

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

# **Analyse des Ist-Zustandes und der Verwendung eines Digitalen Zwillings in der Betriebsphase des Infrastrukturwesens im Freistaat Bayern mit internationalem Vergleich**

Masterthesis

für den Master of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor: Franziska Lang-Scharli B.Sc.

Matrikelnummer:



1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

2. Betreuer: Simon Vilgertshofer M.Sc.

Ausgabedatum: 01. Juli 2022

Abgabedatum: 31. Oktober 2022



## Abstract

Road infrastructure is an important element for a country's economy. To maintain the reliability and functionality of this critical infrastructure various technologies are used throughout their lifecycle. For the planning of roads and engineering structures, the digital planning technology BIM is gaining in importance and replacing the traditional 2D planning. After completion of a construction project, the as-built data is handed over to the user. In this lifecycle phase, the focus is on preserving the structure and maintaining the required safety measures. The technology of the digital twin is already being used in other technical areas to monitor and optimize these conditions. The digital twin system is a combination of different technologies which are used for data acquisition, processing, analysis, visualization, and storage. In this paper, the different components of a digital twin are examined. Furthermore, the international application of digital twins in the maintenance management of road infrastructure is analysed. The core of these paper is the analysis of the existing maintenance management system for roads and bridges in the Free State of Bavaria. Possible optimization possibilities based on the literature for the improvement of the system are named in order to improve the existing simple digital twin in its functions.

## Zusammenfassung

Die Straßeninfrastruktur ist ein wichtiges Element für die Wirtschaft eines Landes. Um die Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit dieser kritischen Infrastruktur zu erhalten, werden verschiedene Technologien über deren Lebenszyklus verwendet. Bei der Planung der Straßen und Ingenieurbauwerke gewinnt die digitale Planungstechnologie BIM an Bedeutung und ersetzt die traditionelle 2D-Planung. Nach der Fertigstellung der Baumaßnahmen erfolgt die Übergabe der Bestandsdaten an den Betrieb. In dieser Lebenszyklusphase liegt der Fokus auf dem Erhalt der Bauwerkssubstanz und des geforderten Sicherheitszustandes. Zur Überwachung und Optimierung dieser Zustände wird in anderen technischen Bereichen bereits die Technologie des digitalen Zwillings verwendet. Dabei ist das System des digitalen Zwillings eine Kombination aus verschiedenen Technologien, welche für die Erfassung, Verarbeitung, Analyse, Visualisierung und Speicherung der Daten verwendet werden. In dieser Arbeit werden die verschiedenen Bestandteile eines digitalen Zwillings betrachtet. Des Weiteren wird die Verwendung von digitalen Zwillingen im internationalen Erhaltungsmanagement von Straßeninfrastrukturprojekten untersucht. Kernstück der Arbeit ist die Analyse des bestehenden Erhaltungsmanagementsystem für Straßen und Brücken im Freistaat Bayern. Es werden sinnvolle Optimierungsmöglichkeiten auf Grundlage der Literatur zur Verbesserung des Systems benannt, um den bestehenden digitalen Zwilling in dessen Funktionen zu verbessern

## Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis                                    | v         |
| Abbildungsverzeichnis                                 | VIII      |
| Tabellenverzeichnis                                   | X         |
| Abkürzungsverzeichnis                                 | XI        |
| <b>1 Einführung und Motivation</b>                    | <b>1</b>  |
| 1.1 Einführung .....                                  | 1         |
| 1.2 Ziel der Arbeit .....                             | 2         |
| 1.3 Aufbau der Arbeit .....                           | 3         |
| <b>2 BIM–Building Information Modeling</b>            | <b>4</b>  |
| 2.1 Begriffsdefinition BIM .....                      | 4         |
| 2.2 BIM - Allgemeiner Überblick .....                 | 5         |
| 2.3 BIM im Infrastrukturwesen .....                   | 10        |
| 2.4 Richtlinien und Rahmenbedingungen .....           | 13        |
| 2.4.1 Stufenplan Digitales Planen und Bauen.....      | 13        |
| 2.4.2 Masterplan BIM Bundesfernstraßen .....          | 14        |
| 2.4.3 BIM4INFRA.....                                  | 15        |
| <b>3 Digitaler Zwilling</b>                           | <b>16</b> |
| 3.1 DT – Allgemeine Definitionen .....                | 17        |
| 3.2 Abgrenzung des DT von ähnlichen Technologien..... | 18        |
| 3.2.1 Abgrenzung des DT von BIM .....                 | 18        |
| 3.2.2 Abgrenzung des DT von Digitalen Modellen.....   | 19        |
| 3.2.3 Abgrenzung des DT von Simulationsmodellen ..... | 19        |
| 3.2.4 Abgrenzung des DT von Surrogate Models .....    | 19        |
| 3.2.5 Abgrenzung des DT von Big Data.....             | 20        |
| 3.3 Klassifizierung von Digitalen Zwillingen .....    | 20        |
| 3.3.1 Erstellungszeitpunkt.....                       | 20        |
| 3.3.2 Integrationsgrad .....                          | 22        |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3.3    | Geometrische Modellgenauigkeit.....                      | 23        |
| 3.3.4    | Hierarchien .....  | 24        |
| 3.4      | Implementierungsprinzipien – „Gemini Principles“ .....   | 25        |
| 3.5      | Modelle zur Beschreibung eines DTs .....                 | 27        |
| 3.5.1    | Strukturmodelle.....                                     | 27        |
| 3.5.2    | Funktionale Modelle.....                                 | 32        |
| 3.5.3    | Reifegradmodelle.....                                    | 34        |
| <b>4</b> | <b>Technologien zur Umsetzung von DTs</b>                | <b>39</b> |
| 4.1      | Basistechnologien.....                                   | 40        |
| 4.1.1    | Sensoren und Messsysteme.....                            | 40        |
| 4.1.2    | Datenübertragungstechnologien.....                       | 40        |
| 4.1.3    | Internet of Things.....                                  | 41        |
| 4.1.4    | Datenspeicherungs- und Datenmanagementtechnologien ..... | 41        |
| 4.1.5    | Visualisierung .....                                     | 42        |
| 4.2      | Kerntechnologien von DTs.....                            | 43        |
| 4.2.1    | Modellerstellung.....                                    | 43        |
| 4.2.2    | Datenfusion.....   | 45        |
| 4.3      | Fortgeschrittene Technologien .....                      | 46        |
| 4.3.1    | Cloud Computing .....                                    | 46        |
| 4.3.2    | Blockchain (BC) .....                                    | 46        |
| 4.3.3    | Künstliche Intelligenz (KI) .....                        | 48        |
| <b>5</b> | <b>Datenmodellierung</b>                                 | <b>51</b> |
| 5.1      | Industry Foundation Classes (IFC) .....                  | 51        |
| 5.1.1    | IFC Alignment.....                                       | 52        |
| 5.1.2    | IFC-Road .....   | 52        |
| 5.2      | Semantic Web.....  | 53        |
| 5.2.1    | Semantic Web – Allgemeiner Überblick.....                | 53        |
| 5.2.2    | Semantic Web Stack.....                                  | 54        |
| 5.2.3    | Resource Description Framework (RDF) .....               | 55        |
| 5.2.4    | RDF-Graph .....  | 56        |
| 5.2.5    | RDF-Schemas .....  | 57        |
| 5.2.6    | Web Ontology Language (OWL).....                         | 57        |
| 5.3      | ifcOWL.....  | 58        |

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>6</b>  | <b>Internationale Forschungen und Projekte</b>               | <b>59</b>  |
| 6.1       | INSPIRE .....  | 59         |
| 6.2       | AM4INFRA.....  | 60         |
| 6.3       | CoDEC.....   | 62         |
| 6.4       | United Kingdom .....   | 64         |
| 6.5       | Dänemark .....   | 66         |
| 6.6       | USA (Bundesstaat Oregon) .....                               | 67         |
| 6.7       | Norwegen .....   | 68         |
| 6.8       | Deutschland (BISStra) .....                                  | 69         |
| <b>7</b>  | <b>Erhaltungsmanagement</b>                                  | <b>70</b>  |
| 7.1       | Rechtliche Grundlagen .....                                  | 70         |
| 7.2       | Erhaltungsmanagement Straße - Allgemein .....                | 71         |
| 7.3       | Erhaltungsmanagement Straße – Bayern.....                    | 73         |
| 7.4       | Ingenieurbauwerke - Allgemein.....                           | 75         |
| 7.5       | Erhaltung von Ingenieurbauwerken – Bayern .....              | 77         |
| 7.6       | Werkzeuge im Erhaltungsmanagement-Bayern .....               | 81         |
| 7.7       | BAYSIS als zentrale Dateninformationsquelle .....            | 86         |
| 7.8       | SIB-Bauwerke .....   | 90         |
| 7.9       | OKSTRA .....   | 91         |
| <b>8</b>  | <b>Analyse des Bestandsystems und mögliche Optimierungen</b> | <b>95</b>  |
| 8.1       | Bestandssystem.....  | 95         |
| 8.2       | Bewertung des Bestandsystems.....                            | 96         |
| 8.3       | Optimierungsvorschläge .....                                 | 111        |
| <b>9</b>  | <b>Industrie 4.0 in der Baubranche</b>                       | <b>116</b> |
| 9.1       | Chancen und Risiken.....                                     | 117        |
| 9.1.1     | Ökonomische Chancen und Risiken .....                        | 117        |
| 9.1.2     | Ökologische Chancen und Risiken .....                        | 118        |
| 9.1.3     | Technologische Risiken .....                                 | 119        |
| 9.1.4     | Soziale Risiken .....  | 120        |
| <b>10</b> | <b>Zusammenfassung und Fazit</b>                             | <b>121</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>                                  | <b>125</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Informationsverlust über den Projektverlauf (Borrmann et al., 2021, S. 3)<br>.....                                 | 6  |
| Abbildung 2: Verlauf der Planung über den Projektverlauf (Borrmann et al., 2021, S. 9)<br>.....                                 | 8  |
| Abbildung 3: Austauschbarkeit von Modellinformationen mit Open BIM (Borrmann et al., 2021, S. 13).....                          | 9  |
| Abbildung 4: Stufenplan Digitales Planen und Bauen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015, S. 7) ..... | 14 |
| Abbildung 5: Masterplan BIM Bundesfernstraßen (Meister et al., 2021) .....  | 14 |
| Abbildung 6: Veröffentlichungen nach Jahren, basierend auf Scopus Suche "digital twin" (Stand: 05.07.2022).....                 | 16 |
| Abbildung 7: Systembild DT (Arora & Tushir, 2019) .....   | 18 |
| Abbildung 8: Lebenszyklus des physischen und digitalen Zwillings (Sacks et al., 2020)<br>.....                                  | 21 |
| Abbildung 9: Hierarchielevel von DTs (Singh et al., 2021).....  | 24 |
| Abbildung 10: „Gemini Principles“ (Bolton et al., 2018, S. 16).....   | 26 |
| Abbildung 11: Modelle zur Beschreibung eines DTs (Davila Delgado & Oyedele, 2021, S. 8).....                                    | 27 |
| Abbildung 12: DT-Bewertungsmodell (Arora & Tushir, 2019) .....  | 36 |
| Abbildung 13: Level von DTs (Madni et al., 2019) .....  | 37 |
| Abbildung 14: Technologiepyramide von digitalen Zwillingen (Fang et al., 2022, S. 4303).....                                    | 39 |
| Abbildung 15: W3C - Semantic Web Layer Cake (W3C, 2007).....  | 55 |
| Abbildung 16: RDF-Graph (Böhms et al., 2018) .....  | 56 |
| Abbildung 17: UML-Klassendiagramm – Überblick (Europäische Union, 2022a) .....  | 60 |
| Abbildung 18: Systemarchitektur der CoDEC Pilotprojekte (Barateiro et al.).....   | 63 |
| Abbildung 19: Digital Twin–Road Map (National Highways, 2021b).....   | 65 |
| Abbildung 20: Begriffsdefinitionen der Straßenerhaltung (Stöckner et al., 2021, S. 15)<br>.....                                 | 72 |



---

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 21: Zustandsbeurteilung von Ingenieurbauwerken (Weller, 2021, S. 17)  | 75  |
| Abbildung 22: Ablauf der Beurteilung des Bauwerkszustandes (eigene Darstellung nach (Wenner, S. 22))  | 79  |
| Abbildung 23: Struktur des BMS (Weller, 2021, S. 38)  | 80  |
| Abbildung 24: Erhaltungsmanagementkreislauf (Degelmann et al., 2011)  | 81  |
| Abbildung 25: Module des PMS (Stöckner et al., 2021, S. 17)   | 82  |
| Abbildung 26: Ablauf der ZEB und Datenverarbeitung (eigene Darstellung nach (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022; Degelmann et al., 2011; König et al.)) | 85  |
| Abbildung 27: Datenbereich in BAYSIS (Zentralstelle Straßeninformationssysteme (ZIS) bei der Landesbaudirektion Bayern, 2019)                             | 86  |
| Abbildung 28: Netzknotenbezeichnung (eigene Darstellung nach (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c) )  | 88  |
| Abbildung 29: Tabelle zur Benennung einer Punktinformation (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c)  | 89  |
| Abbildung 30: Benennung eines Streckenabschnittes (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c)   | 89  |
| Abbildung 31: Straßenzustandsdaten (OKSTRA-Pflegestelle)  | 93  |
| Abbildung 32: Unterhaltungsvereinbarung (OKSTRA-Pflegestelle)   | 94  |
| Abbildung 33: prototypisches Modell des bestehenden Erhaltungsmanagementsystems (eigene Darstellung)  | 103 |
| Abbildung 34: Systemarchitektur der Bestandssysteme (eigene Darstellung)  | 104 |

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Definitionen des BIM-Begriffes.....                | 5  |
| Tabelle 2: Definitionen des Begriffes digitaler Zwilling..... | 17 |

---

## Abkürzungsverzeichnis

|       |                                      |
|-------|--------------------------------------|
| BIM   | Building Information Modeling        |
| LOD   | Level of Development                 |
| LOG   | Level of Geometry                    |
| LOI   | Level of Information                 |
| GM    | Gesamtmodell                         |
| bS    | BuildingSmart                        |
| IFC   | Industry Foundation Class            |
| AIA   | Auftraggeber-Informationsanforderung |
| BAP   | Bauabwicklungsplan                   |
| AN    | Auftragnehmer                        |
| DGM   | digitales Geländemodell              |
| AG    | Auftraggeber                         |
| DT    | Digital Twin (digitaler Zwilling)    |
| DTI   | Digital Twin Instance                |
| DTP   | Digital Twin Prototype               |
| CDBB  | Center for Digital Built Britain     |
| NDT   | National Digital Twin                |
| IoT   | Internet of Things                   |
| KI    | künstliche Intelligenz               |
| LiDAR | Light Detection and Ranging          |
| BCT   | Blockchain Technologie               |
| ML    | Machine Learning                     |
| WWW   | World Wide Web                       |
| OWL   | Web Ontology Language                |

---

|           |   |
|-----------|---|
| RDF       | Resource Description Framework  |
| URL       | Uniform Resource Locator  |
| GeoZG     | Geodatenzugangsgesetz des Bundes  |
| FACS-STIP | „Features, Attributes and Conditions–Statewide Transportation Improvement Program“                          |
| BISStra   | Bundesinformationssystem Straße   |
| BASt      | Bundesanstalt für Straßenwesen  |
| BMDV      | Bundesministerium für Digitales und Verkehr   |
| ZEB       | Zustandserfassung und -bewertung  |
| BAYSIS    | Bayerisches Straßeninformationssystem   |
| SIB-BW    | Straßeninformationsbank-Bauwerke  |
| DIN       | Deutsche Institut für Normung e. V.   |
| PMS       | Pavement-Management-System  |
| BayStrWG  | Bayerisches Straßen- und Wegegesetz   |
| ZTV-ZEB   | Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen |
| TP        | Teilprojekt   |
| TSD       | Traffic Speed Deflectometer   |
| VEP       | Verbesserte Erhaltungsplanung   |
| KEB       | Koordiniertes Erhaltungs- und Bauprogramm   |
| ASB-ING   | Anweisung Straßeninformationsbank; Segment Bauwerksdaten  |
| BMS       | Bauwerk-Management-System   |
| OSA       | objektbezogene Schadensanalyse  |
| ASB       | Anweisung Straßeninformationsbank   |
| OKSTRA    | Objektkatalog für Straßen- und Verkehrswesen  |
| NK        | Netzknoten  |

# 1 Einführung und Motivation

## 1.1 Einführung

Das Verkehrsnetz stellt einen der wichtigsten Bestandteile der deutschen Wirtschaft dar. Sowohl die Vernetzung, als auch der Zustand sind wichtige Punkte, die die Leistungsfähigkeit des Systems beeinflussen und beschreiben (Müller C., 2019, S. 1). In den vergangenen Jahren wurden viele finanzielle Mittel im Straßensektor für Baumaßnahmen verwendet. Dabei waren die meisten Maßnahmen Erneuerungen und Ausbaumaßnahmen. Das bestehende ca. 20 000 km lange Straßennetz des Freistaat Bayerns (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2022c), welches historisch gewachsen ist, stammt zu einem Großteil aus den 60er und 70er Jahren (Degelmann et al., 2011, S. 2). Bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 50 Jahren müssen in den kommenden Jahren viele Teile des Infrastrukturnetzes grundlegend erneuert werden. Zum Zeitpunkt der Planung bestehender Straßen- und Brückeninfrastruktur deutscher Autobahnen und Bundesstraßen wurde das stetig steigende Verkehrsaufkommen nicht berücksichtigt. Der kontinuierliche Anstieg der Verkehrsbelastung durch steigenden Schwerlastverkehr und das ansteigende Strukturalter führen zu einer stetigen Verschlechterung der Zustandswerte der Infrastrukturbauwerke (Degelmann et al., 2011, S. 2). Als Folge dieser Entwicklung rücken in der Forschung vermehrt Strategien zur Erhaltung und Instandsetzung von Infrastrukturbauwerken in den Fokus.

Nicht nur durch den konstanten Anstieg des Verkehrsaufkommens verschlechtert sich der Zustand der Bauwerke; auch durch natürliche physikalische Mechanismen bedarf es im Laufe des Lebenszyklus eines Bauwerks baulicher Erhaltungsmaßnahmen. Die Zuweisung der zu diesem Zweck notwendigen finanziellen Mittel erfolgt aktuell auf Basis der Ergebnisse der ZEB-Befahrungen, Brücken- und Tunnelprüfungen. Durch dieses einheitliche System der Erhaltungsplanung in Deutschland ist es möglich, die Zustandswerte von Brücken stetig zu verbessern (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 11).

Die Themen der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit stehen bei der Betrachtung des Erhaltungsmanagement im Fokus (Degelmann et al., 2011, S. 2). In den vergangenen Jahren rückte das Thema der Nachhaltigkeit von Baumaßnahmen immer mehr in den

Mittelpunkt. Europaweit ist der Bausektor für 32% der CO<sub>2</sub>-Emissionen und für 25% des jährlichen Abfalls (Ungureanu & Hartmann, 2020, S. 254) verantwortlich. Wesentliche Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen können eine sinnvolle Materialauswahl und eine Reduktion des Materials durch gezielt geplante Instandsetzungsmaßnahmen zur Verlängerung der Lebenszeit von Bauwerken und der Straßenoberflächen sein (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 12). Trotz nachhaltiger Planung dürfen die Sicherheitsaspekte, so wie Zuverlässigkeit und Sicherheit der Bauwerke, nicht an Bedeutung verlieren (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 12). Das bestehende Erhaltungsmanagement muss durch moderne Technologien erweitert werden. In diesem Zuge kann die Technik des digitalen Zwillings Anwendung finden. Der Digitale Zwillinge beinhaltet eine Verbindung zwischen dem realen Bauwerk und dessen virtuellen Abbild (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Durch Verwendung von verschiedenen weiteren Technologien kann ein exaktes und dynamisches Abbild des physischen Bauwerks geschaffen werden (Fang et al., 2022). Dieses Abbild kann als Grundlage für verschiedene Anwendungsfälle während des Lebenszyklus des Bauwerks und des Erhaltungsmanagements genutzt werden. Noch ist die flächendeckende Anwendung eines digitalen Zwillings im Erhaltungsmanagement eine Zukunftsvision; sie bietet enormen Chancen und Möglichkeiten (Arora & Tushir, 2019, S. 10).

## 1.2 Ziel der Arbeit

Die nachfolgende Arbeit enthält eine Analyse des bestehenden Erhaltungsmanagement-System der Bundesfernstraßen im Freistaat Bayern. Im Anschluss folgt eine Ausarbeitung eines möglichen Konzeptes für den Einsatz eines digitalen Zwillings für die Instandhaltung und den Unterhalt. Im Rahmen des „Masterplans BIM Bundesfernstraßen“ soll bis zum Jahr 2025 die Technologie BIM für alle Planungsmaßnahmen als Regelprozess gelten (Meister, Scholz & Banemann, 2021). Neben der BIM-Technologie für die Planungs- und Bauphase wird für die Erhaltungsphase der digitale Zwilling, welcher Bestandsdaten aus der BIM-Planung, Sensordaten und weitere Technologien aus dem Themenbereich der künstlichen Intelligenz vereint, als zukunftsweisende Technologie präsentiert.

Auf Basis der Forschungen zu dem Thema digitaler Zwilling in der Betriebsphase von Infrastrukturbauwerken und dessen Verwendung in Pilotprojekten wird eine Optimierung des bestehenden Erhaltungsmanagementsystems vorgeschlagen. Diese

beinhaltet das bestehende System und darauf aufbauende Vorschläge, wie das bestehende System optimiert werden kann und neue Technologien Anwendung finden können.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Zu Beginn der Arbeit wird ein kurzer Überblick über die Technologie BIM und deren Verwendung in der Infrastrukturplanung gegeben. Im Anschluss daran wird das Themengebiet des digitalen Zwillings genauer erläutert. Der digitale Zwilling findet bereits in verschiedenen Bereichen Anwendung, weswegen verschiedene Definitionen in der Literatur zu finden sind. Die Abgrenzung des digitalen Zwillings von anderen Technologien ermöglicht ein besseres Verständnis für den Begriff. Des Weiteren werden verschiedene Klassifizierungen, Bestandteile und mögliche Anwendungen des digitalen Zwillings erläutert. Im Anschluss werden verschiedene Pilotprojekte, in denen digitale Zwillinge im Erhaltungsmanagement von Infrastrukturbauwerken Anwendung finden, vorgestellt. Nach der Darstellung und Analyse des Erhaltungsmanagements im Freistaat Bayern werden mögliche Optimierungen und Änderungsvorschläge für die Verwendung des digitalen Zwillings aufgezeigt.

## 2 BIM–Building Information Modeling

Die Methode Building Information Modeling (BIM) ist eine der bedeutendsten technologischen Entwicklungen in der Bauindustrie. Durch die BIM-Methode wird ein digitales Bauwerksmodell erstellt (Eastman, Teicholz, Sacks & Liston, 2008, S. 1). Dieses Modell wird von Beginn der Vorplanung über die Ausführung bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung kontinuierlich aktualisiert und mit Informationen angereichert. Nach Fertigstellung enthält das Modell genaue geometrische Informationen und Daten, welche die Erstellung und die Erhaltung unterstützen können (Eastman et al., 2008, S. 1). Ziel ist es, durch die Nutzung dieser einzigen Informationsquelle den Datenaustausch zwischen den verschiedenen Planern und Fachgewerken zu verbessern und den Informationsverlust zu minimieren (Borrmann, König, Koch & Beetz, 2021, S. 1).

### 2.1 Begriffsdefinition BIM

Verschiedenen Definitionen der Abkürzung BIM werden abhängig von dem Fokus der Autoren veröffentlicht. So beschreibt BIM einen kollaborativen Arbeitsprozess, der ein digitales Modell verwendet (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015, S. 6). Eine andere Definition des Akronyms BIM legt den Fokus auf die Strukturierung und Verwaltung von Bauwerksdaten über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes (Mallela et al., 2020, S. 17). In Tabelle 1 sind weitere Definitionen des Akronyms BIM zusammengefasst.



Tabelle 1: Definitionen des BIM-Begriffes

|  |  |
|--|--|
| BIM ist ein System, zur Erstellung eines digitalen Abbildes eines Assets. Die Anwendung von BIM erleichtert die Erstellung und das Teilen von Informationen über den gesamten Lebenszyklus eines Assets.   | (Geem, Biswas & Proust, 2021)  |
| BIM beschreibt das Managen von Informationen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks.  | (ice, 2015)  |
| BI-Modeling beschreibt die Erstellung, Bearbeitung und Verwaltung eines digitalen Bauwerksmodells mittels verschiedener geeigneter Softwareprodukte.   | (Borrmann et al., 2021, S. 4)  |
| BI-Model beschreibt ein digitales, meist dreidimensionales Abbild eines Bauwerkes, welches zusätzlich zu den geometrischen Informationen noch Objekte mit semantischen Informationen enthält.  | (Borrmann et al., 2021, S. 4)  |
| „Building Information Modeling (BIM) beschreibt eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden.“ | (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015, S. 6) |

## 2.2 BIM - Allgemeiner Überblick

Die Abkürzung BIM beschreibt eine kooperative Arbeitsmethode, deren Kernstück ein digitales dreidimensionales Bauwerksmodell ist, in welchem über den gesamten Lebenszyklus konstant alle wichtigen Informationen erfasst und verwaltet werden (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015, S. 6). Der Lebenszyklus des Bauwerks, beginnt mit der digitalen Planung der Baumaßname und geht über die Bau- und die Nutzungsphase bis hin zum Abriss des Bauwerks. Während des Lebenszyklus wird das Gesamtmodell aktualisiert und Veränderungen werden ergänzt (Meister et al., 2021). Die gesammelten Daten und Information werden in einer gemeinsamen Datenumgebung, dem Common Data Environment (CDE), gespeichert, verwaltet und zwischen allen Beteiligten ausgetauscht. Die CDE Plattform stellt zusätzlich eine transparente Kommunikation zwischen allen am Projekt Beteiligten sicher und bietet die Möglichkeit, den Ablauf des Qualitätsmanagements zu strukturieren (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen & Bau und Verkehr, 2022a).

Über die CDE werden bei der BIM-Methode alle Informationen von den verschiedenen beteiligten Fachdisziplinen ausgetauscht. Dies bietet im Gegensatz zu der vorher gängigen Methode, bei der die Informationen nur als graphische 2D-Pläne ausgetauscht werden den Vorteil, dass kein Informationsverlust durch die Übergabe stattfindet. An dem Übergabepunkt nach der Entwurfsplanung werden die vorher digital erstellten Pläne und Informationen in Papierform weitergegeben, wodurch ein Verlust an digitalen Informationen entsteht (Abbildung 1) (Mallela et al., 2020, S. 8–9).

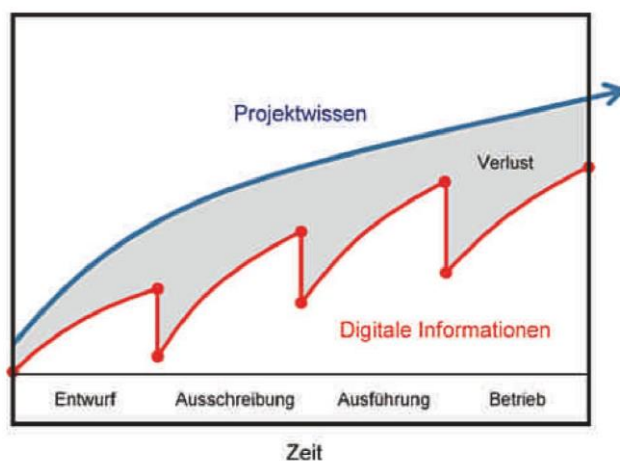


Abbildung 1: Informationsverlust über den Projektverlauf (Borrmann et al., 2021, S. 3)

Durch die kontinuierliche Planung mit BIM kann über den Projektverlauf der Verlust von Informationen minimiert werden, Informationssilos durch die Arbeit an einem Gesamtmodell (Meister et al., 2021) aufgehoben werden (Mallela et al., 2020, S. 8–9) sowie die Informationstiefe, Qualität und Produktivität der Planung erhöht werden (Borrmann et al., 2021, S. 3).

In der aktuell noch hauptsächlich verwendeten 2D-Planung können Informationen nur zu einem gewissen Teil maschinell verarbeitet werden. Die Prüfung der 2D-Pläne auf Konsistenz ist nur manuell möglich. Das Fehlen einer automatischen Konsistenzprüfung kann bei umfangreichen Bauprojekten eine Vielzahl von Planungsfehlern zur Folge haben und zu späteren Störungen im Bauablauf führen. Zusätzlich zu der Kollisionsprüfung am 3D-Modell können mit Hilfe des Modells Simulationen direkt am Planungsmodell durchgeführt werden und die Ergebnisse für Anpassungen der Planung verwendet werden (Borrmann et al., 2021, S. 2).

Das 3D-BIM-Modell, welches alle relevanten Informationen enthält (Steiner, Kytzia & Mathis, 2020, S. 6–18), ist keine reine 3D-geometrische Darstellung des Bauwerks. Ein 3D-Modell wird erst durch den internen Aufbau aus Bauteilobjekten zu einem BIM-Modell; diese Objekte werden mit einer Semantik beschrieben. Durch die Semantik

können weitere Informationen zur Beschreibung der Bauteilobjekte angefügt werden (Borrmann et al., 2021, S. 6). Die semantische Modellierung ermöglicht die automatische Ableitung von 2D-Plänen aus dem 3D-Modell, dient als Basis der Kollisionsprüfung und ermöglicht die Verwendung verschiedener Simulationen und Analysen (Borrmann et al., 2021, S. 6). Eine parametrische Modellierung der Objekte ermöglicht zusätzlich ein einfaches Anpassen der Proportionen ohne erhöhten Arbeitsaufwand (Eastman et al., 2008, S. 16).

### Ausarbeitungsgrad

Für jedes Projekt und jeden Anwendungsfall werden zwischen allen Beteiligten in den Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) und dem BIM-Abwicklungsplan (BAP) der Ausarbeitungsgrad (LOD) für den Daten- und Informationsaustausch festgelegt. Der Level of Development (LOD) beschreibt die Genauigkeit, mit der Informationen zu einem festgelegten Zeitpunkt vorhanden und ausgetauscht werden müssen (Borrmann et al., 2019b). Um eine detailliertere Beschreibung des Ausarbeitungsgrades zu erhalten, wurde der LOD in den geometrischen Ausarbeitungsgrad (LOG) und den alphanumerischen Ausarbeitungsgrad (LOI) unterteilt (Borrmann et al., 2019b). Die Anforderung an die Ausarbeitung des Level of Information (LOI) und Level of Geometry (LOG) werden vor Projektbeginn festgelegt (König et al., S. 28). Zu Beginn des Projektes befindet sich das Modell in einer niedrigen Detaillierungsstufe. Die Detaillierung erhöht sich im Verlaufe des Projektes stetig und lässt sich mit der zunehmenden Genauigkeit der maßstäblichen Zeichnungen vergleichen (Borrmann et al., 2019b).

Bereits in der Entwurfsphase ist es möglich, mit der BIM-Methode ein hohes LOD zu erreichen. Dieses ermöglicht in der frühen Projektphase eine eingehende Analyse von verschiedenen Planungsvarianten. In dieser Planungsphase ist es möglich, Entwürfe mit einem geringen Kosten- und Zeitaufwand anzupassen. Im Gegensatz dazu verschiebt sich der Planungsaufwand bei der konventionellen Planung in die Phase der Ausführungsplanung, in der erst ein hoher LOD erreicht wird. In dieser Phase ist eine Anpassung der Planung mit hohen Kosten und Aufwand verbunden.

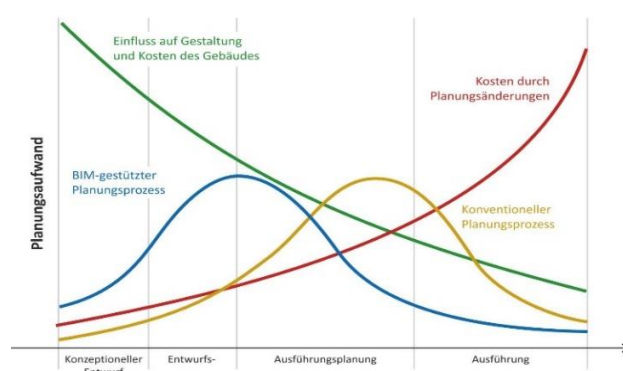


Abbildung 2: Verlauf der Planung über den Projektverlauf (Borrmann et al., 2021, S. 9)

## Softwarelandschaft

Bei der BIM-Methode werden unterschiedliche BIM-Autorenwerkzeuge verwendet, um die Modelle zu erstellen und zu bearbeiten (Borrmann A. et al., 2019e). Jedes Gewerk nutzt für die Planung eine eigene fachspezifische Software zum Erstellen der Fachmodelle (Borrmann et al., 2019b). Nach der Erstellung der Fachmodelle werden diese von Fachkoordinatoren auf fachliche Richtigkeit geprüft. Im Anschluss werden mehrere Fachmodelle zu dem Gesamtmodell zusammengeführt. Die jeweiligen Stände des Gesamtmodells werden in der CDE versioniert (Borrmann et al., 2019b). Die Übergabe der Fachmodelle zwischen verschiedenen Softwareprodukten und Planern stellt dabei bei der Erstellung des Gesamtmodells eine wichtige Aufgabe dar. Zur Veranschaulichung der verschiedenen Zusammenarbeitsstufen im BIM-Kontext werden die folgenden Betrachtungsweisen verwendet: Wenn BIM nur für spezielle Aufgaben eingesetzt wird und nicht für die ganzheitliche Planung angewandt wird, wird diese Form der Anwendung als „little BIM“ bezeichnet. „little BIM“ wird nur als Insellösung in einer Fachdisziplin verwendet und nicht für die Planung des Gesamtprojektes. Wird BIM für die gesamte Planung verwendet, wird die Anwendung als „BIG BIM“ bezeichnet. Neben der Unterteilung auf Projektebene kann die Verwendung von BIM zusätzlich noch auf

der Ebene der Softwareanwendungen unterteilt werden. Bei einer Verwendung von Softwareprodukten unterschiedlichster Herstellern wird von einer „Open BIM“ Anwendung gesprochen (Borrmann et al., 2021, S. 12–13).

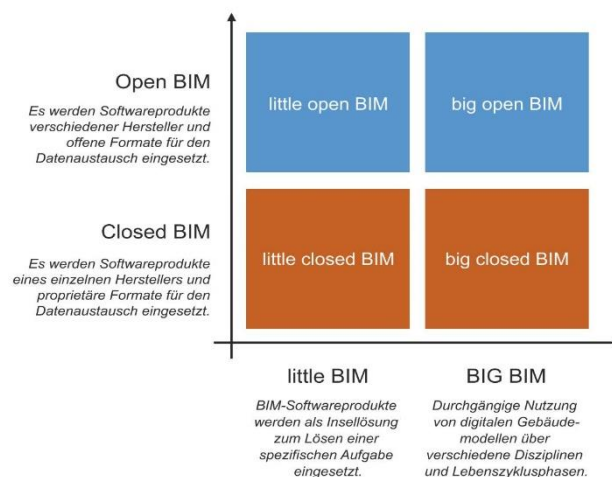


Abbildung 3: Austauschbarkeit von Modellinformationen mit Open BIM (Borrmann et al., 2021, S. 13)

Kernbestandteil von BIM ist der Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Softwareprodukten und Planern (Amann & Borrmann, 2015). BuildingSmart (bS) entwickelte zu diesem Zweck einen OpenBIM-Standard, der einen offenen Datenaustausch über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks und zwischen verschiedenen Softwareprodukten ermöglicht (Ait-Lamallam, Yaagoubi, Sebari & Doukari, 2021). Das entwickelte Industry Foundation Class (IFC) Schema ist ein standardisiertes Datenmodell, welches die Anforderungen zum offenen Datenaustausch erfüllt (Amann & Borrmann, 2015). Das EXPRESS IFC-Datenschema ist in der DIN EN ISO 16739-1 (DIN EN ISO 16739-1) definiert und wird in Kapitel 5.1 näher erläutert.

### Vertragliche Rahmenbedingungen

Die vertraglichen Vorgaben hinsichtlich der Inhalte, Qualität und Abläufe während der BIM Planung sind in der AIA und dem BAP vorgegeben. Im Mittelpunkt der AIA stehen die Anforderungen an die Modelle (Borrmann et al., 2019a), die Übergabeformate und die zu verwendenden Anwendungsfälle (Borrmann et al., 2021, S. 17). Im BAP werden die Prozessabläufe und Rollen aus Sicht des Auftragnehmers (AN) konkreter beschrieben. Der BAP enthält die genaue Beschreibung der Anwendungsfallumsetzung, die Beschreibung der Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten (Borrmann et al., 2019c), benennt die verwendeten Softwareprodukte und die Prüfmechanismen zur Qualitätskontrolle (Borrmann et al., 2021, S. 17).

### 2.3 BIM im Infrastrukturwesen

Die Verwendung von BIM beschränkt sich aktuell noch zu großen Teilen auf den Bereich des Hochbaus und wird in diesem Bereich hauptsächlich in der Planungs- und Bauphase verwendet. Vereinzelt verwendet die BIM-Technologie bereits in der Betriebsphase von Hochbauprojekten (Cooperative Research Centre for Construction Innovation, 2007).

Im Infrastrukturbereich hingegen wird BIM bisher nur in wenigen Projekten in der Planung verwendet (Chong H., Lopez R., Wang J., Wang X. & Zhao Z., 2016). Die meisten Autorenwerkzeuge wurden für die Anwendung im Hochbau entwickelt und können erst durch die Erweiterung um zusätzliche Funktionen auch für die Erstellung von Infrastrukturmodellen verwendet werden (Borrmann A. et al., 2019e). Die Softwareprodukte sind meist nicht für die vollständige Planung von allen Anwendungen geeignet, wodurch die erstellten Fachmodelle zwischen verschiedenen Softwareprodukten ausgetauscht werden müssen. Somit wird auch für den Infrastrukturbau ein Datenmodell zum Austausch von geometrisch-semantischen Modellen benötigt (Borrmann A. et al., 2019e). Das IFC-Datenschema ist der Standard zum Austausch von Daten im Hochbau (Costin, Adibfar, Hu & Chen, 2018) und wurde von bS erweitert, um Infrastrukturdaten auszutauschen. Im Jahr 2010 wurde der „Infrastructure Room“ von bS gegründet. In Folge der Zusammenarbeit mit internationalen Gruppen wurde eine IFC-Formaterweiterung für den Infrastrukturbereich entwickelt, das den Austausch von Planungs-, Realisierungs- und Wartungsdaten ermöglicht (buildingSMART, 2021).

