

## Positionspapier

Verkehrsinfrastrukturforschung – DACH 2023

# ADAPTIVE DIGITALE ZWILLINGE FÜR NACHHALTIGKEITSBEWERTUNGEN IM INFRASTRUKTURBAU

### AutorInnen

Prof. Dr. Markus König  
Dr. Philipp Hagedorn  
Simon Kosse  
Liu Liu

Prof. Dr. Rade Hajdin  
Dr. Tim Blumenfeld  
Dr. Nikola Tanasic  
Dr. Frank Schiffmann

Dr. Holger Diederich  
Christian Schlatter  
Dr. Tim Zinke  
Jessica Steinjan

Prof. Dr. Alfred Strauss  
Greta Weifner  
Eliana Torres Schlader

# 1. Einleitung und Problemstellung

Die öffentliche Hand steht zunehmend vor der Herausforderung, Infrastrukturmaßnahmen nicht nur nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien zu bewerten, sondern auch im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeitswirkungen. Entlang des Lebenszyklus von Ingenieurbauwerken entstehen umfangreiche Daten aus Planung, Bau, Betrieb und Rückbau, die bislang jedoch nur eingeschränkt für übergreifende Bewertungen genutzt werden. Dieses vorhandene Datenpotential kann erweitert, strukturiert und verknüpft werden, um Nachhaltigkeitsanalysen über den gesamten Lebenszyklus zu ermöglichen.

Mit der Novelle des Klimaschutzgesetzes von 2024 ergeben sich zudem neue rechtliche Verpflichtungen, die insbesondere den Verkehrssektor betreffen. Bei der Planung, Auswahl und Umsetzung von Investitionen muss künftig systematisch geprüft werden, inwiefern Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen. Gleichzeitig erlaubt das Gesetz, höhere Bau- und Erhaltungskosten zu rechtfertigen, sofern sie der nachweisbaren Emissionsminderung dienen. Damit wächst der Bedarf an verlässlichen, transparenten und kontinuierlich aktualisierbaren Bewertungsinstrumenten.

Digitale Zwillinge bieten hierfür einen vielversprechenden Ansatz. Sie verknüpfen bestehende Bauwerksdaten mit Echtzeitinformationen und ermöglichen so eine dynamische Bewertung ökologischer, ökonomischer und materieller Auswirkungen. Im Forschungsprojekt GreenInfraTwins wurde untersucht, in welchem Umfang Digitale Zwillinge für Nachhaltigkeitsanalysen von Ingenieurbauwerken nutzbar gemacht werden können und welche Voraussetzungen hierfür erforderlich sind.

Dieses Positionspapier bündelt die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse. Es identifiziert zentrale Anforderungen, Potenziale und Limitationen beim Einsatz Digitaler Zwillinge und leitet daraus konkrete Handlungsempfehlungen für eine nachhaltigkeitsbezogene Implementierung ab. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf der Nutzungs- und Rückbauphase von Ingenieurbauwerken, da hier wesentliche Emissionen, Materialflüsse und Erhaltungsbedarfe entstehen. Ziel ist es, durch den Einsatz Digitaler Zwillinge das Erreichen der Klimaziele zu unterstützen, Kreislaufwirtschaft zu fördern und eine ganzheitliche, datenbasierte Entscheidungsfindung über den Lebenszyklus zu ermöglichen.

## Digitaler Zwilling

*Ein digitaler Zwilling im Infrastrukturbau ist eine virtuelle, dynamische Repräsentation eines Bauwerks oder Systems (physischer Zwilling), die über einen (teil-)automatisierten Daten- und Informationsaustausch mit der realen Infrastruktur verknüpft ist. Hierdurch werden Analysen, Simulationen und Entscheidungsunterstützung über den Lebenszyklus ermöglicht. Im Unterschied zu industriellen Anwendungen liegt der Schwerpunkt auf langjährigen Betriebs-, Zustands- und*

*Erhaltungsaufgaben sowie der Integration von BIM-, GIS- und Sensordaten für Planung, Bau und Betrieb öffentlicher Infrastrukturen. Ein semantischer Construction Digital Twin nach Boje et al. [1] erweitert dieses Konzept um einen gemeinsamen, ontologiebasierten Bedeutungs- bzw. Wissenslayer (Linked Data, Knowledge Graph), der Daten und Prozesse formal beschreibt und damit semantische Interoperabilität und weitergehende Auswertungen ermöglicht.*

## 2. Bezugnahme zu länderpolitischen Entwicklungen

In Deutschland soll im Jahr 2026 der Regelprozess für die Anwendung der BIM-Methode in Infrastrukturprojekten gestartet werden. Gleichzeitig wird derzeit vom Bundesministerium für Verkehr eine Strategie für die Entwicklung und Anwendung des Digitalen Zwillinges im Bereich der Bundesfernstraßen ausgearbeitet. Dabei werden auch Nachhaltigkeitsbewertungsaspekte mitberücksichtigt. Die Anwendung von Digitalen Zwillingen soll im Lebenszyklus von Bauwerken erfolgen, wobei ein Schwerpunkt auf die Nutzungsphase gelegt wird. Dies entspricht vollständig der Schwerpunktlegung in diesem Forschungsprojekt. Die operative Anwendung von Digitalen Zwillingen findet derzeit nur in einzelnen Testfeldern statt und fokussiert sich (noch) nicht auf Nachhaltigkeitsanalyseaufgaben.

