhaltungsmassnahmen. Sie ist durch ihre klare Hierarchisierung in Komponentenebenen und Entscheidungsregeln leicht verständlich strukturiert. Die Ontologie BMO (Jiang et al., 2023) verfolgt auch ähnliche Ziele, scheint aber Probleme bei der technischen Umsetzung zu haben. Sie enthält jedoch wesentliche Konzepte für die Verknüpfung mit den Instandhaltungsmassnahmen einer Brücke.

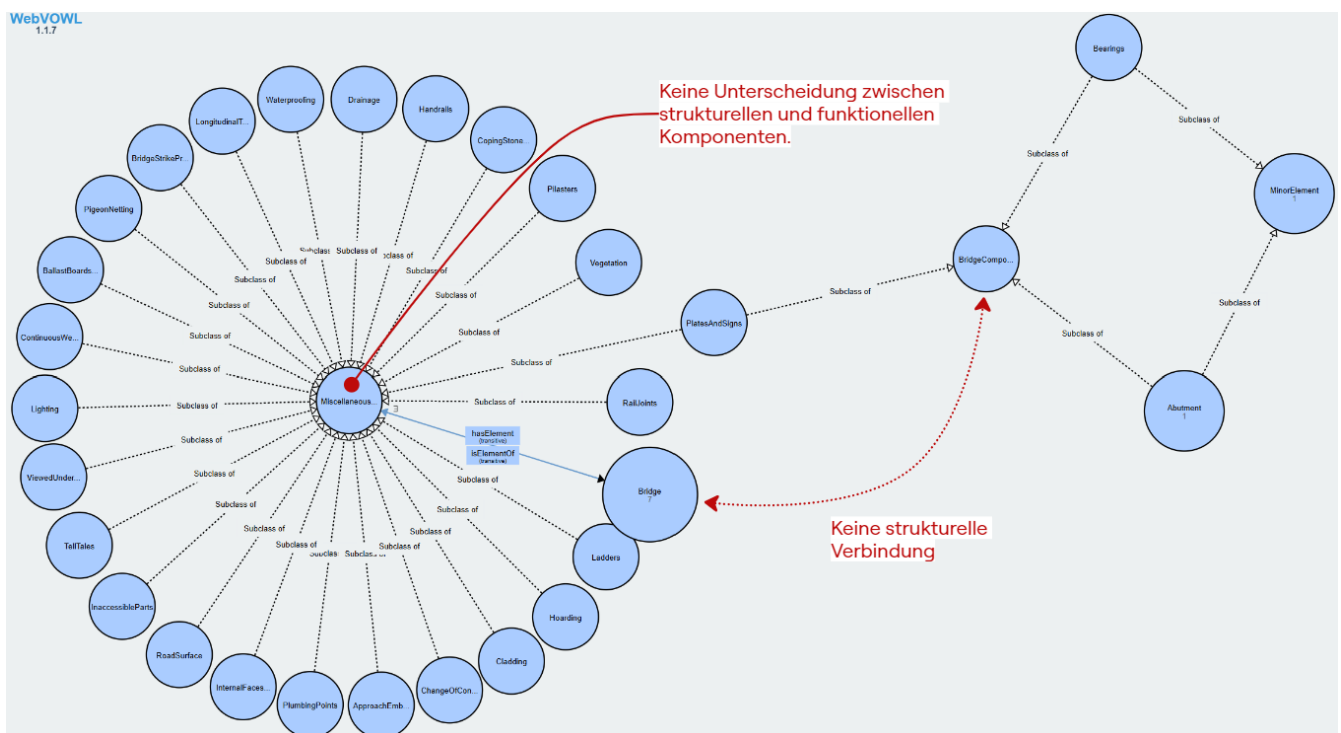


Abb. 10 : BMO-Ontologie in WebVOWL mit Kommentaren

Für die Modellierung von sensorischen Zustandsdaten bietet die Ontologie BSHM (Li et al., 2021) eine auf SOSA/SSN (OGC & W3C, 2017) basierende Struktur zur Beschreibung von Sensoren, Beobachtungen, Zeitreihen und Messgrößen. Laut (Li et al., 2021) wird sie bereits in der Praxis eingesetzt und kann leicht mit strukturellen Ontologien wie BROT kombiniert werden, ist aber nicht online verfügbar. Darüber hinaus bietet die Ontologie SERAF (García-Castro et al., 2023) eine alternative IoT-orientierte Erweiterung für Sensoren zur semantischen Beschreibung von Geräten und Messkontexten.

Für die Integration von Verkehrsdaten kann die DATEX II Roadworks Ontology (Petersen, 2018) verwendet werden, die Verkehrsdaten standardisiert und RDF-kompatibel modelliert. Die Ontologie könnte die Verknüpfung von Verkehrsbelastungen mit spezifischen Brückenkomponenten oder Zeitpunkten ermöglichen und damit die Möglichkeiten der Zustandsanalyse erweitern.

Danach nimmt die geometrische Beschreibung eine zentrale Rolle ein, insbesondere in Bezug auf die Verknüpfung mit 3D/BIM-Modellen. Ontologien wie ifcOWL (Pauwels et al., 2017) und FOG/OMG (Bonduel et al., 2020a) ermöglichen eine semantische Repräsentation von Geometrien, Formaten, Einheiten und deren Herkunft. Diese Konzepte sind von essenzieller Bedeutung für die Verankerung von Geometriedaten in einem auf LD basierenden Zwilling.

Darüber hinaus existieren weitere ergänzende Ontologien wie BrIM (Xiao et al., 2022), die den Fokus auf die Vollständigkeit von Informationsmodellen einer Brücke legt, sowie BrMontology (Ren et al., 2019) und CBRPMO (Wu et al., 2021), die regelbasierte Entscheidungslogiken im Instandhaltungsprozess einer Brücke abbilden. Für den Bereich der normkonformen Beschreibung von Bauwerksdaten sind ASB-ING (Gobels & Beetz, 2021) und die daraus entwickelte Blontology (Zhang et al., 2022) von Relevanz. Beide Verfahren gestatten eine strukturierte Erfassung von Brückenelementen und Prüfberichten. Es ist jedoch anzumerken, dass sie gemäss nur deutschem Standard erfolgen.

Daneben stehen für die Modellierung von Infrastrukturnetzen geeignete Ontologien zur Verfügung: Die Ontologie INTO (Bartnitzek & Hamdan, 2024) und auch EUROTL (AM4INFRA, 2018) können die topologischen Beziehungen innerhalb linearer Infrastrukturen wie Strassen modellieren und lassen sich mit Brückenmodellen verknüpfen, um die Lage im Netzkontext korrekt zu erfassen.

Die vorliegende Vielfalt an Ontologien demonstriert die Bandbreite potenzieller Modellierungsansätze und betont die Relevanz einer konzeptuellen Auswahlstrategie, die auf die spezifischen Anforderungen eines digitalen Zwillings im Brückenbereich abgestimmt ist.

Es ist schon evident, dass keine Ontologie sämtliche Anforderungen vollständig erfüllen kann. In einer späteren Phase wird daher ein modularer Ansatz verfolgt, bei dem verschiedene Ontologien kombiniert oder angepasst werden können.

Jedoch wird zunächst eine Zusammenfassung der Ontologien in tabellarischer Form vorgenommen, um einen allgemeinen Überblick zu erlangen. Die Analyse und der Vergleich der Ontologien erfolgten anhand von Kriterien und auf der Grundlage der in Kapitel 2.3.2 genannten Anforderungen.

Tab. 2 : Kriterien zur Analyse von Ontologien

	Kriterium	Anforderung der Kap. 2.3.2
K1	<b>Brückenspezifisch</b> Mit Dehnungsfugen? ( <i>expansion joint</i> )	Die Ontologie muss spezifisches Domänenwissen (Brücke, <b>Dehnungsfuge</b> ) abbilden
K2	<b>Sensordaten</b> Integration möglich?	Integration von Sensordaten (z.B. Dehnung, Temperatur, Verkehrslasten)
K3	<b>Verfügbarkeit</b> Online oder nur Paper?	Die Ontologie sollte online öffentlich zugänglich sein.
K4	<b>LD-Kompatibilität</b> Datenserialisierung (TTL, N-Triples, usw.) Ist die TTL-Datei korrekt geschrieben?	Ontologie in <b>Turtle (.ttl)</b> und korrekt geschrieben
K5	<b>Semantische Eindeutigkeit?</b>	Eindeutige Definition von Klassen und Relationen
K6	<b>Interoperabilität</b> Kompatibel mit <b>IFCBridge</b> -Logik?	Kompatibel und semantisch (Logik) verknüpft mit dem <b>IFCBridge</b> -Standard 4.3
K7	<b>Modularität</b> Ist das sinnvoll?	ist so aufgebaut, dass zusätzliche Module (Ontologien) hinzugefügt werden können

Tab. 3 : Ontologien im Vergleich

		1	2	3	4	5	6	7	8
		BrMontology	BROT (-Framework)	CBRPMO	BrIM	ASB-ING	Blontology	BMDO	BMO
---	<b>Name</b>	Bridge Maintenance Ontology	Bridge Topology Ontology	Concrete Bridge Rehabilitation Project Management Ontology	Bridge Information Model Ontology	ASB-ING Ontology	Bridge Inspection Ontology	Bridge Maintenance Domain Ontology	Bridge Maintenance Ontology
---	<b>Anwendungsfall</b>	Entscheidungsprozesse in der Brückeninstandhaltung	<b>Kein</b> (generelle Repräsentation von Brücken)	Instandsetzungsprojekte von Betonbrücken.	Vollständigkeitsprüfung von Brückeninformationsmodellen	Brücken- und Tunnelinspektionsdaten (Ontologie-Version von ASB-ING)	Effizienz und Genauigkeit der Brückeninspektion	Instandhaltung von Brücken.	Brückeninstandhaltung
---	<b>Autoren</b>	Guoqian Ren Rui Ding Haijiang Li	Al-Hakam Hamdan Scherer Raimar	Chengke Wu Peng Wu Jun Wang Rui Jiang Mengcheng Chen	Yang Xiao Zongjian Li Qin Zhao Yaqin Chen Hao Li	Anne Göbels Jakob Beetz	Yang Zhang Yuhong Liu Guangting Lei Shengyu Liu Peng Liang	Yang Zhang Jia Liu Kepeng Hou	Yali Jiang Haijiang Li Gang Yang
-->	<b>Jahr (Release)</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b> (2022)	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2021</b> (2022)	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2023</b> (v4.0)
---	<b>Land</b>	Vereinigte Kingdom (UK) / China	Deutschland	Australien / China	China	Deutschland (DE)	China	China	China / UK
---	<b>Basiert auf</b>	JTG/T H21-2011 (Chinesischer Standard)	BOT-Ontologie	11 Handbücher und 52 Fallstudien in China, Nordamerika und Australien	Chinesischer Standard	ASB-ING Bauwerksdaten in DE	JTG/T H21-2011 (Chinesischer Standard)	Chinesischer Standard	Standards für China und das Vereinigte Kingdom
<b>K1</b>	<b>Brückenspezifisch</b> Mit Dehnungsfugen? (expansion joint)	<b>JA</b>	<b>JA</b>	<b>JA</b>	(JA)	<b>JA</b>	<b>JA</b>	<b>JA</b>	<b>JA</b>
<b>K2</b>	<b>Sensordaten</b> Integration möglich?	Nein	nicht direkt	Nein	nicht vorhanden	nicht direkt	nicht direkt	(JA)	(JA)
<b>K3</b>	<b>Verfügbarkeit</b> Online oder nur Paper?	Nein, nur Paper	<b>JA</b> <sup>1 2</sup>	Nein	---	<b>JA</b> <sup>3 4</sup>	Nein	Nein	<b>JA</b> <sup>5</sup>
<b>K4</b>	<b>LD-Kompatibilität</b> Datenserialisierung (TTL, N-Triples, usw.)	nicht klar	JSON-LD, RDF/XML, N-Triples, TTL	nicht klar	nicht klar	JSON-LD, RDF/XML, N-Triples, TTL	(in RDF)	Datei nicht öffentlich	JSON-LD, RDF/XML, N-Triples, TTL
	Ist die TTL-Datei korrekt geschrieben?	---	<b>JA</b>	---	---	<b>JA</b>	---	---	Nein, Fehler in der Syntax
<b>K5</b>	<b>Semantische Eindeutigkeit?</b>	(JA)	<b>JA</b> (sauber definiert)	wenig strukturiert	<b>JA</b>	<b>JA</b>	<b>JA</b>	<b>JA</b> (sauber)	Nein, Inkonsistenzen in der Struktur
<b>K6</b>	<b>Interoperabilität</b> Kompatibel mit IFCBridge-Logik?	Nein	<b>JA</b>	Nein	<b>JA</b>	<b>JA</b>	Nein	Nein	Nein
<b>K7</b>	<b>Modularität</b> Ist das sinnvoll?	eingeschränkt	<b>JA</b>	Nein	Nein, schon definiert	Nein, zu gross	Nein, zu spezialisiert	Nein	Nein

<sup>1</sup> *Ontology Specification Draft: [Bridge Topology Ontology](#)*

<sup>2</sup> *GitHub: [GitHub - Alhakam/brot: The Bridge Topology Ontology \(BROT\) allows the definition of bridge constructions including aggregated zones and components as well as their topological relations.](#)*

<sup>3</sup> *Ontology Specification Draft: [ASB-ING Ontology](#)*

<sup>4</sup> *GitHub: [GitHub - AnneGoebels/ASB-ING\\_Ontology](#)*

<sup>5</sup> *Ontology Specification Draft: [Bridge Maintenance Ontology \(BMO\)](#)*

### 2.3.4 Konzeptuelle Auswahl

Die in diesem Kapitel präsentierte Modellierung stellt eine konzeptionelle Auswahlentscheidung dar und bildet die Grundlage für die spätere PoC-Umsetzung. In diesem Abschnitt wurde eine vollständige Implementierung nicht realisiert. Stattdessen erfolgt die Dokumentation und Validierung in Kapitel 5 (Resultaten) anhand des konkreten Anwendungsfalls (Fallstudie Schwarzwaldbrücke).

Auf Basis der Analyse bestehender Ontologien (Anhang. X.9) wurde ein modulares Konzept für den digitalen Zwilling entwickelt. Die vorliegende Konstruktion vereint spezifisches Wissen bezüglich Brückenbauwerken mit semantisch beschriebenen Sensordaten und ermöglicht zudem die Anbindung an den IFC-Standard.

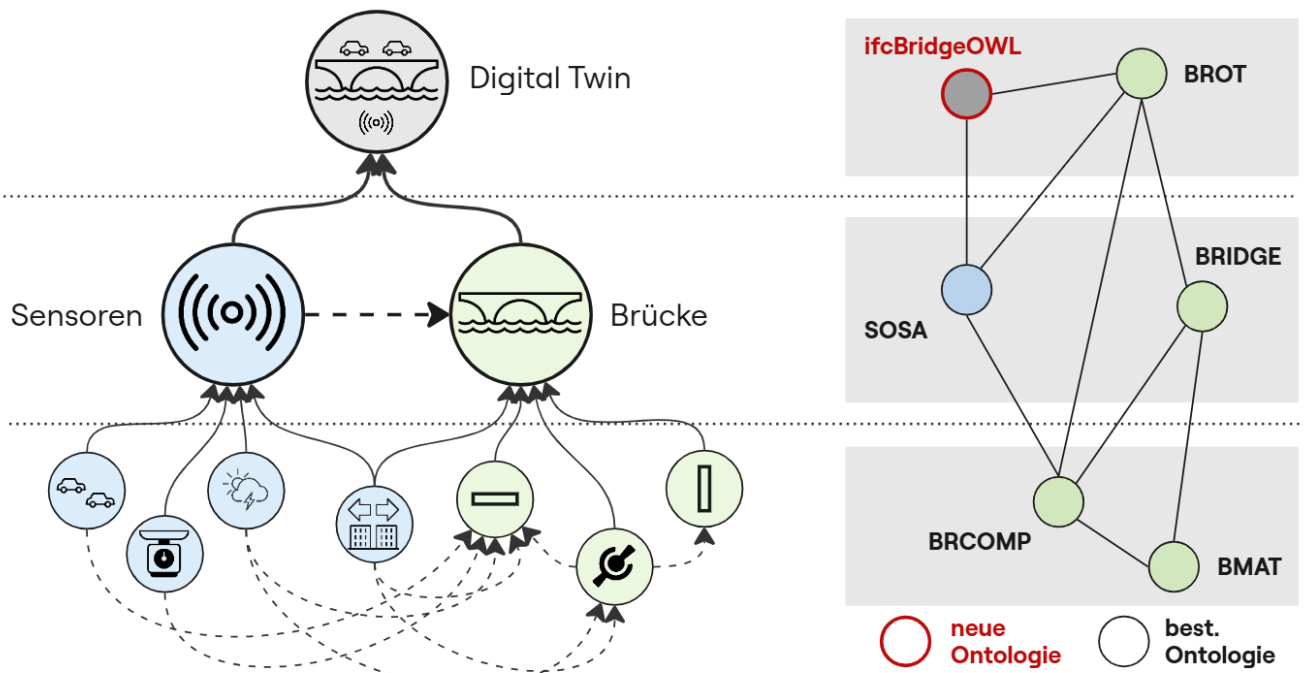


Abb. 11 : Konzeptionelle Ebene des Digital Twin

Die Bausteine der für PoC vorgeschlagenen Architektur basieren auf dem BROT-Framework (Hamdan & Scherer, 2020), das eine klare und erweiterbare Taxonomie der Brückenkomponenten beschreibt. In der vorliegenden Untersuchung wird die Ontologie dahingehend definiert, dass *bro:Bridge* als Basis dient und Beziehungen über *bro:hasComponent* strukturiert werden (*bro:Joint*). Die vorliegende Struktur erweist sich als besonders geeignet für die Modellierung realer Brücken, da sie eine semantisch klare Abbildung der funktionalen und topologischen Integration einzelner Elemente ermöglicht.

Im Hinblick auf die semantische Repräsentation von Sensordaten, wie etwa Temperatur-, Dehnungs- oder Verkehrslastmessungen, findet die Ontologie SOSA/SSN (OGC & W3C, 2017) Anwendung. Die vorliegende Ontologie ermöglicht die Verwendung von Sensoren (*sosa:Sensor*). Die Kombination von BROT und SOSA ermöglicht somit eine präzise Kopplung zwischen physischer Struktur und Zustand, ohne die strukturelle Integrität des Modells zu beeinträchtigen.

Die Integration dieser beiden Ontologien erfolgt über eine Brückenontologie namens *IfcBridgeOWL*. Die Funktion dieser kleinen Ontologie besteht in der gezielten Verknüpfung von Konzepten aus IFC 4.3 mit Entitäten aus BROT und SOSA. Die zentrale Klasse *IfcBridge* wird beispielsweise durch *rdfs:subClassOf* mit *bro:Bridge* verbunden, wodurch die geometrisch-funktionale Struktur des IFC-Modells in ein semantisch angereichertes Brückenverständnis überführt wird.

Die Verwendung von *rdfs:subClassOf* anstelle von *owl:equivalentClass* wurde bewusst gewählt. Während *owl:equivalentClass* eine vollständige semantische Gleichheit zwischen zwei Klassen postuliert (inklusive aller Eigenschaften und Einschränkungen), erlaubt *rdfs:subClassOf* eine flexiblere Modellierung. Diese Wahl ermöglicht eine kontrollierte Spezialisierung: IFC-Elemente bewahren ihre charakteristischen Eigenschaften bei gleichzeitiger Einbindung in das semantische System.

In dem vorliegenden Konzept wurde bewusst auf die Nutzung der Ontologie ifcOWL (Pauwels & Terkaj, 2016) verzichtet. Obwohl eine direkte Übersetzung des EXPRESS<sup>6</sup>-Schemas in OWL vorliegt, ist eine gezielte domänenspezifische Anwendung aufgrund der Grösse, Komplexität und semantischen Redundanzen (vgl. Pauwels et al., 2017) des Modells ifcOWL weniger geeignet. Stattdessen erlaubt das hier entwickelte Mapping über ifcBridgeOWL eine leichtere, strukturierte Verknüpfung relevanter Konzepte, wobei insbesondere auch zusätzliche Informationsquellen wie das buildingSMART Data Dictionary (bSDD) berücksichtigt werden.

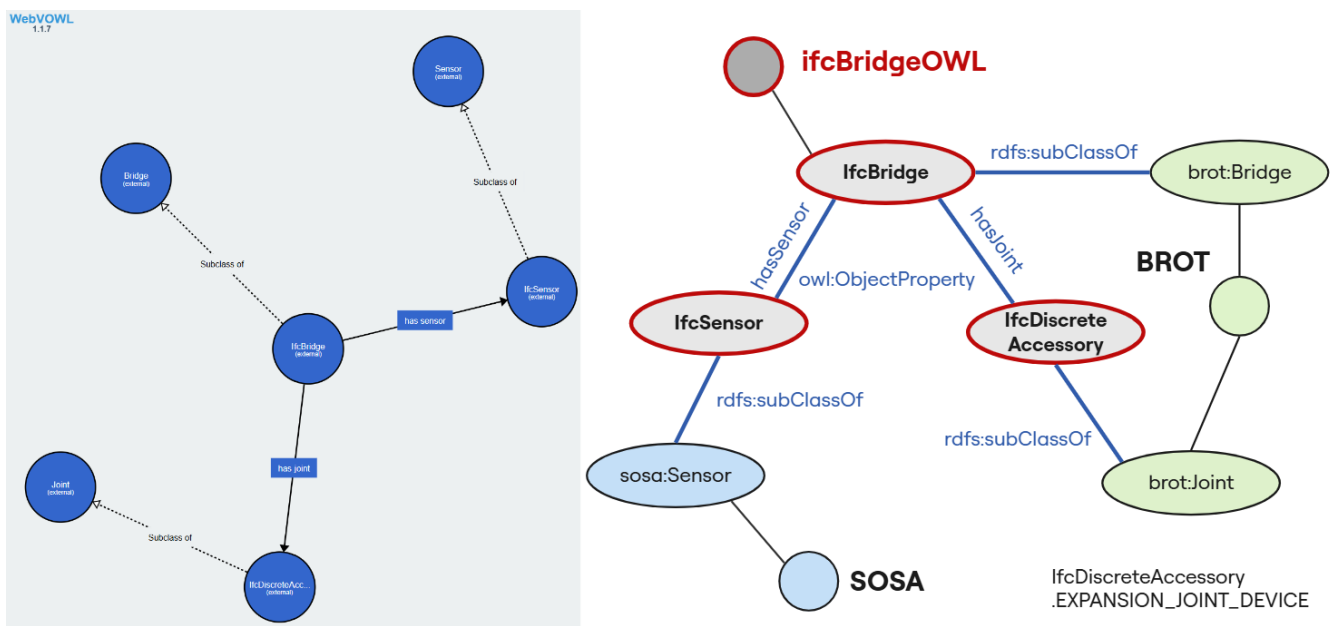


Abb. 12 : Visuelle (in WebVOWL) und konzeptionelle Darstellung des Digital Twin

Die Sensoren in *IfcSensor* werden als Unterklasse (*rdfs:subClassOf*) von *sosa:Sensor* typisiert und über die Eigenschaft *hasSensor* mit der Bridge verknüpft, während die Dehnfugen als *IfcDiscreteAccessory* im IFC-Modell abgebildet und mit *brot:Joint* verknüpft werden.

Auch in diesem Fall wird eine Verknüpfung von *rdfs:subClassOf* zwischen *IfcDiscreteAccessory* und *brot:Joint* vorgenommen, da *IfcDiscreteAccessory* verschiedene Typen von Baubehör (nicht ausschliesslich Dehnungsfugen) umfassen kann, während *brot:Joint* eine klare semantische Bedeutung aufweist.

Wie in Abb. 12 dargestellt, zeigt die Visualisierung die resultierende Ontologiestruktur inklusive Vererbungshierarchien und semantischen Objektbeziehungen.

Diese visuelle und konzeptionelle Modellierung (aber auch in Turtle-File) bildet die Grundlage für einen LD-basierten digitalen Zwilling, der Informationen über die Struktur und die Sensoren einer Brücke in einem einheitlichen semantischen Modell verknüpft.

<sup>6</sup> EXPRESS: Datendefinitionssprache (*Data Definition Language*) für den IFC-Standard

## 2.4 Werkzeuge

Die Realisierung eines digitalen Zwillings bedingt die Bewältigung einer Vielzahl technischer Aufgaben, um die Erfüllung des gesamten semantischen Informationsmodells zu gewährleisten.

Dieser Prozess beinhaltet die Modellierung, Abfrage und Visualisierung von Informationen. Wie bereits im Kapitel 2.1.3 dargelegt, konstituiert sich der digitale Zwilling nicht lediglich aus einem geometrischen 3D-Modell, sondern integriert zudem semantische Sensordaten.

Um diesen digitalen Schatten strukturiert aufzubauen, werden verschiedene Werkzeuge benötigt, die jeweils eine Kernaufgabe innerhalb des Datenworkflows übernehmen. Dazu gehören Werkzeuge zur Modellierung und Validierung von Ontologien, zur Integration und Speicherung von Daten im RDF-Format, zur Abfrage über SPARQL sowie zur Visualisierung von Geometrie und semantischen Beziehungen.

Tab. 4 : Zentrale Aufgaben und deren Funktion

	Aufgabe	Funktion
1	Modellierung und Validierung der Ontologie	Erstellung und Test der OWL-konformen Ontologie inkl. Strukturprüfung
2	Datenintegration (RDF) und -speicherung	Ablage, Verknüpfung und semantische Speicherung von Linked Data / RDF
3	SPARQL-Abfragen und Datenanalyse	Formulierung und Ausführung von SPARQL-Abfragen auf der RDF-Datenbank
4	Visualisierung (Ontologie)	Graphische Darstellung semantischer Strukturen (TBox & ABox)
5	Visualisierung (IFC-Modell)	Darstellung von IFC-basierten Brückenmodellen mit semantischer Anreicherung

Die in der Tab. 4 dargestellten Aufgaben konstituieren in ihrer Gesamtheit die Grundlage für die in Kapitel 2.1.3 präsentierte technische Realisierung des digitalen Schattens. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die jeweils verwendeten Werkzeuge für die einzelnen Aufgaben beschrieben und in den Kontext des PoCs eingeordnet.

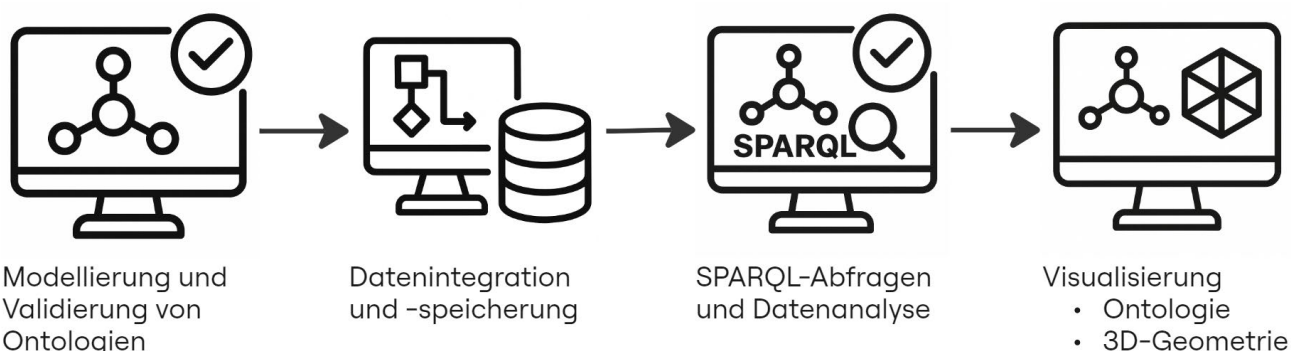


Abb. 13 : Visualisierungsprozess der Aufgaben

Eine Ausnahme bildet die Aufgabe der Ontologiemodellierung, bei der das Werkzeug Protégé (Stanford University, 2020) direkt eingesetzt wurde, da das verwendete Werkzeug in der Literaturrecherche der Ontologie (Kap.2.3.3) zu finden ist.

Dieses wurde insbesondere für die strukturelle Validierung eingesetzt und ermöglichte eine regelbasierte Prüfung der Ontologie. Aufgrund seiner limitierten Visualisierungsfunktionen wurde es für andere Aufgaben nicht weiterverwendet.

## 2.4.1 Graphdatenbanken

Die Verwaltung semantischer Daten erfordert spezialisierte Datenbanksysteme, die komplexe Beziehungen zwischen Informationen effizient abbilden können (Borrmann et al., 2021). Eine Graphdatenbank (*Graph Database*) erweist sich in diesem Zusammenhang als besonders geeignet, da sie Informationen nicht in Tabellenform, sondern als Netzwerk (Graph) von Knoten und Kanten modelliert.

Die vorliegende Struktur gestattet die Administration dynamischer, vernetzter Datenmodelle, wie sie im Kontext von Bauwerksinformationsmodellen, Zustandsdaten und semantisch angereicherten Objektinformationen evident werden (Bonduel et al., 2020b).

Ein spezieller Typ dieser Systeme ist der *Triplestore*, der auf dem RDF basiert (Borrmann et al., 2021). Dabei werden Daten als Triple gespeichert, das heisst, sie werden als Subjekt, Prädikat und Objekt gespeichert.

Diese Form eignet sich insbesondere für die Verwaltung von Ontologien (COGITO Project, 2022) und die Verknüpfung unterschiedlicher Informationsquellen über standardisierte Schnittstellen. Mittels der Abfragesprache SPARQL besteht die Möglichkeit, gezielte Anfragen an die Datenstruktur zu stellen.

In der Schweiz nutzen öffentliche Institutionen wie Swisstopo, die Bundeskanzlei oder das LINDAS-Projekt (Interview X.10) bereits dedizierte Triplestore-Infrastrukturen, um Verwaltungsdaten im RDF-Format bereitzustellen.

Gemäss (BAR, 2025a) konstituiert ein Triplestore ein zentrales Element für die Arbeit mit Linked Data, da er dazu dient, strukturierte Daten zu speichern und mittels SPARQL-Queries zur weiteren Nutzung zu machen. Innerhalb der Bundesverwaltung finden derzeit drei verschiedene Tools Anwendung: *Stardog*, *Fuseki* und *Virtuoso* (BAR, 2025a).

NAME	URL	SPARQL ENDPOINT	SPARQL INTERFACE	TECHNISCHES PRODUKT
LINDAS	<a href="https://ld.admin.ch">https://ld.admin.ch</a>	<a href="https://ld.admin.ch/query">https://ld.admin.ch/query</a>	<a href="https://ld.admin.ch/sparql">https://ld.admin.ch/sparql</a>	<a href="#">Stardog</a>
Swisstopo	<a href="https://geo.ld.admin.ch">https://geo.ld.admin.ch</a>	<a href="https://geo.ld.admin.ch/query">https://geo.ld.admin.ch/query</a>	<a href="https://geo.ld.admin.ch/sparql">https://geo.ld.admin.ch/sparql</a>	<a href="#">Fuseki</a>
Bundeskanzlei	<a href="https://fedlex.data.admin.ch">https://fedlex.data.admin.ch</a>	<a href="https://fedlex.data.admin.ch/sparqlendpoint">https://fedlex.data.admin.ch/sparqlendpoint</a>	<a href="https://fedlex.data.admin.ch/de-CH/sparql">https://fedlex.data.admin.ch/de-CH/sparql</a>	<a href="#">Virtuoso</a>

Abb. 14 : Linked Data Triplestores der Bundesverwaltung, in Anlehnung an (BAR, 2025a)

Auch gemäss den Ergebnissen der Literaturrecherche zu Ontologien (Kap. 2.3) lassen sich einige potenzielle Anwendungen für Graphdatenbanken ableiten.

Im Rahmen des Projekts COGITO wird der Einsatz von *GraphDB* als zentrales Werkzeug für die Verwaltung des semantischen digitalen Zwillings hervorgehoben (COGITO Project, 2022). Im Rahmen des TwinGen-Projekts (Borrmann et al., 2022) findet *GraphDB* Anwendung bei der Kombination geometrischer und semantischer Daten.

In den Artikeln von (Bonduel et al., 2020b) wird zudem der generische Einsatz von Triplestores wie *Blazegraph* untersucht, insbesondere hinsichtlich der Integration geometrischer Datenmodelle.

Darüber hinaus wurde im Kontext der Ontologie SODIA (Jäkel et al., 2025) der Triplestore *Stardog* präzise erwähnt und eingesetzt. Demgegenüber wird von (Borrmann et al., 2021) Apache Jena ausdrücklich für SPARQL-Abfragen empfohlen.

Die aufgeführten Beispiele demonstrieren, dass neben den Triplestores der öffentlichen Verwaltung auch spezialisierte Systeme wie *GraphDB*, *Stardog* und *Apache Jena* in Anwendungen in der Baubranche zum Einsatz kommen.

Die nachfolgende Tabelle präsentiert eine Übersicht über die gefundene und ausgewählte Triplestore, deren Lizenzmodelle, SPARQL-Unterstützung sowie dokumentierte Einsatzbereiche:

Tab. 5 : Ausgewählte Triplestores im Vergleich

	Triplestore	Lizenz	SPARQL	Verbreitung	Quelle
1	<b>Apache Jena Fuseki</b>	Open Source	✓+	Verwaltung + Baubranche	swisstopo (BAR, 2025a)
2	<b>Blazegraph</b>	Open Source	✓--	geringe Verbreitung	(Bonduel et al., 2020b)
3	<b>GraphDB</b>	Frei (für Forschung) / proprietär	✓+	Baubranche	(COGITO Project, 2022) (Borrmann et al., 2022)
4	<b>Stardog</b>	Proprietär	✓++	generell (auch Baubranche)	LINDAS (BAR, 2025a)
5	<b>Virtuoso</b>	kommerziell	✓	Verwaltung	Bundeskanzlei (BAR, 2025a)

Nach dem Vergleich der in Tab. 5 dargestellten Triplestores wurde, GraphDB (Ontotext, 2025) als Lösung für den in dieser MTH entwickelte PoC ausgewählt. Die Entscheidung basiert auf einer Kombination aus praktischer Einsetzbarkeit, funktionalem Umfang und bereits vorhandener Anwendungserfahrung (mit GraphDB).

Apache Jena Fuseki (Apache Software, 2025) überzeugt als quelloffene Lösung mit solider SPARQL-Unterstützung, wobei die Bedienung primär über eine einfache Oberfläche erfolgt. Dieser Aspekt erweist sich als vorteilhaft bei der Administration von Ontologiemodellen. Für forschungsnahen Anwendungen stellt Fuseki eine valide Grundlage dar, hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit und Integrationsfähigkeit jedoch nicht das Niveau professioneller Plattformen erreichend.

Gemäss der in der Literaturrecherche wird Blazegraph als leichtgewichtiger RDF-Store beschrieben, der sich für einfache Abfragen eignet. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt befindet sich das Projekt nicht mehr in der aktiven Entwicklungsphase (GitHub, 2020). Darüber hinaus sind moderne Instrumentarien für Administration und Visualisierung nicht vorhanden, was den langfristigen Einsatz des Projekts einschränkt.

Stardog (Stardog Union, 2025) findet in aktuellen Ontologieprojekten wie LINDAS (BAR, 2025a) Anwendung und zeichnet sich durch ein breites Spektrum an semantischen Funktionen aus. Hinsichtlich der Anwendung im akademischen Umfeld ist festzustellen, dass das Produkt mit einer Lizenz verbunden ist.

Virtuoso (OpenLink Software, 2024) wurde für die Verwendung in grossen LD-Umgebungen sowie für die Bereitstellung offener Verwaltungsdaten konzipiert (BAR, 2025a). Im öffentlichen Sektor findet es Anwendung, jedoch ist es aufgrund der komplexen technischen Anforderungen an Einrichtung und Wartung, insbesondere in Verbindung mit domänenspezifischen 3D-Modellen, als weniger geeignet zu betrachten (siehe auch Interview X.10).

Zusammenfassend lässt sich argumentieren, dass GraphDB (Ontotext, 2025) aus den folgenden Gründen gewählt wurde: Es vereint die Vorzüge einer robusten semantischen Datenbank mit einer intuitiven Web-Benutzeroberfläche und einer klaren Struktur. In Projekten wie TwinGen (Borrmann et al., 2022) und (COGITO Project, 2022) wurde GraphDB erfolgreich eingesetzt, um Ontologien mit geometrischen und infrastrukturellen Informationen zu verknüpfen. Darüber hinaus ermöglicht die kostenlose Suchversion eine einfache Nutzung im akademischen Kontext.

## 2.4.2 Tools zur SPARQL

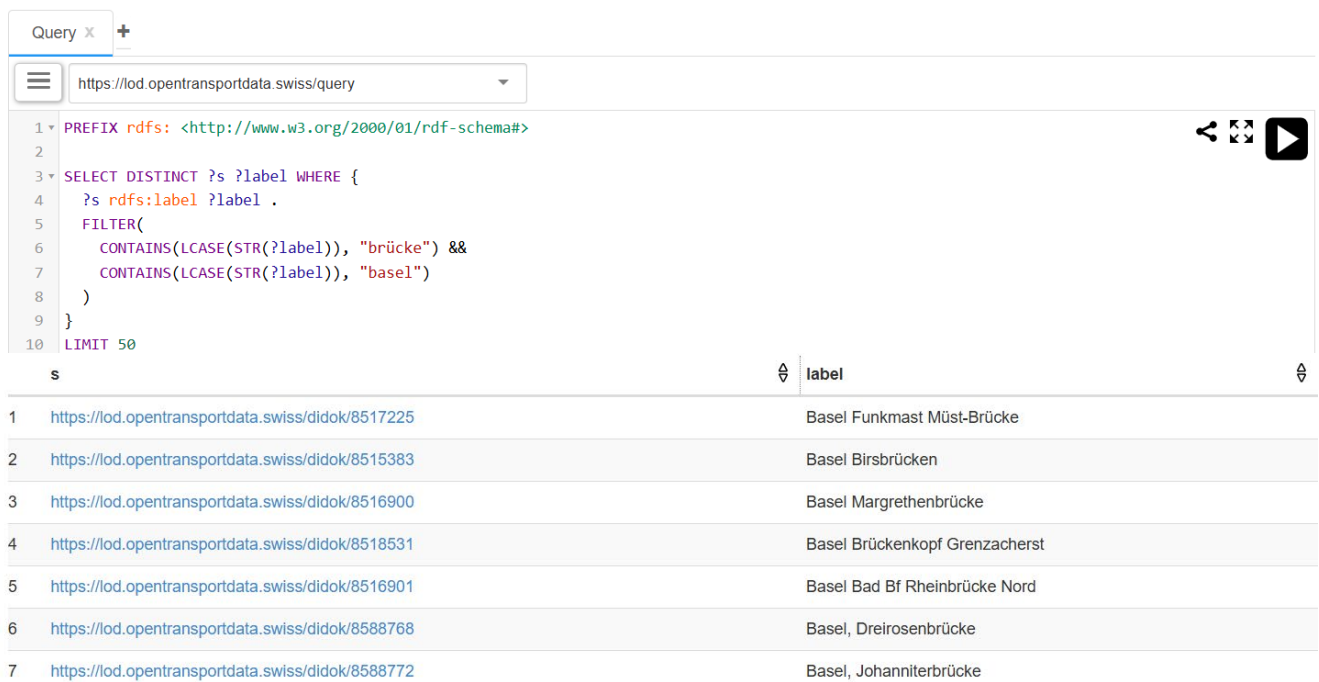
Ein zentrales Element dieser Masterthesis, die Ontologien und semantische Modelle zum Gegenstand hat, ist die Abfrage von Informationen über SPARQL.

Gemäss der Empfehlung von (Borrman et al., 2021) wird für die Abfrage von LD in der Baubranche speziell Apache Jena (Apache Software, 2025) empfohlen. Jena umfasst Komponenten zur SPARQL-Abfrage von RDF-Daten. Für die vorliegende Masterarbeit wurde jedoch GraphDB (Ontotext, 2025) als zentrales Tool ausgewählt (Kap. 2.4.1). GraphDB stellt standardkonforme SPARQL-Endpunkte bereit und ermöglicht sowohl einfache SELECT- als auch komplexe CONSTRUCT-Abfragen über eine Web-Oberfläche durchzuführen und zu visualisieren.

In Protégé (Stanford University, 2020) besteht ebenfalls die Option, SPARQL-Abfragen lokal auszuführen. Die vorliegende Funktionalität wird mittels eines Plugins aktiviert und dient in dieser MTH insbesondere der Validierung von Ontologien sowie der Überprüfung aufgrund begrenzter Visualisierungsfunktionen und Performance.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der Literaturrecherche weitere visuell unterstützende SPARQL-Tools identifiziert. Hier ist insbesondere der SPARQL-Visualizer in (Bonduel et al., 2020b) zu nennen. Dieses Open-Source-Tool von (Rasmussen, 2022) bietet eine anschauliche Darstellung von SPARQL-Tripeln und eignet sich insbesondere zur interaktiven Analyse von 3D-räumlichen und semantischen Beziehungen.

Ein besonders praxisrelevantes Beispiel für den Einsatz von SPARQL in der öffentlichen Verwaltung ist LINDAS (BAR, 2025b). LINDAS stellt Verwaltungsdaten im RDF-Format über standardisierte SPARQL-Endpunkte zur Verfügung. Im Rahmen der *Linked Data Meetups* (Nov 2025 und Feb. 2025) wurde LINDAS mehrfach als *Best-Practice-Plattform* vorgestellt und es verwendet das browserbasierte Tool YASGUI (*Yet Another SPARQL GUI*), das eine intuitive Oberfläche für SPARQL-Abfragen bietet (Zazuko GmbH, 2025a). Es ermöglicht die Eingabe und Ausführung von Abfragen direkt im Browser mit Syntaxhervorhebung, Autovervollständigung und verschiedenen Optionen zur Anzeige der Ergebnisse (Interview X.10). Es wird zudem darauf verwiesen, dass YASGUI auch in *lod.opentransportdata.swiss* zum Einsatz kommt (siehe dazu Anhang X.6)



The screenshot shows the YASGUI interface for the SPARQL endpoint `https://lod.opentransportdata.swiss/query`. The query is as follows:

```

1 PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
2
3 SELECT DISTINCT ?s ?label WHERE {
4   ?s rdfs:label ?label .
5   FILTER(
6     CONTAINS(LCASE(STR(?label)), "brücke") &&
7     CONTAINS(LCASE(STR(?label)), "base1")
8   )
9 }
10 LIMIT 50

```

The results table displays the following data:

s	label
<a href="https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8517225">https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8517225</a>	Basel Funkmast Müst-Brücke
<a href="https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8515383">https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8515383</a>	Basel Birsbrücken
<a href="https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8516900">https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8516900</a>	Basel Margrethenbrücke
<a href="https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8518531">https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8518531</a>	Basel Brückenkopf Grenzacherst
<a href="https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8516901">https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8516901</a>	Basel Bad Bf Rheinbrücke Nord
<a href="https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8588768">https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8588768</a>	Basel, Dreirosenbrücke
<a href="https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8588772">https://lod.opentransportdata.swiss/didok/8588772</a>	Basel, Johanniterbrücke

Abb. 15 : Ergebnisse einer SPARQL-Abfrage *opentransportdata*

### 2.4.3 Visualisierung und Viewer

Ein zentraler Aspekt des MTH-Proposals besteht in der Entwicklung eines PoC, der sowohl die 3D-Visualisierung der zu Bauobjekte als auch die Darstellung der Ontologien in einem einzigen gemeinsamen System integriert.

Das Ziel dieses kombinierten Visualisierungskonzepts besteht darin, eine verbesserte Interaktion mit dem digitalen Schatten zu ermöglichen und somit ein initial benutzerfreundliches Tool zur Verfügung zu stellen.

Für die Visualisierung von semantischen Modellen stehen online verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, die sich in ihrer Funktionalität unterscheiden. In der vorliegenden Masterarbeit werden je nach Zielsetzung, die in der Regel die Darstellung der ontologischen Struktur (TBox) oder konkreter Instanzen (ABox) ist, verschiedene Tools verwendet, die sich hauptsächlich aus der vorangegangenen Literaturrecherche zur Ontologie ergeben haben.

Im Rahmen der Literaturrecherche zur Ontologie wurde wiederholt konstatiert, dass WebVOWL (MIT License, 2019) häufig als Instrument zur Visualisierung der TBox genutzt wird. Die Webanwendung präsentiert Ontologieklassen, Hierarchien und Eigenschaften in Form eines interaktiven Graphen. Auch in dieser MTH findet sie Anwendung, insbesondere zur strukturellen Überprüfung von Ontologien (vgl. Abb. 10).

Zur Visualisierung spezifischer ABox-Daten können GraphDB Desktop (Ontotext, 2025) oder WebProtégé (Stanford University, 2020) herangezogen werden. Es konnte festgestellt werden, dass beide über eine integrierte Visualisierungsfunktion verfügen. Mittels dieser Funktion ist es möglich, die Resultate von SPARQL-Abfragen in Form eines Graphen oder einer Tabelle darzustellen. Es konnte jedoch auch festgestellt werden, dass die Funktionalitäten der beiden Tools lediglich für einfachere ABox geeignet sind.

Für die Kombination von Geometrie- und Ontologiedaten wurden im Wesentlichen zwei Werkzeuge identifiziert (in der bestehenden Literaturrecherche). Von besonderem Interesse ist der *TwinGenViewer*, der im Rahmen des TwinGen-Projekts entwickelt wurde (Borrmann et al., 2022) und der andere Viewer mit Fokus auf ABox ist der *Linked Data Viewer* (Göbels, 2023). Beide bieten eine visuelle Navigation und die Interaktion erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche, die strukturierte RDF-Daten mit Kontextinformationen darstellt.

Die nachfolgende Tabelle präsentiert eine kompakte Übersicht über die Funktionalitäten der fünf Viewer-Tools:

Tab. 6 : Funktionsvergleich der fünf Viewer-Tools

	Tool	TBox	ABox	3D-Geometrie	3D-Semantik
1	WebVOWL 1.1.7	✓	X	X	✓ (Ontologie)
2	GrapDB Desktop 11.0.0	✓	(teilweise)	X	✓
3	WebProtégé 4.0.2	✓	✓ (mit Plugin)	X	✓
4	TwinGenViewer	X	✓	✓	X
5	Linked Data Viewer	X	✓	(teilweise)	X

Die Analyse der Funktionalitäten zeigt, dass keines der Werkzeuge alle Anforderungen gleichzeitig erfüllt. Je nach Visualisierungsziel wurden daher gezielt kombinierte Werkzeuge eingesetzt. Im folgenden Kapitel wird diese konkrete kombinierte Werkzeugauswahl für das PoC ausgewählt.

## 2.4.4 Werkzeugauswahl

Das ultimative Ziel bei der Auswahl der Tools war die Entwicklung einer integrierten PoC-Lösung, die verschiedene Datenebenen des digitalen Zwillings sowohl visuell als auch funktional zusammenführt. Dieser Ansatz gründet auf dem in Abb. 16 dargestellten Konzept und fokussiert sich auf drei vertikal angeordnete Ebenen.

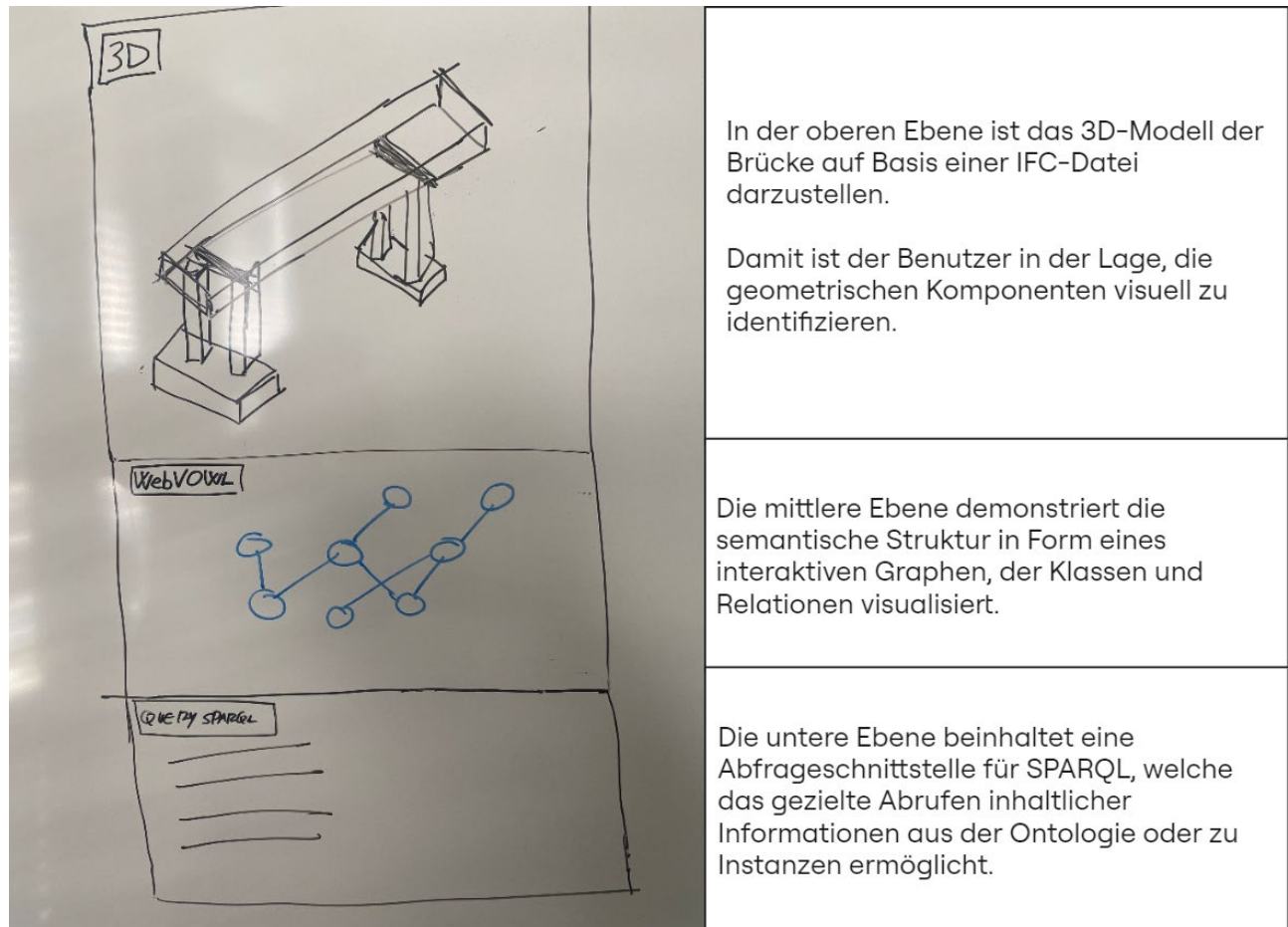


Abb. 16 : Skizze des Proof of Concept mit Beschreibung

Die vorliegende Kombination aus Visualisierung, semantischer Struktur und Abfragemöglichkeiten zielt darauf ab, eine interaktive und intuitive Navigation durch die digitalen Brückendaten zu ermöglichen.

Für die Implementierung des vorliegenden Konzepts wurden drei primäre Werkzeugkomponenten selektiert, die sich in ihrer Funktionalität ergänzen.

Für die Umsetzung wurde der TwinGenViewer (Göbels, 2022) ausgewählt, da er eine webbasierte Darstellung von 3D-Modellen auf IFC-Basis ermöglicht und bereits im TwinGen-Projekt (Borrmann et al., 2022) speziell für Brückenkonstruktionen eingesetzt wurde.

Für die semantische Struktur wird WebVOWL (MIT License, 2019) verwendet, das OWL-Ontologien interaktiv darstellt und sich daher besonders für die Analyse und Kommunikation ontologischer Inhalte eignet.

Für die Ausführung der SPARQL-Abfragen wurde YASGUI (Zazuko GmbH, 2025a) gewählt. YASGUI wird direkt mit dem SPARQL-Endpoint von GraphDB (Ontotext, 2025) verbunden, der in diesem Fall ausschliesslich als Triplestore fungiert.

Die Wahl der Werkzeuge erfolgte auch unter anderem aufgrund der Tatsache, dass es sich bei TwinGenViewer, WebVOWL und YASGUI um Open-Source-Projekte handelt, die der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen und eine aktive Kontrolle über GitHub erfahren.