Abweichend von der Planung im Hochbau sind Infrastrukturbauwerke Linienbauwerke; sie verlaufen entlang einer Achse, auf die alle Objekte referenzieren. Durch diese geometrische Ausdehnung werden besondere Anforderungen an die Softwareprodukte und das Datenaustauschformat gestellt. Die weite geometrische Ausdehnung bedingt zusätzlich Abhängigkeiten verschiedener Umgebungsinformationen. Aus diesem Grund werden für die Planung zusätzlich zu dem digitalen Geländemodell (DGM) weitere Informationen wie Umweltschutzzonen und Grunderwerbsskizzen aus Geoinformationssystemen benötigt (Borrmann et al., 2021, S. 647–649).

## Modellerstellung und Modellaustausch

Grundlage der Planung und Modellerstellung ist das DGM und vorhandene Bestandsmodelle, welche vom Auftraggeber (AG) zur Verfügung gestellt werden. In diesen Modellen ist eine Vielzahl von Informationen mit variierender Genauigkeit enthalten, die im Verlauf der Planung durch Vermessungen validiert und ergänzt werden müssen. Für die Erstellung der Fachmodelle und der späteren Zusammenführung zu einem Gesamtmodell müssen die Modelle in einem einheitlichen Koordinatensystem erstellt werden. Auf Grund der verschiedenen verbreiteten Lage- und Höhensystemen werden die Modelle in der Planungssoftware durch relative Koordinaten mit Bezug zu einem vereinbarten Koordinatensystem beschrieben (Borrmann et al., 2021, S. 648–649). Die verzerrungsgetreue Darstellung des sich über mehrere Kilometer erstreckenden Bauprojektes und die damit einhergehenden Datenmengen stellen ein weiteres Problem dar (Borrmann et al., 2021, S. 649–650). Bei der Trassenplanung wird die Achse in drei Dimensionen, den Querschnitt, Längsschnitt und Grundriss aufgeteilt. Durch die spätere Überlagerung dieser Ebene wird das 3D-Modell der Trasse erzeugt. Dabei werden die Querprofile in Abständen von 5-10 m entlang der Achse linear verbunden. 3D-basierte Trassenplanungen erzielen bereits in frühen Planungsphasen einen hohen LOG. Auf Basis dieses exakten Straßenquerschnittsmodells erfolgt unter anderem die Kostenberechnungen und der Grunderwerb (Borrmann et al., 2021, S. 650–654). Die Brückenkonstruktion und die geometrischen Abmessungen sind abhängig von dem Trassierungsverlauf. Für eine mögliche teilautomatisierte Generierung der Brücke können sowohl implizite als auch explizite CAD-Verfahren verwendet werden. Die digitale 3D-Darstellung ermöglicht bereits zu Beginn der Planung einen scheinbar hohen LOG. Im Vergleich dazu wurden bei der 2D-Planung die Genauigkeit durch den Maßstab und die Bemaßungsketten festgelegt. Um die Belastbarkeit der Planungsinformationen in der BIM-Planung zu gewährleisten, müssen Richtlinien für den LOD in den verschiedenen Planungsphasen erstellt werden (Borrmann et al., 2021, S. 656–658).

## Anwendungsfälle

Ziel der BIM-Anwendung ist eine Steigerung der Produktivität, verbesserte Kommunikation, Erhöhung der Planungssicherheit und daraus resultierend eine Reduktion der Risiken. Aus diesen BIM-Zielen können unterschiedliche für jedes Projekt spezifische Anwendungsfälle abgeleitet werden (Borrmann A. et al., 2019d). Die Varianz in der Bauindustrie und den Projekten (Flemming C., 2010, S. 119–125) hat immer projektspezifische Anwendungsfälle zur Folge (Borrmann A. et al., 2019d).



Zum Teil können Anwendungsfälle sowohl im Hochbau als auch im Straßenbau identisch genutzt werden; es muss in beiden Bereichen eine Koordination der Fachgewerke stattfinden (Bradley, Li, Lark & Dunn, 2016). Dieser Anwendungsfall beinhaltet neben der Zusammenführung der Fachmodelle eine automatische Kollisionsprüfung (Borrmann A. et al., 2019d). Die Kollisionsprüfung ist einer der Kernanwendungspunkte im Hochbau. Im Straßenbau bedarf es auf Grund der geometrischen Besonderheit nur in geringen Umfang einer Kollisionsprüfung (Bradley et al., 2016). Ein Vorteil bei der Anwendung von BIM im Straßenbau ist die Integration von nicht graphischen Daten während der Planungs- und Bauphase (Bradley et al., 2016). Im Anwendungsfall Bemessung und Nachweisführung (Borrmann A. et al., 2019d) können gezielt Simulationen zum Verkehrsfluss, Auswirkungen des Baubetriebs und Analyse von Umwelteinwirkungen der verschiedenen Planungsvarianten durchgeführt werden (Chong H. et al., 2016). Weitere Anwendungsfälle sind unter anderem die automatische Ableitung von Mengen und Kosten (5D), sowie die Erstellung eines Bauablaufplanes (4D) auf Grundlage der 3D-Planungsunterlagen (Kim et al., 2014).

Die Anwendung des Visualisierungsanwendungsfalls (Borrmann A. et al., 2019d) ermöglicht eine verbesserte Darstellung der Baumaßnahme und trägt zu einer verbesserten Anwohnerkommunikation bei (Chong H. et al., 2016). Neben der Anwendung von BIM in der Planungsphase können durch die Dokumentation des Baufortschrittes in dem Gesamtmodell (Bradley et al., 2016; Buttgerit & Heller) Verzögerungen im Bauablauf sowie Terminüberschneidungen schnell identifiziert (Borrmann A. et al., 2019d) und Maßnahmen ergriffen werden.



## 2.4 Richtlinien und Rahmenbedingungen

Verschieden Maßnahmen tragen dazu bei, Anwendung und Akzeptanz von BIM im Infrastrukturbereich zu verbessern. Dazu zählen die Schaffung von rechtlichen Grundlagen für die Bereitstellung der digitalen Informationen, deren einheitlicher Austausch und die Entwicklung von Richtlinien und Normen zur Standardisierung der Prozesse und Rahmenbedingungen. Desweiteren können Kollaborationen mit nationalen Industriepartnern und Wissensaustausch dazu beitragen, die Akzeptanz zu verbessern. Eine weitere wichtige Maßnahme ist die unterstützende Einführung von Richtlinien und Vorgaben der Regierung (Mallela et al., 2020, S. 3). In Deutschland wurden sowohl von der Bundesregierung als auch von den Bundesländern Leitfäden und Handreichungen für die Einführung von BIM im Infrastrukturbereich erarbeitet und veröffentlicht. Auf einige Veröffentlichungen des Bundesministeriums und des Bayerischen Staatsministeriums wird im Folgenden eingegangen.

### 2.4.1 Stufenplan Digitales Planen und Bauen

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur<sup>1</sup> veröffentlichte 2015 den „Stufenplan Digitales Planen und Bauen“. In diesem wurden Maßnahmen und Ziele festgelegt, um bis zum Jahr 2020 das Leistungsniveau 1 im Bausektor zu erreichen. In Abbildung 4 ist die Struktur des Stufenplans des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015) dargestellt. In diesem wird schematisch dargestellt, wie die Einführung von BIM durch eine schrittweise ansteigende Verwendung in aktuellen Projekten erzielt werden soll. Des Weiteren legt der Stufenplan fest, welche Maßnahmen zu welchem Zeitpunkt angewendet werden sollen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015).

---

<sup>1</sup> Seit 2021 Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)

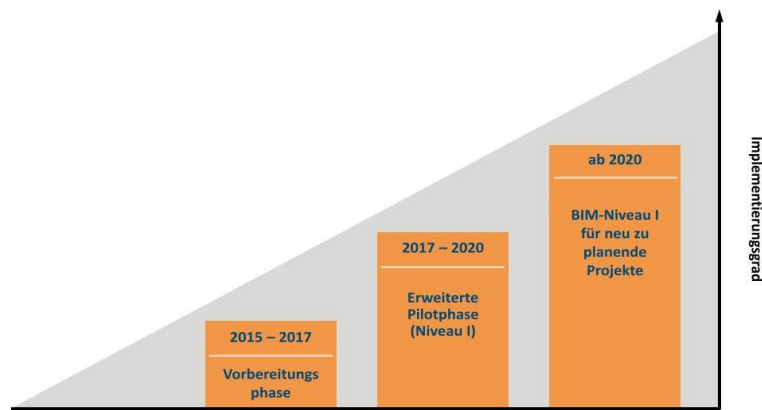


Abbildung 4: Stufenplan Digitales Planen und Bauen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015, S. 7)

## 2.4.2 Masterplan BIM Bundesfernstraßen

In Folge des „Stufenplanes Digitales Planen und Bauen“ hat die Bundesregierung mit dem „Masterplan BIM Bundesfernstraßen“ (Meister et al., 2021) eine weitere Implementierungsstrategie veröffentlicht. Diese soll von der Autobahn GmbH und den Straßenbauverwaltungen der Länder verwendet werden. Das Implementierungskonzept sieht eine phasenweise Einführung von BIM-Anwendungsfällen in drei Stufen vor, die in Abbildung 5 dargestellt sind. In der ersten Phase werden aufbauend auf den in den Handlungsleitfäden von BIM4INFRA genannten Anwendungsfälle einige Anwendungsfälle für die flächendeckende Testung ausgewählt. Ziel ist es, Erkenntnisse für die Anwendung und die notwendigen Voraussetzungen für die folgenden Pilotprojekte zu schaffen. Bis zum Jahr 2025 soll eine flächendeckende Verwendung von BIM im Bundesfernstraßennetz erreicht werden und die Grundlagen für eine Anwendung vom digitalen Zwillingen (DT) geschaffen werden (Meister et al., 2021).

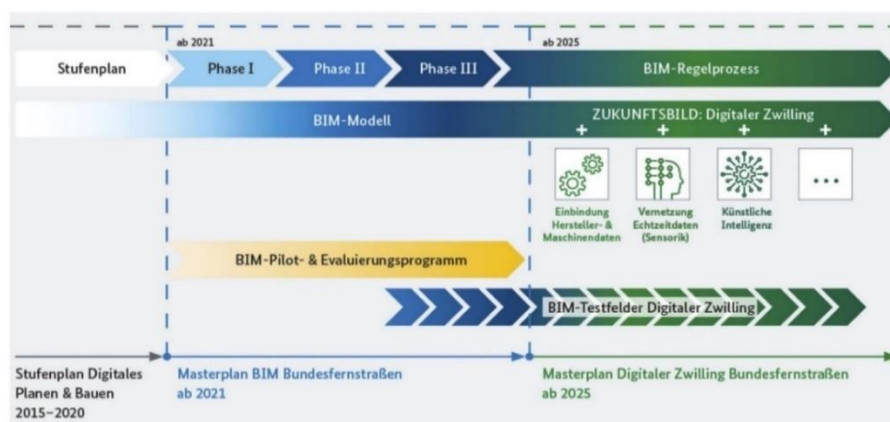


Abbildung 5: Masterplan BIM Bundesfernstraßen (Meister et al., 2021)

In der zweiten Phase sollen weitere Anwendungsfälle ergänzt werden und die BIM Methode intensiv in ausgewählten Projekten verwendet werden. Anschließend an die

zweite Phase soll BIM flächendeckend in allen aktuellen Großprojekten verwendet werden sowie in allen noch folgenden Projekten. Die flächendeckende Anwendung von BIM in der Planung stellt die Grundlage für die Zukunftsvision des digitalen Zwillings dar (Meister et al., 2021).

Zur Umsetzung dieser Ziele bedarf es einheitlicher Modellierungsrichtlinien, Leitfäden und Objektkataloge. Die im Projekt BIM4INFRA entwickelten Handreichungen basieren auf dem vierten Arbeitspaket des „Stufenplans Digitales Planen und Bauen“ und sollen ein allgemeines Verständnis für das Thema BIM schaffen und dessen Einsatz vorantreiben (Borrmann et al., 2019a).

### **2.4.3 BIM4INFRA**

Die im Rahmen des Projektes BIM4INFRA erarbeiteten zehn Handlungsleitfäden behandeln alle relevanten inhaltlichen, organisatorischen und rechtliche Themen. Die Handreichungen sollen helfen, das Verständnis für BIM zu festigen (Borrmann et al., 2019a), Leitfäden für die Ausschreibung und Vergabe von Leistungen (Borrmann et al., 2019c; Borrmann A. et al., 2019a, 2019b) zur Verfügung zu stellen, Prozesse im BIM-Ablauf festzulegen und helfen, Softwareprodukte (Borrmann A. et al., 2019e) und neutrale Schnittstellen (Borrmann A. et al., 2019c) zu bewerten.

### 3 Digitaler Zwilling

Neben der vermehrten Forschung zum Themengebiet BIM nahm in den vergangenen Jahren die Forschung zum Thema digitaler Zwilling (DT) zu. 95,8% der Veröffentlichungen mit dem Schlüsselwort „digital twin“ wurden nach 2016 veröffentlicht (Abbildung 6). Verschiedene Vorteile werden im Zusammenhang mit der Verwendung von DT genannt: Die Verwendung soll zu einer Kosten-, Zeitersparnis beitragen und das Verständnis der Zusammenhänge in dem betrachteten System verbessern (Dalibor et al., 2022). DTs können für verschiedene Zwecke verwendet werden: für Analysen von Systemen, zur Vorhersage von Zuständen und zur Unterstützung im Erhaltungsmanagement. Die Technologie wird in verschiedenen Bereichen verwendet. Sie findet sowohl im Maschinenbau, Luft- und Raumfahrt, Produktionssystem und Bauwesen Anwendung (Graf, 2018, S. 312).

Die Definitionen, welche Bestandteile ein DT enthält und welche Aufgaben er erfüllt, ist sehr stark von den Themengebieten abhängig, in denen diese Anwendung finden (Arora & Tushir, 2019, S. 16).

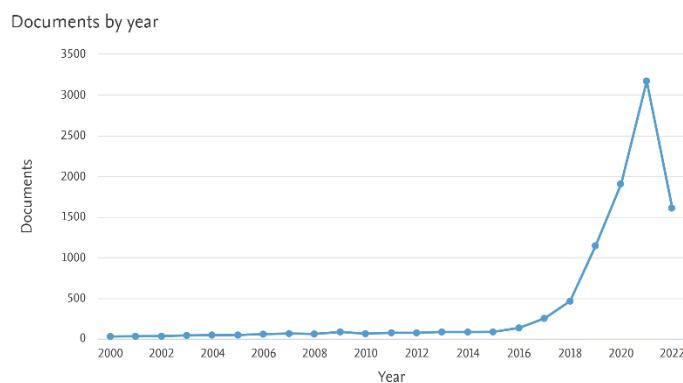


Abbildung 6: Veröffentlichungen nach Jahren, basierend auf Scopus Suche "digital twin" (Stand: 05.07.2022)

In Tabelle 2 sind verschiedene Definitionen des Begriffes DT nach Themengebiet sortiert dargestellt.

*Tabelle 2: Definitionen des Begriffes digitaler Zwilling*

| Industrie                     | Definition  | Quelle                                 |
|-------------------------------|---|--|
| Luft- und Raumfahrt<br>– NASA | Ein DT verbindet hoch realistische Simulationen mit Messergebnissen, Wartungshistorie und allen verfügbaren Daten, um die Lebensdauer des fliegenden Zwillings abzubilden und ermöglicht dadurch eine hohe Sicherheit und Zuverlässigkeit.        | (Arora & Tushir, 2019, S. 17)          |
| Bauwesen                      | Ein digitales Abbild von einem Wertgegenstand, Prozesses oder System in der gebauten oder natürlichen Umwelt.   | (Bolton et al., 2018, S. 10)           |
| Bauwesen                      | Ein DT ist ein Abbild eines physischen Systems, welches über den gesamten Lebenszyklus durch eine Datenaustauschschnittstelle verbunden ist.  | (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022) |
| Schifffahrt                   | Ein digitaler Zwilling ist eine realitätsgetreue Darstellung der operativen Dynamik seines physischen Gegenstückes, die durch eine nahezu in Echtzeit erfolgende Synchronisation zwischen dem Cyberspace und dem physischen Raum ermöglicht wird. | (Schleich, Anwer, Mathieu & Wartzack)  |
| Akademisch                    | Ein digitaler Zwilling ist eine realistische Repräsentation eines physischen Objektes   | (Arora & Tushir, 2019, S. 17)          |

### 3.1 DT – Allgemeine Definitionen

VanDerHorn & Mahadevan (2021) veröffentlichte die allgemeine Definition eines DTs, wonach ein DT eine virtuelle Repräsentation eines physischen Systems ist, welches durch den Austausch von Informationen zwischen dem physischen und virtuellen System geupdatet wird ([Abbildung 7](#)).

Nach der Definition von VanDerHorn & Mahadevan (2021) besteht ein DT aus drei Bestandteilen: (1) der physischen Realität, (2) dem virtuellen Abbild und (3) der Verbindung zwischen (1) und (2), welche einen bidirektionalen Austausch ermöglicht. Die Verbindung (3) zwischen dem realen System und dem virtuellen Abbild ermöglicht die Synchronisation der beiden Systeme. Diese updatet in regelmäßigen Abständen das virtuelle System.

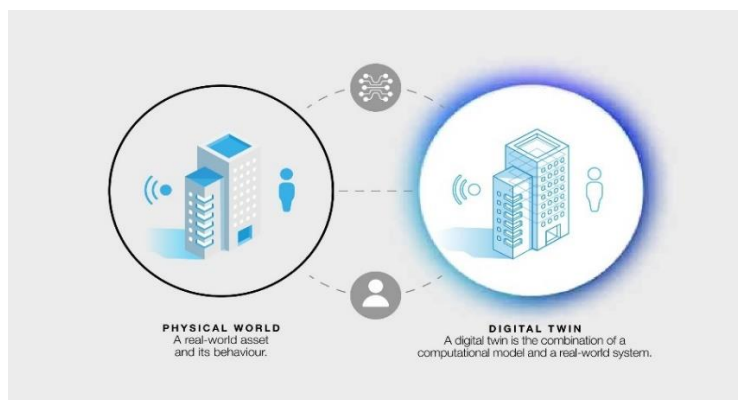


Abbildung 7: Systembild DT (Arora & Tushir, 2019)

### 3.2 Abgrenzung des DT von ähnlichen Technologien

Im Baukontext gibt es nach Davila Delgado & Oyedele (2021) drei unterschiedliche Verwendungen des Begriffes DT: (1) Wird der Begriff DT nur auf die Bauindustrie angewendet, beschreibt er ein realistisches Abbild von Bauwerken, Prozessen oder Systemen. (2) Der DT ist die Erweiterung von BIM um Datenerfassungssysteme und Verarbeitungssysteme. Zum Teil wird bei dieser Definition der DT auch als kompletter Ersatz der BIM-Technologie angewandt. Bei dieser Verwendung werden verschiedene DTs für die jeweiligen Phasen des Bauwerks verwendet. (3) Ein DT ist ein geschlossenes digital-phisches System, das für den Betrieb von Bauwerken genutzt wird.

Die Definition des DTs kann durch die Abgrenzung zu verwandten Technologien wie BIM, Simulations- und Ersatzmodellen noch verdeutlicht werden (Arora & Tushir, 2019, S. 16). Diese werden im Folgenden näher erläutert.

#### 3.2.1 Abgrenzung des DT von BIM

Die beiden Technologien DT und BIM ähneln sich in vielen Punkten; beide Technologien sind eine digitale Repräsentation eines physischen Systems (Davila Delgado & Oyedele, 2021) und enthalten viele Informationen, welche für den Betrieb relevant sind (Borrmann et al., 2021, S. 5). Bei der BIM-Technologie werden diese Informationen nach der Fertigstellung des Bauwerks an den Betrieb übergeben und nicht mehr kontinuierlich aktualisiert (Borrmann et al., 2021, S. 5). Die bidirektionale Verbindung des DTs ermöglicht den Informationsaustausch zwischen dem realen und virtuellen System (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). BIM ist für die Verwendung über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks gedacht (Borrmann et al., 2021, S. 5), beschränkt sich zur Zeit aber hauptsächlich auf die Planungs- und Bauphase (Cooperative Research Centre for Construction Innovation, 2007), wohingegen DTs für die Phase des

Betriebes und der Wartung verwendet werden (Opoku, Perera, Osei-Kyei & Rashidi, 2021) und der Überwachung von Zustandsdaten und Schäden dienen.

### **3.2.2 Abgrenzung des DT von Digitalen Modellen**

Ein digitales CAD-Modell, welches im BIM-Prozess verwendet wird, ist kein DT. Der DT wird als dynamisches System beschrieben, das durch die Verbindung zu genau einem in der realen Welt existierenden System den aktuellen Zustand darstellt (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Das digitale Modell ist ein statisches Modell, das den aktuellen Planungsstand darstellt und nur durch einen manuellen Eingriff verändert werden kann. BIM-Modelle sind auf Grundlage dieser Tatsache nicht ohne Erweiterung für das Unterhaltungsmanagement nutzbar; sie können aber als visuelle Repräsentation des realen Systems genutzt werden und dadurch der Darstellung des realen Systems innerhalb des DTs dienen (Grabe, Ullerich, Wenner & Herbrand, 2020, S. 118–125).

### **3.2.3 Abgrenzung des DT von Simulationsmodellen**

Simulationsmodelle werden bei der Planung und Durchführung von Bauprojekten in der Planungsphase verwendet. Sie eignen sich für Verschattungsanalysen oder um den Energieverbrauch zu simulieren (Borrmann et al., 2021, S. 6). Ein Simulationsmodell zeigt einen möglichen Zustand eines noch nicht realisierten physischen Systems, welcher auf Grundlage von Annahmen generiert wurde. Nach VanDerHorn & Mahadevan (2021) stellt ein Simulationsmodell keinen DT dar. Der DT basiert im Vergleich zum Simulationsmodell auf realen physischen Daten, das Simulationsmodell basiert auf mathematischen Modellen und Berechnungen (Aheleroff, Xu, Zhong & Lu, 2020).

### **3.2.4 Abgrenzung des DT von Surrogate Models**

Zur Analyse der gesammelten Daten verwenden DTs meist detaillierte mathematische Modelle, welche einer hohen Rechenleistung bedürfen (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Surrogate Models gehören zu den Methoden des Machine Learnings (Chakraborty, Adhikari & Ganguli, 2020). Dabei versteht man unter einem Surrogate Model die vereinfachte Darstellung der Realität dar, wohingegen ein DT den Anspruch hat, ein exaktes virtuelles Abbild eines realen Systems zu sein (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Surrogate Models können verwendet werden, um komplexe physikalische und mathematische Probleme vereinfacht zu berechnen. Dazu muss eine große Menge an Daten verfügbar sein, welche zum Trainieren des Modells verwendet

werden. Sofern das Ersatzmodell eine ausreichende Genauigkeit zur Abbildung der Wirklichkeit erzielt, kann durch dessen Verwendung Rechenleistung eingespart werden und es kann zur Berechnung von Vorhersagen verwendet werden. Das Ersatzmodell muss während seiner Verwendung gepflegt und aktualisiert werden (Bárkányi, Chován, Németh & Abonyi, 2021).

### **3.2.5 Abgrenzung des DT von Big Data**

Big Data beschreibt die Verarbeitungsart der Analyse von Zusammenhängen und Informationen von Daten, welche aufgrund von Ursprung, Menge, Aktualisierungsrate und Umfang nicht mit herkömmlichen Analysemethoden verarbeitet werden können (National Infrastructure Commission, 2017, S. 18). Zur Analyse der Zusammenhänge und um diese Daten wirtschaftlich zu nutzen, werden verschiedene Tools und Algorithmen verwendet (Qi & Tao, 2018). Im Vergleich dazu besteht der DT aus drei Hauptkomponenten (VanDerHorn & Mahadevan, 2021), welche durch zusätzliche Technologien erweitert werden. Zur Abbildung des realen Bauwerkszustands können viele verschiedene Daten verwendet werden, weshalb Big Data als ein Teil des DTs verwendet werden kann (Qi & Tao, 2018).

## **3.3 Klassifizierung von Digitalen Zwillingen**

In der Literatur werden verschiedene Kriterien genannt, die zur Beschreibung und Klassifizierung von digitalen Zwillingen verwendet werden können. So werden unter anderem Darstellungsgenauigkeit, Erstellungszeitpunkt, Anwendungsmöglichkeiten, Reifegrad, Integrationsgrad und Hierarchie als Unterscheidungspunkte genannt.

### **3.3.1 Erstellungszeitpunkt**

DTs können zu jedem Zeitpunkt im Lebenszyklus eines Bauwerks erstellt werden (Evans, Savian, Burns A. & Cooper, 2019). Anhand des Entwicklungszeitpunktes können diese unterschieden werden (Kahlen, Flumerfelt & Alves, 2017, S. 95). Am effizientesten ist ein DT, wenn er möglichst früh entwickelt wird; so können umfangreiche Informationen gesammelt und gespeichert werden (Evans et al., 2019).

Wird der DT bereits vor dem realen Bauwerk erstellt, bezeichnen (Kahlen et al., 2017, S. 95–98) ihn als Digital Twin Prototype (DTP). Dieser DT beschreibt eine prototypische Version eines zukünftigen realen Objektes; er enthält grundlegende Informationen für die spätere Objekterstellung. Die enthaltenen Informationen setzen sich aus Materialmengen, 3D-Modellen und Simulationsergebnissen zusammen. Die



Entstehung des DTP beginnt im Virtuellen und kann als Grundlage für verschiedene Tests zu der Optimierung des Bauwerks dienen. Erst nach Beendigung aller Tests und Optimierung des Systems wird das reale Objekt erstellt (Kahlen et al., 2017, S. 95–98). In diesem Fall ähnelt der beschriebene DT einem BIM-Modell.

Ein bereits zu Beginn der Produktionsphase erstellter DT, welcher nach der Fertigstellung des Bauwerks kontinuierlich mit Informationen des realen Systems aktualisiert wird, wird als Digital Twin Instance (DTI) bezeichnet. Das kontinuierliche Aktualisieren ermöglicht eine gute Beschreibung des Systemzustandes und kann zur Vorhersage von Entwicklungen verwendet werden (Kahlen et al., 2017, S. 97–98).

In der Bauindustrie findet neben diesen beiden Arten eine Mischung aus den beiden Anwendung. (Sacks, Brilakis, Pikas, Xie & Girolami, 2020) entwickelten das Modell zur Entstehungsbeschreibung eines DT (Abbildung 8). Dieses Modell verbindet die beiden Arten DTP und die DTI.

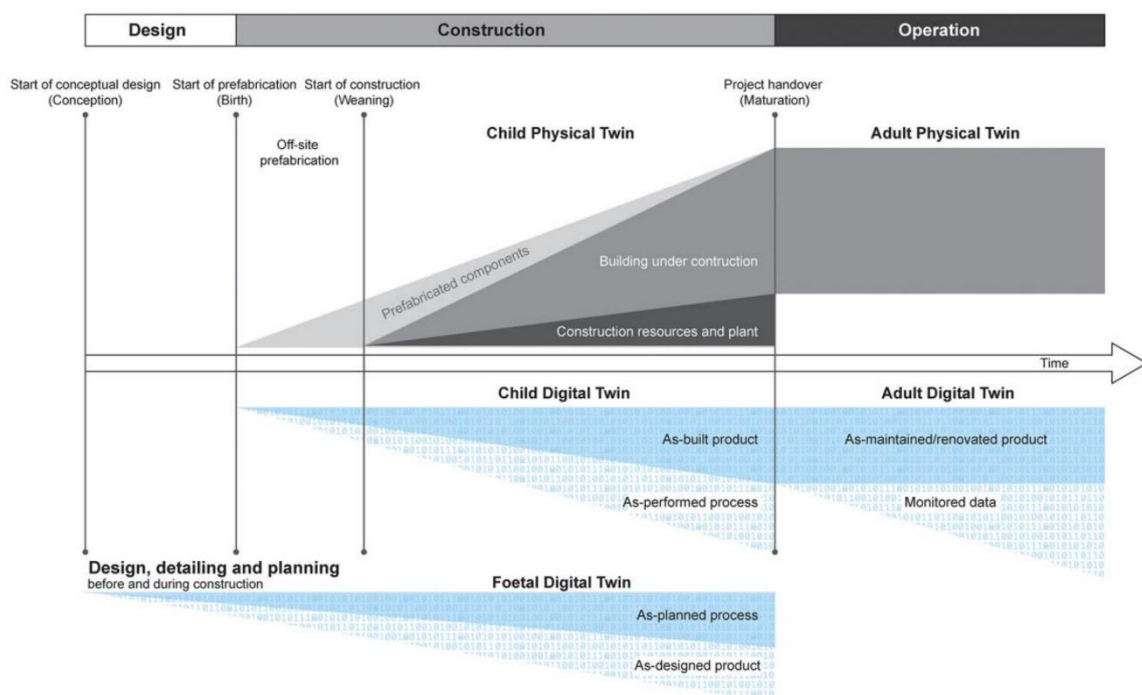


Abbildung 8: Lebenszyklus des physischen und digitalen Zwillings (Sacks et al., 2020)

Das Modell in Abbildung 8 beschreibt die Entwicklung eines DTs. Dieser wird parallel zu dem realen Bauwerk erstellt. In der Design-Phase wird ein digitales Modell nach den Vorgaben des Auftraggebers erstellt. Der LOG und LOI des Modells nimmt während der Planungsphase stetig zu. Dieses digitale Modell wird von Sacks et al. (2020) als „Foetal Digital Twin“ in Anlehnung an die menschliche Entwicklungsphase benannt. In dieser Entwicklungsphase wird der DT als Grundlage für Simulationen und Optimierungen des Bauwerks verwendet und als DTP (Kahlen et al., 2017, S. 95–98)

bezeichnet. Mit dem Baubeginn entsteht der reale Zwilling und dessen Detailierung steigt im Verlauf der Bauphase stetig an. Der reale Baufortschritt wird parallel im „Child Digital Twin“ durch das „As-built product“ dargestellt. Nach Fertigstellung des Bauwerks verändert sich der Informationsgehalt im realen System nur noch geringfügig, wohingegen das digitale System durch die Sensor- und Zustandsdaten stetig neue Informationen erhält (Sacks et al., 2020). Die Anreicherung des DT über dessen Lebenszyklus mit Sensordaten fällt nach Kahlen et al. (2017, S. 97–98) in die Kategorie des DTI. Eine parallele Entwicklung des DT neben dem realen Systems stellt sicher, dass der DT das reale System möglichst genau abbildet und sich mit ihm über die Zeit entwickeln kann (Chakraborty et al., 2020).

Bei bestehenden Bauwerken kann die Erstellung des DTs erst in der Nutzungsphase erfolgen. Die in Abbildung 8 dargestellte parallele Erstellung eines DT ist demzufolge nicht möglich. Die Erstellung ähnelt stattdessen dem DTI, welcher in der Bauphase erstellt wird (Kahlen et al., 2017, S. 97–98).

### 3.3.2 Integrationsgrad

Aufbauend auf der allgemeinen Definition von VanDerHorn & Mahadevan (2021), welche in Kapitel 3.1 erläutert wurde, besteht ein DT aus einem realen Objekt und dessen virtueller Darstellung. Die beiden Komponenten sind durch einen kontinuierlichen Datenaustausch verbunden. Die „twinning rate“ beschreibt die Frequenz, mit der das System upgedatet wird und den Zustand des realen Systems ins Virtuelle überträgt. Abhängig von der Anwendung und dem Themengebiet kann das System in real-time oder near-real-time aktualisiert werden (Pregolato et al., 2022). DTs mit einer real-time Updaterate werden als dynamische Modelle beschrieben. Im Gegensatz dazu werden DT mit festgelegten Updatezyklen als statische digitale Modelle bezeichnet (Lamb, 2019). Eine weitere Unterscheidung der DTs kann anhand des Informationsaustausches zwischen den realen und virtuellen Systemen erfolgen.

Als „Digitales Modell“ werden DTs bezeichnet, deren Datenaustausch zwischen den beiden Komponenten manuell erfolgt. Eine Zustandsänderung im realen System hat keinen direkten Einfluss auf das virtuelle System. Erst nach einer manuellen Anpassung des digitalen Modells bildet dieses den Zustand des realen Systems wieder richtig ab (Kritzinger, Karner, Traar, Henjes & Sihm, 2018).

Der „digitale Schatten“ ist ein DT, bei dem automatisch Daten und Informationen von dem realen Objekt zu dessen digitalen Abbild übermittelt werden. Der Datenaustausch

von dem Virtuellen zu dem realen Objekt erfolgt beim digitalen Schatten weiterhin manuell (Kritzinger et al., 2018).

Nach Kritzinger et al. (2018) besteht bei einem „Digitalen Zwilling“ ein bidirektionaler automatischer Informationsaustausch. Der DT bildet den Zustand des realen Objektes ab und kann durch die bidirektionale Verbindung den Zustand des realen Objektes verändern.

### **3.3.3 Geometrische Modellgenauigkeit**

Ein DT kann zur Darstellung der Informationen und des realen Systems geometrische Modelle nutzen. Diese Modelle können anhand verschiedener geometrischer Genauigkeiten unterschieden werden; ähnlich wie es bei BIM-Modellen anhand des LOGs möglich ist. Abhängig von der Verwendung des DTs werden unterschiedliche Anforderungen an die geometrische Genauigkeit des Modells gestellt. So reicht ein geometrisches Modell mit einer niedrigen Genauigkeit bereits aus, um die Lage von Schäden am realen System darzustellen (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 58), wohingegen zum Beispiel bei der Berechnung der Tragfähigkeit von historischen Bogentragwerken höhere Anforderungen an die geometrische Repräsentation gestellt werden müssen (Angjeliu, Coronelli & Cardani, 2020). Für die Verortung von Schäden bietet ein 3D-Modell des Bauwerks einen erheblichen Mehrwert (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 24).

### 3.3.4 Hierarchien

DT können nach ihrem geometrischen Umfang unterschieden werden, wodurch die in Abbildung 9 dargestellte Hierarchie entsteht. Von dem untersten Level erhöht sich der geometrische Umfang, welcher durch den DT beschrieben wird.

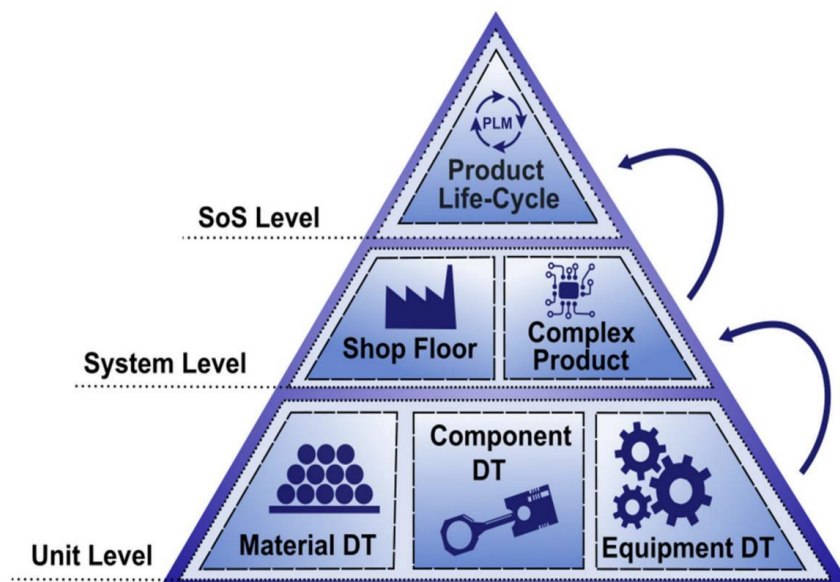


Abbildung 9: Hierarchielevel von DTs (Singh et al., 2021)

Das Unit Level beschreibt DTs, die die kleinsten Fertigungseinheiten abbilden. Die Ebene enthält auch DTs zur Beschreibungen von Materialien (Tao, Qi, Wang & Nee, 2019). Diese können zur nachhaltigen Optimierung von Materialproduktionsprozessen und zur gezielten Auswahl der ressourcenschonenden Materialien verwendet werden (Xiang, Zhang, Zuo & Tao, 2019). Neben Material DTs sind im Unit Level auch DTs enthalten, welche funktionale Bestandteile eines großen Ganzen abbilden. Diese finden unter andern im Maschinenbau Anwendung, um die Lebenserwartung von Elektromotoren vorherzusagen und zu verbessern (Venkatesan, Manickavasagam, Tengen kai & Vijayalakshmi, 2019). Diese funktionalen DTs werden als Komponenten Zwillinge (Component Twins) bezeichnet (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 30).

Die DTs des System Level sind DTs, die aus mehreren Component Twins zusammengesetzt sind. Dies ermöglicht eine bessere Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen DTs und eine besseren Ressourcenverwendung (Tao et al., 2019). Diese Objekt Zwillinge (Asset Twins) (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 30) stellen eine digitale Repräsentanz eines Objektes dar, welches aus mehreren funktionalen

Komponenten besteht, wobei alle Komponenten in dem virtuellen Modell dargestellt werden. Im Kontext der Baubranche werden Brücken- und Tunnelbauwerke, sowie Straßenzüge als Objektzwillinge klassifiziert, welche als Complex Products (Abbildung 9) gelten. Als Systemzwilling (System Twins) wird ein Zusammenschluss von mehreren Objektzwillingen bezeichnet (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 30). Auch diese Art des DTs wird dem System Level zugeordnet (Tao et al., 2019). Der Systemzwilling ermöglicht die Beschreibung des Gesamtzustandes und ermöglicht zusätzlich die Analyse der Zustände der einzelnen Objektzwillinge (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 30). Ein Beispiel für einen Systemzwilling kann die Darstellung eines Straßennetzes sein, welches durch Sensoren den aktuellen Zustand der Verkehrslage erfasst und diesen optimiert (Schmidt et al., 2015).