Die digitale Transformation im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen in Österreich verfolgt das Ziel, Planungs-, Bau- und Erhaltungsprozesse effizienter, transparenter und stärker datenbasiert zu gestalten. Im Fokus stehen insbesondere BIM-Anwendungen und die Ausprägung von Digitalen Zwillingen für den späteren Betrieb, inklusive Fragen zu Modellstandards, Datenschnittstellen, Speicherlösungen sowie Governance- und Verantwortlichkeitsstrukturen. Für den Zeitraum 2020 bis 2030 lässt sich die Einführung vereinfacht in drei Phasen gliedern: 2020–2023 stand die Identifikation geeigneter digitalisierbarer Prozesse im Vordergrund, 2024–2026 die organisatorische und methodische Ausgestaltung einschließlich der Definition von BIM- und Digital-Twin-Anforderungen, und 2027–2030 die schrittweise Implementierung und Skalierung in den Regelbetrieb. Damit wird Digitalisierung als strukturierter Transformationsprozess verstanden, der technische, organisatorische und rechtliche Aspekte verbindet und gleichzeitig eine verbesserte Grundlage für nachhaltigkeitsorientierte Entscheidungen im Infrastrukturbereich schafft.

In der Schweiz entwickeln sich Nachhaltigkeitsanalysen von Ingenieurbauwerken zunehmend entlang eines integrierten Lebenszyklusansatzes, der ökologische, sozio-kulturelle und ökonomische Aspekte systematisch miteinander verknüpft und durch digitale Methoden unterstützt wird. Gesetzliche Grundlagen wie das Klima- und Innovationsgesetz (KIG), das Bundesgesetz über die Nationalstraßen (NSG) sowie das Bundesgesetz über das öffentliche Beschaffungswesen (BöB) stärken seit den letzten Jahren explizit die Berücksichtigung von Umweltwirkungen und Nachhaltigkeitskriterien in Planung, Bau und Betrieb von Infrastrukturbauwerken. Methodisch stützen sich Ökobilanzen dabei auf international und national anerkannte Normen und werden zunehmend mit Lebenszykluskostenanalysen ergänzt, wie sie vom Bundesamt für Straßen (ASTRA) für Nationalstraßen verbindlich eingefordert werden. Parallel dazu treibt das ASTRA, im Rahmen seiner Digitalisierungsstrategie die Einführung von Building Information Modeling (BIM) und Digitalen Zwillingen voran. Ziel ist es, Daten über den gesamten Lebenszyklus von Infrastrukturobjekten konsistent bereitzustellen („Single Point of Truth“) und für das Asset Management sowie Qualitäts- und Nachhaltigkeitsbewertungen nutzbar zu machen.

## 3. Anforderungen

### 3.1 Gesellschaftliche und organisatorische Randbedingungen

Der Einsatz Digitaler Zwillinge im Infrastrukturbau wird von zahlreichen Akteuren aus der Politik, von der öffentlichen Hand, der Forschung und der Wirtschaft vorangetrieben. Daraus ergibt sich ein hoher Koordinationsbedarf, um parallele Entwicklungen zu vermeiden und skalierbare Lösungen zu ermöglichen. Digitale Zwillinge müssen bestehende Systeme und Prozesse schrittweise ergänzen; ein vollständiger Ersatz vorhandener Lösungen ist nicht realistisch.

Die Anwendung erfordert interdisziplinäre Kompetenzen, insbesondere in den Bereichen Digitale Zwillinge und Nachhaltigkeitsbewertung. Diese sind bei Infrastrukturbetreibern bislang nur begrenzt verfügbar, so dass die Einführung zunächst mit zusätzlichem organisatorischem und personellem Aufwand verbunden ist. Strategisch stellt sich zudem die Frage, ob Digitale Zwillinge als Lösung für einzelne Bauwerke, oder von Beginn an im Rahmen einer übergeordneten Portfoliostrategie umgesetzt werden.

### 3.2 Anforderungen an Nachhaltigkeitsanalysen

Für Ingenieurbauwerke existieren bislang keine einheitlichen, etablierten Instrumente zur systematischen Integration von Nachhaltigkeitsindikatoren in Entscheidungsprozesse. Allgemein anerkannte Berechnungsregeln, Systemgrenzen sowie eine harmonisierte Gewichtung der Indikatoren fehlen weitgehend, obwohl internationale Zertifizierungsinitiativen eigene Standards in den vergangenen Jahren entwickelt haben (etwa BREEAM Infrastructure).

Digitale Zwillinge können ein mächtiges Instrument zur Schliessung dieser Lücke darstellen, deren Mehrwert sollte daher klar herausgearbeitet werden. Akzeptanz entsteht nur dann, wenn verstanden wird, welche zusätzlichen Erkenntnisse – etwa hinsichtlich Aktualität, Vergleichbarkeit oder Prognosefähigkeit – gegenüber bestehenden Bewertungsansätzen gewonnen werden können.