### 3 Methodik

Die vorliegende MTH verfolgt einen iterativen und forschungsbasierten Ansatz zur Entwicklung und Validierung eines semantischen digitalen Schattens einer Autobahnbrücke und es folgt einer zweistufigen Methodik.

Zunächst wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um bestehende Ontologien und LD-Werkzeugen zu identifizieren und zu evaluieren. Auf dieser Grundlage wurde ein *Proof of Concept* konzipiert, realisiert und validiert.

Die Forschungsfragen und der thematische Ansatz wurden anhand einer Pyramidenstruktur entwickelt, die in Anhang X.7 dargestellt ist und die Beziehung zwischen Zielen, Anwendung und Nutzung der Ontologie veranschaulicht.

#### 3.1 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche fungierte als methodische Grundlage für die Beantwortung der initialen Fragestellungen (Kap. 1).

Das Ziel des MTHs bestand darin, den Stand der Technik (STAR) der Ontologien (siehe Kap. 2.3) und der derzeit verfügbaren semantischen Technologien systematisch zu erfassen (siehe Kap. 2.4).

Zu diesem Zweck wurde ein zweistufiger Ansatz verwendet, der aus einer strukturierten ontologischen Recherche (*Systematic Literature Review*) und einer ergänzenden Recherche zu Technologien und Knowledge-Graph-Tools (*semi-qualitative Recherche*) bestand.

Zunächst wurde *Google Scholar* (Google, 2024) genutzt. Die vorliegende Suchmaschine fungierte nicht nur als Instrument zur Identifizierung relevanter Suchbegriffe, sondern wurde zudem zur Umsetzung der drei Suchstrategien A, B und C (siehe Anhang X.8) genutzt.

Im Anschluss wurde die identische Suchstrategie (A, B und C) auf die wissenschaftlichen Datenbanken *ScienceDirect* (Elsevier B.V., 2025) und *Web of Science* (Clarivate, 2025) angewendet.

Die verwendeten Stichwortkombinationen sowie die Anzahl der gefilterten Ergebnisse sind in Anhang X.7 dokumentiert.

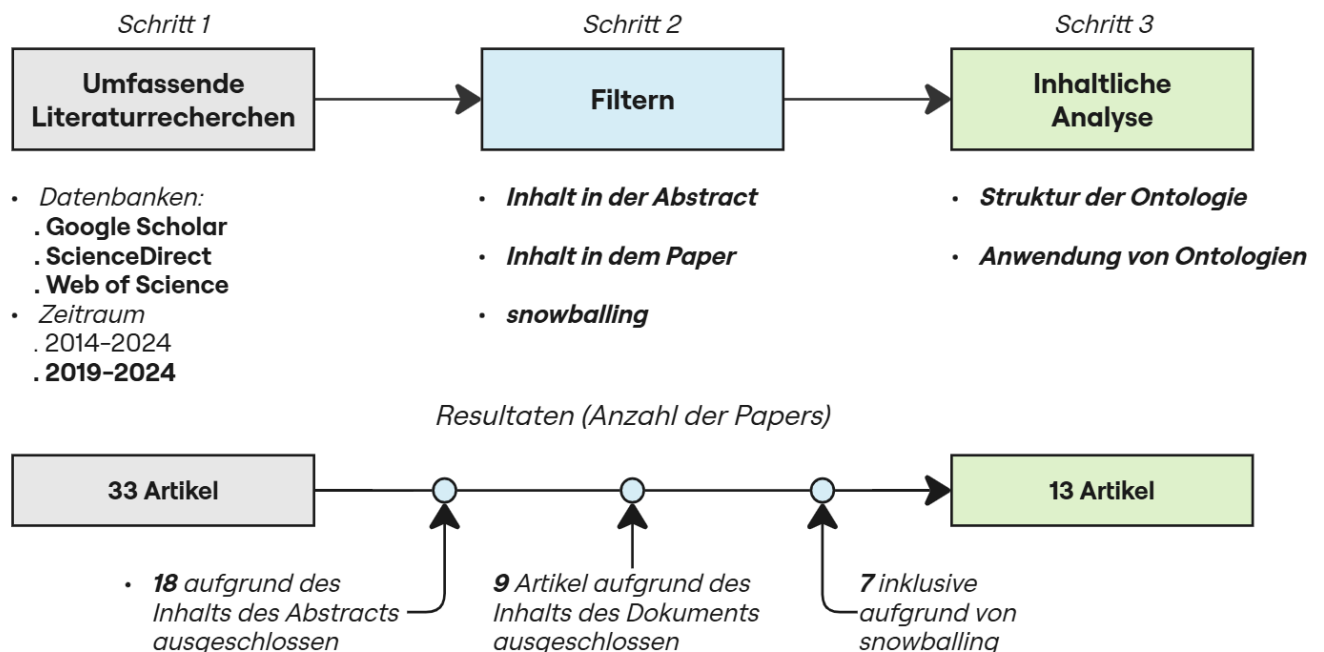


Abb. 17 : Methodisches Vorgehen bei der Literaturrecherche zur Ontologie

Die Abbildung veranschaulicht das dreistufige Vorgehen: Zunächst wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, gefolgt von einer strukturierten Filterung der Ergebnisse und einer Inhaltsanalyse.

Im ersten Schritt wurden die relevanten Datenbanken / Suchmaschine ausgewählt (Google Scholar, ScienceDirect und Web of Science), ein Referenzzeitraum festgelegt (2014/2019–2024) und die zuvor entwickelten Suchstrategien angewendet (Anhang X.7).

Im Schritt 2 erfolgte eine Filterung der Ergebnisse anhand des Inhalts der Abstracts, der Relevanz des Volltexts und der Referenzen (*snowballing*).

Im dritten Schritt erfolgte eine Evaluation der übrigen Literatur hinsichtlich der Struktur und Anwendung bestehender Ontologien. Die Analyse ergab insgesamt 13 Artikel, die für das Kapitel 2.3 von Relevanz sind und als Grundlage für die weitere Bearbeitung dienen.

Im Anschluss daran wurde eine semi-qualitative Recherche nach den zu verwendenden Werkzeugen durchgeführt. Das Ziel bestand darin, Technologien für die PoC-Entwicklung zu identifizieren.

Die in der Literatur angeführten Werkzeuge wurden in drei Gruppen unterteilt: Graphdatenbanken, SPARQL-Tools und Viewers. Im Rahmen einer Evaluation wurden diese anhand ihrer Lizenzbedingungen (Open Source/Studentenlizenz) und ihrer funktionalen Eignung für den konkreten Fall bewertet.

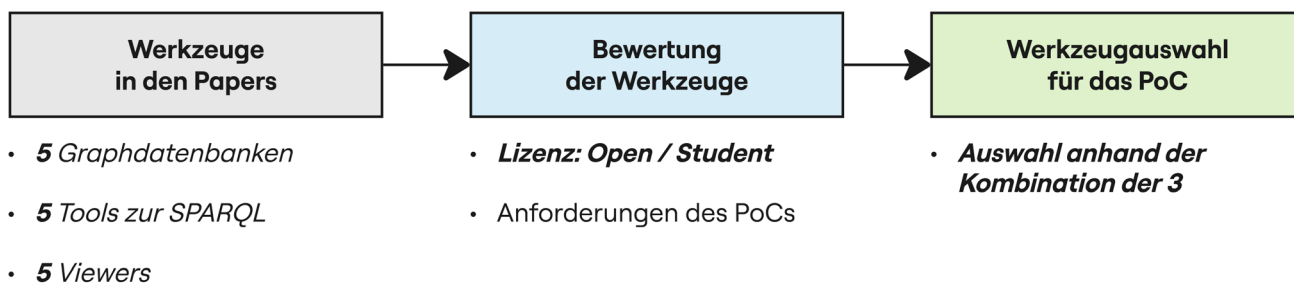


Abb. 18 : Prozess zur Auswahl der Werkzeuge

Der dreistufige Prozess ist in Abb. 18 dargestellt. Die finale Entscheidung für den PoC basierte auf der optimalen Kombination von Archivierungs-, Abfrage- und Visualisierungstools.

### 3.1.1 Snowballing

Zur Ergänzung der systematischen Recherche wurde die *snowballing*-Methode verwendet.

Es konnte festgestellt werden, dass ein signifikanter Anteil der evaluierten Ontologien nicht unmittelbar über Stichwortsuchen aufgefunden wurde, sondern erst durch Analyse von Verweisen in wissenschaftlichen Artikeln oder *GitHub-Repositoryys* identifiziert werden konnte.

Die Analyse der Zitate in den Arbeiten von (Bartnizek & Hamdan, 2024) ermöglichte die Identifizierung weniger bekannter Ontologien.

Ein unterstützendes Instrument war (Connected Papers, 2025), das thematisch verwandte Texte und Autoren visuell darstellte (Brückenontologie). Diese explorative Methodik ermöglichte es, zusätzliche Arbeiten zu berücksichtigen, die mit klassischen Suchstrategien nur schwer zu finden gewesen wären.

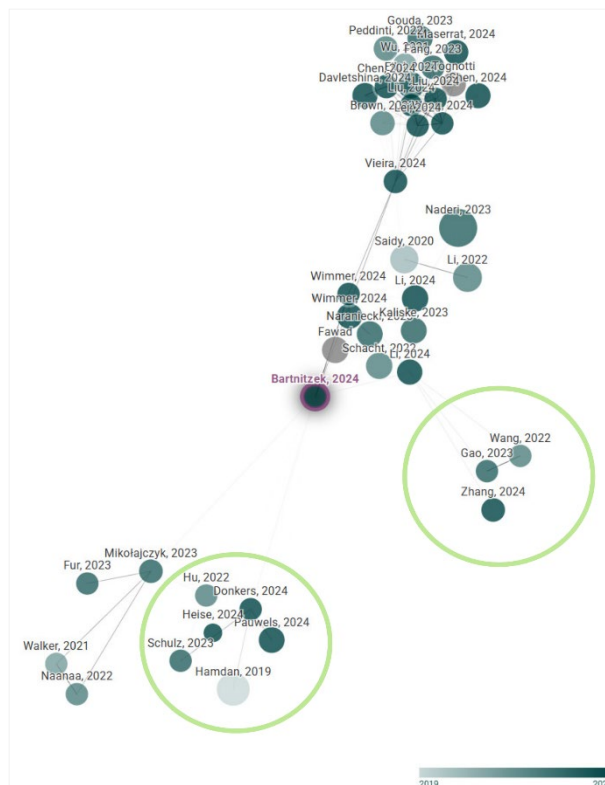


Abb. 19 : Screenshot of Connected Papers

### 3.2 Expertinterviews

Um eine methodische Grundlage zu schaffen und die theoretischen und konzeptionellen Grundlagen des PoC zu validieren, wurden insgesamt vier Experteninterviews durchgeführt. Die Durchführung der Interviews erfolgte in Form von semi-strukturierten Interviews, auch bekannt als semi-qualitative Forschungsinterviews (Pfeiffer, 2019).

Diese Methodik ermöglichte es, einer strukturierten Leitlinie (für die Interviews) zu folgen und gleichzeitig flexibel auf neue Erkenntnisse zu reagieren.

Zunächst wurden zwei Interviews mit Experten aus dem Bereich «Linked Data» durchgeführt.

Im Rahmen des Interviews wurden die Grundlagen semantischer Technologien, RDF-Modelle und Ontologien vertieft sowie deren Einsatz in föderalen Datenarchitekturen (öffentliche Verwaltung) diskutiert. Es wurde betont, dass RDF eine hervorragende Grundlage für die Modellierung offener, interoperabler Wissensgraphen bildet, insbesondere bei der Verwendung offener Formate wie *Turtle*.

Ein Expert\*in (Interview X.9) betonte die Relevanz der Wiederverwendung bestehender Vokabulare und Ontologien in der Baupraxis, um Redundanzen und Komplexität zu minimieren. Darüber hinaus wurde auf die Relevanz der Datenharmonisierung (und auch Semantik), insbesondere im Kontext des Umgangs mit Sensordaten (beispielsweise Verkehrsdaten) und Bauwerksinformationen, hingewiesen (siehe Anhang X.10).

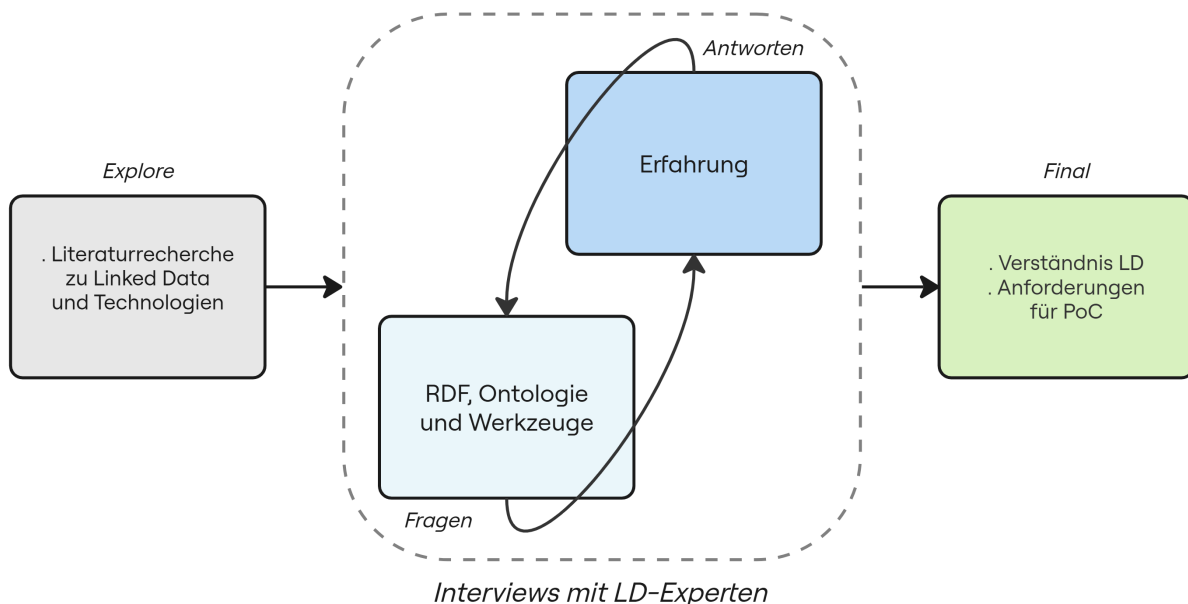


Abb. 20 : Iterativer Prozess des Verständnisses mittels Interviews der Linked Data

Nach der Entwicklung des Konzepts wurden ein Interview (Anhang X.11) und eine Validierungsbesprechung (PoC) mit David Bucher, dem Thesis-Experten dieser Arbeit, durchgeführt.

Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Bewertung des methodischen Ansatzes (*concept*), der Auswahl geeigneter Ontologien sowie der praktischen Umsetzbarkeit eines digitalen Schattens unter Verwendung von RDF und SPARQL.

Die Diskussion über die semantische Integration von Sensordaten, die ontologische Abbildung und ontologische *Light-Approaches* (Wiederverwendung der Ontologien) im Vergleich zu komplexeren Schemata wie *IfcOWL* (Pauwels & Terkaj, 2016) erlangte eine besondere Bedeutung.

Das Gespräch lieferte entscheidende Impulse für die ontologische Architektur und die Modellierungstiefe des PoC.

In einer abschliessenden Validierungsbesprechung wurden schliesslich die entwickelten Konzepte validiert und es erfolgte eine kurze Überprüfung der Konsistenz des ontologischen Modells sowie des Mapping zwischen IFC und bestehenden Ontologien.

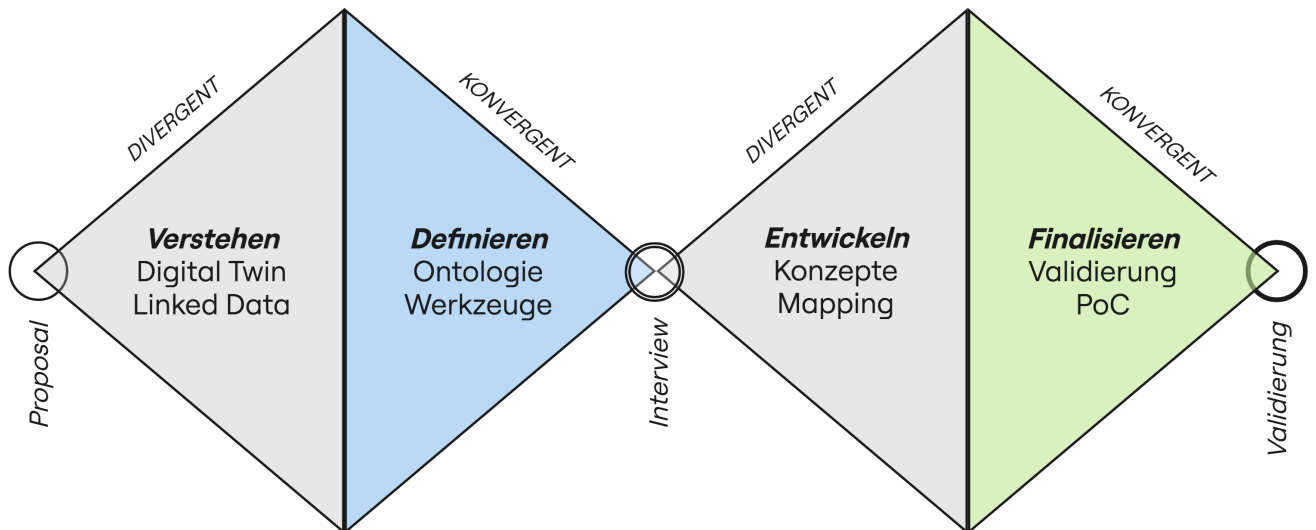


Abb. 21 : Double Diamond für die PoC-Validierung mit dem Thesis-Expert

Des Weiteren wurde ein weiteres Interview mit einem Experten (Anhang X.12) auf dem Gebiet der Brückenermüdung, (qualifiziert durch ASTRA) durchgeführt. Ziel war es, die Bautechnische Relevanz des ausgewählten Anwendungsfalls aus Sicht der aktuellen Praxis / Projektierung zu validieren. Es wurde insbesondere darauf hingewiesen, dass die Integration von realen Sensordaten (WIM-Daten, Dehnung, Verkehr) in ein digitales Modell (oder auch DT) künftig präzisere und weniger konservative Ermüdungsnachweisen ermöglichen könnte (siehe Kap. X.1).

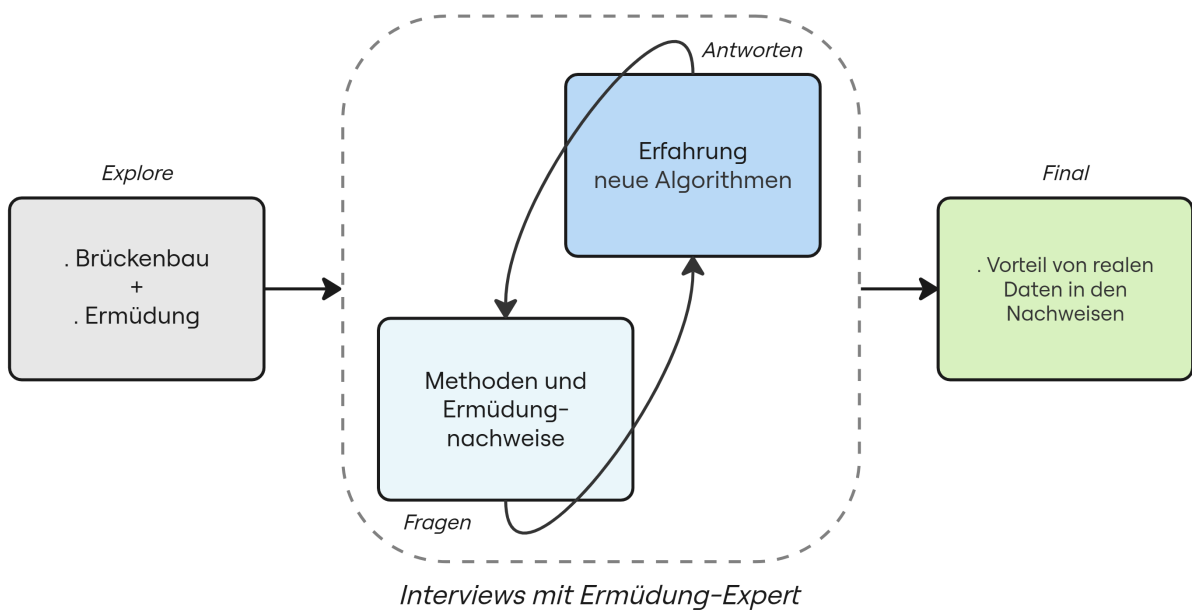


Abb. 22 : Interviews zur Verständigung über die Ermüdungsnachweise

Die Erkenntnisse und Ergebnisse aus allen vier Interviews wurden kontinuierlich in die Entwicklung des Konzepts (und Varianten) sowie in die Priorisierung der Modellierungselemente der Brücke integriert.

Die vollständigen Protokolle (Fragen und Antworten) der Interviews mit Einverständniserklärung und Unterschrift sind im Anhang dokumentiert.

### 3.3 Fallstudie

Für die vorliegende Masterthesis wurde die Schwarzwaldbrücke (A2) in Basel als konkrete Fallstudie ausgewählt.

Ziel war die Entwicklung und Validierung eines semantisch angereicherten digitalen Schattens einer Brücke (*Proof of Concept*). Die Wahl einer realen Brücke erfolgt auf Basis diverser Überlegungen, sowohl aus technischer als auch aus methodischer Sicht.

Die Schwarzwaldbrücke (Abb. 23) ist eine klassische Balkenbrücke, deren Errichtung zwischen 1971 und 1973 erfolgte (ASTRA, 2020). Zum Zeitpunkt der Arbeiten betrug ihr Alter somit über 50 Jahre. Der hier beschriebene Brückentyp stellt den mit Abstand am häufigsten im nationalen Strassennetz der Schweiz anzutreffenden Brückentyp dar (siehe auch Kap. 5.2.2).

Aufgrund der klar und übersichtlichen Struktur, die sich aus dem statischen System ergibt, lässt sich dieser Brückentyp besonders einfach in 3D-Darstellungen modellieren, wobei die Vorgaben des IFC-Schemas (IFC 4X3\_ADD2, 2025a) zu befolgen sind.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Fokus dieser Masterthesis nicht ausschliesslich auf der 3D-Modellierung liegt, sondern insbesondere auf ihrer Semantik.



Abb. 23 : Foto der Schwarzwaldbrücke

Aus bautechnischer Sicht ist die Schwarzwaldbrücke von signifikanter Relevanz, da sie im Rahmen des ASTRA-Erhaltungsprojekts Osttangente Basel (ASTRA, 2020) bereits konkrete Probleme bei den Dehnungen aufwies. Im Jahr 2020 wurden die Fahrbahnübergänge auf der Seite Grossbasel saniert.

Eine Analyse der Dichtungsprofile ergab, dass diese Verschleisserscheinungen aufwiesen. Zudem wurde eine Korrosion der Stahlteile festgestellt (ASTRA, 2020). Schäden dieser Art sind ein charakteristisches Merkmal von älteren Brücken, die einer hohen Verkehrsbelastung ausgesetzt sind. Sie weisen auf eine fortschreitende Ermüdung hin, die in dieser MTH eine zentrale Rolle spielt.

Aus methodischer Perspektive ist die gewählte Fallstudie von zentraler Relevanz. Die Gültigkeit eines PoC ist an seine praktische Anwendbarkeit geknüpft. Er muss in einem realistischen Kontext überprüft werden, um seine Relevanz zu gewährleisten (Köhler, 2020).

Die Anwendung auf diese spezifische Brücke, die durch bekannte Eigenschaften, Alter, Struktur und dokumentierte Schäden charakterisiert ist, generiert präzise den erforderlichen Validierungsrahmen (siehe auch Kap. 5.6.1).

Gemäss (Köhler, 2020) erlauben Fallstudien in frühen Entwicklungsphasen eine gezielte Überprüfung der Machbarkeit und Interoperabilität technischer oder semantischer Lösungen. Ihre Eignung zur Identifizierung der Stärken und Schwächen eines Konzepts sowie die Generierung fundierter Rückschlüsse hinsichtlich notwendiger Anpassungen ist evident. Die in dieser MTH ausgewählte Fallstudie wird genau diesem Zweck dienen.

### 3.4 Prozess der Datenbeschaffung

Die Datenbeschaffung erfolgte nach einem strukturierten Vorgehen (*Schritt für Schritt*). Der Fokus der Untersuchung wurde auf die Schwarzwaldbrücke in Basel gelegt. Ausgehend von dieser Fallstudie wurden, die für den digitalen Schatten erforderlichen Datentypen analysiert und deren Aufbereitung im RDF-Format (.ttl) untersucht.

Zunächst wurde eine gezielte Recherche durchgeführt, um festzustellen, ob die Sensordaten bereits online im RDF-Format verfügbar sind, um eine möglichst direkte Integration zu ermöglichen. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass derzeit nur Wetterdaten über das Open-Data-Portal verfügbar sind (siehe auch Kap. 4.1).

Aufgrund der Tatsache, dass die Wetterdaten bereits im RDF-Format vorlagen, konnte der folgende Verarbeitungsprozess implementiert werden:

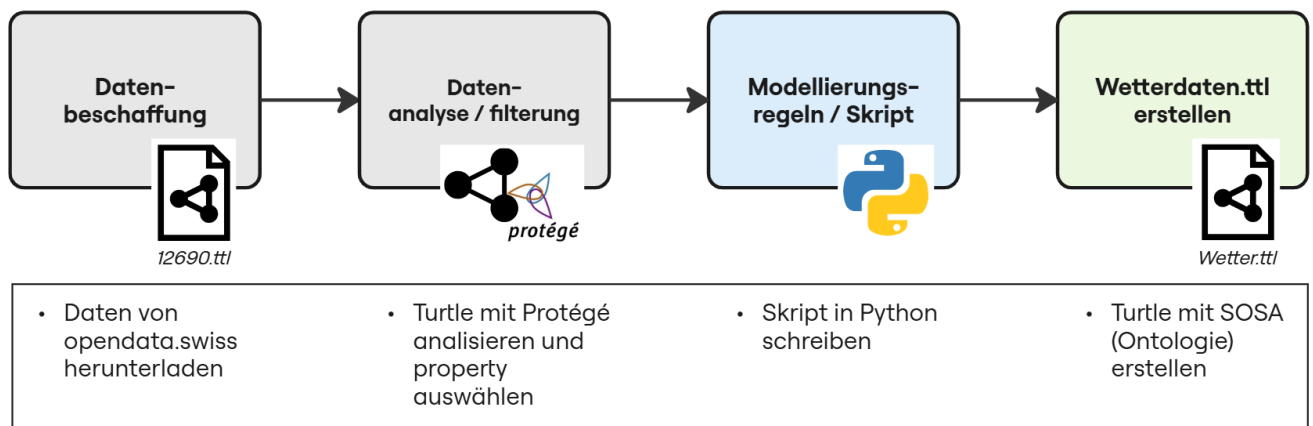


Abb. 24 : Verarbeitungsschritte für Wetterdaten

Die Verkehrsdaten wurden einer Verkehrszählstelle des ASTRA entnommen (siehe Kap. 4.2). Die Zählstelle lieferte die Verkehrswerte in tabellarischer Form, darunter die Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde und die Aufschlüsselung nach Fahrtrichtung.

Da die Daten nicht im RDF-Format vorlagen, mussten sie manuell vorverarbeitet und anschliessend semantisch modelliert werden:

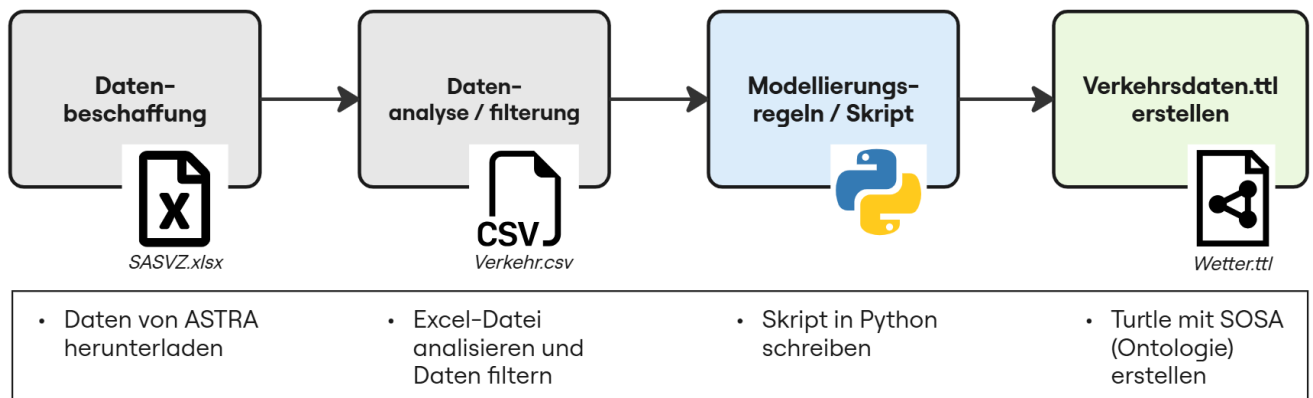


Abb. 25 : Verarbeitungsschritte für Verkehrsdaten

Da die WIM-Daten und Verformungsdaten nicht verfügbar waren, wurden für diese synthetische Datensätze in Excel erstellt (siehe auch Kap. 4.3 Und Kap. 4.4) und anschliessend mittels eines automatischen Python-Skripts in RDF (Serialisierung in Turtle) umgewandelt.

Neben den sensorbasierten Datensätzen wurde auch die Geometrie der Brücke in zwei BIM-Autoresensoftwareprogrammen in Form von IFC-Dateien modelliert (siehe auch Kap. 4.5). Dank der Entwicklung der zukünftigen Ontologie ifcBridgeOWL wurde auch diese Geometrie anschliessend in das RDF-Format (.ttl) konvertiert.

### 3.5 Methodischer Ansatz

Der aktuelle Stand der Forschung zu semantischen digitalen Zwillingen (Kap. 2.1) zeigt, dass eine Vielzahl von Ansätzen zur Erstellung dieser Zwillingsmodelle auf der Ad-Hoc-Entwicklung neuer Ontologien für jeden Anwendungsfall basiert (siehe die Anzahl der existierenden Ontologien, siehe Kap. 2.3.3). Dieser Ansatz erfordert jedoch einen erheblichen konzeptionellen und technischen Aufwand und steht in einem gewissen Widerspruch zum Prinzip der Interoperabilität von LD (siehe Kap. 2.2.1).

Im Gegensatz zu diesem Ansatz wurde in der vorliegenden MTH ein anderer Weg eingeschlagen, nämlich die gezielte Wiederverwendung und Kombination bestehender Ontologien (siehe Kap. 2.3.4). Ziel war die Entwicklung einer gemeinsamen und erweiterbaren Basis, die auf etablierten und online verfügbaren Ontologien basiert. Dieser Ansatz begünstigt nicht nur die technische Stabilität, sondern auch die Interoperabilität mit bestehenden Standards, wie in unserem Fall IFC 4.3 (IFC 4X3\_ADD2, 2025a).

Die methodische Umsetzung dieses Ansatzes erfolgte durch eine initiale Definition der erforderlichen Daten- und semantischen Konzeptarten auf Grundlage des Konzepts des DTs (Kap. 2.3.4). Auf dieser Grundlage erfolgte die Selektion der geeigneten Ontologien: das BROT-Framework (Hamdan & Scherer, 2020) für die Brückentopologie und SOSA/SSN (OGC & W3C, 2017) für die Sensorintegration. Abschliessend wurde eine Light-Mapping-Ontologie (*ifcBridgeOWL*) definiert, um die Konzepte aus dem IFC-Schema in die semantische Struktur zu übertragen.

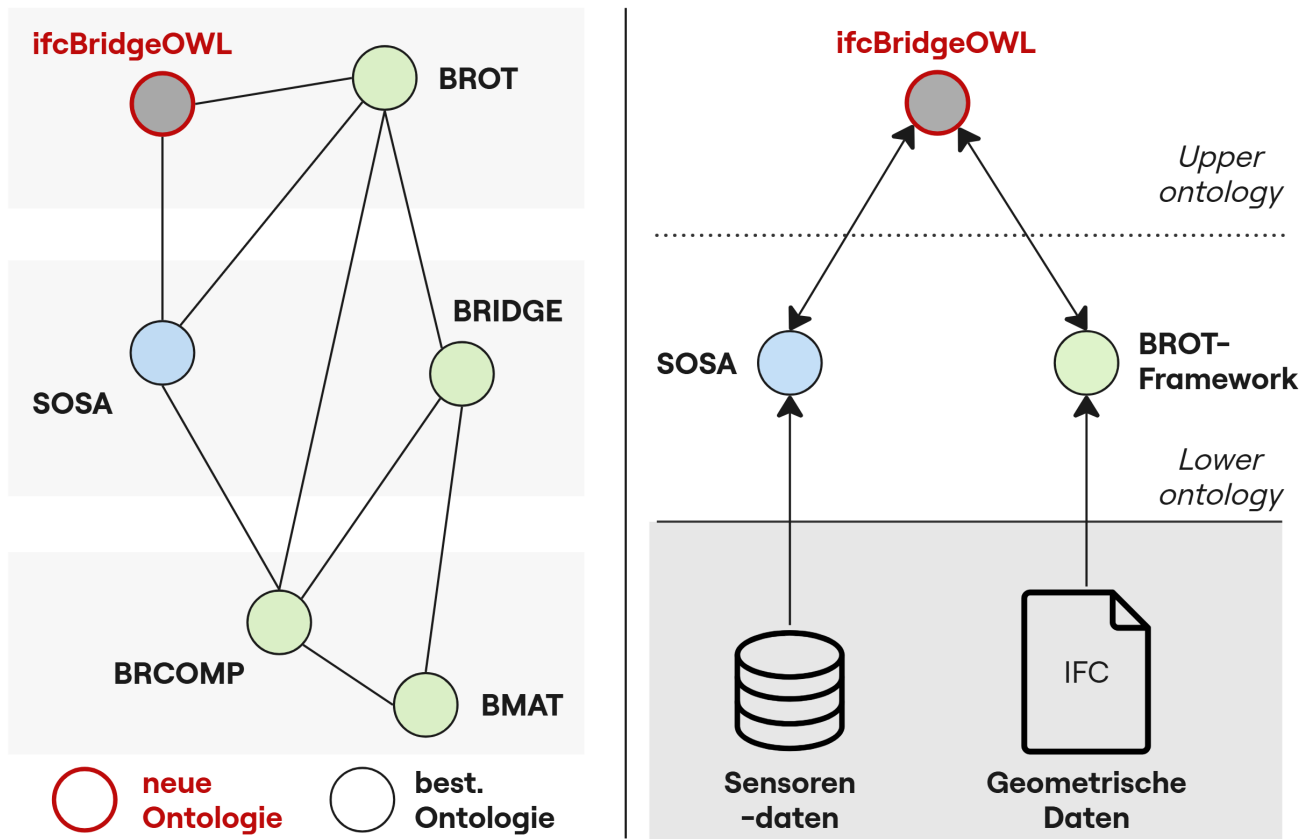


Abb. 26 : Ontologie-basiertes Modellierungskonzept

In der präsentierten Abbildung erfolgt eine Differenzierung zwischen den Ontologien: «Upper ontology» und «Lower ontology».

Bei Lower Ontologies wie BROT und SOSA erfolgt die Modellierung domänenspezifischer Konzepte direkt aus den Quelldaten (Sensoren und IFC-Datei). Die Upper Ontologie (*ifcBridgeOWL*) fungiert in diesem Modell als übergeordnete logische Schicht. Ihre Aufgabe besteht in der semantischen Integration und Verknüpfung der bestehenden Ontologien.

## 4 Datenbeschaffung

Im Rahmen des Versuchs zur Erreichung eines *Proofs of Concept* des digitalen Zwillings wurde der Versuch unternommen, ein möglichst reales Daten zu integrieren. Da keine Basisdaten vorlagen, wurde eine wichtige und leicht zu modellierende Autobahnbrücke gesucht (in dieser Fallstudie wurde die Schwarzwaldbrücke ausgewählt, siehe auch Kapitel 3.3).

Diese Brücke wurde als Referenz herangezogen, um zu ermitteln, welche Sensoren potenziell als Referenz geeignet sein könnten. Für die Ermittlung der Temperatur wurden die *Messstation A2-Hardstation* und für die Fahrzeugzählung die *Verkehrszählstelle 277* herangezogen. Für die anderen Sensordaten wurden synthetische Daten erstellt, die aus realen Daten abgeleitet wurden.

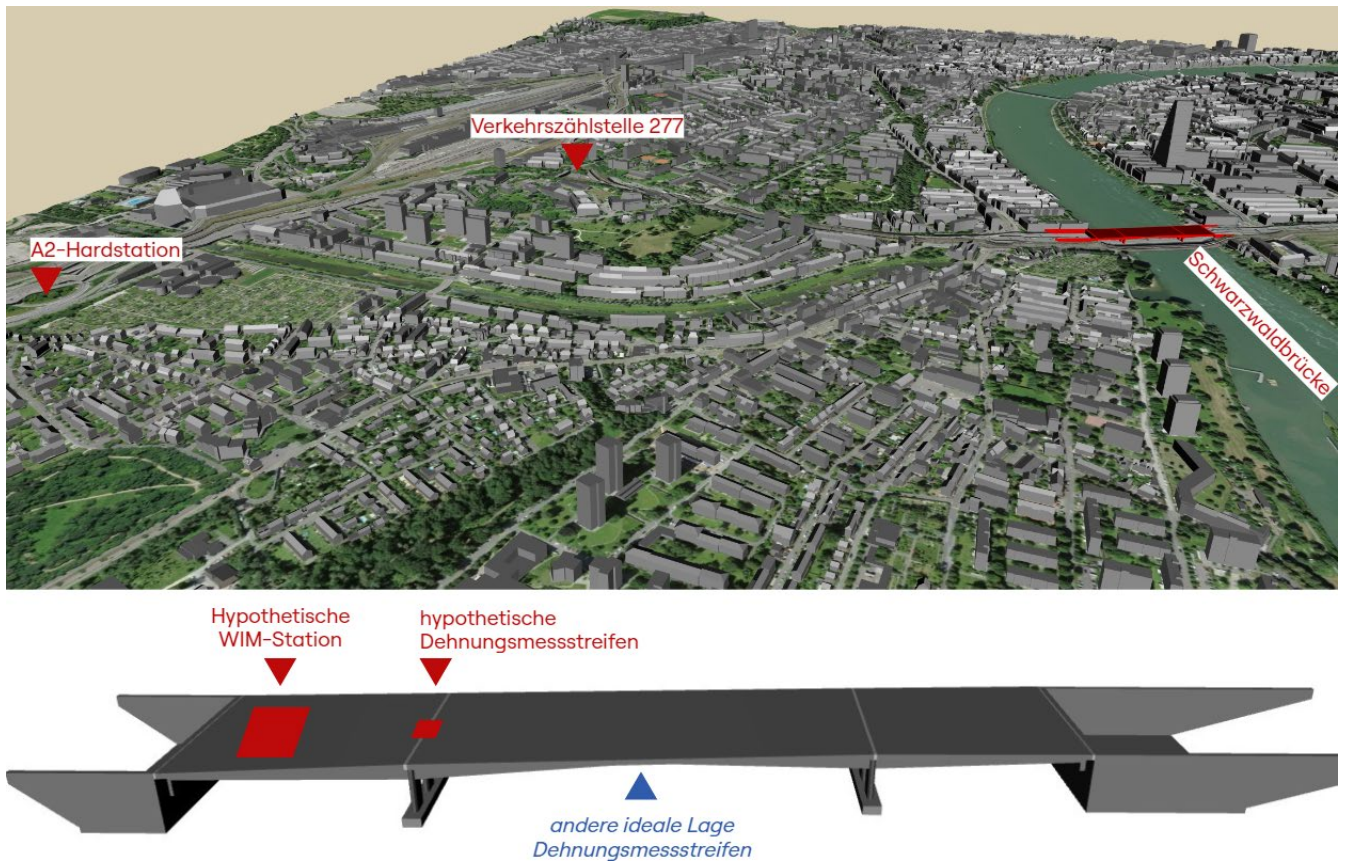


Abb. 27 : Lokalisation der Messpunkte und Datenquellen

Die vorliegende Datenerfassung umfasst nicht nur die Messdaten, sondern auch die Geometrie der Brücke. Letztere wird so modelliert, dass eine semantische Verknüpfung mit Ontologien erfolgt. Zu diesem Zweck erfolgt eine Kombination verschiedener Datenquellen:

Tab. 7 : Überblick über die verwendeten Datenquellen, eigene Darstellung

	Daten	Beschreibung
1	Wetterdaten	Temperaturdaten der Wetterstation
2	Verkehrsdaten	Anzahl der schweren Fahrzeuge pro Tag von Zählstelle
3	WIM-Daten ( <i>Weigh-in-Motion</i> )	Informationen über Achslasten und Fahrzeugkategorien
4	Dehnungsdaten	Dehnungswerte auf der Grundlage von Verkehrsdaten
5	Geometrie der Brücke	IFC-Modell der Schwarzwaldbrücke

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Datenquellen sowie die gewählte semantische Modellierungsmethode detailliert erörtert.

### 4.1 Wetterdaten

Wetterdaten stellen eine signifikante externe Informationsquelle für die semantische Anreicherung des digitalen Zwillings dar und unterstützen den Fachplanende bei der Evaluierung der Plausibilität der Daten der Extensometer. (Interview X.12)

Als Fallstudie wurde die Schwarzwaldbrücke in Basel herangezogen, wobei die nächstgelegene Wetterstation, die Messstation A2 Hard, als Beispiel dient. Die Daten sind öffentlich über das Open-Data-Portal der Schweiz (*opendata.swiss*<sup>7</sup>) verfügbar und bieten halbstündliche Messwerte zu Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit (OGD, 2025). Darüber hinaus sind sie bereits in einer Turtle-Datei (*12690.ttl*) verfügbar. Die Verwendung dieses Formats bietet den Vorteil einer direkten Integration der Daten in den digitalen Zwilling.

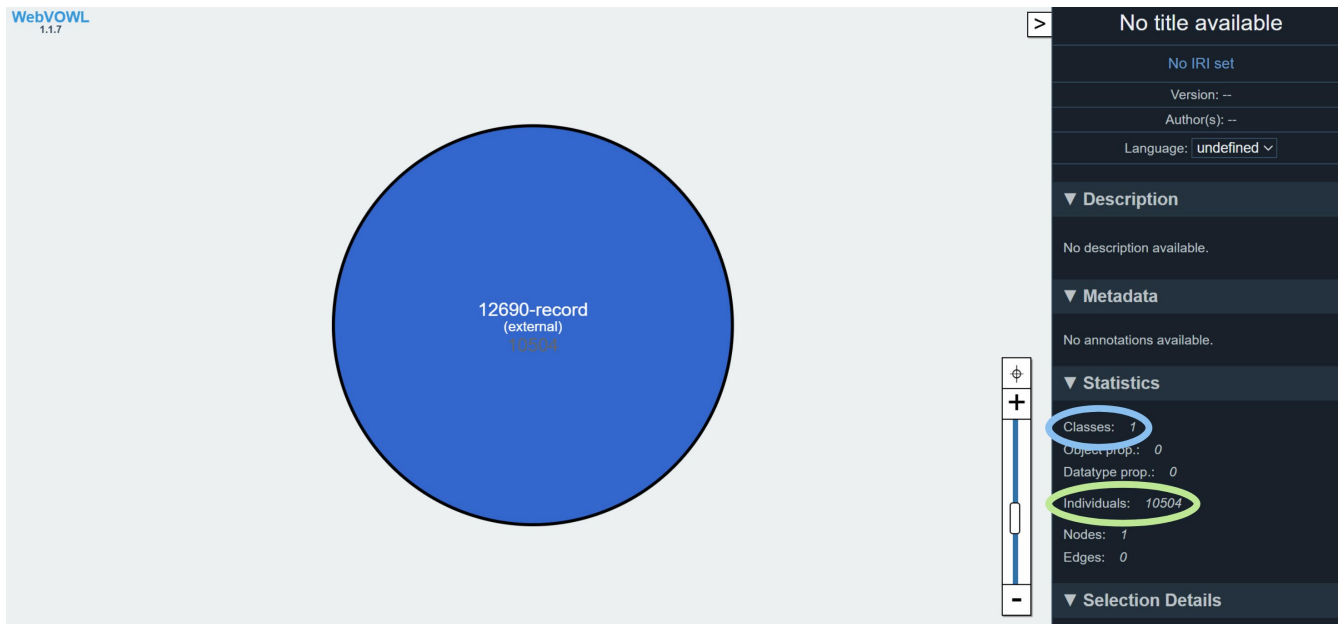


Abb. 28 : Turtle-File in WebOWL

Die sogenannte Turtle-Datei umfasst eine Klasse (*12690-record*) sowie 10504 Individuen (Abb. 28). In *WebProtégé* wurden die beiden erforderlichen Eigenschaften (*properties*) identifiziert und mittels der URI von *data.bl.ch* den Datensätzen in Tab. 8 zugewiesen.

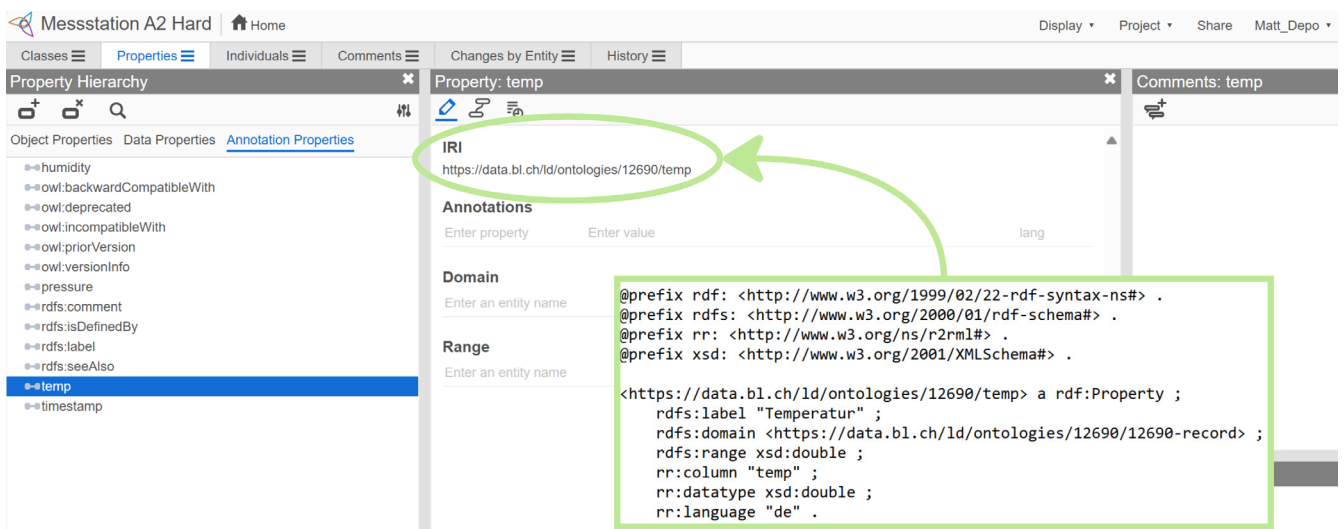


Abb. 29 : Datenanalyse in WebProtégé

<sup>7</sup> Website: [Wetter Messstation A2 Hard \(halbstündliche Daten seit September 2024\) | opendata.swiss](https://opendata.swiss)

Tab. 8 : Datenfilterung mit URI und Datensatz

	property	URI	Datensatz
a	Temperatur	<a href="https://data.bl.ch/ld/ontologies/12690/temp">https://data.bl.ch/ld/ontologies/12690/temp</a>	<../temp> "10.45"
b	Zeitstempel	<a href="https://data.bl.ch/ld/ontologies/12690/timestamp">https://data.bl.ch/ld/ontologies/12690/timestamp</a>	<../timestamp> "2024-10-19 03:30:00+00:00"

Der heruntergeladene Datensatz *12690.ttl* enthielt strukturierte RDF-Daten (mit Zeitstempeln und Temperaturen), jedoch keine direkte Ontologie wie SOSA/SNN (OGC & W3C, 2017). Um diese Informationen semantisch nutzbar zu machen, wurde ein Python-Skript verwendet, das aus dem Originalfile drei reale Temperaturmessungen extrahierte und gemäss SOSA-Struktur modellierte.

Tab. 9 : SOSA-Modellierungsregeln für das Python-Skript

	SOSA-Eigenschaft	Instanzen	Beschreibung
1	sosa:madeBySensor	ex:A2HardStation	Repräsentiert die Wetterstation A2 Hard
2	sosa:observedProperty	ex:Temperature	Repräsentiert die Lufttemperatur
3	sosa:hasFeatureOfInterest	ex:IfcBridge_1	Verknüpfung zur Brücke
4	sosa:result	"2.913"^^xsd:float <sup>8</sup>	Wert der gemessenen Temperatur
5	sosa:resultTime	"2025-03-14T01:00:00Z"^^xsd:dateTime <sup>9</sup>	Datum und Uhrzeit der Messung
6	rdf:type	sosa:Observation / sosa:Sensor	Definition des Typs für die semantische Interpretation

Die lokale Ausführung des Python-Skripts (Anhang X.19) führte zur Generierung der Datei *Wetterdaten.ttl*. Diese enthält drei exemplarische Messungen im SOSA-konformen RDF-Format. Diese Datei beinhaltet die Messwerte als sosa:Observation mit verknüpften Entitäten wie sosa:Sensor, sosa:observedProperty und IfcBridge. Die resultierende Datei bildet die Grundlage für die im Kapitel X.9 beschriebene semantische Verknüpfung.

The image shows the GraphDB interface. On the left is a sidebar with navigation options like 'Import', 'Explore', and 'Visual graph'. The main area displays a 'Visual graph' with nodes for 'Sensor', 'A2Hard Wetterstation', and three 'Obs' nodes. Relationships are shown as lines between nodes. To the right, a 'Turtle' script is displayed, defining prefixes and instances for the graph.

Abb. 30 : Turtle-File in GraphDB mit Wetterdaten und TTL-Skript

<sup>8</sup> xsd:float : Es bezeichnet einen numerischen Gleitkommawert gemäss der XML-Schema-Definition.  
<sup>9</sup> xsd:dateTime : Es bezeichnet ein standardisiertes Zeitformat gemäss der XML-Schema-Definition.

## 4.2 Verkehrsdaten

Die Integration von realen Verkehrsdaten in einen digitalen Zwilling einer Brücke ermöglicht eine Verfeinerung der Zustandsnachweise und in diesem Fall der Ermüdungsberechnungen nach (SIA 261/1, 2020). Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der Analysegenauigkeit. Die Verwendung aktueller Daten ermöglicht eine detailliertere Darstellung der Beanspruchung der Brücke. Dies wiederum trägt zur Optimierung der Dauerhaftigkeitsprognose sowie zur gezielten Planung von Unterhaltsarbeiten bei. Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) betreibt heute auf den wichtigsten Strassenverbindungen ein Netz von permanenten automatischen Verkehrszählstellen (ASTRA, 2025a). Die so gewonnenen Echtzeitdaten der Strassenverkehrszähler<sup>10</sup> (SASVZ) sind jedoch nicht vollständig online verfügbar.

Die betreffenden Verkehrsdaten sind regulär in DATEX II verfügbar, einem Standard für den Austausch von Verkehrsdaten. Zunächst war vorgesehen, sie unter Verwendung der *DATEX II Roadworks Ontology* (Petersen, 2018) unmittelbar in *Turtle* zu konvertieren. Es sei jedoch angemerkt, dass diese nicht in ihrer Gesamtheit online verfügbar sind. Stattdessen sind sie lediglich als wöchentliche Verkehrsentwicklung in DTV in einer Excel-Datei verfügbar. Diese reichen für die Überprüfung der Brückenermüdung mithilfe der Algorithmen aus.

Die Excel-Datei beinhaltet aggregierte Werte, wie den durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) sowie den prozentualen Anteil der schweren Fahrzeuge (über 3,5 t).

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurde die Schwarzwaldbrücke als Fallstudie und Beispiel ausgewählt. Konkret wurde hierfür die Zählstelle Nr. 277 «Basel, Schwarzwaldbrücke (AB)» herangezogen.