In dem obersten Level der DT Hierarchie dem „System of System Level“ (SoS Level), sind DTs enthalten, welche auf Systemebene miteinander vernetzt sind (Tao et al., 2019). Diese vernetzten Zwillinge werden durch den Zusammenschluss von mehreren System Twins erstellt (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 30). Ein Beispiel eines vernetzten Zwillings ist der National Digital Twin (NDT) in England, welcher vom Centre for Digital Built Britain (CDBB) sowie von Highway England gemeinsam geplant wird (Bolton et al., 2018). Zusätzlich zu den vernetzten Zwillingen können Prozesszwillinge (Process Twin), durch eine Echtzeitüberwachung digital Fertigungsprozesse abbilden, Probleme identifizieren und beheben (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 31).

### 3.4 Implementierungsprinzipien – „Gemini Principles“

Digital Built Britain verfolgt die Vision eines NDTs. Dieser soll durch die Vernetzung von DTs einen wirtschaftlichen Vorteil generieren. Zusätzlich zu den DTs des Bausektors sollen im NDT noch DTs aus anderen Bereichen vernetzt werden und die Grundlage für Entscheidungen gebildet werden (Bolton et al., 2018). Neben den wirtschaftlichen Vorteilen kann dadurch die Produktivität der Bauindustrie gesteigert, so wie der durch Baumaßnahmen entstehende Müll reduziert werden (Bolton et al., 2018)

In der Forschung wurden bis zur Veröffentlichung der „Gemini Principles“ viele Erkenntnisse zu den zugrundeliegenden Technologien eines DTs geschaffen. Diese bezogen sich immer auf die Lösung einzelner technischer Problemstellungen und nicht auf die allgemeine Anwendung der Technologie (Lamb, 2019). Die „Gemini Principles“ wurden von CDBB entwickelt, um eine einheitliche Richtlinie für die Implementierung von DTs zu schaffen (Bolton et al., 2018). Damit sie als Grundlage für alle

Anwendungsfälle und Bereiche gelten, sind sie sehr allgemein gefasst (Lamb, 2019). In den „Gemini Principles“ wird der DT als dynamisches Modell beschrieben, welches mit Hilfe von Sensoren und Messungen das reale Bauwerk überwacht (Moretti & Merino, 2022). Für die Erstellung dieses funktionalen, zuverlässigen und nützlichen DTs müssen nach Digital Built Britain bei der Implementierung die „Gemini Principles“ angewandt werden, um eine einheitliche Entwicklung für den gesamten Bausektor zu schaffen (Bolton et al., 2018, S. 8). Die in den „Gemini Principles“ veröffentlichten Leitlinien tragen unterstützend dazu bei, wichtige Schlüsselfragen bei der Implementierung zu beantworten. Die Prinzipien gliedern sich in drei Überkategorien: Zweck, Vertrauen und Funktion. Die Unterteilung der Überkategorien erfolgt jeweils in drei Unterpunkte, welche weitere wichtige Punkte betrachten und die Verwendung von DTs darstellen (Abbildung 10) (Bolton et al., 2018, S. 16).

In den Prinzipien ist festgelegt, dass eine DT

- (1) zweckmäßig sein muss. Der Öffentlichkeit muss dadurch ein Vorteil erbracht werden, sowie einen Erkenntnismehrwert für die Bauindustrie aus dessen Anwendung generiert werden.
- (2) vertrauenswürdig sein muss. Er muss eine sichere Übertragung aller notwendigen Daten durch offene Schnittstellen ermöglichen und die zuverlässigen Daten sicher verarbeiten und speichern.
- (3) funktional und effizient sein muss. Durch das Festlegen von Standards und Definierung von klaren Eigentumsverhältnissen muss er jedoch offen für technologische Weiterentwicklungen sein.



Abbildung 10: „Gemini Principles“ (Bolton et al., 2018, S. 16)



### 3.5 Modelle zur Beschreibung eines DTs

Das System eines DTs stellt eine Kombination aus verschiedenen Hard- und Software-systemen mit verschiedenen Funktionen und Komponenten dar. Um das komplexe System eines DTs mit allen Aspekten und Bestandteilen zu beschreiben, müssen verschiedene Modelle verwendet werden. In Abbildung 11 stellen Davila Delgado & Oyedele (2021) alle Modelle dar, die zur Beschreibung notwendig sind. Zu diesen zählen Strukturmodelle, Funktionsmodelle und Maturity Models.

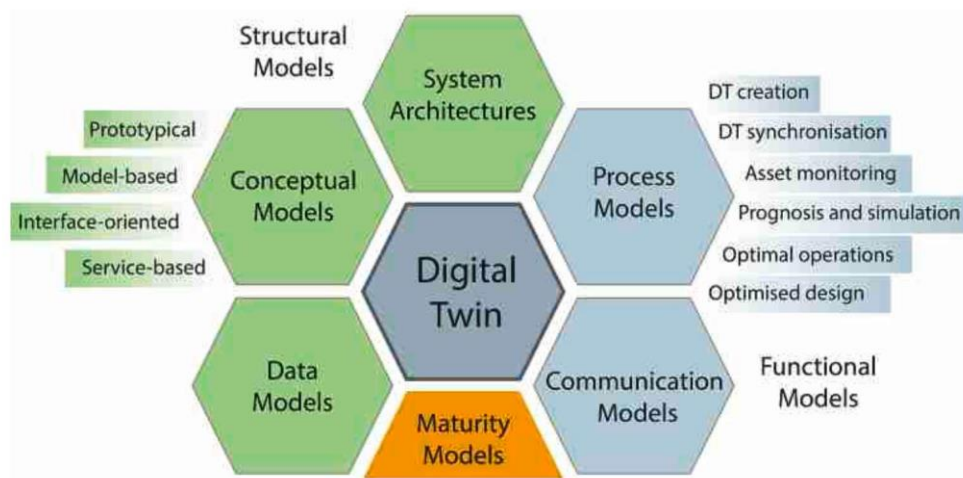


Abbildung 11: Modelle zur Beschreibung eines DTs (Davila Delgado & Oyedele, 2021, S. 8)

#### 3.5.1 Strukturmodelle

Strukturmodelle beschreiben durch eine abstrakte Darstellung die Strukturen und Funktionen eines DTs und können diese dadurch für Anwender verständlicher darstellen. Davila Delgado & Oyedele (2021) unterteilen die Strukturmodelle in weitere Modelle: konzeptionelle Modelle, Systemarchitekturmodelle und Datenmodelle

##### Konzeptionelle Modelle

Konzeptionelle Modelle können nach Davila Delgado & Oyedele (2021) abhängig von ihrem inhaltlichen Schwerpunkt in vier Unterkategorien unterteilt werden. Das prototypische Modell beschreibt auf abstrakter funktionaler Ebene den Zusammenhang zwischen den Messinstrumenten, den Messgrößen, den nötigen Bestandsinformationen und deren Interaktionen mit dem Benutzer des DTs. Im Gegensatz dazu beschreibt das modellbasierte Strukturmodell nach Davila Delgado & Oyedele (2021) die Struktur des DTs durch die mögliche Zusammenarbeit verschiedener Funktionsmodelle in dem technologischen Umfeld. Jedes der Funktionsmodelle wird zur Beschreibung einer

besonderen Funktion des realen Systems verwendet. Dadurch können physikalische Systemänderungen und Simulationen mit Rechenmodellen und Geometrien beschrieben werden. Abhängig von der Verwendung des DTs müssen unterschiedliche Modelle in dem Strukturmodell dargestellt werden. Durch das Schnittstellenmodell kann der Zusammenhang zwischen virtuellem und realem System durch den DT dargestellt werden. Dieses Modell beschreibt den DT als abstrakte Verbindung für die Optimierung der ablaufenden Prozesse. Der Fokus des Modelles liegt auf den Prozessen der Datenverarbeitung und -weitergabe, weniger auf der Darstellung des Bauwerks. Das servicebasierte Modell beschreibt den DT aus der Sicht des Benutzers und stellt dessen Anforderungen in den Vordergrund. Es werden die möglichen Interaktionen zwischen dem Benutzer und den anwendbaren Prozessen beschrieben. Zusätzlich kann mit Hilfe dieses Modells auch die Zusammenarbeit verschiedener DTs schematisch beschrieben werden (Davila Delgado & Oyedele, 2021).

### Systemarchitekturmodelle

Ein DT besteht aus verschiedenen Elementen und Technologien (Klein et al., 2019). In den Systemarchitekturmodellen werden die Beziehungen zwischen den Softwaresystemen und Komponenten beschrieben. Dieses Modell stellt einen wichtigen Teil bei der Erstellung eines DTs dar, um die Interaktionen zwischen realen und virtuellen System zu beschreiben (Davila Delgado & Oyedele, 2021) und darzustellen, wie die verschiedenen verwendeten Technologien zusammenarbeiten. Im Systemarchitekturmodell wird dargestellt, wie die Daten und Informationen zwischen den verschiedenen Elementen ausgetauscht werden (Klein et al., 2019). Die Zusammenarbeit der Systeme sollte vor Beginn der Entwicklung gut durchdacht werden, um das volle Potential des DTs zu erzielen (Josifovska, Yigitbas & Engels, 2019). DTs können verschiedene Arten von Systemen darstellen; im Bereich von Bauwerken und Straßen stellt der DT ein cyber-physisches System dar. Diese Systeme beschreiben physische Elemente und Prozesse durch die Verwendung von mathematischen Modellen und Simulationen (Josifovska et al., 2019). Es werden in der Literatur verschiedene Architekturen von DTs dargestellt. Einige werden im Folgenden ausführlich erläutert.

Lu et al. (2020) stellte einen DT vor, welcher sowohl Gebäude als auch Städte abbilden kann. Die vorgestellte Architektur des dynamischen Stadt-DTs besteht aus fünf Ebenen. Die Ebene der Datenerfassung, die Übertragungsebene der Daten, die digitale Modellierungsschicht, die Modellintegrationsschicht, sowie die Schicht, in der die



Ergebnisse bereitgestellt werden. Der vorgestellte DT bildet eine vernetzte Stadt ab und enthält Daten von DTs auf Gebäudeebene (Lu et al., 2020).

Aheleroff et al. (2020) stellt ein DT-Architekturmodell vor, welches aus fünf Schichten aufgebaut ist: die physische Schicht, die Kommunikationsschicht, die digitale Ebenen, die Cyber Ebene und die Anwendungsebene. Die physische Ebene beschreibt dabei die physischen Objekte, die die Grundlage des DTs bilden. Die in der physischen Schicht gesammelten Daten werden durch die Kommunikationsebene in die digitale Ebene übertragen. Eine digitale Kopie des realen Objektes ist in der digitalen Ebene enthalten; diese Kopie beinhaltet neben geometrischen Daten physikalische Sensordaten, welche in verschiedenen Formaten erfasst werden. In der Anwendungsebene werden die Daten für den Benutzer aufbereitet dargestellt.

Gürdür Broo, Bravo-Haro & Schooling (2022) entwickelten ein Modell für einen Brücken DT, dessen cyber-physische Systemarchitektur aus fünf Ebenen aufgebaut ist. Die Architektur beschreibt die physischen Erfassungssysteme, die Datenerfassung, die Speicherung und Weitergabe der Daten, sowie die Verarbeitung und Darstellung der Daten. Die erste Ebene beinhaltet die Messsysteme und Messkonzepte. Der nächste Bestandteil stellt die Datenerfassung dar. In diesem Bereich werden die gesammelten Daten synchronisiert und strukturiert, um im Anschluss in einem lokalen Datenspeicher am Bauwerk gespeichert zu werden. Die Daten werden über das Internet an eine Cloud Plattform weitergegeben, aus welcher die Daten entnommen und in verschiedenen Softwareanwendungen analysiert werden. In der letzten Ebene der Architektur befindet sich die Datenpräsentation, die die analysierten Informationen dem Benutzer für Entscheidungen zur Verfügung stellt. Gürdür Broo et al. (2022) benennt die Möglichkeit, die vorgestellte Architektur durch das Vernetzen mit weiteren DTs zu erweitern, um einen National Digital Twin zu erhalten.

Josifovska et al. (2019) stellt vier Hauptbestandteile eines cyber-physischen DTs dar. Dazu gehören die physische Ebene, die virtuelle Ebene, die Datenverwaltungsebene und die Dienstleistungsebene. Die physische Ebene stellt eine Abstraktion des realen Zwillings dar und kann verschiedene Konzepte widerspiegeln. Es kann zum Beispiel ein Objekt darstellen, welches von Sensoren beobachtet wird. Die virtuelle Ebene beinhaltet Informationen, um das physische Objekt darzustellen. Die Informationen sind Grundlage für verschiedene Modelle, wie geometrische, physikalische oder Prozessmodelle, die verwendet werden, um konkrete Zustände darzustellen. In der

Datenverwaltungsebene werden die Daten analysiert, verwaltet und gespeichert. Mit Hilfe der Dienstleistungsebene können Einstellungen getätigt werden, um die gewünschten Ziele zu erreichen.

Auf Grundlage der allgemeinen Definition eines DTs entwickelten Nwogu, Lugaresib, Anagnostoua, Matta & Taylor (2022) ein Systemarchitekturmodell, welches sich in drei Hauptebenen gliedert: Die Ebenen des realen Objektes, das virtuelle Abbild und die Verbindung zwischen den beiden Ebenen. Die Ebene des virtuellen Zwillings wird von Nwogu et al. (2022) in die Datenerfassung, Datenanalyse-, Datenspeicherungs-, Simulations-, Vorhersagen-, Optimierungs- und Kontrollebene unterteilt.

Jedes der beschriebenen Architekturmodelle ist für einen konkreten Anwendungsfall entwickelt worden und kann nur zum Teil auf andere Projekte übertragen werden. Für jedes Projekt muss eine eigene Systemarchitektur entwickelt werden (Gürdür Broo et al., 2022). Trotz der Varianz in den Systemarchitekturen sind in den vorgestellten Systemen grundlegende Gemeinsamkeiten vorhanden, die in den folgenden Ebenen zusammengefasst werden können.

#### Physische Ebene und Datenerfassung

Die physische Ebene oder auch Datenerfassungsebene stellt die Grundlage eines DTs dar (Lu et al., 2020). Sie enthält sowohl das physische Objekt als auch die Messsysteme, Sensoren, Messkonzepte und das Personal (Celik Y., Petri I. & Rezugi Y., 2021; Josifovska et al., 2019). Die Sensoren sind ein wichtiger Bestandteil der physischen Ebene; sie sind sowohl zur Erfassung der Messdaten als auch zu deren Weitergabe notwendig (Aheleroff et al., 2020). Auf Grundlage des Messkonzeptes werden die Arten der Sensoren ausgewählt und deren Lage an dem Objekt bestimmt. Durch die große Varianz in Umfang, Format, Quelle und Intervall der Daten kann die Erstellung der Datenerfassung einige Probleme bereiten (Lu et al., 2020). Einige Systemarchitekturmodelle trennen die Datenerfassung von der physischen Ebene und nutzen eine weitere Ebene für die Erfassung der Daten. Durch diese Entscheidung setzen sie eine explizite Trennung zwischen der physischen und der virtuellen Realität (Gürdür Broo et al., 2022). Andere Architekturen zählen die Datenerfassung zu der physischen Ebene und trennen die beiden Ebenen nicht (Aheleroff et al., 2020).

#### Datenübertragungsebene und Kommunikationsebene

Die Übertragungsebene stellt die Verbindung zwischen der physischen Ebene und den weiteren virtuellen Ebenen dar (Aheleroff et al., 2020). Die Ebene enthält verschiedene

Kommunikationstechnologien. So können die Daten von den Sensoren über das IoT übertragen werden und an Cloud-Speicher weitergegeben werden (Lu et al., 2020).

#### Datenintegration und -verarbeitungsebene

Nach Übertragung der Daten werden diese in der Integrationsebene verarbeitet und gespeichert. Von Aheleroff et al. (2020) wird diese Ebene als Cyber Layer bezeichnet und beinhaltet alle Technologien, welche zum Speichern, Verarbeiten und Erstellen eines dynamischen digitalen Modells notwendig sind (Josifovska et al., 2019). Dazu zählen Big Data, Cloud Computing und Machine Learning. Gürdür Broo et al. (2022) zählt zu dieser Ebene auch Softwareprogramme zur Analyse der Daten. Lu et al. (2020) bezeichnet diese Ebene als Kernstück des DTs. Sie enthält Techniken zur Analyse der gesammelten Daten, zur Verarbeitung in Simulationen sowie zur Speicherung.

#### Datendarstellung

Die Ebene der Datendarstellung ermöglicht es dem Nutzer, auf die analysierten Daten zuzugreifen. Durch verschiedene Darstellungsarten in Form von Dashboard Ansichten oder 3D Modellen können die Daten für den Benutzer visuell aufbereitet werden (Gürdür Broo et al., 2022). Das 3D Modell des physischen Objektes wird zum Teil einer eigenen Ebene zugeordnet. Diese Ebene kann nach Lu et al. (2020) zusätzlich auch Simulationsmodelle enthalten.

#### Datenmodelle

Mit Hilfe des Datenmodells können die Beziehungen zwischen den verschiedenen Datensätzen beschrieben werden. Kernstück für einen DT ist die Interoperabilität zwischen den verschiedenen Systemen. Das am meisten verbreitete Datenmodell im Bausektor ist das IFC-Schema. Dieses ermöglicht zur Zeit noch nicht den vollständigen Austausch aller in einem DT vorhandener Daten (Davila Delgado & Oyedele, 2021).

### 3.5.2 Funktionale Modelle

#### Kommunikationsmodelle

Um einen guten Datenaustausch zu ermöglichen, bilden Kommunikationsmodelle die Methoden zur Kommunikation zwischen den verschiedenen Verarbeitungssystemen, Sensoren und Messsystemen ab. Die Systeme müssen unterschiedliche Datenformate aus verschiedenen Quellen verarbeiten. Neben den verschiedenen Formaten kann die Updaterate des Informationsaustausches stark variieren, wodurch die Form der Kommunikation beeinflusst wird (Davila Delgado & Oyedele, 2021).

#### Prozessmodelle

Prozessmodelle beschreiben Instanzen, Verhaltensmuster und Regeln, welche notwendig für die gewünschten Ergebnisse sind. Sie skizzieren Prozesse, die im Zusammenhang mit einem DT stehen, sowie die Erstellung, die Synchronisation oder die Simulation eines DTs (Davila Delgado & Oyedele, 2021).

#### DT-Erstellungsmodelle

Erstellungsmodelle beschreiben die Prozessschritte, um die Bestandteile eines leistungsfähigen DTs zu erstellen. Davila Delgado & Oyedele (2021) bezieht sich bei der Anwendung dieser Erstellungsmodelle im Bauwesen auf die Erstellung der geometrischen Repräsentation des Bauwerks und dessen eingeschränkte Umsetzbarkeit auf Grundlage der großen Varianz an Bauwerken und Komponenten. Trotz des großen Potenzials von DTs finden diese im Bauwesen bisher nur selten Anwendung (Pregolato et al., 2022).

#### Beispiel für ein Erstellungsmodell

Parrott A. & Warshaw L. (2017) und Pregolato et al. (2022) entwickelten ein DT-Erstellungsmodell zur erfolgreichen Implementierung von DTs. Dabei müssen verschiedene Punkte bearbeitet werden, die im Folgenden dargestellt werden (Parrott A. & Warshaw L., 2017; Pregolato et al., 2022).

- (1) Daten- und Bedarfsermittlung: In diesem Schritt werden die realen Anforderungen und Strukturen ermittelt, die Grundlage des DTs sind (Pregolato et al., 2022). Aus diesen Informationen kann ein Prozessdiagramm erstellt werden, das die Geschäftsprozesse abbildet. Nach der Bedarfsermittlung ist ein Überblick über die operativen Prozesse, Ziele, Daten und Informationen, die für die Erstellung eines funktionsfähigen DTs nötig sind, vorhanden. Die Erweiterung

um Kosteninformationen kann eine genauere Analyse der Optimierungsmöglichkeiten ermöglichen (Parrott A. & Warshaw L., 2017).

Im Anschluss an die Analyse der Anforderungen und Ziele muss eine Systemarchitektur für den DT erstellt werden, die sowohl den Datenaustausch der Sensoren in Echtzeit ermöglicht als auch den physischen Zwilling im Virtuellen abbildet (Parrott A. & Warshaw L., 2017). Dazu werden folgende Schritte empfohlen.

- (2) Digitale Modellerstellung: Das virtuelle Modell, welches in diesem Schritt erstellt wird, kann zur Simulation, Visualisierung und zur Kontrolle verwendet werden. Zusätzlich müssen zu dem Modell offene Schnittstellen implementiert werden, um den Austausch von Daten aus unterschiedlichen Quellen zu ermöglichen (Pregolato et al., 2022).
- (3) Installation der Messeinrichtung: Parrott A. & Warshaw L. (2017) benennt als nächsten Schritt die Anbringung von Sensoren zum Messen zuvor ausgewählter Mess- und Zustandsgrößen.
- (4) Übermittlung von Sensordaten: Die gesammelten Sensordaten, welche den Zustand des realen Bauwerks darstellen und eine Modellvalidierung und Modellaktualisierung ermöglichen, müssen durch ein geeignetes Übertragungssystem abrufbar und verarbeitbar sein. Die erforderliche Datenqualität und der Ermittlungszyklus wurde in (1) festgelegt und sind Grundlage für die nötige Erfassungs- und Kommunikationstechnologien (Parrott A. & Warshaw L., 2017; Pregolato et al., 2022).
- (5) Aggregationsschritt und Analyse: Einige Daten müssen vor dem Import in den DT in Zustandsgrößen umgerechnet werden, wohingegen andere Beschreibungsgrößen sind und direkt verwendet werden können. Die Datenverarbeitung kann in der Cloud oder vor Ort stattfinden. Zusätzlich muss die Verarbeitung flexibel sein, um sich an den technologischen Fortschritt anzupassen (Parrott A. & Warshaw L., 2017; Pregolato et al., 2022). Im Anschluss an die Verarbeitung können die Daten in dem Modell visualisiert werden (Parrott A. & Warshaw L., 2017).
- (6) Betriebsphase: Der letzte Schritt ist die Verwendung des DTs. Die gesammelten Daten werden in Dashboards dargestellt und geben einen Überblick über den Zustand des physischen Systems. Es werden Stellen aufgezeigt, die Handlungsbedarf erfordern. Nach Durchführung der Inspektionen oder

Instandsetzungen werden durch Feedback mögliche Anpassungen und Verbesserungen der Analysemechanismen zurückgegeben (Parrott A. & Warshaw L., 2017; Pregolato et al., 2022).

#### DT-Synchronisationsmodelle

Ein wesentlicher Bestandteil eines DTs ist die Verbindung zwischen dem realen und virtuellen System, welche für die Synchronisation des DTs verantwortlich ist (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Abhängig von den Funktionen und Aufgaben des DTs gibt es unterschiedliche Zeitabstände, in denen der DT aktualisiert wird. Auf den Bausektor übertragen können neben kontinuierlichen Aktualisierungen durch Sensoren auch ereignisbasierte Synchronisationen erfolgen, wie zum Beispiel nach der Fertigstellung einer Baumaßnahme (Park, Lee & Noh, 2020). Das Synchronisationsmodell beschreibt die für spezielle Anwendungsfälle festgelegte Synchronisationsrate (Davila Delgado & Oyedele, 2021).

#### Simulationsmodelle

Simulationen sind ein wichtiger Teil eines DTs und ermöglichen es auf Basis der gesammelten Daten Vorhersagen zu den Zustandsentwicklungen und daraus resultierenden Wartungen zu treffen. Nach Davila Delgado & Oyedele (2021) gibt es zwei verschiedene Arten von Simulationen: die kontinuierliche Simulation und die diskrete Simulation. Werden die Simulationen nur infolge von bestimmten Ereignissen aktualisiert, so wird diese Art als diskrete Simulation bezeichnet (Davila Delgado & Oyedele, 2021).

### 3.5.3 Reifegradmodelle

Der technologische Fortschritt und die damit verbundenen Vorteile führen zu einem Wandel in den Unternehmen und Verwaltungen. Diese beginnen schrittweise die neuen Methoden in ihre Unternehmensprozesse einzubinden. Meist werden Teillösungen eingeführt und nicht das volle Potential der Technologien ausgeschöpft. Eine vollständige Einführung der neuen Methoden würde allen Projektbeteiligten viele Vorteile verschaffen (Bentley, 2018a). Um eine gezielte Weitereinführung der digitalen Technologien zu erreichen, können die Unternehmen mit Hilfe von Maturity-Models den aktuellen Entwicklungsgrad der Technologieeinführung bewerten und auf dieser Grundlage die nächsten Schritte planen (Papic & Cerovsek, 2019). Die Maturity-Models ermöglichen neben der Analyse der eigenen technologischen Entwicklung auch

die Bewertung der Qualität der Projekte für den Vergleich verschiedener Projekte mit Hilfe neutraler Indikatoren (Uhlenkamp et al., 2022). Die Maturity-Models welche in der Bauindustrie und bei DTs Anwendung finden, sind aus verschiedenen Phasen aufgebaut, die die notwendigen technologischen Kriterien beinhalten und für die Bewertung des Implementierungsfortschrittes genutzt werden (Davila Delgado & Oyedele, 2021). Die Entwicklung eines DTs findet nicht immer linear statt. Es können Elemente aus höheren Ebenen bereits im DT enthalten sein, bevor weniger komplexe Elemente implementiert werden (Evans et al., 2019). Aus diesem Grund eignen sich die im Folgenden beschriebenen Modelle nur bedingt zur Beschreibung der Entwicklungsstufe eines DTs.

Chen et al. (2021) entwickelte auf Grundlage der „Gemini Principles“ ein Reifegradmodell, das in drei Hauptebenen unterteilt ist, von denen jede durch neun Kriterien beschrieben wird. Durch die Bewertung des Projektes anhand der gegebenen Kriterien kann die Entwicklungsstufe neutral bewertet und mit anderen Projekten verglichen werden.

Eine weiteres Modell zur Bewertung und zum Abgleich des Entwicklungsfortschrittes wurde von Evans et al. (2019) entwickelt. Dieses Modell beschreibt die Entwicklung eines DTs in sechs Stufen. Die erste Stufe des Modells wird als Element 0 bezeichnet und beschreibt einen neu erstellten DT eines Bestandsbauwerks. Dieser DT beinhaltet nur die „as-built“ Daten aus der Bauphase. Die nächste Stufe des DT (Element 1) ist ein DT, der nur Objekte enthält, welche in einem BIM-Prozess ausgearbeitet und in der Bauphase erstellt wurden. Durch Anreicherung eines Element 1 DTs mit Metadaten wird er zu einem Element 2 DT und erhält zusätzlich die Funktion zur Simulation von Zuständen. Davila Delgado & Oyedele (2021) vergleichen die ersten drei Stufen des Modells mit dem BIM-Maturity Model von buildingSmart. Ein Element 3 DT verwendet zur Vorhersage des Verhaltens Sensoren und Echtzeitdaten (Evans et al., 2019). Für die Klassifizierung als Element 4 DT muss eine bidirektionale Verbindung zwischen realem und virtuellem System vorhanden sein. Der Element 5 DT verwendet nach Evans et al. (2019) alle gespeicherten Informationen und trifft auf Grundlage dieser autonom Entscheidungen.

Das von Hamer et al. (2018) vorgestellte Modell beschreibt die Zunahme der Fähigkeiten eines DTs in drei Stufen: Der Typ 1 DT kann zur Überwachung und nur in besonderen Ausnahmen zur Analyse der gesammelten Daten verwendet werden. Der

Typ 2 beschreibt einen DT, welcher durch eine bidirektionale Verbindung Kontrolle über das reale Asset besitzt und dieses gezielt verändern kann. Der Typ 3 DT beschreibt ein System, bei dem Modelle und Simulationen verwendet werden, um Vorhersagen zu tätigen und daraus Optimierungsvorschläge zu generieren.

Arora & Tushir (2019, S. 21–23) benutzten für die Beschreibung und Bewertung von DTs vier Kenngrößen: Autonomie, Intelligenz, Lernfähigkeit und Genauigkeit. Die vier Bewertungskenngrößen besitzen konzeptionell einen Zusammenhang, werden jedoch in dem Bewertungsmodell unabhängig voneinander betrachtet. Jede Kenngröße wird abhängig von dem Entwicklungsstand des DTs getrennt voneinander mit einer Bewertungseinheit zwischen 1 und 5 bewertet (Abbildung 12). Aus dem Durchschnitt der Kenngrößenlevel ergibt sich das Bewertungslevel des DTs.



Abbildung 12: DT-Bewertungsmodell (Arora & Tushir, 2019)

Level 1 beschreibt dabei einen DT, welcher aus einem digitalen Modell besteht, das eine Verbindung zur realen Welt besitzt. Er kennzeichnet sich durch limitierte Funktionen und einen Mangel an Intelligenz und Autonomie aus und stellt in erster Linie ein einfaches Modell oder eine Karte dar (Arora & Tushir, 2019).

Ein DT des Level 2 ist ein digitales Modell, welches in bestimmten Situationen Feedback geben kann und dieses durch die bidirektionale Verbindung an eine Informationsschnittstelle weitergeben kann (Arora & Tushir, 2019).

Level 3 beinhaltet einen DT, welcher Vorhersagen zum Unterhalt sowie Analysen und interne Informationen bereitstellt. Er kann verwendet werden, um Vorhersagen zur erwarteten Lebenszeit von Bauwerken zu tätigen (Arora & Tushir, 2019).

Ein DT, welcher die Fähigkeit besitzt, auf Grundlage verschiedener Quellen effektiv zu lernen und dadurch selbständig Entscheidungen zu erarbeiten und diese als



Entscheidungsoptionen für den Betreiber vorzuhalten, wird als Level 4 DT bezeichnet (Arora & Tushir, 2019).

Ein DT des Level 5 würde nach Arora & Tushir (2019, S. 21–23) ein breites Spektrum an Fähigkeiten und Zuständigkeiten besitzen und sich letztendlich der Fähigkeit nähern, autonom zu handeln.

Das Maturity Model nach Uhlenkamp et al. (2022) besteht aus 31 Kriterien, welche in sechs Kategorien zusammengefasst werden. Nicht alle der 31 Kriterien werden gleichwertig gewichtet und einige werden bei der Bewertung der Reife nicht berücksichtigt. Zum einen gibt es Kategorien, in denen nur ein Kriterium bewertet wird, während bei anderen Kriterien alle Punkte der Kriterien summiert werden und so die Bewertung ergeben. Mit Hilfe der Gewichtung kann der Benutzer Kriterien, die seiner Meinung nach wichtiger sind, stärker gewichten. Bei der Visualisierung werden die Kategorien nach Gewichtung und Reifegrad dargestellt. Die verwendeten Bereiche im Diagramm helfen zusätzlich bei der Bewertung.

Madni, Madni & Lucero (2019) definierten vier Level, um die Funktion und Absichten der virtuellen Repräsentation einzuteilen. Diese Einteilung ist in Abbildung 13 dargestellt.

| Level                         | Model Sophistication  | Physical Twin  | Data Acquisition from Physical Twin  | Machine Learning (Operator Preferences) | Machine Learning (System/Environment) |
|-------------------------------|---|----------------|--|---|---------------------------------------|
| 1<br>Pre-Digital Twin         | virtual system model with emphasis on technology/technical-risk mitigation            | does not exist | Not applicable   | No                                      | No                                    |
| 2<br>Digital Twin             | virtual system model of the physical twin   | exists         | performance, health status, maintenance; batch updates                             | No                                      | No                                    |
| 3<br>Adaptive Digital Twin    | virtual system model of the physical twin with adaptive UI                            | exists         | performance, health status, maintenance; real-time updates                         | Yes                                     | No                                    |
| 4<br>Intelligent Digital Twin | virtual system model of the physical twin with adaptive UI and reinforcement learning | exists         | performance, health status, maintenance, environment; both batch/real-time updates | Yes                                     | Yes                                   |

Abbildung 13: Level von DTs (Madni et al., 2019)

Madni et al. (2019) bezeichnet als „pre-digital Twin“ ein virtuelles Modell, welches vor dem physischen Zwilling generiert wurde. Dieser DT wird in der Entwurfsphase des Bauwerks erstellt und ist Grundlage für die Analysen von verschiedenen Planungsvarianten und zur Minderung von technischen Risiken. Das „pre-digital Twin“-Modell wird nach Madni et al. (2019) meist nur für die Analysen in der Planungsphase verwendet

---

und wird im späteren Verlauf durch einen neuen DT ausgetauscht. Der neu erstellte DT baut auf den Erkenntnissen des „pre-digital Twin“ auf.

Der „digitale Zwilling“ des Level 2 speichert Zustands- und Wartungsdaten des realen Systems. Das virtuelle System wird in diesem Level durch kontinuierlich erfasste und geupdatete Zustandsdaten von Sensoren aktualisiert. Die Daten werden zur Entscheidungsunterstützung sowie zur Anpassung von Erhaltungsplänen verwendet.

Der „Adaptive Digital Twin“ besitzt eine adaptive Benutzeroberfläche und passt durch ML-Algorithmen die Benutzeroberfläche den Gewohnheiten des Benutzers an. Der Benutzer wird dadurch bei der Echtzeit-Entscheidungsfindung und Erhaltungsplanung unterstützt.

Der „Intelligent Digital Twin“ des Level 4 besitzt die gleichen technischen Kenngrößen des Level 3 DTs. Zusätzlich wird er um ML-Algorithmen ergänzt, welche Muster in dem Betriebsablauf erkennen, das System analysieren und dadurch Entscheidungen unterstützen (Madni et al., 2019).

## 4 Technologien zur Umsetzung von DTs

Bei der Umsetzung eines DT finden verschiedene Technologien und Methoden Anwendung. Diese können nach Fang et al. (2022) in drei Kategorien unterteilt werden, abhängig davon wie wichtig sie für die Erstellung und Funktion des DTs sind. Die Unterteilung erfolgt in (1) die Basistechnologien, die für die Erfassung der physischen Einflüsse und Zustände sowie der Übertragung der Messergebnisse verantwortlich sind. Zu diesen Technologien zählen unter anderem Sensoren, IoT-Technologie, Datenspeicherung und die Vernetzung und Übertragung zwischen dem realen und dem virtuellen System. (2) Die Kerntechnologien sind für die Erstellung des virtuellen Modells, der Fusion und Analyse der Daten und zur Bewertung der Zustände des realen Systems nötig. (3) Die fortgeschrittenen Technologien werden verwendet, um die Leistung des DTs zu verbessern. So können durch KI-Anwendungen die Effizienz der Vorhersagen verbessert werden (Fang et al., 2022).

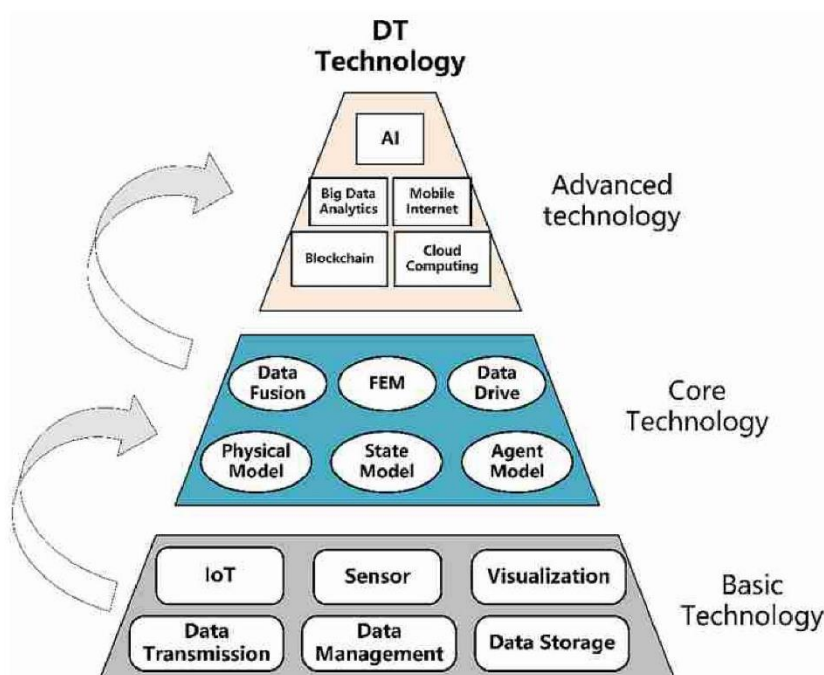


Abbildung 14: Technologiepyramide von digitalen Zwillingen (Fang et al., 2022, S. 4303)

## 4.1 Basistechnologien

Zur Erstellung eines DTs mit grundlegenden Funktionen werden die Basistechnologien benötigt. Im Folgenden werden die nach Fang et al. (2022) definierten grundlegenden Technologien genauer erläutert.

### 4.1.1 Sensoren und Messsysteme

Das Kernstück jedes DTs sind die gesammelten und gespeicherten Daten, welche Grundlage für die Darstellung des physischen Bauwerks im Virtuellen sind. Auf der Basis dieser Daten werden Entscheidungen getroffen (Fang et al., 2022). Die Erfassung der Daten im Straßenbau erfolgt mit herkömmlichen Messsystemen, wie Lasermessungen zur Messung der Längs- und Querebenheit, sowie mithilfe von mechanischen Messsystemen zur Messung der Griffigkeit (BASt, 2022b). Eine weitere Möglichkeit zur Datenerfassung stellen Sensoren da, welche zum Beispiel an Brücken angebracht werden können (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 26). Durch methodisches Vorgehen und ein festgelegtes Monitoringkonzept können kontinuierlich Zustandsdaten der Bauwerke erfasst werden, welche als Ergänzung zu den periodisch durchgeführten Brückenprüfungen die Datengrundlage und Zuverlässigkeit erhöhen (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 72). Nach einem gut geplanten Monitoringkonzept ist die Wahl der Sensoren entscheidend. Abhängig von den zu bestimmenden Messgrößen können verschieden Arten von Sensoren eingesetzt werden; so können zur Bestimmung von Verformungen Wegsensoren und Laserbestandssensoren zur Bestimmung der Durchbiegungen (Siegert, Holst, Empelmann & Budelmann, 2015, S. 42) verwendet werden. In vielen Studien werden nach (Boje, Guerriero, Kubicki & Rezgui, 2020) Sensoren als Quellen von Echtzeitzustandsdaten genannt. In diesen Studien werden keine genauen Angaben zu Sensorintegration und -typen gemacht. Boje et al. (2020) benennt als weitere Herausforderung die Einbindung der unterschiedlichen Sensormessergebnisse, die sich in Genauigkeit, Frequenz und Datentyp unterscheiden.