#### Indikatoren und Nachhaltigkeitsanalysen

*Im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen werden Indikatoren verwendet, um komplexe Sachverhalte vereinfacht darzustellen und messbar zu machen, ohne die Kernaussage zu verfälschen. Diese können direkt oder*

*durch Verknüpfung mit Indikatorengruppen und schließlich mit übergeordneten Leistungszielen zur Beurteilung der Nachhaltigkeitsdimensionen Ökologie, Sozio-Kultur und Ökonomie herangezogen werden.*

### 3.3 Technische Anforderungen

Die Implementierung digitaler Zwillinge zur Nachhaltigkeitsbewertung erfordert die Zusammenführung heterogener Datenquellen, von Bauwerksdaten in Berichten bis hin zu Sensordaten. Eine zentrale Aufgabe liegt dabei in der Wahl des für den jeweiligen Prozess geeigneten Reifegrads: Während detaillierte, semantisch angereicherte und mit weiteren Datenquellen verknüpfte Bauwerksmodelle präzise Analysen ermöglichen, erfordern sie erheblichen Implementierungsaufwand und eine leistungsstarke IT-Infrastruktur. Zudem erschweren die historisch gewachsenen, oft länderspezifischen Softwarelandschaften der Infrastrukturbetreiber durch fehlende Interoperabilität und nicht implementierte standardisierte Schnittstellen einen durchgängigen Informationsfluss. Ziel muss daher eine anforderungsgerechte Lösung sein, die die Erhebung, Verarbeitung und Speicherung aller erforderlichen Daten durch ein intelligentes Informationsmanagement optimiert und den Ingenieursachverstand durch gezielte Datenanalysen unterstützt, statt ihn durch zu komplexe Systeme zu ersetzen.

Ein wesentliches Hindernis für die flächendeckende Nutzung ist eine lückenhafte Datenbasis. Für Bestandsbrücken fehlen häufig geeignete IFC-Modelle mit den erforderlichen Attributen als Grundlage. Als Ergebnis ist eine aufwendige Nachmodellierungen und -attribuierungen, etwa auf Basis von Scan2BIM-Verfahren, erforderlich. Um digitale Zwillinge für Nachhaltigkeitsanalysen in der Praxis anwenden zu können, müssen u. a. Daten aus Zustandserhebungen, Monitoring-Systemen und Umweltdatenbanken integriert werden, was die technische und konzeptionelle Komplexität weiter erhöht. Erschwert wird dies durch internationale voneinander abweichenden Regelwerken und länderspezifische Berechnungsvorschriften für Nachhaltigkeitsindikatoren. Eine erfolgreiche Umsetzung bedarf daher nicht nur technische geeigneter Systeme, sondern einer engen interdisziplinären Zusammenarbeit, um konsistente Datenqualitäten über den gesamten Lebenszyklus sicherzustellen und auf verschiedene Stakeholdergruppen übertragbare Bewertungsansätze zu etablieren.

# Überblick über Anforderungen

## **Eine Einbettung in existierende Geschäftsprozesse erhöht die Akzeptanz.**

Existierende technische Lösungen und Prozesse werden zukünftig durch Digitale Zwillinge unterstützt, was eine sukzessive Weiterentwicklung durch alle Prozessbeteiligten erfordert. Hierfür müssen Kompetenzen aufgebaut und skalierbare, organisationsbezogene Lösungen entwickelt werden.

## **Anforderungen an Nachhaltigkeitsanalysen müssen definiert werden.**

Alle Organisationen, die Digitale Zwillinge für Infrastrukturbauwerke und deren Nachhaltigkeitsbewertung einsetzen wollen, müssen die Randbedingungen für den Einsatz erheben und definieren. Dazu gehören die Prozesse, in denen Nachhaltigkeitsanalysen für die Entscheidungsfindung eingesetzt werden sollen, und die zur Ausführung erforderlichen Daten.

## **Integration heterogener Datenquellen erfordert ausgewogene technische Ansätze.**

Die Verbindung von Sensordaten, Planungsmodellen und Betriebsinformationen ist essenziell, doch sowohl einfache als auch hochkomplexe Umsetzungen bringen Einschränkungen mit sich. Das Finden einer praxistauglichen Balance zwischen Flexibilität, Genauigkeit und Implementierungsaufwand ist erforderlich, um digitale Zwillinge sinnvoll für Nachhaltigkeitsbewertungen einzusetzen.

## **Einheitliche Standards und Interoperabilität beschleunigen die Umsetzung.**

Unterschiedliche Softwarelösungen und unzureichende Schnittstellen behindern durchgängige Informationsflüsse. Ohne einheitliche Datenmodelle, klare Anforderungen und leistungsfähige IT-Architekturen bleibt die konsistente Bewertung von Nachhaltigkeit technisch schwer umsetzbar.