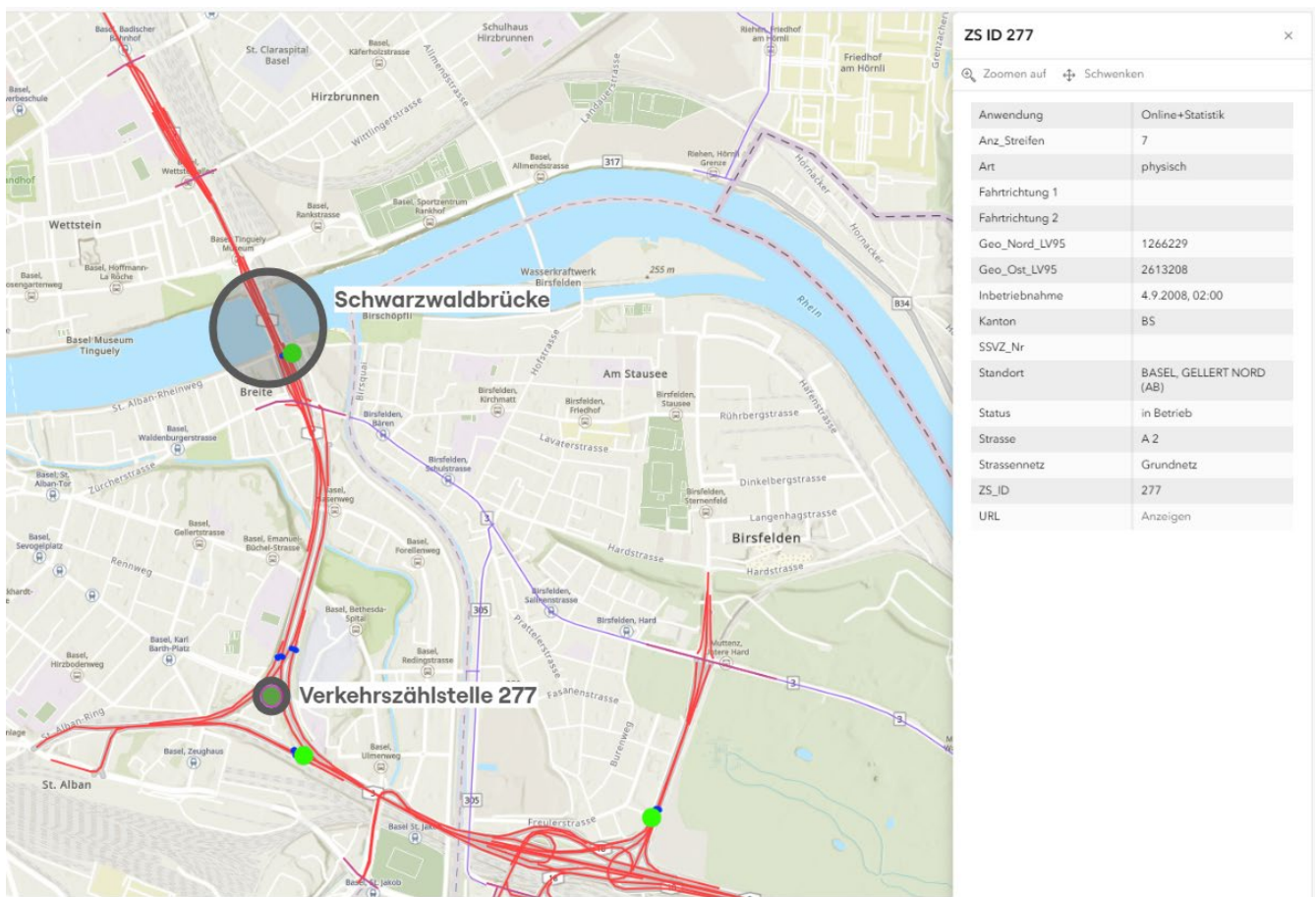


Abb. 31 : Übersicht und Informationen der Verkehrszählstelle 277 (Quelle: ASTRA-Dashboard)<sup>11</sup>

<sup>10</sup> Website : [Wöchentliche Verkehrsentwicklung](#)

<sup>11</sup> Website : [SVZ Data Dashboard](#)

In diesem Schritt wurden die Daten extrahiert, transformiert mittels Python-Skript (Anhang X.19) und als RDF-Triple modelliert.

Im Rahmen der Serialisierung wurde durchgängig das Turtle-Format verwendet, wobei zentrale Entitäten wie *ex:TrafficSensor277*, *ex:HeavyVehicleCount* und *ex:lfcBridge\_1* zum Einsatz kamen. Die auf diese Weise modellierten Daten erlauben eine semantische Verknüpfung zwischen Verkehrszählung und Brücke.

Tab. 10 : SOSA-Modellierungsregeln für das Python-Skript

	SOSA-Eigenschaft	Instanzen	Beschreibung
1	sosa:madeBySensor	ex:SchwarzwaldCounter	Repräsentiert die Zählstelle auf der Schwarzwaldbrücke
2	sosa:observedProperty	ex:HeavyTrafficVolume	Repräsentiert die Anzahl der schweren Fahrzeuge
3	sosa:hasFeatureOfInterest	ex:lfcBridge_1	Verknüpfung zur Brücke
4	sosa:result	"3874"^^xsd:integer <sup>12</sup>	Anzahl der schweren Fahrzeuge pro Tag
5	sosa:resultTime	"2025-03-14"^^xsd:date <sup>13</sup>	Datum der Messung
6	rdf:type	sosa:Observation	Definition des Typs für die semantische Interpretation

Die Abb. 32 veranschaulicht den RDF-Graphen in GraphDB, welcher die modellierten Verkehrsdaten und deren semantische Beziehungen zur Brücke darstellt:

The screenshot shows the GraphDB interface. On the left is a navigation sidebar with options like 'Import', 'Explore', 'Visual graph', 'SPARQL', 'GraphQL', 'Monitor', and 'Setup'. The main area displays a 'Visual graph' with a central red node labeled 'Sensor' and several blue nodes labeled 'Observation\_1' through 'Observation\_11'. Edges connect the sensor to each observation, labeled 'madeBySensor'. A tooltip for 'Observation\_8' shows its type as 'sosa:Observation', RDF Rank as '0', and its properties: 'sosa:result' (3874), 'sosa:resultTime' (2025-03-14), and 'sosa:observedProperty' (HeavyVehicleCount). On the right, a snippet of Turtle script is visible, defining various observations and their relationships.

Abb. 32 : Turtle-File in GraphDB mit Verkehrsdaten und TTL-Skript

<sup>12</sup> xsd:integer : Es bezeichnet einen numerischen Ganzzahlwert gemäss der XML-Schema-Definition.  
<sup>13</sup> xsd:date : Es bezeichnet ein standardisiertes Datumsformat gemäss der XML-Schema-Definition.

### 4.3 WIM-Daten

WIM-Systeme (*Weigh-in-Motion*) stellen eine präzise Datenquelle bezüglich der Verkehrsbelastung dar. Im Rahmen der Erfassung von Daten während des Betriebs werden Achslasten, Fahrzeuggewichte, Geschwindigkeiten, Achszahlen und Fahrzeugklassen ermittelt, ohne dabei den Verkehrsfluss zu unterbrechen (ASTRA, 2025b).

Diese Informationen bilden eine wesentliche Grundlage für das Verständnis der Belastung von Brückenkonstruktionen (Interview X.12) und sind von besonderer Relevanz für die Beurteilung des Verschleisses und der Deformation von Dehnungsfugen.

Da für die Schwarzwaldbrücke keine Echtzeit-WIM-Daten zur Verfügung standen, wurde zur Orientierung auf öffentlich zugängliche Statistiken des ASTRA (ASTRA, 2025b) zurückgegriffen.

Als Referenz diente dabei gezielt die WIM-Station Bözberg (AG) (Anhang X.14), A3, da sich diese in relativer Nähe zur Fallstudienbrücke befindet und vergleichbare Verkehrsmuster aufweist.

Für die semantische Integration wurde ein synthetischer Datensatz in TTL erstellt, der die typischen Werte für eine einzelne Achse eines schweren Fahrzeugs (Achse 1) an fünf aufeinanderfolgenden Tagen (vom 10. bis 14. März 2025) enthält, analog zu den bereits verwendeten Verkehrsdaten.

Für jede Messung wurde lediglich ein Maximalwert der Achslast des Tages berücksichtigt, da dieser im Zusammenhang mit der Ermüdungsprüfung und insbesondere der Grenzwertanalyse von Relevanz ist.

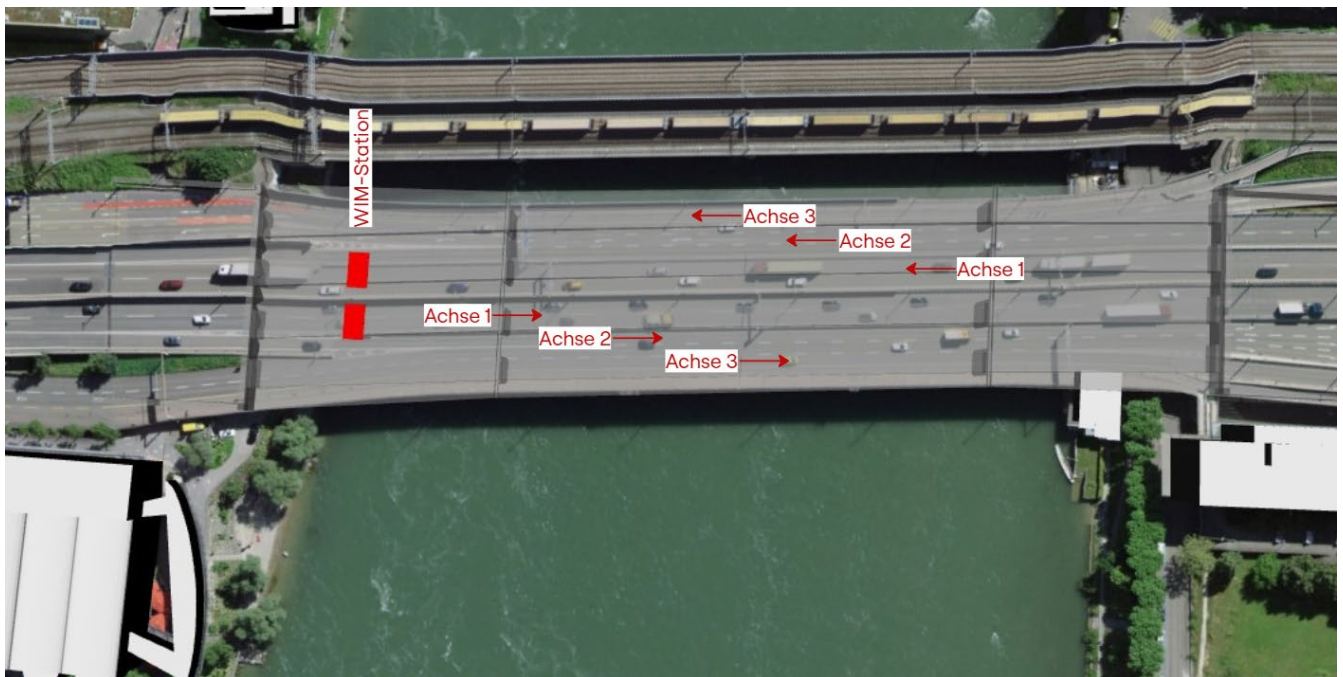


Abb. 33 : Position der Achsen und der WIM-Messstation auf der Schwarzwaldbrücke

Die Daten wurden gemäss der SOSA-Ontologie (OGC & W3C, 2017) strukturiert und beziehen sich auf die Brücke mit der Bezeichnung *ex:lfcBridge\_1*.

In der vorliegenden Masterthesis wurde der Konstruktnamen «*wim:Achslast\_1*» als beobachtete Eigenschaft verwendet. Die vorliegende Konstruktion ist als Hilfsmittel zu verstehen, dessen ausschliessliche Funktion in der Darstellung der Achslast besteht.

Diese Lösung ermöglicht eine klare Trennung der semantischen Beobachtungen und eine gezielte Suche mittels SPARQL. Es sei jedoch angemerkt, dass sie nicht Teil einer standardisierten Domänenontologie ist (sie ist lediglich abstrakt).

Die RDF-Serialisierung in TTL der WIM-Daten wurde automatisch über ein Python-Skript durchgeführt, welches aus definierten Tageswerten strukturierte *sosa:Observation*-Instanzen generiert. Der Python-Code ist im Anhang (Anhang X.19) verfügbar.

Die Datei *WIM-Daten.ttl* beinhaltet fünf separate Instanzen des Typs *sosa:Observation* mit den zugehörigen Tageswerten, dem Datum, der Achslast sowie dem Verweis auf die übergeordnete Brückeninstanz und die hypothetische WIM-Station.

Tab. 11 : SOSA-Modellierungsregeln für das Python-Skript

	SOSA-Eigenschaft	Instanzen	Beschreibung
1	sosa:Observation	ex:Observtion_Achse1_Day5	Instanz für die Beobachtung der Achslast 1
2	sosa:madeBySensor	ex:WIMStation_1	Repräsentiert der WIM-Messstation auf der Schwarzwaldbrücke
3	sosa:observedProperty	wim:Achslast_1	Beobachtete Eigenschaft (aber lokal definiert)
4	sosa:hasFeatureOfInterest	ex:lfcBridge_1	Verknüpfung zur Brücke
5	sosa:result	"9400"	Max. Achslast in kg
6	sosa:resultTime	"2025-03-14"^^xsd:date	Datum der Messung
7	rdf:type	sosa:Observation	Definition des Typs für die semantische Interpretation

Darüber hinaus erfolgte die Visualisierung der Struktur der generierten Daten in GraphDB:

### Visual graph ?

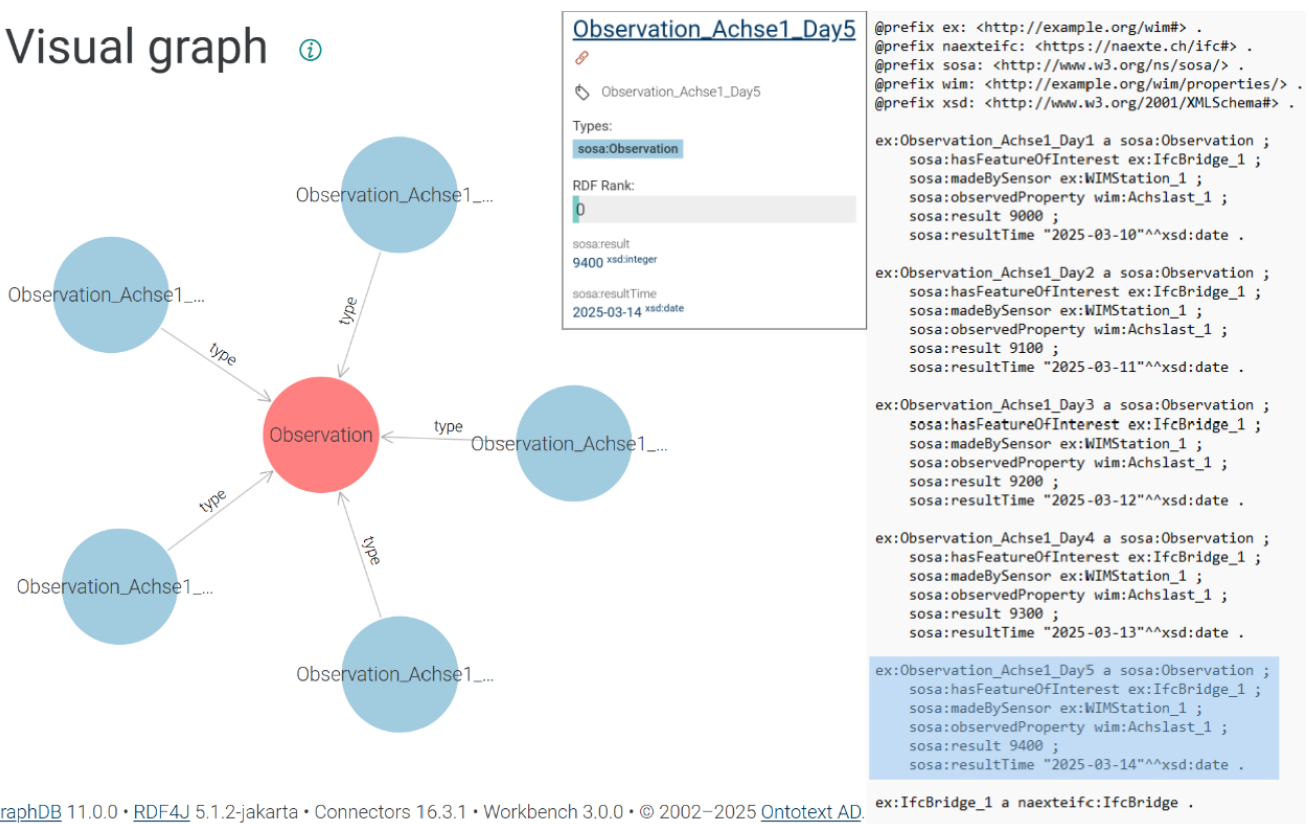


Abb. 34 : Visualisierung von WIM-Daten als RDF-Graph in GraphDB

### 4.4 Dehnungsdaten

Die Erfassung und Integration von Dehnungsdaten ist von zentraler Relevanz, da Dehnungen infolge von Verkehrsbelastungen, Temperaturveränderungen und strukturellem Verhalten entstehen und somit wesentliche Hinweise auf das Langzeitverhalten kritischer Bauteile, wie etwa Dehnungsfugen, liefern.

Da präzise reale Dehnungsdaten nicht zur Verfügung standen, wurde als Grundlage auf die Verkehrsdaten aus Kapitel 4.2 zurückgegriffen. Es erfolgte die Generierung synthetischer (Fake-)Daten unter Anwendung eines simplen Korrelationsfaktors von *1,3 mm pro 1000 LKW* (Interview X.12) sowie eine Aufbereitung in Excel. Diese Vorgehensweise ermöglicht dennoch eine plausible Abbildung des Dehnungsverhaltens und eignet sich zur Demonstration des semantischen Modells.

Dem Anhang X.15 ist als Beispiel eine Darstellung von realen Sensordaten beigefügt und in Abb. 35 als Vorbild:

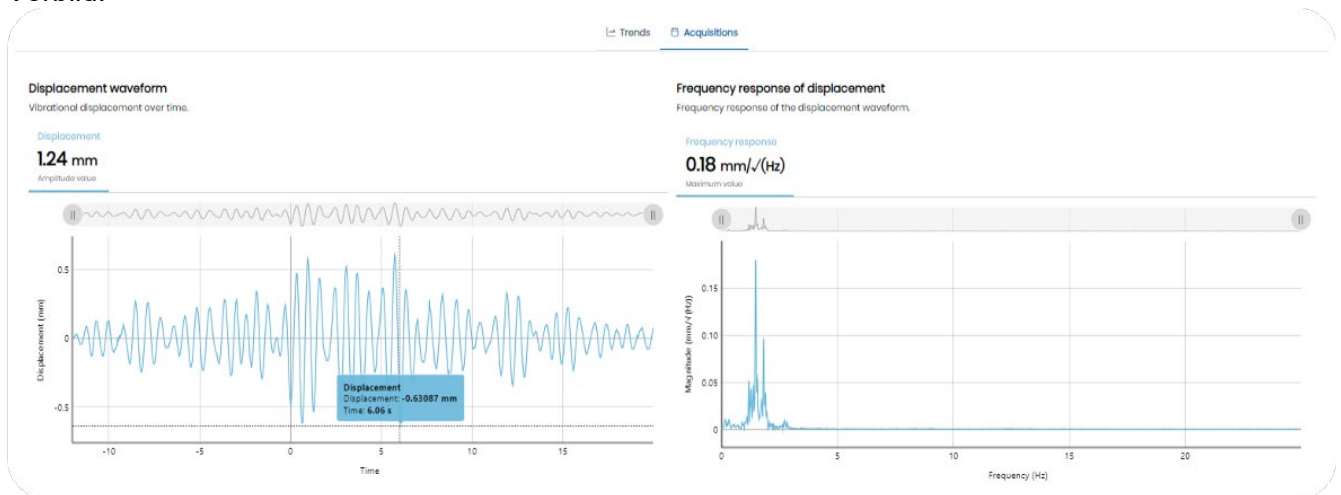


Abb. 35 : Beispiel eines realen Displacement-Datensatzes (Quelle: Move Solutions S.p.A)

Die Analyse der komplexen Bewegungsarten einer Brücke erfordert eine differenzierte Betrachtung auf strukturellem und konzeptionellem Niveau. Dies umfasst die Untersuchung von Translation, Rotation, Biegung und thermischer Ausdehnung (Kaufmann, 2025b).

Die Darstellung in Abb. 36 verdeutlicht, dass Ausdehnungen nicht selten in Kombination mit dem Verhalten der Auflager und den strukturellen Verschiebungen der Fuge auftreten.

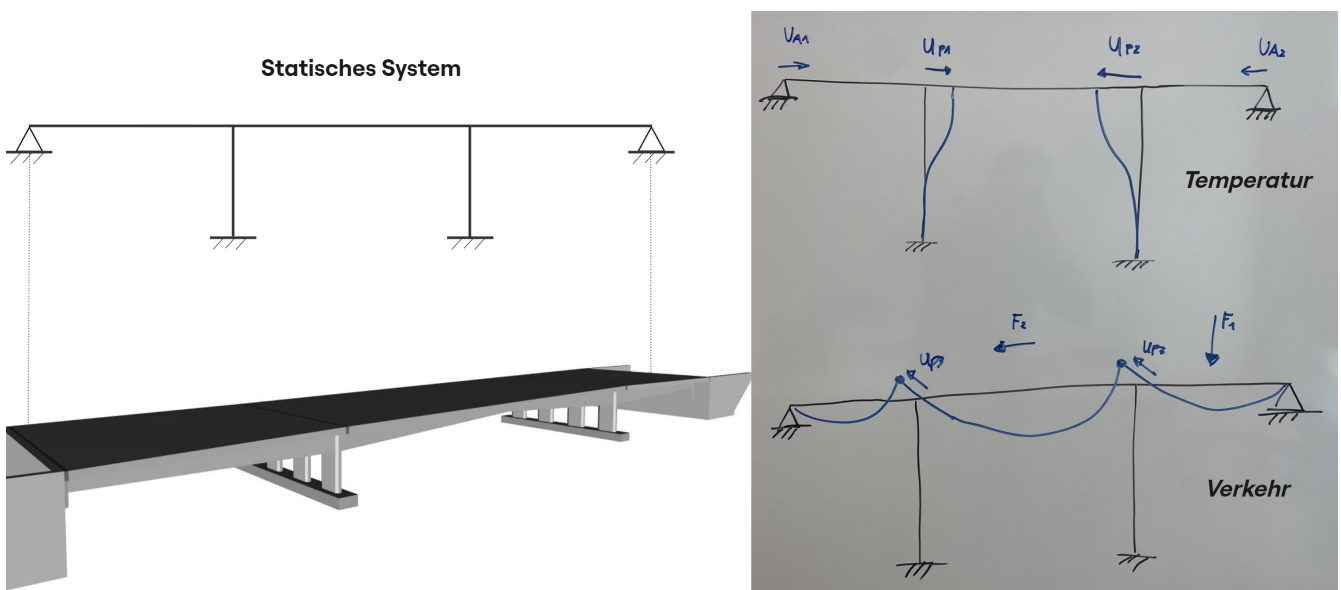


Abb. 36 : Einfluss von Temperatur und Verkehr auf das statische System

Im Rahmen der vorliegenden Masterthesis wurde der (hypothetische) Dehnungsmessstreifen gezielt direkt auf der Dehnungsfuge der Brücke positioniert, da sich dort die Auswirkungen sowohl thermischer als auch verkehrsinduzierter Längendehnungen am stärksten manifestieren. Zudem erlaubt die benachbarte Platzierung einer WIM-Station eine potenzielle Korrelation von Verkehrslast und Deformation. Eine alternative Idealposition (Abb. 27) im Brückenfeld wurde lediglich referenziert, aber nicht verwendet.

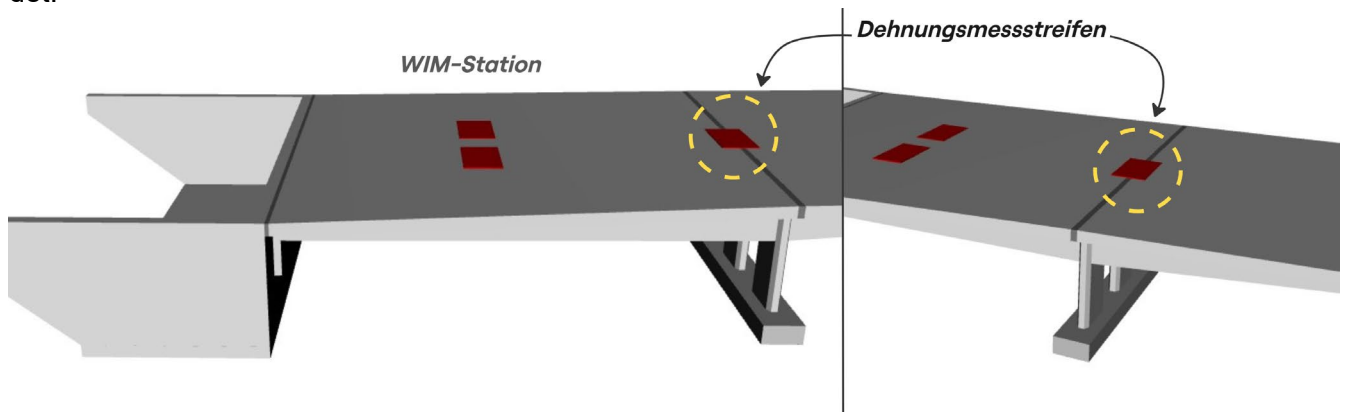


Abb. 37 : Positionierung von Dehnungsmessstreifen auf der Dehnungsfuge

Für die semantische Repräsentation der Dehnungsdaten wurde ein Python-Skript (Anhang X.19) entwickelt, das die Messwerte in das Turtle-Format mit der SOSA-Ontologie (OGC & W3C, 2017) konvertiert.

Die Messung wird als `sosa:Observation` modelliert, inklusive Datum, der Sensorinstanz, des täglich gemessenen Maximalwerts (genug für ein PoC) und des Verweises auf das vollständige Brückenmodell (`IfcBridge`).

Tab. 12 : SOSA-Modellierungsregeln für das Python-Skript

	SOSA-Eigenschaft	Instanzen	Beschreibung
1	<code>sosa:Observation</code>	<code>ex:Observation_Displacement_1</code>	Instanz für die Beobachtung eines Wertes der Dehnung
2	<code>sosa:madeBySensor</code>	<code>ex:BridgeSensor100</code>	Repräsentiert der Sensor auf der Schwarzwaldbrücke
3	<code>sosa:observedProperty</code>	<code>ex:BridgeDisplacement</code>	Repräsentiert die Dehnung aufgrund der Verkehrslast
4	<code>sosa:hasFeatureOfInterest</code>	<code>ex:IfcBridge_1</code>	Verknüpfung zur Brücke
5	<code>sosa:result</code>	"1.62"^^xsd:decimal <sup>14</sup>	Max. Dehnung in Millimeter (mm)
6	<code>sosa:resultTime</code>	"2025-03-14"^^xsd:date	Datum der Messung
7	<code>rdf:type</code>	<code>sosa:Observation</code>	Definition des Typs für die semantische Interpretation

Die vorgestellte Modellierung bildet die Grundlage, um die Dehnungswerte im digitalen Zwilling strukturiert darzustellen und gezielt mit der Dehnungsfuge zu verknüpfen, wo gemäss (ASTRA 12004, 2011) die spezifischen Deformationen für die Nachweisführung zu berücksichtigen sind.

<sup>14</sup> `xsd:decimal` : Es bezeichnet einen numerischen Wert mit Dezimalstellen gemäss der XML-Schema-Definition.

## 4.5 IFC-Datei

Wie bereits in der Einleitung zu Kapitel 4 erwähnt, dient die Schwarzwaldbrücke in Basel als Fallstudie. Da keine Daten zur Verfügung gestanden haben, erfolgte die Erstellung des (BIM-)Modells auf der Grundlage öffentlich zugänglicher Geodaten. Die verwendeten Daten wurden aus dem offenen Datenangebot der Stadt Basel bezogen und umfassen sowohl offizielle amtliche Vermessungsdaten (AV-Daten) als auch ein dreidimensionales Stadtmodell (Basel-Stadt, 2025).

Tab. 13 : Datenquellen für die IFC-Datei

	Aus dem Geodaten-Shop der Stadt Basel	Format	Koordinatensystem
1	3D-Stadtmodell	Wavefront OBJ	LV95
2	Parzellenplan Amtliche Vermessung 1:1'000 inkl. Bau- und Strassenlinien	dwg (Version 2000) – Autodesk	LV95



Abb. 38 : Geodaten- und Geometriebasis der IFC-Datei (Quelle: 3d.geo.bs.ch - Basel-Stadt)

Die Modellierung des IFC-Modells erfolgte zunächst manuell unter Verwendung von Allplan Civil 2025 (Nemetschek Group, 2025) und wurde anschliessend in Lexocad (cadwork informatik, 2025) weiterverarbeitet.

Weil bei der Modellierung wurde, jedoch ein grundlegendes Problem evident: Obwohl die verwendete BIM-Autorensoftware den Export in IFC 4.3 unterstützt, fehlt die Unterstützung für Entitäten wie *IfcSensor*. (Stand: Mai 2025 mit Studentenlizenz)

Um eine modellierbare und geometrisch darstellbare Darstellung der Sensoren zu erhalten, wurde als Alternative die Klasse *IfcDistributionBoard*<sup>15</sup> in Lexocad verwendet. Diese ermöglicht die Visualisierung der Sensoren als 3D-Volumen im digitalen Modell und die nachfolgende semantisch korrekte Verknüpfung in den RDF-Graphen.

<sup>15</sup> Obwohl *IfcDistributionBoard* ursprünglich für die Verteilung von elektrischer Energie konzipiert werden sollte, ermöglicht seine generische Struktur die Darstellung eines physischen Messpunkts. Aus diesem Grund wird es anstelle von *IfcSensor* verwendet. In einem nachfolgenden Schritt erfolgt eine explizite Kennzeichnung als Sensor mittels RDF sowie eine Verknüpfung mit den Messungsdaten über die Ontologie SOSA (*sosa:Platform*, *sosa:Sensor*).

Die dreidimensionale Modellierung der Brückenkonstruktion erfolgte unter Berücksichtigung der Grundsätze des Brückenbaus, wie sie in den Vorlesungsskripten des Kurses «*Bridge Design*» der ETHZ zusammengefasst sind. Diese Vorlesungsskripte spiegeln in logischer Weise den Schweizer Standard im Brückenbau wider (Kaufmann, 2025a).

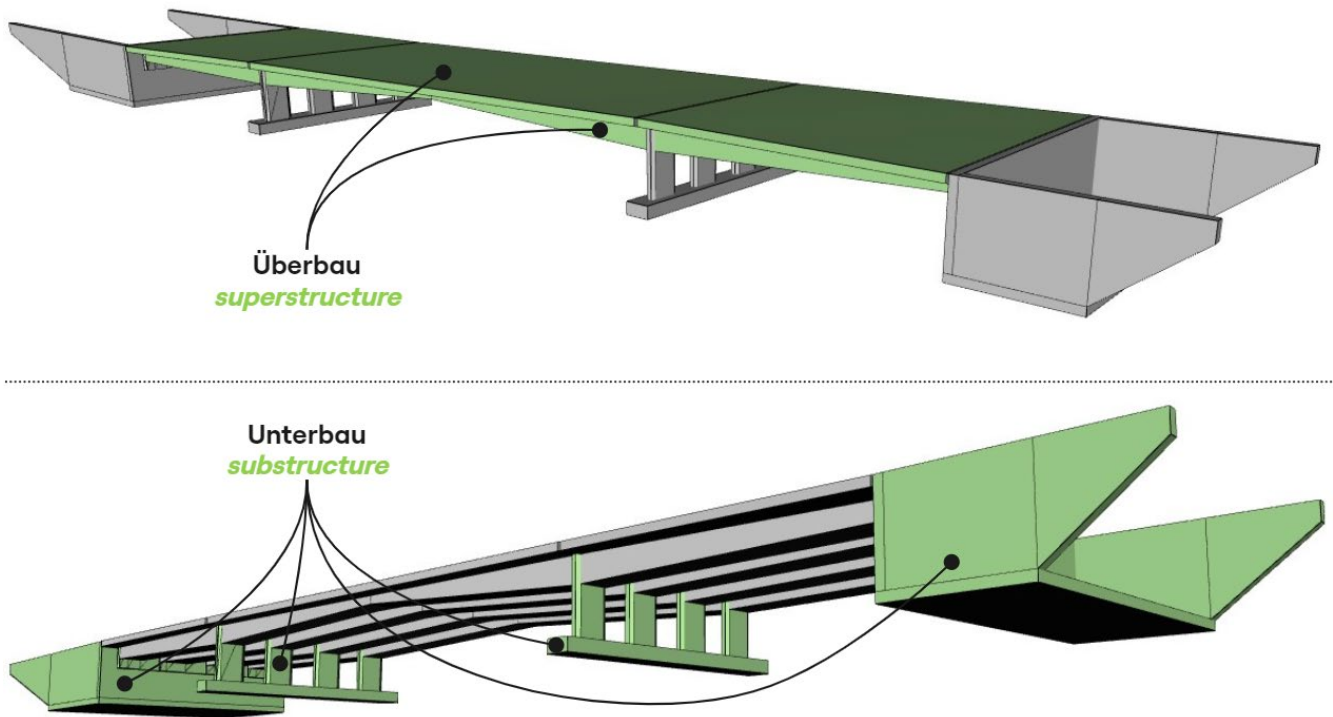


Abb. 39 : Strukturelle Gliederung in Überbau und Unterbau

Der Überbau, bestehend aus Fahrbahnplatte und Brückenträgern, wurde als tragende Einheit modelliert, die die Lasten in Längsrichtung aufnimmt. Der Unterbau wurde durch Pfeiler und Stützen repräsentiert, über die diese Kräfte in den Baugrund eingeleitet werden (Kaufmann, 2025a). Die Dehnungsfugen, die die thermisch/dynamischen Längenänderungen der Brücke ermöglichen, wurden als separate geometrische Elemente im Modell berücksichtigt (Kaufmann, 2025b).

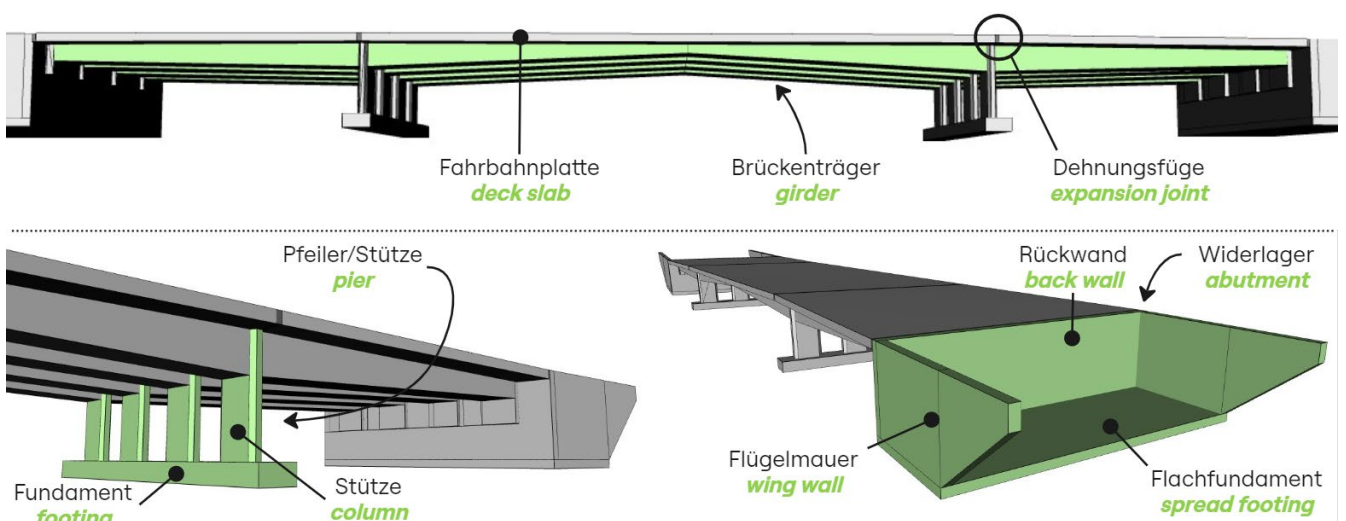


Abb. 40 : Bauteilidentifikation im digitalen Brückenmodell

Das Modell wurde so entworfen, dass es eine sowohl visuell als auch logisch konsistente Darstellung der Brückenkonstruktion ermöglicht.

## 5 Resultaten

In diesem Kapitel werden die Resultate des *Proof of Concept* (PoC) präsentiert, welcher für einen digitalen Zwilling konzipiert wurde, um die Erhaltung einer Autobahnbrücke zu unterstützen.

Im Folgenden wird dargelegt, wie das Konzept konkret entwickelt und anschliessend validiert wurde. Der Fokus der Untersuchung liegt auf der semantischen Integration von IFC-Daten und Sensordaten sowie deren Verknüpfung in einem RDF-basierten Graphenmodell.

Die Integration von Temperaturmesswerten und Materialinformationen mit entsprechenden ontologischen Eigenschaften wird im Anhang detailliert dokumentiert.

### 5.1 Grobkonzept OK

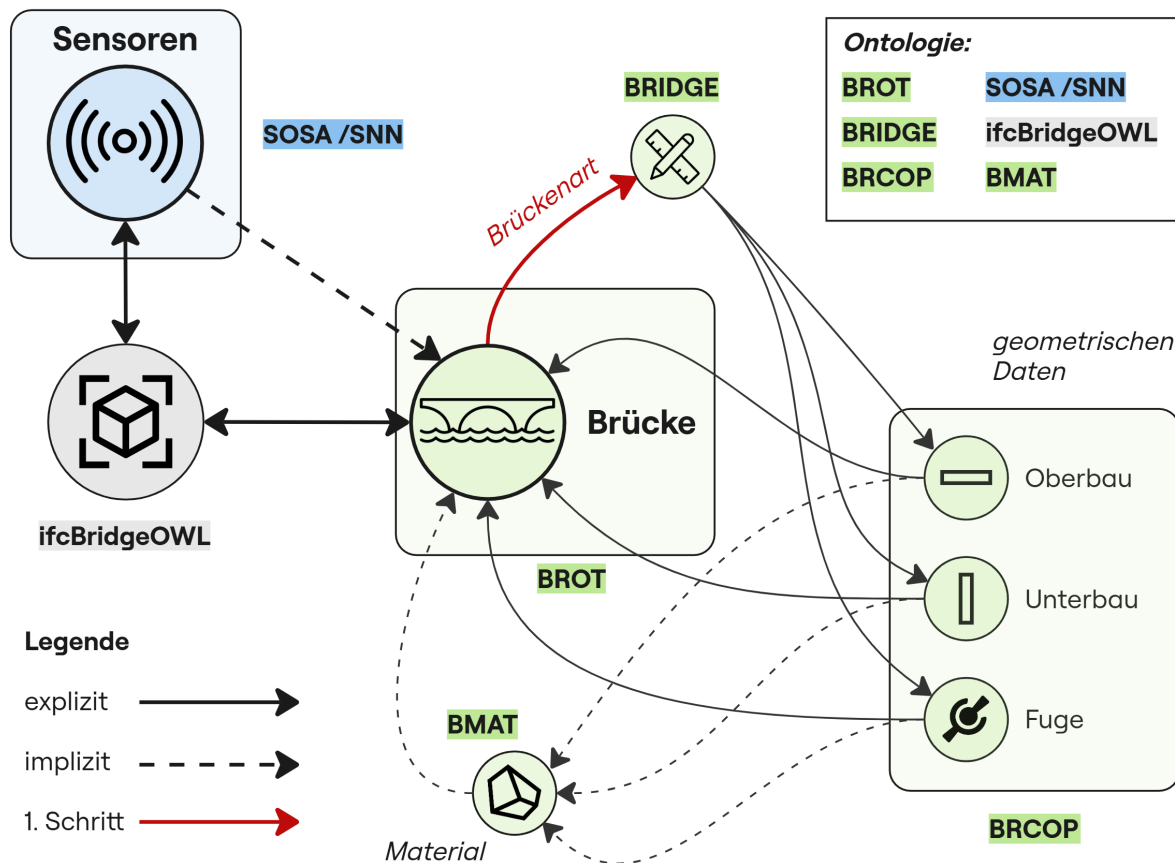


Abb. 41 : semantisches Grobkonzept des Digitalen Zwillings

Im Fokus steht das Brückenobjekt, das durch unterschiedliche Ontologien beschrieben wird und als Knotenpunkt für geometrische (und Material-) Daten fungiert.

Die geometrischen Komponenten werden mittels IFC-Instanzen über die Ontologie ifcBridgeOWL semantisch beschrieben. Diese Elemente sind wiederum mit den Ontologien BROT, BRIDGE und BRCOP verknüpft, um strukturelle, klassifikatorische und komponentenbezogene Informationen formal darzustellen.

Der spezifische Brückentyp wird dabei durch die Ontologie BRIDGE definiert (siehe roter Pfeil als erster Schritt), während die Integration von Materialinformationen durch BMAT erfolgt.

Die Modellierung der Sensordaten erfolgt über die Ontologien SOSA/SSN, wobei eine Verknüpfung mit den entsprechenden Brückenkomponenten stattfindet.

Die Darstellung differenziert zwischen expliziten (durchgezogenen Linien) und impliziten (gestrichelten Linien) semantischen Beziehungen und demonstriert die modulare Erweiterbarkeit des Systems.

## 5.2 IFC für Brücke

IFC-Schema 4.3 stellt das Konzept der *Spatial Breakdown Structure* (SBS) vor, um die Modellierung verschiedener Arten von Bauwerken (Gebäude, Strassen, Brücken usw.) zu ermöglichen (Domer et al., 2024).

Dies ist insbesondere für Tiefbauwerke wie Brücken und Strassen von signifikanter Relevanz, da jedes Bauwerk eine divergierende Modellierungsstruktur (siehe Kap. 5.2.1) und infolgedessen eine disparate Organisationslogik aufweist.

In dieser hierarchischen Struktur befindet sich an der Spitze *IfcProject* und darunter *IfcSite*, mit dem die Lage der Bauwerke definiert wird. Es kann mehrere *IfcSite* geben, so dass mehrere Bauwerke, wie in unserem Anwendungsfall (Brücke und Autobahn), auf unterschiedliche Weise referenziert werden können.

Unterhalb von *IfcSite* finden sich *IfcFacility*, das zur Darstellung von Bauwerkstypen dient, wobei eine Unterklasse verwendet wird: *IfcBuilding*, *IfcBridge*, *IfcRoad*, *IfcRailway* und *IfcMarineFacility* (Domer et al., 2024).

Weiter unten kann *IfcFacility* in mehrere Teile unterteilt werden, in *IfcFacilityPart* und wiederum in die entsprechenden Unterklassen, z.B. *IfcBridgePart*. Ein generisches Teil kann auch durch die Verwendung von *IfcFacilityPartCommon* modelliert werden.

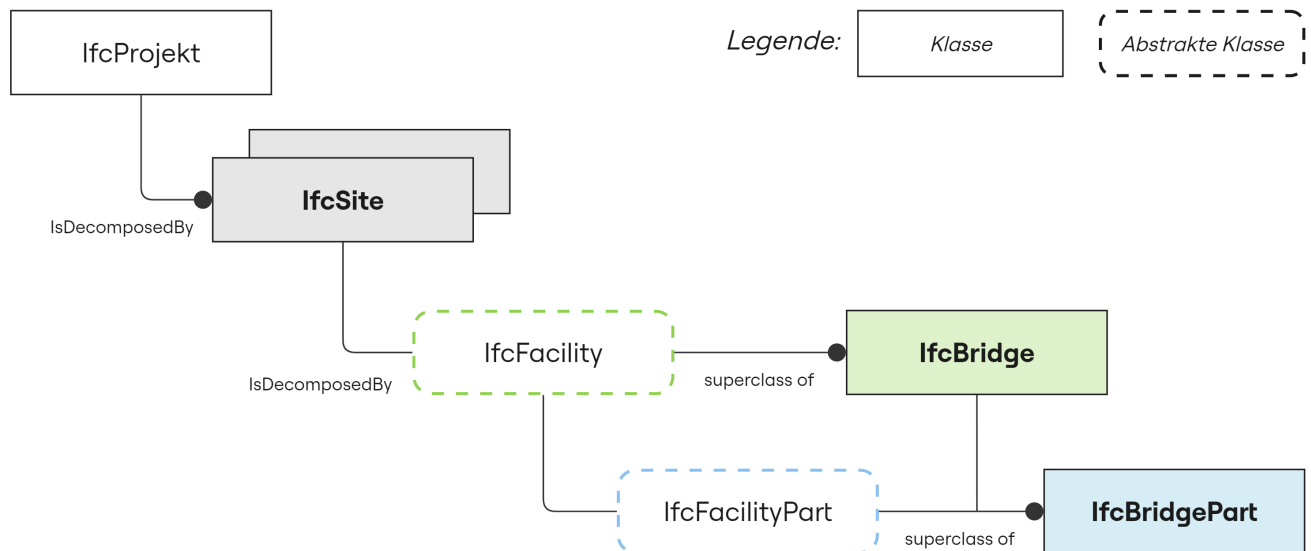


Abb. 42 : Allgemeine Ebene der Breakdown-Struktur im IFC-Schema

Die Klasse weist das Attribut *PredefinedType* für die Typisierung auf und zusätzlich das Attribut *UsageType*, welches die funktionale Rolle des Elements definiert.

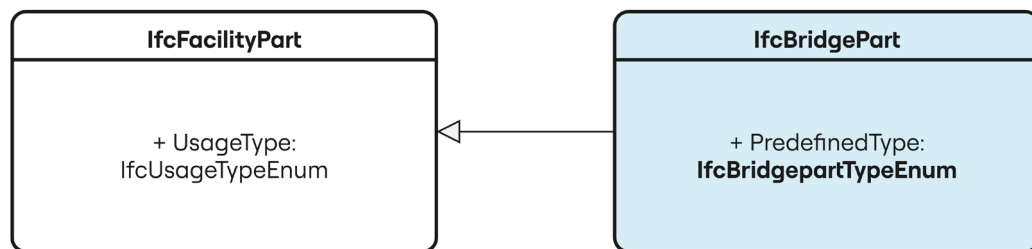


Abb. 43 : Spezialisierung von *IfcFacilityPart* für Brückenkomponenten

Die vorliegende Typisierung ist eine unabdingbare Voraussetzung, um eine präzise Definition der Brückenkomponenten zu gewährleisten.

### 5.2.1 IFC-Logik für Brücke

Bevor das IFC-Schema für das zukünftige Mapping analysiert wird, muss zunächst die Entwurfslogik einer Brücke erläutert werden, um besser zu verstehen, wie das IFC-Schema entworfen wird. Der Entwurfsansatz basiert auf dem Pfad (*path*) und im Detail auf der Ausrichtung (*alignment*) in der Horizontalen und dann auf den Lasten (*loads*) und Brückenelementen in der Vertikalen (Domer et al., 2024).

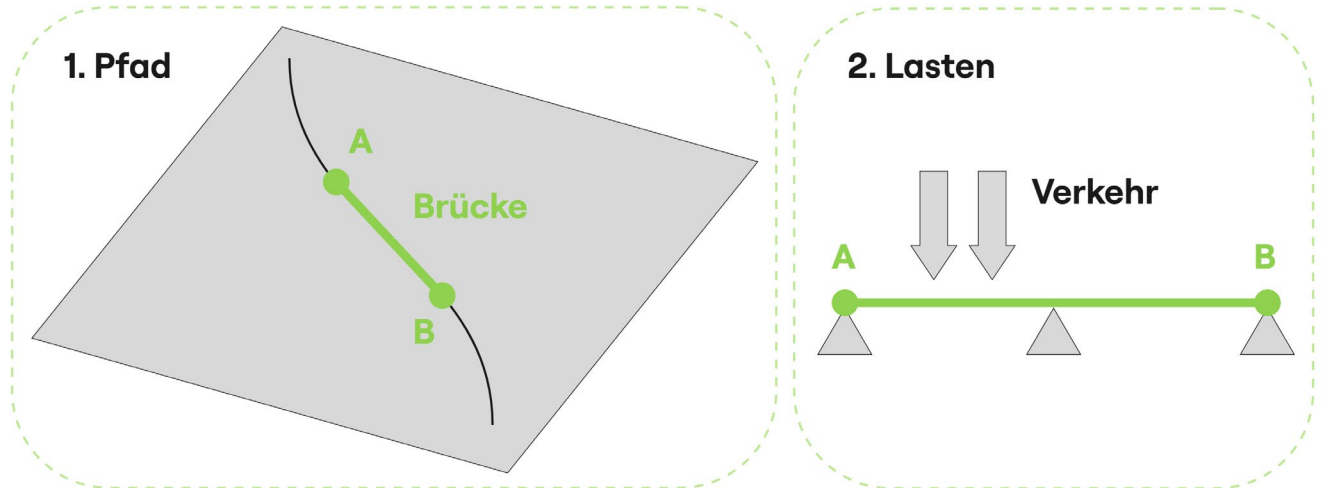


Abb. 44 : Entwurfslogiken für eine Brücke

In der Abb. 44 werden diese zwei Entwurfslogiken dargestellt, wobei die grüne Ausrichtung die Bezugsachse darstellt und die Brücke als Verbindung zwischen zwei Punkten beschrieben wird. Im IFC-Schema wird es durch *IfcAlignment* identifiziert, was ihre Position in Bezug auf den Hauptweg definiert und die Grundlage für die Planung der strukturellen Elemente der Brücke bildet. Dies umfasst das entsprechende statische System und die entsprechende Brückenart (siehe Kap. 5.2.2).

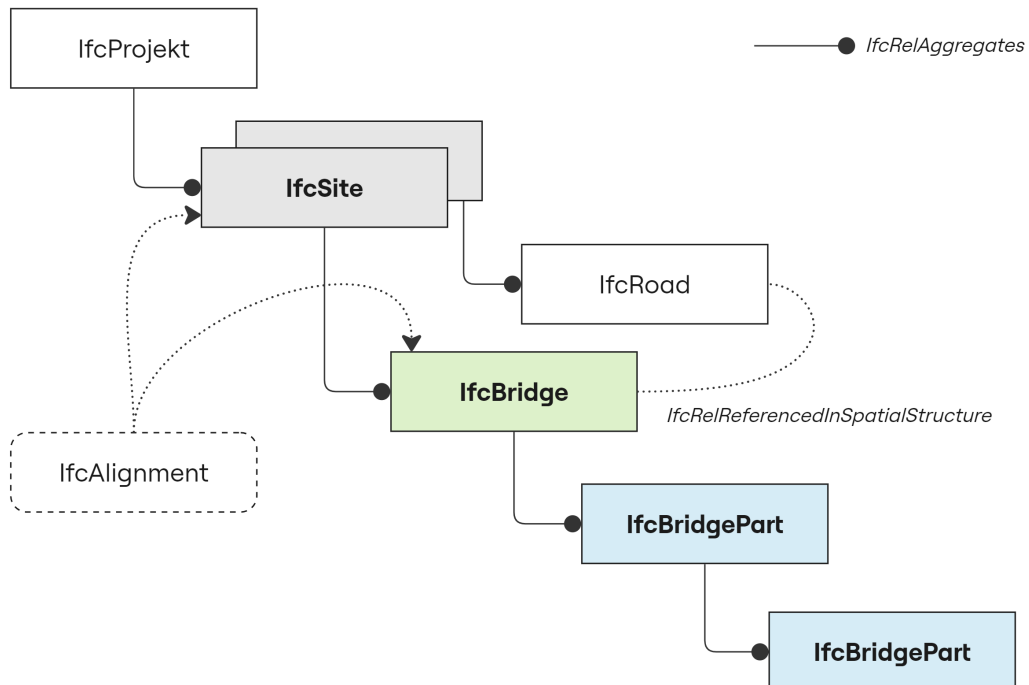


Abb. 45 : Allgemeiner Strukturbaum einer Brücke (eigene Darstellung)

*IfcBridgePart* ist eine allgemeine Entität zur Darstellung von Teilen einer Brücke. Das Attribut *PredefinedType* (vom Typ *IfcBridgePartTypeEnum*) definiert die spezifische Kategorie von *IfcBridgePart* (z.B. SUPERSTRUCTURE, SUBSTRUCTURE usw.). Der Wert von *PredefinedType* erzeugt keine Unterklasse von *IfcBridgePart*, sondern ist ein Attribut, das jeder Instanz von *IfcBridgePart* zugewiesen wird.