### 4.1.2 Datenübertragungstechnologien

Die von den Sensoren und Messsystemen gemessenen Daten müssen im Anschluss in Analysetools verarbeitet und an den DT übermittelt werden. Die relevanten Daten unterscheiden sich in Datenformat, Änderungsrate und Quelle (Fang et al., 2022). Die Übertragung der Daten basiert zum einen auf der Verwendung von geeigneten

Datenformaten und der Datenübertragungsmethode. Es werden verschiedene Möglichkeiten der Datenübertragung im Zusammenhang des DTs genannt. Das Internet of Things wird als eine mögliche Übertragungsart von Sensordaten genannt (Boje et al., 2020).

### 4.1.3 Internet of Things

Das Internet of Things (IoT) ist eine Erweiterung des Internets (Fang et al., 2022). Die Verknüpfung zwischen den physischen Sensoren und dem virtuellen DT durch das IoT liefert die Möglichkeit, Daten in Echtzeit auszutauschen (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 9), um das Verhalten des physischen Zwillings darzustellen und zu analysieren (Madni et al., 2019). Diese Technologie ist eine Basistechnologie für die Implementierung von DTs (Fang et al., 2022). Eine Kombination von Sensordaten mit KI-Analysemethoden kann die Ergebnisse des Wartungsmanagements verbessern. Die über das IoT übermittelten Daten können durch eine zuverlässige Analyse unterstützend bei Entscheidungen tätig sein (Madni et al., 2019). Eine der Herausforderungen ist die Verbindung zwischen den Sensordaten und Simulationen. Verschiedene Überlegungen wurden in Bezug auf die Verwendung von IoT und DT getätigt. Meist wurden nur Konzepte vorgestellt, ohne konkrete technologische Fragen zu beantworten (Boje et al., 2020).

### 4.1.4 Datenspeicherungs- und Datenmanagementtechnologien

Mit zunehmender Verwendung von Sensoren und Messeinrichtungen zur Echtzeitüberwachung des physischen Zwillings nehmen die Datenmengen und die Datenvielfalt zu. Diese Daten müssen innerhalb kurzer Zeit analysiert und verarbeitet werden, um eine Echtzeitanalyse zu erhalten. Des Weiteren spiegeln die Daten den Zustand von kritischen Infrastrukturbauwerken wieder, weswegen an die Speicherung der Daten hohe Schutzanforderungen gestellt werden (Fang et al., 2022). Diese Datenmengen werden als „Big Data“ bezeichnet und sind ein wichtiger Teil eines DTs (Qi & Tao, 2018). Ohne „Big-Data“ wären viele Funktionen des DTs nicht möglich (Qi & Tao, 2018). „Big Data“ wird oft durch die vier „V“ beschrieben. Die „Vs“ beschreiben charakteristische Merkmale von Big Data, sie besitzen ein großes Volumen, variieren in Datentypen und -formaten (Varianz). Das dritte „V“ beschreibt die Geschwindigkeit (velocity) mit der die Daten generiert werden. Das vierte „V“ bezieht sich auf die Zuverlässigkeit (veracity) der Daten (Syafudin, Alfian, Fitriyani & Rhee, 2018). Der Begriff ist trotz dieser vier „V“ nicht eindeutig definierbar. Er kann zum einen zu der

Beschreibung einer großen, unstrukturierten, aus verschiedenen Quellen stammenden Datenmenge, welche nur mit einem großen Zeitaufwand analysierbar und schwer zu speichern ist, verwendet werden. Zum anderen kann er auf Datenebene eine sehr große Datenmenge, welche auf Grund ihres Umfangs mit standardmäßigen Datentools nicht verarbeitet, gespeichert und analysiert werden kann, beschreiben. Aus Sicht des Benutzers liegt der Fokus von „Big-Data“ auf dem Wert, der durch diese generiert werden kann (Qi & Tao, 2018).

Der Umgang mit der großen Menge an unterschiedlichen, unstrukturierten Daten ermöglicht es den Zustand des physischen Zwillings genau abzubilden. Die Daten können in zukünftigen Szenarien zum Trainieren von ML-Algorithmen und für daraus resultierenden Vorhersagen genutzt werden (Boje et al., 2020). Für die Integration dieser Daten gibt es verschiedene Varianten: Zum einen können die geometrischen und semantischen Daten durch den Embedded-Data-Ansatz direkt in dem digitalen Modell des DTs gespeichert werden. Die Wahl der Datenintegration ist abhängig von den zu integrierenden Daten. Liegen Daten aus unterschiedlichen Quellen mit einer hohen Änderungsrate, großer Komplexität und Heterogenität vor, können die Daten durch den Linked-Data-Ansatz in den DT integriert werden (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 56)

#### 4.1.5 Visualisierung

Neben dem Sammeln und Speichern der Daten stellt die Visualisierung der Ergebnisse einen wichtigen Bestandteil des DTs dar. Die Visualisierungstechnik unterstützt den Benutzer dabei, die Ergebnisse richtig zu erfassen und zu bewerten. Für die Darstellung der Informationen können verschiedene Visualisierungstechniken verwendet werden. Es können 2D-Darstellungen in Form von Tabellen, Diagrammen und Graphen verwendet werden. In diesen lassen sich Zusammenhänge zwischen den Daten darstellen. Die 3D-Darstellung der Daten durch virtuelle Reality (VR) ermöglicht es, die Ergebnisse interaktiv zu betrachten (Fang et al., 2022). Verschiedene Zustandsdaten können zur Visualisierung auch graphisch im virtuellen Modell durch Verlinkung der Messergebnisse dargestellt werden (Biswas et al., 2021). Meist können die Technologien wie IoT oder die Analysesoftware bereits die Daten visuell darstellen und es muss keine getrennte Visualisierung implementiert werden (Ala-Laurinaho, 2019).

## 4.2 Kerntechnologien von DTs

Zu den Kerntechnologien eines DTs nach Fang et al. (2022) zählen Technologien, die für die Erstellung des virtuellen Modells und für die Simulation von Zuständen verwendet werden. Diese Technologien sind für die Funktionsfähigkeit eines DTs wichtig (Fang et al., 2022). Zur Erstellung des virtuellen Modells können verschiedene Methoden verwendet werden.

### 4.2.1 Modellerstellung

Neben dem realen System ist das virtuelle Abbild ein wichtiger Bestandteil eines DTs (Fang et al., 2022). Abhängig von der Verwendung und des Bauwerktyps können unterschiedliche Anforderungen an den LOD des Modells gestellt werden. Mit steigendem LOD muss das virtuelle Modell eine höhere geometrische Genauigkeit sowie genauere Daten zum Zustand des Bauwerks abbilden (Shim, Dang, Lon & Jeon, 2019). Es können bestehende parametrische BIM-Modelle, die während dem Planungs- und Bauprozess erstellt wurden, verwendet werden. Für Bestandsbauwerke können Modelle durch verschiedene Methoden erstellt werden. Sie können auf Grundlage von Scan-Punktwolken automatisch generiert werden oder zeitaufwendiger manuell erstellt werden (Gao et al., 2021). Im Folgenden werden Möglichkeiten zur Erstellung der virtuellen Modelle für die verschiedenen Bauwerke dargestellt.

#### Brücken

Bei Bestandsbrücken sind keine 3D-Planungsmodelle verfügbar. Diese können aber auf Basis der 2D-CAD Zeichnungen manuell nachmodelliert werden (Bednorz, Hinderstmann, Jäger & Marszalik, 2020). Bei der Nachmodellierung müssen alle Objekte mit einer eindeutigen GUID bezeichnet werden, um Schäden eindeutig an Bauteilen verorten zu können (Shim et al., 2019). Eine weitere Option ist die Erstellung von 3D-Modellen auf Grundlage von Oberflächenscans der Bauwerke. Die erstellten Punktwolken sind die Basis für eine exakte Nachmodellierung der Bauteilabmessungen in einem CAD-Programm (Bednorz et al., 2020; Mischo, Seifried, Thiele, Schanzenbach & Grassl, 2019). Eine weitere Verwendung ist die Überlagerung der Scan-Punktwolke mit einem parametrischen 3D-Modell. Es lassen sich Oberflächentexturen, Ungenauigkeiten und erste Schadensfälle ableiten (Shim et al., 2019). Eine voll automatisierte, exakte Erstellung von 3D-Modellen, wie es in der Produktionsindustrie möglich ist, ist in der Bauindustrie nicht möglich. Jedes Bauwerk ist ein Unikat und besteht aus vielen einzelnen Komponenten, wodurch der Unterschied zu groß ist, um eine vollständig



automatische Erstellung zu entwickeln (Davila Delgado & Oyedele, 2021). Im Forschungsprojekt zur (teil-) automatischen Erstellung von BIM-Modellen für Straßenbrücken soll ein Work-Flow entwickelt werden, um auf Grundlage von Bauwerksscans und Bestandsdaten BIM-Bestandsmodelle zu erstellen. Dadurch soll der Aufwand zur bisherigen Modellerstellung reduziert werden. Durch die Verknüpfung der beiden Technologien sollen korrekte geometrische und semantische Modelle erstellt werden (Hajdin et al., 2022, S. 11).

## Straßen

Ein DT, der zur Abbildung einer Straße verwendet wird, beinhaltet auch ein digitales Abbild der Straße. Dieses kann wie das Modell einer Brücke aus dem Planungsmodell eines Neubauprojektes bestehen und enthält Informationen zum Aufbau, den Materialien und der Trassierung. Das Modell für bestehende Straßenzüge kann wie bei Brücken durch verschiedenen Methoden generiert werden: So kann der Straßenkörper in einer BIM-Software auf Basis eines 3D-Geländemodells und der 2D-Bestandspläne nachmodelliert werden. Verschiedene Forschungen beschäftigen sich auch mit der Erstellung von 3D-BIM Modellen auf Grundlage von LiDAR Scans. (Barazzetti, Previtali & Scaioni, 2020) stellten einen Workflow vor, durch den auf Grundlage von LiDAR Daten und OpenStreetMAP-Daten Straßen, Vegetation und Gebäude als BIM Objekte dargestellt werden. Weiter Forschungen beschäftigen sich mit der Erkennung und Analyse des Zustandes von Fahrbahnmarkierungen (Soilán, González-Aguilera, del-Campo-Sánchez, Hernández-López & Del Pozo, 2022) und der Extraktion von Straßenschildern aus LiDAR Punktwolken (Ma et al., 2018). LiDAR ist das Akronym für Light Detection and Ranging und ist eine Laserscan-Technologie, mit der Informationen über Objekte gesammelt werden (Gargoum & El-Basyouny, 2017). Im Vergleich zu optischen Methoden können Grenzen zwischen Boden und Straßenoberfläche nicht exakt unterschieden werden. Das Messsystem reagiert mit geringer Empfindlichkeit auf Verdeckungen in Folge von Schattenwürfen (Barazzetti et al., 2020).



### 4.2.2 Datenfusion

Die Datenbasis eines DTs setzt sich aus verschiedenen Daten zusammen, die sich zum Teil durch ihre Einheit, den Datenursprung und den Entstehungszeitpunkt unterscheiden (Fang et al., 2022). Die Daten- und Informationsfusion ist eine Schlüsseltechnologie des DTs, um die Transformation von rohen Sensordaten zu gut verwendbaren Informationen zu ermöglichen. Die Daten- und Informationsfusion beschreibt eine Technik, mit deren Hilfe Daten aus unterschiedlichen Quellen mit unterschiedlichem Alter automatisch oder halbautomatisch umgewandelt werden, um als Unterstützung für menschliche Entscheidungen zu dienen (Z. Liu, Meyendorf & Mrad, 2018). Smith (2006, S. 316–318) hat das Datenfusionsmodell von Steinberg & Bowman, C, L (2001) auf den Bereich des Straßenbaus angepasst. Das Modell beschreibt die Verarbeitung der Daten über vier Level und die mögliche Nutzung der Ergebnisse. Level 0 beschreibt dabei die Schätzung des Signalzustandes - konkret die Verarbeitung und Verbesserung des Signales, um es im späteren Verlauf auswerten zu können. Beim Level 1 werden Daten aus mehreren Quellen verwendet, um den Zustand eines Objektes zu beschreiben. So werden Risse auf der Straßenoberfläche zum einen durch eine optische Begutachtung und durch Messsysteme lokalisiert. Level 2 beschreibt die Zustandsabschätzung auf Grundlage von fusionierten Daten aus verschiedenen Quellen und die daraus abgeleiteten Zustandswerte. Im Level 3 werden die Daten fusioniert und zur Vorhersage von möglichen Schäden auf Grundlage von Risikoanalysen und Abschätzung von Auswirkungen verwendet (Smith, 2006, S. 316–318).

### 4.3 Fortgeschrittene Technologien

Mit fortschreitender Forschung an neuen Technologien können diese auch zur Optimierung der Leistung, Sicherheit und Zuverlässigkeit von DTs beitragen. Die Technologien sind Erweiterungen des DTs, um die Funktionen zu verbessern, wie zum Beispiel ML und Blockchain (Fang et al., 2022).

#### 4.3.1 Cloud Computing

Mit steigendem Umfang der zu verarbeitenden Daten steigt die Belastung des Computersystems und infolge dessen auch die Verarbeitungszeit (Mahamadu, Mahdjoubi & Booth, 2013). Cloud Computing ermöglicht eine flexible IT-Infrastruktur (Celik Y. et al., 2021), wodurch Analysen auf verschiedene Analyseprozesse verteilt werden können. Somit reduziert sich die Verarbeitungszeit und die Leistungen des Systems kann gesteigert werden (Fang et al., 2022).

Für die Anwendung der Technik beim DT müssen drahtlose Übertragungstechnologien zwischen den Sensoren und Messsystemen entwickelt werden. Neben Cloud Computing, welches einen zentralen Analyseansatz verfolgt, kann die Datenverarbeitung auch in direkter Sensornähe geschehen (Fang et al., 2022).

Mit steigender Anwendung der Technik rückt die Datensicherheit in den Fokus. Die Speicherung und Verarbeitung der Daten birgt Anfälligkeiten für Viren, physische Angriffe und Hackerangriffe. Neben diese Risiken müssen die Auswirkungen von Datenverlust und Insolvenz rechtlich geklärt werden. Dies sind einige der Herausforderungen, die vor der Verwendung von Cloud Computing abgewogen werden müssen (Mahamadu et al., 2013).

#### 4.3.2 Blockchain (BC)

Das virtuelle System wird kontinuierlich durch die Ergebnisse der Sensormessungen geupdatet und aktualisiert. Die dadurch erhaltenen Lebenszyklusdaten stellen ein wichtiges Element des DTs dar, müssen gespeichert und versioniert werden und immer verfügbar sein (Huang, Wang, Yan & Fang, 2020). Die Zuverlässigkeit und Richtigkeit der Daten sind eine wichtige Herausforderung; nur auf Grundlage von vertrauenswürdigen Daten können gute Entscheidungen getroffen werden. Die Blockchain Technologie (BCT) bietet die Möglichkeit die Daten dezentral und eindeutig zu speichern, wodurch sie für eine mögliche Verwendung mit DTs geeignet ist (Raj, 2021).

Der Begriff Blockchain beschreibt ein Verzeichnis für digitale Transaktionen. Diese Transaktionen sind im Vergleich zu den meisten Datenbanken nicht zentral, sondern dezentral gespeichert und werden durch mehrere Personen verwaltet. Alle zehn Minuten werden die Transaktionen in kleine Blöcke geteilt und ausgetauscht (Kinnaird C. & Geipel M., 2017, S. 12). Diese Blöcke enthalten einen kryptografischen Hash des Vorgängerblockes und sind mit einem Zeitstempel versehen. Dadurch entsteht eine Abfolge von Blöcken (Lee, Lee, Masoud, Krishnan & Li, 2021). Den gespeicherten Blöcken können nur neue Informationen hinzugefügt werden; bestehende Informationen in den Blöcken können nachträglich nicht geändert werden. Dies wäre nur durch das Verändern der vorangegangenen Blöcke möglich (Kinnaird C. & Geipel M., 2017, S. 12). Die BCT kann in verschiedenen Gebieten Anwendung finden. Darunter sind die Bereiche der Lieferkettenidentifizierung, der Medizin und des Finanzwesens (Perera, Nanayakkara, Rodrigo, Senaratne & Weinand, 2020, S. 30–34). Eine mögliche Anwendung der BCT sowohl im Asset Management von Bauwerken wie auch in der Planung von Bauwerken wird von Perera et al. (2020, S. 35–39) analysiert. Kinnaird C. & Geipel M. (2017, S. 42–43) beschreibt eine mögliche Anwendung der BCT im Bereich BIM. Die Technologie ermöglicht eine nachvollziehbare und endgültige Aufzeichnung der Modelländerungen während der Planung. Werden im Verlauf des Projektes Informationen ausgetauscht, schafft die Aufzeichnung durch die BCT Transparenz und kann das Vertrauen in die Daten erhöhen. BCT ermöglicht es außerdem, den Anspruch der Beteiligten auf ihr geistiges Eigentum geltend zu machen (Kinnaird C. & Geipel M., 2017, S. 42–43).

Als Grundlage für eine mögliche Anwendung der BCT für DT wurden von Teisserenc & Sepasgozar (2021) wichtige Herausforderungen, die die Einführung beeinflussen, analysiert. Diese können in verschiedene Bereiche gegliedert werden. Einige politische Herausforderungen sind unsichere Vorschriften, das Fehlen von Vertragsmodellen und unzureichende Aufsichtsinstrumente. Neben den politischen Herausforderungen gibt es zum Beispiel noch wirtschaftliche, gesellschaftliche, technologische und ökologische Herausforderungen. Weitere Forschungen können in den Themenbereichen Skalierbarkeit, Energieeffizienz und Rechenanforderungen erfolgen (Teisserenc & Sepasgozar, 2021). Die Blockchain ist nicht als Datenspeicher konzipiert; große Datenmengen brauchen lange zum Speichern und Aktualisieren. Dadurch eignet sich die Blockchain nach Lee et al. (2021) nur zur Speicherung von wichtigen Daten, die unerlässlich für die Zusammenarbeit und die Funktion des DTs sind. Lee et al. (2021) hat

ein DT- und Blockchain-Framework entwickelt, um wichtige projektbezogenen Daten nachvollziehbar und unveränderlich weiterzugeben.

### 4.3.3 Künstliche Intelligenz (KI)

In der Literatur wird künstliche Intelligenz (KI) als Bestandteil eines hochentwickelten DTs genannt, welches es dem DT ermöglicht auf Basis der gesammelten Daten Vorhersagen, Optimierungen und Entscheidungen zu formulieren (Madni et al., 2019). Für einfache Anwendungen kann ein DT die durch Sensoren gesammelten Ergebnisse durch eine Visualisierung bereitstellen, ohne dass die Daten mittels KI-Technologien verarbeitet wurden. Bei den meisten Anwendungen eines DT fließen verschiedenen Daten in die Entscheidungsfindung ein. Für diese Anwendungen können KI-Technologien die Daten analysieren und verarbeiten, um einen Mehrwert aus den Daten zu generieren (Hakdaoui, Emran & Oumghar, 2020).

Der Begriff KI umfasst im Zusammenhang mit der Bauindustrie ein breites Themenfeld an Technologien. Zum Themenfeld KI werden folgende Bereiche gezählt: Machine Learning (ML), Computer Vision (Bildererkennung), Robotik und automatische Planung und Terminierung (Abioye et al., 2021). Es gibt einige Herausforderungen, die für die noch nicht weit verbreitete Einführung von KI verantwortlich sind. Darunter zählen kulturelle Barrieren, Mangel an Vertrauen, Bedenken bezüglich der Sicherheit und hohe Investitionskosten (Abioye et al., 2021). Die Hauptkomponenten von KI sind das selbstständige Lernen, die Wiedergabe von Fakten, das Planen, Handeln, Kommunizieren und die Wahrnehmung (Syafrudin et al., 2018)

#### Machine Learning (ML)

ML ist eine Technologie, die sich mit dem Entwickeln von Computerprogrammen befasst. Auf Grundlage von Lebenszyklusdaten, vorangegangenen Erfahrungen sowie statistischer Verfahren können mit Hilfe von ML Abläufe gesteuert und Entscheidungen getroffen werden (Syafrudin et al., 2018). Die Grundlage eines guten Straßenerhaltungsmanagements ist eine umfangreiche Datenbasis, die es ermöglicht in Kombination mit ML-Algorithmen Zustandsveränderungen zu prognostizieren (Chen K., Torbaghan M., Chu M., Zhang L. & Garcia-Hernández A., 2021). Die Technik bietet ein großes Potential, um Fehler zu erkennen und Zustandsvorhersagen zu treffen (Syafrudin et al., 2018). Die durch Sensoren kontinuierlich gesammelten Daten können nützliche Informationen zum Zustand und Entwicklung der Straße liefern und ein besseres Verständnis der Schadensmechanismen schaffen. Der Ansatz des ML

ermöglicht mit hoher Genauigkeit eine verbesserte Vorhersage der Entwicklung des Straßenzustandes (Chen K. et al., 2021).

Mit steigender Komplexität der Zusammenhänge der Messgrößen verbessert sich die Leistung der Analyse durch die Verwendung von ML-Algorithmen. ML hilft dabei, Muster in den Datenströmen zu erkennen und diese nutzbar zu machen. Die Daten können in Echtzeit mit geringem personellen Aufwand analysiert werden, was zu einer Zeit- und Kosteneinsparung führt (Madni et al., 2019). Aktuelle Forschungen zu der Anwendung von ML in der Analyse und Vorhersage von Straßenzustandsdaten wurden von Chen K. et al. (2021) analysiert. Keiner der von Chen K. et al. (2021) analysierten ML-Algorithmen wurde im Kontext von DTs verwendet. Die ML-Algorithmen und KIs, welche noch nicht im praktischen Kontext des DTs verwendet wurden, bieten die Möglichkeit durch das Lösen komplexer Problem das Erhaltungsmanagement zu verbessern (Chen K. et al., 2021). Die Technologien können nicht nur für die Analyse der Zustandsentwicklung und Qualität von Straßen verwendet werden, sondern auch für die Analyse von Zustandsdaten von Brücken. Von Naraniecki, Hartung, Marx & Klemt-Albert (2022) wurde ein ML-Algorithmus auf die Inspektionsergebnisse, Schadensklassen und Zustandsnoten von Bahnbrücken angewandt. Mit Hilfe dieses Algorithmus wurden Zustandsverläufe von Brücken unter verschiedenen Schadensentwicklungen vorhergesagt. Die ML-Algorithmen stoßen jedoch bei Ausreißerdaten an die Grenzen der Genauigkeit des Klassifizierungsmodells, wodurch die Leistungsfähigkeit negativ beeinflusst wird (Syafudin et al., 2018).

### Computer Vision

Die Computer Vision ist ein weiterer Teilbereich der künstlichen Intelligenz. Die Technologie ist eine Kombination aus verschiedenen Fachbereichen. Ziel ist es mit Hilfe von verschiedenen Technologien das menschliche Sehen und die Entscheidungsfindung nachzuahmen (Abioye et al., 2021). Zu diesem Zweck werden Bilder und Videos gesammelt (Mikko Haavisto, Anne Valkonen, Ville Jurkkola, Antti Hannuksela, 2020). Mit modernsten Algorithmen werden diese Daten verarbeitet und analysiert, wodurch die Ergebnisse als Grundlage für Entscheidungen verwendet werden können (Abioye et al., 2021). Die finnische Transportbehörde hat in einem Pilotprojekt die Verwendung von Computer Vision zur Erkennung von Schlaglöchern angewandt (Mikko Haavisto, Anne Valkonen, Ville Jurkkola, Antti Hannuksela, 2020). Zu diesem Zweck wurden Smartphones in Postwägen installiert, die damit das Straßennetz aufzeichneten. Die dadurch gewonnenen Daten dienen sowohl als Trainings- als auch als Analysedaten.

Die Ergebnisse wurden mit menschlichen Analyseergebnissen verglichen und es konnte eine Übereinstimmung der Ergebnisse von ungefähr 90 % gemessen werden. Neben dem Erkennen von Schlaglöchern und der Vorhersage von Zustandsgrößen können Computer Vision und ML-Algorithmen auch zur Identifikation von Rissen in der Straßenoberfläche verwendet werden. Die Anwendung der Technologien auf die Zustandsdaten von Straßen bringt viele Vorteile. Zu diesem Zweck wurden von Peraka & Biligiri (2020) verschiedene Forschungen zu den Themen analysiert und zusammengefasst.

## 5 Datenmodellierung

An der Planung und dem Bau von Ingenieurbauwerken sind verschiedene Fachdisziplinen beteiligt. Durch diese Unterteilung liegt der Fokus in der Bauindustrie auf einer guten Interoperabilität zwischen den verschiedenen Softwareprodukten und Disziplinen. Wichtig ist es eine Verbindung von verschiedenen Anwendungsbereichen zu schaffen und bisher ungenutzte Daten zu identifizieren und zu verwenden (Pauwels, Zhang & Lee, 2016). Neben der Verwendung von IFC um Daten zwischen unterschiedlichen Softwareprodukten herstellerneutral auszutauschen, kann auch die Technologie des Semantic Webs im Bereich Architektur, Ingenieurwesen und Bauwesen angewendet werden (Pauwels et al., 2016). Im folgenden Kapitel wird zuerst ein kurzer Überblick über das Format IFC gegeben und im Anschluss die Technologie des Semantic Webs näher erläutert sowie auf das Format ifcOWL eingegangen.

### 5.1 Industry Foundation Classes (IFC)

Vor der Entwicklung des IFC-Formates durch bS gab es Probleme beim Austausch von Daten zwischen verschiedenen Softwareprodukten im Bausektor. Die Ursache war das Fehlen eines einheitlichen Datenformates, wodurch es zu Datenverlusten beim Informationsaustausch kam (Beetz & Borrmann, 2018). BuildingSmart International (bSI) ist eine non Profit Organisation (Beetz, Amann & Borrmann, 2018) und begann in dem Jahr 1996 (König et al., S. 58) das Industry Foundation Classes (IFC) Format als offenen Datenstandard zu entwickeln, um Bauwerksdaten über den gesamten Lebenszyklus zwischen verschiedenen Softwareprodukten austauschen zu können. Das IFC-Format hat sich als Standard zum Austausch von Bauwerksdaten etabliert und ermöglicht eine gute Zusammenarbeit zwischen verschiedene BIM Softwareprodukten von unterschiedlichen Herstellern (Borrmann et al., 2021, S. 143). Das IFC-Datenmodell ermöglicht es Bauwerke nach objektorientierten Paradigmen genau zu beschreiben. Es findet eine konkrete Trennung zwischen geometrischen und semantischen Informationen statt (Beetz et al., 2018). Der Umfang des Datenmodells hat sich seit Beginn der Entwicklung deutlich vergrößert; es umfasste zum aktuellen Zeitpunkt mehr als 700 Klassen und Attribute. Trotz des großen Datenmodellumfangs beschreibt das IFC Modell nur Teile des Bausektor; es konzentriert sich zu großen Teilen auf den Bereich des Hochbaus (Beetz & Borrmann, 2018; Beetz et al., 2018). Seit 2010 gibt

es seitens bS Bemühungen das IFC-Format an die Bedürfnisse des Infrastrukturbereichs anzupassen (Beetz et al., 2018). Diese Erweiterungen werden jedoch nicht alle Bereiche des Verkehrswesens abdecken können. So wird es dadurch nicht möglich sein, Unfalldaten zu beschreiben. Ein Datenmodell wird nie alle Aspekte eines Themenbereiches beschreiben können (Beetz & Borrmann, 2018).

### 5.1.1 IFC Alignment

Das IFC Alignment Projekt wurde in der Version 4.1 des IFC Modells umgesetzt (Beetz et al., 2018) und stellt die Grundlagen für die spätere Entwicklung der IFC-Road, IFC-Railway und IFC-Bridge Erweiterungen dar (Beetz & Borrmann, 2018). Das Format entstand in Zusammenarbeit mit verschiedenen Verkehrsverwaltungen sowie dem bS InfraRoom (König et al., S. 60). Ziel der Entwicklung war es, ein Format zum Austausch von Trassierungsdaten über den gesamten Lebenszyklus der Trasse zu schaffen, Bestandsdaten zwischen verschiedenen Softwareprodukten auszutauschen und diese nach Projektabschluss zu archivieren. Zusätzlich sollten noch weitere Informationen mit den Trassierungsdaten verknüpft werden (König et al., S. 61).

Durch das Modell können Trassenverläufe von Straßen und Schienen beschrieben werden. Dazu werden die Trassen vergleichbar zu der Trassenbeschreibung durch das OKSTRA-Modell in den Höhenplan (IfcAlignment2DVertical) und Lageplan (IfcAlignment2DHorizontal) unterteilt und beschrieben (Beetz et al., 2018). Im Lageplan wird die Trasse durch die Standardtrassierungselemente Kreisbogen, Gerade und Klothoide beschrieben (Amann & Borrmann, 2015).

### 5.1.2 IFC-Road

Aufbauend auf den Ergebnissen des IFC Alignment- und IFC-Bridge-Standards erweiterte bS das IFC-Format um den IFC-Road- und IFC-Rail-Teil. Die Erweiterung, um den IFC-Road und IFC-Rail- Standard soll es ermöglichen, Planungs-, Bau- und Erhaltungsdaten von Infrastrukturprojekten über eine offene herstellerneutrale Software-schnittstelle auszutauschen (Borrmann, Esser, Jaud, König & Liebich, 2020b). Die Erweiterung des IFC-Standards soll die Darstellung der verschiedenen Koordinatensystemdarstellungen, den Austausch von räumlichen Straßenelementen und die Modellierung von Straßenobjekten verbessern (Ait-Lamallam et al., 2021). Der entwickelte IFC-Road Standard befindet sich noch in der Validierungsphase. In dieser Phase wird der Standard von verschiedenen Softwareherstellern und Experten auf Fehler analysiert. Dies ermöglicht ein frühes Erkennen von möglichen Umsetzungsschwierigkeiten



(Borrmann, Esser, Jaud, König & Liebich, 2020a, S. 18). Im Rahmen der Validierungsphase konnte mithilfe von prototypischer Implementierung bereits gezeigt werden, dass mit Hilfe von IFC 4.3 deutsche Straßenprojekte sehr gut dargestellt und über die offenen Schnittstellen ausgetauscht werden können (Borrmann et al., 2020b). Eine für das Erhaltungsmanagement in Deutschland wichtige Funktion wird durch das IFC-Road Projekt unterstützt: Liegt eine 3D-Planung mit Schichtaufbau der Messtrecke vor, können die durch die Darstellung mittels Abschnitten (ifcFacilityPart) dargestellten Messabschnitte durch ifcPropertySets mit den gemessenen ZEB-Merkmalen versehen werden. Zusätzlich kann durch Anfügen von weiteren Metadaten die Informationsdichte erhöht werden (Borrmann et al., 2020a).

## 5.2 Semantic Web

Die Entwicklung des World Wide Web (WWW) hat den Zugriff auf Dokumente und Informationen verändert. Es ist möglich global und ohne Barrieren Informationen und Wissen auszutauschen. Die im WWW veröffentlichten Daten werden zum Großteil als Rohdatenauszüge in Datenformaten wie CSV, XML oder als HTML-Tabellen dargestellt. Durch die Verwendung dieser Datenformate wird ein Teil ihrer Semantik und Struktur nicht genutzt (Bizer, Heath & Berners-Lee, 2009). Bisher sind die Informationen im WWW durch die gewählte Darstellung nur von Menschen lesbar und interpretierbar. Die gängigen Suchmaschinen ermöglichen eine gewisse Filterung der Informationen. Dies wird durch die Suche und Lokalisierung von Zeichenketten in Texten ermöglicht. Möchte man Informationen strukturiert sammeln und aufbereiten, so wäre die Nutzung von künstlicher Intelligenz denkbar, welche die Aufgabe übernehmen würden, Informationen zu filtern und in maschinenlesbare Formate zu übertragen (Hitzler, Kröttsch, Rudolph & Sure, 2008, S. 9–13).

### 5.2.1 Semantic Web – Allgemeiner Überblick

Im Verlauf eines Bauprojektes und der späteren Erhaltungsphase müssen viele Informationen aus verschiedenen Quellen und Datenformaten (z.B. BIM, GIS und ZEB) zusammengeführt und dargestellt werden. Der Fokus liegt auf der Kombination von Daten und Technologien, die dies unterstützen.

Die Technologie des Semanti-Webs ermöglicht es, Informationen in Graphen zu strukturieren und darzustellen (Pauwels et al., 2016). Kernstück des Semantic Web ist die Sprache RDF, mit der es möglich ist, Informationen aus verschiedenen Quellen darzustellen und zu kombinieren (Pauwels et al., 2016).

Das Semantic Web stellt eine Erweiterung des WWW dar und basiert auf der Anwendung standardisierter Beschreibungen von Inhalten, Dokumenten und Prozessen (Hitzler et al., 2008, S. 1). W3C (W3C, 2015b) beschreibt das Ziel des Semantic Webs als Möglichkeit, Informationen und Daten strukturiert darzustellen und zu speichern und diese sowohl Menschen als auch Maschinen lesbar und interpretierbar zugänglich zu machen. Das Kernstück des Semantic Webs sind die gespeicherten, strukturierten Daten und deren Beziehungen zueinander. Aufgrund dieser Verbindung können die Datensätze auch als Linked Data bezeichnet werden (W3C, 2015a). Vergleicht man die Verlinkung von Informationen des WWW mit der Verbindung im Semantic Web, so verwendet das WWW Hyperlinks, um auf andere Informationen zu verweisen, wohingegen beim Semantic Web Links verwendet werden, die mit einer zusätzlichen Bedeutung versehen sind (Borrmann et al., 2021, S. 224). Beim Semantic Web steht die Überlegung im Vordergrund, die Informationen von Beginn an strukturiert und maschinenlesbar zu speichern (Hitzler et al., 2008, S. 9–13). Menschen ist es möglich den Hyperlinks im Internet zu folgen, Maschinen benötigen dazu ein semantisches Netz aus Daten (Borrmann et al., 2021, S. 224). Um dies zu erreichen, ist es nötig, Informationen in offenen Standards darzustellen, die es ermöglichen zwischen verschiedenen Plattformen und Anwendern Informationen auszutauschen und zu verlinken. Zusätzlich müssen die offenen Standards flexibel gehalten werden, um kontinuierlich an die Anforderungen angepasst werden zu können (Hitzler et al., 2008, S. 9–13). Die Sprachen und Technologien, wodurch die den Daten in Standardformaten zur Verfügung gestellt und verwaltet werden (W3C, 2015a, 2015b), können im Semantic Web Stack zusammengefasst werden.

### 5.2.2 Semantic Web Stack

Der Semantic Web Stack beschreibt die Architektur des Semantic Webs und beinhaltet die Technologien, welche es ermöglichen, Datensätze zu verbinden und Beziehungen zwischen Daten darzustellen. Während des Entwurfes und der Implementierung eines Informationssystems nimmt die Entwicklung der Systemarchitektur eine entscheidende Rolle ein. Die Struktur soll die verwendeten Komponenten und die Beziehungen zueinander veranschaulichen (Gerber, van der Merwe & Barnard, 2008). Die bekannteste Architekturversion des Semantic Webs wurden von Berners-Lee veröffentlicht; sie beinhalten nach Gerber et al. (2008) Diskrepanzen und Inkonsistenzen. Die vorgeschlagene Architektur bildet nach Gerber et al. (2008) keine Funktionen ab, sondern

ist nur eine Strukturierung der im Semantic Web verwendeten Sprachen und wird als Stapel oder Schichtkuchen bezeichnet (Gerber et al., 2008).

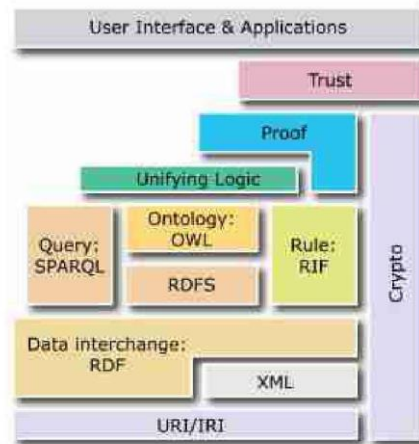


Abbildung 15: W3C - Semantic Web Layer Cake (W3C, 2007)

Der in Abbildung 15 dargestellte Semantic Web Layer Cake wurde 2007 vom W3C veröffentlicht und stellt die Systemstruktur des Semantic Webs dar (W3C, 2007).

Aus der graphischen Darstellung in Abbildung 15 ist zu entnehmen, dass die Technologien aus dem darüberliegenden Layer jeweils eine Erweiterung der darunterliegenden Technologien sind. Die unterste Stufe stellt dabei die URI dar, welche der eindeutigen Identifizierung der Elemente im Semantic Web dient. Der nächste Layer stellt die verwendete Syntax dar; hierfür können XML und RDF verwendet werden. Zur Beschreibung der Semantik werden RDFS verwendet, welche mittels der Web Ontology Language (OWL) um komplexere Beschreibungen erweitert wurde. SPARQL stellt die letzte im Layer Cake abgebildete Sprache dar, welche für Abfragen von RDF-Daten entwickelt wurde (Böhms et al., 2018). Die darüber dargestellten Layer sind keine Sprachen, welche im Zusammenhang mit dem Semantic Web verwendet werden, sondern Funktionen, die erfüllt sein müssen um eine gute Funktionalität zu erhalten. Mit Hilfe von RFD-Graphen werden die Informationen im Semantic Web dargestellt (Pauwels et al., 2016).

### 5.2.3 Resource Description Framework (RDF)

Als Grundstein des Semantic Webs ermöglichen es RDF Daten, Dateninstanzen, Strukturen und deren Beziehungen zu beschreiben und für Maschinen auswertbar darzustellen (Böhms et al., 2018). Im Jahr 1999 veröffentlichte W3C die erste offizielle Spezifikation des Resource Description Framework (RDF) (Hitzler et al., 2008, S. 35). Zu diesem Zeitpunkt wurde RDF für die Abbildung von Web-Ressourcen Metadaten verwendet. Mithilfe von RDF sollten damals Aussagen über die Autoren und die

Lizenzen von Webseiten gemacht werden (Hitzler et al., 2008, S. 35). Die Grundlage der Darstellung von Informationen in RDF ist ein syntaxneutrales Datenmodell, welches als Graph bezeichnet wird (Deutsch, 2007).