## **Datenverfügbarkeit und länderspezifische Unterschiede müssen mitgedacht werden.**

Unvollständige oder nicht anforderungsgerecht erstellte BIM-Modelle sowie der Mangel an qualitätsgesicherten Lebenszyklusdaten erschweren den Aufbau nachhaltigkeitsbezogener digitaler Zwillinge. Zugleich erfordern nationale Unterschiede in Normen, Indikatoren und Softwarestrukturen auch künftig angepasste und kontextbezogene Lösungen.

## 4. Stakeholderbezogene Mehrwerte und Potenziale



### Öffentliche Hand und Infrastrukturbetreiber:

Für die öffentliche Hand und Betreiber von Verkehrswegen bietet die Verknüpfung von digitalen Zwillingen mit Nachhaltigkeitsanalysen eine neue Qualität der Entscheidungsgrundlage. Durch die Integration von Bestands-, Zustands-, Prozess-, Kosten- und Umweltdaten über den gesamten Lebenszyklus hinweg lassen sich Investitions- und Erhaltungsentscheidungen fachlich fundiert und nachvollziehbar begründen. Dies ermöglicht nicht nur eine transparente Priorisierung von Maßnahmen im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Emissionsminderung, sondern schafft auch die notwendige Basis, um klimapolitische Ziele im Infrastrukturbereich messbar umzusetzen und regulatorische Standards zukunftssicher weiterzuentwickeln.



### Gesellschaft:

Der Einsatz innovativer digitaler Bewertungsmethoden leistet einen entscheidenden Beitrag zu einer nachhaltigen und klimaverträglichen Infrastrukturentwicklung, die den gesellschaftlichen Anforderungen an Ressourcenschutz gerecht wird. Bürgerinnen und Bürger profitieren von einer erhöhten Transparenz bei der Verwendung öffentlicher Mittel, da die langfristigen ökologischen und ökonomischen Wirkungen von Bauprojekten fortlaufend sichtbar gemacht werden. Letztlich sichert dieser technologische Fortschritt eine resiliente Infrastruktur, die als Rückgrat moderner Mobilität fungiert und gleichzeitig die ökologischen Lebensgrundlagen für kommende Generationen schont.



### Forschung:

Für die Wissenschaft ergeben sich signifikante Potenziale in der Entwicklung skalierbarer und interoperabler Lösungen, die den digitalen Zwilling als zentrales Werkzeug für das Management und die Entscheidungsunterstützung etablieren. Durch die systematische Verknüpfung von realen Sensordaten und Nachhaltigkeitsindikatoren werden neue Forschungsfelder erschlossen, die weit über konventionelle Ansätze hinausgehen. Dies stärkt die innovationsgetriebene Wertschöpfung entlang des gesamten Bauwerkslebenszyklus und identifiziert gezielt künftige Bedarfe in der Datenintegration und Prognosemodellierung, um die methodische Vorreiterrolle der nationalen Forschung im internationalen Wettbewerb zu festigen.

## 5. Handlungsempfehlungen

Die aus dem Forschungsprojekt entstandenen Handlungsempfehlungen werden in die drei Bereiche Organisation, Prozesse und Technologie eingeteilt. Verschiedene Kompetenzen sind für die inhaltliche Ausgestaltung der Empfehlungen erforderlich und jeweils unterschiedliche Personen werden die Empfehlungen umsetzen.

### 5.1 Organisatorische Empfehlungen

#### – Pilotprojekte in verschiedenen Organisationen initiieren:

Alle Organisationen mit Verantwortung für Planung, Betrieb und Erhaltung von Brücken starten frühzeitig Pilot- und Implementierungsprojekte zum Einsatz nachhaltigkeitsbezogenen Digitalen Zwillingen, um praktische Erfahrungen („Lessons Learned“) zu sammeln.

#### – Erfahrungsaustausch systematisieren:

Die an Entwicklungs- und Pilotprojekten beteiligten Akteure tauschen ihre Erkenntnisse strukturiert und regelmäßig aus. Hierfür sind geeignete Formate oder Plattformen zu etablieren, idealerweise in Anbindung an bestehende Netzwerke, Arbeitskreise oder Fachgremien. Die Ergebnisse werden sinnvollerweise in Handlungsempfehlungen und bundesweit vereinheitlichten Standards zusammengefasst.

#### – Rollen und Verantwortlichkeiten klar definieren:

Für den Betrieb von BIM, Digitalen Zwillingen und den damit verbundenen Geschäftsprozessen sind verschiedene Rollen einzubinden, die bisher noch nicht abschließend definiert und etabliert sind (z. B. operative Infrastrukturbetreiber, Informationsmanagement, Datenverantwortliche, Nachhaltigkeitsverantwortliche). Insbesondere müssen Zuständigkeiten für Datenerstellung, -prüfung, -freigabe und -aktualisierung klar geregelt werden, orientiert an etablierten Asset-Management-Grundsätzen (z. B. ISO-55000-Reihe).

#### – Akzeptanz und Kompetenzen gezielt aufbauen:

Der Erfolg der Digitalisierung hängt maßgeblich von Akzeptanz und Qualifikation ab. Empfohlen werden gezielte Schulungsangebote, der Aufbau interner „Digital Champions“ bzw. „Multiplikatoren“ sowie ein schrittweiser Roll-out mit kurzen Feedback- und Lernzyklen.