## 5.2.2 Brückenarten

Die zweite Entwurfslogik fokussiert sich auf die Definition des statischen Systems der Konstruktion und insbesondere auf die Art der Brücke. Es existieren zahlreiche Brückenarten, die jeweils spezifische Konstruktionsmerkmale und strukturelle Eigenschaften aufweisen.

Im Rahmen der Vorlesung «*Bridge Design*» an der ETH (Kaufmann, 2025a) erfolgt eine Klassifizierung von Brücken nach ihrer primären Konstruktionsart. Die spezifische Brückenart hat signifikante Auswirkungen auf die Kraftverteilung, die Materialwahl sowie die Bauweise und Instandhaltung.

Im Rahmen der Informationsmodellierung gemäss dem Standard IFC 4.3 kommt der Klassifizierung der Brückenarten eine zentrale Bedeutung zu. Diese wird formal über das Attribut *PredefinedType* der Entität *IfcBridge* zugewiesen, wobei das Attribut *IfcBridgeTypeEnum* zur standardisierten Identifizierung der Brückenart verwendet wird.

Diese Definition ist essenziell, um die semantische Konsistenz in BIM-Modellen zu gewährleisten und die Interoperabilität mit Strukturontologien wie BROT (Hamdan & Scherer, 2020) zu unterstützen, die für die Erstellung eines auf LD-basierenden digitalen Zwillings erforderlich sind.

Tab. 14 : Brückenarten nach *IfcBridgeTypeEnum*

	Brückenarten <i>PredefinedType</i>	Auf Deutsch	Beschreibung nach (IFC 4X3_ADD2, 2025b) und (Kaufmann, 2025a)
1	ARCHED	<i>Bogenbrücke</i>	Brücke, deren Fahrbahn von einem oder mehreren Bögen getragen wird.
2	CABLE_STAYED	<i>Schrägseilbrücke</i>	Die Fahrbahnplatte wird von an Masten (Stützen) verankerten schräggestellten Seilen getragen.
3	CANTILEVER	<i>Kragträgerbrücke</i>	Die Tragwerke bestehen aus Kragarmen, die oft symmetrisch von den Pfeilern getragen werden.
4	CULVERT	<i>Durchlass</i>	Kleines Bauwerk, das den Durchfluss von Wasser unter einer Strasse ermöglicht.
5	FRAMEWORK	<i>Rahmenbrücke</i>	Struktur aus monolithisch verbundenen starren Elementen, die auch Biegemomente übertragen können.
6	GIRDER	<i>Balkenbrücke</i>	<b>Brücke, bei der die Fahrbahn von Längsträgern getragen wird.</b>
7	SUSPENSION	<i>Hängebrücke</i>	Die Fahrbahnplatte ist an Hauptseilen aufgehängt, die zwischen den Pylonen gespannt sind.
8	TRUSS	<i>Fachwerkbrücke</i>	Das Tragwerk besteht aus miteinander verbundenen Stäben, die ein dreieckiges Fachwerk bilden.
9	NOTDEFINED	<i>Nicht definiert</i>	Im IFC-Modell ist keine Typologie angegeben.
10	(USERDEFINED) z.B. SLAB	<i>(Benutzerdefiniert) Plattenbrücke</i>	Nicht vordefinierter Typ der Benutzer kann z.B. eine Plattenbrücke angeben, bei der die Platte als Tragwerk dient.

Die Modellierung der Fallstudie erfolgte als Balkenbrücke (*IfcBridgeTypeEnum* = *GIRDER*), da der untersuchte Brückentyp auf Längsträgern basiert, die die Fahrbahn tragen.

Die vorliegende konzeptionelle Grundlage der Brücke bildet die Basis für die nachfolgenden Kapitel, in denen die Rolle des *IfcBridge*-Schemas bei der formalen Definition dieses DTs einer vertieften Betrachtung unterzogen wird.

### 5.2.3 IFC-Schemamodell

Nach erfolgter formaler Typisierung der Brücke als Balkenbrücke (*IfcBridgeTypeEnum = GIRDER*) und Erläuterung der Logik einer Brücke (Kap. 5.2.1) besteht der nächste Schritt in der konkreten Umsetzung des Brückenmodells im IFC-Schema.

*IfcBridge* stellt dabei das Hauptelement dar und ist eine hierarchische Aggregation über *IfcBridgePart*, wobei jede Teilkomponente mit einem vordefinierten Typ (beispielsweise *SUPERSTRUCTURE*, *SUBSTRUCTURE*, *DECK*) versehen ist. Die Kardinalitäten und Beziehungen zwischen den Komponenten sind in Abb. 46 dargestellt.

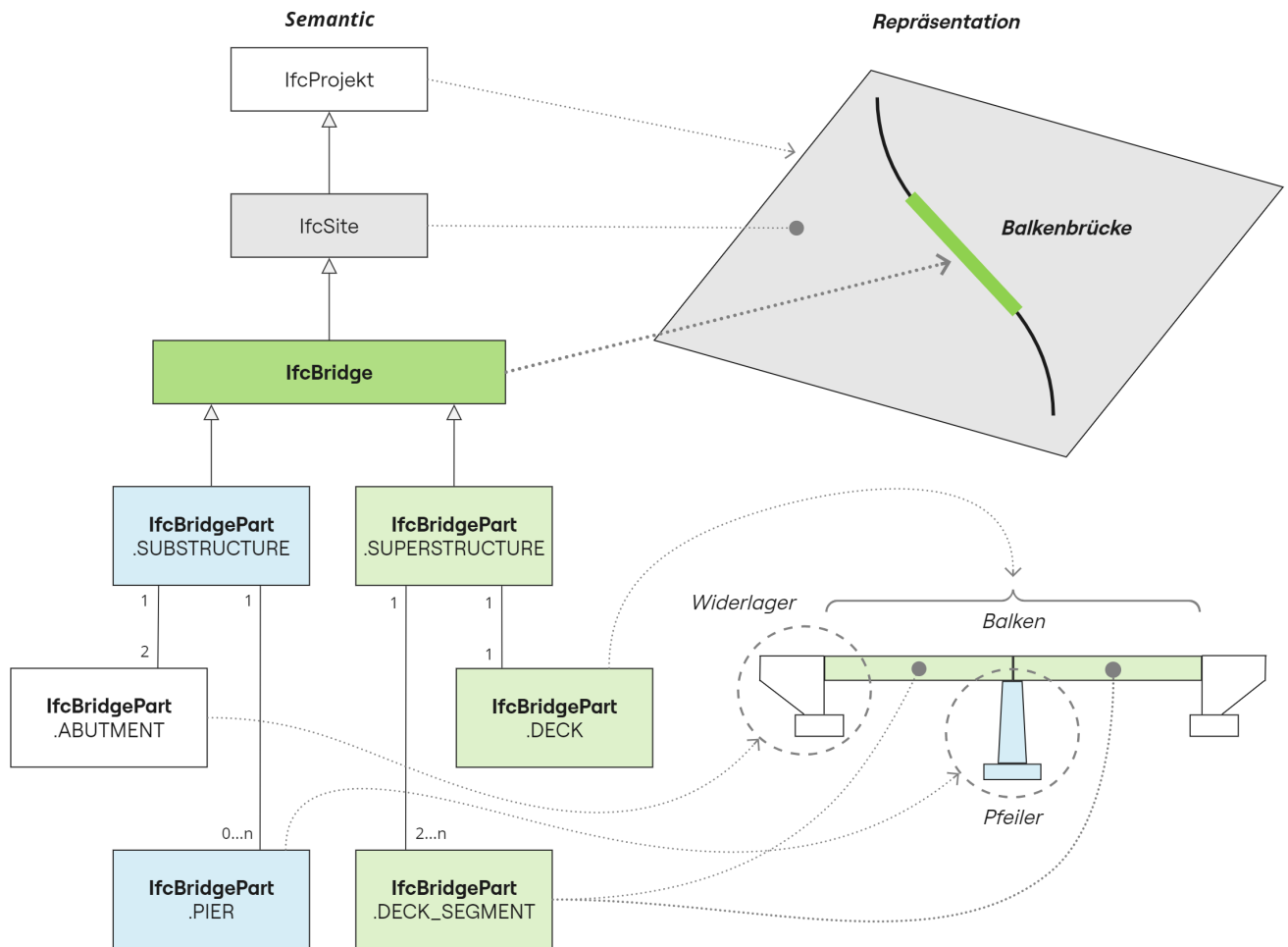


Abb. 46 : Strukturbaum einer Balkenbrücke mit Kardinalität

Für die Modellierung wurden die Hauptkomponenten der Brücke mit den entsprechenden PredefinedType-Werten dargestellt.

*IfcBridgePart.SUPERSTRUCTURE* steht für die tragenden Balkenelemente, wobei *IfcBridgePart.DECK* für die Fahrbahnplatte. *IfcBridgePart.SUBSTRUCTURE* umfasst die Pfeiler und Fundamente, *IfcBridgePart.PIER* beschreibt die Stützkonstruktionen zwischen Über- und Unterbau, *IfcBridgePart.DECK\_SEGMENT* ermöglicht die detaillierte Darstellung der Deckenabschnitte und *IfcBridgePart.ABUTMENT* modelliert die Widerlager.

Aufgrund der differenzierten Struktur ist es möglich, die Brücke im IFC-Modell sowohl geometrisch (Repräsentation) als auch semantisch präzise darzustellen.

In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 47 und Abb. 48 werden die modellierten Komponenten visuell dargestellt, jeweils mit dem zugewiesenen *PredefinedType*.

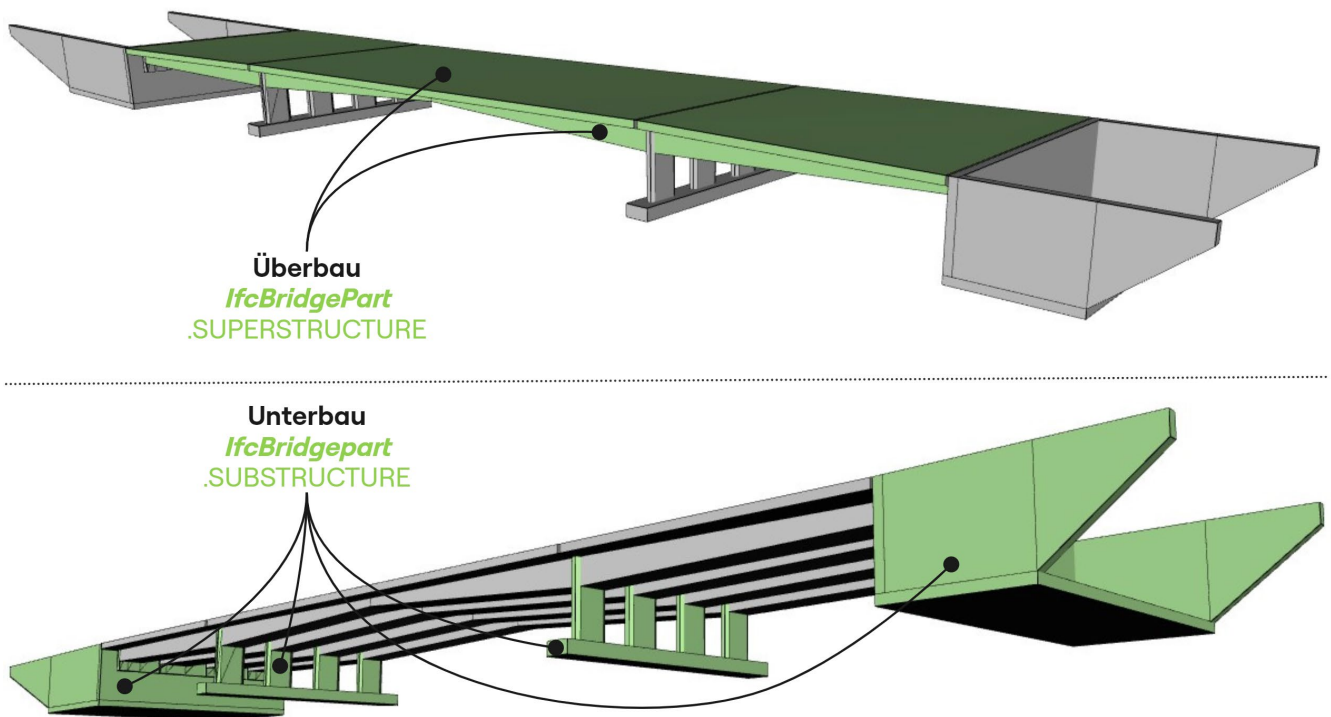


Abb. 47 : Visuelle Darstellung der funktionalen Hauptgliederung

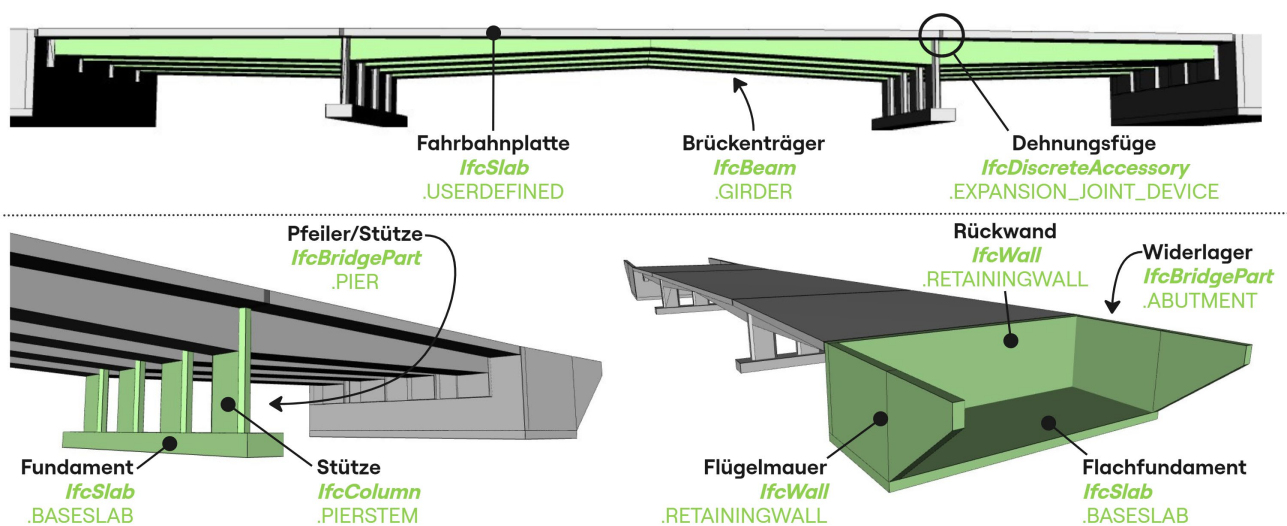


Abb. 48 : Visuelle Darstellung der Komponenten der Brücke

In der Abb. 49 wird das IFC-Modell dargestellt, welches sämtliche verwendeten *IfcBridgePart*-Instanzen in ihrer finalen Form zeigt.

Diese Modellstruktur bildet die Grundlage für die anschließende semantische Abbildung (*Mapping*) mit Ontologien im folgenden Kapitel.

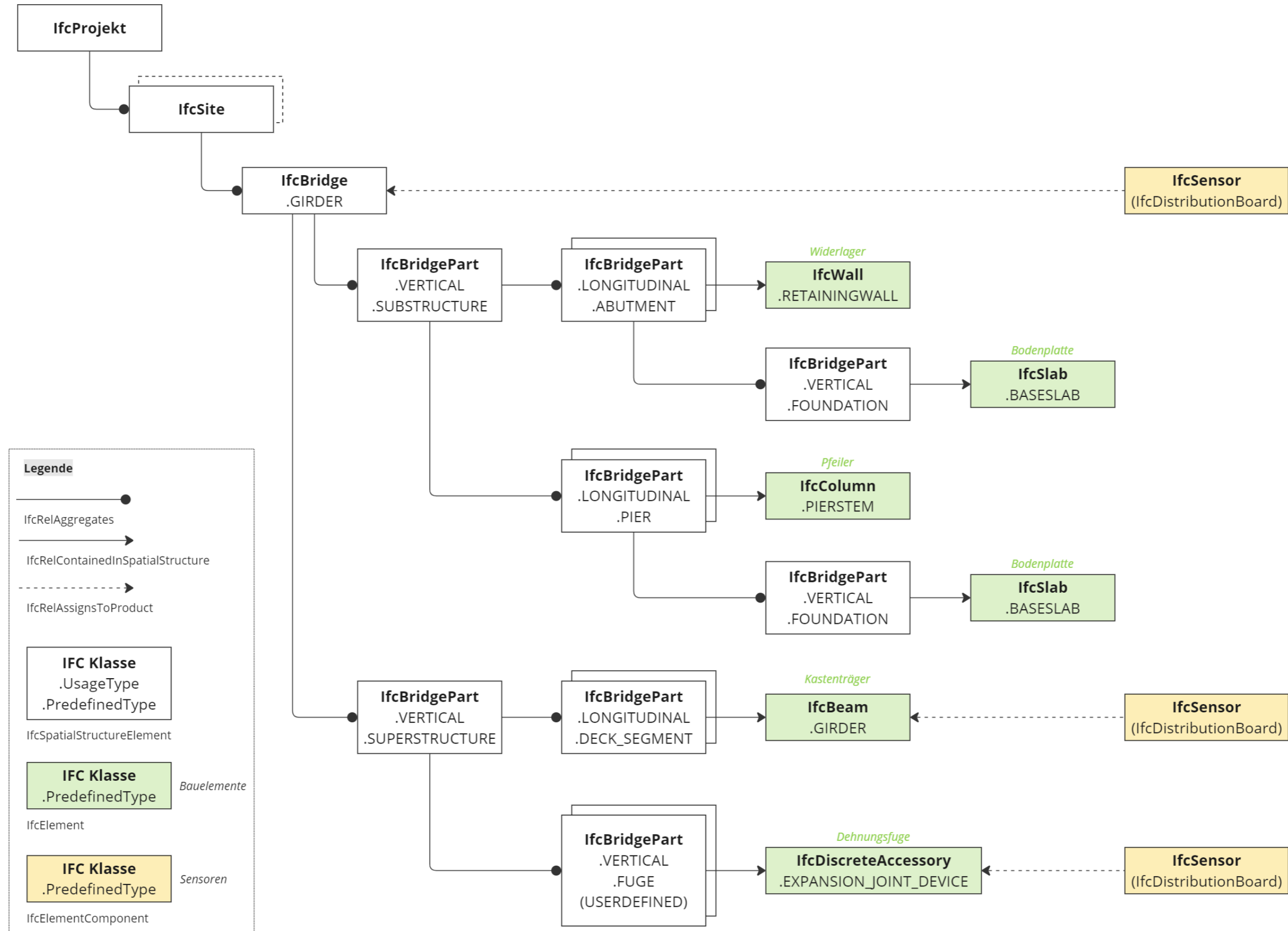


Abb. 49 : Schemamodell der IFC-File

### 5.3 Mapping IFC-BROT

In diesem Kapitel wird die Mapping zwischen IFC 4.3 (IFC 4X3\_ADD2, 2025a) und dem modularen Framework BROT (Hamdan & Scherer, 2020) präsentiert. Das Ziel besteht darin, die geometrischen und semantischen Informationen des IFC-Modells in eine ontologische Darstellung in RDF umzuwandeln, um eine Durchsuchbarkeit in einem auf einer Graphdatenbank basierenden System zu ermöglichen.

Die folgenden Unterkapitel präsentieren zunächst die Struktur der verwendeten Ontologien und beschreiben anschliessend die konkrete Logik der Mapping und deren Umsetzung für Schlüsselemente, wie beispielsweise Dehnungsfugen. Für dieses Mapping wurden zwei Hauptontologien ausgewählt: BROT (Hamdan & Kozak, 2022) und BRCOMP (Hamdan & Kozak, 2020a).

Während die BROT-Ontologie zur Beschreibung des allgemeinen Brückenkonzepts und seiner Komponenten verwendet wird, spezifiziert die BRCOMP-Ontologie detailliert die einzelnen Strukturelemente der Brücke, wobei ein ähnlicher Ansatz wie bei *IfcBridgePart* in IFC 4.3 zu beobachten ist.

#### 5.3.1 BROT-Framework

Die Bridge Topology Ontology (BROT) wurde konzipiert, um die strukturellen und topologischen Merkmale von Brücken in einem semantischen Kontext darzustellen.

Die vorliegende Ontologie stellt eine Erweiterung der allgemeineren Building Topology Ontology-BOT (Rasmussen et al., 2021) dar. Sie definiert grundlegende Klassen wie *brt:Bridge*, *brt:SpatialZone* und *brt:Components* sowie die Beziehungen zwischen ihnen, beispielsweise *brt:hasComponent*.

Zur Vervollständigung wird das (Ontologie-)Modul BRCOMP (*Bridge Components Ontology*) verwendet, das auf BROT basiert und weitere Details zur Struktur der Komponenten liefert. Die Brückenelemente werden in *brcomp:SuperstructureComponent* und *brcomp:SubstructureComponent* unterteilt.

Es sei darauf hingewiesen, dass weitere spezifische Komponenten wie Verbindungen (*brcomp:Joint*) durch eigene Unterklassen beschrieben werden.

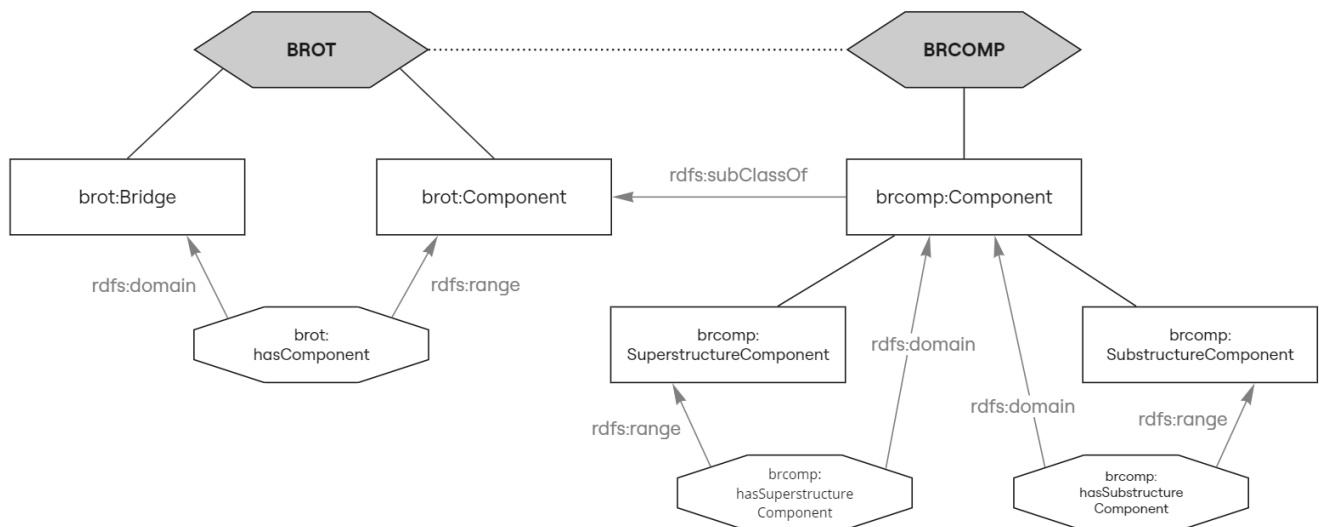


Abb. 50 : Ontologische Struktur BROT-BRCOMP mit RDF – Beziehungen

Die allgemeine BROT/BRCOMP-Struktur mit RDF-Beziehungen für das Mapping von IFC 4.3 ist in der Abb. 50 oben dargestellt.

BROT enthält die Klassen *brt:Bridge*, die die Brücke modelliert, und *brt:Component*, die eine generische Komponente der Brücke repräsentiert.

Die Objekteigenschaft *brt:hasComponent* verbindet die beiden Klassen und gibt über *rdfs:domain* an, dass das Objekt eine Brücke ist und über *rdfs:range*, dass das Objekt eine Komponente (der Brücke) ist.

Mit BRCOMP kann BROT erweitert werden, um die spezifischeren Komponenten der Brücke zu modellieren. Insbesondere über die Relation *rdfs:subClassOf* wird *brcomp:Component* mit *brrot:Component* verbunden, das die Eigenschaften von *brcomp:Component* erbt. Diese Klasse enthält zwei Klassen: *brcomp:SuperstructureComponent*, die die Komponenten des Überbaus repräsentiert, und *brcomp:SubstructureComponent*, die die Komponenten des Unterbaus repräsentiert.

Die semantische Vererbung von *brcomp:Component* ermöglicht den direkten Verweis von Überbau- und Unterbaukomponenten auf *brrot:Component* über *rdfs:subClassOf*:

```
brcomp:SuperstructureComponent rdfs:subClassOf brrot:Component
brcomp:SubstructureComponent rdfs:subClassOf brrot:Component
```

turtle

Zur besseren Definition der Beziehung zwischen der Brücke und ihren Komponenten können zwei spezifische Eigenschaften für den Überbau und den Unterbau hinzugefügt werden:

```
brrot:hasSuperstructureComponent rdfs:subPropertyOf brrot:hasComponent
brrot:hasSubstructureComponent rdfs:subPropertyOf brrot:hasComponent
```

turtle

Aufgrund dieser spezifischen Eigenschaften erfolgt die direkte Verbindung von *brrot:Bridge* mit den BRCOMP-Komponenten:

```
brrot:Bridge brrot:hasSuperstructureComponent brcomp:SuperstructureComponent
brrot:Bridge brrot:hasSubstructureComponent brcomp:SubstructureComponent
```

turtle

### 5.3.2 Logik des Mappings zu IFC

Die vorliegende Mapping zwischen IFC 4.3 und BROT dient der Übertragung der in einem IFC-Modell enthaltenen Informationen in ein RDF-basiertes Modell.

Die Grundlage bildet die Zuordnung semantisch äquivalenter Konzepte zwischen den IFC-Klassen und den in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Klassen der Ontologien BROT und BRCOMP.

Unter Verwendung der ontologischen Struktur (Abb. 50) und dieser neuen Eigenschaften wird das grundlegende Mapping mit IFC 4.3 (Abb. 51) durchgeführt.

Die blaue Pfeilrichtung zeigt dabei an, dass *brrot:Bridge* mit *IfcBridge* verknüpft ist bzw. *brrot:Component* mit *IfcBridgePart*.

Die grüne Pfeilrichtung zeigt an, dass *brcomp:Superstructure* mit *IfcBridgePart.PredefinedType = SUPERSTRUCTURE* verbunden ist bzw. *brcomp:Substructure* mit *IfcBridgePart.PredefinedType = SUBSTRUCTURE*.

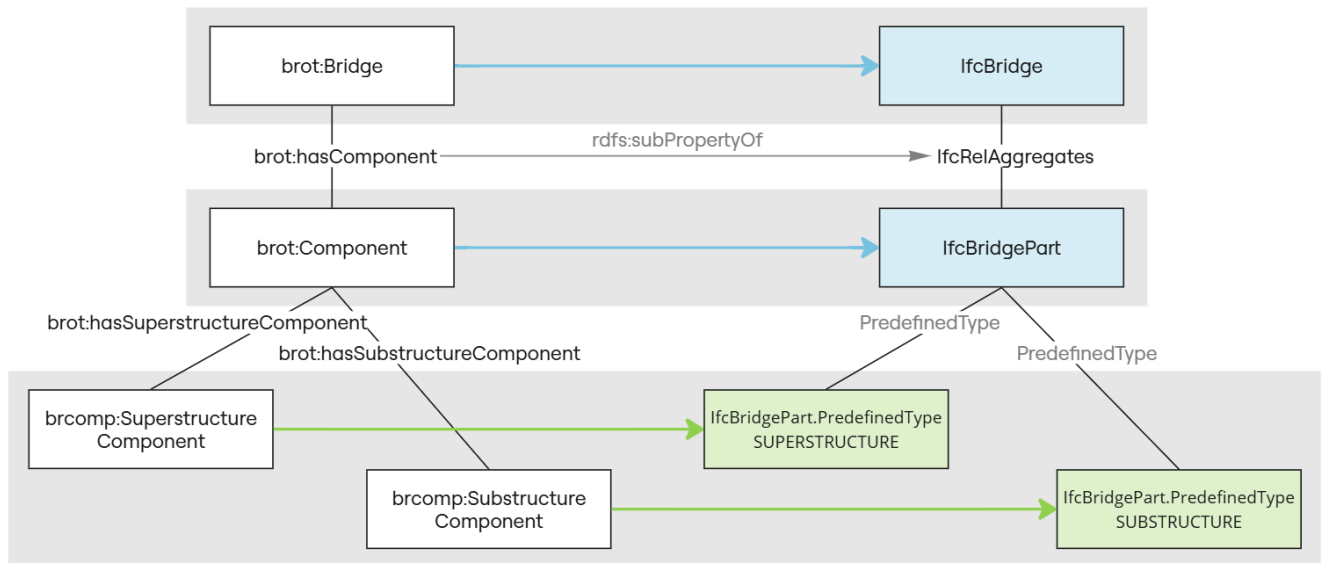


Abb. 51 : Basismapping zwischen BROT und IFC 4.3

In der aktuellen Version von IFC 4.3 wird *IfcBridge* über *IfcRelAggregates* mit *IfcBridgePart* verbunden. Um diese Logik in RDF beizubehalten, wird eine zusätzliche spezifische Eigenschaft definiert, die darauf hinweist, dass *brot:hasComponent* eine semantische Abbildung (erbt das Verhalten) von *IfcRelAggregates* ist. *brot:hasComponent* wird somit zu einer Untereigenschaft von *IfcRelAggregates*:

```

brot:Bridge brot:hasComponent brot:Component
brot:hasComponent rdfs:subPropertyOf ifcBridgeOWL:IfcRelAggregates
  
```

turtle

In BROT-Ontologie ist die Komponenten explizit in Unterklassen angeordnet, während sie in IFC 4.3 in *IfcBridgePart* als Attribut *PredefinedType* klassifiziert sind.

Die ursprüngliche Variante des Mappings sah vor, *IfcBridgePart.PredefinedType* über *rdfs:subClassOf* zu einer Unterklasse von *IfcBridgePart* zu machen. Um jedoch die Logik von IFC 4.3 konzeptionell nicht zu verändern, wurde beschlossen, *PredefinedType* auch in RDF als Eigenschaft zu belassen (*owl:ObjectProperty*):

```

ex:bridgePart1 a ifcBridgeOWL:IfcBridgepart ;
  ifcBridgeOWL:PredefinedType ifcBridgeOWL:SUPERSTRUCTURE

ex:bridgePart2 a ifcBridgeOWL:IfcBridgepart ;
  ifcBridgeOWL:PredefinedType ifcBridgeOWL:SUBSTRUCTURE
  
```

turtle

wobei *ex:bridgePart1* und *ex:bridgePart2* spezifische Instanzen eines hypothetischen Modells sind.

Dieser Ansatz ermöglicht die Vermeidung von Starrheit im RDF-Modell für das spätere Mapping. So kann beispielsweise ein neuer Wert (*IfcBridgePartTypeEnum = DECK*) einfach eingeführt werden. Während Instanzen von *IfcBridgePart* in SPARQL-Abfragen einfacher abgefragt werden können (ist dies auf ihre hierarchische Struktur ohne Unterklassen zurückzuführen).

### 5.3.3 Integration Dehnungsfuge

In diesem Kapitel wird dargelegt, wie die Komponenten einer Brücke, insbesondere die Dehnungsfuge, semantisch modelliert und für das RDF-Mapping zwischen IFC 4.3 und dem BROT-Framework abgebildet werden.

Das Ziel besteht darin, eine einheitliche Grundlage für die weitere Entwicklung der Ontologie ifcBridge-OWL (siehe Kap. 5.5) zu schaffen.

In der ontologischen Spezifikation von BROT wird eine Fuge (*brot:Joint*) beschrieben als: ein gewünschter oder toleranzbedingter Spalt oder Raum zwischen zwei Teilen oder Komponenten (Hamdan & Kozak, 2022).

Gemäss dieser Definition kann eine Fuge nicht separat behandelt werden, sondern soll Eigenschaften von *brot:Component* erben, da sie selbst eine Komponente ist.

Man kann also sagen, dass *brot:Joint* eine Unterklasse von *brot:Component* ist:

```
brot:Joint rdfs:subClassOf brot:Component
```

turtle

Gemäss dieser Argumentation besteht die Möglichkeit, ein «*Joint*» mit den verschiedenen Komponenten der Brücke als Über- oder Unterbau zu verbinden.

Dabei ist es essenziell, die semantische Hierarchie in den Beziehungen beizubehalten. Demnach ist *brot:hasJoint* eine Untereigenschaft von *brot:hasComponent*.

```
brot:hasJoint rdfs:subPropertyOf brot:hasComponent
brcomp:SuperstructureComponent brot:hasJoint brot:Joint
brcomp:SubstructureComponent brot:hasJoint brot:Joint
```

turtle

Des Weiteren verfügt BRCOMP über spezifische Fugen, mittels derer das RDF-Modell angereichert werden kann: *brcomp:ConstructionJoint* und *brcomp:ExpansionJoint*.

Diese können über *rdfs:subClassOf* als Unterkategorien von *brot:Joint* betrachtet werden.

```
brcomp:ConstructionJoint rdfs:subClassOf brot:Joint
brcomp:ExpansionJoint rdfs:subClassOf brot:Joint
```

turtle

Eine theoretisch fundierte Unterscheidung zwischen Fuge des Überbaus und denen des Unterbaus könnte das semantische Schema präzisieren.

In diesem Anwendungsfall erweist sich diese Differenzierung jedoch als nicht notwendig.

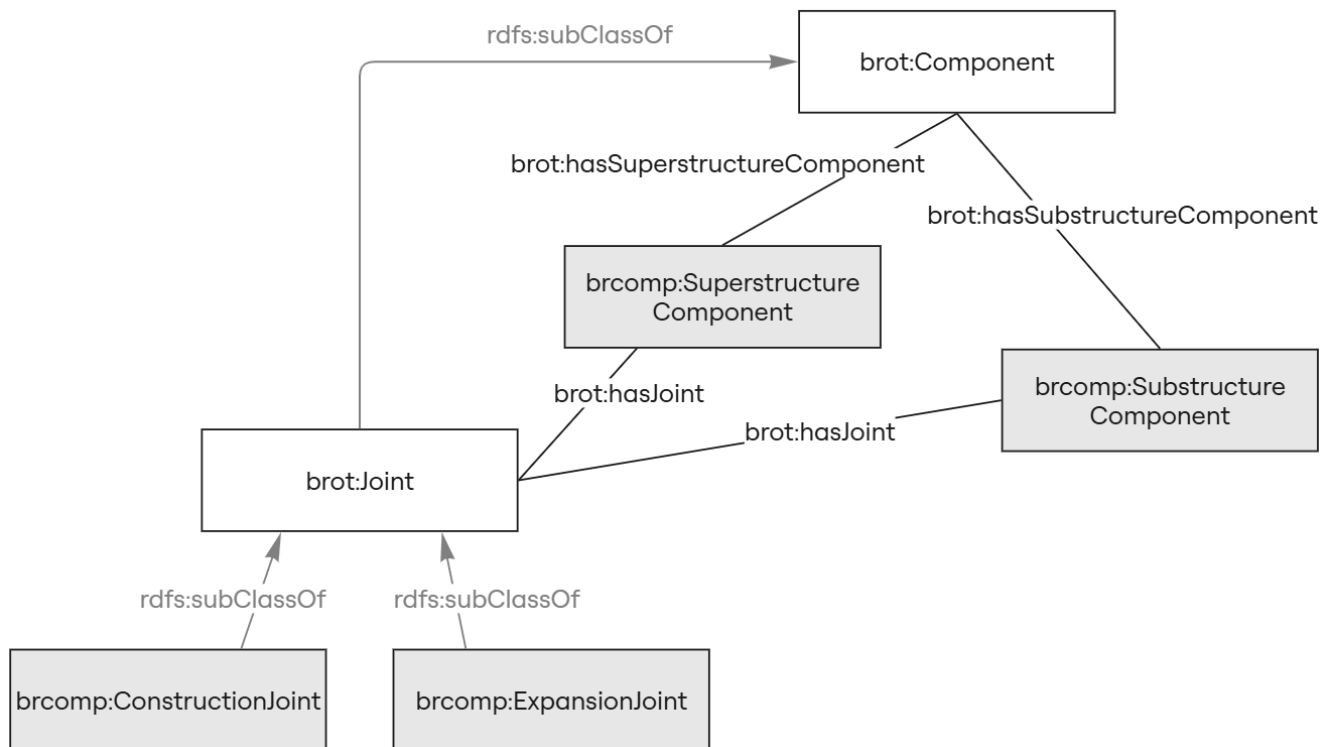


Abb. 52 : Ontologische Struktur BROT-BRCOMP mit Fugenklasse

Gemäss (Domer et al., 2024) kann eine Dehnungsfuge als *IfcDiscreteAccessory* mit *PredefinedType = EXPANSION\_JOINT\_DEVICE* beschrieben werden, sodass eine direkte Abbildung mit *brcomp:ExpansionJoint* möglich ist.

Für die Modellierung von normalen Fugen, die als Elementbaugruppen dargestellt werden können, empfehlen (Domer et al., 2024) die Verwendung von *IfcElementAssembly*. Demzufolge werden sowohl *brot:Joint* als auch *brcomp:ConstructionJoint* (was für den Anwendungsfall von untergeordneter Bedeutung ist) als *IfcElementAssembly* abgebildet.

```

brot:Joint rdfs:subClassOf ifcBridgeOWL:IfcElementAssembly .
brcomp:ExpansionJoint rdfs:subClassOf ifcBridgeOWL:IfcDiscreteAssembly ;
  ifcBridgeOWL:PredefinedType ifcBridgeOWL:EXPANSION_JOINT_DEVICE .
brcomp:ConstructionJoint rdfs:subClassOf ifcBridgeOWL:IfcElementAssembly .
  
```

Gemäss der ontologischen Struktur der BROT/BRCOMP (Abb. 52) können die Überbaustruktur und die Unterbaustruktur *brot:hasJoint* Verbindungen aufweisen. Daher ist eine Verbindung von *IfcRelAggregates* mit dem IFC-Schema erforderlich, um diese Beziehung zu gewährleisten:

```

brcomp:SuperstructureComponent brot:hasJoint brot:Joint .
brcomp:SubstructureComponent brot:hasJoint brot:Joint .

brcomp:SuperstructureComponent ifcBridgeOWL:IfcRelAggregates ifcBridgeOWL:IfcElementAssembly .
brcomp:SubstructureComponent ifcBridgeOWL:IfcRelAggregates ifcBridgeOWL:IfcElementAssembly .
  
```

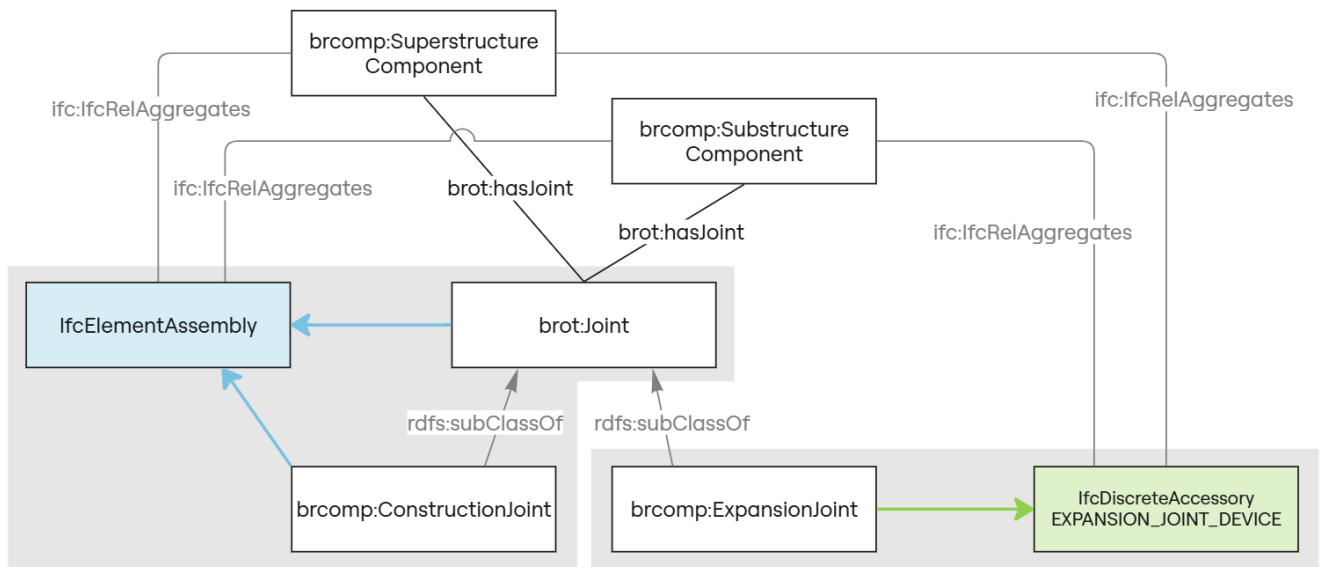


Abb. 53 : Mapping von Fugen zwischen IFC 4.3 und BROT-BRCOMP

Es muss angegeben werden, da es in Abb. 53 nicht vorhanden ist, aber im IFC 4.3 Schema ist *IfcElementAssembly* mit *IfcDiscreteAssembly* über *IfcRelAggregates* verbunden.

### 5.3.4 Integration weiter Brückenkomponenten

Für eine vollständige semantische Mapping müssen neben den Dehnungsfugen auch die anderen Komponenten der Brücke, d. h. die tatsächliche Geometrie, berücksichtigt werden. Die nachfolgend beschriebenen Elemente wurden anhand der zuvor erstellten IFC-Basisdatei (siehe Abb. 49) identifiziert und mit IFC 4.3 sowie den Ontologien BROT und BRCOMP abgeglichen. Die semantische Beschreibung dieser Bauelemente erfolgt über die Ontologie BRCOMP, die sich, anders als IFC 4.3, nicht auf *PredefinedType* stützt, sondern auf klar strukturierte Klassenhierarchien.

Es wurde die Entscheidung getroffen, die Klassenstruktur nicht in Form von *rdfs:subClassOf* auf *IfcBridgePart* zu erweitern, sondern die semantische Beschreibung vollständig über BRCOMP-Komponenten wiederzugeben.

Die Beziehungen zu übergeordneten Komponenten wurden mittels *brot:isPartOf* dargestellt. Dieser Ansatz ermöglicht Kohärenz, die mit der ursprünglichen Prämisse, bestehende Ontologien (in diesem Fall BROT) zu verwenden, im Einklang steht.

Tab. 15 : Mapping IFC 4.3 - BRCOMP

	Bauelemente	IFC-Klasse	BRCOMP-Klasse	Topologische Beziehung
1	Fahrbahnplatte	<i>IfcSlab: USERDEFINED</i>	brcomp:DeckComponent	brot:isPartOf ex:superstructure_1
2	Brückenträger	<i>IfcBeam: GIRDER</i>	brcomp:GirderComponent	brot:isPartOf ex:superstructure_1
3	Stütze	<i>IfcColumn: PIERSTEM</i>	brcomp:PierComponent	brot:isPartOf ex:substructure_1
4	Fundament	<i>IfcSlab: BASESLAB</i>	brcomp:BaseSlabComponent	brot:isPartOf ex:substructure_1
5	Wände	<i>IfcWall: RETAININGWALL</i>	brcomp:RetainingWallComponent	brot:isPartOf ex:substructure_1

Die als *IfcSlab* modellierte Fahrbahnplatte mit *PredefinedType = USERDEFINED* wird mit der Klasse *brcomp:DeckComponent* klassifiziert, um ihre funktionale Rolle im Überbau auszudrücken. Die Integration in die Brückenkonstruktion erfolgt mittels *brt:isPartOf*.

```
ex:deck_1 a ifc:IfcSlab , brcomp:DeckComponent ;
    ifc:PredefinedType ifc:USERDEFINED ;
    brt:isPartOf ex:superstructure_1 .
```

turtle

Der Brückenträger wurde im IFC-Modell mit *IfcBeam* mit dem vordefinierten Typ «*GIRDER*» dargestellt. Zur semantischen Beschreibung der tragenden Funktion im Überbau wurde die Instanz um *brcomp:GirderComponent* ergänzt.

```
ex:beam_1 a ifc:IfcBeam , brcomp:GirderComponent ;
    ifc:PredefinedType ifc:GIRDER ;
    brt:isPartOf ex:superstructure_1 .
```

turtle

Die Stützen wurden als *IfcColumn* mit dem vordefinierten Typ «*PIERSTEM*» modelliert. Zu diese Behufe wurde die Instanz um der Klasse «*brcomp:PierComponent*» erweitert und der Unterbau zugewiesen.

```
ex:column_1 a ifc:IfcColumn , brcomp:PierComponent ;
    ifc:PredefinedType ifc:PIERSTEM ;
    brt:isPartOf ex:substructure_1 .
```

turtle

Die Fundamentplatte wurde als *IfcSlab* mit *PredefinedType = BASESLAB* modelliert und ist funktional mit «*brcomp:BaseSlabComponent*» verbunden.

```
ex:base_slab_1 a ifc:IfcSlab , brcomp:BaseSlabComponent ;
    ifc:PredefinedType ifc:BASESLAB ;
    brt:isPartOf ex:substructure_1 .
```

turtle

Die Rückwand beziehungsweise Flügelwand wurde als *IfcWall* mit dem vordefinierten Typ «*RETAININGWALL*» modelliert.

Eine explizite Stütze im RDF-Modell ist nicht erwünscht, daher wurde sie direkt der Unterbau zugewiesen (*ex:substructure\_1*). Die Instanz wurde mit der eigens eingeführten Klasse *brcomp:RetainingWallComponent* typisiert.

```
ex:retaining_wall_1 a ifc:IfcWall , brcomp:RetainingWallComponent ;
    ifc:PredefinedType ifc:RETAININGWALL ;
    brt:isPartOf ex:substructure_1 .
```

turtle

## 5.4 Mapping IFC-Sensoren

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Sensordaten im IFC-Modell verknüpft wurden. Die allgemeinen Verkehrsdaten aus Kapitel 4.2 wurden bereits korrekt im RDF-Modell dargestellt, d.h. sie beziehen sich auf die gesamte Brücke (*ex:IcfBridge\_1*). Es ist daher nicht notwendig, in diesem Kapitel eine neue Beziehung zu erstellen.

Demgegenüber wurden die WIM- (Kap. 4.3) und Dehnungsdaten (Kap. 4.4) semantisch aktualisiert, sodass alle Beobachtungen auf *sosa:Observation* unter *ex:ExpansionJoint\_1* verweisen. Zur Optimierung der Lesbarkeit und Auffindbarkeit wurde ein neues Benennungsschema implementiert, um die SPARQL-Abfragen zu verbessern:

```
ex:Observation_<Typ>_<Datum>          z.B. ex:Observation_WIM_2025_03_14      turtle
```

Es sei darauf gewiesen, dass die Anmerkungen nicht unmittelbar in die IFC-Datei integriert werden, sondern dass die Verknüpfung über die gemeinsame URI von *ex:ExpansionJoint\_1* erfolgt. Die vorliegende Instanz repräsentiert eine Komponente vom Typ *IcfDiscreteAccessory* im IFC-Modell und wurde in RDF als *brcomp:ExpansionJoint* klassifiziert.

```
ex:ExpansionJoint_1 a ifc:IcfDiscreteAccessory , brcomp:ExpansionJoint      turtle
```

Die WIM-Daten wurden als einzelne Beobachtungen modelliert, die die maximale Achslast eines Fahrzeugs an einem bestimmten Tag erfassen (Anhang X.20).

Die vorliegenden Beobachtungen werden der Komponente *ex:ExpansionJoint\_1* zugeordnet, wodurch eine zukünftige Analyse der lokalen Belastungen (und des Verschleisses der Fuge) ermöglicht wird.

```
ex:Observation_WIM_2025_03_14 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:WIMStation_1 ;
  sosa:observedProperty ex:Achslast_1 ;
  sosa:result 9400 ;
  sosa:resultTime "2025-03-14"^^xsd:date .      turtle
```

Die synthetisch generierten Dehnungsdaten wurden analog zu den Beobachtungen modelliert und mit derselben Dehnungsfuge verknüpft (Anhang X.20).

Zu diesem Zweck wurde die beobachtete Eigenschaft «*ex:BridgeDisplacement*» herangezogen. Die vorliegende Kennung entspricht in diesem Fall dem standardisierten Schema:

```
ex:Observation_Displacement_2025_03_14 a sosa:Observation ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:result "5.04"^^xsd:decimal ;
  sosa:resultTime "2025-03-14"^^xsd:date ;
  sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor_100 .      turtle
```

## 5.5 ifcBridgeOWL

Die direkte Verwendung von ifcOWL (Pauwels & Terkaj, 2016), der offiziellen OWL-Darstellung des IFC-Schemas, erweist sich in vielen praktischen Fällen aufgrund ihrer Komplexität und Klassenredundanz als suboptimal (Pauwels et al., 2017).

Daher wurde ifcBridgeOWL entwickelt, eine reduzierte und schlanke Ontologie, die ausschliesslich die für den digitalen Zwilling relevanten Konzepte des IFC-Schemas übernimmt und sie mit den bestehenden Ontologien in Beziehung setzt. Dabei werden insbesondere die Konzepte (Semantik) gemäss dem aktuellen IFC4.3 (IFC 4X3\_ADD2, 2025a), wie im bSDD beschrieben, übernommen.

Das Ziel besteht darin, die semantische Interoperabilität (siehe auch Kap. 2.2.1) zu erhöhen, indem die Komplexität des Modells auf ein Minimum reduziert wird und bestehende Ontologien so weit wie möglich wiederverwendet werden (Konzept Wiederverwendung, Kap. X.5).

### 5.5.1 Klassenstrukturen

Die Ontologie basiert auf einem strukturierten Mapping-Ansatz zwischen IFC-Klassen und externen semantischen Konzepten (BROT und SOSA).

Im Rahmen der Analyse wurden zentrale Bauelemente des IFC-Schemas (siehe Kap. 5.3.2), wie *IfcBridgePart* und *IfcDiscreteAccessory*, untersucht und geeigneten Konzepten aus BRCOMP zugeordnet. Dieses konzeptionelle Mapping bildet die Grundlage für die Implementierung der Ontologie ifcBridgeOWL.

Zu diesem Zweck wird gezielt *rdfs:subClassOf* verwendet, um die Klassenstruktur flexibel zu halten. In Anbetracht der Intention der Reduktion von Abhängigkeiten wurde auf die Definition von Beziehungen der Klasse *owl:equivalentClass* verzichtet.

Darüber hinaus ist aus semantischer Sicht eine 1:1-Entsprechung zwischen den IFC-Klassen und denen des BROT-Frameworks auszuschliessen.

IFCBridge wurde als Schema konzipiert (siehe auch Kap. 5.2.1), um geometrische und informative Brückendaten (im BIM-Kontext) darzustellen, während BROT dazu dient, topologische Beziehungen und strukturelle Konzepte zu formalisieren (Hamdan & Scherer, 2020).

```
ifcBridgeOWL:IfcBridge rdfs:subClassOf brot:Bridge
ifcBridgeOWL:IfcBridgePart rdfs:subClassOf brot:BridgePart
ifcBridgeOWL:IfcSlab rdfs:subClassOf brcomp:DeckComponent
ifcBridgeOWL:IfcBeam rdfs:subClassOf brcomp:GirderComponent
ifcBridgeOWL:IfcColumn rdfs:subClassOf brcomp:PierComponent
ifcBridgeOWL:IfcWall rdfs:subClassOf brcomp:RetainingWallComponent
ifcBridgeOWL:IfcDiscreteAccessory rdfs:subClassOf brcomp:ExpansionJoint
```

turtle

Neben der strukturellen Topologie der Brücke muss ifcBridgeOWL auch die sensorische Dimension berücksichtigen. Zu diesem Zweck werden den SOSA-Konzepten Klassen wie *IfcSensor* aus dem IFC-Standard zugeordnet. Die vorliegende Verknüpfung erlaubt die semantische Modellierung realer (oder simulierter) Sensoren und deren Integration in den digitalen Zwilling.