#### 5.2.4 RDF-Graph

Die Informationen werden in RDF-Dokumenten durch ein Triple, bestehend aus Subjekt, Prädikat und Objekt, beschreiben (Borrmann et al., 2021, S. 141) und in einem gerichteten Graphen gespeichert (Hitzler et al., 2008, S. 36). Das Subjekt und das Objekt beschreiben dabei Ressourcen und das Prädikat beschreibt die Verbindung der Ressourcen (Bizer et al., 2009). Der gerichtete Graph besteht aus Knoten und gerichteten Kanten, die eindeutig durch eine Benennung identifizierbar sind (Hitzler et al., 2008, S. 36). Jeder Knoten im Graph bildet ein Objekt ab (Pauwels et al., 2016). In Abbildung 16 ist ein Beispiel eines gerichteten Graphens dargestellt.

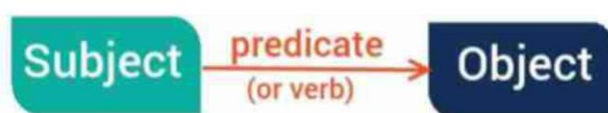


Abbildung 16: RDF-Graph (Böhms et al., 2018)

RDF betrachtet die Beziehungen zwischen zwei Knoten als Ressourcen und weist diesen eine grundlegende Wichtigkeit zu. Durch die Abbildung von Informationen und Beziehungen als Knoten und Kanten können mehrere Einzelgraphen aus verschiedenen Quellen zu einer großen Graphenstruktur zusammengeführt werden. Kombinierte Graphen können die gleichen Informationen mit unterschiedlicher Bezeichnung beinhalten, da für viel Informationen keine einheitliche Benennung vorgegeben ist (Hitzler et al., 2008, S. 36–37). Die Zuweisung einer Uniform Resource Locators (URL) Bezeichnung an alle Knoten und Kanten des Graphen ermöglicht eine eindeutige Identifizierung (Borrmann et al., 2021, S. 141). Die URL ermöglicht es, die Ressourcen nicht nur innerhalb eines Datenmodells zu verknüpfen, sondern diese über Netzwerke und Datengrenzen hinweg zu verknüpfen. Somit können Informationen aus verschiedenen Datenquellen in einem Modell dargestellt werden (Borrmann et al., 2021, S. 225).

### 5.2.5 RDF-Schemas

Durch Verwendung von RDF-Ontologien und Vokabularen kann die semantische Struktur des RDF-Graphen erweitert werden (Pauwels et al., 2016). Das RDF-Schema ist eine formale Semantik für RDF (Hitzler et al., 2008, S. 91) und besteht aus Spezifikationen von Klassen, Unterklassen, Kommentaren und Datentypen (Pauwels et al., 2016). Der Begriff Semantik beschreibt dabei die Wichtigkeit von Informationen oder Daten (Borrmann et al., 2021, S. 53). Grund für die Einführung der Semantik waren Kritiken an der Funktionsweise der RDF-Datenspeicherung. Auf zwei verschiedene RDF-Datenspeicher angewandt, liefert die gleiche Abfrage mit der gleichen Abfragesprache SPARQL unterschiedliche Ergebnisse. Dies lag an der unterschiedlichen Interpretation von Anfragen und wurde erst durch Formalisierung mittels der Semantik behoben (Hitzler et al., 2008, S. 91). Das RDF-Schema erweiterte das Vokabular von RDF, führte neue Klassenbezeichnungen ein (Hitzler et al., 2008, S. 99) und ermöglicht es durch Hierarchien terminologisches Wissen über Klassen und Property zu spezifizieren (Hitzler et al., 2008, S. 86). Aufbauend auf dem RDFS-Konzept ermöglicht die OWL eine komplexere Darstellung der Informationen (Hitzler et al., 2008, S. 125–126), wie zum Beispiel Typenbeschränkungen und komplexe Klassenausdrücke. Die auf Basis des OWL-Konzeptes konstruierten Graphen werden als OWL-Ontologie bezeichnet (Pauwels et al., 2016).

### 5.2.6 Web Ontology Language (OWL)

Die Semantic-Web-Sprache OWL wurde entwickelt, um komplexe Informationen darzustellen. Die Verwendung von OWL ermöglicht es, die dargestellten Informationen von Computern auszuwerten zu lassen (W3C, 2013). Die OWL-Sprache beinhaltet eine Ontologie, wodurch mit einer festgelegten Terminologie Beziehungen zwischen festgelegten Begriffen beschrieben werden (Hesse W., 2005). Mit der OWL-Ontologie können Klassen, ihre Instanzen und Eigenschaften beschrieben werden (W3C, 2004). Verschiedene Communities haben unterschiedliche Anforderungen an die Ausdrucksmöglichkeit der OWL-Sprache. So entwickelten sich drei Untersprachen: Die OWL Lite, OWL DL und OWL Full. Sie stellen jeweils eine Erweiterung ihres Vorgängers dar (W3C, 2004).

### 5.3 ifcOWL

Die Verwendung von IFC zielt darauf ab, Daten zwischen verschiedenen Softwareprodukten und Teilnehmern auszutauschen. In Folge der vermehrten Verwendung der Semantic Web Technologien beginnen verschiedene Initiativen mit der Entwicklung einer Übersetzung des IFC-Schema in eine Ontologiesprache (Terkaj & Šojić, 2015). Diese Entwicklung einer Übersetzung des EXPRESS-Schemas in OWL ermöglicht die Weiterverwendung des IFC-Standards für Baudaten sowie die Nutzung der verschiedenen Semantic Web Vorteile und die Weiternutzung bestehender Softwareprodukte zur Speicherung und Verarbeitung der Daten (Pauwels & Terkaj, 2015).

Für diesen Zweck wurde sowohl von bS als auch von weiteren Forschenden ein EXPRESS- to OWL-Konverter entwickelt. Das entstehende IfcOWL-Schema ermöglicht es, das etablierte IFC-Schemas in OWL darzustellen und somit Gebäude- und Planungsdaten durch das Semantic Web und Linked Data darzustellen. Die in der IFC-Datei enthaltenen Daten werden in einem Graphen im OWL-Format zur Verfügung gestellt, wodurch es möglich ist, weitere Daten aus unterschiedlichen Quellen wie GIS, Sensoren oder Materialdaten zu verlinken. Mit Hilfe von ifcOWL kann ein Netz aus verknüpften Gebäudedaten erstellt werden (buildingSMART International, 2022).

## 6 Internationale Forschungen und Projekte

International wurden verschiedene Forschungsprojekte durchgeführt, welche sich mit dem Thema des Datenaustausches zwischen Planungs-BIM-Modellen von Straßeninfrastrukturbauwerken, Asset-Managementsystemen für die Berechnung von Lifecycle Kosten und der Verbesserung von Instandhaltungsmaßnahmen beschäftigen. Einige der Forschungsprojekte legten zusätzlich noch verstärkt einen Fokus auf die Kooperation zwischen Infrastrukturbehörden benachbarter Länder, wie zum Beispiel das Forschungsprojekt AM4INFRA, welches zum Teil von der Europäischen Union finanziert wurde. Gemeinsame Ziele der Forschungsprojekte und Richtlinien INSPIRE, AM4INFRA und INTERLINK waren eine Standardisierung von Datenformaten und Datenaustauschformaten zur Qualitätsverbesserung und zur Verbesserung der Interoperabilität zwischen verschiedenen Softwareprodukten. Dies geschah in Anlehnung an das offene Datenformat IFC, welches von buildingSmart entwickelt wurde.

### 6.1 INSPIRE

Die INSPIRE-Richtlinie der Europäischen Union soll eine einheitliche Geoinformationsstruktur der europäischen Mitgliedsländer schaffen. Das angestrebte einheitliche Datenformat soll den Austausch von Geo- und Umweltinformationsdaten zwischen den Organisationen des öffentlichen Sektors ermöglichen und den Zugang zu Geoinformationen in Europa vereinfachen. Die Richtlinie umfasst 34 Geodathemen, welche für verschiedene Umweltanwendungen verwendet werden. Die 2007 in Kraft getretene Richtlinie soll von den Mitgliedsstaaten bis 2021 vollständig umgesetzt werden (Europäische Union, 2022b). Dänemark nutzt das INSPIRE-Datenmodell bereits zur Darstellung ihrer Straßengeodaten (Pedersen, 2013).

Die INSPIRE-Richtlinien sollen dabei helfen, dass Informationen nur einmal erfasst und effektiv gespeichert werden. Die Informationen aus verschiedenen Quellen sollen für alle Anwendungen einfach kombiniert werden können, um diese für alle Nutzer transparent zur Verfügung zu stellen (European Commission, 2022b).

Basis der Inhalte und Strukturen der INSPIRE-Geodaten bildet das INSPIRE-Datenmodell. Durch diese werden Themen, wie zum Beispiel „Transport Networks“, beschrieben. Zur Darstellung des Datenmodells wird UML verwendet. Diese wird von einer Arbeitsgruppe entwickelt und zentral verwaltet (European Commission, 2022a).



Die UML ist eine internationale standardisierte Notation, die durch verschiedene Diagrammarten objektorientierte Modelle beschreibt (Borrmann et al., 2021, S. 56–57). Die INSPIRE-Website der Europäischen Union stellt diese Schemadateien zum Download zur Verfügung (Europäische Union, 2022a). Das UML-Modell in Abbildung 17 stellt die Klassenbeziehungen der Transportnetzwerkdaten visuell dar (Europäische Union, 2022b). Die INSPIRE-Richtlinie ist in Deutschland durch das Geodatenzugangsgesetz des Bundes (GeoZG) und bundeslandspezifische Gesetze umgesetzt worden (Landesamt für Digitalisierung).

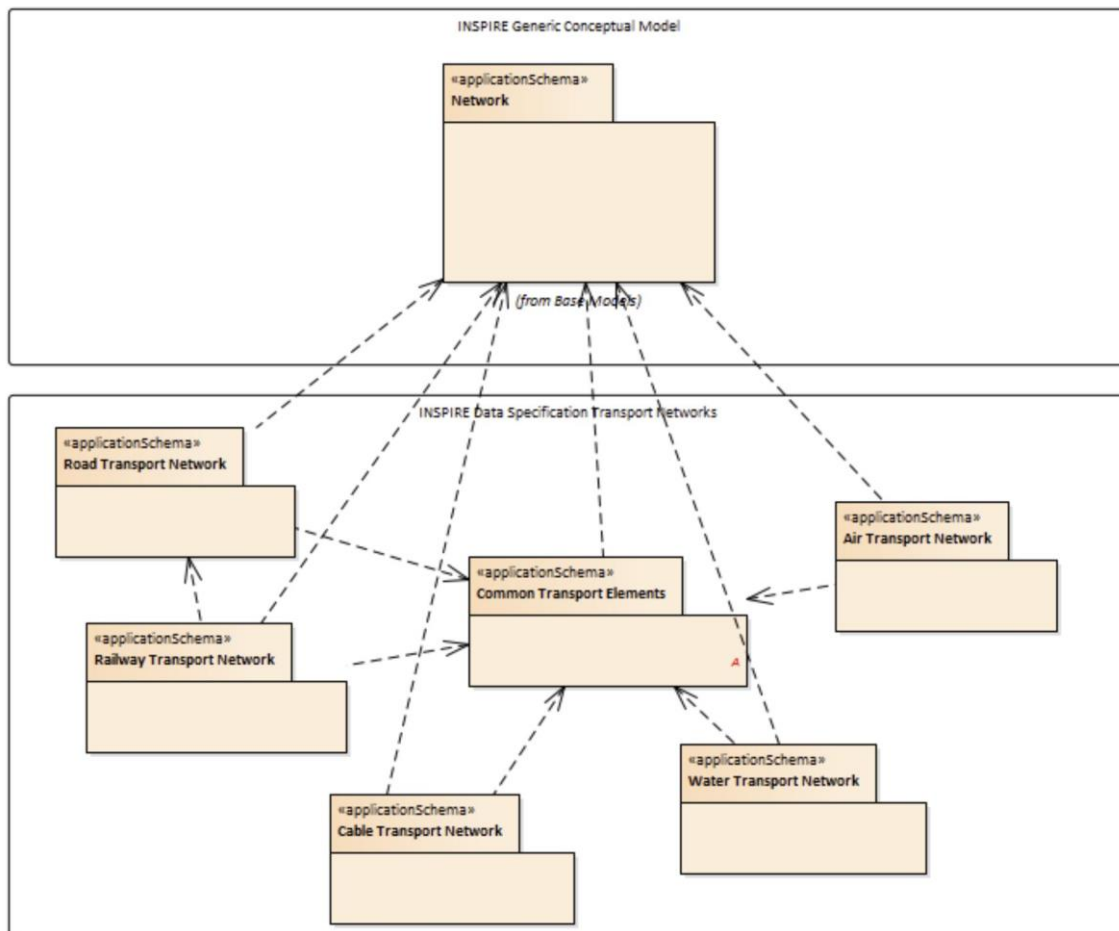


Abbildung 17: UML-Klassendiagramm – Überblick (Europäische Union, 2022a)

## 6.2 AM4INFRA

Das Forschungsprojekt AM4INFRA, welches von der Europäischen Union im Jahr 2016 initiiert wurde, hatte das Ziel, einheitliche Richtlinien und Empfehlungen für das Asset-Management von nationalen Straßenbehörden in Europa zu entwickeln, um eine einheitliche Verwaltung des europäischen Verkehrsraums bis zum Jahr 2050 zu erzielen. Dazu wurden die Erfahrungen von vier nationalen Infrastrukturbehörden,



welche bereits Erfahrungen mit der Implementierung eines funktionierenden Asset-Managementsystems in ihrem Land hatten, gesammelt (*AM4INFRA*).

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Rahmenkonzeptes für die Einführung eines lebenszyklus- und risikobasierten Asset-Managements, welches zu einer effektiveren und nachhaltigeren Verwaltung von Straßeninfrastruktur im europäischen Raum beitragen soll. Das dazu geplante Gesamtkonzept sah drei Hauptelemente vor: die Entwicklung einer gemeinsamen Sprache, die Grundlage einer verbesserten Kommunikation ist, eine gemeinsame Datenverwaltung und gemeinsam genutzte Daten. Diese Leitlinien sollen einen grenzüberschreitenden Austausch von Daten und Informationen ermöglichen und aussagekräftige Kriterien zur Bewertung von Leistungen, Kosten und Risiko bereitstellen. Diese Elemente sollten einen einheitlichen Rahmen bilden, der durch die Verkehrsbehörden im eigenen Ermessen umgesetzt werden kann (*AM4INFRA*).

Im Zuge des Forschungsprojektes wurde eine vereinfachte Struktur zur Anwendung einer Lebenszykluskosten- und Risikoanalyse von Infrastrukturbauwerken erarbeitet (Sinhal, Mbah, Scott & Gibb, 2018). Grundlegende Anforderungen an Art und Umfang von Informationen für verschiedene Assets (Marcovaldi & Biccellari, 2018) wurden anhand von Pilotprojekten erarbeitet. Als wichtiger Punkt des Forschungsprojektes wurde die Notwendigkeit von vollständigen und zuverlässigen Asset-Daten für die Verwaltung und den Betrieb von Straßeninfrastruktur hervorgehoben. Zu diesem Zweck kann ein CDE als einzige Informationsquelle verwendet werden. Als erster Schritt vor der Implementierung einer gemeinsamen Datenumgebung wurde ein Asset Data Dictionary (ADD) entwickelt, in dem die wichtigsten Informationen und zugehörigen Attribute der Assets enthalten sind (Marcovaldi & Biccellari, 2018). Im Anschluss daran wurde in einem Business Blue Print (BBP) eine mögliche IT-Lösung dargestellt, welche als Grundlage für das Asset-Management System dient (Marcovaldi, 2018b). Ziel für das Asset-Managementsystem war die Integration von Kerndaten aus verschiedenen Datenquellen, die Verbesserung der Weitergabe von Asset-Informationen und die Verifizierung der Informationen. Das Managementsystem soll gemäß (Marcovaldi, 2018b) folgende Aufgaben erfüllen: Es soll die Daten der einzelnen Straßenbauverwaltungsbehörden aus deren Asset-Datensystemen in einer Datenquelle zusammenführen. Dazu werden die Daten gemäß dem ADD in ein einheitliches Datenformat überführt und nach einheitlichen Regeln dargestellt. Ein hoher Anspruch wurde an die

Zuverlässigkeit der Daten gestellt, welche zwischen den verschiedenen Behörden ausgetauscht werden sollen (Marcovaldi, 2018b).

Die Daten, welche in dem CDE gespeichert sind, werden durch verschiedene Hierarchien zugänglich gemacht. Sie können nach den Kriterien des Netzwerkes, zum Beispiel Straßen oder Wasserwege, der Benennung des Netzwerkes (z.B. A90), der Station in dem Netzwerk und nach der genauen Asset-ID, gefiltert werden. Anhand dieser Kategorisierung können verschiedene Informationen und Verifizierungszustände abgerufen und in verschiedenen Datenformaten exportiert werden (Marcovaldi, 2018b).

Die theoretisch entwickelten Grundlagen wurden anhand der realen Ringstraße A90, welche die Vororte von Rom verbindet, getestet. Das Projekt wurde erfolgreich abgeschlossen und es wurden folgende Erkenntnisse generiert: Es war möglich, Datensätze aus verschiedenen Datenquellen zusammenzuführen und für die Bewertung auszuwerten. Zusätzlich wurde noch auf mögliche Verbesserungen hingewiesen (Marcovaldi, 2018a).

### 6.3 CoDEC

Das Forschungsprojekt CoDEC startete 2018 mit dem Ziel, ein tieferes Verständnis für die praktische Verwendung von BIM im Straßenbau in den europäischen Ländern zu erforschen. Das Hauptziel war es, eine Methode zu entwickeln, wie BIM Daten aus der Planungs- und Herstellungsphase in die bereits bestehenden und viele Bestandsdaten beinhaltenden Asset-Managementsysteme (AMS) importiert werden können. Das Forschungsprojekt nutzte bereits vorangegangene Forschungsergebnisse der Forschungsprojekte INTERLINK und AM4INRFA, die sich mit der Integration von Daten in bestehende AMS durch das Entwickeln von Data Dictionarys und Ontologien beschäftigen. CoDEC erweiterte die Ergebnisse der vorangegangenen Forschungsprojekte um ein Open Application Protocol Interface (API) als automatische Datenverbindung zwischen verschiedenen Datenquellen. Dieses System wurde in zwei Pilotprojekten getestet. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt war die Verwendung und Integration von Sensordaten in BIM-Modelle und AMS (Biswas et al., 2021).

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden in dem CoDEC Data Dictionary, der CoDEC Ontologie und einer Open API zusammengefasst. Diese Ergebnisse stellen allgemeine Richtlinien dar und sollen von den nationalen Straßenbaubehörden für ihre spezifischen Anwendungen angepasst werden (Biswas et al., 2021).

In dem Forschungsprojekt wurde ein besonderer Fokus auf die Verwendung von Sensoren und die Weiternutzung der dadurch bereitgestellten Daten gelegt. Dabei wurden die Sensoren nicht dem Typ Asset zugeordnet, sondern als neue Objekte integriert. Dadurch ist eine Unterscheidung zwischen mobilen und stationären Sensoren möglich und es besteht die Möglichkeit, neue Sensoren und Daten zukünftig für verschiedene Anwendungen zu nutzen (Biswas et al., 2021). Das Pilotprojekt 1 (Barateiro et al.) befasste sich mit der Visualisierung von Tunnelsensordaten in einem 3D-BIM-Modell.

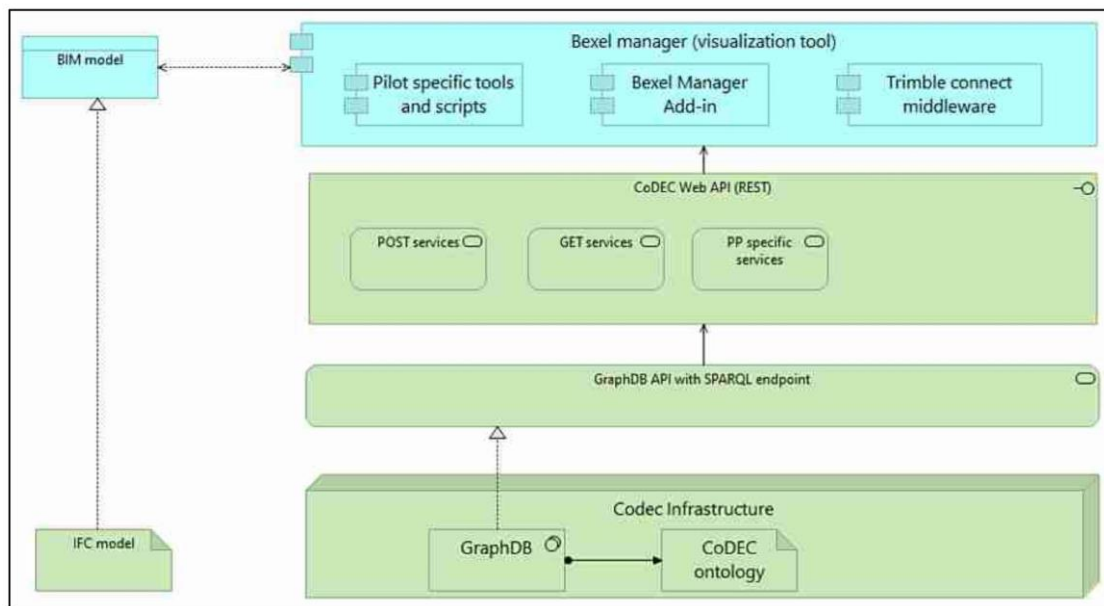


Abbildung 18: Systemarchitektur der CoDEC Pilotprojekte (Barateiro et al.)

Die Systemarchitektur, welche für die CoDEC Pilotprojekte verwendet wurde, ist in Abbildung 18 dargestellt. Sie ist aus drei Layer aufgebaut. Im untersten Layer werden alle Daten gespeichert, welche für die Projekte notwendig sind. Der mittlere Layer stellt die logische Funktionalität des Systems bereit und greift auf die nötigen Daten in der Datenschicht zu. Der Benutzer kann über das Visualisierungslayer auf die Ergebnisse zugreifen. Es findet keine direkte Verbindung zwischen den Layer statt, wodurch eine technologische Unabhängigkeit geschaffen wird und jeder Layer zum Beispiel durch unterschiedliche Programmiersprachen erstellt werden kann (Barateiro et al.).

Für die Verbindung der Layer wurde von CoDEC ein Open Application Protocol Interface (API) entwickelt. Dieses ermöglicht eine Abfrage der Daten aus unterschiedlichen, durch Linked-Data verknüpften Datenbanken. Die API ist eine unabhängige Ebene zwischen den Daten und der Logikebene und ermöglicht dadurch einen angepassten,

technologisch unabhängigen Zugriff auf die Daten in der Linked-Data Umgebung (Barateiro et al.; Biswas et al., 2021).

Bei den technischen Umsetzungen der Pilotprojekte wurde der Bexel-Manager als Visualisierungstool verwendet. Das Programm wurde um für die besonderen Anforderungen entwickelten Add-Ins erweitert. Die Add-Ins stellen eine Verbindung zu den verschiedenen Datenquellen dar und ermöglichen das Filtern und Analysieren der Daten. Für jedes Pilotprojekt wurde ein eigenes, auf die gewünschten Anwendungsfälle zugeschnittenes BIM-Modell mit einem BIM-Designtool erstellt und anschließend mittels des IFC 2x3 Formats in den Bexel-Manager importiert (Barateiro et al.).

Durch die Entwicklung eines Data Dictionary und die Übersetzung in die maschinenlesebare Ontologie wurde nach CoDEC (Biswas et al., 2021) ein Fortschritt erzielt, um BIM und Asset-Daten für die jeweiligen Anwendungen verfügbar zu machen und somit den Übergang vom bestehenden AMS des Betriebs hin zur Verwendung von DTs zu unterstützen.

#### **6.4 United Kingdom**

National Highway England (NH) hat in dem Projekt „Digital Roads“ ihren Leitfaden für ihre digitale Zukunftsstrategie von 2020–2025 für das Straßenwesens in England veröffentlicht. Ziel der Strategie ist es, ihre aktuelle Arbeitsweise zu verbessern und durch die Digitalisierung der Planung und Verwaltung das Straßennetz zu optimieren (National Highways, 2021b). Die Einführung soll eine Baukostenreduzierung von bis zu 33 % und einer Verbesserung der Kapazitäten der Autobahnen durch die Einführung von selbstfahrenden Autos um bis zu 80 % zur Folge haben (National Highways, 2021c). Die Einführung neue Bautechniken infolge der Digitalisierung soll die Unfallrate während der Bauphase um bis zu 37 % senken. Die Standardisierung des Designs und modulare Bautechniken sollen eine Reduktion des Kohlenstoffdioxidausstoßes um bis zu 50 % ermöglichen (National Highways, 2021c).

Die Ziele der „Digital Roads“ (National Highways, 2021b) beinhalten folgende drei Hauptthemen: digitale Planung und Konstruktion, digitale Arbeitsabläufe und digitale Informationen für die Bevölkerung. Die Hauptthemen werden in weitere Unterpunkte gegliedert. Das Thema „digitale Planung und Konstruktion“ konzentriert sich auf die Digitalisierung der Planung. Dabei soll durch Modularisierung die Effizienz gesteigert werden. Die vorhandenen Informationen sollen vereinheitlicht und kombiniert werden, um aus ihnen einen guten Nutzen ziehen zu können. Für die Analyse der Daten sollen

zusätzlich neue Technologien wie ML und KI verwendet werden. Als ein weiteres Ziel sollen bis zum Jahr 2025 die Grundlagen für einen DT durch die Verknüpfung vorhandener Daten geschaffen werden. Dadurch sollen Planungsentscheidungen und Erhaltungsmaßnahmen unterstützt werden (National Highways, 2021b).

Für die Entwicklung eines DT kollaboriert NH mit verschiedenen Organisationen, darunter UK Research and Innovation und die Universität Cambridge (National Highways, 2021a, S. 2). Der Zeitplan für die Entwicklung des DT ist in Abbildung 19 dargestellt.

**Digital twin** - The foundation of Digital Twin will be established through the collation and federation of existing data to support network planning and decision making.

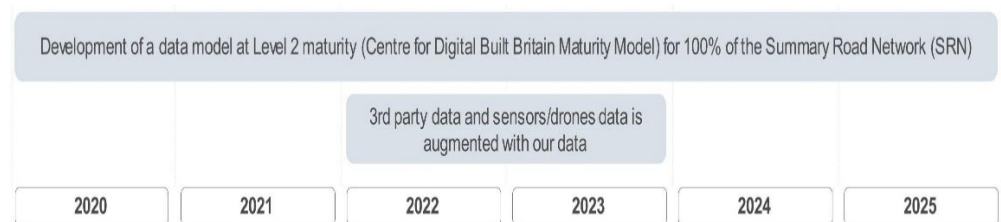


Abbildung 19: Digital Twin–Road Map (National Highways, 2021b)

Aktuell wird für die Verwaltung der Autobahnen das Highways Agency Pavement Management System (HAPMS) der Highway Agency verwendet. Dieses Softwaresystem beinhaltet alle Informationen zum aktuellen Netzwerk und dessen historischen Daten und liefert eine eindeutige Definition des gesamten Netzes. Auf diesem virtuellen Netz werden alle Informationen mit Bezug zur Straße verortet. So werden unter anderem Straßenaufbaudaten, Straßenzustandsdaten und Unfalldaten in dem System gespeichert. Diese Informationen können sowohl auf einer Karte dargestellt als auch in Textform ausgegeben werden. Sie werden mittels verschiedener Tools ausgewertet, um die Erhaltungsmaßnahmen der Straßenoberfläche zu planen und den finanziellen Mitteleinsatz zu optimieren.

Zur Verortung der Informationen wird das Straßennetz in Abschnitte unterteilt, von denen jeder durch einen exakten Start- und Endpunkt charakterisiert ist und weitere Informationen zu der Anzahl an Spuren enthält (Highway Agency, 2009).

## 6.5 Dänemark

Ziel der dänischen Digitalisierungsstrategie im Straßenwesen ist eine enge öffentliche Zusammenarbeit bis zum Jahr 2025 - speziell zwischen den Kommunen und der dänischen Straßendirektion. Zum Erreichen dieses Zieles werden verschiedene Kooperationsformen angewandt. Für das Asset-Management werden gemeinsame Programme verwendet. So soll im Laufe des Jahres 2022 das neue Asset-Managementsystem dTIMS implementiert werden, das die beiden aktuell verwendeten Systeme Belops und DANBRO ersetzt (Brückenmanagement) (Vejdirektoratet, 2022b).

RoSy ist eine Asset-Managementsoftware, die von Grontmij entwickelt wurde. Die Software wird von 40 % der Kommunen zur Verwaltung von straßenbezogenen Daten verwendet. Die Anwendung von RoSy ermöglicht eine Verlinkung von allen in der Datenbank gespeicherten, straßenbezogenen Daten, wie zum Beispiel die Verkehrsbelastung, Zustandsdaten oder Straßengeometrien, auf einer Karte (Grontmij - Carl Bro, 2005).

Vejman.dt ist eine webbasierte Datenbank, auf der verschiedene Informationen gespeichert sind und die von 60 % der Kommunen für die Verwaltung genutzt wird. Durch ein Kartenfenster können die Informationen eingesehen und dargestellt werden (Vejdirektoratet, 2022b).

Das Asset-Managementsystem dTIMS wird ab dem Jahr 2022 zuerst in ausgewählten Pilotkommunen das aktuelle System vejman.dk ersetzen und soll ab dem Jahr 2023 in allen Kommunen Dänemarks für die Verwaltung von Straßen- und Brückendaten verwendet werden. In den folgenden Jahren soll das System der Firma deghton um weitere Assets, wie zum Beispiel Entwässerung oder Signalanlagen, erweitert werden (Vejdirektoratet, 2022a). Die Aufteilung des Systems in vier Arbeitsbereiche ermöglicht eine gezielte Nutzung der Informationen für die jeweiligen Anwendungsfälle (Vejdirektoratet, 2022a).

Für die einfache Weiternutzung der Daten werden diese zum einen mit einem standardisierten nationalen Schlüssel zur Identifizierung von Straßenabschnitten versehen, zum anderen wurde ein Standard für eine einheitliche digitale Darstellung der Straßen- und Verkehrsdaten entwickelt. Diese Maßnahmen wurden auf Grundlage des europäischen INSPIRE-Standards für die Darstellung von Straßendaten erarbeitet (Vejdirektoratet, 2022c).

National Access Point (NAP) wird als nationaler Austauschpunkt und Quelle verschiedener Daten für die dänische Regierung im Zusammenhang mit Straßen genutzt. Dort

werden zusätzlich zu den von der Richtlinie der EU 2010/40/EU geforderten Daten weitere Daten zur Verfügung gestellt (Vejdirektoratet, 2021).

## 6.6 USA (Bundesstaat Oregon)

Das Oregon Department of Transportation (ODOT) verwaltet über 8 000 Meilen an Autobahnen (Bentley, 2018b). Um diese Strecken effizient zu verwalten, wurden zwei Programme zur Verwaltung der Anlagedaten und Straßeninfrastruktur implementiert. Eines der beiden Programme ist TransInfo. Dieses ist ein landesweite Asset-Management-System, das aktuelle Statistiken zu der Straßeninfrastruktur zur Verfügung stellt. Das andere Programm ist das „Features, Attributes and Conditions–Statewide Transportation Improvement Program“ (FACS-STIP), das Anwendern Informationen zu den Standorten, Zuständen und Attributen der Straßenobjekte zur Verfügung stellt (Brown, 2016)

Das System TransInfo zur Verwaltung der Straßendaten basiert auf dem AssetWise System von Bentley (Bentley, 2018b). Dieses ermöglicht eine einheitliche Visualisierung des Straßennetzes und stellt statistische Informationen in einem einheitlichen System dar (Bentley, 2018b). Die Informationen besitzen eine räumliche Netzzuordnung durch das Programm, wodurch die Behörde effizient Daten erfassen und verarbeiten kann (Brown, 2016). Mit Hilfe des Programms können Kostenkalkulationen und Berichte für die verwalteten Objekte erstellt werden (Brown, 2016). Seit der Einführung von TransInfo konnte die Effizienz der Verwaltung um 66 % gesteigert und die Kosten der Datenerfassung und -wartung um 10 Prozent reduziert werden (Bentley, 2018b).

Das System AssetWise der Firma Bentley wurde für die Verwaltung und Inspektion von Straßen und Brücken sowie für die Streckenplanung und Genehmigung von Schwerlastverkehr entwickelt. Es verwaltet die Informationen zu den Bauwerken über deren gesamten Lebenszyklus. Die Zustandsdaten der Bauwerke können schnell und effektiv ortsunabhängig erfasst werden (Bentley Systems, 2021).

FACS-STIP wurde sowohl für interne wie auch externe Benutzer entwickelt, um diesen Zugriff auf Asset-Daten und eine räumliche Kartendarstellung zu ermöglichen. Mit Hilfe des Kartenfensters wurde ein zentraler Ort mit allen Informationen geschaffen, an dem diese betrachtet und analysiert werden können. FACS-STIP besteht aus zwei Komponenten: Zum einen das Karten-Tool, das einen ArcGIS Server verwendet, um verschiedene Karten mit unterschiedlichen Basisinformationen darzustellen. Das Kartenfenster ermöglicht den Zugriff auf verschiedene Asset Daten und Attribute und die Abfragen



können ausgedruckt werden. Die zweite Komponente ist das Data To Go Tool, mit dem Benutzer Abfragen zu bestimmten Bereichen oder Punkten tätigen können. Diese Abfragen können vom Benutzer in eine Excel-Tabelle exportiert werden. Des Weiteren ermöglicht das Tool die Anpassung von Informationen von Assets (Brown, 2016).

## 6.7 Norwegen

Kernstück der Straßenverwaltung in Norwegen ist die NVDB-Datenbank. Die in der Datenbank enthaltenen Informationen werden visuell in der Webanwendung VEGKART dargestellt. Den Benutzern werden dadurch Informationen zu mehr als 350 Objekten zur Verfügung gestellt. Die Hauptkomponente von VEGKART ist das Kartenfenster, in dem geographische Informationsbereiche ausgewählt werden. Durch Auswahl von Straßen oder Objekten werden die dazugehörigen Informationen angezeigt (NVDB Transportportal, 2022).

In dem NVDB-Datenkatalog werden alle Merkmalstypen beschrieben, die auf das Straßennetz Bezug nehmen. Jedes Merkmal besitzt verschiedene Attribute mit jeweils einer eindeutigen ID und einem Namen. Die Verknüpfung der Informationen zu der Strecke kann entweder punkthaft oder linear sein (NVDB Transportportal, 2022). Einige dieser Merkmale sind öffentlich in der Webanwendung VEGKART für alle Benutzer einsehbar, aber ein Großteil der Informationen ist nur für die Straßenverwaltung einsehbar (Vegdata.no, 2022). Zur eindeutigen Zuordnung der Informationen auf das Straßennetz wird jede Straße in Abschnitte und Unterabschnitte unterteilt. Die Beschreibung von Kreuzungen und Verzweigungen ist in dem Bezeichnungssystem nochmals genauer unterteilt (NVDB Transportportal, 2022).

Die im Kartenfenster von VEGKART ausgewählten Informationen können sowohl als Excel-Datei als auch als Link zu der exakten API-Abfrage, welche die Daten in der NVDB-Datenbank abfragt, exportiert werden (NVDB Transportportal, 2022).



## 6.8 Deutschland (BISStra)

Das Bundesinformationssystem Straße (BISStra) wird in Deutschland vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) für Verwaltungs- und Forschungsaufgaben genutzt (BASt, 2022a). Die Firma GIS Consult, welche das System entwickelt hat, betreibt verschiedene geografische Informationssysteme für Bund, Länder und Kommunen. BISStra besteht aus einem Kernsystem und darauf basierenden Fachsystemen. Die Informationen werden aus den Straßendatenbanken der Länder in BISStra übertragen und basieren auf den Vorgaben der ASB. Die Zusammenführung der Informationen ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung und Visualisierung aller Informationen, welche auch über die Webanwendung BISStraWeb von Anwendern abgerufen werden können (GIS Consult, 2022). Die gespeicherten Fachinformationen basieren auf einer einheitlichen räumlichen Verortung (BASt, 2022a). Diese beziehen sich auf die im Kernsystem gespeicherten Straßennetzdaten der Bundesfernstraßen. Die verschiedenen Fachsysteme enthalten unter anderem Informationen zur Verkehrsmessung, Zuständen der Straßenoberfläche sowie Informationen zu Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Alle enthaltenen Fachinformationen können für Forschungszwecke flexibel kombiniert werden (BASt, 2022a).

## 7 Erhaltungsmanagement

Infrastrukturbauwerke werden für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren bei Straßen und 100 Jahren bei Brücken (DIN EN 1990) geplant. Die Nutzungsphase schließt als zweite und längste Phase des Lebenszyklus eines Infrastrukturbauwerks an die Errichtungsphase an (Müller C., 2019, S. 47). Ziel der Instandhaltung ist, durch gezielte Maßnahmen während des Lebenszyklus die Erhaltung oder Wiederherstellung des geforderten funktionstüchtigen Zustandes des Bauwerks zu bewahren (DIN 31051). Die strategische Planung des Erhaltungsmanagement im Straßenbau sieht verschiedene Aspekte vor: Im Fokus steht der technische Werterhalt (Stöckner et al., 2021, S. 15); zusätzlich werden betriebswirtschaftliche und volkswirtschaftliche Aspekte berücksichtigt, die sowohl die Sicherheit als auch den Komfort beeinflussen (Fastrich, 2011, S. 6–7). Das Abwägen der verschiedenen Aspekte ist für die Erarbeitung einer allgemeinen Strategie nicht ausreichend. Die Erhaltungsstrategie muss vielmehr auf Grundlage verschiedene Kriterien für jedes betrachtete Objekt im Einzelfall erstellt werden (Fastrich, 2011, S. 6–7). Die Betrachtung der Einzelobjektzustände ist wichtig, um auf Grundlage dieser Informationen die Priorisierung der Maßnahmen sowie den wirtschaftlichsten Zeitpunkt für die Erhaltungsmaßnahme und langfristige Prognosen des Erhaltungsmanagement und Zustandsentwicklungen festzulegen (Stöckner et al., 2021, S. 15–16). Zur Unterstützung dieser Aufgaben werden computergestützte Verfahren verwendet, welche ökonomische und ökologische Maßnahmenvorschläge unter Beachtung der vorangegangenen Zustandsbewertungen und unter vorgegebenen Rahmenbedingungen erarbeiten (Blumenfeld, 2020, S. 37; Fastrich, 2011, S. 18).