#### – Mindestanforderungen vor Projektstart festlegen:

Bereits vor Beginn von Pilotprojekten sollten Mindestanforderungen definiert werden, etwa hinsichtlich Modellqualität, Datenverfügbarkeit, Schnittstellen und Verantwortlichkeiten. Dies erhöht die Wiederholbarkeit, Vergleichbarkeit und Skalierbarkeit der Ergebnisse.

## 5.2 Prozessorientierte Empfehlungen

### – Integration in bestehende Geschäftsprozesse sicherstellen:

Digitale Zwillinge sollten konsequent in die bestehenden Planungs-, Betriebs-, und Erhaltungsprozesse integriert werden. Eine Anbindung an die vorhandenen Geschäftsprozesse sowie die Erweiterung um Nachhaltigkeitsaspekte erhöht die Akzeptanz bei den Stakeholdern und vermeidet Parallelstrukturen.

### – Indikatorenauswahl an Anwendungsfällen im Lebenszyklus ausrichten:

Passende Nachhaltigkeitsindikatoren werden auf Basis der jeweiligen Anwendungsfälle und der Lebenszyklusphase ausgewählt. Nicht jeder Indikator ist für jede Fragestellung erforderlich; vielmehr ist zu definieren, welche Indikatoren für welche Entscheidungsprozesse benötigt werden.

### – Vergleichbarkeit durch einheitliche Systemgrenzen gewährleisten:

Um Variantenstudien vergleichen zu können und Auswertungen auf Portfolioebene durchführen zu können, sind Systemgrenzen einheitlich festzulegen. Dies umfasst den Betrachtungszeitraum, die funktionale Einheit, berücksichtigte Bauteile, erforderliche Verkehrsführungen sowie der Abgrenzung von Bau- und Betriebsphase.

### – Ressourcen für den Dauerbetrieb einplanen:

Die Aktualisierung von Projektdaten, eine kontinuierliche Datenerhebung und die Berechnung von Indikatoren erfordert fortlaufende Pflege. Hierfür sind dauerhaft die passenden personellen und finanziellen Ressourcen einzuplanen, damit die definierten Mehrwerte in den Betriebsprozessen auch erreicht werden können.

### – Dokumentation und Nachweisführung unterstützen:

Die Bewertung der Anwendungsfälle kann so ausgestaltet werden, dass sie regulatorische Nachweise und Dokumentationsanforderungen unterstützt, beispielsweise zu Lebenszyklusdenken, Ressourceneffizienz, Emissionen oder dem Schutzgut Mensch. Dadurch wird der Digitale Zwilling auch als Grundlage für Reporting- und Fördermechanismen nutzbar.

### **Normen zur Definition des Lebenszyklus und von Grundlagen der Nachhaltigkeitsanalyse**

*Die im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen verwendeten Begriffe, ihre Bedeutung und die zu beachtenden Randbedingungen sind für Infrastrukturbauwerke auf europäischer Ebene genormt und auch in Deutschland eingeführt worden. Die DIN EN 15643 aus*

*dem Jahr 2021 stellt allgemeine Rahmenbedingungen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken bereit. Diese und weitere Normen und Richtlinien sind bei der Ausarbeitung des Forschungsprojekts berücksichtigt worden.*

## Anwendungsfälle für Nachhaltigkeitsanalysen von Brücken

In dem Forschungsprojekt GreenInfraTwins werden vier Anwendungsfälle für Digitale Zwillinge definiert und in Demonstratoren umgesetzt, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Nutzungsphase angewendet werden und sich an wichtigen Geschäftsprozessen orientieren. Diese Anwendungsfälle

sind in der nachfolgenden Grafik auf Basis eines typischen Verlaufs der Lebenszykluskosten einer Autobahnbrücke dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Anwendungsfälle die Entscheidungsfindung in der gesamten Nutzungsphase unterstützen können.