Infolge der Restriktionen der eingesetzten BIM-Authoring-Software (siehe Kap. 4.5) konnte die Klasse *IfcSensor* nicht unmittelbar modelliert werden. Stattdessen wurde temporär die Klasse *IfcDistributionBoard* zur geometrischen Repräsentation verwendet.

Diese fungiert jedoch lediglich als technischer «Platzhalter» im geometrischen Modell und ist nicht semantisch signifikant im Kontext der Sensorik.

In der Ontologie ifcBridgeOWL wird dieser Platzhalter korrekt durch eine spezifische Klasse «*ifcBridgeOWL:IfcSensor*» ersetzt. Diese ist über «*rdfs:subClassOf sosa:Sensor*» formal mit SOSA verknüpft.

```
ifcBridgeOWL:IfcSensor rdfs:subClassOf sosa:Sensor
```

turtle

### 5.6 Proof of Concept

In diesem Kapitel wird die technische Umsetzung eines semantisch angereicherten digitalen Zwillings für das Instandhaltungsmanagement einer Autobahnbrücke erörtert.

Das Ziel besteht darin, die realen Komponenten der Brücke mit semantischen Informationen zu verknüpfen und diese Informationen interaktiv abrufbar und visualisierbar zu machen, um die Realisierbarkeit (PoC) nachzuweisen.

In Anlehnung an Kapitel 2.4.4 wurde das technische Konzept für den PoC in zwei Hauptfunktionsbereiche unterteilt: die Visualisierung und die Abfragen. Diese Separation diente nicht nur der methodischen Strukturierung des Projekts, sondern bildet auch die Grundlage für die Validierung.

Der Viewer präsentiert die Geometrie aus der IFC-Datei, während über die SPARQL-Schnittstelle gezielte semantische Abfragen an den RDF-Wissensgraphen gestellt werden können.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht schematisch die für den PoC entwickelte Architektur:

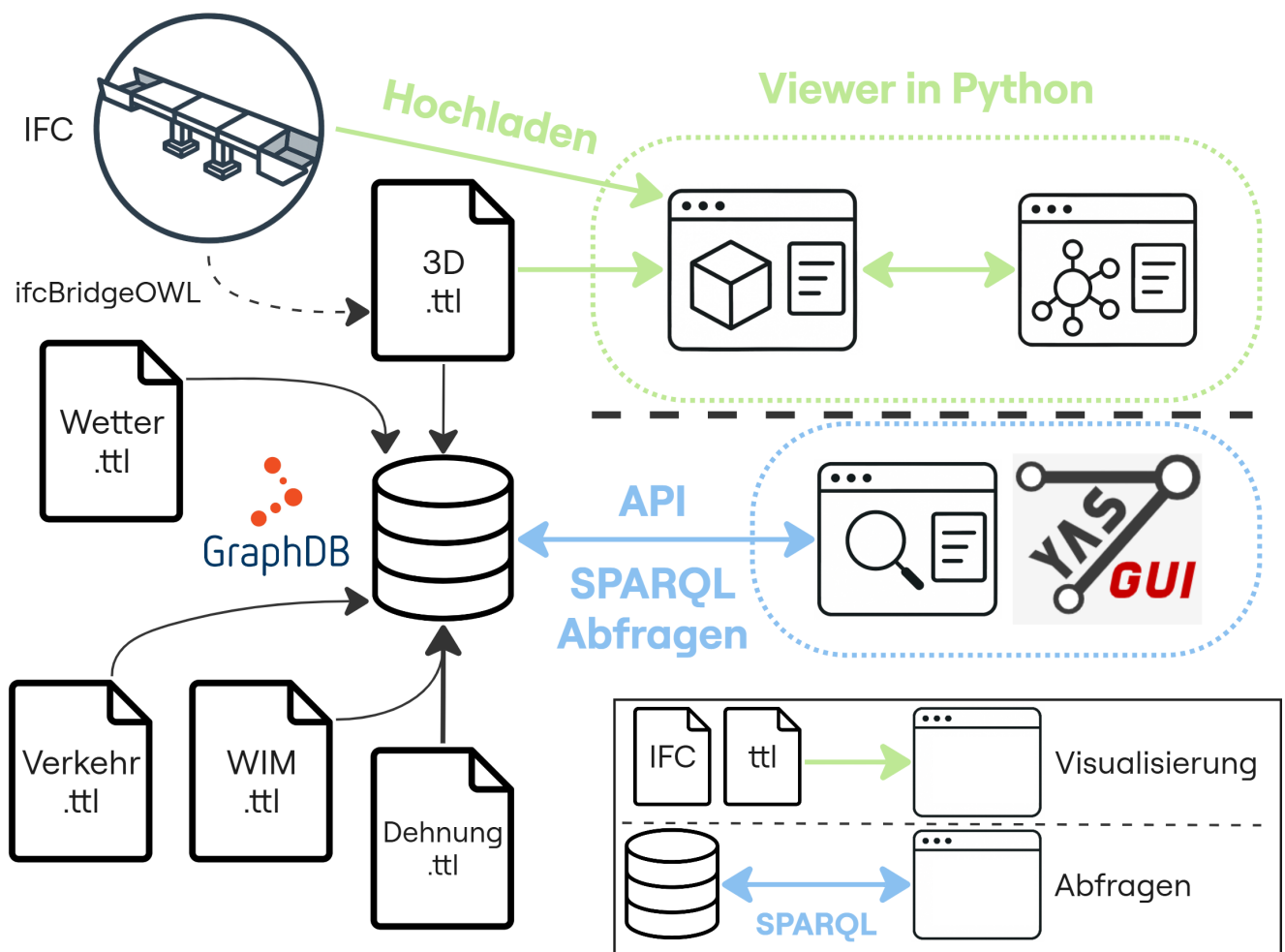


Abb. 54 : Architektur des entwickelten PoCs

Die Architektur des Prototyps basierte auf den Konzepten von TwinGenViewer und WebVOWL, wurde jedoch vollständig unabhängig davon und lokal in Python neu implementiert. Der Code in GitHub von TwinGenViewer war zwar öffentlich verfügbar, funktionierte jedoch nicht (Göbels, 2022).

Daher wurde das visuelle und konzeptionelle Prinzip übernommen, die technische Umsetzung jedoch überarbeitet.

Das Ziel bestand darin, die Geometrie der Brücke aus einer IFC-Datei darzustellen und gleichzeitig eine im Turtle-Dateiformat gespeicherte Ontologie als verknüpftes Wissensdiagramm anzuzeigen. Die Verknüpfung erfolgt auf Instanzebene zwischen den semantisch beschriebenen Entitäten und den geometrisch modellierten Objekten.

Die Visualisierung wurde in statischer Form realisiert, da es im Rahmen dieses PoC nicht vorrangig darum ging, eine zu dynamische Visualisierungsumgebung zu schaffen, sondern den klaren und verständlichen Zusammenhang zwischen der semantischen Beschreibung und dem geometrischen Modell hervorzuheben.

Die geometrische Darstellung der Brücke wird lokal mit Hilfe von *IfcOpenShell* generiert und als einfache interaktive Webvisualisierung (mit Streamlit) implementiert. Es besteht die Möglichkeit, Struktur und Position der Komponenten im Raum zu erfassen, ohne dabei auf komplexe Funktionen zurückgreifen zu müssen.

In einem zweiten Schritt wird die Turtle-Datei, welche die semantischen Informationen über die Brückenkomponenten enthält, geladen und als RDF-Diagramm gespeichert.

Der vorliegende Ansatz ermöglicht die Erlangung eines strukturierten Überblicks über die semantische Organisation des IFC-Modells.

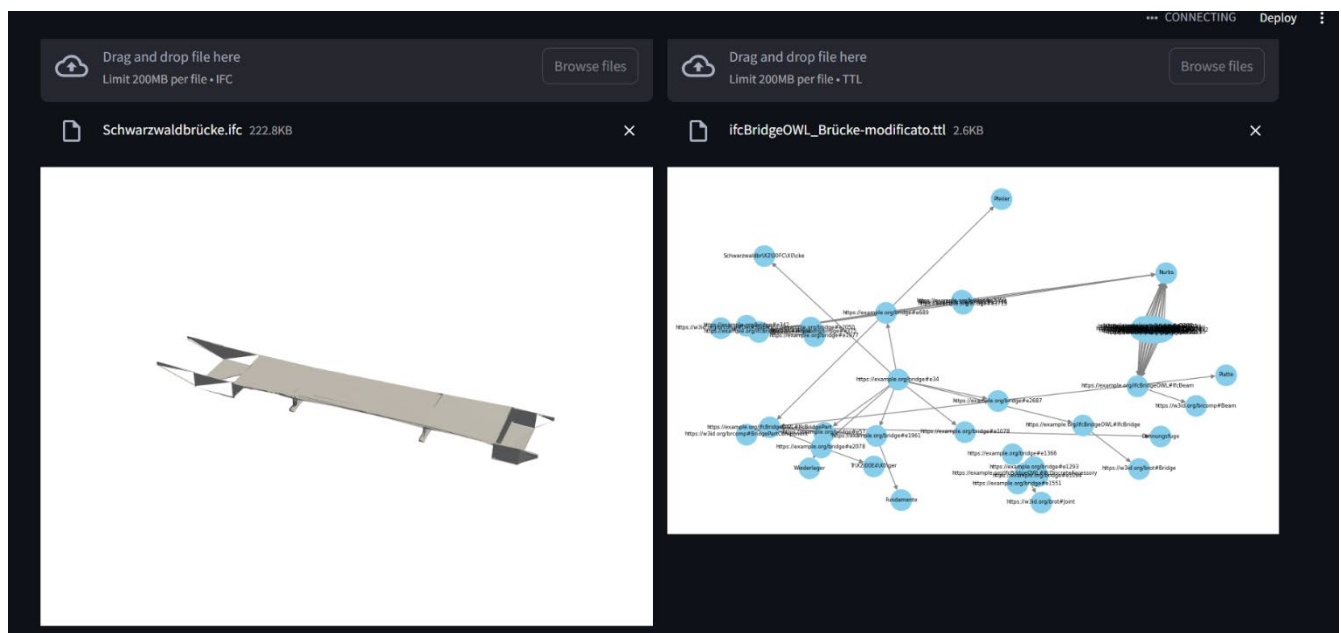


Abb. 55 : Screenshot Viewer mit 3D-Modell und Ontologieansicht

Die Speicherung von IFC-Komponenten im RDF-Diagramm erfolgt als Instanzen im Namensraum. Dies geschieht unter Verwendung einer konsistenten URI-Struktur.

Die vorliegenden URIs beinhalten eindeutige interne IFC-IDs (beispielsweise *e1094*, *e1293*), die aus dem Quellmodell extrahiert wurden. Dies ermöglicht eine stabile Zuordnung zwischen Geometrie und semantischen Beschreibungen.

Die Resultate demonstrieren die Funktionalität der gewählten Struktur, welche mittels URIs direkt auf IFC-Elemente verweist.

Für zukünftige Anwendungen sollte jedoch die Verwendung stabiler Identifikatoren wie *GlobalID* in Betracht gezogen werden, um langfristig robuste Verknüpfungen zwischen semantischen Entitäten und geometrischen Komponenten zu gewährleisten.

### 5.6.1 Validierung

Um den entwickelten *Proof of Concept*, wie in Kapitel 2.4.4 Werkzeugauswahl beschrieben, einer validen Prüfung zu unterziehen, wurde der Versuch unternommen, die SPARQL-Abfragen nicht nur lokal in der GraphDB (Ontotext, 2025), sondern auch über das browserbasierte *Endpoint* YASGUI (Zazuko GmbH, 2025a) auszuführen.

Ziel war es, zu überprüfen, ob der RDF-basierte PoC für digitale Zwillinge dezentral (*Decentralization*) über offene Schnittstellen abgefragt werden kann, entsprechend dem Prinzip des *Semantic Web* und Open Data Strategie (BFS, 2025a).

Da YASGUI standardmässig keinen Zugriff auf lokal ausgeführte SPARQL-Endpunkte zulässt, wurde mit Hilfe von ngrok (ngrok, Inc, 2025) ein temporärer HTTPS-Tunnel zwischen GraphDB und YASGUI eingerichtet. Der lokale Endpunkt (<http://localhost:7200/repositories/WIM-Daten>) konnte folglich mittels einer URL (<https://9c2c-147-86-XXX-YY.ngrok-free.app/repositories/WIM-Daten>) öffentlich zugänglich gemacht werden.

```

ngrok (Ctrl+C to quit)
+ Want to hang with ngrokkers on our new Discord? http://ngrok.com/discord

Session Status      online
Account             MattDepo (Plan: Free)
Version             3.22.1
Region              Europe (eu)
Latency              8ms
Web Interface        http://127.0.0.1:4040
Forwarding           https://9c2c-147-86-XXXX-YY.ngrok-free.app -> http://localhost:7200

Connections
  ttl   opn   rt1   rt5   p50   p90
   4    0    0.01  0.01  60.88 69.61

HTTP Requests
-----
20:11:06.368 CEST GET /repositories/WIM-Daten 200
20:10:57.305 CEST POST /repositories/WIM-Daten 200
20:10:49.373 CEST POST /repositories/WIM-Daten 200
20:10:49.729 CEST POST /repositories/WIM-Daten 200
20:10:48.391 CEST POST /repositories/WIM-Daten 200
19:55:56.694 CEST GET /repositories/WIM-Daten 200
19:50:46.173 CEST POST /repositories/WIM-Daten 200

```

Abb. 56 : Zugriff von YASGUI auf GraphDB über ngrok

Der vorliegende Ansatz ermöglichte die vollständige Ausführung von SPARQL-Abfragen in einer dezentralen Umgebung, wobei der Prozess ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Infrastruktur durchgeführt wurde.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass beim Zugriff über YASGUI trotz dieser Verbindung ein CORS-Fehler angezeigt wurde (siehe Abb. 57), da die CORS-Aktivierung bei einem kostenlosen Konto (Student) nicht unterstützt wird.

Aufgrund einer fehlerhaften Ausführung des Ladevorgangs der SPARQL-Abfrage über YASGUI wurde der betreffende Befehl lokal ausgeführt und das Ergebnis im Format *.srx* (SPARQL XML) gespeichert (Abb. 58 und siehe auch Anhang X.21 SPARQL-Ergebnisse aus YASGUI).

Trotz dieser technischen Einschränkungen konnte dennoch erfolgreich eine SPARQL-Abfrage über YASGUI durchgeführt werden. Die Verbindung zu GraphDB funktionierte, und es wurden strukturierte RDF-Daten aus dem WIM-Datensatz abgerufen.

Die vorliegende SPARQL-Abfrage gestattet einen gezielten Zugriff auf strukturierte WIM-Daten, darunter die Eigenschaft *AchsLast\_1* mit exakt datierten Einzelwerten.

Dies ist ein signifikanter Beweis für die Abfragelogik des digitalen Zwillings und das Potenzial von (bereinigten) Echtdateien, die unmittelbar online verfügbar sind.

The screenshot shows the YASGUI interface with a SPARQL query and an error message. The query is as follows:

```

1 PREFIX sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/>
2
3 SELECT ?obs ?property ?value ?date
4 WHERE {
5   ?obs a sosa:Observation ;
6       sosa:observedProperty ?property ;
7       sosa:result ?value ;
8       sosa:resultTime ?date .
9 }
10 LIMIT 50
11
12

```

Below the query, there is a red error message box with the following text:

Unable to get response from endpoint. Possible reasons:

- Incorrect endpoint URL
- Endpoint is down
- Endpoint is not accessible from the YASGUI server and website, and the endpoint is not CORS-enabled

Abb. 57 : SPARQL-Abfrage mit YASGUI mit CORS-Fehlermeldung

The screenshot shows an XML snippet of a SPARQL result. The XML is as follows:

```

<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<sparql xmlns='http://www.w3.org/2005/sparql-results#'>
  <head>
    <variable name='obs' />
    <variable name='property' />
    <variable name='value' />
    <variable name='date' />
  </head>
  <results>
    <result>
      <binding name='obs'>
        <uri>http://example.org/wim#Observation_Achse1_Day1</uri>
      </binding>
      <binding name='property'>
        <uri>http://example.org/wim/propertie./Achslast_1./uri>
      </binding>
      <binding name='value'>
        <literal datatype='http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer'>9000</literal>
      </binding>
      <binding name='date'>
        <literal datatype='http://www.w3.org/2001/XMLSchema#date'>2025-03-10</literal>
      </binding>
    </result>
  </results>
</sparql>

```

Green circles highlight the following values in the XML:

- URI: `http://example.org/wim#Observation_Achse1_Day1`
- URI: `http://example.org/wim/propertie./Achslast_1./uri`
- Value: `9000`
- Date: `2025-03-10`

Abb. 58 : Teil des lokal gespeicherten Ergebnisses mit YASGUI

Der Zugriff auf bereits integrierte WIM-Daten bietet ein enormes Potenzial für eine nicht konservative Nachweise der Brückenermüdung (siehe Kapitel X.1).

Der unmittelbare Zugriff auf tatsächliche Verkehrslasten erlaubt die Vermeidung simplifizierter und generischer Lastmodelle. Stattdessen können aus ingenieurtechnischer Sicht angepasste Algorithmen (Bianchi et al., 2021) angewendet werden, die eine präzisere Unterscheidung zwischen gefährdeten und unkritischen Brücken ermöglichen.

Obwohl die Möglichkeit besteht, SPARQL-Abfragen über YASGUI auszuführen, wurde für die weitere Validierung und Analyse im PoC bewusst auf die lokale Ausführung in GraphDB zurückgegriffen. Dies ermöglichte eine höhere Ausführungsgeschwindigkeit, den direkten Zugriff auf semantische Verknüpfungen im Graphen und die visuelle Darstellung komplexer Beziehungen in der integrierten Ontologiansicht.

Zur Validierung des *Proof of Concept* wurde eine regelbasierte Validierung (SPARQL-Abfrage) für Dehnungsfugen durchgeführt.

Gemäss den technischen Spezifikationen (ASTRA 12004, 2011) ist eine Bewegungsreserve von mindestens 25 mm an der Fuge erforderlich. Darüber hinaus ergeben sich aus den ASTRA-Regeln und Experteninterviews (Interview X.1) Anzeichen dafür, dass bei mehr als 4000 schweren Fahrzeugen pro Tag eine erhöhte zyklische Beanspruchung auftritt, die sich negativ auf die Lebensdauer auswirken kann.

Basierend auf diesen beiden Anforderungen werden sie als Grundlage für eine regelbasierte Qualitätskontrolle der Dehnungsfugen auf semantischer Ebene verwendet. Die Überprüfung erfolgt direkt mittels der SPARQL-Abfrage auf dem in *GraphDB* gespeicherten Graphen.

Es sei darauf hingewiesen, dass eine Differenzierung zwischen der Bewegungsreserve (Projektierung) und der tatsächlich gemessenen Dehnung (durch Sensorik) erforderlich ist, um eine klare Unterscheidung zu gewährleisten.

Tab. 16 : Die Bedeutung von Soll- und Istwert bei Dehnungsfugen

	Eigenschaft	Beschreibung
<b>A</b>	<b>Bewegungsreserve</b>	Die maximale konstruktive Verschiebung, die die Fuge aufnehmen kann. (SOLLWERT)
<b>B</b>	<b>Gemessene Dehnung</b>	Die reale und gemessene Verschiebung in Längsrichtung, die unter Betriebsbedingungen auftritt.

Zunächst erfolgte eine Überprüfung der Daten zur Dehnung und zum Verkehr mittels einer *SELECT*-Abfrage (siehe X.22 SPARQL-Abfrage), welche die Beobachtungen der angeschlossenen Sensoren umfasste.

Es wurde sichergestellt, dass für jede Fuge tägliche Beobachtungen verfügbar waren und diese korrekt mit einem gemeinsamen Datum (*sosa:resultTime*) referenziert waren (Abb. 59).

	date	dehnung	fahrzeuge
1	"2025-03-07" <sup>^^xsd:date</sup>	"5.05" <sup>^^xsd:float</sup>	"3886" <sup>^^xsd:int</sup>
2	"2025-03-08" <sup>^^xsd:date</sup>	"1.62" <sup>^^xsd:float</sup>	"1250" <sup>^^xsd:int</sup>
3	"2025-03-09" <sup>^^xsd:date</sup>	"0.27" <sup>^^xsd:float</sup>	"208" <sup>^^xsd:int</sup>
4	"2025-03-10" <sup>^^xsd:date</sup>	"4.25" <sup>^^xsd:float</sup>	"3267" <sup>^^xsd:int</sup>
5	"2025-03-11" <sup>^^xsd:date</sup>	"5.34" <sup>^^xsd:float</sup>	"4104" <sup>^^xsd:int</sup>
6	"2025-03-12" <sup>^^xsd:date</sup>	"5.3" <sup>^^xsd:float</sup>	"4078" <sup>^^xsd:int</sup>
7	"2025-03-13" <sup>^^xsd:date</sup>	"5.27" <sup>^^xsd:float</sup>	"4056" <sup>^^xsd:int</sup>
8	"2025-03-14" <sup>^^xsd:date</sup>	"5.04" <sup>^^xsd:float</sup>	"3874" <sup>^^xsd:int</sup>
9	"2025-03-15" <sup>^^xsd:date</sup>	"1.65" <sup>^^xsd:float</sup>	"1273" <sup>^^xsd:int</sup>
10	"2025-03-16" <sup>^^xsd:date</sup>	"0.27" <sup>^^xsd:float</sup>	"210" <sup>^^xsd:int</sup>
11	"2025-03-17" <sup>^^xsd:date</sup>	"4.71" <sup>^^xsd:float</sup>	"3623" <sup>^^xsd:int</sup>

GraphDB 11.0.0 • RDF4J 5.1.2-jakarta • Connectors 16.3.1 • Workbench 3.0.0 • © 2002–2025 [Ontotext AD](#). All rights reserved.

Abb. 59 : SPARQL-Abfrageergebnis

Im Anschluss wurde eine semantische Regel mit einer *CONSTRUCT*-Anweisung formuliert, um automatisch Verbindungen zu identifizieren, bei denen die gemessene Dehnung den Schwellenwert von 25 mm überschreitet oder die Anzahl der schweren Fahrzeuge 4000 pro Tag übersteigt.

Die kritischen Bedingungen wurden in GraphDB mittels *INSERT* dauerhaft gespeichert, um eine Visualisierung (oder eine weitere Analyse) zu ermöglichen.

Die nachfolgende Abb. 60 veranschaulicht die in GraphDB visualisierten Verbindungen zwischen einer Dehnungsfuge (*Dehnungsfuge IfcBridge\_1*) und drei automatisch identifizierten kritischen Ereignissen (11.03., 12.03. und 13.03.2025), bei denen die Bedingungen der Regelprüfung erfüllt waren, d. h. die Anforderungen der Dehnungsfuge überschritten wurden. Die Triple wurden automatisch von der SPARQL-Logik generiert und mit dem Prädikat *ex:criticalOnDate* versehen.

Table
Raw response
Pivot Table
Google Chart

Download as
Visual

Compact view 
Hide row numbers 
Showing results from 0 to 4 of 4. Query took 0.1s, today at 9:26.

	subject	predicate	object
1	ex:ExpansionJoint_1	rdf:type	ex:KritischerJoint
2	ex:ExpansionJoint_1	ex:criticalOnDate	"2025-03-11"^^xsd:date
3	ex:ExpansionJoint_1	ex:criticalOnDate	"2025-03-12"^^xsd:date
4	ex:ExpansionJoint_1	ex:criticalOnDate	"2025-03-13"^^xsd:date

GraphDB

Visual graph

ifcBridgeOWL\_Verkehr\_Dehnung

- Import
- Explore
- SPARQL
- GraphQL
- Monitor
- Setup
- Lab
- Help

Dehnungsfuge IfcBridge\_1

Dehnungsfuge IfcBridge\_1 · Dehnfuge IfcBridge\_1

Types:

- ex:KritischerJoint
- ifcBridgeOWL:IfcDiscreteAccessory
- bro:t:Joint

RDF Rank:

0

Dehnungsfuge IfcBridge\_1 [Show 1 more](#)

bro:heavyVehicleCountPerDay **3886** xsd:int [Show 10 more](#)

bro:hasMeasuredExtension **5.05** xsd:float [Show 9 more](#)

ex:criticalOnDate

- 2025-03-11 xsd:date [Show 2 more](#)
- 2025-03-12 xsd:date
- 2025-03-13 xsd:date

GraphDB 11.0.0 · RDF4J 5.1.2-jakarta · Connectors 16.3.1 · Workbench 3.0.0 · © 2002–2025 Ontotext AD. All rights reserved.

Abb. 60 : Semantische Verknüpfung kritischer Ereignisse

Das Ziel des vorliegenden PoC bestand darin, verschiedene ursprünglich getrennte Datenquellen (beispielsweise Verkehr, Ausdehnung) unter Verwendung von RDF-Technologien nicht auf Dateiebene, sondern auf semantischer Ebene logisch miteinander zu verknüpfen.

Es konnte festgestellt werden, dass die eigentliche Stärke nicht nur in der Integration liegt, sondern in der Möglichkeit, mittels der regelbasierten SPARQL-Logik (*CONSTRUCT + INSERT*) aus den vorhandenen Informationen neue Informationen zu generieren.

Dies ist für weitere Anwendungen im Bereich der Lebensdauerbewertung von Brücken und insbesondere für die Ermüdung von signifikanter Relevanz: So könnte beispielsweise eine Regel festlegen, dass eine Dehnungsfuge ausgetauscht werden muss, wenn sie über einen Zeitraum von mehr als 1000 Tagen einer zyklischen Belastung von mehr als 4000 schweren Fahrzeugen pro Tag ausgesetzt war.

Die Identifikation solcher kritischen Zustände erfolgt nicht mehr manuell, sondern über automatisch generierte Triple, die die Grundlage für ein intelligentes Instandhaltungsmanagement (*Digital Twin*) bilden.

## 6 Diskussion

Die vorliegende MTH hat sich der Aufgabe angenommen, mittels der Entwicklung eines PoC zu demonstrieren, dass digitale Zwillinge auf Basis semantischer Technologien ein signifikantes, bislang jedoch ungenutztes Potenzial aufweisen.

Aus persönlicher Perspektive kann dieser Ansatz als ein klarer Paradigmenwechsel betrachtet werden, der von isolierten Modellen zu vernetzten und kontextualisierten Wissenssystemen (*Linked Data*) übergeht.

Die Verbindung zwischen Geometrie und Sensorik hat neue Möglichkeiten hervorgebracht.

Es wird nicht nur ermöglicht, die Sensorwerte formal (semantisch) einer bestimmten Komponente (z.B. Dehnungsfuge) zuzuordnen, sondern durch die Kombination dieser heterogenen Daten auch neue Informationen zu generieren (siehe auch Kap. 5.6.1).

Durch die Erfassung der aktuellen Nutzungssituation entsteht ein digitaler Schatten, der auch für komplexe Analysen genutzt werden kann. Nach meiner Einschätzung bietet dies einen entscheidenden Mehrwert im Vergleich zu herkömmlichen Monitoring-Methoden (oder BIM-Monitoring), die in der Regel lediglich dokumentarischen/kontrollierenden Zwecken dienen und nicht kontextsensitiv sind (z.B. Echtzeitwetter).

Ein besonders signifikanter Vorteil besteht in der Möglichkeit, reale Verkehrsdaten in die Struktur des semantischen Modells zu integrieren.

Anstelle von konservativen Annahmen oder Standardlasten (siehe Anhang X.1) können tatsächliche (reale) Lasten, beispielsweise aus WIM-Daten, in die Analyse einbezogen werden. Dies ermöglicht wesentlich genauere und kontextgerechte Ermüdungsnachweise.

Ein weiterer zentraler Aspekt der MTH war die Vertiefung des IFC 4.3-Standards für Brücken (*IfcBridge*) als Grundlage für das topologische Modell. Obwohl geometrische Informationen im Kontext der Erhaltung häufig hinter Zustandsdaten oder Inspektionsberichten zurücktreten, ist es für mich als planenden Ingenieur evident, dass sie eine entscheidende Rolle spielen.

Eine exakte geometrische Lokalisierung ist für die korrekte Zuordnung und interpretative Analyse von Informationen aus Sensoren essenziell.

In dieser Hinsicht bietet IFC 4.3 entscheidende Vorteile: Die klare Trennung zwischen räumlicher Struktur, Elementtypen und Instanzen ermöglicht nicht nur eine saubere Modellierung der Struktur, sondern bildet auch die Voraussetzung für eine semantische Erweiterung.

Nur dank des strukturierten Verständnisses der *PredefinedTypes*, der räumlichen Unterteilungen und der zugehörigen Beziehungen konnte die Ontologie *ifcBridgeOWL* als Vermittlungsebene konzipiert und sinnvoll mit spezifischen Ontologien wie BROT oder SOSA verknüpft werden.

Insbesondere im Zusammenhang mit Dehnungsfugen war es unerlässlich, deren geometrische Lage und strukturelle Einbindung im Modell verständlich darzustellen, nicht nur als visuelle Hilfe, sondern auch als logische Referenz.

Meiner Meinung nach sollte die Rolle der Geometrie im Erhaltungsmanagement neu bewertet werden: nicht als rein grafische Darstellung, sondern als tragende Struktur eines semantisch fundierten digitalen Zwillings.

## 7 Fazit / Ausblick

In der vorliegenden MTH wurde dargelegt, dass die Kombination semantischer Technologien mit geometrischen und sensorischen Daten die Grundlage für die Erstellung eines funktionsfähigen digitalen Zwillings bildet, der für die Instandhaltung einer Brücke eingesetzt werden kann.

Der entwickelte PoC veranschaulicht, wie bestehende Ontologien gezielt genutzt und integriert werden können, um heterogene Daten abzubilden und auszuwerten.

Das Fazit dieser Arbeit lautet, dass es derzeit weder im Stand der Technik noch in laufenden Forschungsprojekten ein fertiges oder auch nur fortgeschrittenes Instrument gibt, das diese Form des semantischen digitalen Zwillings im Infrastrukturbereich ermöglicht.

Auch David Bucher (Thesis-Expert) bestätigt, dass es derzeit noch keine Lösung gibt, mit der ein solcher PoC direkt umgesetzt werden könnte (Interview Anhang X.11).

Für die darauffolgende Phase ist daher die Entwicklung eines echten Prototyps erforderlich.

Zu diesem Zweck könnten auch SWRL-Regeln (*Semantic Web Rule Language*) integriert werden, um algorithmische Auswertungen, beispielsweise Ermüdungsnachweise (siehe auch Anhang X.1), automatisch durchzuführen.

Das Ziel besteht in der Entwicklung eines komplexeren Regelkatalogs, der dazu befähigt, semantisch verknüpfte geometrische (einschliesslich materialbezogene) und sensorische Daten zu interpretieren und auf dieser Grundlage automatisierte Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement zu generieren (ein sogenannter digitaler Zwilling).

Die Validierung des Systems sollte nicht nur an einem Brückenmodell, sondern an verschiedenen Brücken einer Autobahnschnitte durchgeführt werden.

Zu diesem Zweck wäre es denkbar, SWRL-Regeln für bestimmte Komponenten zu entwickeln und diese mit realen Verkehrsdaten zu testen.

Ich erkenne ein beträchtliches Potenzial in der weiteren Entwicklung dieses PoC, beispielsweise im Rahmen eines *Innosuisse*-Projekts.

Die Übertragung der entwickelten Lösung in eine reale Betriebsumgebung und deren praktischer Test in Zusammenarbeit mit ASTRA und weiteren Partnern wäre somit möglich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der entwickelte PoC eine solide Grundlage für zukünftige datenbasierte Erhaltungsstrategien bildet.

Die Kombination aus geometrischer Genauigkeit, semantischer Tiefe, aktuellen Sensordaten und regelbasierter Analyse macht digitale Zwillinge zu einem vielversprechenden Werkzeug.

## V Literaturverzeichnis

- Abisset-Chavanne, E., Coupaye, T., Golra, F.R., Lamy, D., Piel, A., Scart, O., Vicat-Blanc, P., 2024. *A Digital Twin use cases classification and definition framework based on Industrial feedback*. Comput. Ind. 161, 104113. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104113>
- AM4INFRA, 2018. EUROTL Framework [WWW Document]. URL <https://wpd1.s3.eu-central-1.amazonaws.com/index.html> (accessed 4.29.25).
- Apache Software, 2025. Apache Jena - A free and open source Java framework for building Semantic Web and Linked Data applications. [WWW Document]. URL <https://jena.apache.org/index.html> (accessed 5.2.25).
- ASTRA, 2020. *Editorial ASTRA -A2 Osttangente Info4\_Juni 2020*.
- ASTRA 12004, 2011. *12004 Teil 2 Fahrbahnübergänge (2011 V1.10)*.
- ASTRA, B. für S., 2025a. Wöchentliche Verkehrsentwicklung [WWW Document]. URL <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/daten-informationsprodukte/verkehrsdaten/daten-publikationen/automatische-strassenverkehrszaehlung/verkehrsentwicklung-auf-dem-nationalstrassennetz.html> (accessed 4.24.25).
- ASTRA, B. für S., 2025b. Gewichtserfassung (WIM) [WWW Document]. URL <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/daten-informationsprodukte/verkehrsdaten/daten-publikationen/gewichtserfassung.html> (accessed 5.9.25).
- BAR, 2025a. Das LINDAS Ökosystem - Linked Data Triplestores der eidgenössischen Verwaltung [WWW Document]. URL <https://lindas.admin.ch/ecosystem/LINDAS-ecosystem/> (accessed 5.3.25).
- BAR, 2025b. LINDAS - Linked Data Service [WWW Document]. URL <https://lindas.admin.ch/> (accessed 4.27.25).
- Bartnizek, J., Hamdan, A.-H., 2024. *An Ontology Concept for the Topological Abstraction of Infrastructure Networks*. Presented at the 2024 European Conference on Computing in Construction. <https://doi.org/10.35490/EC3.2024.292>
- Basel-Stadt, 2025. Geodaten-Shop Kanton Basel-Stadt [WWW Document]. URL <https://shop.geo.bs.ch/> (accessed 5.7.25).
- BFS, 2025a. Open Government Data (OGD) [WWW Document]. URL <https://www.bfs.admin.ch/content/bfs/de/home/dienstleistungen/ogd.html> (accessed 4.27.25).
- BFS, 2025b. Metadatenkatalog für die Schweiz [WWW Document]. URL <https://i14y-ch.github.io/handbook/de/> (accessed 4.27.25).
- BFS, 2020. Linked Open Data — Handbuch Opendata.swiss 1.0 Dokumentation - Bundesamt für Statistik [WWW Document]. URL <https://handbook.opendata.swiss/de/content/glossar/bibliothek/linked-open-data.html> (accessed 4.18.25).
- Bianchi, G., Nussbaumer, A., Pedro, J.J.O., 2021. *European traffic on road bridges and recalibration of damage equivalence factor for fatigue verification*. ce/papers 4, 1065–1075. <https://doi.org/10.1002/cepa.1397>
- Bonduel, M., Wagner, A., Pauwels, P., 2020a. FOG: File Ontology for Geometry formats [WWW Document]. URL <https://mathib.github.io/fog-ontology/> (accessed 4.21.25).
- Bonduel, M., Wagner, A., Pauwels, P., Vergauwen, M., Klein, R., 2020b. *Including widespread geometry schemas into Linked Data-based BIM applied to built heritage*. Proc. Inst. Civ. Eng. - Smart Infrastruct. Constr. 172, 34–51. <https://doi.org/10.1680/jsmic.19.00014>
- Borrmann, A., Blankenbach, J., Beetz, J., König, M., Becker, R., Blut, T.A.W., Celik, T., Benedikt, F., Göbels, A., Mafipour, M.S., Martens, J., Scheffer, M., Vilgertshofer, S., 2022. *TwinGen-Technologien zur Generierung digitaler Zwillinge als Grundlage für Betrieb und Instandhaltung baulicher Infrastruktur*.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J. (Eds.), 2021. *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, VDI-Buch. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4>
- Bucher, D.F., Hunhevicz, J.J., Soman, R.K., Pauwels, P., Hall, D.M., 2024. *From BIM to Web3: A critical interpretive synthesis of present and emerging data management approaches in construction informatics*. Adv. Eng. Inform. 62, 102884. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102884>
- cadwork informatik, 2025. Lexocad - die Software für Bauunternehmer [WWW Document]. lexocad. URL <https://07.cadwork.ch/de/> (accessed 5.7.25).

- Clarivate, 2025. *Web of Science* | Clarivate. URL <https://clarivate.com/academia-government/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-referencing/web-of-science/> (accessed 5.21.25).
- COGITO Project, 2022. *D3.4 – COGITOData Model and Ontology Definition and Interoperability Design v3*.
- Connected Papers, 2025. Connected Papers | Find and explore academic papers [WWW Document]. URL <https://www.connectedpapers.com/> (accessed 5.21.25).
- Dari, A., 2020. Crolla il ponte Morandi a Genova: problema strutturale, ma perchè ? [WWW Document]. Ingenio. URL <https://www.ingenio-web.it/articoli/crolla-il-ponte-morandi-a-genova-problema-strutturale-ma-perche/> (accessed 5.22.25).
- Domer, B., Bernardello, R.A., Borin, P., Giordano, A., Schatz, Y., 2024. *Interoperability: An Introduction to IFC and BuildingSMART Standards, Integrating Infrastructure Modeling*. EPFL Press.
- Elsevier B.V., 2025. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [WWW Document]. URL <https://www.sciencedirect.com/> (accessed 5.21.25).
- EN 1992-2, 2014. *Eurocode EN 1992-2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken*.
- Felder, J., 2025. *State-of-the-art Literatur-Review*. FHNW - Guide Res. Writ. Assign. URL <https://www.fhnw.ch/plattformen/academicguide/de/state-of-the-art-literatur-review/> (accessed 5.21.25).
- Gao, Y., Xiong, G., Hu, Z., Chai, C., Li, H., 2024. *Bridge Digital Twin for Practical Bridge Operation and Maintenance by Integrating GIS and BIM*. Buildings 14, 3731. <https://doi.org/10.3390/buildings14123731>
- García-Castro, R., Lefrançois, M., Poveda-Villalón, M., Daniele, L., 2023. *The ETSI SAREF ontology for smart applications: a long path of development and evolution*, Wiley Online Library. Energy Smart Appl. Appl. Methodol. Chall. 183–215.
- Getuli, V., 2020. *Ontologies for Knowledge modeling in construction planning Theory and Application*.
- GitHub, 2020. Blazegraph Database [WWW Document]. URL <https://blazegraph.com/> (accessed 5.3.25).
- Göbels, A., 2023. *Design-Computation-RWTH/LinkedDataViewerPublic*, Design Computation.
- Göbels, A., 2022. *AnneGoebels/TwinGenViewer*.
- Gobels, A., Beetz, J., 2021. *Conversion of legacy domain models into ontologies for infrastructure maintenance*.
- Google, 2024. Suchmaschine Google Scholar [WWW Document]. URL <https://scholar.google.com/> (accessed 5.21.25).
- Gotsch, K., 2025. Bogenbrücke [WWW Document]. URL <https://www.karl-gotsch.de/Lexikon/Bogenbr.htm> (accessed 4.17.25).
- Hamdan, A.-H., Kozak, T., 2022. BROT-Bridge Topology Ontology Documentation [WWW Document]. URL <https://alhakam.github.io/brot/> (accessed 5.12.25).
- Hamdan, A.-H., Kozak, T., 2020a. BRCOMP-Ontology Documentation [WWW Document]. URL <https://alhakam.github.io/brcomp/> (accessed 4.21.25).
- Hamdan, A.-H., Kozak, T., 2020b. BMAT-Ontology Documentation [WWW Document]. URL <https://alhakam.github.io/bmat/> (accessed 4.21.25).
- Hamdan, A.-H., Scherer, R.J., 2020. *Integration of BIM-related bridge information in an ontological knowledgebase*.
- Heise, I., Esser, S., Borrmann, A., 2024. *Towards a comprehensive digital twin of a road infrastructure system - Requirements analysis and System architecture*.
- Herle, S., Becker, R., Wollenberg, R., Blankenbach, J., 2020. *GIM and BIM*. PFG – J. Photogramm. Remote Sens. Geoinformation Sci. 88, 33–42. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00090-4>
- Holcim AG, 2023. *BETON NACH SN EN 206: 2013 + A2: 2021 (Juli 2023)*.
- Höltzsch, R., 2024. *Carolabrücke als Weckruf: Warum Deutschlands Brücken bröckeln*. Neue Zür. Ztg.
- IFC 4X3\_ADD2, 2025a. IFC4.3.2.0 Documentation [WWW Document]. URL [https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4\\_3/](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/) (accessed 5.12.25).
- IFC 4X3\_ADD2, 2025b. 5.4.2.5 IFCBridgeTypeEnum - IFC 4.3.2 Documentation [WWW Document]. URL <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IFCBridgeTypeEnum.htm> (accessed 5.10.25).

- Innosuisse, 2025. Innosuisse - Projektausschreibung BRIDGE Proof of Concept [WWW Document]. URL <https://www.innosuisse.admin.ch/de/projektausschreibung-bridge-proof-of-concept> (accessed 5.14.25).
- ISO 55001, 2024. *ISO 55001;2024 ed.2 - Asset management system - Requirements*.
- Jäkel, J.-I., Heinlein, E., Morgenstern, H., Kim, H., Klemm-Albert, K., 2025. *System- and Data-integrated linking of digital 3D models of existing bridge structures with Knowledge Graphs of non-destructive diagnostic methods*. *J. Inf. Technol. Constr.* 30, 603–630. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.025>
- Jasiński, M., Łaziński, P., Piotrowski, D., 2023. *The Concept of Creating Digital Twins of Bridges Using Load Tests*. *Sensors* 23, 7349. <https://doi.org/10.3390/s23177349>
- Jiang, Y., Li, H., Yang, G., 2023. *Bridge Maintenance Ontology (BMO)* [WWW Document]. URL <https://jyl61.github.io/BMO/> (accessed 4.29.25).
- Justen, A., Ancel, R., Mathys, N., Schiller, C., 2022. *Verkehrsperspektiven 2050 - Schlussbericht - Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)*.
- Kang, C., Walker, M., Marx, S., 2024. *Advances of Digital Twins in Bridge Structures Maintenance*. *Procedia Struct. Integr.* 64, 1232–1239. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.191>
- Kaufmann, W., 2025a. *ETH - Bridge Design - Chap.1.2 Introduction\_Notes*.
- Kaufmann, W., 2025b. *ETH - Bridge Design - Chap.4 Support and Articulation\_Notes*.
- Köhler, C., 2020. *Basiswerkzeuge zur Erstellung wissenschaftlicher Arbeiten: Starthilfen und Tools zur praktischen Umsetzung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-31238-1>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W., 2018. *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*. *IFAC-Pap.* 51, 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Li, R., Mo, T., Yang, J., Jiang, S., Li, T., Liu, Y., 2021. *Ontologies-Based Domain Knowledge Modeling and Heterogeneous Sensor Data Integration for Bridge Health Monitoring Systems*. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 17, 321–332. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2967561>
- MIT License, 2019. *VisualDataWeb/WebVOWL*, Visual Data Web.
- Moser, A., Michel, C., 2025. *twins – lunch & learn - Kanton Basel-Stadt*.
- Mousavi, V., Rashidi, M., Mohammadi, M., Samali, B., 2024. *Evolution of Digital Twin Frameworks in Bridge Management: Review and Future Directions*. *Remote Sens.* 16, 1887. <https://doi.org/10.3390/rs16111887>
- Nemetschek Group, 2025. *ALLPLAN Civil kaufen - Funktionen & Kaufoptionen - ALLPLAN Deutschland GmbH* [WWW Document]. URL <https://www.allplan.com/de/produkte/allplan-civil/> (accessed 5.7.25).
- ngrok, Inc, 2025. *ngrok | API Gateway, Kubernetes Ingress, Webhook Gateway* [WWW Document]. URL <https://ngrok.com/> (accessed 5.20.25).
- OGC & W3C, 2017. *Semantic Sensor Network Ontology - SOSA/SNN Ontology* [WWW Document]. URL <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>
- OGD, 2025. *Wetter Messstation A2 Hard (halbstündliche Daten seit September 2024) - open-data.swiss* [WWW Document]. URL <https://opendata.swiss/de/dataset/wetter-messstation-a2-hard-halbstundliche-daten-seit-september-2024> (accessed 4.22.25).
- Ontotext, 2025. *GraphDB is an enterprise ready Semantic Graph Database, compliant with W3C Standards*. [WWW Document]. URL <https://graphdb.ontotext.com/> (accessed 5.2.25).
- OpenLink Software, 2024. *OpenLink Software: Virtuoso Homepage* [WWW Document]. URL <https://virtuoso.openlinksw.com/> (accessed 5.3.25).
- Pauwels, P., Krijnen, T., Terkaj, W., Beetz, J., 2017. *Enhancing the ifcOWL ontology with an alternative representation for geometric data*. *Autom. Constr.* 80, 77–94. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.001>
- Pauwels, P., Terkaj, W., 2016. *EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology*, Elsevier BV. *Autom. Constr.* 63, 100–133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.003>
- Petersen, N., 2018. *Datex II Roadworks Ontology*.
- Pfeiffer, F., 2019. *Strukturiertes Interview für die Abschlussarbeit führen*. Scribbr. URL <https://www.scribbr.ch/methodik-ch/strukturiertes-interview/> (accessed 5.20.25).

- Rasmussen, M.H., 2022. *MadsHolten/sparql-visualizer*.
- Rasmussen, M.H., Pauwels, P., Lefrançois, M., Schneider, G.F., Hviid, C.A., Karlshøj, J., 2021. *Building Topology Ontology - BOT*, Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32365.28647>
- Relekar, A.S., Smolira, P., Petrova, E., Aalborg University, Svidt, K., 2021. *Enabling Digital Twins with Advanced Visualization and Contextualization of Sensor Data with BIM and Web Technologies*.
- Ren, G., Ding, R., Li, H., 2019. *Building an ontological knowledgebase for bridge maintenance*. *Adv. Eng. Softw.* 130, 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.02.001>
- Riegelnic, J., Rosin, K., Schenker, R., Stalder, H., Truttmann, D., 2023. *LOD-Workshop\_Stadt-Zurich\_Anleitung*.
- Schildknecht, L., 2024. *MSc FHNW VDC ISK- Informationssysteme konfigurieren-DB SQL-v1.00*.
- SIA 261, 2020. *SIA 261\_2020-Einwirkungen auf Tragwerke*.
- SIA 261/1, 2020. *SIA 261-1\_2020-Ergänzende Festlegungen*.
- Smolira, P., 2025. *Ontologies for bridge maintenance-Piotr Smolira\_InfraBIM2025*.
- Stanford University, 2020. Protégé - A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems [WWW Document]. URL <https://protege.stanford.edu/> (accessed 5.2.25).
- Stardog Union, 2025. The Enterprise Knowledge Graph Platform | Stardog [WWW Document]. Stardog Union. URL <https://www.stardog.com/> (accessed 5.3.25).
- Wu, C., Wu, P., Wang, J., Jiang, R., Chen, M., Wang, X., 2021. *Ontological knowledge base for concrete bridge rehabilitation project management*. *Autom. Constr.* 121, 103428. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103428>
- Xiao, Y., Li, Z., Zhao, Q., Chen, Y., Li, H., 2022. *The knowledge modeling of bridge code for automated completeness checking*, IEEE, in: 2022 18th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS). Presented at the 2022 18th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), IEEE, Chengdu, China, pp. 414–418. <https://doi.org/10.1109/CIS58238.2022.00093>
- Zazuko GmbH, 2025a. *trifid/packages/yasgui at main · zazuko/trifid* [WWW Document]. GitHub. URL <https://github.com/zazuko/trifid/tree/main/packages/yasgui> (accessed 5.2.25).
- Zazuko GmbH, 2025b. *lod.opentransportdata.swiss* [WWW Document]. URL <https://lod.opentransportdata.swiss/> (accessed 4.27.25).
- Zhang, Y., Liu, J., Hou, K., 2023. *Building a Knowledge Base of Bridge Maintenance Using Knowledge Graph*. *Adv. Civ. Eng.* 2023, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2023/6047489>
- Zhang, Y., Liu, Y., Lei, G., Liu, S., Liang, P., 2022. *An Enhanced Information Retrieval Method Based on Ontology for Bridge Inspection*. *Appl. Sci.* 12, 10599. <https://doi.org/10.3390/app122010599>

## VI Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 : Was man idealerweise erreichen will, in Anlehnung an (Smolira, 2025).....	14
Abb. 2 : Abgrenzung zwischen Digitalem Zwilling .....	15
Abb. 3 : Aktuelle Interpretation eines digitalen Zwillings .....	15
Abb. 4 : Grundkonzept des Digital Twin – semantische Ebene .....	16
Abb. 5 . Ein Beispiel für ein Triple .....	17
Abb. 6 : Ein Beispiel von einem Graph.....	17
Abb. 7 : Drei Varianten der Bogenbrücke, in Anlehnung an (Gotsch, 2025) .....	18
Abb. 8 : die 3 verschiedene Datenbanktypen .....	19
Abb. 9 : Zusammenhang zwischen Ontologien und semantischen Strukturen .....	20
Abb. 10 : BMO-Ontologie in WebVOWL mit Kommentaren .....	22
Abb. 11 : Konzeptionelle Ebene des Digital Twin .....	25
Abb. 12 : Visuelle (in WebVOWL) und konzeptionelle Darstellung des Digital Twin .....	26
Abb. 13 : Visualisierungsprozess der Aufgaben .....	27
Abb. 14 : Linked Data Tripestores der Bundesverwaltung, in Anlehnung an (BAR, 2025a) .....	28
Abb. 15 : Ergebnisse einer SPARQL-Abfrage opentransportdata .....	30
Abb. 16 : Skizze des Proof of Concept mit Beschreibung.....	32
Abb. 17 : Methodisches Vorgehen bei der Literaturrecherche zur Ontologie .....	33
Abb. 18 : Prozess zur Auswahl der Werkzeuge.....	34
Abb. 19 : Screenshot of Connected Papers .....	34
Abb. 20 : Iterativer Prozess des Verständnisses mittels Interviews der Linked Data .....	35
Abb. 21 : Double Diamond für die PoC-Validierung mit dem Thesis-Expert .....	36
Abb. 22 : Interviews zur Verständigung über die Ermüdungsnachweise.....	36
Abb. 23 : Foto der Schwarzwaldbrücke .....	37
Abb. 24 : Verarbeitungsschritte für Wetterdaten.....	38
Abb. 25 : Verarbeitungsschritte für Verkehrsdaten .....	38
Abb. 26 : Ontologie-basiertes Modellierungskonzept .....	39
Abb. 27 : Lokalisation der Messpunkte und Datenquellen .....	40
Abb. 28 : Turtle-File in WebOWL .....	41
Abb. 29 : Datenanalyse in WebProtégé .....	41
Abb. 30 : Turtle-File in GraphDB mit Wetterdaten und TTL-Skript.....	42
Abb. 31 : Übersicht und Informationen der Verkehrszählstelle 277 (Quelle: ASTRA-Dashboard).....	43
Abb. 32 : Turtle-File in GraphDB mit Verkehrsdaten und TTL-Skript .....	44
Abb. 33 : Position der Achsen und der WIM-Messstation auf der Schwarzwaldbrücke.....	45
Abb. 34 : Visualisierung von WIM-Daten als RDF-Graph in GraphDB.....	46
Abb. 35 : Beispiel eines realen Displacement-Datensatzes (Quelle: Move Solutions S.p.A).....	47
Abb. 36 : Einfluss von Temperatur und Verkehr auf das statische System.....	47
Abb. 37 : Positionierung von Dehnungsmessstreifen auf der Dehnungsfuge .....	48
Abb. 38 : Geodaten- und Geometriebasis der IFC-Datei (Quelle: 3d.geo.bs.ch - Basel-Stadt).....	49
Abb. 39 : Strukturelle Gliederung in Überbau und Unterbau.....	50
Abb. 40 : Bauteilidentifikation im digitalen Brückenmodell.....	50
Abb. 41 : semantisches Grobkonzept des Digitalen Zwillings.....	51
Abb. 42 : Allgemeine Ebene der Breakdown-Struktur im IFC-Schema .....	52
Abb. 43 : Spezialisierung von IfcFacilityPart für Brückenkomponenten .....	52
Abb. 44 : Entwurfslogiken für eine Brücke.....	53
Abb. 45 : Allgemeiner Strukturbaum einer Brücke (eigene Darstellung) .....	53
Abb. 46 : Strukturbaum einer Balkenbrücke mit Kardinalität.....	55
Abb. 47 : Visuelle Darstellung der funktionalen Hauptgliederung .....	56
Abb. 48 : Visuelle Darstellung der Komponenten der Brücke .....	56
Abb. 49 : Schemamodell der IFC-File .....	57
Abb. 50 : Ontologische Struktur BROT-BRCOMP mit RDF – Beziehungen.....	58
Abb. 51 : Basismapping zwischen BROT und IFC 4.3.....	60
Abb. 52 : Ontologische Struktur BROT-BRCOMP mit Fugenklasse .....	62
Abb. 53 : Mapping von Fugen zwischen IFC 4.3 und BROT-BRCOMP .....	63

---

Abb. 54 : Architektur des entwickelten PoCs .....	67
Abb. 55 : Screenshot Viewer mit 3D-Modell und Ontologieansicht .....	68
Abb. 56 : Zugriff von YASGUI auf GraphDB über ngrok .....	69
Abb. 57 : SPARQL-Abfrage mit YASGUI mit CORS-Fehlermeldung .....	70
Abb. 58 : Teil des lokal gespeicherten Ergebnisses mit YASGUI .....	70
Abb. 59 : SPARQL-Abfrageergebnis .....	71
Abb. 60 : Semantische Verknüpfung kritischer Ereignisse .....	72

## VII Tabellenverzeichnis

Tab. 1 : Anforderungen an Ontologien .....	21
Tab. 2 : Kriterien zur Analyse von Ontologien .....	23
Tab. 3 : Ontologien im Vergleich .....	24
Tab. 4 : Zentrale Aufgaben und deren Funktion .....	27
Tab. 5 : Ausgewählte Triplestores im Vergleich.....	29
Tab. 6 : Funktionsvergleich der fünf Viewer-Tools.....	31
Tab. 7 : Überblick über die verwendeten Datenquellen, eigene Darstellung .....	40
Tab. 8 : Datenfilterung mit URI und Datensatz .....	42
Tab. 9 : SOSA-Modellierungsregeln für das Python-Skript.....	42
Tab. 10 : SOSA-Modellierungsregeln für das Python-Skript.....	44
Tab. 11 : SOSA-Modellierungsregeln für das Python-Skript.....	46
Tab. 12 : SOSA-Modellierungsregeln für das Python-Skript.....	48
Tab. 13 : Datenquellen für die IFC-Datei .....	49
Tab. 14 : Brückenarten nach IfcBridgeTypeEnum .....	54
Tab. 15 : Mapping IFC 4.3 - BRCOMP .....	63
Tab. 16 : Die Bedeutung von Soll- und Istwert bei Dehnungsfugen.....	71

## VIII Hilfsmittelverzeichnis

Eingesetzte Hilfsmittel	Zweck	Einsatzgebiet
<b>Allplan Civil 2025</b> (BIM-Autorensoftware)	Erstellung des geometrischen Brückenmodells in 3D	Diente zur manuellen IFC-Modellierung der Brücke
<b>ChatGPT 4o</b> (KI-gestützter Assistent)	Unterstützung bei Struktur und Konzeptentwicklung	Hilfe bei der Gliederung, Formulierung technischer Inhalte
<b>DeepL Übersetzer + Write</b> (Neuraler Übersetzer)	Unterstützung Textformulierung und Übersetzungen	Hilfe bei sprachlicher Optimierung und Übersetzungen
<b>GraphDB Desktop</b> (Graphdatenbank)	Verwaltung und Abfrage semantischer Daten	Speicherung der Ontologieinstanzen
<b>IfcOpenShell</b> (Python-Bibliothek)	Konvertierung der IFC-Datei in ein lesbares 3D-Modell	Darstellung im Viewer
<b>Lexocad V. 31.0</b> (BIM-Autorensoftware)	Erstellung des geometrischen Brückenmodells in 3D	Diente zur manuellen IFC-Modellierung der Brücke
<b>Miro</b> (Online-Whiteboard)	Erstellung von Konzeptzeichnungen und Abbildungen	Verwendung zur grafischen Darstellung
<b>Ngrok</b> (TunnelAPI-Tool)	Bereitstellung eines temporären öffentlichen Zugriffs auf Lokal	Verbindung zwischen lokalem GraphDB und YASGUI
<b>Noun Project</b> (Vektorsymbolbibliothek)	Bereitstellung grafischer Icons für Abbildungen	Verwendung standardisierter Symbole
<b>Python</b> (Programmiersprache)	Konvertierung der Daten in RDF und Erstellung des Viewers	Werkzeug für Mapping und PoC-Viewer
<b>Streamlit</b> (Python-Webframework)	Aufbau einer Weboberfläche für die Viewer-Darstellung	Ermöglicht den PoC-Viewer
<b>Visual Studio Code v1.99.3</b> (Entwicklungsumgebung)	Bearbeitung von Python- und RDF-Dateien	Entwicklung, Test und Anpassung des Prototyps
<b>WebVOWL</b> (Visualisierungstool)	Darstellung der Turtle-File als Ontologiestruktur	Visualisierung der TBox für die Abbildungen
<b>Word</b> (Textverarbeitung)	Erstellung und Formatierung der finalen Dokumentation	Layout, Strukturierung und Druckvorbereitung der MTH
<b>YASGUI</b> (SPARQL-Webinterface)	Abfrage semantischer Daten	Testen und Validieren von SPARQL-Abfragen
<b>Zotero 7.0.15</b> (Literaturverwaltungssoftware)	Verwaltung und Zitierung wissenschaftlicher Quellen	Organisation und Einbindung von Literaturverweisen

## IX Anhänge

### X.1 Ermüdung von Brücken

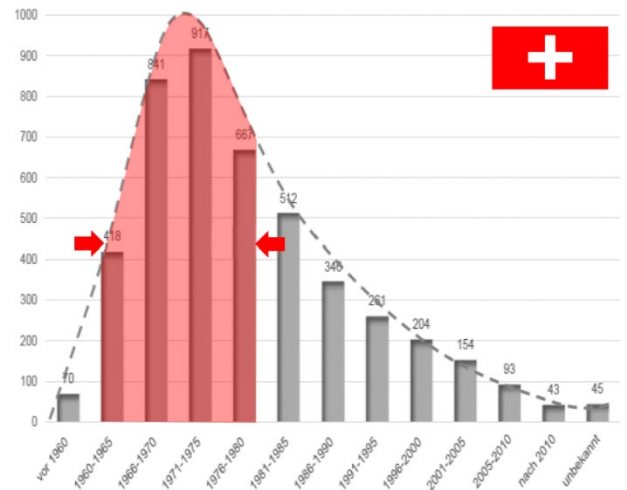
Brückenbauwerke sind im Betrieb über Jahrzehnte hinweg zyklischen Beanspruchungen durch Verkehrslasten ausgesetzt (Bianchi et al., 2021).