### 7.1 Rechtliche Grundlagen

Nach Art. 9 Absatz (1) des Bayerisches Straßen- und Wegegesetzes (BayStrWG) umfassen die Aufgaben des Trägers der Straßenbaulast alle mit der Unterhaltung und dem Bau verbundenen Aufgaben. Demnach hat der Träger die Aufgabe, die Straße in einem dem Verkehrsbedürfnis, der öffentlichen Ordnung und der Sicherheit angepassten Zustand zu bauen und zu erhalten. Dazu sind nach Art. 9 Absatz (2) die allgemein anerkannten Regeln der Technik anzuwenden (Bayerische Staatskanzlei, 1981).

Im Jahr 2001 wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen die Richtlinie RPE-Stra 01 zur Vereinheitlichung der systematischen

Erhaltungsplanung veröffentlicht. Die Richtlinie RPE-Stra 01 beschreibt die wesentlichen verwaltungstechnischen Planungsstufen für eine effiziente und systematische Straßenerhaltung. Ferner beinhaltet sie alle notwendigen Schritte für die Planung und Durchführung der systematischen Erhaltungsplanung. In Bayern werden dafür auf Basis der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) die folgenden zwei Verfahren verwendet (Bayerische Staatskanzlei, 2001): Das verbesserte Erhaltungsmanagement ermittelt auf Grundlage der ZEB-Daten mit Hilfe von Algorithmen Vorschläge für ein Erhaltungsprogramm (Degelmann et al., 2011, S. 15). Diese Vorschläge werden in den darauffolgenden Jahren von den Ämtern mit dem ihnen zur Verfügung stehenden Budget umgesetzt. Das von Bund und Ländern entwickelte PMS wird seit 2002 in ausgewählten Ämtern getestet und dessen Ergebnisse fließen in die Planung des Erhaltungsprogrammes ein (Bayerische Staatskanzlei, 2001).

## 7.2 Erhaltungsmanagement Straße - Allgemein

Das Straßennetz besteht aus dem Straßenkörper, welcher aus verschiedenen Schichten aufgebaut ist, sowie den Ingenieurbauwerken (Haardt, 2003). Für jedes dieser Bestandteile müssen in Hinblick auf das Erhaltungsmanagement unterschiedliche Informationen gesammelt und Entscheidungen getroffen werden. Aus diesem Grund erfolgt eine getrennte Begutachtung und Bewertung der Zustände und dem darauf aufbauenden Erhaltungsmaßnahmen für jeden der beiden Bauwerkstypen.

Die durchschnittliche Nutzungsdauer einer Straßenbefestigung ist 50 Jahre (DIN EN 1990). Diese Nutzungsdauer wird über die gesamte Straßenbefestigung konstant angenommen. Der Querschnitt einer Straße besteht aus verschiedenen konstruktiven Schichten aus unterschiedlichen Materialien, welche unterschiedliche Nutzungszeiträume aufweisen. So besitzen Asphaltdeckschichten eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 12 bis 25 Jahren und die darunterliegende hydraulisch gebundene Trag-schicht (HGT) eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 60 bis 80 Jahren (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2019). Um die Sicherheit und den Komfort zu erhalten sowie ökonomische Aspekte zu berücksichtigen (Fastrich, 2011, S. 6–7) unterliegen die Straßenbefestigungen einer Erhaltungsmanagementplanung.

Die Maßnahmen, welche als Folge dieser Planung erfolgen, werden in bauliche und betriebliche Erhaltungsmaßnahmen unterschieden. Die bauliche Erhaltung wird nach RPE-Stra 01 in Instandhaltung, Instandsetzung und Erneuerung unterteilt (Stöckner et al., 2021, S. 15).

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Bauliche<br/>Erhaltung</b>   | (örtlich-punktueller oder kleinflächiger Maßnahmen)<br><b>Bauliche Unterhaltung (Instandhaltung)</b><br>(z. B. Vergießen von Rissen, kleinflächige Flickarbeiten) |  |
|   | <b>Instandsetzung</b><br><br>(größere flächige<br>Maßnahmen)  | <b>I1 – auf der Deckschicht</b><br>(z. B. Oberflächenbehandlung, Dünnschichtbelag) |
|   |   | <b>I2 – an der Deckschicht</b><br>(z. B. Hoch-/Tiefenbau der Deckschicht)          |
|   | <b>Erneuerung</b>   | <b>E1 – an der Decke</b><br>(z. B. Hoch- oder Tiefenbau der Decke)                 |
| <b>E2 – an Tragschicht(en)/ am Oberbau</b><br>(z. B. Verstärkung, Tiefenbau einschließlich der Tragschicht(en)) |   |  |

Abbildung 20: Begriffsdefinitionen der Straßenerhaltung (Stöckner et al., 2021, S. 15)

Die Unterteilung der möglichen Maßnahmen erfolgt anhand des räumlichen Umfangs sowie der Art der Maßnahme (Abbildung 20). Zum Beispiel bewirkt die Instandsetzung einer Deckschicht eine Verbesserung des Substanzwertes und umfasst keinen kompletten Austausch der Deckschicht. Bei der Erneuerung werden abhängig von dem Zustand der Fahrbahnbefestigung eine oder mehrere Schichten der Fahrbahn ausgebaut und ersetzt (Stöckner et al., 2021, S. 15).

Das aktuell reaktive Erhaltungsmanagement der Straßenbefestigungen verwendet die berechneten Substanz- und Gebrauchswerte der Straßenoberflächen. Diese werden auf Grundlage der Ergebnisse der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) der Straßendeckschichtoberfläche berechnet (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2021b; FGSV, 2006). Die errechneten Zustandswerte basieren nur auf festgelegten Oberflächenmerkmalen, welche zur Beschreibung des Zustandes der Straßenoberfläche verwendet werden. Sie geben keine Auskunft über den Zustand der darunterliegenden Binder- und Tragschichten (Stöckner et al., 2021, S. 13). Die erfassten Zustandswerte werden nach der Prüfung in eine Notenskala von 1,0 bis 5,0 umgerechnet. Durch diese Normierung werden die Einflüsse der lokal festgestellten Schäden auf den Zustand des gesamten Straßenabschnittes verrechnet. Die Note 1,0 erhält ein Straßenabschnitt im Idealzustand. Wird im Verlauf der Berechnung die Zustandsnote 3,5 (Warnwert) für einen Streckenabschnitt ermittelt, so unterliegt dieser Streckenabschnitt einer genaueren Überwachung und Maßnahmen zur Verbesserung des Straßenzustandes werden geplant (FGSV, 2006, S. 77). Bei der Überschreitung des Schwellenwertes 4,5 wird eine Erhaltungsmaßnahmenprüfung eingeleitet (FGSV, 2006).

Die EDV-basierten Pavement-Management-Systeme bewerten den Straßenzustand, priorisieren Erhaltungsmaßnahmen, stellen Prognosen über die Zustandsentwicklung und den Erhaltungsbedarf auf und ermitteln den wirtschaftlichsten Zeitpunkt für die Instandsetzung (Stöckner et al., 2021, S. 15–16). Diese aktuell verwendeten Programme beziehen nur die Oberflächenkennwerte in die Bewertung der Straßenqualität ein. Andere Kennwerte, wie zum Beispiel die Dicke der Tragschichten, die Materialkennwerte und die damit verbundene Resttragfähigkeit des gesamten Straßenaufbaus werden nicht berücksichtigt (Stöckner et al., 2021). Um einen umfassenderen Überblick über den Zustand und die Restnutzungsdauer der Straßenbefestigung zu erhalten, werden verschiedener Forschungsprojekte durchgeführt, um weitere Kennwerte in die Analyse der exakten Straßenzustände einzubeziehen zu können. Aktuell werden in Deutschland Pavement-Management-System (PMS) verwendet, deren ökonomische Bewertung auf den Ergebnissen der ZEB basiert und erst in den kommenden Jahren durch die Ergänzung um Materialkennwerte der einzelnen Schichten erweitert werden sollen (Stöckner et al., 2021, S. 14).

### **7.3 Erhaltungsmanagement Straße – Bayern**

#### **Zustandserfassung und -bewertung (ZEB)**

Die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB) regeln die notwendige Vorbereitung, Durchführung, Auswertung, Bewertung und Qualitätssicherung der ZEB (FGSV, 2006). Die ZEB wird mit einem schnellfahrenden Messfahrzeug durchgeführt und erfasst die Ebenheit im Längs- und Querprofil, die Rauheit der Oberfläche und Substanzmerkmale der Asphalt- und Betonoberflächen. Ziel der ZEB ist die Planung einer mittel- und langfristigen Strategie für den Erhalt der Straßen sowie der Bewertung der Materialeignung durch kontinuierliche Schadensverlaufsbetrachtungen auf Objektebene (Degelmann et al., 2011, S. 35).

## Ablauf der ZEB

Nach (FGSV, 2006) ist die ZEB in vier Teilprojekte unterteilt. Vor der Durchführung der ZEB werden die Grunddaten im Teilprojekt 0 (TP0) vom AG vorbereitet und an den AN übergeben. Die Struktur der Grunddaten ist in der ZTV-ZEB festgelegt und beinhaltet Informationen zu dem zu erfassenden Netz (BASt, 2017). Nach Übergabe der Grunddaten werden diese hinsichtlich Vollständigkeit, Gültigkeit und Richtigkeit vom AN überprüft. Im Anschluss an die Prüfung erfolgt eine Übergabe an TP1-3 (BASt, 2017).

Die durch die ZEB erfassten Messergebnisse müssen eindeutig einer Position zugeordnet werden können. Zu diesem Zweck wird für das Straßennetz das Netzknoten- und Stationierungssystem der ASB Version 2.04 (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c) angewandt. Ein Abschnitt ist definiert als die Strecke zwischen zwei Nullpunkten (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018a). Die festgelegten Erfassungsabschnitte werden in inner- und außerörtliche Straßen unterteilt. Die Zustandsdaten der außerörtlichen Straßen werden auf 100 m Abschnitte homogenisiert dargestellt (FGSV, 2006).

Die Erfassung der Messwerte erfolgt in den Teilprojekten 1 bis 3 durch schnellfahrende Messfahrzeuge. Zu den zu erfassenden Messgrößen gehören Längs- und Querebenheit (TP1), Griffigkeit (TP2) und Oberflächenbilder (TP3). Nach der Erfassung werden die Daten durch den AN ausgewertet (TP4). Die Messfahrzeuge nutzen zur Erfassung der Messwerte Lasertechniken, ein schräg gestelltes Messrad (SKM) sowie Kameras. Die gesammelten Werte werden in verschiedenen Rohdaten erfasst. Diese Rohdaten werden im Anschluss an die Messung vom AN in Geo-Rohdaten umgewandelt, als Teil des TP 4 durch ein BASt-Programm aufbereitet und in das Netzknotenstationierungssystem eingeordnet (BASt, 2017). Die erzeugten Raster-Rohdaten werden als XML-Dateien gespeichert (Hertwig, 2007), aus denen anschließend dimensionslose Zustandsgrößen ermittelt werden. Diese Zustandswerte werden vom AN statistisch ausgewertet und als Grafiken und Tabellen bereitgestellt. Sie werden zusätzlich in Form von Zustandsprofilen, -bändern und -karten visualisiert (BASt, 2017).

Die Speicherung und Archivierung der Daten erfolgt durch die BAST in dem IT-ZEB-System. Die Daten werden auf dem Server der IT-ZEB länderspezifisch gespeichert und zusätzlich von den Ländern vorgehalten. Die Speicherung durch das IT-ZEB-System ermöglicht jederzeit eine Neuberechnung der Zustandswerte auf Grundlage der Rohdaten, was bei Netzanpassungen oder Bewertungsverfahrensänderung nötig wird (König et al., S. 88).

#### 7.4 Ingenieurbauwerke - Allgemein

Der Zustand eines Bauwerks ist abhängig von seiner Nutzung, Konstruktion und äußeren Einflüssen und kann in einer charakteristischen Zustandskurve, die die Zustandsveränderung beschreibt, graphisch dargestellt werden (Empelmann, 2008). In Abbildung 21 ist der Verlauf einer beispielhaften Zustandskurve dargestellt. In Folge der Instandsetzung des Bauwerks am Punkt 1 erhöht sich der Abnutzungsvorrat und verlängert die potenzielle Nutzungsdauer des Bauwerks. Die Grundvoraussetzung für eine lange Nutzungsdauer des Bauwerks sind die Durchführung von Inspektionen, daraus errechnete Zustandsnoten und eine systematisch geplante Instandsetzung (Fastrich, 2011, S. 17).

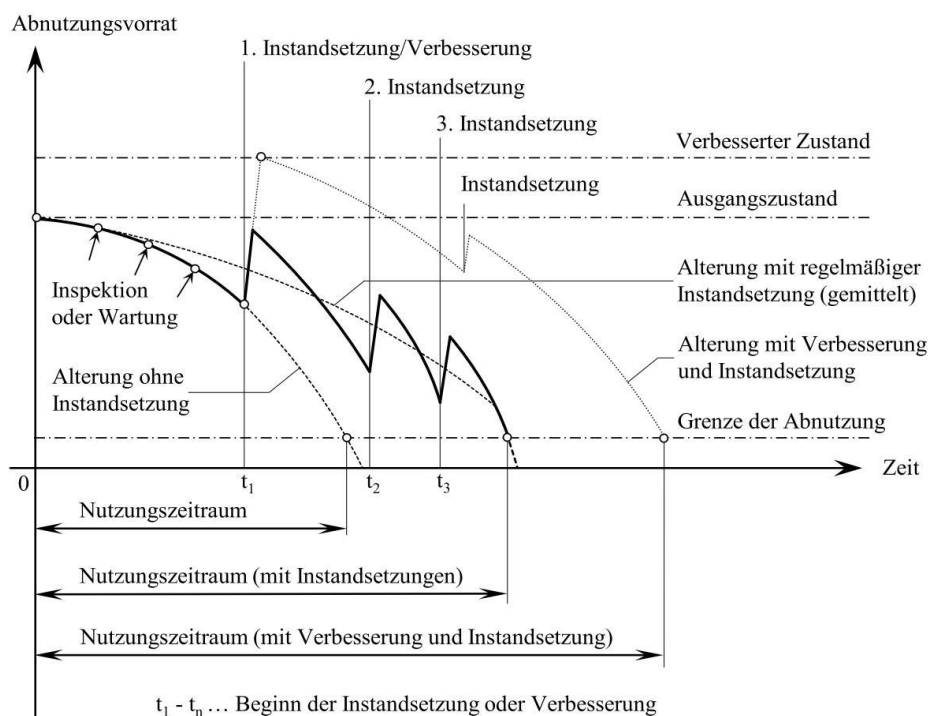


Abbildung 21: Zustandsbeurteilung von Ingenieurbauwerken (Weller, 2021, S. 17)

Zur Erhaltung eines ausreichenden Abnutzungsvorrates der Bauwerke werden im Erhaltungsmanagement verschiedene Maßnahmen angewandt. Diese besitzen die



Aufgaben die Sicherheit und Funktionalität des Ingenieurbauwerks zu erhalten (Holst, 2006). Abhängig von der Art und dem Umfang können diese Maßnahmen unterschieden werden in: (1) Maßnahmen, welche nur einen kleinen Umfang besitzen und keine Verbesserung des Gebrauchswertes zur Folge haben; diese werden als baulichen Unterhaltsmaßnahmen bezeichnet. (2) Dagegen wird bei Maßnahmen zur Instandsetzung der Gebrauchswert des Bauwerks erheblich verbessert. (3) Kann der Gebrauchswert eines bestehenden Bauwerksteils durch Maßnahmen nicht mehr in ausreichendem Umfang wiederhergestellt werden, so erfolgt eine Erneuerung dieses Bauteils (Haardt, 2003).

Um die richtige Wahl der Erhaltungsmaßnahme zu treffen, müssen die Zustände der Brücken und Tunnel ermittelt werden. Die Ergebnisse werden meist in Form von Protokollen, Papierzeichnungen und Fotos gespeichert. Die inkonsistente Darstellung von Informationen sowohl in Papierform als auch in digitaler Form kann zu Schwierigkeiten im Informationsmanagement führen. Es findet keine Verbindung zwischen den Informationen und dem realen Bauwerk statt und es fällt schwer, schnell einen umfangreichen Überblick über alle wichtigen Informationen zu erhalten (Zhang, 2020). Aus den Ergebnissen der Inspektionen werden Zustandsnoten für die einzelnen Teilbauwerke sowie für das Gesamtbauwerk berechnet. Diese Gesamtzustandsnote kann Zahlenwerte zwischen 1,0 und 4,0 annehmen und wird vom Prüfprogramm berechnet (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 21; Haardt, 2003, S. 11). Abhängig von dem Zahlenwert der Gesamtnote müssen Maßnahmen zum Erhalt des Bauwerks eingeleitet werden, da ohne Eingriff die Standsicherheit oder Verkehrssicherheit des Bauwerks beeinträchtigt ist und es zu einem Ausfall des Bauwerks kommen kann (Degelmann et al., 2011, S. 44).

Um auf Grundlage der während der Inspektionen gesammelten Ergebnisse wirtschaftliche Entscheidungen zu treffen und die Sicherheit der Bauwerke zu gewährleisten, müssen die gesammelten Informationen ausgewertet werden. Zur Unterstützung der Erhaltungsmanagementplanung wurden in einigen Ländern EDV-basierte Erhaltungsmanagementsysteme entwickelt (Fastrich, 2011, S. 18). Diese Systeme stellen nie das gesamte Erhaltungsmanagement dar, sondern dienen nur als Entscheidungsunterstützung für die Ingenieure (Stöckner et al., 2021, S. 15–16). Auf Grund der baulichen Unterschiede und unterschiedlichen Anforderungen in der Planungsphase und dem notwendigen Aufwand der Baumaßnahme werden die Bestandteile der



Straßeninfrastruktur getrennt in Managementsystemen für Straßenoberflächen (PMS) und Bauwerksmanagement-Systemen (BMS) bewertet.

### Structural Health Monitoring (SHM)

Neben der Bewertung der durch Inspektionen gesammelten Ergebnissen und anschließender Maßnahmenfestlegung können für einzelne Ingenieurbauwerke Bauwerksmonitoring-Konzepte entwickelt werden. Mit Hilfe des Structural Health Monitorings (SHM) kann der Abnutzungsvorrat des Bauwerks besser beurteilt werden. Durch die gezielte Überwachung des Objektes können Prognosen zu der Resttragfähigkeit und der noch vorhandenen Lebensdauer ermittelt werden. Im Zuge der SHM werden viele Informationen gesammelt, die für ein effektives Erhaltungsmanagement sinnvoll verarbeitet und gespeichert werden müssen. Durch die Verwendung von Sensoren und der maschinellen Auswertung der Ergebnisse kann mit Hilfe der SHM das Erhaltungsmanagement vom reaktiven Management hin zum prädiktiven Management entwickelt werden. Wichtig dabei ist, ein gutes Messkonzept zu erstellen und dieses beizubehalten, da eine Veränderung der Sensoren oder des Messortes bereits einen Einfluss auf die erhaltenen Ergebnisse hat. Die Veränderung der Auswertung infolge des Ortswechsellns hat einen Verlust der Vergleichbarkeit zur Folge (Varabei, Wimmer & Braml, 2022).

## 7.5 Erhaltung von Ingenieurbauwerken – Bayern

Neben den Fahrbahnen zählen zum Straßennetz auch die Ingenieurbauwerke. Diese haben im Streckennetz eine besondere Bedeutung, da eine Brückenbaumaßnahme komplexer als die Erneuerung einer Fahrbahn ist und einer längeren Zeitspanne für die Umsetzung bedarf. Zusätzlich müssen im Zuge der Erneuerungen weite Umleitungen bis zum nächsten Ingenieurbauwerk eingerichtet werden (Degelmann et al., 2011, S. 41).

Für die Prüfung der Brückenbauwerke wird die Norm (DIN 1076) als Grundlage verwendet. Nach (DIN 1076) werden die Prüfungen der Bauwerke in Hauptprüfungen, einfache Prüfungen und Sonderprüfungen unterteilt. Die Hauptprüfung erfolgt alle sechs Jahre. Dabei werden alle Bauteile der Brücke handnah begutachtet. Bei der einfachen Prüfung werden die Brücken alle drei Jahre nach einer Hauptprüfung ohne Zuhilfenahme von unterstützenden Geräten begutachtet. Die Sonderprüfung findet nur nach schwerwiegenden Wetterereignissen oder Unfällen statt und dient einer Sicherstellung der Schadensfreiheit des betroffenen Bauwerks (Degelmann et al., 2011,

S. 41–44). Nach DIN 1076 (DIN 1076) sind drei Unterlagen während der Bauwerksprüfung zu erstellen: das Bauwerksbuch, die Bauwerksakte und das Bauwerksverzeichnis (Weller, 2021, S. 22). In dem Bauwerksbuch werden alle Ergebnisse der Prüfungen dokumentiert. Die aufgenommenen Einzelschäden werden getrennt nach den Kriterien Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit bewertet (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2013, S. 4). Im Anschluss werden die einzelnen Schäden durch den Algorithmus des SIB-Bauwerke (SIB-BW) Programms unterschiedlich gewichtet und zu einer Gesamtzustandsnote verrechnet (Weller, 2021, S. 69). Die aufgenommenen Schäden werden neben der Auflistung in SIB-BW zusätzlich in Skizzen und in 2D-Plänen verortet (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 21). Die Gesamtzustandsnote kann Zahlenwerte zwischen 1,0 und 4,0 annehmen (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 21). Sie ist kein eindeutiges Kriterium für den Umfang der Schäden und den notwendigen finanziellen Mitteleinsatz, sondern dient lediglich als Indiz für notwendige Instandsetzungsmaßnahmen (Degelmann et al., 2011, S. 41–44). Basierend auf den ermittelten Schäden werden Empfehlungen zu weiteren Maßnahmen, wie Verkehrsraumeinschränkungen und Nachrechnungen der Brückenstatik, ausgesprochen (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2013, S. 4). Die im Bauwerksbuch dokumentierten Daten werden nach der Prüfung durch den Ingenieur in das Programmsystem SIB-BW übertragen (Weller, 2021, S. 22). Die Struktur der Datenspeicherung in SIB-BW wird durch die Anweisung Straßeninformationsbank; Segment Bauwerksdaten (ASB-ING) vorgegeben. Die ASB-ING wird nur zur Strukturierung der Schadens- und Bauwerksdaten verwendet und hat keinen Einfluss auf die Bewertung der Bauwerke (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2013, S. 4–6). Im Anschluss an die Prüfung der Bauwerke werden kleine Schäden vom Brückentrupp beseitigt, um größere Folgeschäden zu vermeiden. Die verbleibenden Schäden werden nach der Übermittlung in SIB-BW in das KEB der Bayerischen Straßenbauverwaltung übertragen und in den mittelfristigen und langfristigen Erhaltungsplan der Verwaltungen eingeplant (Degelmann et al., 2011, S. 45).

Neben der standartmäßigen Brückenprüfung kann für ausgewählte Brücken mit Hilfe der Nachrechnung des strukturellen Zustandes der Traglastindex des Bauwerks bestimmt werden (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 21).

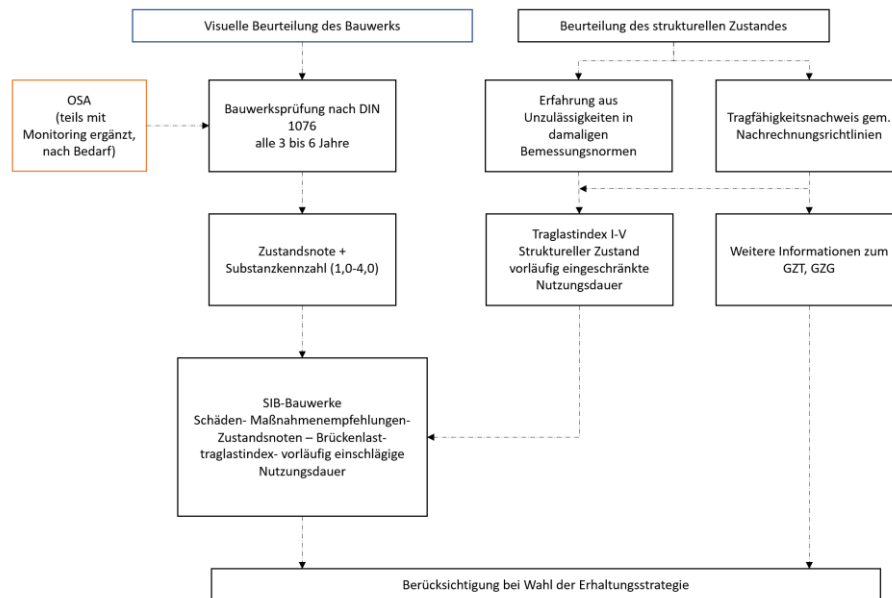


Abbildung 22: Ablauf der Beurteilung des Bauwerkszustandes (eigene Darstellung nach (Wenner, S. 22))

Um die stetig steigende Anzahl an Erhaltungsmaßnahmen besser zu koordinieren und die finanziellen Mittel optimal einzusetzen, wurde das Bauwerksmanagementsystem (BMS) entwickelt. Dieses ermöglicht eine zuverlässige Bereitstellung von Zustandsinformationen und einen Überblick über die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel (Degelmann et al., 2011, S. 46). Die Struktur des BMS ist in Abbildung 23 dargestellt. Die Maßnahmenermittlung wird zuerst auf Objektebene durchgeführt und im Anschluss daran erfolgt auf Netzebene eine Reihung der Maßnahmen anhand der zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel (Degelmann et al., 2011, S. 46; Weller, 2021, S. 47).

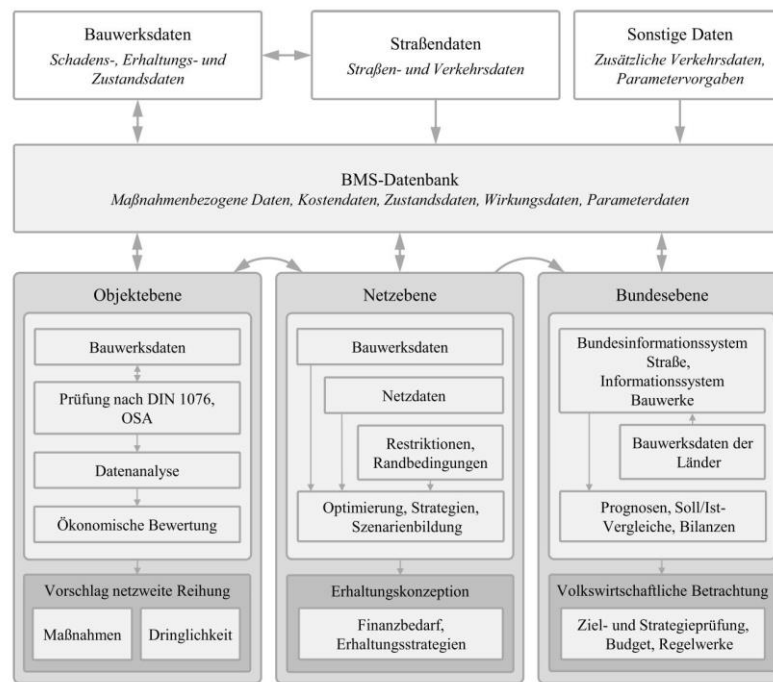


Abbildung 23: Struktur des BMS (Weller, 2021, S. 38)

Die BMS-Datenbank stellt das Kernstück des BMS dar; in ihr werden alle Informationen zu den Bauwerken gespeichert und aufbereitet. Unter anderem werden Daten aus SIB-BW übernommen und verarbeitet (Weller, 2021, S. 37). Die aus SIB-BW übernommenen Daten basieren auf den Ergebnissen der Bauwerksinspektionen. Diese Inspektionsergebnisse, welche auf Grundlage der in der DIN 1076 geregelt Bauwerksprüfungen ermittelt werden, sind Bestandteil der Maßnahmenplanungen, welche die Standsicherheit und Verkehrssicherheit im vorgegebenen Nutzungszeitraum erhalten sollen. Die Maßnahmenplanung erfolgt zusätzlich auf Grundlage von festgelegten Rahmenbedingungen und bereits implementierter Maßnahmenvorschlägen. Für die Bestimmung des Eingreifzeitpunktes werden die ermittelten Zustandsnoten der einzelnen Bauteile als Basis genommen. Überschreitet ein Bauteil die Note von 3,4, werden sofort Maßnahmen zum Erhalt des Bauteils eingeleitet, wohingegen bei Zustandsnote im Bereich von 1,8-2,9 die Maßnahmen in einem mittel- bis längerfristigen Zeitrahmen durch das BMS geplant werden. Für Bauteile mit einer Zustandsnote, die besser als 1,8 ist, erfolgt kein Maßnahmenvorschlag. Die Maßnahmen, welche durch das BMS vorgeschlagen werden, beinhalten neben dem Vorschlag der Maßnahme auch eine Einschätzung der Wirksamkeit in Form des Rücksetzwertes (Haardt, 2003).

Das Programm empfiehlt ab dem Zeitpunkt, an dem der Schaden festgestellt wurde, alle technisch möglichen Maßnahmen. Zusätzlich werden mit Hilfe der Verhaltensmodelle die Schadensentwicklungen ohne das Eingreifen prognostiziert. Als

Einflussparameter für die Bestimmung der Maßnahmen werden die abgeschätzten Restnutzungsdauern, die technischen Daten der Bauwerke, Vorgaben der Erhaltungsstrategien der Baulastträger und Erfahrungen aus vorangegangenen Erhaltungsmaßnahmen verwendet (Haardt, 2003).

Nach der Analyse der möglichen Erhaltungsmaßnahmen auf Objektebene werden auf der Netzebene alle notwendigen Maßnahmen nach wirtschaftlichen Kriterien gereiht (Weller, 2021, S. 47). Durch die Implementierung des BMS können auf Netzebene anhand der gegebenen Bestandsinformationen, Zustandsinformationen und den finanziell zur Verfügung stehenden Mitteln ökonomische Entscheidungen getroffen werden. Dies bedeutet, dass entweder mit dem geringsten Mitteleinsatz ein bestimmter Bauwerkszustand erzielt wird oder mit einem festgelegten Mitteleinsatz der bestmögliche Zustand wiederhergestellt wird. Somit soll das sich in der Entwicklung befindende BMS dem Baulastträger helfen, Erhaltungsmaßnahmen systematisch zu planen und diese anhand ihrer Dringlichkeit zu priorisieren. Die Einteilung der Reihenfolge der Maßnahmen erfolgt durch wirtschaftliche Kriterien. So werden Maßnahmen priorisiert, welche eine gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis besitzen (Haardt, 2003).

## 7.6 Werkzeuge im Erhaltungsmanagement-Bayern

Für die Erhaltung der Straßen- und Brückeninfrastruktur in Bayern wurde der Prozesskreislauf des Erhaltungsmanagements entwickelt. Dieser beschreibt einen geschlossenen Kreislauf mit allen Aufgaben der Verwaltung, welche für die Erhaltung des geforderten Straßen- und Brückenzustands notwendig sind (Abbildung 24). Dazu zählen neben der Erfassung der Zustandsdaten die Bewertung und Vorhersagung der Netzqualität sowie die Planung notwendiger Erhaltungsmaßnahmen (Degelmann et al., 2011, S. 2–3).



Abbildung 24: Erhaltungsmanagementkreislauf (Degelmann et al., 2011)

Im Zuge der Erhaltungsplanung der Straßenoberfläche wird zur Unterstützung der systematischen Planung das Pavement-Management-System (PMS) in Pilotämtern angewandt. Dieses kann unterstützend bei der Entscheidung von notwendigen Erhaltungsmaßnahmen tätig sein (Degelmann et al., 2011, S. 3). Das in den Pilotämtern verwendete PMS wurde Mitte der 90er Jahre zur Unterstützung des Erhaltungsmanagements für Bundesautobahnen und Bundesstraßen entwickelt. Die grundlegende Struktur des PMS besteht aus acht Modulen (Abbildung 25) und ist seit dessen Entwicklung unverändert. Die Grundlage der Analysemechanismen des PMS sind die Systematiken zum Straßenerhalt, welche in der RPE-Stra 01 geregelt sind. Zur Verbesserung des Systems wurden seit der Entwicklung verschiedene Forschungsarbeiten in Auftrag gegeben, um die Systematiken der Zustandsentwicklungen und Schadensmechanismen zu erforschen (Stöckner et al., 2021, S. 17–18).



Abbildung 25: Module des PMS (Stöckner et al., 2021, S. 17)

Grundlage des PMS sind die durch die ZEB erfassten Bestandsdaten, auf Basis derer im Modul 1 homogene Abschnitte ermittelt werden, denen weitere Bestandsinformationen aus den Straßendatenbanken hinzugefügt werden. Diese ermittelten Daten bilden die Grundlage für alle weiteren Module des PMS. Im zweiten Modul werden abhängig von der Liegezeit die Zustandsentwicklung der Straßenbefestigung abgeschätzt. Dabei werden die Prognosen mit Hilfe von Verlaufsfunktionen für jeden in Modul 1 ermittelten Abschnitt bestimmt. Die Ermittlung der Zustandsentwicklungen beinhaltet zuerst eine objektspezifische Betrachtung der Abschnitte und eine anschließende Bestimmung der Maßnahmen auf Netzebene. Um diese Prognosen für die folgenden Module verwenden zu können, enthalten die Verlaufsfunktionen keine Erhaltungsmaßnahmen. Des Weiteren müssen verschiedene Informationen zu den

betrachten Abschnitten vorhanden sein, da sonst eine Ermittlung des Zustandsverlaufes nicht möglich ist. Diese notwendigen Informationen setzen sich aus Materialkennwerten, Einbaujahr, Bauweise und vielen weiteren Kennwerten zusammen. Auf Grundlage dieser in Modul 2 bestimmten Prognosen werden im Modul 3 die Abschnitte ermittelt, welche für das zu planende Erhaltungsjahr einen Zustandswert mit einer Note zwischen 3,5 und 4,5 erreichen. Im Anschluss daran erfolgt eine Schadensursachenanalyse (Modul 4) sowie die Bestimmung der verschiedenen darauf aufbauenden technischen Erhaltungsmaßnahmen (Modul 5). Diese verschiedenen Maßnahmen werden in Modul 6 anhand der Kosten-Nutzen-Analyse aufgereiht. Im Anschluss an die objektspezifische Maßnahmenbetrachtung werden auf Netzebene die besten Maßnahmen bestimmt (Modul 7). Anschließend werden die Ergebnisse der PMS-Analyse in einem Erhaltungsprogramm zusammengefasst (Modul 8) (Stöckner et al., 2021, S. 17–18).

Einige der für die Analyse der Zustandsprognose notwendigen Informationen sind nicht für alle Bestandsstraßen vorhanden (Stöckner et al., 2021, S. 17–18). So sind zum Beispiel die Informationen zum Straßenaufbau der Bestandsstraßen nur zum Teil in BAYIS enthalten und müssen für die restlichen Straßen mit hohem finanziellen Aufwand ermittelt werden (Degelmann et al., 2011, S. 3). Um diese Informationen für die Anwendung des PMS zu ermitteln, wurde im Rahmen eines Pilotprojektes in Bayern mit dem Traffic Speed Deflectometer (TSD) die Tragfähigkeit von Teilen des Straßennetzes ermittelt (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2021a).

Vor der Einführung des PMS in den Pilotämtern wurde als Alternative das System der Verbesserten Erhaltungsplanung (VEP) entwickelt. Dieses System ist an die vorhandene Datenlage angepasst, berücksichtigt neben den ZEB-Daten das Verkehrsaufkommen und findet flächendeckend Anwendung in den Bauämtern (Degelmann et al., 2011, S. 15). In Folge der stetig steigenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Straßen und verschiedener anderer Einflussfaktoren wurde das System der VEP von der Bayerischen Straßenbauverwaltung weiterentwickelt. Aktuell wird das Koordinierte Erhaltungs- und Bauprogramm (KEB) angewendet (Degelmann et al., 2011, S. 3–4), das auf den Grundlagen der VEP aufbaut (Degelmann et al., 2011, S. 15).

Die VEP verwendet die Ergebnisse der ZEB und bildet auf Grundlage der Zustandswerte 100 m lange, zusammenhängende Abschnitte. Für jeden Abschnitt wird die

Dringlichkeitsklasse mithilfe einer Matrix bestimmt. Im Anschluss daran werden die Abschnitte anhand vorgegebener Regeln zu mindestens 500 m langen Erhaltungsabschnitten zusammengefasst. Die Bildung der Erhaltungsabschnitte ermöglicht eine wirtschaftliche Vergabe der Baulose, da kürzere Abschnitte unwirtschaftlich sind. Für jeden Erhaltungsabschnitt wird im Anschluss die durchschnittliche Dringlichkeitsklasse über den gesamten Abschnitt ermittelt. Die Sortierung erfolgt anhand der ermittelten Dringlichkeitsklassen. Zusätzlich wird durch eine Gewichtung der Bedeutung des Streckenabschnittes für den Verkehr die Reihenfolge der Liste beeinflusst (Degelmann et al., 2011, S. 15–16).

Für ein verbessertes Erhaltungsmanagement ist zusätzlich zu dem Wissen über den aktuellen Zustand der Straßenbefestigung auch die Möglichkeit, auf Basis dieser Vorhersagen möglichen Zustandsentwicklungen zu tätigen, wichtig. Nach heutigem Wissen haben sowohl Materialeigenschaften, Verkehr, Klima, der Zeitpunkt der Zustandserfassung, der Zeitpunkt des optimalen Zustandes und die durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen einen Einfluss auf die Zustandsentwicklung der Straßenbefestigung. Aus diesen Informationen können mit stochastischen Verfahren Zustandsprognosen ermittelt werden. Dies ist nicht für jeden Zustandswert mit Hilfe der Prognosen möglich. Im Jahr 2007 wurden erstmals die Ergebnisse der ZEB-Messungen verwendet, um die Richtigkeit der Verhaltensfunktionen zu überprüfen. Seit 2008 wird an der Verwendung von neuronalen Netzwerken zur Vorhersage der Zustandswerte von Straßenbefestigungen gearbeitet (Weller, 2021, S. 30–32).