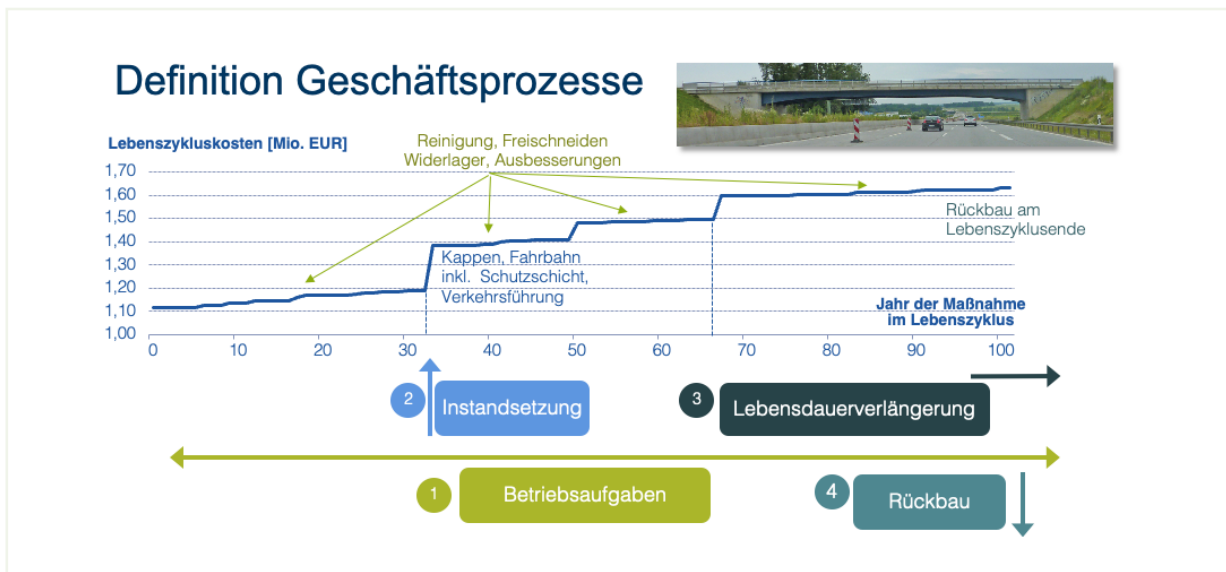


Abb. 1: Definition der Geschäftsprozesse und Anwendungsfälle entlang des Lebenszyklus

## 5.3 Technologische Empfehlungen

### – Einen dezentralen und modularen Architekturansatz wählen:

Die im Projekt entwickelte Softwarearchitektur ist in der Grafik dargestellt. Die Integration heterogener Daten sollte über einen Ontologie-Layer erfolgen, der als semantische Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen Formaten fungiert und die korrekte Konfiguration der digitalen Zwillinge ermöglicht. Dieser Layer verknüpft Informationen über Bauteile, Maßnahmen, Indikatoren und ihre zeitliche Dimension und ermöglicht die Aufbereitung dieser Informationen für die Nachhaltigkeitsberechnung - unabhängig von den vorliegenden Modellen und Konfigurationen. Durch die Nutzung verteilter Systeme als Micro-services und dezentraler Datenhaltung kann eine flexible und skalierbare Webumgebung geschaffen werden, die auch externe Datenanbindungen mit dynamischen Werten erlaubt, beispielsweise zur Abfrage von aktualisierten Umweltproduktdeklarationen oder tagesaktuellen Materialpreisen.

#### Ontologie

*Eine Ontologie ist ein formales, explizites Modell der Begriffe und Beziehungen eines bestimmten Anwendungsbereichs und dient als gemeinsame, maschineninterpretierbare Verständigungsbasis (vgl. Gruber: "an explicit specification of a conceptualization"<sup>[3]</sup>). Sie definiert Klassen, Eigenschaften und Restriktionen, mit denen Wissen strukturiert und*

*logisch erschließbar gemacht wird. Im Bauwesen können Ontologien genutzt werden, um Bauteile, Maßnahmen, Zustands- und Nachhaltigkeitsindikatoren einheitlich zu beschreiben und so digitale Zwillinge, Auswertungen und Kollaborationsprozesse über verschiedene Softwarelösungen hinweg konsistent zu unterstützen.*

### – Das Datenmodell auf Basis eines Linked-Data-Ansatzes und von Ontologien aufbauen:

Der Ansatz von Linked Data und Ontologien wird für die Umsetzung des Digitalen Zwillings ausdrücklich empfohlen, denn er ermöglicht es, verschiedene bereits bestehende Datenquellen und Dateien miteinander zu verknüpfen, ohne dass eine einzelne zentrale Datenbank notwendig ist. Um eine einheitlich Lösung zu entwickeln, die länderspezifisch wiederverwendet werden kann, wurde im Rahmen von GreenInfraTwins die GrIT-Ontologie entwickelt, die hier online verfügbar ist

<https://rub-informatik-im-bauwesen.github.io/greeninfratwins/ns/>

## Linked Data

*Linked Data bezeichnet einen Ansatz, bei dem Informationen als eindeutig identifizierbare Ressourcen (URIs) in Form von maschinenlesbaren Tripeln publiziert und über das Web miteinander verknüpft werden (vgl. Tim Berners-Lee <sup>[2]</sup>). Durch diese Verknüpfungen entsteht ein flexibles Datennetzwerk, das von*

*verschiedenen Systemen gemeinsam genutzt und erweitert werden kann. Im Bauwesen erlaubt Linked Data insbesondere, BIM-, Sensor-, Zustands- und Umweltdaten aus unterschiedlichen Quellen interoperabel zu verbinden, ohne sie in einem einzigen Datenmodell vereinheitlichen zu müssen.*

### – IFC-Modelle strukturieren und einbinden:

Für eine konsistente Wissensrepräsentation müssen die zugrunde liegenden IFC-Modelle entsprechend strukturiert werden. Hierzu sind zusätzliche Parameter erforderlich, die im Rahmen der Definition einer Level of Information Need (LOIN) anwendungsfall-spezifisch ausgearbeitet werden und im Einklang mit der zentralen GrIT Ontology stehen sollten. Diese definierten Parameter legen fest, welche Informationen auf welcher Detailebene bereitgestellt werden müssen, um eine effektive Verknüpfung und Verwendung der Daten zu ermöglichen. Ein Beispiel hierfür ist die Verknüpfung vom IFC-Modell zum EPD-Datensatz.