Langfristig können diese zu Ermüdungserscheinungen im Material führen, insbesondere an kritischen Details wie Dehnungsfugen oder Übergängen zwischen Baugliedern. Während in der Vergangenheit vornehmlich statische Lasten von Relevanz waren, ist heute bekannt, dass auch bei geringen Spannungsamplituden über Millionen von Lastzyklen Ermüdungsschäden auftreten können.

Das Thema Ermüdung ist daher hochaktueller denn je, denn der Boom im Brückenbau fand in der Schweiz zwischen den 1960er- und 1980er-Jahren statt (Justen et al., 2022).

Es ist evident, dass mehr als 50 Prozent der nationalen Brückenbauwerke aus dieser Epoche stammen und gegenwärtig ein Alter von circa 60 Jahren aufweisen.

Zu dieser Zeit war die Erforschung der Thematik der Ermüdung noch in den Anfängen und fand daher bei der Planung keine Berücksichtigung. In der Konsequenz wurden zahlreiche dieser Bauwerke ohne spezifischen Ermüdungsnachweis errichtet (siehe auch Anhang X.12).



Brückenbau in CH, in Anlehnung an Bianchi ETH-Präsentation, 2023

Darüber hinaus hat sich die Verkehrssituation grundlegend modifiziert (Justen et al., 2022): Der zunehmende Schwerverkehr – oft über 40 Tonnen und mit mehreren Achsen – sowie dichter Verkehr über viele Stunden pro Tag verstärken die zyklische Beanspruchung erheblich. Eine präzise Ermüdungsbewertung ist daher essenziell geworden.

#### Normative und Methoden

Die Ermüdungsnachweise in der Schweiz basieren auf den SIA-Normen: In Bezugnahme auf die europäischen Normen, insbesondere (EN 1992-2:2014), werden gemäss (SIA 261:2020) und (SIA 261/1:2020) drei Nachweismethoden unterschieden:

##### 3 Methoden für den Ermüdungsnachweis

	Nachweismethode	Beschreibung	Verwendung
1	<b>Dauerfestigkeit</b>	Direkter Vergleich zwischen maximaler Spannungsamplitude und dem Grenzwert	Einfache und konservative Methode. Wird bei Voruntersuchungen oder für wenig beanspruchte Details verwendet.
2	<b>Schadensakkumulation (Rainflow)</b>	Bewertung der Restlebensdauer durch Zählung realer Spannungsschwankungen	Wird verwendet, wenn reale Verkehrsdaten oder Monitoring vorhanden sind. Geeignet für kritische Details.
3	<b>Schadensäquivalenzfaktoren (λ-Methode)</b>	Vereinfachtes Modell mit Faktoren λ <sub>1</sub> –λ <sub>4</sub> für Verkehr, Dauer, Geometrie usw.	<b>Standardmethode gemäss SIA 261/1.</b> Wird fehlenden Messdaten eingesetzt. Kann konservativ sein.

In der Schweiz findet die Lambda-Methode für die Überprüfung der Ermüdung gemäss der Norm (SIA 261/1, 2020) den Standard. Die Methode bedient sich idealisierter Lastmodelle (beispielsweise Punktlasten, standardisierter Einflüsse), etwa 20 Einflusslinien und basiert in der Regel auf den Wöhler-Kurven für Stahl. Dies kann zu konservativen Ergebnissen führen.

Aus diesem Grund wurde die Lambda-Methode in den letzten Jahren weiterentwickelt (Bianchi et al., 2021), wodurch eine realistischere Berechnung ermöglicht wird, die auch reale Verkehrsdaten, erweiterte Einflussbereiche und Ermüdungskurven von Beton berücksichtigt. Die Faktoren  $\lambda_1$  bis  $\lambda_4$  berücksichtigen die kritische Länge, das Verkehrsaufkommen, die Nutzungsdauer und die Anzahl der betroffenen Fahrspuren.

*Vergleich zwischen der aktuellen Nachweisen mit dem Forschungsstand, eigene Darstellung*

Aspekt	Klassische $\lambda$ -Methode (SIA 261/1:2020)	Mit Bianchi-Algorithmen (Bianchi et al., 2021)
Verkehrsmodell	Idealisiert (Punktkräfte)	Real gemessene Daten
Einflusslinien	Ca. 20 typische Linien	> 100'000 simulierte Linien
Materialmodell	Ideal für Stahl	Auch für Beton
$\lambda$ -Faktoren	Tabellenbasiert	Dynamisch, berechnet aus realen Verkehrsdaten
Einsatzbereich	Projekte mit fehlenden Verkehrsdaten	Nachweise für bestehende Bauwerke
Genauigkeit	Hoch konservativ	Präzisiere Lebensdauerprognosen

Algorithmen dieser Art bedürfen der Verwendung realer Daten, die jedoch oftmals aus diversen Systemen und Formaten stammen und sich infolgedessen nur schwer in konventionelle Arbeitsprozesse integrieren lassen.

### Vorteil mit einem Digital Twin

Die Weiterentwicklung des Ermüdungsnachweises nach (Bianchi et al., 2021) verdeutlicht, dass für eine präzise Berechnung kombinierte Daten erforderlich sind, insbesondere reale Verkehrsdaten, Spannungs- und Dehnungsmessungen sowie genaue Geometrieinformationen.

Der Einsatz eines digitalen Zwillings, der auf LD-Technologien basiert, stellt in diesem Kontext die optimale Lösung dar. Die sensorischen Messdaten (beispielsweise aus Dehnungsmessgeräten) werden in diesem Modell semantisch mit der Brückengeometrie (IFC 4.3) sowie den Materialkennwerten verknüpft.

Durch den Einsatz spezifischer SPARQL-Abfragen können gezielt die Informationen extrahiert werden, die für die Anwendung der von (Bianchi et al., 2021) entwickelten Berechnungsmodelle und Algorithmen in MATLAB erforderlich sind.

Die Entwicklung eines intelligenten, interoperablen Modells für das aktive Erhaltungsmanagement von Brücken ist somit realisierbar.

## X.2 Digital Model

Ein «*Digital Model*» (Digitales Modell) bezeichnet eine statische digitale Repräsentation eines geplanten oder bestehenden physischen Objekts. Es besteht keine Verbindung zu Echtzeitdaten, weshalb Änderungen am realen Objekt – etwa infolge baulicher Modifikationen – manuell in das Modell eingepflegt werden müssen (Kritzinger et al., 2018). Es handelt sich folglich um eine nicht-synchronisierte Darstellung, bei der kein kontinuierlicher Informationsfluss zwischen physischer und digitaler Welt besteht.

*Digital Models* finden insbesondere in der Planungsphase Anwendung. Sie dienen als Grundlage für Visualisierungen, Simulationen und statische Berechnungen (Gao et al., 2024).

Ein typisches Beispiel für ein solches digitales Modell ist ein Brückenbauwerk, das in der Planungsphase mit Hilfe einer BIM-Autorensoftware erstellt wird. Es bildet die Struktur geometrisch (und semantisch) ab, wird jedoch nach der Bauausführung häufig nicht weiter gepflegt und verbleibt daher als isoliertes Modell ohne Anbindung an Sensordaten (Jasiński et al., 2023).

## X.3 Digital Twin

Ein «*Digital Twin*» repräsentiert die fortschrittlichste Form der digitalen Darstellung. Er ist durch eine bidirektionale Kopplung mit dem physischen Objekt verbunden und ermöglicht somit nicht nur die laufende Synchronisierung von Daten, sondern auch eine aktive Rückwirkung auf das reale System (Kritzinger et al., 2018).

Im Unterschied zu digitalem Modell und digitaler Schatten ist der digitale Zwilling mit intelligenten Funktionen ausgestattet, zu denen Datenanalyse, Simulation, Vorhersage und im fortgeschrittenen Stadium sogar autonome Entscheidungsfindung zählen (Kang et al., 2024).

Gemäss den Experteninterviews (im Anhang Interview X.11) ist es möglich, dass einige dieser Funktionen, die darauf abzielen, Entscheidungsprozesse zu unterstützen, direkt durch die Verwendung von miteinander verbundenen Wissensgraphen und maschinenlesbaren Metadaten erfolgen.

Gemäss (Kang et al., 2024) kann ein digitaler Zwilling im Brückenbau alle Lebenszyklusphasen unterstützen, von der Planung über den Betrieb bis hin zur Instandhaltung und zum Rückbau.

In Kombination mit Technologien wie FEM-Modellen, IoT-Sensorik, KI-gestützter Auswertung und Verkehrsanalysen wird der digitale Zwilling zu einem aktiven Steuerungselement im Infrastrukturmanagement (Heise et al., 2024).

Wie (Mousavi et al., 2024) betonen, mangelt es vielen gegenwärtigen Brücken-Zwillingen an einer klar strukturierten Entscheidungslogik. Zwar existieren Ansätze zur Echtzeitüberwachung und Modellaktualisierung, doch die Integration intelligenter *Decision Support Systems* (DSS) wird als essenzieller nächster Schritt betrachtet.

Die Generierung datenbasierter Empfehlungen – etwa für Erhaltungsprioritäten – ist ein wesentlicher Aspekt, um die Zuverlässigkeit der Instandhaltungsentscheidungen zu erhöhen. Die Autoren betonen die Relevanz eines mehrschichtigen DT-Frameworks, das über die reine Datenvisualisierung hinausgeht und auch proaktiv agieren kann, beispielsweise bei Ermüdung der Brücken.

Ein praktisches Beispiel ist ein intelligenter Brücken-Zwilling, der nicht nur strukturelle Zustandsdaten in Echtzeit empfängt, sondern auch kritische Schwellenwerte erkennt, Sanierungsempfehlungen generiert oder bei Bedarf automatisierte Warnmeldungen auslöst (Jasiński et al., 2023). In dieser Form fungiert der *Digital Twin* als zentrales Werkzeug für vorausschauende Wartung (*predictive maintenance*) und risikobasiertes Asset Management (ISO 55001:2024)

## X.4 Digitaler Zwilling im Brückenbau

Im Bereich der Brückenerhaltung ist der Einsatz von Digital Twins ein vielversprechender Ansatz, um Instandhaltung und Betrieb integriert und datenbasiert zu gestalten. Wie (Kang et al., 2024) betonen, zeigen DTs ein grosses Potenzial in allen Lebenszyklusphasen eines Bauwerks - von der Planungs- und Bauphase über den Betrieb bis hin zur Rückbauplanung.

Der DT wird dabei nicht nur als Visualisierungswerkzeug verstanden, sondern als umfassende, dynamische Plattform, die physische Objekte mit digitalen Modellen in Echtzeit verbindet, z.B. über Sensordaten, Inspektionsdaten oder Betriebsinformationen (Kang et al., 2024).

(Jasiński et al., 2023) gehen noch einen Schritt weiter und beschreiben ein vollständiges Konzept zur Erstellung von DTs auf der Basis von FEM-Modellen (*Finite Elemente Methode*), die durch Belastungsversuche (z.B. statische und dynamische Versuche) validiert werden.

Diese Kombination wird als wesentlich angesehen, um verlässliche Aussagen über das reale Tragverhalten einer Brücke treffen zu können. Mit Hilfe von Digital Twins kann beispielsweise die Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Verformungen analysiert oder die Nachgiebigkeit von Spannweiten unter Last bewertet werden - ein zentraler Schritt in der modernen Brückenbewertung (Jasiński et al., 2023).

Darüber hinaus betonen (Mousavi et al., 2024), dass aktuelle DT-Anwendungen im Brückenmanagement häufig nur Teilaspekte des Lebenszyklus abdecken, was ihr volles Potenzial begrenzt. Gemäss dem Paper wird die Implementierung eines mehrschichtigen DT-Frameworks als eine Möglichkeit zur Gewährleistung einer durchgängigen Datenverbindung von der Planungsphase bis zur Erhaltungsphase erachtet.

Das vorliegende Framework integriert neben physischer und digitaler Repräsentation auch Datenverbindung, semantische Modellierung sowie eine Entscheidungs- und Visualisierungsschicht. Dieser Ansatz ermöglicht insbesondere in Bezug auf alternde Infrastrukturen die Entwicklung einer vorausschauenden Instandhaltungsstrategie.

Ein besonders sensibler Aspekt in der Brückeninstandhaltung betrifft mechanisch und thermisch hoch beanspruchte Bauteile, wie z.B. Dehnfugen.

Sowohl (Kang et al., 2024) als auch (Heise et al., 2024) betonen die Bedeutung einer strukturierten Datenverknüpfung sowie den Einsatz graphbasierter Modellierungsansätze (z.B. *Neo4j*) zur ganzheitlichen Analyse von Infrastruktursystemen. Dieser Ansatz ermöglicht es, auch besonders sensible oder wartungsintensive Komponenten wie Dehnfugen gezielt zu modellieren, mit Zustandsdaten zu verknüpfen und über den gesamten Lebenszyklus digital zu begleiten.

(Heise et al., 2024) zeigen am Beispiel eines prototypischen Systems, wie Zustandsdaten von Brücken mit Verkehrslastdaten kombiniert werden können, um strukturelle Belastungen besser zu verstehen und Instandhaltungsmassnahmen fundierter zu planen.

Auch wenn konkrete Bauteile wie Fugen nicht benannt werden, ist der methodische Rahmen offen genug, um genau solche Details in zukünftigen Anwendungen - etwa im Kontext von Ermüdungsanalysen - zu berücksichtigen.

Daraus ergibt sich, dass digitale Zwillinge im Bereich der Brückenerhaltung ein flexibles und leistungsfähiges Werkzeug darstellen, um auch bisher schwer erfassbare Brückenkomponenten datenbasiert zu überwachen, zu analysieren und vorausschauend instand zu halten.

## X.5 LD: Wiederverwendung und Anreicherung

Der zentrale Mehrwert von LD liegt in der Möglichkeit zur Wiederverwendung und semantischen Anreicherung bestehender Datenmodelle (Borrmann et al., 2021).

LD kann dabei in Kombination mit international etablierten Vokabularen und Ontologien wie OWL, SKOS, FOAF oder DCAT zum Einsatz gebracht werden. Diese ermöglichen eine konsistente, interoperable Beschreibung von Daten in unterschiedlichen Domänen – von Bauelementen über Personen bis hin zu Datenkatalogen (Borrmann et al., 2021).

Der Prozess der Modellierung wird durch den Einsatz und die Kombination standardisierter Ontologien wie BOT (*Building Topology Ontology*), PRODUCT, PROPS oder GEOM realisiert. Diese Ontologien spezifizieren jeweils spezifische Aspekte eines Bauwerks, wie beispielsweise die Topologie, die Produkteigenschaften oder die Geometrie, und stellen diese in modularer Form dar (Bucher et al., 2024).

Ein Vorteil besteht darin, dass eine Anpassung oder Restrukturierung bestehender Datenmodelle nicht erforderlich ist, um neue Informationen zu integrieren. Semantische Verlinkungen ermöglichen die Anreicherung zusätzlicher Inhalte aus externen Quellen, ohne dass die Originalstruktur verändert werden muss (Borrmann et al., 2021). Diese Eigenschaft erleichtert die Einbindung zusätzlicher Wissensquellen und trägt zur Robustheit und Zukunftsfähigkeit des Datenmodells bei.

Die aktuell verfügbaren Daten der Stadt Zürich (vgl. Riegelning et al., 2023) demonstrieren exemplarisch die Möglichkeit, bestehende Datenquellen durch die Verknüpfung ihrer Semantik zu erweitern und neu zu kombinieren.

## X.6 LD: Einsatz in der Schweiz

Auf nationaler Ebene wird das Thema Linked Data aktiv gefördert, beispielsweise durch die Plattform *opendata.swiss*, das offizielle Datenportal der Schweizer Behörden (BFS, 2020). Das Ziel besteht darin, Daten nicht nur offen, sondern auch interoperabel, semantisch verknüpft und langfristig nutzbar bereitzustellen. Des Weiteren findet dieses Konzept bereits auf Verwaltungsebene Anwendung: Dies kann als Beispiel für die Umsetzung von *Open Government Data* (OGD) mit LD betrachtet werden (BFS, 2025a), wie es die Stadt Zürich praktiziert (Riegelning et al., 2023). Im Rahmen ihrer Initiative hat die Stadt Zürich verschiedene Datensätze wie Statistiken zu Eigennamen, geografische Daten oder Wahlergebnisse öffentlich zugänglich gemacht. Die Publikation erfolgt strikt im RDF-Format und ermöglicht sowohl flexible als auch zielgerichtete Abfragen über *Endpoint*.

Darüber hinaus existieren weitere Plattformen, die auf LD-Technologien basieren und SPARQL-Endpunkte bereitstellen. Ein Beispiel ist LINDAS (*Linked Data Services*) des Bundesarchivs (BAR), der verschiedene Datensätze aus dem öffentlichen Sektor interoperabel und semantisch erschlossen anbietet (BAR, 2025b).

Ein weiteres Beispiel ist der von Zazuko GmbH betriebene SPARQL-Endpunkt *lod.opentransportdata.swiss*, der offene Transport- und Mobilitätsdaten bereitstellt im RDF-Format angeboten, sodass diese flexibel abgefragt, kombiniert und für Mobilitätsdienste weiterverwendet werden können (Zazuko GmbH, 2025b).

Gemäss den im Anhang Interview X.9 dargelegten Interviews findet RDF zunehmend Anwendung in technologiegestützten Interoperabilitätsprojekten, wie beispielsweise I14Y, insbesondere im Kontext der föderalen Datenharmonisierung (BFS, 2025b). Die Verbindung von offenen Daten mit semantischer Verknüpfung fördert demnach nicht nur die Transparenz, sondern bildet auch eine elementare Basis für innovative Anwendungen, wie etwa digitale Zwillinge (vgl. Anhang Interview X.11).

Die bisherigen Beispiele aus der Schweiz zeigen, dass Linked Data als Schlüsseltechnologie für die Bereitstellung, Verknüpfung und Wiederverwendung offener Verwaltungs- und Mobilitätsdaten etabliert ist. Es konnte nachgewiesen werden, dass RDF-basierte Strukturen zentrale Aspekte wie Transparenz, Interoperabilität und nachhaltige Nutzung von Daten gemäss der OGD-Prinzipien (BFS, 2025a) fördern.

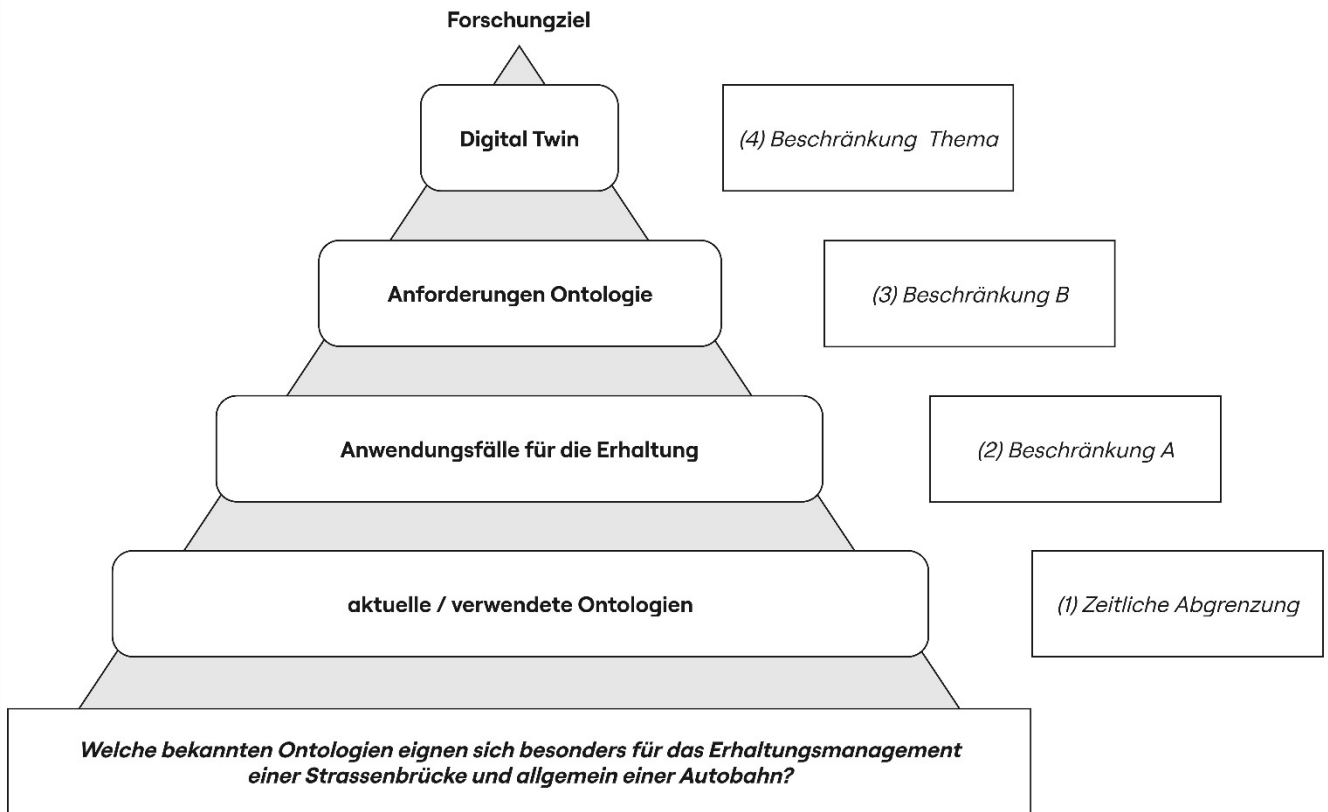
Die vorliegende Masterarbeit orientiert sich an diesen nationalen Entwicklungen und leistet durch die Anwendung von LD-Standards im Kontext von Brückeninfrastrukturen einen direkten Beitrag zur angestrebten digitalen Transformation.

## X.7 Forschungsfrage

### Forschungsziel

**Welche bekannten Ontologien eignen sich besonders für das Erhaltungsmanagement einer Strassenbrücke und allgemein einer Autobahn?**

Es wird eine systematische Recherche des Standes der Technik der aktuellen Ontologien für den Brückenbau, insbesondere für Autobahnbrücken, durchgeführt.



Um das Ziel dieser Recherche zu erreichen, wurden folgende Teilforschungsfragen formuliert:

(1)	<p><b>Welche Ontologien werden derzeit im Strassenbau und insbesondere bei Brücken verwendet?</b>                  Zeitliche Abgrenzung: Fokus auf den Stand der Technik von 2014/2019 bis 2024</p>
(2)	<p><b>In welchen Anwendungsfällen wird Erhaltung für Ontologien verwendet?</b>                  Thematische Einschränkung A: Fokus auf Erhaltung</p>
(3)	<p><b>Welche spezifischen Anforderungen müssen Ontologien erfüllen?</b>                  Thematische Einschränkung B: Interoperabilität, Erweiterbarkeit, RDF- Kompatibilität</p>
(4)	<p><b>Welche bereits existierenden Ontologien können dazu dienen, einen digitalen Zwilling einer Strasse oder Brücke für das Erhaltungsmanagement zu erstellen?</b>                  Beschränkung Thema: Anwendung auf den Digital Twin</p>

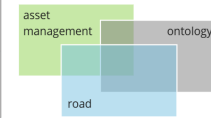
## X.8 Suchen und Resultaten

### Suche A

Suche A:

	Begriff 1	Begriff 2	Begriff 3
DE	"Erhaltungsmanagement"	"Strasse" und "Autobahn"	"Ontologie" und "linked data"
EN	"asset management" AND "maintenance" OR "conservation"	"road" AND "highway"	"ontology" AND "linked data"

Suchstring 1:  
 "asset management" AND "road" AND "ontology"  
 Suchsprache: Englisch  
 Zeitfenster: 2014-2024



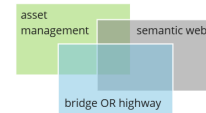
SUCHE A (in Google Scholar)						Anmerkungen
Suche A1	Suchstring 1	AND				
Suche A2	Suchstring 1	AND	AND	AND	AND	
Begriff 1	"asset management"	"maintenance"	"conservation"			
Begriff 2	"road"			"highway"		
Begriff 3	"ontology"				"linked data"	
Ergebnisse A1	2'540	0				"conservation" ist nicht als Stichwort geeignet
Ergebnisse A2			525	126	15	Es wurden nur die Titels gelesen und es wurde festgestellt, dass die Ergebnisse nicht relevant waren

### Suche B

Suche B:

	Begriff 1	Begriff 2	Begriff 3
DE	"Erhaltungsmanagement"	"Brücke" oder "Autobahn"	"Ontologie,-n" AND "linked data" oder "semantic web"
EN	"asset management" AND "maintenance" OR "monitoring" OR "inspection"	"bridge" UND "highway"	"ontology" OR "ontologies" AND "linked data" OR "semantic web"

Suchstring 2:  
 "asset management" AND ("road" OR "highway") AND "semantic web"  
 Suchsprache: Englisch  
 Zeitfenster: 2014-2024



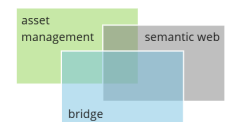
SUCHE B (in Google Scholar)						Anmerkungen
Suche B	Suchstring 2	AND	AND	AND	AND	
Begriff 1	"asset management"	"monitoring"		"inspection"		
Begriff 2	"bridge" UND "highway"					
Begriff 3	"semantic web"		"ontology"		"linked data"	
Ergebnisse B	1'010	771	448	206	77	Es wurden nur die Titels gelesen und es wurde festgestellt, dass die Ergebnisse <b>relevant</b> waren
					12	Zeitfenster: 2024-2024

### Suche C

Suche C:

	Begriff 1	Begriff 2	Begriff 3
DE	"Erhaltungsmanagement"	"Brücke"	"Ontologie,-n" AND "linked data" oder "semantic web"
EN	"asset management" AND "maintenance" OR "monitoring" OR "inspection"	"bridge"	"ontology" OR "ontologies" AND "linked data" OR "semantic web"

Suchstring 3:  
 "asset management" AND "bridge" AND "semantic web"  
 Suchsprache: Englisch  
 Zeitfenster: 2014-2024



SUCHE C (in Google Scholar)						Anmerkungen
Suche C	Suchstring 2	AND	AND	AND	AND	
Begriff 1	"asset management"		"maintance"		"inspection"	
Begriff 2	"bridge"					
Begriff 3	"semantic web"	"ontology"	"linked data"			
Ergebnisse C	1'000	682	309	256	106	
					54	AND "digital twin"
					10	Zeitfenster: 2024-2024

## X.9 Interview 1

### Expertinterview Lien Beroggi

#### Expertinterview mit Lien Beroggi

Kontakt: [REDACTED]

#### Interoperability I14Y<sup>1</sup> Intern FSO-BFS

Schwerpunkte: Semantic Web, RDF, Linked Data

[REDACTED]

Datum, Zeit: 24.02.2025, 20:25 - 21:00

Ort: Bern

#### Einstieg – 5 min

- Begrüssung
- Themen und Beschreibung von Dauer und Ablauf
- Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Interviewstudie (**Aufnahme**)

#### Traktanden – 15 min

- **Linked Data / Semantic Web** (generell)
- **Projekt I14Y** (spezifisch)

#### Ausblick – 10 min

- Evtl. Nachfrage zu Unklarheiten
- **Weitere Vorgehen**
- Auswertung der Ergebnisse und Zusendung des Interviewprotokolls per Mail an Lien
- im April/Mai ein weiteres Interview zum Prototyp für Feedback
- Einverständniserklärung Interview schicken

---

<sup>1</sup> I14Y: Interoperabilitätsplattform des Bundesamts für Statistik BFS

## Expertinterview Lien Beroggi

### Linked Data / Semantic Web

*Se dovesse descrivere in poche parole l'approccio Linked Data/Semantic Web, come lo descriverebbe? E invece la tecnologia RDF?*

Wenn Sie den Ansatz Linked Data/Semantic Web in wenigen Worten beschreiben müssten, wie würden Sie ihn beschreiben? Und wie würden Sie stattdessen die RDF-Technologie beschreiben?

*Il Semantic Web ha l'obiettivo di rendere i dati comprensibili non solo agli esseri umani, ma anche alle macchine, definendo una semantica condivisa. Ogni oggetto viene descritto in modo univoco e standardizzato, così che tutti possano usare e interpretare la stessa definizione.*

*Il Linked Data è un insieme di principi per pubblicare e collegare dati sul Web in modo strutturato, sfruttando identificatori univoci (URI) e relazioni semantiche tra le informazioni (soggetto predicato oggetto).*

*L'RDF (Resource Description Framework) è il modello di base su cui si costruisce il Linked Data. Organizza i dati in triple (soggetto predicato oggetto), dove il predicato definisce la relazione tra soggetto e oggetto. Questo permette di creare reti di dati interconnessi con significati espliciti.*

*RDF è stato il primo formato per rappresentare queste triple, ma oggi esistono alternative più leggibili, come Json LD o Turtle, più comunemente usato al giorno d'oggi.*

*Lei ha anche conoscenze della metodologia BIM: cosa ne pensa dell'approccio Linked Data nel mondo BIM?*

Sie haben auch Kenntnisse der BIM-Methodik: Was halten Sie vom Linked Data-Ansatz in der BIM-Welt?

*L'integrazione di Linked Data e BIM potrebbe rivoluzionare il settore delle costruzioni e della gestione degli edifici, facilitando l'accesso ai dati, la gestione efficiente delle risorse, l'analisi avanzata (con AI e LLM).*

*BIM gestisce una quantità enorme di dati relativi a un edificio, con il rischio di ridondanza e scarsa interoperabilità. Se questi dati vengono definiti semanticamente attraverso Linked Data, si possono eliminare duplicazioni e migliorare la loro integrazione e accessibilità. Grazie a Linked Data, possiamo anche scoprire e integrare informazioni che inizialmente non erano visibili o note, migliorando analisi e processi decisionali.*

*La chiave dei Linked Data sta nel loro stesso nome: collegare i dati; questi collegamenti permettono di ottenere più sapere dalla stessa quantità di dati, permettono in altre parole di sfruttare meglio e più a fondo la potenzialità dei dati in nostro possesso (spremere tutto il sapere che possiamo ricavare dalla stessa quantità di dati).*

## Expertinterview Lien Beroggi

### Projekt I14Y

*In questo momento sta lavorando al progetto I14Y. In che modo avete integrato o avete intenzione di integrare l'approccio dei Linked Data/Semantic Web e la tecnologia RDF al progetto?*

Sie arbeiten derzeit am I14Y-Projekt. Wie haben Sie den Linked Data/Semantic Web-Ansatz und die RDF-Technologie in das Projekt integriert oder beabsichtigen Sie, dies zu tun?

*I14Y (Swiss Interoperability platform) è la piattaforma nazionale per la raccolta e la gestione dei metadati in Svizzera. Il suo obiettivo principale è migliorare l'interoperabilità tra i dati provenienti da diversi uffici della Confederazione, compresi enti come USTRA, e altre organizzazioni pubbliche e private. Ogni ufficio o impresa può contribuire con le proprie terminologie (concetti, liste di codici e vocabolari), i metadati dei propri dataset, dataservice (APIs), publicservice, permettendo la standardizzazione e il riutilizzo dei dati da parte di altri enti. La piattaforma stessa non ospita i dati, ma facilita il loro collegamento tra diversi sistemi, la ricerca e il ritrovamento di dati esistenti, il riutilizzo e l'armonizzazione dei dati (l'obiettivo è il once only principle: che mira a garantire che i cittadini, le istituzioni e le aziende debbano fornire determinate informazioni standard alle autorità e alle amministrazioni una sola volta).*

*Anche se al momento I14Y non usa linked data, l'approccio Linked Data e Semantic Web può svolgere un ruolo chiave nell'evoluzione di I14Y, migliorando la qualità dell'interoperabilità a livello semantico. Il mio progetto attualmente prevede la descrizione di modelli (schemi) di dataset in rdf (utilizzando prevalentemente SHACL) per essere in grado poi di visualizzare strutture complesse e di riutilizzarle (completamente o in parte). Oltre alla compatibilità tecnica (sintattica), è fondamentale che i dataset siano comprensibili e collegabili tra loro in modo semantico. La tecnologia rdf e i principi dei Linked Data possono aiutare a descrivere in modo più strutturato le relazioni tra i dati, facilitando il riutilizzo di modelli esistenti e la creazione di connessioni tra informazioni provenienti da diverse fonti.*

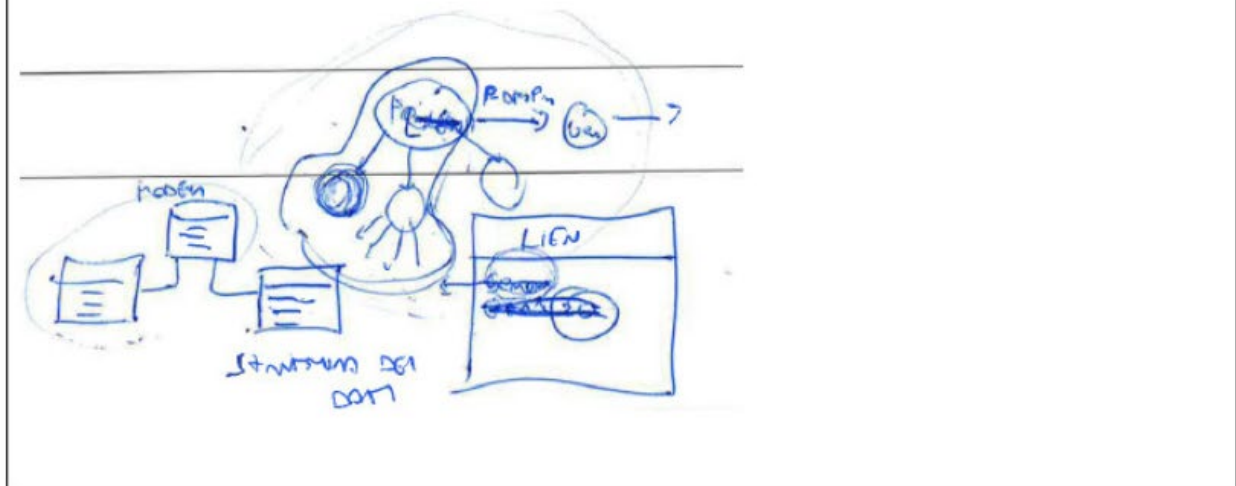
*L'obiettivo del progetto I14Y è garantire l'interoperabilità e l'accessibilità dei dati. Come avete fatto? Utilizzando una Graph-Datenbank comune? Se sì, quale?*

Das Ziel des Projekts I14Y ist es, die Interoperabilität und Zugänglichkeit von Daten zu gewährleisten. Wie haben Sie das gemacht? Haben Sie eine gemeinsame Graph-Datenbank verwendet? Wenn ja, welche?

*Il progetto I14Y ha come obiettivo principale garantire interoperabilità e accessibilità dei dati. Attualmente, non utilizziamo linked data, ma lavoriamo completamente con un database relazionale.*

## Expertinterview Lien Beroggi

Tuttavia, stiamo avviando l'implementazione di un modello basato su Linked Data per la gestione delle strutture dei dataset. Questo rappresenta un primo passo verso un'architettura più flessibile e semantica. Nel lungo termine, quasi sicuramente anche il resto degli oggetti verrà gestito in un triple store per migliorare l'interoperabilità semantica, ma questa è una visione a lungo termine. A breve termine è invece prevedibile una maggiore collaborazione con la piattaforma LINDAS (completamente in linked data).



Secondo il sito I14Y, il suo obiettivo è ottimizzare l'integrazione dei dati per facilitare la condivisione delle informazioni con altre piattaforme. Secondo lei, è possibile integrare alcuni metadati nel mio prototipo?

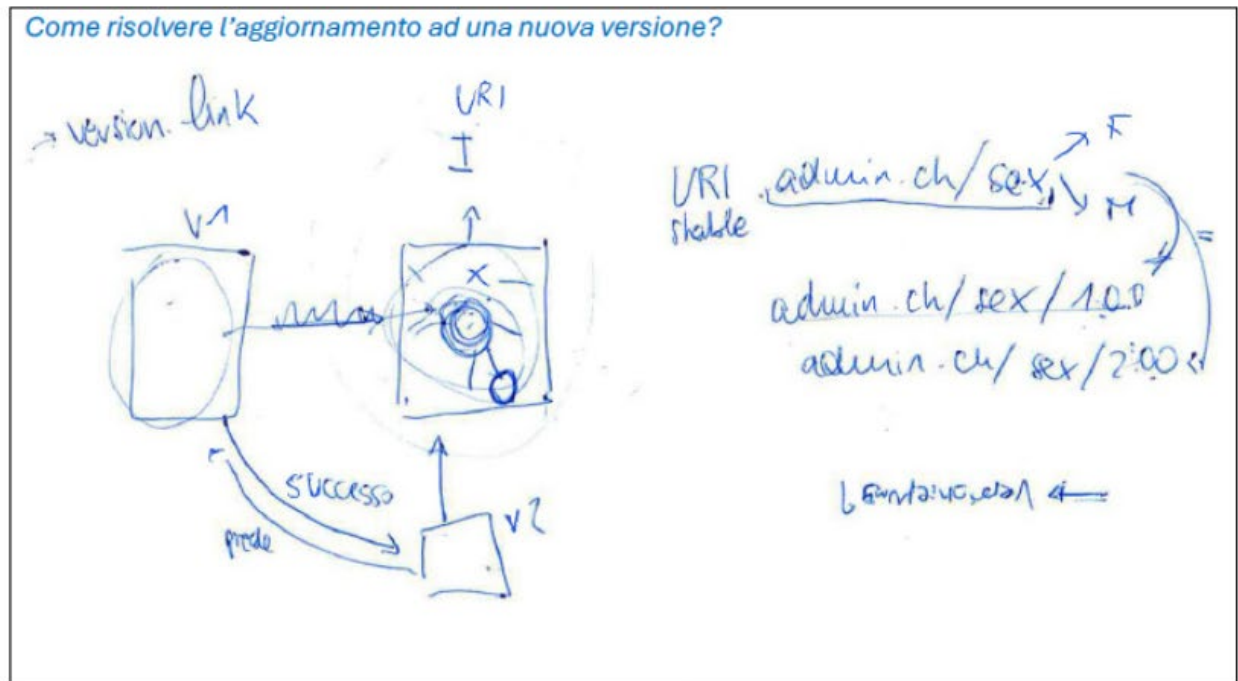
Laut der Website I14Y besteht ihr Ziel darin, die Datenintegration zu optimieren, um den Informationsaustausch mit anderen Plattformen zu erleichtern. Ist es Ihrer Meinung nach möglich, einige Metadaten in meinen Prototyp zu integrieren?

La piattaforma I14Y non raccoglie i dati stessi, ma si concentra sulla raccolta e gestione dei metadati dei dataset. L'obiettivo è ottimizzare l'integrazione dei dati e facilitare la loro individuazione e condivisione tra diverse piattaforme.

Se il tuo prototipo potrà fornire metadati (riguardanti dataset, dataservices, publicserves o concetti) che potrebbero essere interessanti da condividere con il resto della popolazione sarebbe allora possibile integrarli nella piattaforma. Tuttavia, per garantire la qualità dei dati su I14Y, abbiamo un processo di data governance molto rigido e prima di avere il diritto di pubblicare i tuoi dati devi essere accettato come "agenzia pubblicante".

**Expertinterview Lien Beroggi**

**Evtl. Nachfrage**



**Weitere Vorgehen**

## Expertinterview Lien Beroggi

### Einverständniserklärung zur Teilnahme am Interview im Rahmen der Masterthesis: Digitaler Zwilling für Strassenbrücke mit Linked Data

#### Kontaktinformation

FHNW Camus Muttenz

Hofackerstrasse 30

4132 Muttenz

Tel. [REDACTED]

Mail Studiengangleitung: [REDACTED]

#### Teilnahme am Interview

Ihre Teilnahme am Interview umfasst ein maximal einstündiges Gespräch, das wir aus wissenschaftlichen Gründen aufzeichnen möchten. Es werden Fragen zu den Themen Linked Data, RDF-Technologie sowie Triple Store und Ontologien gestellt. Darüber hinaus interessieren wir uns für Ihre Erfahrungen mit Linked Data-Projekten im Baubranche und/oder darüber hinaus.

#### Rückruf von der Teilnahme oder Widerruf der Einwilligung

Die Teilnahme am Interview ist freiwillig. Sie haben jederzeit das Recht, ohne Angabe von Gründen von der Teilnahme am Interview zurückzutreten. Sie haben ausserdem das Recht, Ihre Einwilligung zu widerrufen und Ihre personenbezogenen Daten löschen zu lassen.

#### Datenschutz

Die im Rahmen des Interviews erhobenen Daten werden ausschliesslich für diese Masterthesis verwendet. Ihr Name oder andere Angaben zu Ihrer Identität werden vertraulich behandelt, nicht veröffentlicht und nicht an Dritte weitergegeben. Ihr Beitrag wird in anonymisierter oder pseudonymisierter Form sicher gespeichert und nach Abschluss des Interviews gelöscht.

#### Einverständniserklärung

Ich habe die in dieser Erklärung enthaltenen Informationen gelesen und verstanden.

Ich erkläre mich mit der Teilnahme an diesem Interview einverstanden und stimme der Speicherung und Nutzung meiner im Rahmen der Masterthesis erhobenen Daten zu.

#### Unterschriften:

Name der teilnehmenden Person

Datum

Unterschrift

Lien Beroggi

07.03.2025

[REDACTED]

Einverständniserklärung eingeholt von

Datum

Unterschrift

Matteo Depoli

28.02.2025

[REDACTED]

## X.10 Interview 2

### Expertinterview Benedikt Hitz

Expertinterview mit Dr. Benedikt Simon Hitz

Kontakt: [REDACTED]

Wissenschaftlicher Mitarbeiter BFH

Schwerpunkte: Linked Data, Data Harmonisierung, Wiederverwendbare Daten, Open Data

[REDACTED]

Datum, Zeit: 05.03.2025, 9:00-9:30

Ort: Teams-Besprechung

#### Einstieg – 5 min

- Begrüssung
- Themen und Beschreibung von Dauer und Ablauf
- Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Interviewstudie (Aufnahme)

#### Traktanden – 15 min

- **Linked Data / RDF**
- **Ontologie / Mapping**
- **Knowledge Graphs**

#### Ausblick – 10 min

- Evtl. Nachfrage zu Unklarheiten
- **Weitere Vorgehen**
- Auswertung der Ergebnisse und Zusendung des Interviewprotokolls per Mail an Benedikt
- Einverständniserklärung Interview schicken
- Feedback Prototyp in April/Mai 2025
- Einladung im Juni zur MTH-Präsentation (25./26. Juni 2025)
- Evtl. Präsentation auf dem nächsten *Linked Data Meetup* im September

## Expertinterview Benedikt Hitz

### Linked Data

**Welche Branchen nutzen Linked Data am besten? Warum ist das Ihrer Meinung nach so? und die Baubranche?**

*Linked Data wird vor allem in der Verwaltung eingesetzt, da es die Wiederverwendbarkeit von Stammdaten ermöglicht, z.B. durch Verweise auf bestehende Informationen in den Kantonen.*

*In anderen Bereichen wie der Biochemie und der Bioinformatik wird Linked Data zur Ableitung von Zusammenhängen zwischen Wirkstoffen und Krankheiten verwendet. Diese Branche profitiert stark von Knowledge Graphs, die auf Basis bestehender Daten neue Korrelationen herstellen.*

*Die Baubranche nutzt Linked Data bisher wenig, hat aber Potenzial in Bereichen wie gesetzliche Regelungen und Materialverwendung.*

Auf der Website der BFH zum Thema Linked Data ist zu lesen: «*Linked Data nutzt das Resource Description Framework*».

**Verwenden Sie in Ihren Projekten hauptsächlich RDF, um Linked Data zu verwalten, oder integrieren Sie auch andere Technologien (JSON-LD, usw.) und nach welchen Kriterien entscheiden Sie sich?**

*Ja, RDF ist die Basis, da es Daten als Graphen mit Triples beschreibt.*

*Für die Serialisierung werden verschiedene Formate verwendet: Turtle (TTL) wegen der besseren Lesbarkeit und Dokumentation und JSON-LD für Schnittstellen zu Systemen, die JSON besser verarbeiten können.*

*Diese Entscheidung hängt primär von der Nutzungsumgebung ab: Verwaltungsdaten und statische Verknüpfungen werden oft in Turtle modelliert, während dynamische Systeme wie API-Schnittstellen mit JSON-LD arbeiten.*

**Welche Entwicklungen erwarten Sie für die Nutzung von Linked Data und RDF in den nächsten Jahren? Z.B. für grosse Player wie SBB oder ASTRA**

*Der wichtigste Treiber ist die künstliche Intelligenz (KI), die bei der Datenharmonisierung und der Beschreibung von Metadaten hilft.*

*Verwaltungseinheiten verwenden oft unterschiedliche Begriffe für ähnliche Daten. KI kann helfen, diese automatisch zuzuordnen.*

## Expertinterview Benedikt Hitz

### Ontologie

Ontologien werden häufig in Linked Data-Projekten verwendet.