Das System der KEB fasst alle Informationen der Straßen- und Ingenieurbauwerke zusammen und nutzt zur Erstellung der Excel-Liste alle vorhandenen Daten der ZEB, VEP und der Bauwerksprüfung. Die Excel-Liste ist die Grundlage der KEB in allen Bauämtern. Sie beinhaltet Maßnahmenvorschläge, welche auf Grundlage der VEP erarbeitet wurden. Seit 2010 erfolgt die Darstellung der VEP-Listen in BAYSIS (Degelmann et al., 2011, S. 19–21).



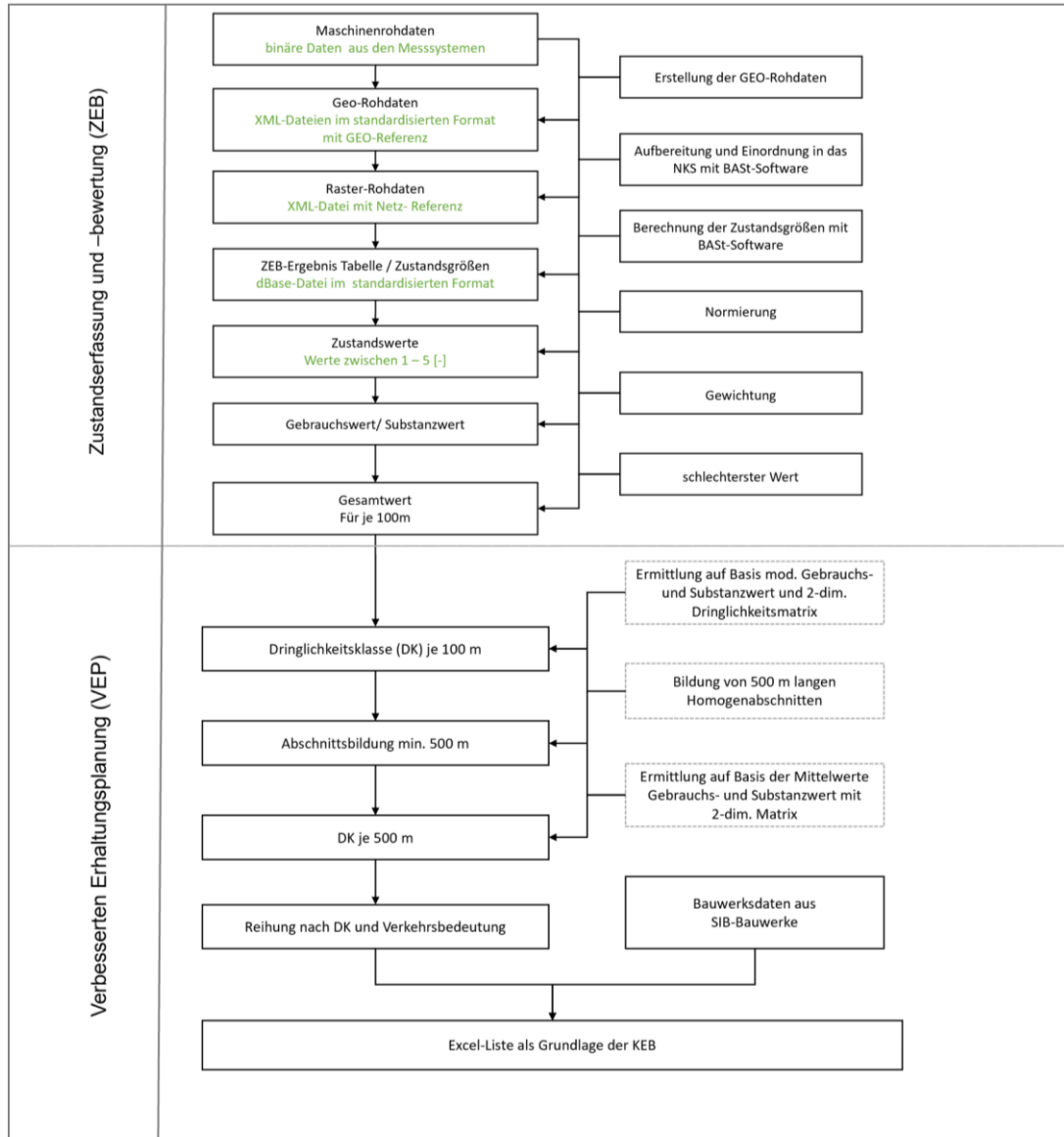


Abbildung 26: Ablauf der ZEB und Datenverarbeitung (eigene Darstellung nach (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022; Degelmann et al., 2011; König et al.))

## 7.7 BAYSIS als zentrale Dateninformationsquelle

Die zentrale Dateninformationsquelle der Bayerischen Straßenbauverwaltung ist das Bayerische Straßeninformationssystem (BAYSIS). BAYSIS ermöglicht es, durch eine fächerübergreifende Vernetzung von Fachinformationen auf Grundlage einer eindeutigen Netzzuordnung die Programmvietfalt für Verwaltungsaufgaben der Straßenbauverwaltung zu reduzieren (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2022b). Neben der Bereitstellung von Informationen für Verwaltungsaufgaben können Bürger über das interaktive Kartenfenster auf verschiedene Informationen zugreifen (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2022b).

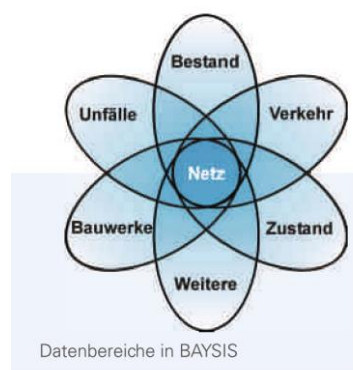


Abbildung 27: Datenbereich in BAYSIS (Zentralstelle Straßeninformationssysteme (ZIS) bei der Landesbaudirektion Bayern, 2019)

Kernstück von BAYSIS ist die Verknüpfung von straßenbezogenen Daten aus verschiedenen Quellen des überörtlichen Straßennetzes des Freistaates Bayern. In BAYSIS werden die Daten der in Abbildung 27 dargestellten Themen über die Stationierung des Straßennetzes verknüpft. Es sind Informationen zum Bestand der Straße sowie Unfalldaten, Verkehrsdaten, Zustandsinformationen und Bauwerksinformationen stationsbezogen gespeichert (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2022b). Die stationsbezogene Verknüpfung ermöglicht es, Daten und Messergebnisse eindeutig einem realen Straßenabschnitt zuzuordnen und schafft somit ein zweidimensionales digitales Abbild des realen Straßennetzes (Zentralstelle Straßeninformationssysteme (ZIS) bei der Landesbaudirektion Bayern, 2019). Zur Darstellung, Verortung und eindeutigen Speicherung der Informationen wird das Netzknotensystem des bundesweite Standards Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c, S. 18) verwendet. Durch den Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA) können die Daten über eine einheitliche Schnittstelle exportiert werden (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2022b).

Im Kartenfenster von BAYSIS steht dem Anwender eine kartografische Darstellung des Straßennetzes mit den verschiedenen Informationen zur Verfügung. Das Geoinformationssystem ist aus verschiedenen Layer aufgebaut, welche aus den fachlichen Inhalten bestehen und je nach Bedarf abgerufen werden können (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2022b). Die gleichzeitige Darstellung der verschiedenen Layer ermöglicht ein Verschneiden der Informationen und eine Einbindung von Geobasisdaten aus verschiedenen Quellen (Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren, für Bau und Verkehr, 2015, S. 12). Seit 2010 ist es möglich, mit Hilfe von BAYSIS die Ergebnisse des „koordinierten Erhaltungs- und Bauprogrammes“ (KEB), welche durch die Bauämter in einer Excel Tabelle verwaltet werden, visuell darzustellen und abzurufen (Degelmann et al., 2011, S. 20).

### ASB-Datenschema

Das Straßennetz und alle in BAYSIS enthaltenen Informationen werden nach der Stationierungsrichtlinie und den fachlichen Festlegungen zur Datenerfassung der ASB strukturiert und gespeichert. Der Netzbezug der Informationen erfolgt durch die Zuweisung von Stationierungspunkten oder -bereichen (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2013). Durch eine durchgehende Anwendung der ASB zur Strukturierung und Aufnahme der Daten und Informationen kann eine umfassende Sammlung von Infrastrukturdaten für die Verwaltung in einem Erhaltungsmanagementprogramm zur Verfügung gestellt werden (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c, S. 5). Die Vorgaben der ASB sind in verschiedene Segmente gegliedert. In dem Segment Kernsystem wird das Netzknoten-Stationierungssystem definiert und weitere Segmente standardisiert (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c, S. 8).

### Straßennetz

Zur exakten Verortung aller aufgenommenen Datensätze muss die Straßenstruktur in einem einheitlichen Format abgebildet werden. Dazu wird die Straße in Abschnitte unterteilt, welche durch die Netzknoten (NK) festgelegt werden. Innerhalb des Abschnitts beginnt die Stationierung an dem Anfangs-NK und endet mit dem End-NK des Abschnittes (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c, S. 18). Auf Basis dieses NK-Systems kann das Straßennetz auch aus verkehrstechnischer Sicht durch die Beschreibung mittels Planungselemente aufgenommen werden (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c, S. 18).

Die Stationierung der Straße erfolgt nach den in der ASB festgelegten Regeln. Jede Straße erhält eine metrische Stationierung, deren aufsteigende Richtung abhängig von der Hauptverlaufsrichtung der Straße ist (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c, S. 19–20). Die Lage eines Netzknoten ergibt sich durch die planfreie oder plangleiche Kreuzung von Straßen mit der abzubildenden Straße. Innerhalb eines Netzknoten können mehrere Nullpunkte enthalten sein. Der Anfang und das Ende eines Abschnittes ist jeweils in einem Nullpunkt (L. Liu, Hagedorn & König, 2021). Zusätzlich zu den Regelfällen der Netzknotenzuordnung sind einige Sonderfälle anzuwenden, die in dem ASB-Kernsystem (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c) näher erläutert sind. Jeder Netzknoten ist durch eine eindeutige Bezeichnung identifizierbar. Diese besteht aus einer 7-stelligen Nummer und ist anhand eines Beispiels in Abbildung 28 dargestellt.

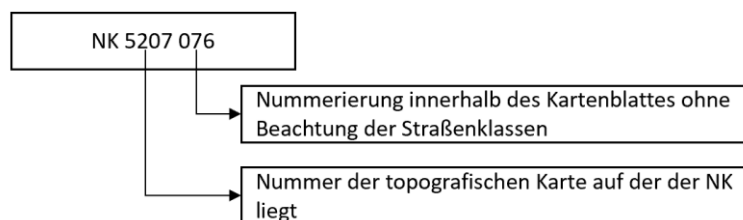


Abbildung 28: Netznotenbezeichnung (eigene Darstellung nach (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c))

Jeder Abschnitt, der an einem Nullpunkt beginnt und endet, wird durch eine interne Stationierung unterteilt und näher beschrieben (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c). Finden infolge einer baulichen Maßnahme Veränderungen an der Lage der Netzknoten statt, so bleiben diese in vielen Fällen gleich. Nur in bestimmten Fällen muss das Netzknotensystem angepasst werden. Diese sind in der ASB festgelegt (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c, S. 90). Auch die Lage der Nullpunkte wird nur angepasst, sofern die Verschiebung außerhalb des Toleranzbereiches liegt und aus wirtschaftlicher Sicht notwendig ist. Ansonsten wird die Lage des Nullpunktes durch eine neue Einmessskizze dokumentiert.

## Räumliche Sachverhalte

Zur Beschreibung räumlicher Sachverhalte werden die Informationen auf einen Punkt oder eine Strecke im Netz bezogen. Somit können viele verschiedene Informationen dem Netz zugeordnet werden (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c, S. 59). Die Lage einer Punktinformation kann mit folgender Bezeichnung (Abbildung 29) eindeutig identifiziert werden.

| Straßenpunkt        |                                |            |          |
|---------------------|--------------------------------|------------|----------|
| Feld                | Erläuterung                    | Datentyp   | Qualität |
| Abschnitt / Ast (P) | Bildung aus Von-NP und Nach-NP | Alph. (16) |          |
| Station (P)         | Angabe in Kilometer            | Num. (2.3) | Q 2.1    |

Abbildung 29: Tabelle zur Benennung einer Punktinformation (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c)

Durch die Verwendung von zwei Punkten kann eine Streckeninformation abgebildet werden. Ein Beispiel für die Visualisierung dieser Information ist in Abbildung 30 dargestellt.



In obiger Notation wäre diese Strecke gegeben als:

|                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| Von-Abschnitt/Ast | 5108 072 O 5208 101 A |
| Von-Station       | 0,200                 |
| Bis-Abschnitt/Ast | 5208 059 O 5207 061 O |
| Bis-Station       | 0,300                 |

Abbildung 30: Benennung eines Streckenabschnittes (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c)

Durch diese Lokalisierungsmethoden können alle Elemente eindeutig einer Stelle im Netz zugeordnet werden und durch das Anfügen von weiteren Schlüsseln aus den jeweiligen Schlüsselstabellen näher beschrieben werden. Ein Bohrkern wird beispielsweise durch eine Punktlokalisierung auf dem Netz verortet und dessen Lage durch den Abstand zur Bestachse spezifiziert (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018b, S. 15).

## 7.8 SIB-Bauwerke

Zur Dokumentation der Brückenzustandsdaten wird das Datenmodell der Anweisung Straßeninformation-Bank, Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING) verwendet. Dieses ist in SIB-BW implementiert und speichert die Daten in einem relationalen Datenbanksystem. „SIB-Bauwerke bestehen aus einer relationalen Datenbank, der Clientsoftware, der Verbindung zwischen Client und Datenbank mittels ODBC-Treiber, dem Grafik- und Dokumentenarchiv (Bilder-, Plan-, Dokumenten-Dateien) und dem Wissensarchiv (Schlüsseldateien)“ (WPM-Ingenieure, 2019, S. 9). In dem Grafik- und Dokumentenarchiv können Benutzer verschiedene Dokumente in einer voreingestellten Struktur abspeichern (WPM-Ingenieure, 2019, S. 11). Der Wissenskatalog (Schlüsseldateien) wird durch die ASB-ING definiert, fortlaufend aktualisiert und erweitert (WPM-Ingenieure, 2019, S. 21). Jedes in der ASB-ING definierte Objekt wurde in SIB-Bauwerke in einer Tabelle implementiert, in die Bauwerks- und Schadensdaten eingetragen werden (WPM-Ingenieure, 2019, S. 61). In den Masken können verschiedene Datentypen in Textform, numerischer Form und dem Schlüsselformat eingetragen werden (WPM-Ingenieure, 2019, S. 62).

Die Informationen in SIB-Bauwerke werden in mehr als 60 Tabellen gespeichert, die sich in Konstruktions- und Zustandsdaten unterteilen. Sie werden innerhalb der Datenbank nach ihren logischen und hierarchischen Abhängigkeiten gespeichert. So werden einem Bauwerk mehrere Teilbauwerke zugewiesen. Es ist in SIB-BW nur möglich, entlang dieser hierarchischen Strukturen zu navigieren (WPM-Ingenieure, 2019, S. 63).

Die Konstruktions- und Prüfdaten in SIB-BW können für Bearbeitungszwecke als CAP-Format exportiert werden (WPM-Ingenieure, 2019, S. 49–52) sowie beim Spezialtransfer durch das DBF-Format oder das OKSTRA-Format an den Bund und an BMS-Programme weitergegeben werden (WPM-Ingenieure, 2019, S. 52).

### ASB-ING

In der ASB-ING ist die Erfassung der Bauwerksdaten von Ingenieurbauwerken geregelt. Es werden Angaben zu der Erfassung von Konstruktions-, Prüfungs- und Verwaltungsdaten gemacht. Die während der Prüfung aufgenommenen Daten werden einzeln nach den verschiedenen Sicherheitskriterien Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit in Anlehnung an die ASB-ING bewertet. Aus diesen erfassten Daten wird durch SIB-BW eine Zustandsnote für jedes Teilbauwerk ermittelt (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2013, S. 4).

Zur eindeutigen Zuordnung der Bauwerksdaten wird jedes Bauwerk mit einer 7-stelligen Bauwerksnummer bezeichnet. Die ersten vier Stellen beziehen sich auf die Kartennummer, auf der das Bauwerk verortet ist. Innerhalb einer Karte werden die Bauwerke unabhängig von der Straßenklasse, von der sie abhängig sind, fortlaufend nummeriert. Die dreistellige Nummer wird der Kartennummer angehängt (Bsp. 6547 105) (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2013, S. 5). Jedes Brücken- und Tunnelbauwerk besteht aus mindestens einem Teilbauwerk, das zur Identifikation jeweils mit einer Teilbauwerksnummer bezeichnet wird. Dazu wird die Bauwerksnummer um den Zusatz eines Buchstabens oder eine Ziffer erweitert. Die Wahl der Bezeichnung ist abhängig von der Bildung der Gesamtlänge einer Bauteilart (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2013, S. 6). Die für jedes Bauteil getrennt zu erfassenden Informationen werden je nach Vorgabe in numerischer oder alphanumerischer Form oder mittels der in der ASB-ING vorgegebenen Schlüssel-formate erfasst (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2013, S. 12–18).

## 7.9 OKSTRA

Der Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA) wurde im Auftrag der BASt entwickelt und ist an die Anforderungen der deutschen Straßenverwaltungsbehörden und Gesetzgebung angepasst. Das Datenmodell wurde entwickelt, um Informationen zum Themenbereich Straße einheitlich auszutauschen und notwendige Prozesse zu verbessern. Der Standard umfasst ungefähr 14 000 Attribute und ist einer der umfangreichsten verwendeten Standards weltweit (Beetz et al., 2018). Das OKSTRA-Datenmodell wird von einigen Softwareherstellern als Datenaustauschformat verwendet und ermöglicht somit den verlustfreien Austausch zwischen diesen Softwareprodukten (BASt, 2022c).

Mithilfe des in XML modellierten und im UML-Schema abgebildeten Datenmodells OKSTRA können geometrisch-semantische Informationen von Straßen herstellerneutral und offen ausgetauscht werden (Beetz et al., 2018). Der OKSTRA-Katalog umfasst verschiedene Pakete, darunter den Entwurf, Entwässerung, Straßennetz- und Straßenzustandsdaten (Beetz et al., 2018; Radenberg, Müller, König, Hagedorn et al., 2021). Das OKSTRA-Modell ermöglicht es, die während des Lebenszyklus anfallenden Straßendaten durch typbasierte Modelle darzustellen und zwischen

verschiedenen Softwareprodukten auszutauschen (Radenberg, Müller, König & Hagedorn, 2021, S. 15–16; Weise, Schmidt & Hettwer, 2018).

Das OKSTRA-Modell umfasst verschiedene Arten von Klassen: Objektarten, elementare Datentypen, komplexe Datentypen und Schlüsseltabellen (Beetz et al., 2018). Zwischen den verschiedenen Klassen existieren nur zwei zulässige Beziehungen: die Vererbungsbeziehung und die Assoziation. Bei der Vererbung übernimmt die erbende Klasse alle Attribute und Assoziationen der vererbenden Klasse. Das OKSTRA-Modell ermöglicht nicht nur eine einfache Vererbung; eine Klasse kann auch von zwei anderen Klassen erben (Hettwer, 2019).

Die Objektart *OKSTRA\_Objekt* vererbt direkt alle Attribute an dessen Nachfolger. Darunter ist auch das Attribut *OKSTRA\_ID*, welches zur eindeutigen Identifikation des Objektes genutzt wird (Hettwer, 2019). Ein großer Teil der in OKSTRA enthaltenen Attribute sind Textfelder, deren Inhalt durch die Schlüsseltabellen festgelegt wird. Diese sind eine Besonderheit vom OKSTRA. Sie ermöglichen aus rein technischer Sicht eine einfache Erweiterung des Modells. Durch den Datentyp der Schlüsseltabellen ist es möglich, Einträge aus bereits definierten Wertetabellen zu übernehmen. Das Objekt besitzt zwei oder mehr Attribute mit dem Datentyp `CharacterString`, mit dem der Rollename „Kennung“ und weitere der „Kennung“ zugeordnete Werte angegeben werden. Diese Besonderheit entspricht nicht der Standardmodellierung in UML und erschwert die semantische Kopplung mit anderen Datenmodellen (Beetz et al., 2018; Hettwer, 2019).

Ähnlich verhält sich dies auch mit den Fachbedeutungslisten, welche je nach Bundesland unterschiedlich definiert sind. Diese ermöglichen durch die Zuweisung einer eindeutigen ID an ein Geometrieobjekt eine Konkretisierung dieses Objektes. Es können jedoch zeitgleich unterschiedliche Versionen der Fachbedeutungslisten verwendet werden, wodurch es zu Problemen beim Datenaustausch zwischen verschiedenen Bundesländern kommen kann (Beetz et al., 2018; Radenberg, Müller, König, Hagedorn et al., 2021).

Im Folgenden werden Teile des OKSTRA-Paketes *S\_Straßenzustandsdaten* als UML-Diagramm dargestellt und erläutert. Dies ist nur ein sehr kleiner Teil des umfangreichen Datenmodells und enthält Objekte, um Straßenzustandsdaten und deren Erfassung abzubilden.



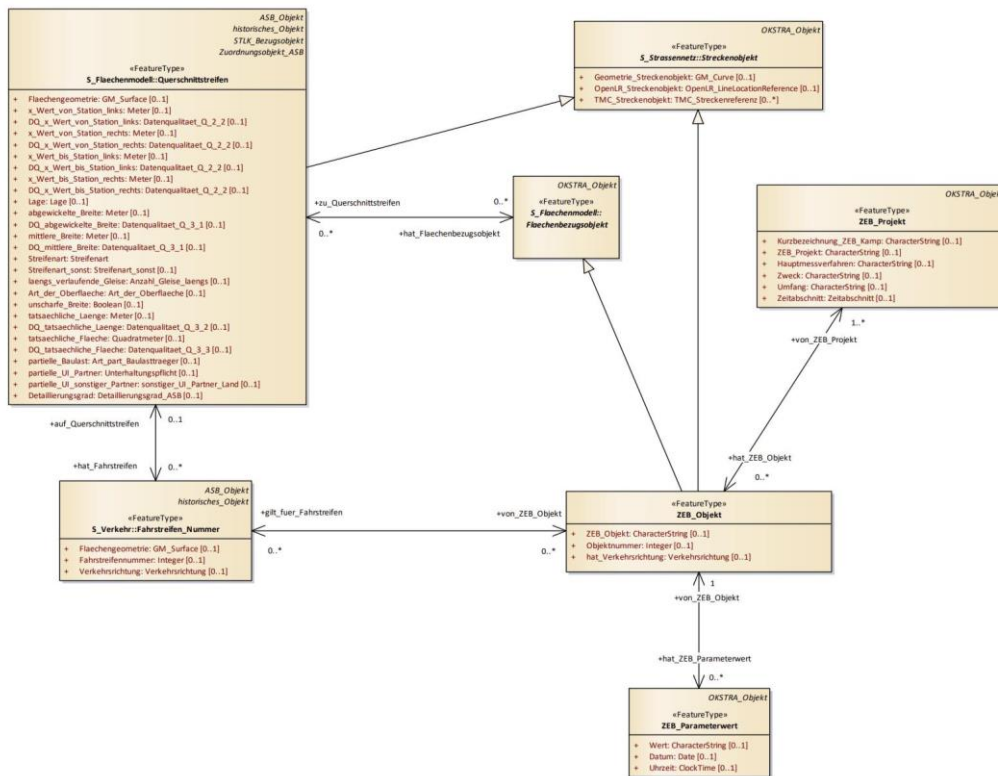


Abbildung 31: Straßenzustandsdaten (OKSTRA-Pflegestelle)

Das Paket *S\_Straßenzustandsdaten* wird durch mehrere UML-Modelle beschrieben. In Abbildung 31 ist eines dieser Diagramme dargestellt. Das wichtigste Element ist das *ZEB\_Objekt*, das einem Messabschnitt der ZEB mit einer achsbezogenen Ausdehnung entspricht, die durch das Streckenobjekt beschrieben wird. Die Ausdehnung in Querrichtung wird durch die Anzahl der Fahrstreifen bestimmt. Für besondere Anwendungsfälle kann das *ZEB\_Objekt* auch über ein Flächenbezugsobjekt verortet werden. Durch die Objekte- und Projektparameter werden weitere Attribute mit dem *ZEB\_Objekt* verknüpft.

Das Paket *S\_Adminstration* enthält Objekte zur Beschreibung verwaltungstechnischer und erhaltungstechnischer Informationen. Die Grundlage der Modellierung ist die ASB, in der Eigenschaften definiert sind, die bei allen in SIB-BW enthaltenen Objekten angewandt werden können. Zur Abbildung dieser Objekte wurde im OKSTRA das *ASB\_Objekt* eingeführt, das an alle mit der ASB modellierten Objekte vererbt.

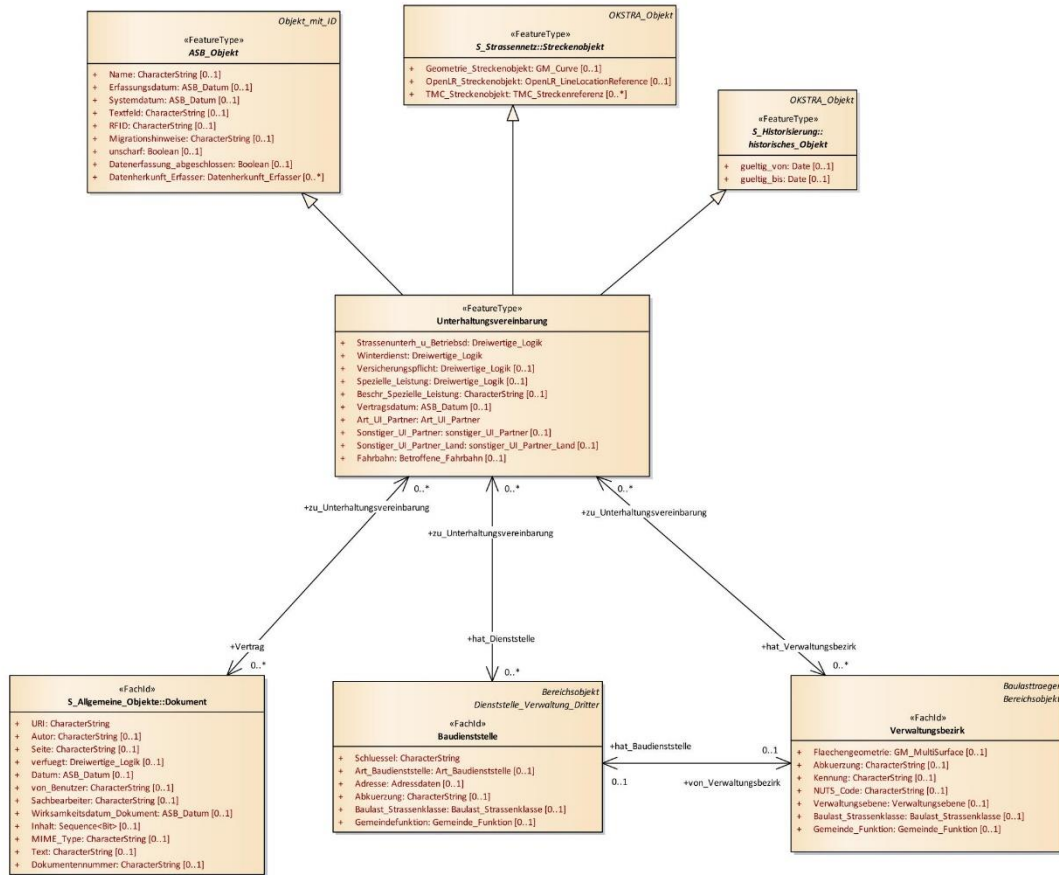


Abbildung 32: Unterhaltsvereinbarung (OKSTRA-Pflegestelle)

In Abbildung 32 ist die Modellierung der Unterhaltsvereinbarung, welche die Verantwortlichkeiten für ein Bauwerk beschreiben, dargestellt.

## 8 Analyse des Bestandsystems und mögliche Optimierungen

Die wichtigsten Elemente des Erhaltungsmanagementsystems der bayerischen Straßenbauverwaltungen werden zu Beginn des erarbeiteten Optimierungskonzeptes nochmals kurz zusammengefasst. Im Anschluss daran wird das System anhand der in der Literatur verwendeten Maturity Models in Hinblick auf Übereinstimmungen mit einem DT und dessen Bestandteilen analysiert.

### 8.1 Bestandssystem

Das bestehende System des Erhaltungsmanagements in Bayern ist aus zwei getrennten Systemen aufgebaut. BAYSIS ist die länderspezifische zentrale Dateninformationsquelle für alle Daten mit direktem Straßenbezug, in dem das bayerische Straßennetz als 2D-Streckenband abgebildet ist. Die enthaltenen Informationen besitzen einen direkten Netzbezug durch das Netzknotenstationierungssystem, welches im ASB-Kernsystem definiert ist. Das Kartenfenster von BAYSIS ermöglicht eine gezielte Visualisierung aller enthaltenen Informationen. Die abgebildeten Informationen sind mit dem festgelegten Datenformat der ASB modelliert.

Alle Informationen zu den Ingenieurbauwerken sind in der deutschlandweiten einheitlichen Datenbank SIB-BW gespeichert und werden auf Grundlage der Vorgaben der ASB-ING modelliert. Dabei werden die während der Bauwerksprüfung erfassten Schäden nicht graphisch, sondern in Tabellenform gespeichert, wodurch die Lage der Schäden teilweise schwer nachvollziehbar ist. Zum Teil werden in dem Programm 2D-Skizzen zur Verortung der Schäden an den Teilbauwerken hinterlegt. In BAYSIS werden nur im geringen Umfang Informationen zu den Ingenieurbauwerken bereitgestellt und es besteht keine direkte Verbindung zwischen den beiden Systemen. Aus diesem Grund werden die beiden Systeme zuerst getrennt in Hinblick auf ihre Einordnung als digitaler Zwilling betrachtet.

Auf Grundlage der in den beiden Systemen enthaltenen Zustandswerten werden im Anschluss daran mit Hilfe der Bauwerk-Management-Systeme (BMS) und Pavement-Management-Systeme (PMS) Analysen zu den Zustandsentwicklungen der Schäden generiert. Diese Ergebnisse sind die Basis für die finanzielle Planung der Erhaltungsmaßnahmen.

## 8.2 Bewertung des Bestandsystems

### Definitionsanalyse

Ein digitaler Zwilling ist nach VanDerHorn & Mahadevan (2021) ein virtuelles Abbild eines realen Systems, welches Informationen mit Hilfe einer bidirektionalen Verbindung zwischen dem realen und dem virtuellen System austauscht. Legt man diese Definition zur Bewertung der beiden Systeme zu Grunde, sind beide Systeme keine DTs. Sie bilden zwar jeweils unabhängig voneinander Teile der bayerischen Infrastruktur ab, jedoch ist kein bidirektionaler Informationsaustausch zwischen den beiden Systemen vorhanden. Vielmehr werden in vorgegebenen Updatezyklen Zustandsinformationen vom realen System in die digitale Ebene übertragen. Auf Grund der physischen Gegebenheiten des Bauwesens wird die geplante Zustandsänderung des digitalen Zwillings erst durch eine manuelle Anpassung in Form einer Erhaltungsmaßnahme in der realen Welt umgesetzt. In der Literatur erfolgt neben der Einordnung der Systeme durch die allgemeine Definition nach VanDerHorn & Mahadevan (2021) eine weitere Unterscheidung von DTs anhand der Verbindung zwischen dem virtuellen Abbild und dessen realen Gegenstück. DTs, deren Informationsaustausch nicht automatisch bidirektional stattfindet, werden dabei als „digitaler Schatten“ bezeichnet (Kritzinger et al., 2018). Nach dieser Beschreibung erfolgt der Austausch zwischen den beiden Systemen nur in eine Richtung automatisch. So werden zwar die Zustandsänderungen des realen Systems in festgelegten Abständen automatisch ins Virtuelle übertragen, jedoch erfolgt keine automatische Anpassung des realen Systems in Folge einer Veränderung des virtuellen Zwillings. Diese Anpassung des Zustandes erfolgt erst in Folge von manuell eingeleiteten Maßnahmen (Kritzinger et al., 2018). Diese charakteristischen Merkmale des Informationsaustausches eines „digitalen Schattens“ beschreiben die Updatemechanismen der beiden Erhaltungsmanagementsysteme am besten. Die Aktualisierung des virtuellen Systems erfolgt erst nach den durchgeführten Inspektionsmaßnahmen: Bei dem System SIB-BW erfolgt die Aktualisierung im Anschluss an die durchzuführenden Hauptprüfungen und in BAYSIS werden die Informationen nach der ZEB-Messung in das System übertragen. Auf Grundlage dieser enthaltenen Zustandsinformationen werden manuell Entscheidungen zu Instandsetzungs- und Erhaltungsmaßnahmen geplant, welche im Anschluss manuell von den zuständigen Firmen ausgeführt werden. Demzufolge entsprechen die beiden Bestandssysteme nicht der allgemeinen Definition eines DTs nach VanDerHorn & Mahadevan (2021). Sie besitzen jedoch die charakteristischen Merkmale eines „digitalen Schattens“.

Davila Delgado & Oyedele (2021) veröffentlichten drei Verwendungsmöglichkeiten des Begriffes DT im Baukontext. (1) Zum einen kann der Begriff in diesem Kontext verwendet werden, um ein realistisches Abbild von Bauwerken, Prozessen und Systemen zu beschreiben. Demzufolge können in diesem Kontext die beiden Systeme nur zum Teil als DT bezeichnet werden: Beide Systeme sind nur im geringen Umfang ein realistisches Abbild eines Bauwerks. Sie sind eine abstrakte Darstellung des realen Systems mit einem niedrigen LOD. In dieser Abbildung sind jedoch alle Zustandswerte und Schäden der realen Systeme enthalten. (2) Zum anderen kann der Begriff DT im Baukontext verwendet werden, um die Erweiterung von BIM durch Datenerfassungssysteme und Analysesysteme zu beschreiben (Davila Delgado & Oyedele, 2021). Auch diese Definition des Begriffs DT erfüllen die beiden Systeme nur zum Teil: Die Grundlage der beiden Systeme sind keine BIM-Modelle. Beide Systeme wurden für die Speicherung, Verarbeitung und Visualisierung der Zustandswerte der Straßeninfrastruktur entwickelt. Die Zustandsdaten innerhalb dieser Systeme werden durch Messsysteme und Inspektionen erfasst, die im Anschluss analysiert werden. (3) Die dritte mögliche Verwendung des Begriffs DT im Kontext der Bauindustrie beschreibt ein geschlossenes digital-physisches System, welches in der Betriebsphase eines Bauwerks verwendet wird. Da beide Systeme explizit für die Anwendungen in der Betriebsphase entwickelt wurden, können anhand dieser Begriffsverwendung die Systeme als DTs bezeichnet werden.

Im Folgenden werden die beiden Systeme als DTs bezeichnet, da die physischen Gegebenheiten des Bausektors keine automatische bidirektionale Verbindung zwischen dem realen und dem virtuellen System ermöglicht. Der Zustand des realen Systems kann zwar automatisch erfasst werden, jedoch müssen die Erhaltungsmaßnahmen immer von den zuständigen Ingenieuren geplant und von Fachfirmen ausgeführt werden. Somit ist das bestehende System nach der Literatur ein „digitaler Schatten“ (Kritzinger et al., 2018), jedoch bestehen nur begrenzte Möglichkeiten das System zu einem DT nach der allgemeinen Definition von VanDerHorn & Mahadevan (2021) weiterzuentwickeln. Die beiden Systeme wurden explizit für die Verwendung in der Betriebsphase der Bauwerke entwickelt und nutzen zur Erfassung der Zustandsdaten verschiedene Erfassungs- und Verarbeitungssysteme. Mit Hilfe dieser bilden sie die Zustände der realen Objekte in abstrakter Form ab. Somit kann der Begriff des DTs nach den Definition von Kritzinger et al. (2018) auf die beiden Bestandssysteme angewendet werden.

Zusätzlich zu der Unterscheidung der verschiedenen Verwendungen des Begriffs des DTs im Baukontextes und der genauen Spezifikation des Informationsaustausches ist der Umfang der abgebildeten Wirklichkeit entscheidend für die Bezeichnung des DTs. Beschreibt der DTs ein reales Objekt vollständig, welches aus mehreren funktionalen Komponenten besteht, so kann dieser DT als ein Asset Twin (Objektzwilling) bezeichnet werden (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 30). Das System SIB-BW beinhaltet eine Abbildung aller Brücken- und Tunnelbauwerke, welche in Deutschland im Infrastrukturnetz vorhanden sind. Jedes dieser Bauwerke, welche wiederum aus weiteren funktionalen Bestandteilen zusammengesetzt sind, werden in dem System SIB-BW durch in Tabellenform gespeicherte Informationen beschrieben. Diese funktionalen Bestandteile beschreiben die Teilbauwerke, aus denen jedes Bauwerk besteht und welche nach der Vorgabe der ASB-ING hierarchisch gegliedert sind (WPM-Ingenieure, 2019, S. 63). Das System BAYSIS bildet das gesamte Straßennetz des Freistaates Bayern mit sämtlichen Informationen, welche einen Straßenbezug besitzen, ab (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2022b). Diese Informationen werden in dem System in unterschiedlichen Layer dargestellt und können von den Benutzern unabhängig voneinander betrachtet werden. Die Layer bilden folglich funktionale Teile des Gesamtsystems ab. Somit ist auch das System BAYSIS ebenso wie SIB-BW eine Objektzwilling, welche Teile des Infrastrukturnetzes in Bayern beschreiben.