### – Die transparente und qualitätsgesicherte Datenverwaltung sicherstellen:

Für die Nachvollziehbarkeit und Vertrauenswürdigkeit der Daten sind automatische Qualitätssicherungen, Metadaten (Quelle, Zeitstempel) und Versionierung obligatorisch, sodass Änderungen jederzeit dokumentiert und überprüft werden können.

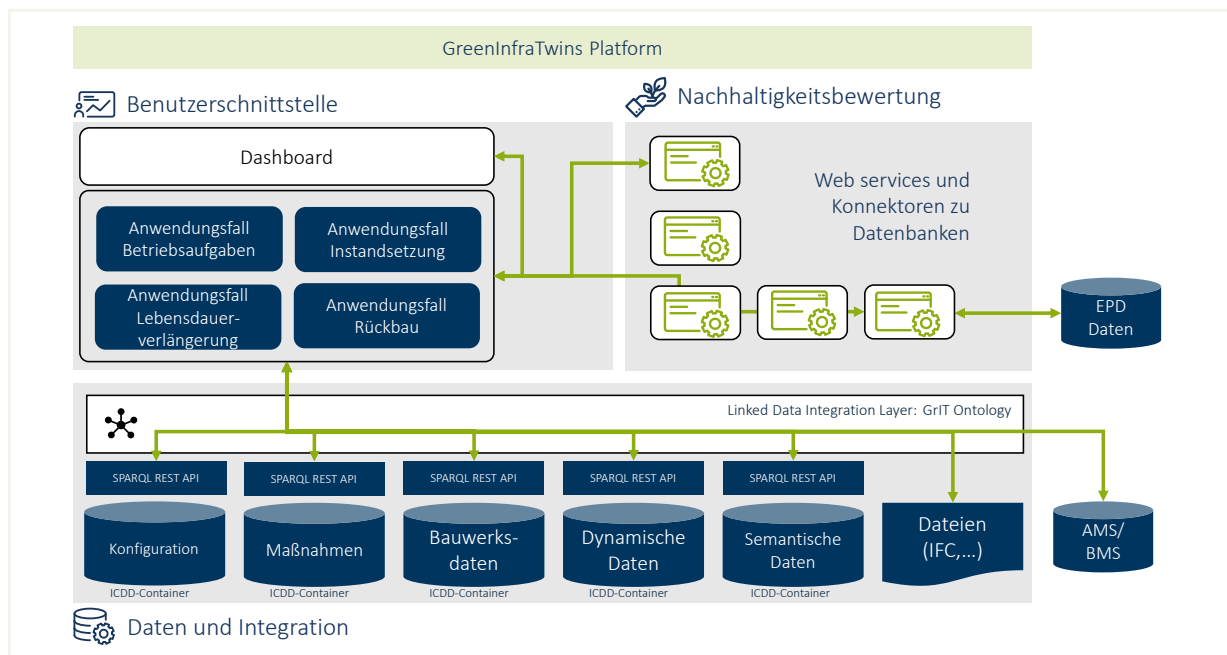


Abb. 2: Modulare Softwarearchitektur entwickelt und implementiert in GreenInfraTwins

## 6. Schlussbemerkung

Building Information Modeling (BIM) hat sich bei Infrastrukturbetreibern als zentrales Werkzeug etabliert und bildet die Grundlage für den nächsten Entwicklungsschritt: den Digitalen Zwilling. Durch dessen Einsatz können Nachhaltigkeitsanalysen erstmals systematisch und kontinuierlich in den Lebenszyklus von Ingenieurbauwerken integriert werden. Der Digitale Zwilling erweitert bestehende BIM-Anwendungen insbesondere in der Nutzungsphase und unterstützt damit die Entscheidungsfindung.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts GreenInfraTwins zeigen, dass Digitale Zwillinge eine Schlüsselrolle für eine zukunftsfähige und nachhaltige Infrastrukturentwicklung einnehmen können. Auf Basis klar definierter Nachhaltigkeitsindikatoren, interoperabler Datenmodelle und offener, vernetzter Systemarchitekturen ermöglichen sie eine ganzheitliche, transparente und fortlaufend aktualisierbare Bewertung ökologischer, ökonomischer und sozialer Auswirkungen.

Digitale Zwillinge sind damit nicht nur ein technisches Weiterentwicklungsinstrument bestehender BIM-Ansätze, sondern ein strategisches Werkzeug zur Umsetzung klima- und nachhaltigkeitspolitischer Ziele im Infrastrukturbereich. Ihre konsequente Weiterentwicklung und Implementierung schafft die Voraussetzung für eine datenbasierte, langfristig tragfähige Planung, den ressourceneffizienten Betrieb und eine nachhaltige Erhaltung von Ingenieurbauwerken.