**Haben Sie Projekte mit diesem Ansatz durchgeführt? Wenn ja, was waren die wichtigsten Vorteile, die Sie festgestellt haben?**

*In der Verwaltung werden Ontologien kaum genutzt, da sie oft zu komplex sind. Stattdessen setzt man eher auf Datenschemas, die die Grundstruktur von Daten definieren, ohne zu viele Abhängigkeiten zu schaffen.*

*Daten aus unterschiedlichen Quellen (z. B. Verkehrsdaten, Bauwerksdaten) zu vereinheitlichen, um interoperable Systeme zu ermöglichen.*

**Was waren die grössten Herausforderungen bei der Integration von Ontologien in Ihre Linked-Data-Projekte? Wie sind Sie damit umgegangen?**

*Eine der grössten Herausforderungen ist die Harmonisierung von Begriffen, da es viele Ontologien gibt, die dieselben Konzepte unterschiedlich benennen.*

*Im Idealfall sollten bestehende Vokabulare und Ontologien so weit wie möglich wiederverwendet werden, anstatt neue zu entwickeln.*

**Haben Sie sich auch mit dem Mapping verschiedener Ontologien beschäftigt? Wenn ja, welche Methoden und Werkzeuge haben Sie für das *Ontology Aligment* verwendet und auf welche Schwierigkeiten sind Sie dabei gestossen?**

*Nein, eine direkte Arbeit an Ontology Mapping wurde nicht durchgeführt.*

## Expertinterview Benedikt Hitz

### Knowledge Graphs

Derzeit arbeitet sie an dem Projekt: Strategische Begleitung von LINDAS Next, bei dem die LINDAS-Daten in "Knowledge Graphs" umgewandelt werden sollen.

Auf der Website des Projekts heisst es: «*Knowledge Graphs...lassen sich Datensätze sehr einfach mit Kontextinformationen (Metadaten) verknüpfen. Man spricht deshalb auch von Linked Data.*»

**Welchen Ansatz verfolgen Sie bei der Verwaltung dieser Linked Data? (Triple Store, Property Graph Database usw.)**

*Die Verwaltung erfolgt hauptsächlich über Triple Stores mit RDF-basierten Datenbanken. Alternativ gibt es Labeled Property Graphs wie Neo4j. Diese bieten Vorteile bei der Verwaltung von Metadaten, haben jedoch keinen unabhängigen Standard und sind weniger verbreitet.*

**Welche Graph-Datenbank haben Sie für die LINDAS-Datenmigration in Betracht gezogen und nach welchen Kriterien haben Sie sich entschieden?**

*Für LINDAS wurde Stardog ausgewählt, da es sich als die leistungsfähigste Lösung erwiesen hat. Alternativen wie GraphDB werden für nicht-kommerzielle Projekte verwendet, während Apache Jena als leistungsfähig, aber kompliziert in der Konfiguration angesehen wird. Die Wahl basiert auch auf Performance-Kriterien und der Kompatibilität mit bestehenden Infrastrukturen.*

**Haben Sie bereits Erfahrung mit Graph-Datenbanken in anderen Projekten? Wenn ja, welche Vorteile und Herausforderungen haben Sie dabei festgestellt?**

*Jain, aber die Vorteile von RDF-Graphen sind offene Standards und gute Interoperabilität. Eine Herausforderung ist jedoch die komplexe Konfiguration einiger Lösungen wie Apache Jena.*

## Expertinterview Benedikt Hitz

### Evtl. Nachfrage

*In der Baubranche spielt die Geometrie eine wichtige Rolle. Viele Daten liegen unstrukturiert vor oder sind schwer zugänglich. Digitale Zwillinge und Linked Data sollen helfen, Informationen dynamischer und interaktiver zu machen, z.B. für die Echtzeit-Überwachung von Brücken.*

### Weitere Vorgehen

*Die nächsten Schritte beinhalten die Präsentationen bei Linked Data Events (und die Fortsetzung der Arbeit an Datenharmonisierungsprojekten in der Baubranche.)*

## Expertinterview Benedikt Hitz

### Einverständniserklärung zur Teilnahme am Interview im Rahmen der Masterthesis:

#### Digitaler Zwilling für Strassenbrücke mit Linked Data

#### Kontaktinformation

FHNW Camus Muttenz

Hofackerstrasse 30

4132 Muttenz

Tel. [REDACTED]

Mail Studiengangleitung: [REDACTED]

#### Teilnahme am Interview

Ihre Teilnahme am Interview umfasst ein maximal einstündiges Gespräch, das wir aus wissenschaftlichen Gründen aufzeichnen möchten. Es werden Fragen zu den Themen Linked Data, RDF-Technologie sowie Triple Store und Ontologien gestellt. Darüber hinaus interessieren wir uns für Ihre Erfahrungen mit Linked Data-Projekten im Baubranche und/oder darüber hinaus.

#### Rückruf von der Teilnahme oder Widerruf der Einwilligung

Die Teilnahme am Interview ist freiwillig. Sie haben jederzeit das Recht, ohne Angabe von Gründen von der Teilnahme am Interview zurückzutreten. Sie haben ausserdem das Recht, Ihre Einwilligung zu widerrufen und Ihre personenbezogenen Daten löschen zu lassen.

#### Datenschutz

Die im Rahmen des Interviews erhobenen Daten werden ausschliesslich für diese Masterthesis verwendet. Ihr Name oder andere Angaben zu Ihrer Identität werden vertraulich behandelt, nicht veröffentlicht und nicht an Dritte weitergegeben. Ihr Beitrag wird in anonymisierter oder pseudonymisierter Form sicher gespeichert und nach Abschluss des Interviews gelöscht.

#### Einverständniserklärung

Ich habe die in dieser Erklärung enthaltenen Informationen gelesen und verstanden.

Ich erkläre mich mit der Teilnahme an diesem Interview einverstanden und stimme der Speicherung und Nutzung meiner im Rahmen der Masterthesis erhobenen Daten zu.

#### Unterschriften:

Name der teilnehmenden Person

Datum

Unterschrift

Dr. Benedikt Simon Hitz

18.03.2025

[REDACTED]

Einverständniserklärung eingeholt von

Datum

Unterschrift

Matteo Depoli

05.03.2025

[REDACTED]

## X.11 Interview 3

### Expertinterview David Bucher

#### Expertinterview mit David Bucher

Kontakt: [REDACTED]

Chair of Innovative and Industrial Construction und Ph.D. Candidate

Schwerpunkte: Decentralized in AEC, blockchain, semantic web, linked data

[REDACTED]

Datum, Zeit: 27.03.2025, 14:00-15:00

Ort: Teams-Besprechung

#### Einstieg – 15 min

- Begrüssung
- Themen und Beschreibung von Dauer und Ablauf
- Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Interviewstudie (**Aufnahme**)
- Kurze Stand der Masterthesis (in Kürze)

#### Traktanden – 30 min

- **Linked Data / RDF** (generell)
- **Ontologie / Mapping**
- **Knowledge Graphs**

#### Ausblick – 15 min

- Evtl. Nachfrage zu Unklarheiten
- **Weitere Vorgehen**
- Auswertung der Ergebnisse und Zusendung des Interviewprotokolls per Mail an David
- im Mai ein weiteres Interview zum Prototyp für Feedback
- Einverständniserklärung Interview schicken
- Einladung im Juni zur MTH-Präsentation (25./26. Juni 2025)

## Expertinterview David Bucher

### Linked Data / Semantic Web

Eine direkte Einstiegsfrage:

**Was unterscheidet Ihrer Meinung nach Linked Data vom Semantic Web? Und was unterscheidet Linked Data von RDF? (In eigenen Worten)**

Linked Data beschreibt ein Regelwerk – State of Rules (Konzept), wie Daten im Web verknüpft gemacht werden sollen. Es geht konkret darum, Daten so bereitzustellen, dass sie maschinenlesbar und verlinkbar sind.

Das Semantic Web ist viel grösser und ist die übergeordnete Vision, die sich daraus ergibt: ein weltweites Netzwerk von miteinander verknüpften Knowledge-Graphen. Linked Data ist also ein Mittel zum Zweck, das Semantic Web ist das Resultat dieser Verknüpfung. Derzeit existiert die Vision des Semantic Web in Form des KG.

RDF ist das Datenmodell (Technologie) für Linked Data. Es beschreibt Daten in Form von Tripeln (Subjekt -> Prädikat -> Objekt). RDF gehört zum State of Rules, ist aber allein noch kein Linked Data - erst wenn die Daten über das Web auffindbar und verlinkt sind, spricht man von Linked Data.

**In Ihrem letzten Paper (From BIM to Web3) wird der Linked Data Ansatz als Schlüsseltechnologie für das Konzept des Web of Data identifiziert. Ist das richtig?**

Linked Data ist nicht nur eine technische Methode, sondern auch ein zentraler Baustein für die Weiterentwicklung von Web-Technologien.

Es ist aber nicht die einzige Schlüsseltechnologie: Wichtig sind auch Konzepte wie Dezentralisierung, um grosse Datenmengen speichern zu können, und Konnektivität sowie *Trustless* und *Permissionless*.

**Welche konkreten Mehrwerte kann Linked Data im Umgang mit Bauwerksdaten für digitale Zwillinge bieten?**

Linked Data ermöglicht die semantische Verknüpfung von heterogenen Bauwerksdaten wie z.B. IFC-Modellen, Sensordaten und statischen Berichten.

(Ein zukünftiger Mehrwert besteht darin, dass Autorensoftware zukünftig direkt über Linked Data angebunden werden kann, so dass IFC als Austauschformat langfristig überflüssig wird.)

**Expertinterview David Bucher****Ontologie / Mapping**

In dem Paper BIM2WEB zitieren Sie Ontologien wie BOT /ifcOWL.

**Haben Sie vielleicht Erfahrungen mit anderen Ontologien in der Baubranche?**

Ausser BOT und IfcOWL habe ich keine direkte Erfahrung, da IfcOWL die Ontologie ist, die auf dem IFC-Schema basiert, während BOT die am häufigsten verwendete Ontologie ist, da sie sehr einfach und nicht so komplex wie IfcOWL ist.

Das Papier spricht auch von einem neuen, leichteren (Linked Building Data) LBD-Ansatz für semantische Bauwerksdaten.

**Was macht ihn Ihrer Meinung nach praktischer als ifcOWL - und sehen Sie Einsatzmöglichkeiten in realen Bauprojekten?**

Noch nicht, da bisher ein praxistaugliches Werkzeug fehlt, das den LBD-Ansatz effektiv umsetzt.  
Obwohl LBD gegenüber IfcOWL klare Vorteile bietet - wie eine einfachere Struktur, bessere Modularität und einfachere Kombination mit Ontologien wie BOT - fehlt es bisher an einer durchgängigen Unterstützung durch Softwarelösungen, die LBD in realen Bauprojekten tatsächlich nutzbar machen.

**Haben Sie sich auch mit dem Mapping verschiedener Ontologien beschäftigt? Wenn ja, welche Methoden und Werkzeuge haben Sie für das *Ontology Aligment* verwendet und auf welche Schwierigkeiten sind Sie dabei gestossen?**

Ja, aber mehr im Bereich Nachhaltigkeit (sustainability).  
Für das Mapping von Ontologien in der Baubranche empfehle ich das Papier von:  
*"The evolution of ontology in AEC: A two-decade synthesis, application domains, and future directions"* Ranjith K. Soman

## Expertinterview David Bucher

### Knowledge Graphs

Im BIM2Web-Papier wird erwähnt, dass die Daten in einer Graphdatenbank gespeichert werden, um die Abfrage über SPARQL zu unterstützen, aber es wird nicht spezifiziert, welche.

**Haben Sie Erfahrung mit Graphdatenbanken? offen oder proprietär?**

Ja, mehr bei Neo4J, so proprietäre Graphdatenbanken.

**Was unterscheidet Ihrer Ansicht nach eine typische RDF-Graphdatenbank von einer relationalen Datenbank – speziell im Kontext von BIM oder digitalen Zwillingen?**

RDF-Graphdatenbanken sind im Vergleich zu relationalen Datenbanken deutlich besser in der Lage, semantisch verknüpfte Daten abzubilden, was insbesondere im Kontext von BIM und digitalen Zwillingen entscheidend ist.

Relationale Datenbanken stossen schnell an ihre Grenzen, z.B. beim *Inference Checking* oder beim technischen Mapping.

Im Paper wird die Integration von Sensordaten in semantische Modelle und digitale Zwillinge angesprochen.

**Wie könnten Ihrer Meinung nach Sensordaten mithilfe von Linked Data und Ontologien (SOSA/SNN) sinnvoll in einen Knowledge Graph eingebunden werden?**

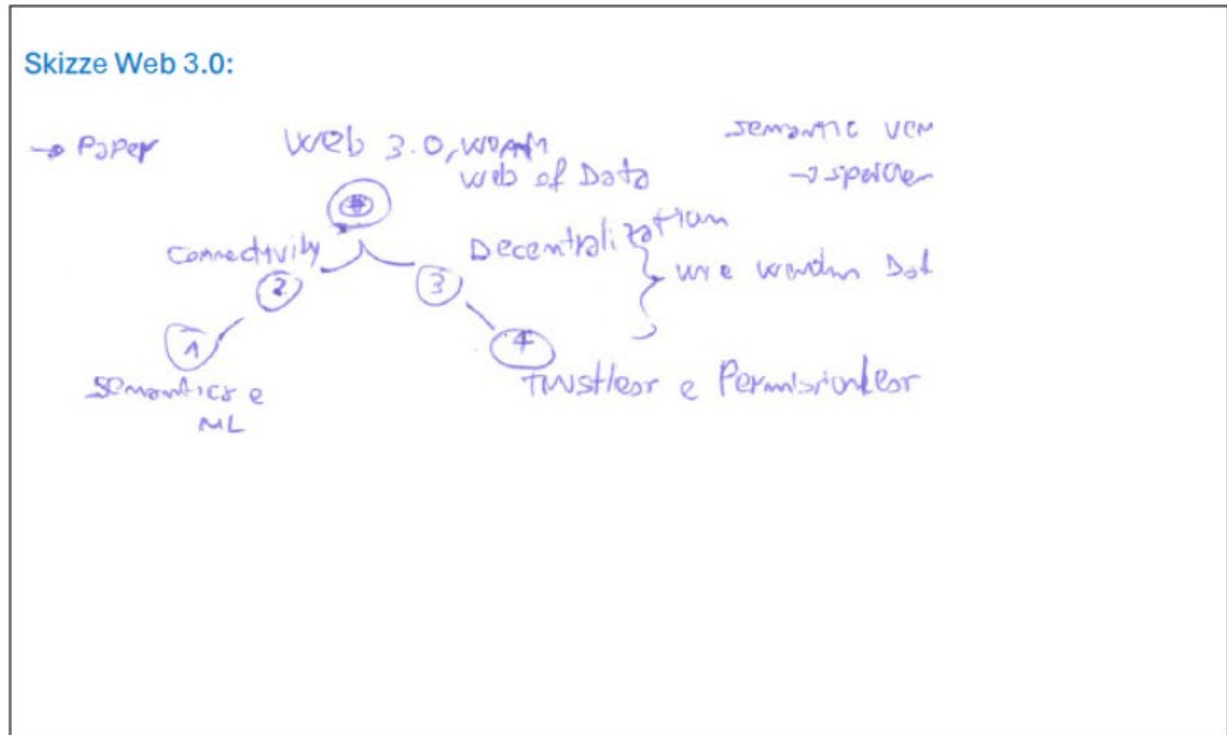
Sensordaten werden mehr und mehr genutzt, insbesondere im Zusammenhang mit digitalen Zwillingen.

Dabei spielen Metadaten (wie Zeitstempel, Messfrequenz usw.) eine zentrale Rolle.

Mit Hilfe von *Linked Data* können die verschiedenen Sensordaten sinnvoll in einen Knowledge-Graph integriert werden, indem Messungen, Sensoren und beobachtete Eigenschaften semantisch beschrieben und mit den entsprechenden Bauteilen des Bauwerks verknüpft werden.

**Expertinterview David Bucher**

**Evtl. Nachfrage**



**Weitere Vorgehen**

Prototyp in Sharepoint versenden und freigeben

## Expertinterview David Bucher

### Einverständniserklärung zur Teilnahme am Interview im Rahmen der Masterthesis: Digitaler Zwilling für Strassenbrücke mit Linked Data

#### Kontaktinformation

FHNW Camus Muttenz  
Hofackerstrasse 30  
4132 Muttenz  
Tel. [REDACTED]  
Mail Studiengangleitung: [REDACTED]

#### Teilnahme am Interview

Ihre Teilnahme am Interview umfasst ein maximal einstündiges Gespräch, das wir aus wissenschaftlichen Gründen aufzeichnen möchten. Es werden Fragen zu den Themen Linked Data, RDF-Technologie sowie Triple Store und Ontologien gestellt. Darüber hinaus interessieren wir uns für Ihre Erfahrungen mit Linked Data-Projekten im Baubranche und/oder darüber hinaus.

#### Rückruf von der Teilnahme oder Widerruf der Einwilligung

Die Teilnahme am Interview ist freiwillig. Sie haben jederzeit das Recht, ohne Angabe von Gründen von der Teilnahme am Interview zurückzutreten. Sie haben ausserdem das Recht, Ihre Einwilligung zu widerrufen und Ihre personenbezogenen Daten löschen zu lassen.

#### Datenschutz

Die im Rahmen des Interviews erhobenen Daten werden ausschliesslich für diese Masterthesis verwendet. Ihr Name oder andere Angaben zu Ihrer Identität werden vertraulich behandelt, nicht veröffentlicht und nicht an Dritte weitergegeben. Ihr Beitrag wird in anonymisierter oder pseudonymisierter Form sicher gespeichert und nach Abschluss des Interviews gelöscht.

#### Einverständniserklärung

Ich habe die in dieser Erklärung enthaltenen Informationen gelesen und verstanden.

Ich erkläre mich mit der Teilnahme an diesem Interview einverstanden und stimme der Speicherung und Nutzung meiner im Rahmen der Masterthesis erhobenen Daten zu.

#### Unterschriften:

Name der teilnehmenden Person

Datum

Unterschrift

**David Bucher**

[REDACTED]

Einverständniserklärung eingeholt von

Datum

Unterschrift

**Matteo Depoli**

27.03.2025

[REDACTED]

## X.12 Interview 4

### Expertinterview Gianluca Bianchi

#### Expertinterview mit Gianluca Bianchi

Kontakt: [REDACTED]

Dipl. Bau-Ing. ETH / FH bei AFRY Zürich und Näxte GmbH

Schwerpunkte: Ermüdungsnachweise nach Eurocode und SIA, Lambda-Faktor-Methode

[REDACTED]

Datum, Zeit: 27.03.2025, 13:00-14:00

Ort: Schlieren

#### Einstieg – 5 min

- Begrüssung
- Themen und Beschreibung von Dauer und Ablauf
- Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Interviewstudie (**Aufnahme**)

#### Traktanden – 25 min

- **Daten zum Ermüdungsnachweis**

#### Ausblick – 10 min

- Evtl. Nachfrage zu Unklarheiten
- **Weitere Vorgehen**
- Auswertung der Ergebnisse und Zusendung des Interviewprotokolls per Mail an Gianluca
- im Mai ein weiteres Interview zum Prototyp für Feedback
- Einverständniserklärung Interview schicken
- Einladung im Juni zur MTH-Präsentation (25./26. Juni 2025)

**Expertinterview Gianluca Bianchi****Daten zum Ermüdungsnachweis**

Welche geometrischen Daten werden für die Berechnung der Ermüdung einer Brücke benötigt? Und welche zusätzlichen Informationen werden für die Überprüfung benötigt? (z. B. Bewehrungsdaten).

*Quali dati geometrici servono per il calcolo della fatica di un ponte? E quali informazioni aggiuntive sono necessarie per la verifica? (ad esempio, i dati sull'armatura).*

*Per il calcolo della fatica di un ponte sono richiesti tutti i dati geometrici principali che descrivono la struttura, come la lunghezza delle campate, la larghezza del ponte, l'altezza e lo spessore delle travi, le dimensioni dei piloni e delle fondazioni.*

*Questi dati permettono di definire i modelli strutturali su cui si basano le analisi. Inoltre, devono essere disponibili le informazioni sulla disposizione delle armature (in particolare nei punti critici), sulla sezione trasversale e sui materiali utilizzati. Questi elementi sono fondamentali per stimare correttamente gli effetti dei cicli di carico ripetuti e localizzare i potenziali punti soggetti a fatica.*

*Per la verifica della resistenza a fatica non bastano solo i dati geometrici. Sono essenziali anche le caratteristiche dei materiali (come classe del calcestruzzo e tipo di acciaio), i dettagli costruttivi (come il copriferro e la lunghezza delle ancorature) e le informazioni sull'armatura, inclusa la disposizione, diametro, passo e continuità delle barre.*

*Inoltre, la vita utile prevista per la struttura, la frequenza del traffico e le condizioni ambientali giocano un ruolo determinante. Tutti questi aspetti sono considerati nei modelli di verifica secondo le normative Eurocode e SIA.*

Wie sollten die Verkehrsdaten strukturiert sein? Nur Schwerverkehr? In welchem Format liegen sie typischerweise bei DATEX vor?

*Come dovrebbero essere strutturati i dati sul traffico? Solo traffico pesante? In che formato sono tipicamente in DATEX?*

*I dati sul traffico devono essere strutturati in modo da permettere l'identificazione delle categorie di veicoli che transitano sul ponte, con particolare attenzione al traffico pesante, che è il principale responsabile dell'accumulo di danni da fatica.*

**Expertinterview Gianluca Bianchi**

*È utile suddividere i veicoli in classi (ad esempio 10 classi secondo lo standard ASTRA) e registrare il numero di passaggi per classe, l'interasse degli assi e il carico per asse. Inoltre, è importante avere una rappresentazione temporale (giornaliera, settimanale o mensile) per valutare l'evoluzione nel tempo e individuare picchi critici.*

*DATEX II è lo standard europeo per lo scambio di informazioni sul traffico e sulla mobilità. I dati sono tipicamente strutturati in formato XML e comprendono informazioni dettagliate su eventi stradali, condizioni di traffico, veicoli in transito e velocità media.*

*Nel contesto dei ponti, si utilizzano i messaggi DATEX per raccogliere i flussi di traffico, in particolare i dati relativi al traffico pesante, e integrarli nei sistemi di monitoraggio e verifica strutturale.*

*L'utilizzo di questo formato permette una facile interoperabilità con altri sistemi digitali pubblici e privati.*

**Wäre es interessant, auch Umwelt-/Klimadaten zu haben?**

**(z.B. minimale maximale Temperatur, Frost-Tau-Zyklen, Temperaturschwankungen?)**

***Sarebbe interessante disporre anche di dati ambientali/climatici?***

***(tipo temperatura minimo/massima, cicli di gelo-disgelo, escursione termiche?)***

*Sì, disporre di dati ambientali e climatici può essere molto utile, anche se il loro impatto diretto sulla fatica strutturale è generalmente inferiore rispetto a quello del traffico.*

*Tuttavia, parametri come la temperatura minima e massima, i cicli di gelo-disgelo, l'umidità e le variazioni termiche giornaliere possono contribuire all'analisi delle condizioni operative del ponte.*

*Questi dati sono particolarmente rilevanti per la calibrazione dei modelli numerici e per la comprensione dei fenomeni di degrado indotti dal clima.*

*Ad esempio, le variazioni termiche influenzano la dilatazione dei materiali e l'apertura delle fessure nei giunti e negli elementi in calcestruzzo.*

**Expertinterview Gianluca Bianchi**

**Welche Daten sollten die Dehnungsfugen haben? Die von den Dehnungsmessstreifen abgeleiteten?**

*Quali dati dovrebbero avere i giunti di dilatazione? Quelli derivanti dagli estensimetri?*

*I giunti di dilatazione sono componenti critici che permettono la libera espansione e contrazione della struttura.*

*Per monitorarne il comportamento nel tempo, è utile installare estensimetri che registrino gli spostamenti relativi e le deformazioni. I dati più importanti includono l'ampiezza delle aperture, la frequenza delle variazioni cicliche, le accelerazioni locali e la temperatura.*

*Questi dati possono essere integrati in un sistema di digital twin per identificare pattern di degrado, pianificare interventi manutentivi e prolungare la vita utile del componente. Inoltre, eventuali anomalie nei giunti possono riflettersi sull'intera dinamica del ponte.*

**Wären auch Informationen zu Inspektionen interessant? Und eventuell Wartungen? (z. B. Fotos)**

*Sarebbero interessanti anche informazioni relative a ispezioni? Ed eventualmente, manutenzioni? (tipo foto)*

*Sì, le informazioni derivanti dalle ispezioni periodiche e dalla manutenzione sono fondamentali per una valutazione completa dello stato di salute del ponte.*

*Report fotografici, annotazioni su fessure, corrosione, distacchi di materiale e usura meccanica permettono di arricchire i modelli previsionali con dati qualitativi e storici. Inoltre, documentare gli interventi effettuati (tipo, data, materiali utilizzati) consente di comprendere l'efficacia delle azioni correttive e supporta la programmazione di attività future.*

*Questi dati, se digitalizzati e integrati in un gemello digitale, aumentano significativamente la trasparenza e la tracciabilità della gestione infrastrutturale.*

## Expertinterview Gianluca Bianchi

### Einverständniserklärung zur Teilnahme am Interview im Rahmen der Masterthesis: Digitaler Zwilling für Strassenbrücke mit Linked Data

#### Kontaktinformation

FHNW Camus Muttenz  
Hofackerstrasse 30  
4132 Muttenz  
Tel. [REDACTED]  
Mail Studiengangleitung: [REDACTED]

#### Teilnahme am Interview

Ihre Teilnahme am Interview umfasst ein maximal einstündiges Gespräch, das wir aus wissenschaftlichen Gründen aufzeichnen möchten. Es werden Fragen zu den Themen Linked Data, RDF-Technologie sowie Triple Store und Ontologien gestellt. Darüber hinaus interessieren wir uns für Ihre Erfahrungen mit Linked Data-Projekten im Baubranche und/oder darüber hinaus.

#### Rückruf von der Teilnahme oder Widerruf der Einwilligung

Die Teilnahme am Interview ist freiwillig. Sie haben jederzeit das Recht, ohne Angabe von Gründen von der Teilnahme am Interview zurückzutreten. Sie haben ausserdem das Recht, Ihre Einwilligung zu widerrufen und Ihre personenbezogenen Daten löschen zu lassen.

#### Datenschutz

Die im Rahmen des Interviews erhobenen Daten werden ausschliesslich für diese Masterthesis verwendet. Ihr Name oder andere Angaben zu Ihrer Identität werden vertraulich behandelt, nicht veröffentlicht und nicht an Dritte weitergegeben. Ihr Beitrag wird in anonymisierter oder pseudonymisierter Form sicher gespeichert und nach Abschluss des Interviews gelöscht.

#### Einverständniserklärung

Ich habe die in dieser Erklärung enthaltenen Informationen gelesen und verstanden.

Ich erkläre mich mit der Teilnahme an diesem Interview einverstanden und stimme der Speicherung und Nutzung meiner im Rahmen der Masterthesis erhobenen Daten zu.

#### Unterschriften:

Name der teilnehmenden Person

Gianluca Bianchi [REDACTED]

Datum

27.03.2025

Unterschrift [REDACTED]

Einverständniserklärung eingeholt von

Matteo Depoli

Datum

27.03.2025

Unterschrift [REDACTED]

### X.13 Analyse der Ontologie

Die Analyse unter Zuhilfenahme der in Tab. 2 definierten Kriterien (K1–K7) verdeutlicht die divergierenden Schwerpunkte und Stärken der untersuchten Ontologien.

Hinsichtlich der brückenspezifischen Fachlichkeit (K1) erfüllen nahezu alle Ontologien die Anforderung, Bauteile wie Dehnungsfugen explizit modellieren zu können. In diesem Zusammenhang sind auch die Unterschiede zwischen den Dehnungsfugen in Ontologie wie BROT, BMDO, BMO, Blontology und ASB-ING zu berücksichtigen. Lediglich bei BrIM bleibt diese Komponente implizit.

In Bezug auf die Integration von Sensordaten (K2) manifestiert sich eine signifikante Diskrepanz: Während BSHM und externe Modelle wie SOSA/SSN hierfür optimiert sind, bieten viele der untersuchten Ontologien keine eigene Sensorstruktur. Lediglich BMDO und BMO weisen erste Ansätze zur Integration auf.

Die Analyse der Verfügbarkeit (K3) ergibt, dass lediglich die Ontologien BROT, ASB-ING und BMO öffentlich zugänglich sind. Die anderen Ontologien BMDO oder CBRPMO werden lediglich in wissenschaftlichen Veröffentlichungen referenziert, jedoch nicht frei nutzbar gemacht.

Für die Nutzung ist die LD-Kompatibilität (K4) von entscheidender Relevanz. In diesem Fall bieten lediglich die Ontologien BROT, BMO und ASB-ING eine präzise Serialisierung in die Formate Turtle, während die Ontologien BMDO und BrMontology lediglich konzeptionell beschrieben sind. Bei den anderen ist dies unklar.

Hinsichtlich der semantischen Eindeutigkeit (K5) überzeugen BROT, ASB-ING und Blontology mit klar definierten Klassen und Relationen. Aber die vorliegende Analyse ergibt, dass BMO strukturelle Inkonsistenzen aufweist, was eine maschinelle Interpretierbarkeit erheblich einschränkt.

Die Interoperabilität mit IFC-Strukturen (K6) ist vor allem bei BROT und ASB-ING gut umgesetzt, da beide Ontologien explizit auf Standardlogik IFC (wie in dem Kapitel 5.2.1 erklärt wird). Bei anderen Ontologien fehlt diese Verbindung oder sie ist nicht klar definiert.

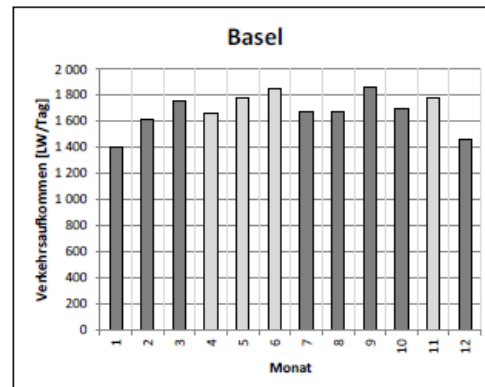
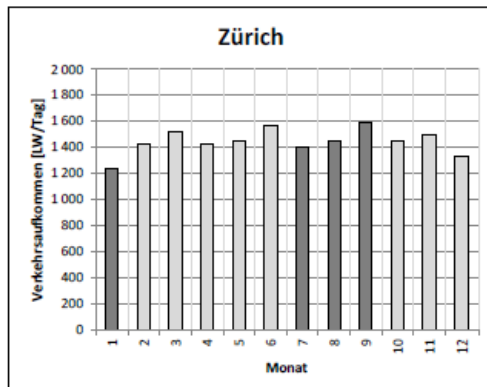
Hinsichtlich der Modularität (K7) wird ersichtlich, dass nur eine geringe Anzahl an Ontologien eine flexible Erweiterbarkeit aufweist. Im vorliegenden Kontext ist festzustellen, dass sich das Modell von BROT durch eine positive Auffälligkeit auszeichnet. Andere Modelle sind entweder als monolithisch konzipiert zu bezeichnen (CBRPMO, BMO) oder erscheinen aufgrund ihres Umfangs nur bedingt modifizierbar (wie ASB-ING).

## X.14 WIM-Station Bözberg

2022 – Bözberg | Auswertung und Bearbeitung der WIM-Daten Quelle: ASTRA

### 3.4.1 Nach Monat

Anzahl Erkennungen nach Monat		
Monat	Richtung 1 : Zürich	Richtung 2 : Basel
Januar	38'322	43'632
Februar	38'251	45'091
März	46'495	54'302
April	41'715	48'613
Mai	42'019	52'307
Juni	45'766	53'537
Juli	43'417	51'866
August	44'955	51'842
September	47'798	55'818
Oktober	44'016	52'452
November	43'571	51'887
Dezember	39'824	45'338



Bemerkung: Die Berechnung der monatlichen Aufteilungen zieht die Integrität der Daten in Betracht (Fehlende Tage und Datenverluste). Februar (427), März (427), April, Mai, Juni, Oktober (427), November, Dezember (427): Erkennung nicht geschätzt, tägliche Werte geschätzt.

Anzahl Erkennungen nach Klassen SWISS10			
Klasse SWISS10	Erkennungen		Grafik
1	31'225	2.8%	
2	493	0.0%	
3	53'615	4.8%	
4	47'544	4.2%	
5	90'944	8.1%	
6	18'114	1.6%	
7	44'052	3.9%	
8	233'430	20.8%	
9	144'926	12.9%	
10	457'912	40.8%	
GM	579	0.1%	

2022 – Bözberg | Auswertung und Bearbeitung der WIM-Daten Quelle: ASTRA

## 4 Vorlage nach Norm VSS 40 320

Referenzdokument : [1] [2] [6] [12]

### 4.1 Aufteilung zwischen den Fahrspuren

Aufteilung zwischen den Fahrspuren					
Konfiguration	Richtung 1 : Zürich		Richtung 2 : Basel		Auf Basis von :
	1	2	2	1	
2x2 Spuren	45.7%	0.5%	52.5%	1.3%	Anzahl Erkennungen
	50.2%	0.2%	49.3%	0.4%	Gesamtgewicht
	49.9%	0.1%	49.9%	0.2%	Äquivalente Verkehrslast total W

Legende : NB : nicht-bemesst

### 4.2 Äquivalenzfaktor nach Fahrzeugklassen

Mittlerer Äquivalenzfaktor k nach Schwerverkehrsklassen						
Umriß	Flexibler und halbstarrer Oberbau			Starrer und kombinierter Oberbau		
	Richtung 1 : Zürich	Richtung 2 : Basel	Norm 2022	Richtung 1 : Zürich	Richtung 2 : Basel	Norm 2022
	0.56	0.85	0.8	0.52	0.81	0.7
	0.96	1.27	1.3	1.28	1.67	1.7
	1.33	1.40	1.7	2.33	2.45	3.0
	1.99	2.53	2.3	4.54	5.84	5.4
	1.27	1.95	1.7	1.21	1.92	1.6
	1.52	1.69	2.1	1.66	1.78	2.3
	2.03	1.93	2.0	2.20	2.08	2.5
	1.78	2.39	2.0	2.18	2.96	2.5
	1.33	1.52	1.4	1.92	2.10	2.0
	0.97	1.40	1.2	0.88	1.33	1.1
	1.16	1.61	1.3	1.10	1.57	1.3
	1.28	1.09	1.3	1.39	1.11	1.3
	2.13	1.80	2.4	2.72	2.15	3.0
	1.44	2.51	2.5	1.46	2.66	2.6
	0.74	0.97	1.1	0.95	1.28	1.4

### 4.3 Äquivalenzfaktor nach Fahrzeugkategorien

Mittlerer Äquivalenzfaktor k nach Fahrzeugkategorien						
Kategorie SWISS10	Flexibler und halbstarrer Oberbau			Starrer und kombinierter Oberbau		
	Richtung 1 : Zürich	Richtung 2 : Basel	Norm 2022	Richtung 1 : Zürich	Richtung 2 : Basel	Norm 2022
1 : Bus, Car	1.26	2.08	2.1	1.36	2.27	2.3
8 : Lastkraftwagen	0.71	0.98	0.9	0.83	1.12	1.1
9 : Lastenzug	1.50	1.96	1.8	1.70	2.18	2.0
10 : Sattelzug	1.73	1.49	1.9	2.11	1.68	2.3

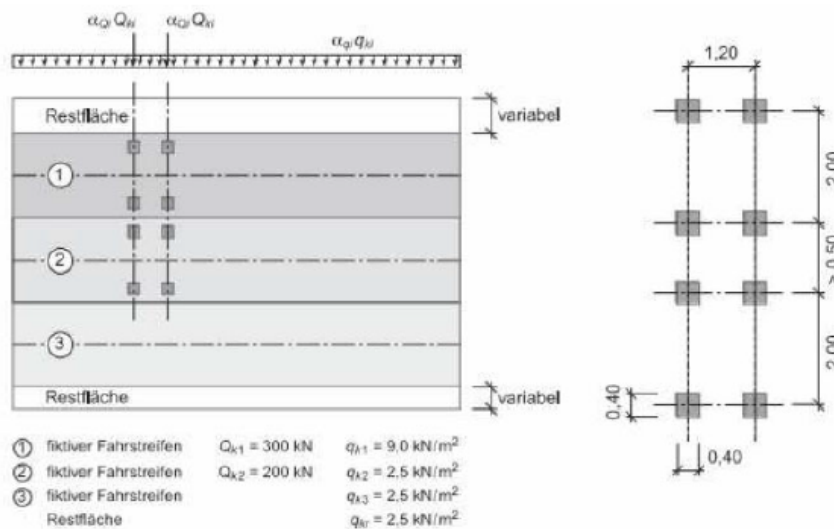
2022 – Bözberg | Auswertung und Bearbeitung der WIM-Daten Quelle: ASTRA

## 6 Vorlage nach Norm SIA 261

Referenzdokument : [3]

Die in Betracht gezogenen Daten sind jene der erkannten Umrissse von 2 bis 6 Achsen, sprich 99.4% der gesamten Proben.

### 6.1 Vorlage der Last 1 nach SIA 261



#### 6.1.1 Konzentrierte Last Q

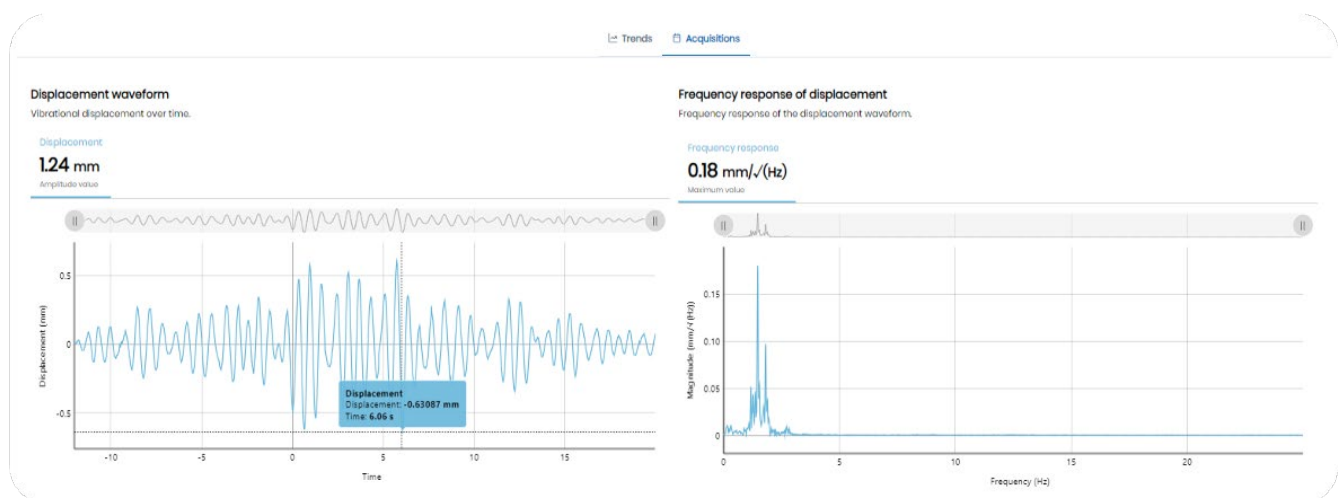
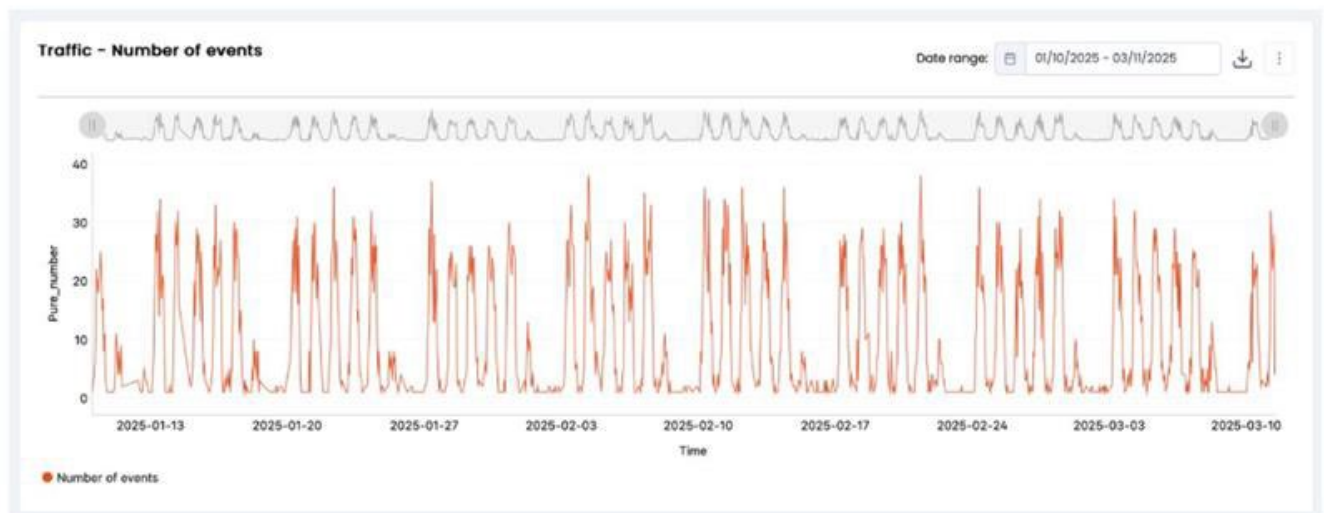
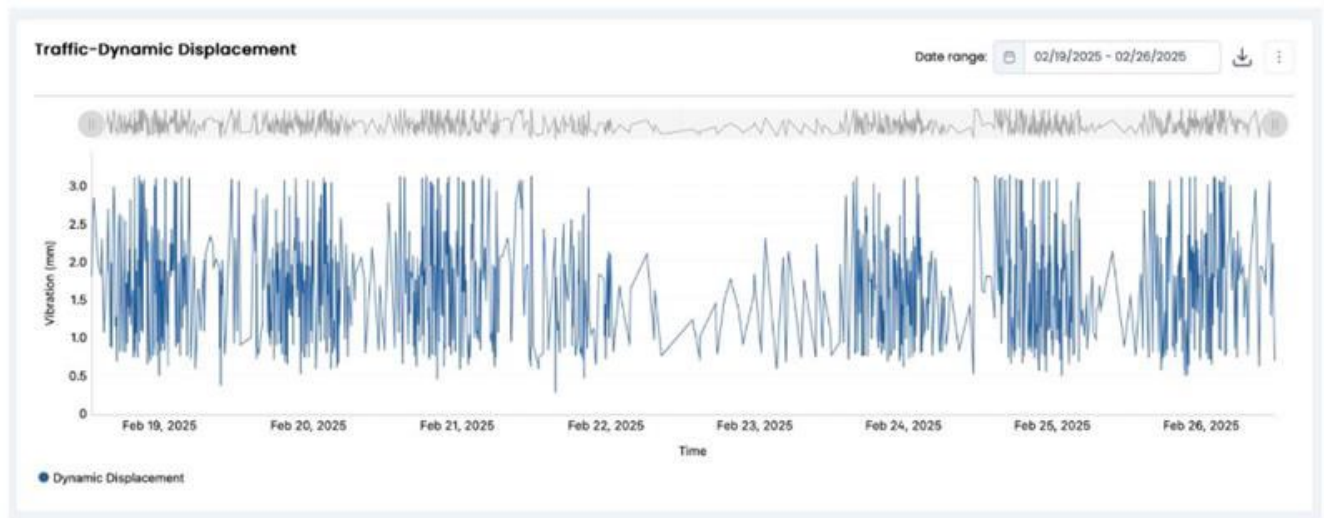
Konzentrierte Last Q					
Typ Achsen	Durchschnittslast [kN]	Durchschnittslast pro Achse [kN]	f0.95 [kN] (pro Achse)	f0.99 [kN] (pro Achse)	f0.9999 [kN] (pro Achse)
Einfach	51	51	98	116	149
Doppelt	87	43	174 (87)	203 (102)	278 (139)
Dreifach	134	45	248 (83)	279 (93)	354 (118)

#### 6.1.2 Verteilte Last q

Verteilte Last q				
Typ	Durchschnittslast	f0.95	f0.99	f0.9999
Gewicht pro Laufmeter [kN/m]	12.7	26.4	36.3	48.5
Gewicht pro Fläche (Breite 3 m) [kN/m <sup>2</sup> ]	4.2	8.8	12.1	16.2

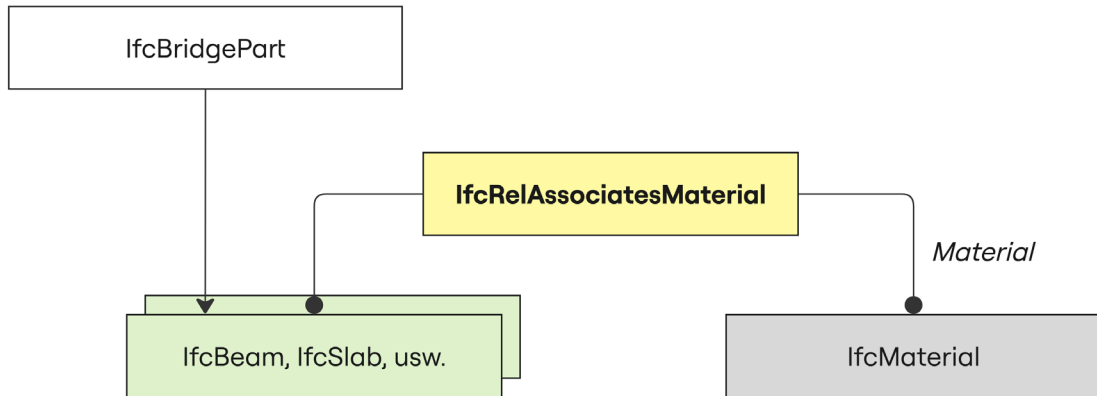
### X.15 Beispiel Dehnungsdaten

Quelle: Move S.p.A. (2023) – [www.movesolutions.it](http://www.movesolutions.it)



### X.16 Materialien spezifizieren

Die semantische Beschreibung von Baumaterialien stellt neben der Geometrie die andere Mindestkomponente für jeden Anwendungsfall dar, bei dem das Endziel eine Berechnung ist. In IFC 4.3 erfolgt die Materialzuweisung in der Regel über *IfcRelAssociatesMaterial* und über Property Sets (PSet), wie beispielsweise *PSet\_ConcreteElementGeneral*, wo sie zur Dokumentation der physikalischen Eigenschaften (Dichte, Festigkeit, Elastizitätsmodul) verwendet werden können.



Verknüpfung IfcBridgePart mit seinen Materialien, eigene Darstellung

Für die semantische Integration der Materialien wurde die Ontologie BMAT (Hamdan & Kozak, 2020b) verwendet, die ebenfalls Teil des BROT-Frameworks ist.

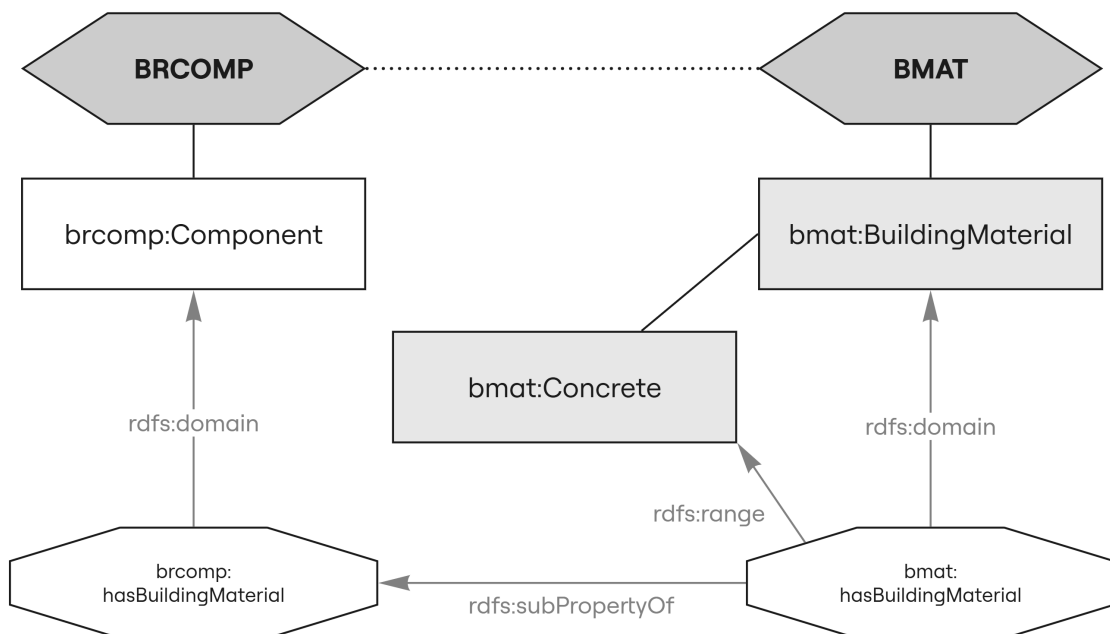
Die vorliegende Ontologie erlaubt die Darstellung von Materialien (wie Stahlbeton) als Instanzen von *bmat:BuildingMaterial* und die formale Beschreibung ihrer technischen Eigenschaften (wie Festigkeit oder Korrosionsverhalten).

Im Rahmen dieser Zuordnung wurde die Eigenschaft *brcomp:hasBuildingMaterial* eingeführt, um eine Verbindung zwischen den Brückenkomponenten und ihren Materialien herzustellen.

Die vorliegende Eigenschaft wird als untere Eigenschaft von *bmat:hasBuildingMaterial* modelliert:

```
brcomp:hasBuildingMaterial rdfs:subPropertyOf bmat:hasBuildingMaterial
```

turtle



Verknüpfung von Bauteilen und Materialien mittels BRCOMP und BMAT, eigene Darstellung

Die Eigenschaft *brcomp:hasBuildingMaterial* ist als Untereigenschaft (*rdfs:subPropertyOf*) von *bmat:hasBuildingMaterial* definiert. Dadurch kann eine *brcomp:Component*, z.B. ein Brückenträger, mit einem Material wie *bmat:Concrete* verknüpft werden.

Die Informationen zur Domäne und zum Intervall sollen die formale Gültigkeit der Beziehung sicherstellen: *brcomp:hasBuildingMaterial* benötigt eine Komponente (aus BRCOMP) als *rdfs:domain* und ein Material (aus BMAT) als *rdfs:range*. Diese Struktur ermöglicht eine klare Trennung zwischen physikalischer Struktur (Geometrie) und Materialinformation.

Auf diese Weise ist es möglich, semantische Materialien mit strukturellen Komponenten aus BRCOMP zu verknüpfen, ohne die bestehende Ontologiestruktur zu verändern.

Die Dateneigenschaften (wie Druckfestigkeit oder Elastizitätsmodul) verbleiben auf Materialebene und werden nicht direkt dem Brückenelement, sondern dem referenzierten Material zugeordnet.

Im Detail wird diese Trennung zwischen Bauwerk und Material auch auf Instanzebene beibehalten. Beispielsweise kann ein Brückenträger mit einer bestimmten Betonklasse (z.B. C35/45) wie folgt modelliert werden:

```
ex:beam_1 a ifc:IfcBeam , brcomp:GirderComponent ;
          brot:isPartOf ex:superstructure_1 ;
          brcomp:hasBuildingMaterial ex:C35_45 .
```

turtle

Die zugehörige Materialinstanz *ex:C35\_45* kann mit weiteren technischen Eigenschaften angereichert werden. Zu den relevanten Eigenschaften zählen neben der Druckfestigkeit und Dichte auch die Umweltbedingungen, wie sie in der SN EN 206 (siehe Holcim AG, 2023) durch sogenannte Expositionsklassen definiert sind. Da diese nicht Bestandteil der ursprünglichen BMAT-Ontologie sind, wurden sie als domänenspezifische Erweiterung hinzugefügt. Es wurde eine eigene Klasse *exmat:ExposureClass* sowie die zugehörige Objektproperty *exmat:hasExposureClass* eingeführt, mit den Umweltbedingungen wie Frostangriff oder wechselnde Feuchtigkeit semantisch modelliert werden können:

```
exmat:ExposureClass a owl:Class ;
                    rdfs:subClassOf bmat:MaterialProperty .

exmat:hasExposureClass a owl:ObjectProperty ;
                       rdfs:domain bmat:BuildingMaterial ;
                       rdfs:range exmat:ExposureClass .
```

turtle

Die Klassen XC4 und XF1 wurden als Expositionsklassen hinzugefügt:

```
exmat:XC4 a exmat:ExposureClass .

exmat:XF1 a exmat:ExposureClass .
```

turtle

Die Materialinstanz *ex:C35\_45* kann daher wie folgt ergänzt werden:

```
ex:C35_45 a bmat:Concrete ;
          bmat:hasCompressiveStrength "45"^^xsd:float ;
          bmat:hasDensity "2500"^^xsd:float ;
          bmat:hasMaterialType "Stahlbeton" ;
          bmat:hasExposureClass bmat:XC4, bmat:XF1 .
```

turtle

## X.17 Ontologische Eigenschaften

Neben der Modellierung von Klassen wurde bei der Entwicklung von ifcBridgeOWL auch Wert auf die formale Strukturierung der verwendeten Eigenschaften gelegt.

Diese Komponenten spielen eine zentrale Rolle bei der semantischen Beschreibung der Beziehungen zwischen den Brückenkomponenten, dem Material und den Sensoren. Die Eigenschaften wurden dabei nicht nur anhand ihrer Bedeutung definiert, sondern auch formal mit Domänen- (*domain*) und Rangeangaben (*range*) sowie einer übergeordneten logischen Klassifizierung.

Des Weiteren erfolgte dies mit der Intention, die Wiederverwendbarkeit und Interoperabilität zu gewährleisten.

Die Eigenschaft *brcomp:hasBuildingMaterial* wurde eingeführt, um eine beliebige Komponente einer Brücke mit einem entsprechenden Baumaterial zu verknüpfen.

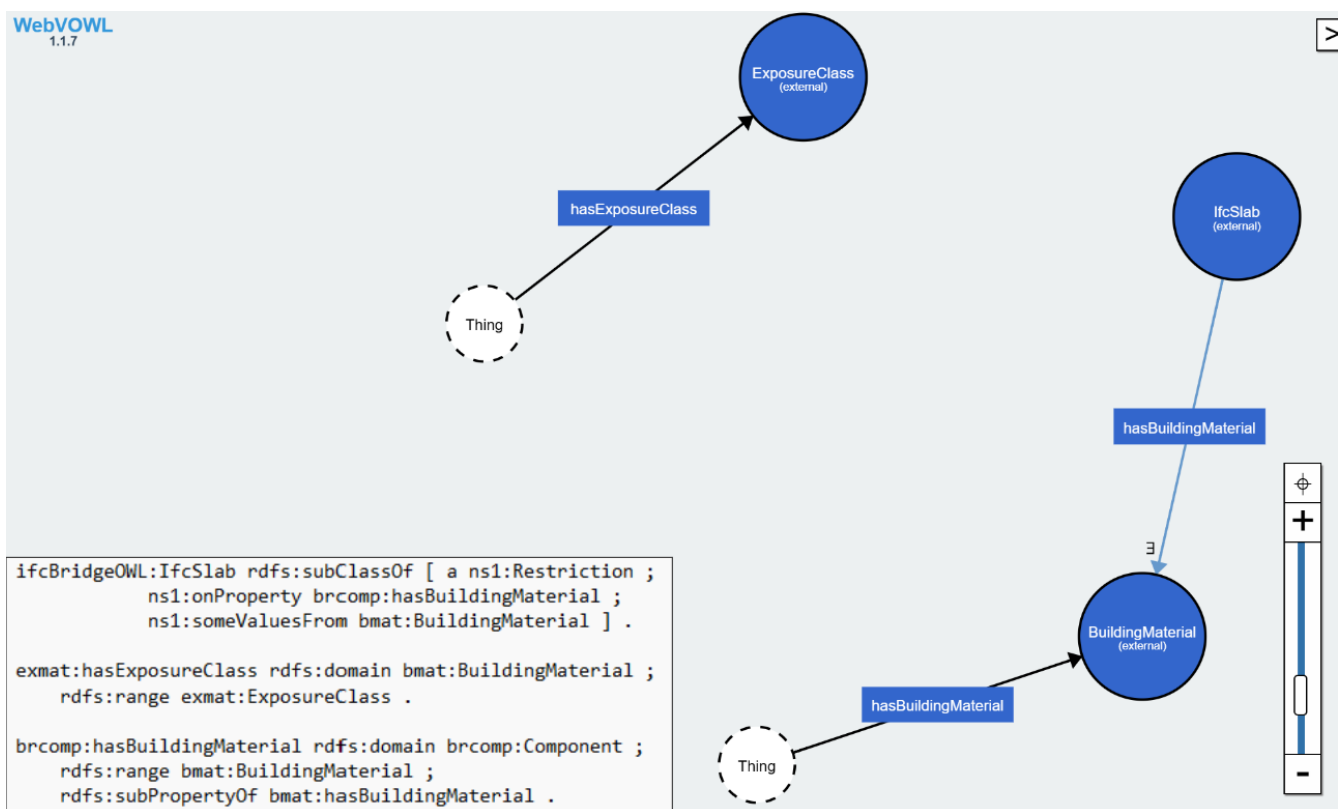
Diese Eigenschaft ist als Spezialisierung (*rdfs:subPropertyOf*) von *bmat:hasBuildingMaterial* modelliert und so definiert, dass sie nur zwischen Objekten der Klassen *brcomp:Component* und *bmat:BuildingMaterial* verwendet werden kann.

Die Verknüpfung ermöglicht eine konsistente Erfassung der Materialeigenschaften, wie beispielsweise Festigkeit und Dichte, während die tatsächlichen Werte im Material selbst und nicht in der Komponente gespeichert werden.

Die Darstellung der (mögliche) Umwelteinflüsse auf Stahlbeton erfolgt mithilfe der Eigenschaft «*exmat:hasExposureClass*». In der vorliegenden Modellierung erfolgt die Verknüpfung eines Materials mit einer entsprechenden Expositions Klasse gemäss der Norm SN EN 206:2013 (Holcim AG, 2023).

Als Beispiele seien an dieser Stelle XC4 und XF1 genannt. Diese Modellierung ist von grundlegender Bedeutung für die Bewertung der Dauerhaftigkeit von Betonelementen, da sie eine differenzierte semantische Beschreibung der Beanspruchungsszenarien (für die Erhaltung) durch Wasser, Chloride, Frost oder Karbonatisierung ermöglicht.

Die explizite Trennung zwischen Material und Expositions Klasse gewährleistet zudem die Offenheit des Modells für zukünftige Anpassungen.



Beispiel einer OWL-Restriktion für ifcBridgeOWL:IfcSlab

In der Abbildung wird eine OWL-Einschränkung dargestellt, die auf die Klasse *ifcBridgeOWL:IfcSlab* angewendet wird und vorschreibt, dass jede ihrer Instanzen mit mindestens einem Material (*bmat:BuildingMaterial*) verknüpft sein muss.

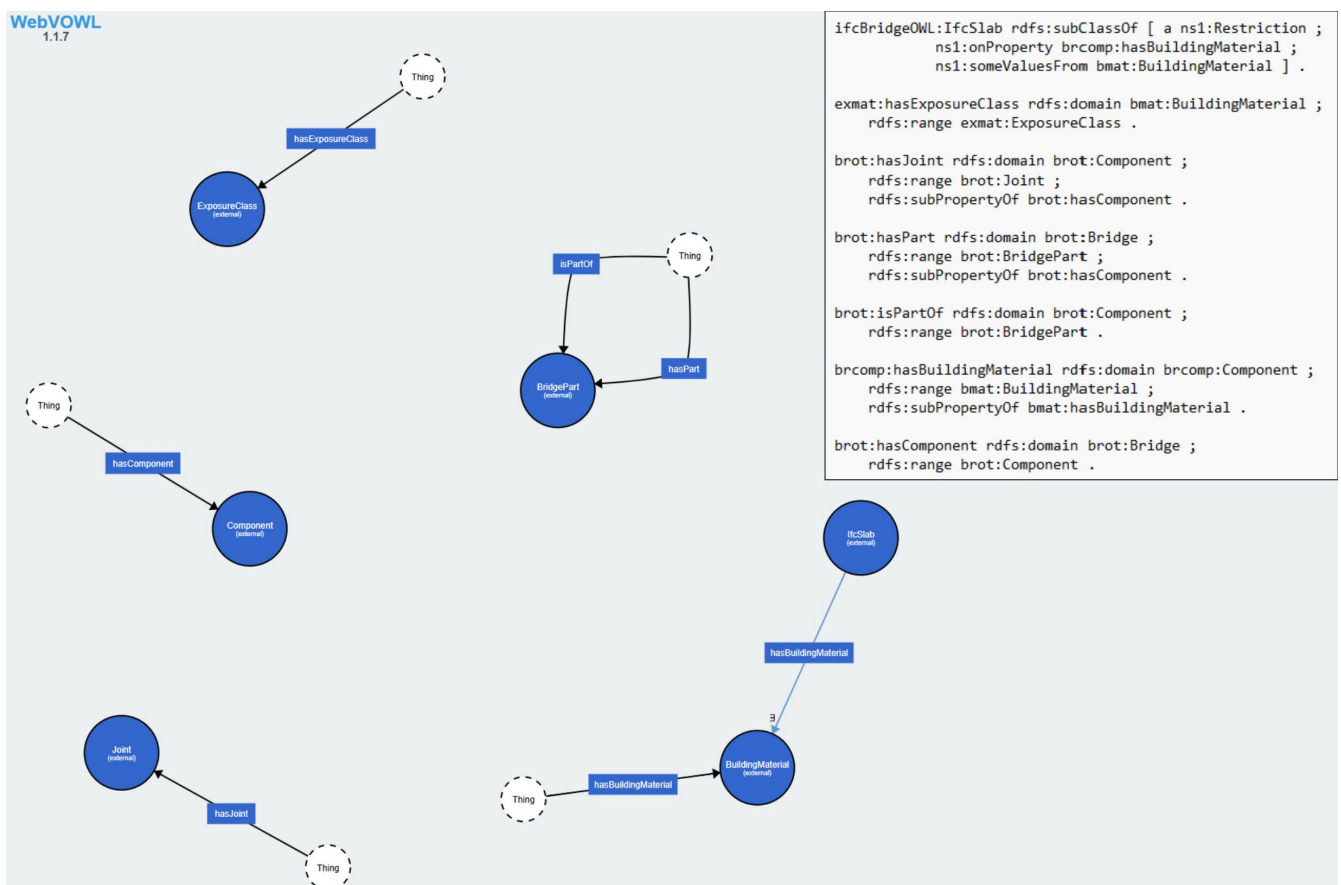
Diese Art der ontologischen Modellierung stärkt die semantische Kohärenz und unterstützt automatische Validierungsmechanismen, was für den im nächsten Kapitel beschriebenen zukünftigen *Proof of Concept* von einem digitalen Zwilling/Schatten besonders nützlich ist.

Neben den klassischen Materialeigenschaften müssen auch topologische Beziehungen innerhalb der Brückenkonstruktion klar und formal in der Ontologie beschrieben werden.

Die Eigenschaft *brt:hasComponent* findet Anwendung bei der Verknüpfung einer Brücke mit ihren funktionalen Komponenten. Eine spezifischere Variante stellt hierbei *brt:hasPart* dar, welche sich auf Teile der Brücke bezieht.

Die Eigenschaft *brt:hasJoint* beschreibt demgegenüber die Beziehung zwischen einer Komponente und den zugehörigen Verbindungselementen, die insbesondere bei der Modellierung von Dehnungsfugen eine signifikante Rolle einnehmen.

Des Weiteren ist *brt:isPartOf* zu berücksichtigen, welches als umgekehrte Beziehung eine Rückverfolgung der hierarchischen Struktur ermöglicht.



TBox-Modellierung von ontologischen Eigenschaften in ifcBridgeOWL

## X.18 Temperaturintegration

Die semantische Integration meteorologischer Daten mit den strukturellen Komponenten einer Brücke stellt einen weiteren grundlegenden Schritt dar.

Die Verbindung zwischen den Temperaturdaten und den Dehnungsfugen (*Expansion Joint*) ist für die Instandhaltungsplanung von signifikanter Relevanz, da thermische Schwankungen gemäss vorliegender Evidenz zu Materialverschleiss und strukturellen Spannungen führen können (siehe Anhang X.12).

Wie in 4.1 dargelegt, erfolgte die Modellierung der Temperaturmessungen der Wetterstation A2 Hard unter Verwendung der Ontologie SOSA/SNN (OGC & W3C, 2017) und die Erstellung der ersten Turtle-Datei (*Wetterdaten.ttl*) und im ersten Schritt erfolgte die Zuordnung der Messungen zur gesamten Brücke (*IfcBridge*).

Der vorliegende Schritt besteht in der Korrelation des Temperaturwerts mit der Dehnungsfuge, wobei zu berücksichtigen ist, dass die tatsächliche Temperatur der Bauteile von der Lufttemperatur abweicht (ASTRA 12004, 2011). Diese Hypothese ist sowohl auf die Sommermonate, insbesondere aufgrund der Sonneneinstrahlung, als auch auf die Wintermonate, in denen aufgrund des ständigen Schwerverkehrs höhere Temperaturen auftreten, anzuwenden. Es ist evident, dass der kontinuierliche LKW-Verkehr lokale Erwärmungen verursacht. Die Ursachen sind dabei in den physikalischen Effekten der Reibung, der Vibrationen sowie der Wärmerückkopplung zu verorten.

Zur Berücksichtigung dieser Effekte wurde eine Temperaturkorrektur von +3°C eingeführt (siehe Anhang X.12). Dieser Wert kann als Näherung für typische Situationen mit hoher Belastung bei niedrigen Aussentemperaturen herangezogen werden.

Zur Integration dieser Korrektur wurden zwei divergierende semantische Modellierungsvarianten untersucht. In beiden Fällen wurden die korrigierten Temperaturwerte explizit mit der Dehnungsfuge verknüpft, nicht mehr mit der Brücke.

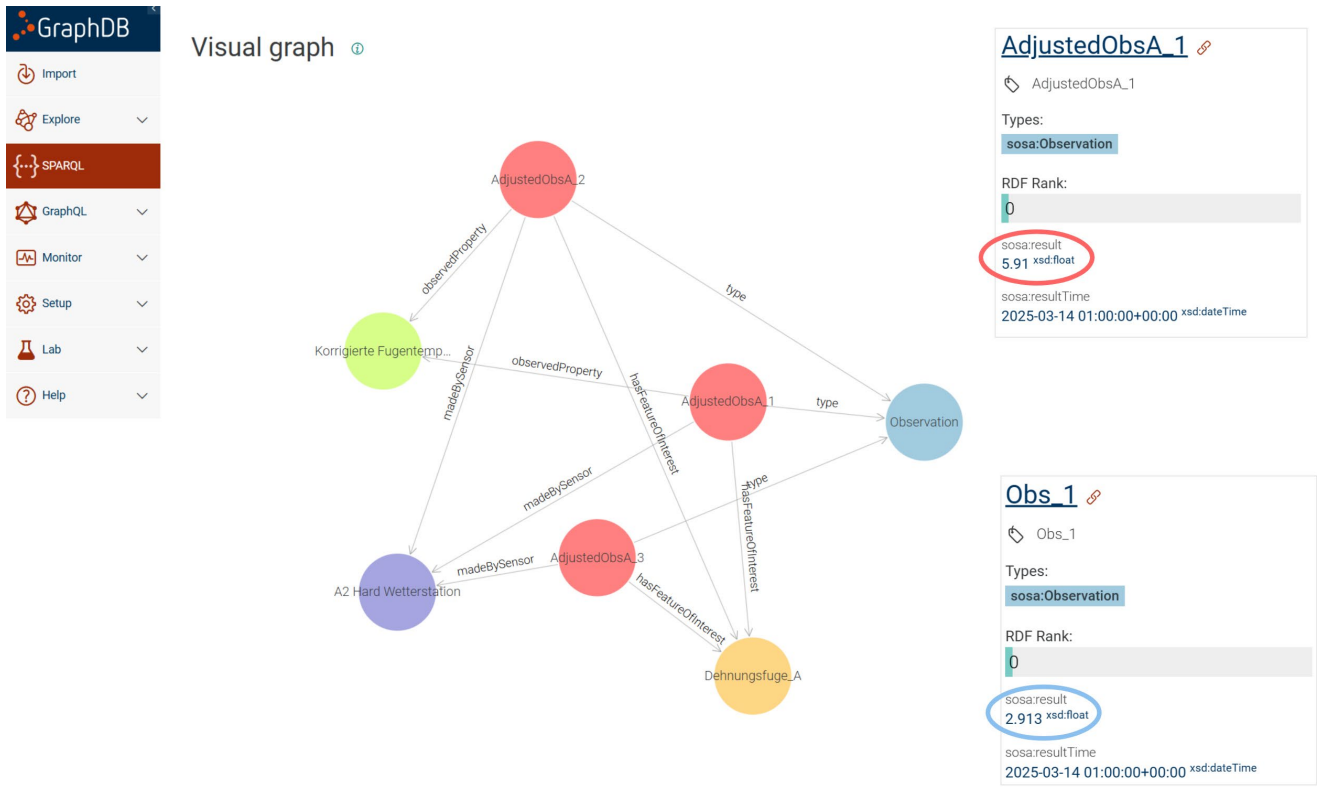
### Mögliche Modellierungsvarianten der Temperaturintegration

	Modellierungsvarianten	
	Variante A	Variante B
Beschreibung	Direkte Korrektur der Lufttemperatur (+3°C)	Einen «virtuellen» Sensor modellieren
Vorteil	Einfach zu modellieren und klar abfragbar in SPARQL	Rückverfolgbarkeit der Daten: Saubere Trennung zwischen Roh- und Neuwerten
Nachteil	semantisch weniger korrekt	Mehr Aufwand bei der Modellierung

Im weiteren Laufe des Textes wird eine Analyse der beiden Modellierungsvarianten und ihrer Erstellung in der Turtle-Datei durchgeführt.

Bei der ersten Variante A erfolgt die Anpassung der Temperatur direkt durch eine neue Beobachtung (Observation), in der der korrigierte Wert (+3 °C) als *sosa:result* gespeichert wird.

Die ursprüngliche Lufttemperatur bleibt weiterhin mit der gesamten Brücke (*IfcBridge\_1*) verknüpft, während die neu berechnete, angepasste Temperatur gezielt mit der Dehnungsfuge (*ex:ExpansionJoint\_01*) verknüpft wird. Die vorliegende Modellierung erfolgt ohne den Einsatz zusätzlicher semantischer Konstrukte. Allerdings ergibt sich daraus, dass die korrigierten Werte keine direkte Verbindung zur ursprünglichen Messung aufweisen, was ihre Ableitung im Modell nur implizit nachvollziehbar macht.



GraphDB 11.0.0 • RDF4J 5.1.2:jakarta • Connectors 16.3.1 • Workbench 3.0.0 • © 2002–2025 Ontotext AD. All rights reserved.

Grafik der Modellierungsvariante A in GraphDB

Demgegenüber fusst die zweite Variante B auf der Implementierung eines virtuellen Sensors (ex: *VirtualFugeSensor*), der spezifisch für die Erfassung der berechneten Fugentemperatur konzipiert wird. Die korrigierte Temperatur wird als eigenständige *sosa:Observation* erfasst und der Dehnungsfuge als *FeatureOfInterest* zugeordnet.

Für eine semantisch saubere und nachvollziehbare Modellierung ist die Trennung sowohl der Rohdaten als auch der berechneten Werte voneinander von essenzieller Bedeutung.

Die semantische Verknüpfung zwischen den Elementen der SOSA-Ontologie und den in IFC modellierten Komponenten bildet die Grundlage für eine kohärente Integration der Sensordaten in den digitalen Zwilling. Die Anwendung der Eigenschaft *sosa:hasFeatureOfInterest* diente der Zuordnung jeder Beobachtung einer bestimmten IFC-Entität, wie beispielsweise *IfcBridge* für Lufttemperaturen oder *IfcDiscreteAccessory* für Temperaturen an der Dehnungsfuge.

```

ex:AdjustedObsA_1 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_01 ;
  sosa:madeBySensor ex:A2HardStation ;
  sosa:observedProperty ex:adjustedFugeTemperature ;
  sosa:result "5.91"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-14 01:00:00+00:00"^^xsd:dateTime .

ex:ExpansionJoint_01 a ifc:IfcDiscreteAccessory ;
  rdfs:label "Dehnungsfuge_A"@de .
    
```

Die beiden vorgestellten Varianten demonstrieren die Möglichkeit der semantischen und strukturierten Integration sensorischer Daten.

## X.19 Python-Skripte

### RDF2SOSA

```

RDFtoSOSA.py 2 X
C:\Users\ma1183322 > OneDrive - FHNW > Desktop > MTH > 25_Datenbeschaffung > 5.1-Wetterdaten > RDFtoSOSA.py > ...
14 # Crea un nuovo grafo RDF per il file Wetterdaten.ttl
15 g_output = Graph()
16 g_output.bind("sosa", SOSA)
17 g_output.bind("ex", EX)
18 g_output.bind("ifc", IFC)
19
20 # Entità principali
21 sensor_uri = EX["A2HardStation"]
22 bridge_uri = EX["IfcBridge_1"]
23 temp_prop = EX["Temperature"]
24
25 # Definizioni statiche
26 g_output.add((sensor_uri, RDF.type, SOSA.Sensor))
27 g_output.add((sensor_uri, RDFS.label, Literal("A2 Hard Wetterstation", lang="de")))
28 g_output.add((bridge_uri, RDF.type, IFC.IfcBridge))
29 g_output.add((bridge_uri, RDFS.label, Literal("A2 Hard Brücke", lang="de")))
30 g_output.add((temp_prop, RDF.type, SOSA.ObservableProperty))
31 g_output.add((temp_prop, RDFS.label, Literal("Lufttemperatur", lang="de")))
32
33 # Estrazione di 3 osservazioni
34 count = 0
35 for s in g_input.subjects():
36     temp = None
37     time = None
38     for p, o in g_input.predicate_objects(subject=s):
39         if "temp" in str(p): temp = o
40         if "timestamp" in str(p): time = o
41     if temp and time:
42         obs = EX[f"Obs_{count+1}"]
43         g_output.add((obs, RDF.type, SOSA.Observation))
44         g_output.add((obs, SOSA.madeBySensor, sensor_uri))
45         g_output.add((obs, SOSA.hasFeatureOfInterest, bridge_uri))
46         g_output.add((obs, SOSA.observesProperty, temp_prop))
47         g_output.add((obs, SOSA.result, Literal(float(temp), datatype=XSD.float)))
48         g_output.add((obs, SOSA.resultTime, Literal(str(time), datatype=XSD.dateTime)))
49         count += 1
50     if count >= 3:
51         break
52
53 # Salva il nuovo file RDF in formato Turtle
54 g_output.serialize("Wetterdaten.ttl", format="turtle")
55 print("✅ Datei 'Wetterdaten.ttl' erfolgreich erstellt.")
56

```

### Verkehr2SOSA

```

Verkehr2SOSA.py 3 X
C:\Users\ma1183322 > OneDrive - FHNW > Desktop > MTH > 25_Datenbeschaffung > 5.2-Verkehrsdaten > Verkehr2SOSA.py > ...
1 from rdflib import Graph, Namespace, Literal, RDF
2 from rdflib.namespace import XSD
3 import pandas as pd
4
5 # Carica il file CSV
6 df = pd.read_csv("Verkehrsdaten.csv")
7
8 # Namespace unico
9 EX = Namespace("https://naexte.ch/verkehr#")
10 SOSA = Namespace("http://www.w3.org/ns/sosa/")
11
12 # Crea il grafo RDF
13 g = Graph()
14 g.bind("ex", EX)
15 g.bind("sosa", SOSA)
16
17 # Risorse fisse
18 sensor = EX["TrafficSensor277"]
19 bridge = EX["IfcBridge_1"]
20 property = EX["HeavyVehicleCount"]
21
22 g.add((sensor, RDF.type, SOSA.Sensor))
23 g.add((sensor, EX.label, Literal("Verkehrszähler A2 Richtung 2", lang="de")))
24
25 g.add((bridge, RDF.type, EX.IfcBridge))
26 g.add((bridge, EX.label, Literal("Schwarzwaldbrücke Basel", lang="de")))
27
28 g.add((property, RDF.type, SOSA.ObservableProperty))
29 g.add((property, EX.unit, Literal("Anzahl Fahrzeuge", lang="de")))
30
31 # Osservazioni
32 for i, row in df.iterrows():
33     obs = EX[f"Observation_{i+1}"]
34     g.add((obs, RDF.type, SOSA.Observation))
35     g.add((obs, SOSA.hasFeatureOfInterest, bridge))
36     g.add((obs, SOSA.madeBySensor, sensor))
37     g.add((obs, SOSA.observesProperty, property))
38     g.add((obs, SOSA.resultTime, Literal(row["Date"], datatype=XSD.date)))
39     g.add((obs, SOSA.result, Literal(int(row["HeavyVehicles"]), datatype=XSD.integer)))
40
41 # Salvataggio
42 g.serialize("Verkehrsdaten.ttl", format="turtle")

```

## WIM2SOSA

```

WIM2SOSA.py 2 X
C: > Users > ma1183322 > OneDrive - FHNW > Desktop > MTH > 25_Datenbeschaffung > 5.3-WIM-Daten > WIM2SOSA.py > ...
1 |
2 from rdflib import Graph, Namespace, Literal, URIRef
3 from rdflib.namespace import RDF, XSD
4
5 # Namespaces
6 EX = Namespace("http://example.org/wim#")
7 SOSA = Namespace("http://www.w3.org/ns/sosa/")
8 WIM = Namespace("http://example.org/wim/properties/")
9 NAEXTE_IFC = Namespace("https://naexte.ch/ifc#")
10
11 # Beispielhafte Verkehrsdaten-Tage
12 dates = [
13     "2025-03-10",
14     "2025-03-11",
15     "2025-03-12",
16     "2025-03-13",
17     "2025-03-14"
18 ]
19
20 # Erstelle Graph
21 g = Graph()
22 g.bind("ex", EX)
23 g.bind("sosa", SOSA)
24 g.bind("wim", WIM)
25 g.bind("naexteifc", NAEXTE_IFC)
26
27 # Brücke definieren
28 bridge = EX.IfcbBridge_1
29 g.add((bridge, RDF.type, NAEXTE_IFC.IfcbBridge))
30
31 # Generiere WIM-Observationen für jede Achslast an jedem Tag
32 for i, date in enumerate(dates):
33     obs = EX[f"Observation_Achsel_Day{i+1}"]
34     g.add((obs, RDF.type, SOSA.Observation))
35     g.add((obs, SOSA.resultTime, Literal(date, datatype=XSD.date)))
36     g.add((obs, SOSA.result, Literal(9000 + i * 100, datatype=XSD.integer)))
37     g.add((obs, SOSA.observedProperty, WIM["Achslast_1"]))
38     g.add((obs, SOSA.hasFeatureOfInterest, bridge))
39     g.add((obs, SOSA.madeBySensor, EX.WIMStation_1))
40
41 # Serialisiere
42 g.serialize(destination="WIM-Daten.ttl", format="turtle")

```

## Verkehrsdaten

```

Dehnungsdaten.py X
C: > Users > ma1183322 > OneDrive - FHNW > Desktop > MTH > 25_Datenbeschaffung > 5.4-Dehnungsdaten > Dehnungsdaten.py > ...
1 |
2 from rdflib import Graph, Namespace, Literal, RDF
3 from rdflib.namespace import XSD
4 import pandas as pd
5
6 # Caricamento del CSV
7 df = pd.read_csv("dehnungsdaten_verschiebung_only.csv")
8
9 # Namespace
10 EX = Namespace("https://naexte.ch/verkehr#")
11 SOSA = Namespace("http://www.w3.org/ns/sosa/")
12
13 # Creazione grafo
14 g = Graph()
15 g.bind("ex", EX)
16 g.bind("sosa", SOSA)
17
18 # Risorse
19 sensor = EX["BridgeSensor100"]
20 bridge = EX["IfcbBridge_1"]
21 property_disp = EX["BridgeDisplacement"]
22
23 # Definizioni delle risorse
24 g.add((sensor, RDF.type, SOSA.Sensor))
25 g.add((sensor, EX.label, Literal("Sensor für Brückendehnung", lang="de")))
26 g.add((bridge, RDF.type, EX.IfcbBridge))
27 g.add((bridge, EX.label, Literal("Schwarzwaldbrücke Basel", lang="de")))
28 g.add((property_disp, RDF.type, SOSA.ObservableProperty))
29 g.add((property_disp, EX.unit, Literal("Millimeter", lang="de")))
30
31 # Aggiunta delle osservazioni
32 for i, row in df.iterrows():
33     date_str = row["Date"]
34     obs = EX[f"Observation_Displacement_{i+1}"]
35
36     g.add((obs, RDF.type, SOSA.Observation))
37     g.add((obs, SOSA.hasFeatureOfInterest, bridge))
38     g.add((obs, SOSA.madeBySensor, sensor))
39     g.add((obs, SOSA.observedProperty, property_disp))
40     g.add((obs, SOSA.resultTime, Literal(date_str, datatype=XSD.date)))
41     g.add((obs, SOSA.result, Literal(float(row["Verschiebung [mm]"]), datatype=XSD.decimal)))
42
43 # Salvataggio
44 g.serialize("Dehnungsdaten.ttl", format="turtle")

```

**ifcBridgeOWL**

```
ifcBridgeOWL.py 5 X
C: > Users > ma1183322 > Downloads > ifcBridgeOWL.py > ...
1
2 from rdflib import Graph, Namespace
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import networkx as nx
5
6 # Caricamento del file TTL
7 g = Graph()
8 g.parse("/mnt/data/ifcBridgeOWL_extended_full.ttl", format="turtle")
9
10 # Stampa di alcune triple come esempio
11 print("Alcune triple presenti nel grafo:")
12 for i, (s, p, o) in enumerate(g):
13     print(f"{i+1}: {s} -- {p} --> {o}")
14     if i >= 9: # Mostra solo le prime 10 triple
15         break
16
17 # Esecuzione di una query SPARQL per ottenere tutte le classi
18 query = """
19 SELECT DISTINCT ?class WHERE {
20     ?class a owl:Class .
21 }
22 """
23
24 results = g.query(query, initNs={"owl": "http://www.w3.org/2002/07/owl#"})
25
26 print("\nClassi trovate nell'ontologia:")
27 for row in results:
28     print(row.class)
29
30 # Visualizzazione come grafo RDF (semplificata)
31 G = nx.DiGraph()
32
33 for s, p, o in list(g)[:100]: # Limitiamo a 100 triple per visualizzazione
34     G.add_edge(str(s), str(o), label=str(p))
35
36 plt.figure(figsize=(15, 15))
37 pos = nx.spring_layout(G, k=0.3)
38 nx.draw(G, pos, with_labels=True, node_size=500, font_size=8, arrows=True)
39 edge_labels = nx.get_edge_attributes(G, 'label')
40 nx.draw_networkx_edge_labels(G, pos, edge_labels=edge_labels, font_size=6)
41 plt.title("Visualizzazione parziale dell'ontologia (prime 100 triple)")
42 plt.tight_layout()
43 plt.savefig("/mnt/data/ontologia_ifcBridge_graph.png")
44 plt.show()
45
```

## Viewer-App

```

viewer_app.py 6 X
C:\> Users > ma1183322 > OneDrive - FHNW > Desktop > MTH > 31_Resultaten > viewer_app.py > ...

1
2 import streamlit as st
3 import ifcopenshell
4 import ifcopenshell.geom
5 import tempfile
6 import os
7 from rdflib import Graph
8 import networkx as nx
9 import matplotlib.pyplot as plt
10 from io import BytesIO
11 import base64
12
13 # Funzione per caricare e visualizzare un file IFC (mock visivo)
14 def display_ifc_info(file_path):
15     try:
16         model = ifcopenshell.open(file_path)
17         entities = model.by_type("IfcProduct")
18         names = [e.GlobalId for e in entities if hasattr(e, "GlobalId")]
19         return names[:10] # mostriamo solo i primi 10 per esempio
20     except Exception as e:
21         return [str(e)]
22
23 # Funzione per visualizzare un grafo RDF
24 def plot_ontology_graph(g):
25     G = nx.DiGraph()
26     for s, p, o in g:
27         G.add_edge(str(s), str(o), label=str(p))
28
29     plt.figure(figsize=(12, 8))
30     pos = nx.spring_layout(G, k=0.5)
31     nx.draw(G, pos, with_labels=True, node_color='lightblue', edge_color='gray', node_size=2000, font_size=8)
32     plt.title("Ontologia RDF - Visualizzazione base")
33     buffer = BytesIO()
34     plt.savefig(buffer, format='png')
35     buffer.seek(0)
36     img_bytes = buffer.read()
37     encoded = base64.b64encode(img_bytes).decode()
38     return f''
39
40 # Interfaccia Streamlit
41 st.title("Prototipo Viewer - IFC e Ontologia RDF")
42
43 uploaded_ifc = st.file_uploader("Carica un file IFC", type=["ifc"])
44 if uploaded_ifc:
45     with tempfile.NamedTemporaryFile(delete=False, suffix=".ifc") as tmp_ifc:
46         tmp_ifc.write(uploaded_ifc.read())
47         tmp_ifc_path = tmp_ifc.name
48     st.subheader("Contenuto file IFC")
49     st.write(display_ifc_info(tmp_ifc_path))
50     os.unlink(tmp_ifc_path)
51
52 uploaded_owl = st.file_uploader("Carica un file OWL/Turtle", type=["ttl", "owl"])
53 if uploaded_owl:
54     with tempfile.NamedTemporaryFile(delete=False, suffix=".ttl") as tmp_ttl:
55         tmp_ttl.write(uploaded_owl.read())
56         tmp_ttl_path = tmp_ttl.name
57     st.subheader("Ontologia RDF")
58     g = Graph()
59     g.parse(tmp_ttl_path, format="turtle")
60     html_graph = plot_ontology_graph(g)
61     st.markdown(html_graph, unsafe_allow_html=True)
62     os.unlink(tmp_ttl_path)
63

```

## X.20 TTL-File-Sensoren

### Wetterdaten

```

Wetterdaten.ttl
Datei Bearbeiten Ansicht

@prefix ex: <https://example.org/data/> .
@prefix ifc: <http://ifcow1.openbimstandards.org/IFC4-3#> .
@prefix rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#> .
@prefix sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/> .
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> .

ex:Obs_1 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:A2HardStation ;
  sosa:observedProperty ex:Temperature ;
  sosa:result "2.913"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-14 01:00:00+00:00"^^xsd:dateTime .

ex:Obs_2 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:A2HardStation ;
  sosa:observedProperty ex:Temperature ;
  sosa:result "4.4229"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2024-12-04 18:00:00+00:00"^^xsd:dateTime .

ex:Obs_3 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:A2HardStation ;
  sosa:observedProperty ex:Temperature ;
  sosa:result "3.4717"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-01-06 05:30:00+00:00"^^xsd:dateTime .

ex:A2HardStation a sosa:Sensor ;
  rdfs:label "A2 Hard Wetterstation"@de .

ex:IfcBridge_1 a ifc:IfcBridge ;
  rdfs:label "A2 Hard Brücke"@de .

ex:Temperature a sosa:ObservableProperty ;
  rdfs:label "Lufttemperatur"@de .

```

### Verkehrsdaten

```

Verkehrsdaten.ttl
Datei Bearbeiten Ansicht

@prefix ex: <https://naexte.ch/verkehr#> .
@prefix sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/> .
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> .

ex:Observation_1 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 3886 ;
  sosa:resultTime "2025-03-07"^^xsd:date .

ex:Observation_10 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 210 ;
  sosa:resultTime "2025-03-16"^^xsd:date .

ex:Observation_11 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 3623 ;
  sosa:resultTime "2025-03-17"^^xsd:date .

ex:Observation_2 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 1250 ;
  sosa:resultTime "2025-03-08"^^xsd:date .

ex:Observation_3 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 208 ;
  sosa:resultTime "2025-03-09"^^xsd:date .

ex:Observation_4 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 3267 ;
  sosa:resultTime "2025-03-10"^^xsd:date .

ex:Observation_5 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 4104 ;
  sosa:resultTime "2025-03-11"^^xsd:date .

ex:Observation_6 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 4078 ;
  sosa:resultTime "2025-03-12"^^xsd:date .

ex:Observation_7 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 4056 ;
  sosa:resultTime "2025-03-13"^^xsd:date .

ex:Observation_8 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 3874 ;
  sosa:resultTime "2025-03-14"^^xsd:date .

ex:Observation_9 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
  sosa:madeBySensor ex:TrafficSensor277 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result 1273 ;
  sosa:resultTime "2025-03-15"^^xsd:date .

ex:HeavyVehicleCount a sosa:ObservableProperty ;
  ex:unit "Anzahl Fahrzeuge"@de .

ex:IfcBridge_1 a ex:IfcBridge ;
  ex:label "Schwarzwaldbrücke Basel"@de .

ex:TrafficSensor277 a sosa:Sensor ;
  ex:label "Verkehrszähler A2 Richtung 2"@de .

```

## WIM-Daten

```

WIM-Daten.ttl
Datei Bearbeiten Ansicht

@prefix ex: <http://example.org/wim#> .
@prefix naexteifc: <https://naexte.ch/ifc#> .
@prefix sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/> .
@prefix wim: <http://example.org/wim/properties/>
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>

ex:Observation_Achse1_Day1 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:WIMStation_1 ;
sosa:observedProperty wim:Achslast_1 ;
sosa:result 9000 ;
sosa:resultTime "2025-03-10"^^xsd:date .

ex:Observation_Achse1_Day2 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:WIMStation_1 ;
sosa:observedProperty wim:Achslast_1 ;
sosa:result 9100 ;
sosa:resultTime "2025-03-11"^^xsd:date .

ex:Observation_Achse1_Day3 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:WIMStation_1 ;
sosa:observedProperty wim:Achslast_1 ;
sosa:result 9200 ;
sosa:resultTime "2025-03-12"^^xsd:date .

ex:Observation_Achse1_Day4 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:WIMStation_1 ;
sosa:observedProperty wim:Achslast_1 ;
sosa:result 9300 ;
sosa:resultTime "2025-03-13"^^xsd:date .

ex:Observation_Achse1_Day5 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:WIMStation_1 ;
sosa:observedProperty wim:Achslast_1 ;
sosa:result 9400 ;
sosa:resultTime "2025-03-14"^^xsd:date .

ex:IfcBridge_1 a naexteifc:IfcBridge .
    
```

## Dehnungsdaten

```

Dehnungsdaten.ttl
Datei Bearbeiten Ansicht

@prefix ex: <https://naexte.ch/verkehr#> .
@prefix sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/> .
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> .

ex:Observation_Displacement_1 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 5.05 ;
sosa:resultTime "2025-03-07"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_10 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 0.27 ;
sosa:resultTime "2025-03-16"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_11 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 4.71 ;
sosa:resultTime "2025-03-17"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_2 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 1.62 ;
sosa:resultTime "2025-03-08"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_3 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 0.27 ;
sosa:resultTime "2025-03-09"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_4 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 4.25 ;
sosa:resultTime "2025-03-10"^^xsd:date .
    
```

```

ex:Observation_Displacement_5 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 5.34 ;
sosa:resultTime "2025-03-11"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_6 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 5.3 ;
sosa:resultTime "2025-03-12"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_7 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 5.27 ;
sosa:resultTime "2025-03-13"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_8 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 5.04 ;
sosa:resultTime "2025-03-14"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_9 a sosa:Observation ;
sosa:hasFeatureOfInterest ex:IfcBridge_1 ;
sosa:madeBySensor ex:BridgeSensor100 ;
sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
sosa:result 1.65 ;
sosa:resultTime "2025-03-15"^^xsd:date .

ex:BridgeDisplacement a sosa:ObservableProperty ;
ex:unit "Millimeter"@de .

ex:BridgeSensor100 a sosa:Sensor ;
ex:label "Sensor für Brückendehnung"@de .

ex:IfcBridge_1 a ex:IfcBridge ;
ex:label "Schwarzwaldbrücke Basel"@de .
    
```

## Verkehrsdaten\_IFCBridgeOWL

```

Verkehrsdaten_ifcBridgeOWL.ttl  X  +
Datei  Bearbeiten  Ansicht

@prefix brot: <https://w3id.org/brot#> .
@prefix ex: <https://example.org/bridge#> .
@prefix ifcBridgeOWL: <https://example.org/ifcBridgeOWL#> .
@prefix rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#> .
@prefix sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/> .
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> .

ex:Observation_Traffic_1 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "3886"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-07"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_10 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "3874"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-14"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_11 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "1273"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-15"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_2 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "210"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-16"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_3 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "3623"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-17"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_4 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "1250"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-08"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_5 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "208"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-09"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_6 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "3267"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-10"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_7 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "4104"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-11"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_8 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "4078"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-12"^^xsd:date .

ex:Observation_Traffic_9 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
  sosa:result "4056"^^xsd:int ;
  sosa:resultTime "2025-03-13"^^xsd:date .

ex:ExpansionJoint_1 a ifcBridgeOWL:IcfDiscreteAccessory,
  brot:Joint ;
  rdfs:label "Dehnfuge IfcBridge_1" ;
  ifcBridgeOWL:represents ex:IcfBridge_1 ;
  brot:heavyVehicleCountPerDay "208"^^xsd:int,
    "210"^^xsd:int,
    "1250"^^xsd:int,
    "1273"^^xsd:int,
    "3267"^^xsd:int,
    "3623"^^xsd:int,
    "3874"^^xsd:int,
    "3886"^^xsd:int,
    "4056"^^xsd:int,
    "4078"^^xsd:int,
    "4104"^^xsd:int .
    
```

## Dehnungsdaten\_IFCBridgeOWL

```

Dehnungsdaten_ifcBridgeOWL.ttl  X  +
Datei  Bearbeiten  Ansicht

@prefix brot: <https://w3id.org/brot#> .
@prefix ex: <https://example.org/bridge#> .
@prefix ifcBridgeOWL: <https://example.org/ifcBridgeOWL#> .
@prefix rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#> .
@prefix sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/> .
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> .

ex:Observation_Displacement_1 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "5.05"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-07"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_10 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "5.04"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-14"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_11 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "1.65"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-15"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_2 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "0.27"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-16"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_3 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "4.71"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-17"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_4 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "1.62"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-08"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_5 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "0.27"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-09"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_6 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "4.25"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-10"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_7 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "5.34"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-11"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_8 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "5.3"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-12"^^xsd:date .

ex:Observation_Displacement_9 a sosa:Observation ;
  sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
  sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
  sosa:result "5.27"^^xsd:float ;
  sosa:resultTime "2025-03-13"^^xsd:date .

ex:ExpansionJoint_1 a ifcBridgeOWL:IcfDiscreteAccessory,
  brot:Joint ;
  rdfs:label "Dehnfuge IfcBridge_1" ;
  ifcBridgeOWL:represents ex:IcfBridge_1 ;
  brot:hasMeasuredExtension "0.27"^^xsd:float,
    "1.62"^^xsd:float,
    "1.65"^^xsd:float,
    "4.25"^^xsd:float,
    "4.71"^^xsd:float,
    "5.04"^^xsd:float,
    "5.05"^^xsd:float,
    "5.27"^^xsd:float,
    "5.3"^^xsd:float,
    "5.34"^^xsd:float .
    
```

## ifcBridgeExtendend

```
ifcBridgeOWL_extended_full.ttl x +
Datei Bearbeiten Ansicht

@prefix brcomp: <https://w3id.org/brcomp#> .
@prefix brot: <https://w3id.org/brot#> .
@prefix ex: <https://example.org/bridge/> .
@prefix ifcbridge: <https://example.org/ifcbridge#> .
@prefix rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#> .
@prefix sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/> .

ex:IfcBridge_1 a ifcbridge:IfcBridge ;
  sosa:hosts ex:Sensor_100 ;
  brot:hasPart ex:BridgePart_1 .

ex:BridgePart_1 a ifcbridge:IfcBridgePart ;
  brot:hasComponent ex:DeckSlab_1,
    ex:MainGirder_1,
    ex:PierStem_1,
    ex:RetainingWall_1 .

ex:DeckSlab_1 a ifcbridge:IfcSlab ;
  brcomp:hasJoint ex:Joint_1 .

ex:Joint_1 a ifcbridge:IfcDiscreteAccessory .

ex:MainGirder_1 a ifcbridge:IfcBeam .

ex:PierStem_1 a ifcbridge:IfcColumn .

ex:RetainingWall_1 a ifcbridge:IfcWall .

ex:Sensor_100 a ifcbridge:IfcSensor .

ifcbridge:IfcBeam rdfs:subClassOf brcomp:GirderComponent .
ifcbridge:IfcBridge rdfs:subClassOf brot:Bridge .
ifcbridge:IfcBridgePart rdfs:subClassOf brot:BridgePart .
ifcbridge:IfcColumn rdfs:subClassOf brcomp:PierComponent .
ifcbridge:IfcDiscreteAccessory rdfs:subClassOf brcomp:ExpansionJoint .
ifcbridge:IfcSensor rdfs:subClassOf sosa:Sensor .
ifcbridge:IfcSlab rdfs:subClassOf brcomp:DeckComponent .
ifcbridge:IfcWall rdfs:subClassOf brcomp:RetainingWallComponent .
```

**ifcBridgeOWL\_Schwarzwaldbrücke**

```

ifcBridgeOWL_Brücke-modificato. x +
Datei Bearbeiten Ansicht

@prefix brcomp: <https://w3id.org/brcomp#> .
@prefix brot: <https://w3id.org/brot#> .
@prefix ex: <https://example.org/bridge#> .
@prefix ifcBridgeOWL: <https://example.org/ifcBridgeOWL#> .
@prefix rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#> .

ex:e1094 a ifcBridgeOWL:IfcDiscreteAccessory .

ex:e1293 a ifcBridgeOWL:IfcDiscreteAccessory .

ex:e1366 a ifcBridgeOWL:IfcDiscreteAccessory .

ex:e1551 a ifcBridgeOWL:IfcDiscreteAccessory .

ex:e1977 a ifcBridgeOWL:IfcSlab .

ex:e2050 a ifcBridgeOWL:IfcSlab .

ex:e2094 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2131 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2168 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2205 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2242 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2279 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2316 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2353 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2390 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2427 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2464 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2501 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2538 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2575 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2612 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e2649 a ifcBridgeOWL:IfcBeam ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e34 a ifcBridgeOWL:IfcBridge ;
  rdfs:label "Schwarzwaldbr\X2\00FC\X0\cke" ;
  brot:hasComponent ex:e1078,
    ex:e1961,
    ex:e2078,
    ex:e2687,
    ex:e57,
    ex:e689 .

ex:e342 a ifcBridgeOWL:IfcSlab .

ex:e3715 a ifcBridgeOWL:IfcSlab ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e375 a ifcBridgeOWL:IfcSlab .

ex:e3750 a ifcBridgeOWL:IfcSlab ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e3785 a ifcBridgeOWL:IfcSlab ;
  rdfs:label "Nurbs" .

ex:e1078 a ifcBridgeOWL:IfcBridgePart ;
  rdfs:label "Dehnungsfuge" .

ex:e1961 a ifcBridgeOWL:IfcBridgePart ;
  rdfs:label "Fundamente" .

ex:e2078 a ifcBridgeOWL:IfcBridgePart ;
  rdfs:label "Tr\X2\00E4\X0\ger" .

ex:e2687 a ifcBridgeOWL:IfcBridgePart ;
  rdfs:label "Platte" .

ex:e57 a ifcBridgeOWL:IfcBridgePart ;
  rdfs:label "Wiederlager" .

ex:e689 a ifcBridgeOWL:IfcBridgePart ;
  rdfs:label "Pfeiler" .

ifcBridgeOWL:IfcBridge rdfs:subClassOf brot:Bridge .

ifcBridgeOWL:IfcDiscreteAccessory rdfs:subClassOf brot:Joint .

ifcBridgeOWL:IfcBridgePart rdfs:subClassOf brcomp:BridgePartComponent .

ifcBridgeOWL:IfcSlab rdfs:subClassOf brcomp:DeckSlab .

ifcBridgeOWL:IfcBeam rdfs:subClassOf brcomp:Beam .

```

## X.21 SPARQL-Ergebnisse aus YASGUI

```

Result-YASGUI.srx
Datei Bearbeiten Ansicht

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<sparql xmlns="http://www.w3.org/2005/sparql-results#">
  <head>
    <variable name="obs"/>
    <variable name="property"/>
    <variable name="value"/>
    <variable name="date"/>
  </head>
  <results>
    <result>
      <binding name="obs">
        <uri>http://example.org/wim#Observation_Achse1_Day1</uri>
      </binding>
      <binding name="property">
        <uri>http://example.org/wim/properties/Achslast_1</uri>
      </binding>
      <binding name="value">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer">9000</literal>
      </binding>
      <binding name="date">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#date">2025-03-10</literal>
      </binding>
    </result>
    <result>
      <binding name="obs">
        <uri>http://example.org/wim#Observation_Achse1_Day2</uri>
      </binding>
      <binding name="property">
        <uri>http://example.org/wim/properties/Achslast_1</uri>
      </binding>
      <binding name="value">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer">9100</literal>
      </binding>
      <binding name="date">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#date">2025-03-11</literal>
      </binding>
    </result>
    <result>
      <binding name="obs">
        <uri>http://example.org/wim#Observation_Achse1_Day3</uri>
      </binding>
      <binding name="property">
        <uri>http://example.org/wim/properties/Achslast_1</uri>
      </binding>
      <binding name="value">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer">9200</literal>
      </binding>
      <binding name="date">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#date">2025-03-12</literal>
      </binding>
    </result>
    <result>
      <binding name="obs">
        <uri>http://example.org/wim#Observation_Achse1_Day4</uri>
      </binding>
      <binding name="property">
        <uri>http://example.org/wim/properties/Achslast_1</uri>
      </binding>
      <binding name="value">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer">9300</literal>
      </binding>
      <binding name="date">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#date">2025-03-13</literal>
      </binding>
    </result>
    <result>
      <binding name="obs">
        <uri>http://example.org/wim#Observation_Achse1_Day5</uri>
      </binding>
      <binding name="property">
        <uri>http://example.org/wim/properties/Achslast_1</uri>
      </binding>
      <binding name="value">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer">9400</literal>
      </binding>
      <binding name="date">
        <literal datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#date">2025-03-14</literal>
      </binding>
    </result>
  </results>
</sparql>

```

## X.22 SPARQL-Abfrage in GraphDB

### SELECT

The screenshot shows the GraphDB SPARQL Query & Update interface. The left sidebar contains navigation options: Import, Explore, SPARQL (selected), GraphQL, Monitor, Setup, Lab, and Help. The main area displays a SPARQL query with line numbers 1 through 21. The query defines prefixes for ex, brot, sosa, and xsd, and then performs a SELECT query with a WHERE clause containing two observations: one for bridge expansion joints and one for heavy vehicle counts. The query is ordered by the date of the results.

```

1 PREFIX ex: <https://example.org/bridge#>
2 PREFIX brot: <https://w3id.org/brot#>
3 PREFIX sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/>
4 PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
5
6 SELECT ?date ?dehnung ?fahrzeuge
7 WHERE {
8   ?obs_dehnung a sosa:Observation ;
9     sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
10    sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
11    sosa:result ?dehnung ;
12    sosa:resultTime ?date .
13
14   ?obs_verkehr a sosa:Observation ;
15     sosa:hasFeatureOfInterest ex:ExpansionJoint_1 ;
16     sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
17     sosa:result ?fahrzeuge ;
18     sosa:resultTime ?date .
19 }
20 ORDER BY ?date
21
    
```

### CONSTRUCT + INSERT

The screenshot shows the GraphDB SPARQL Query & Update interface with a CONSTRUCT and INSERT query. The left sidebar is the same as in the previous screenshot. The main area displays a SPARQL query with line numbers 1 through 25. The query defines the same prefixes as the SELECT query. It uses a CONSTRUCT clause to create a new statement about a critical joint, followed by a WHERE clause that filters for observations where the date is on or after 25.0 or the number of vehicles is greater than 4000. The INSERT clause is highlighted with a red box.

```

1 PREFIX ex: <https://example.org/bridge#>
2 PREFIX brot: <https://w3id.org/brot#>
3 PREFIX sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/>
4 PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
5
6 CONSTRUCT {
7   ?joint a ex:KritischerJoint ;
8     ex:criticalOnDate ?date .
9 }
10 WHERE {
11   ?obs_dehnung a sosa:Observation ;
12     sosa:hasFeatureOfInterest ?joint ;
13     sosa:observedProperty ex:BridgeDisplacement ;
14     sosa:result ?dehnung ;
15     sosa:resultTime ?date .
16
17   ?obs_verkehr a sosa:Observation ;
18     sosa:hasFeatureOfInterest ?joint ;
19     sosa:observedProperty ex:HeavyVehicleCount ;
20     sosa:result ?fahrzeuge ;
21     sosa:resultTime ?date .
22
23   FILTER(?dehnung >= 25.0 || ?fahrzeuge > 4000)
24 }
25
    
```

### Mit INSERT

Added 4 statements. Query took 0.2s, moments ago.