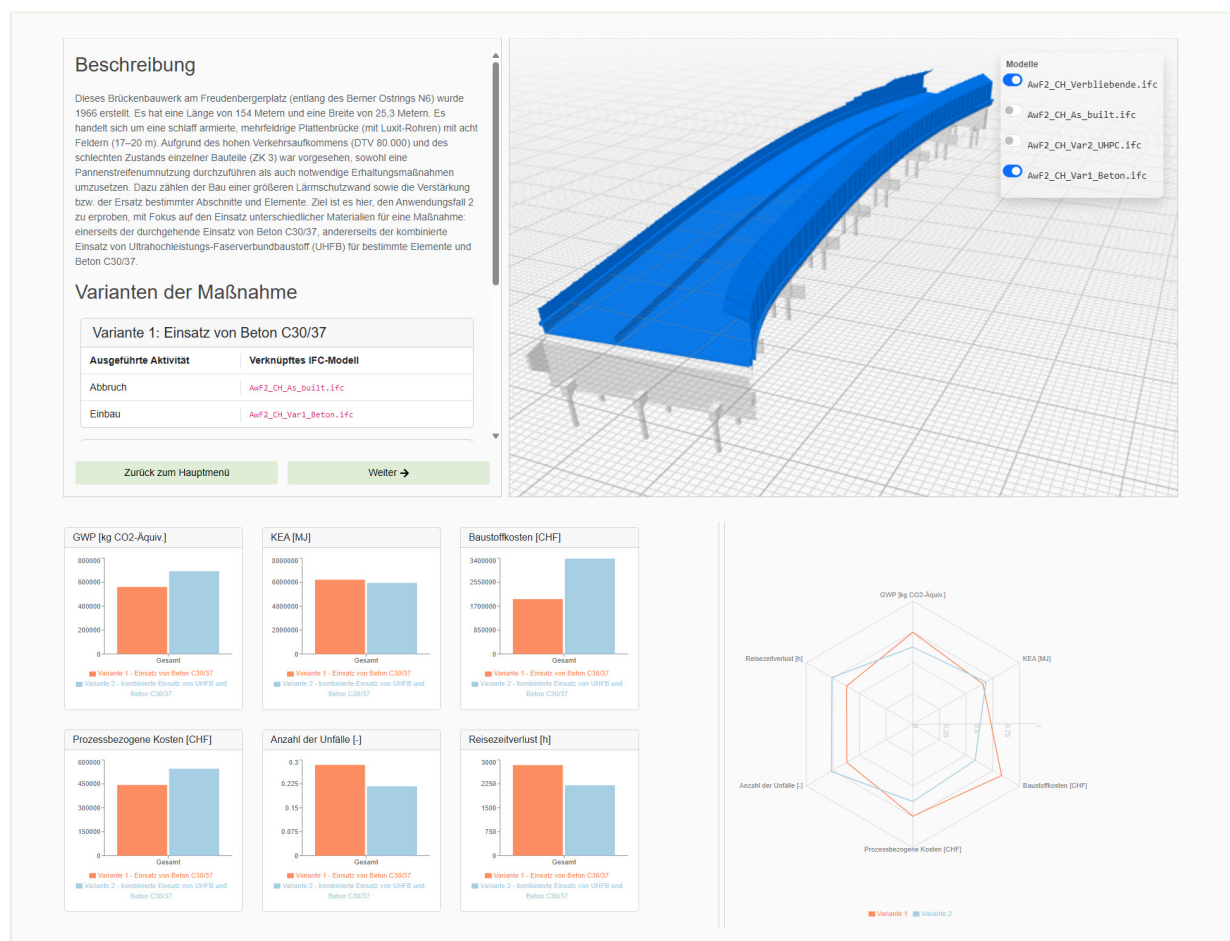


Abb. 3: Konfiguration (oben) und Ergebnisse (unten) der Nachhaltigkeitsbewertung der Instandsetzungsmaßnahme an der Brücke am Berner Ostring (Demonstrator Schweiz).

# Anhang

## Öffentlich verfügbare GreenInfraTwins Ressourcen:

Webseite: <https://greeninfratwins.com/>

Projektbeschreibung auf der FFG Webseite: <https://projekte.ffg.at/projekt/4906615>

GreenInfraTwins Ontologie: <https://rub-informatik-im-bauwesen.github.io/greeninfratwins/ns/>

GreenInfraTwins Web-Anwendung: <https://github.com/RUB-Informatik-im-Bauwesen/greeninfratwins>

ICDD: <https://github.com/RUB-Informatik-im-Bauwesen/IIB.ICDD>

OpenICDD Schnittstelle: <https://github.com/RUB-Informatik-im-Bauwesen/open-icdd>

RUB ICDD Plattform: <https://github.com/RUB-Informatik-im-Bauwesen/icdd-platform>

## Literaturverzeichnis

[1] Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). *Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research*. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>

[2] Berners-Lee, T. (2006). *Linked Data - Design Issues*. *World Wide Web Consortium (W3C)*. Verfügbar unter: <https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>

[3] Gruber, T. R. (1993). *A translation approach to portable ontology specifications*. *Knowledge Acquisition*, 5 (2), 199–220.

Gestaltung: Luca Marie Schönfeld