DTs werden in der Literatur meist mit weiteren Technologien der Industrie 4.0 gleichgesetzt. Diese Technologien besitzen zwar Ähnlichkeiten zu dem System des DTs, unterscheiden sich jedoch in einigen wichtigen Punkten von ihm (Davila Delgado & Oyedele, 2021), wie bereits in Kapitel 3.2 erläutert wurde. Erst eine Kombination dieser Technologien stellt einen vollwertigen DT dar. Die beiden bestehenden DTs beinhalten bereits einiger dieser Technologien. So verwendet das System BAYSIS eine 2D-Karte zur Visualisierung der Ergebnisse, die aus verschiedenen Quellen stammen und mit Hilfe verschiedener Analyseverfahren verarbeitet werden. Auch SIB-BW verwendet mathematische Modelle zur Verarbeitung und Berechnung der enthaltenen Zustandsnoten. Des Weiteren werden zum Teil bereits die in den DTs enthaltenen Zustandsgrößen verwendet, um mit Hilfe von Simulationsmodellen und Verlaufskurven in den beiden Management-Systemen Prognosen zu den zukünftigen Entwicklungen zu tätigen. Als Grundlage für eine einheitliche Implementierung von DTs in dem gesamten Bau-sektor wurden von Digital Built Britain die „Gemini Principles“ entwickelt (Bolton et al.,

2018). Diese Richtlinien sind sehr allgemein gehalten, um auf alle Anwendungsfälle in der Baubranche angewendet werden zu können, und werden zur Bewertung der Qualität der bestehenden Systeme verwendet. Die beiden Bestandssysteme des Erhaltungsmanagements in Bayern erfüllen die Leitlinien, welche in den „Gemini Principles“ veröffentlicht wurden: (1) Nach der ersten Leitlinie der „Gemini Principles“ muss die Implementierung und die Verwendung des DTs der Öffentlichkeit einen Vorteil erbringen und aus dessen Anwendung müssen neue Erkenntnisse für den Bausektor generiert werden können. (Bolton et al., 2018). Mit Hilfe der beiden Bestandssysteme werden notwendige Informationen zu den Zuständen der Schäden an den bayerischen Infrastrukturbauwerken dargestellt. Auf Grundlage dieser Informationen werden ökonomische Entscheidungen über Erhaltungsmaßnahmen getroffen. Die Durchführung dieser Maßnahmen gewährleistet die Sicherheit des Straßennetzes und deren Benutzer. Des Weiteren können die über viele Jahre gesammelten Zustands- und Bestandsdaten verwendet werden, um mit Hilfe der zum Teil fest implementierten Managementsysteme (PMS und BMS) Analysen zur Schadensentwicklung zu ermitteln, welche als Grundlage für weitere Forschungen in der Bauindustrie verwendet werden können. Somit tragen die DTs zu einer Verbesserung der Materialforschung bei.

(2) Eine weitere Anforderung, welche die DTs nach den Leitlinien der „Gemini Principles“ erfüllen müssen; ist die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Systeme (Bolton et al., 2018). Die Daten der Bestandssysteme, werden anhand festgelegter Regeln und Normen erfasst und exakt nach festgelegten Datenstandards strukturiert abgebildet. Durch diese klare Definition der Datengenerierung und des Datenaustausches besitzen die Daten eine hohe Zuverlässigkeit und es ist möglich die Daten mithilfe des etablierten Datenaustauschformates OKSTRA an weitere Planungssysteme weiterzugeben. Zusätzlich werden alle verwendeten Regelwerke, Normen und Datenformate stetig weiterentwickelt und verbessert.

(3) Die letzte Anforderung, welche an einen DT durch die „Gemini Principles“ gestellt wird, ist die Funktionalität und Effektivität des Systems (Bolton et al., 2018). Auch diese Anforderung erfüllen die beiden Bestandssysteme: Beide Systeme werden seit einigen Jahren effektiv für das Erhaltungsmanagement genutzt und werden stetig erweitert, um dessen Funktionalität zu verbessern. So werden zum Beispiel die noch nicht vollständig etablierten BMS und PMS stetig verbessert, um die Zuverlässigkeit der ermittelten Prognosen zu verbessern.

## Maturity Models

Um den Reifegrad der bestehenden DTs-Systeme zu bewerten und mögliche Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren, wurden zwei im Kapitel 3.5.3 vorgestellten Maturity Models verwendet. Das von Hamer et al. (2018) vorgestellte Modell unterscheidet zwischen drei Entwicklungsstufen. Der DT der ersten Stufe wird verwendet, um die Zustände eines Systems zu überwachen. In besonderen Fällen können auf Grundlage dieser Zustandsdaten Analysen durchgeführt werden. Die beiden Bestandssysteme erfüllen die Kriterien eines Typ 1 DTs. Sie sammeln und speichern jeweils getrennt voneinander die Zustände der Straßen- und Ingenieurbauwerke und können diese für die Analyse in den Managementsystemen zur Verfügung stellen. Die Analysemechanismen, welche in den Managementsystemen implementiert sind, können auch zur Vorhersage der Zustandsentwicklungen verwendet werden, auf deren Basis im Anschluss Pläne für das Erhaltungsmanagement erstellt werden. Demnach enthalten die beiden Bestandssysteme bereits ein Element der dritten Ebene dieses Maturity Models. Jedoch besitzen sie auf Grund der physischen Gegebenheiten der Bauindustrie keine bidirektionale Verbindung zwischen dem realen und dem virtuellen Zwilling. Da die angestrebte Weiterentwicklung nicht zwingend linear erfolgen muss und auch bereits Elemente aus einer höheren Entwicklungsstufen in einer niedrigeren Stufe implementiert sein können (Evans et al., 2019), müssen den bestehenden Systemen keine bidirektionalen Verbindungen hinzugefügt werden, um als DT der dritten Ebene bezeichnet werden zu können.

Das zweite Reifegradmodell wird explizit auf die Bauindustrie angewendet und beschreibt die Entwicklung von DTs in fünf Level (Arora & Tushir, 2019). Auch bei diesem Modell können die beiden DTs keinem Level eindeutig zugeordnet werden. So besitzen beiden Systeme verschiedene Elemente der ersten drei Level. Das System SIB-BW stellt eine Verbindung zwischen dem virtuellen und dem physischen Zwilling dar und ist durch begrenzte Funktionen gekennzeichnet (Level 1). Mit Hilfe der Zustandsdaten können in dem BMS Analysen und Vorhersagen zu den zukünftigen Zuständen getätigt werden und es kann die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks bewertet werden (Level 2 und Level 3). Das System BAYSIS verwendet zur Beschreibung der realen Zustände eine 2D-Karte (Level 1). Auch dieser DT besitzt eine Erweiterung, mit dessen Hilfe im geringen Umfang Analysen und Vorhersagen zu den Zustandsentwicklungen und der Lebensdauer der Bauwerke getätigt werden können (Level 2 und



Level 3). Beide Systeme erfüllen jedoch nicht alle Kriterien, welche für die Einordnung der DTs als Level 3 DT notwendig sind.

Anhand der Bewertung der beiden Systeme mit Hilfe dieser beiden Maturity Models kann festgestellt werden, dass beide Systeme nicht nur einfache DTs sind. Sie besitzen bereits Erweiterungen, welche zum Erreichen eines höheren Entwicklungsstandes notwendig sind. Jedoch weisen sie auch Entwicklungslücken auf, welche als Grundlage für mögliche Optimierungsvorschläge verwendet werden und im Folgenden genauer analysiert werden. Im Anschluss an die Analyse wird zusätzlich ein Optimierungsvorschlag zur Verbesserung der Systeme vorgestellt.

### Klassifizierung von DTs

Zur genaueren Beschreibung eines DTs werden in der Literatur verschiedene Kriterien verwendet. Der Erstellungszeitpunkt des DTs kann Auskunft darüber geben, in welchem Umfang Informationen in diesem enthalten sind. Wurde der DT bereits in einer frühen Phase der Planung oder des Betriebs entwickelt, können viele aktuelle Informationen zu dem Bauwerk in dem System gespeichert werden (Evans et al., 2019). Die beiden Systeme wurden aufgrund der Altersstruktur des bayerischen Infrastrukturnetzes, welches zum Großteil in den 60er und 70er Jahren erbaut wurde (Degelmann et al., 2011), erst nach der Fertigstellung eines großen Teiles der Straßeninfrastruktur erstellt. Anhand des Entstehungszeitpunktes können sowohl SIB-BW als auch BAYSIS als Digital Twin Instance (DTI) bezeichnet werden. Diese DTs werden nach der Erstellung der Bauwerke implementiert und werden kontinuierlich mit den aktuellen Zustandsinformationen aktualisiert. Sie können als Grundlage für Zustandsvorhersagen verwendet werden (Kahlen et al., 2017, S. 97–98). Diese Beschreibung entspricht dem Entstehungszeitpunkt der beiden Systeme und deren Anwendung im bayerischen Erhaltungsmanagement. Durch die späte Entwicklung der Systeme können zum Teil nicht alle notwendigen Informationen zu den bestehenden Bauwerken enthalten sein. In dem System SIB-BW sind jedoch alle Bestandsinformationen zu den Bauwerken und deren Teilbauwerke gespeichert sowie alle Informationen zu den Schäden, welche während der Nutzungsphase auftreten.

In dem System BAYSIS hingegen sind noch nicht alle notwendigen Informationen für ein umfassendes Erhaltungsmanagement enthalten. Die durch die ZEB-Messung ermittelten Beschreibungen der Oberflächeneigenschaften wurden für das gesamte Streckennetz erfasst und werden alle vier Jahre aktualisiert (Bayerisches

Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2021a). Jedoch fehlen für Teile des Streckennetzes Informationen zum Aufbau des Straßenquerschnitts- und den Materialkennwerten der einzelnen Schichten (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2021a), welche eine notwendige Grundlage für die Bestimmung des Substanzwertes durch das PMS sind und auf dessen Grundlage Erhaltungsprognosen mit dem PMS errechnet werden können.

Neben dem Erstellungszeitpunkt ermöglicht die Charakterisierung des Datenaustauschs eine genaue Beschreibung der Bestand-DTs. Beide DTs werden nicht kontinuierlich, sondern in festgelegten Zeitabständen oder in Folge von festgelegten Ereignissen aktualisiert. In BAYSIS werden die Informationen der Straßenoberflächenzustände in einem vierjährigen Rhythmus aktualisiert (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2021b). Die Zustandsdatenintegration im System SIB-BW erfolgt im Anschluss an eine Bauwerksinspektion, welche alle sechs Jahre oder in Folge eines schwerwiegenden Wetterereignisses erfolgt (DIN 1076). Anstelle der ereignisbasierten Aktualisierung der Zustandsinformationen, welche in den beiden Bestandssystemen implementiert ist, könnten die Zustände der Bauwerke auch kontinuierlich in Echtzeit aktualisiert werden. Diese Aktualisierungsrate ist auf Grundlage der sich langsam veränderten Zustandswerten der Bauwerke nicht notwendig und würde nur eine große Menge an unnötigen Daten generieren, welche gespeichert und gepflegt werden müsste.

Für die Verortung der periodisch erfassten Zustandsdaten werden in DTs geometrische Modelle verwendet. An den LOD dieser Modelle werden unterschiedliche Anforderungen gestellt, anhängig von der Verwendung, für die der DT entwickelt wurde (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 58). Die Literatur liefert keine genaue Definition, welchen LOD ein geometrisches Modell eines DTs erfüllen muss, um für eine spezielle Anwendungen verwendet werden zu können. Der LOD muss nur auf den geplanten Anwendungsfall abgestimmt werden. Nur das System BAYSIS nutzt aktuell ein geometrisches Modell zur Darstellung der enthaltenen Informationen. So können alle enthaltenen Informationen graphisch im Kartenfenster angezeigt werden. Innerhalb dieses Kartenfenster ist das bayerische Straßennetz als 2D-Steckenband dargestellt und alle Informationen mit Straßenbezug werden durch eine farbliche Darstellung auf diesem abgebildet. Durch diese Darstellung können den Benutzer Informationen schnell und übersichtlich zur Verfügung gestellt werden. Die Verwendung verschiedener Layer ermöglicht es den Benutzern weiter Informationen hinzuzufügen, wodurch

Zusammenhänge zwischen verschiedenen Bereichen einfacher dargestellt werden können. Das System SIB-BW hingegen nutzt keine geometrischen Modelle zur Darstellung und Verortung der Schäden. Die Verortung und Beschreibung der Schäden erfolgen nur aufgrund von Texten und einfachen Handzeichnungen. Die Verwendung eines 3D-Modells zur genaueren Verortung der Schäden würde einen großen Mehrwert bei der Überwachung des Schadensverlauf erbringen (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 24), da somit die Lage der Schäden eindeutig festgelegt ist und es nicht zu Verwechslungen ähnlicher Schäden infolge unverständlicher Lagebeschreibungen kommen kann. Somit ist dies eine Optimierungsmöglichkeit des Bestandssystem, welche im Kapitel 8.3 näher ausgeführt wird.

### Modelle zur Beschreibung der DTs

Zusätzlich zu der genauen Beschreibung einzelner Bestandteile eines DTs können verschiedene Modelle verwendet werden, um weitere komplexe Zusammenhänge und Mechanismen der DTs zu beschreiben (Davila Delgado & Oyedele, 2021). Diese Modelle ermöglichen durch die abstrakte Beschreibung der Systeme eine verständliche Darstellung für die Anwender.

### Konzeptionelle Modelle

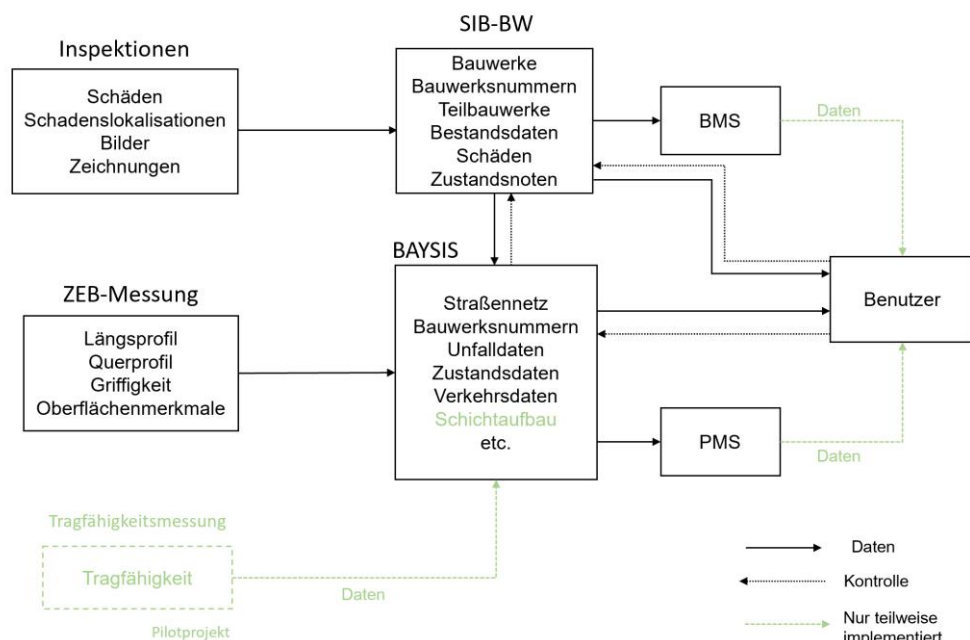


Abbildung 33: prototypisches Modell des bestehenden Erhaltungsmanagementsystems (eigene Darstellung)

In Abbildung 33 ist das prototypische Modell des Bestandssystems des bayerischen Erhaltungsmanagements dargestellt. Mit Hilfe dieses Modells werden die

Zusammenhänge zwischen den Messsystemen und Informationsquellen abstrakt dargestellt (Davila Delgado & Oyedele, 2021). Das bestehende System setzt sich aus den beiden digitalen Zwillingen BAYSIS und SIB-BW zusammen. Der digitale Zwilling BAYSIS ist das Kernsystem des Erhaltungsmanagement, in dem verschiedene Informationen zu dem Straßennetz und sich darauf beziehende Informationen enthalten sind. In SIB-BW sind alle Informationen zu den Brücken- und Tunnelbauwerken enthalten. Die Informationen zu den Brücken- und Tunnelbauwerken werden nur im geringen Umfang in BAYSIS abgebildet. Beide Systeme werden durch verschiedene Messsysteme und Inspektionen mit den Zustandswerten der realen Bauwerke beliefert. Der Benutzer der Systeme kann entweder direkt die notwendigen Informationen aus den beiden Systemen abfragen oder durch die Verwendung der bisher nur teilweise implementierten Systeme PMS und BMS umfangreichere Informationen zu den Zustandsentwicklungen und Erhaltungsmanagementprognosen erhalten. (Davila Delgado & Oyedele, 2021).

### Systemarchitektur und Datenmodell

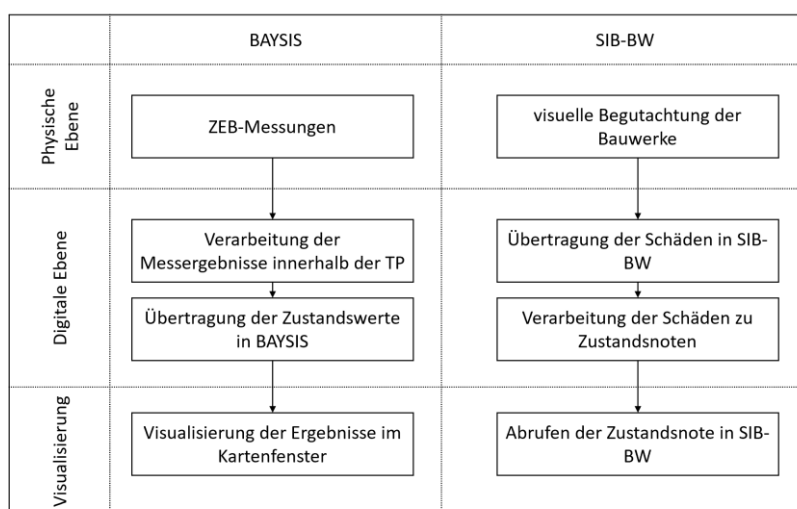


Abbildung 34: Systemarchitektur der Bestandssysteme (eigene Darstellung)

In Abbildung 34 ist die vereinfachte Systemarchitektur der beiden Bestandssysteme dargestellt. Diese beiden Modelle beschreiben, wie die Daten und Informationen zwischen den verschiedenen Ebenen erfasst und ausgetauscht werden. Die Systemarchitektur der beiden Systeme ist in drei Ebenen unterteilt. Da jedes System für einen eigenen Anwendungsfall entwickelt wurde, unterscheiden sich die beiden Systeme in ihrer Struktur und den Mechanismen, mit denen die Daten weitergegeben werden (Gürdür Broo et al., 2022).

Die Datenerfassung der beiden Systeme findet in der physischen Ebene statt. Dort werden die Daten auf Grundlage festgelegter Messungen und Inspektionen erfasst. Die Weitergabe der Daten in die digitale Ebene erfolgt im Anschluss an die Erfassung. Zu diesem Zweck werden die Daten mit Hilfe des für die Anforderungen der deutschen Verkehrsbehörden entwickelten Datenaustauschformates OKSTRA weitergegeben (Beetz et al., 2018). In der digitalen Ebenen unterscheiden sich die beiden Systeme geringfügig. In BAYSIS erfolgt die Verarbeitung der Daten vor der Integration in den DT, während die Rohdaten in SIB-BW direkt im Anschluss an die Bauwerksprüfung in den DT übertragen werden. Erst im Anschluss daran werden die Informationen zu abstrakten Zustandsnoten verarbeitet. In der Visualisierungsebene erfolgt die Darstellung der in den Systemen gespeicherten Informationen. In dieser Ebene unterscheiden sich die beiden Systeme nur in der Art der Darstellung. Während die Ergebnisse in BAYSIS den Benutzer graphisch zur Verfügung gestellt werden, erfolgt die Darstellung in SIB-BW nur in Textform und mit Hilfe der Zustandsnoten.

#### Synchronisationsmodelle und Simulationsmodelle

In der Literatur werden verschiedene Synchronisationszyklen für DTs genannt. Diese sind abhängig von den Funktionen und Aufgaben, welche der DT erfüllen muss (Park et al., 2020). Neben der Echtzeitsynchronisation, welche durch die Verwendung von Sensoren ermöglicht wird, können die Zustände aus dem realen System in das virtuelle System auch in Folge von festgelegten Ereignissen übertragen werden. Dieser ereignisbasierte Synchronisationszyklus bietet sich besonders in der Bauindustrie an, da nach Abschluss von Baumaßnahmen die Zustände des fertiggestellten Objekts in den DT übertragen werden können. Die Synchronisation der Zustände zwischen dem realen und virtuellen System erfolgt in den beiden Systemen in festgelegten Zyklen. So erfolgt die Erfassung der Straßenoberflächenzustandsdaten alle vier Jahre (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2021a). Im Anschluss an die Erfassung werden dieser Ergebnisse in Zustandswerte umgerechnet und in das System BAYSIS übertragen. Die Aktualisierung der Brücken- und Tunnelzustandsdaten erfolgt in unterschiedlichen Updatezyklen. So wird der DT zum einen infolge der Hauptprüfungen, welche alle sechs Jahre an den Bauwerken durchgeführt werden, und zum anderen nach Sonderinspektionen infolge besonderer Ereignissen, wie zum Beispiel Hochwasserereignissen, aktualisiert (DIN 1076). Eine Veränderung der Updatezyklen hin zu einer Echtzeitüberwachung der Zustände würde wenig Mehrwert generiert, da jeder Schaden eine spezifische Änderungsrate hat und diese nicht in Echtzeit

übertragen werden muss. Die Echtzeitüberwachung würde somit zwar eine große Menge Zustandsdaten generieren, welche jedoch wenig Mehrwert erbringen würden und nur mit großem Aufwand gespeichert und gepflegt werden müssten.

### Verwendete Technologien im Zusammenhang mit den bestehenden Systemen

Im Kontext des DTs werden verschiedene Technologien genannt, welche für einen funktionalen DT verwendet werden. Abhängig von der Wichtigkeit für die grundlegenden Funktionen des DTs werden diese in drei Kategorien unterteilt. So gibt es nach Fang et al. (2022) Basistechnologien, Kerntechnologien und fortgeschrittenen Technologien. Im Folgenden werden die beiden DTs in Hinblick auf die Verwendung dieser Technologien analysiert.

Kernstück der Erhaltungssysteme sind die über viele Jahre gesammelten Zustandsdaten, welche zur Abbildung der Zustände genutzt werden. Die Erfassung dieser Daten erfolgt bei den Bestandssystemen durch verschiedenen Lasermesssysteme sowie mechanische und optische Verfahren (FGSV, 2006; DIN 1076). Diese verschiedenen Erfassungstechnologien gehören zu den Basistechnologien der von Fang et al. (2022) beschriebenen Technologiepyramide. Die Basistechnologien werden im Zusammenhang eines DTs für die Erfassung der physischen Zustände sowie für die Übertragung der gemessenen Größen in die virtuelle Ebene verwendet (Fang et al., 2022). Die Übertragung der Daten erfolgt auf Grund der Datenerfassung und der erhöhten Anforderung an die Sicherheit der Daten durch die direkte Weitergabe der Analyseergebnisse von dem AN an den AG mittels eines USB-Sticks (ZEB-Ergebnisse). Bei dem DT, welcher die Zustände der Ingenieurbauwerke abbildet, werden die Inspektionsergebnisse direkt in das Analyseprogramm (SIB-BW) eingetragen und mit dessen Hilfe zu Zustandswerten verarbeitet.

Eine weitere in der Literatur genannten Basistechnologien eines DTs ist die Visualisierung der Analyseergebnisse, der gesammelten Daten und der Zustände des überwachten Systems (Fang et al., 2022). Beide betrachteten Systeme stellen die Ergebnisse den Benutzern in unterschiedlicher Weise zur Verfügung. Im BAYSIS-Kartenfenster werden die Ergebnisse der ZEB-Messungen dem Benutzer visuell zur Verfügung gestellt. Durch das Hinzufügen von Layer können weiter Informationen mit Straßenbezug dargestellt werden. Diese Form der Visualisierung ermöglicht es den Benutzern die Informationen schnell zu erfassen, für weitere Anwendungsfälle zu verwenden und so Entscheidungen zu treffen. Die Ergebnisse der Bauwerksprüfungen werden in

SIB-BW in Form von Zustandsnoten der einzelnen Teilbauwerke und Schadensbeschreibungen der spezifischen Schäden dargestellt. Falls während den Prüfungen Skizzen oder Fotos der Schäden angefertigt wurden, können diese am Teilbauwerk hinterlegt und im Nachgang ausgewertet werden. Die Visualisierungsmethode von SIB-BW kann durch die Verwendung von 3D-Modellen zur Schadensverortung verbessert werden (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 24). Dieser Optimierungsvorschlag wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

An die zur Verbesserung der Ergebnisdarstellung verwendeten 3D-Modelle werden in der Literatur unterschiedliche Anforderungen an den LOD des Modells gestellt. Diese Anforderungen sind zum einen abhängig davon, welchen Ursprung das 3D-Modell hat und für welche Anwendungen das Modell verwendet werden soll (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 58). Wird das Modell während der Planungsphase erstellt und nach Fertigstellung der Baumaßnahme an den Betrieb übergeben, besitzt das Modell aufgrund der Vorgaben der Planung bereits einen hohen LOD (Borrmann et al., 2019b) und kann zur exakten Verortung der Schäden verwendet werden. Muss das Modell dagegen für ein Bestandsbauwerk erst nach Fertigstellung der Baumaßnahme erstellt werden, muss dieses Modell nicht die Anforderungen der Genehmigungsplanung erfüllen und kann einen niedrigeren LOD aufweisen. Das System BAYSIS verwendet zur Visualisierung der enthaltenen Informationen das 2D-Kartenfenster, in welchem das Straßennetz abgebildet ist und alle im System enthaltenen Informationen dargestellt werden können. Bei dieser Form der Visualisierung reicht der bestehende LOD aus, um die vorhandenen Ergebnisse den Benutzern in einer guten Weise darzustellen. Das System SIB-BW stellt die Ergebnisse der Inspektionen den Benutzer nur in Tabellen- und Textform zur Verfügung und bietet nur in geringem Umfang eine graphische Darstellung. Zur Verortung der Schäden werden keine 3D-Modelle verwendet. Jedoch würde ein 3D-Modell mit einem niedrigen LOD, welches auf Basis von Bestandsdaten erstellt wurde, viele Vorteile bringen.

Fang et al. (2022) benennt in der Literatur weitere Kerntechnologien, welche für die Funktionsfähigkeit eines DTs notwendig sind. Zu diesen zählt die Technologie der Modellerstellung, welche für die Erstellung des virtuellen Modells des DTs notwendig ist. Da das System BAYSIS bereits eine 2D-Repräsentation des Straßennetzes enthält, welches bei der Erstellung des Programms generiert wurde und nicht mehr verändert werden muss, findet diese Technologie bei diesem System keine Anwendung. Der DT SIB-BW besitzt zum aktuellen Zeitpunkt noch keine visuelle Darstellung der

Ergebnisse und da dies eine der im Kapitel 8.3 vorgestellten Optimierungsmöglichkeiten ist, findet die Technologie der Modellerstellung erst durch diese Anwendung.

Da die Daten in den beiden Bestandssystemen aus verschiedenen Quellen stammen und unterschiedliche Einheiten besitzen, müssen diese Daten in eine gemeinsame Zustandsgröße umgewandelt werden (Fang et al., 2022). Zu diesem Zweck verwenden die beiden Systeme unterschiedliche Datenfusionstechnologien. Die Verarbeitung der Zustandsdaten der ZEB-Messungen wird in der ZTV-ZEB-Richtlinie geregelt (FGSV, 2006). Die Datenverarbeitung der Inspektionsergebnisse der Brücken- und Tunnelinspektionen erfolgt im Programm SIB-BW nach dem Eintragen der Ergebnisse in die vorgegebenen Tabellen (Degelmann et al., 2011, S. 42). Diese Datenfusionsmechanismen basieren auf fest etablierten Regelwerken und Vorgaben, welche im Zuge des Optimierungsvorschlages nicht verändert werden.

Keine der von Fang et al. (2022) genannten fortgeschrittenen Technologien finden in den bestehenden Systemen direkt Anwendung. Die Verarbeitung der gesammelten Rohdaten zu Zustandswerten erfolgt mit Hilfe von mathematischen Funktionen und der Bewertung der Oberflächenfotos durch Bearbeiter (FGSV, 2006). Die generierten Zustandswerte in den DTs werden für eine Zustandsentwicklungsprognose und darauf aufbauenden Finanzplanung in den Managementsystemen verwendet. Zur Analyse der Straßen- und Ingenieurbauwerkszuständen finden verschiedene mathematische Funktionen in den Systemen Anwendung. In keinem der beiden Systeme (PMS und BMS) werden die Ergebnisse mit Hilfe von künstlicher Intelligenz erarbeitet. Somit ist diese fortgeschrittenen Technologien eine weitere Möglichkeit die Funktionen der bestehenden DTs zu verbessern und deren Vertrauenswürdigkeit zu optimieren.

### Vergleichbare Systeme

Vergleicht man die DTs des bayerischen Erhaltungsmanagements mit internationalen Systemen zur Verwaltung der Straßeninfrastruktur und Projekten zur Verbesserung des Informationsaustausches zwischen der Bauphase und dem Betrieb, so weisen diese gewisse Gemeinsamkeiten auf. Beide Bestandssysteme nutzen das deutschlandweite, einheitliche Datenformat OKSTRA zum Austausch der Informationen zwischen allen Beteiligten. Die Grundlage dieses Datenaustauschformates ist die Datenstruktur, welche auf Grundlage der ASB festgelegt ist und stetig weiterentwickelt wird. Die Entwicklung einer gemeinsamen Sprache für die Verbesserung des Informationsaustauschs zwischen den verschiedenen Bereichen des Betriebs und zwischen



verschiedenen europäischen Verkehrsbehörden ist eines der Ziele des Forschungsprojektes AM4INFRA (*AM4INFRA*). Alle in dem Projekt als notwendige Bestandteile eines funktionierenden Managementsystems vorgestellten Bestandteile sind bereits in den Bestandssystemen enthalten. Somit stellen BAYSIS und SIB-BW jeweils die einzige Informationsquelle (CDE) der abgebildeten Bauwerksdaten dar, in welcher alle wichtigen Informationen und Attribute der Bauwerke gespeichert sind. Des Weiteren beinhaltet die ASB, welche die Grundlage für das Datenaustauschformat OKSTRA ist, alle Spezifikationen und Beschreibungen der Objekte, womit es dem von AM4INFRA entwickelten Asset Data Dictionary (ADD) entspricht.

Der internationale Vergleich der Straßenverwaltungssysteme mit den Bestandssystemen zeigt, dass verschiedene Straßenbauverwaltungen mit einem ähnlichen System wie BAYSIS und SIB-BW arbeiten. Dänemark verwendet aktuell noch zwei getrennte Systeme für die Verwaltung der Straßen- und Brückendaten, was auch in Bayern der Fall ist. Die dänischen Systeme sollen jedoch in den kommenden Jahren zu einem System zusammengeführt werden (Vejdirektoratet, 2022b). Die Daten, welche in BAYSIS gespeichert sind, werden den Nutzern über das Kartenfenster zur Verfügung gestellt, ebenso wie es auch bei den Systemen in Oregon und Norwegen Standard ist. Zur eindeutigen Verortung aller enthaltenen Informationen wird in allen drei internationalen Systemen das Straßennetz in Abschnitte unterteilt, welche eine eindeutige Bezeichnung besitzen. Diese Unterteilung in Abschnitte ermöglicht eine eindeutige Beschreibung von Streckenabschnitten und Punkten (Brown, 2016; NVDB Transportportal, 2022; Vejdirektoratet, 2022c). Die Informationszuordnung in dem System BAYSIS erfolgt auf der gleichen Grundlage. Hierzu wurde das Netz auf Grundlage der in der ASB festgelegten Stationierungsrichtlinie in Abschnitte eingeteilt, welche an einem Netzknoten beginne und enden (Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung, 2018c). Im internationalen Vergleich werden die meisten Straßeninformationssysteme nur zur Darstellung der gespeicherten Informationen verwendet. Die meisten Systeme besitzen keine Funktionen zur Vorhersage von Zustandsentwicklungen. Nur in dem von Bentley entwickelten System in Oregon ist eine Verarbeitung der Daten möglich, wodurch die Produktivität des Managements gesteigert und die Kosten der Datenerfassung- und Verarbeitung reduziert werden konnte (Bentley, 2018a). Die bayerischen Erhaltungsmanagementsysteme bilden aktuell nur den erfassten Zustand der Inspektionen ab und gibt diese Informationen an das PMS und das BMS weiter, in welchen die Zustandsänderungen vorhergesagt und darauf aufbauend ökonomische

Maßnahmen geplant werden. Die Ergebnisse dieser Analysen werden nicht in den Systemen SIB-BW und BAYSIS abgebildet, sondern dienen nur der Priorisierung von notwendigen Maßnahmen. Durch die visuelle Darstellung der Prognoseergebnisse und der darauf aufbauenden Terminplanung der Erhaltungsmaßnahmen in BAYSIS könnte ein schneller Überblick über alle Maßnahmen, welche in einem Kalenderjahr durchzuführen sind, generiert werden. Dieser Optimierungsvorschlag wird im Kapitel 8.3 noch näher erläutert.

Zusammenfassend können beide Systeme getrennt voneinander als einfache digitale Zwillinge eines niedrigen Entwicklungslevel bezeichnet werden. Beide Systeme sind explizit für das Erhaltungsmanagement des Freistaates Bayern entwickelt worden und sind aus diesem Grund auf die Anwendungsfälle des Erhaltungsmanagement der Straßen- und Brückenbauwerke gut angepasst. Zusätzlich enthalten beide Systeme aufgrund ihres langen Bestandszeitraums viele wichtige Bestands- und Zustandsinformationen, welche als Basis für verschiedenen weitere Anwendungen verwendet werden können. Aus diesen Gründen ist eine vollständige Veränderung der Systeme nicht sinnvoll. Vielmehr kann die Leistungsfähigkeit der beiden Systeme durch gezielte Maßnahmen verbessert und die Maturity Level der DTs erhöht werden. Im Folgenden werden Optimierungsvorschläge auf Basis der Bestandsanalyse zur Verbesserung der Systeme dargestellt.

### 8.3 Optimierungsvorschläge

Eine mögliche Optimierungsmöglichkeit stellt die bisher nur im geringen Umfang enthaltene Verbindung zwischen den beiden Systemen BAYSIS und SIB-BW dar. Ein Großteil aller Informationen mit Straßenbezug, wie zum Beispiel Unfallinformationen, Umweltschutzgebieten und Wasserschutzgebiete, ist in BAYSIS gespeichert und kann über das Kartenfenster abgerufen werden. Somit ermöglicht das Kartenfenster einen schnellen und guten Überblick über alle Informationen, welche einen Einfluss auf die Planung und den Erhalt der Straßeninfrastruktur haben. Das Straßennetz beinhaltet zusätzlich auch Ingenieurbauwerke, welche ebenso wie die Straßenflächen dem Erhaltungsmanagement unterliegen. Da aktuell in dem BAYSIS-Kartenfenster nur die Bauwerksnummer eines Bauwerks abgerufen werden können und keine weiteren Informationen zum Zustand oder dem Alter der Brücke hinterlegt sind, müssen diese Informationen dem Programm SIB-BW entnommen werden. Somit kann durch die Betrachtung eines Streckenabschnittes im Kartenfenster von BAYSIS kein schneller Überblick über die Zustände der Strecke und der Bauwerke generiert werden.

Um dieses Problem zu beheben könnten alle Informationen des Systems SIB-BW in BAYSIS integriert werden und SIB-BW aufgelöst werden, um die eindeutige Informationszuordnung zu einem System zu gewährleisten. Diese Optimierungsmöglichkeit würde zwar einen guten Überblick über die Zustandsinformationen der Bauwerke in BAYSIS ermöglichen, jedoch würden viele wichtige Bestandsinformationen, welche in dem deutschlandweiten einheitlichen System SIB-BW gespeichert sind, verloren gehen.

Aus diesem Grund ist eine vollständige Integration des Systems SIB-BW nicht sinnvoll. Vielmehr kann BAYSIS als zentrale Informationsquelle optimiert werden. In dem Kartenfenster können in einem neuen Layer weitere Informationen zu den Zuständen der Bauwerke zur Verfügung gestellt werden. Die einzige Informationsquelle, in der diese Informationen gespeichert sind, bleibt weiterhin SIB-BW und nur ausgewählte Informationen, wie zum Beispiel die Gesamtzustandsnote und das Datum der letzten Inspektion, werden in dem Layer des Kartenfenster durch eine Verknüpfung zur Verfügung gestellt. Für eine bessere visuelle Bewertung der Zustandsinformationen könnten dem Layer noch eine Legende mit Farbschema hinzugefügt werden, um Bauwerke mit einer kritischen Zustandsnote schneller zu identifizieren. Durch diese Veränderung der Informationsdarstellung wäre es möglich den Zustand eines Streckenabschnittes

schnell zu erfassen und aufbauend auf diesen Informationen Entscheidungen zu Streckenerneuerungen zu planen. Zusätzlich ermöglicht die Implementierung mittels eines neuen Layer die Option die Informationen ausgeblendet, falls diese für einen Anwendungsfall nicht notwendig sind.

Zusätzlich zu der Verbesserung der Datenintegration von SIB-BW in BAYSIS besteht bei dem System SIB-BW eine weitere Optimierungsmöglichkeit. Ein vorhandenes Defizit des Systems SIB-BW ist, dass aktuell die Beschreibung und Verortung der Schäden nur durch die Zuordnung zu einem Teilbauwerken mithilfe einer schriftlichen Lagebeschreibung und Klassifizierung der Schäden durch die in den Schlüsseltabellen festgelegten Bezeichnungen erfolgt. Diese Verortungsmethode hat zur Folge, dass zwar eine gute Schadensbeschreibung mit eindeutiger Zuordnung zu einem Teilbauwerk vorliegt, jedoch ist durch die abstrakte Beschreibung der Schadensposition in Textform im Nachgang zu den Inspektionen die Lage der Schäden im Büro nicht immer eindeutig nachvollziehbar und es besteht die Gefahr, dass Schäden falsch bewertet werden. Somit ist es schwer, auf Grundlage der Inspektionsergebnisse eine Analyse der Schäden vorzunehmen, notwendige Maßnahmen zu erarbeiten und mögliche Schadensursachen zu ermitteln. Durch die Verwendung eines 3D-Modells zur Verortung der Schäden können deren Position eindeutig am Modell verortet werden und es kann ein schneller Überblick über die Schadensdichte am Modell erfolgen. Auch werden auf Grundlage des „Masterplan BIM Bundesfernstraßen“ in den folgenden Jahren alle neuen Baumaßnahmen mit der Technologie BIM geplant werden, wodurch zu Beginn der Betriebsphase bereits BIM-Modelle mit einem hohen LOD zur Verfügung stehen. Diese Modelle könnten somit als Grundlage für die Schadensverortung verwendet werden.

Die 3D-Modelle ermöglichen es, die Schäden visuell eindeutig einem Bauteil zuzuordnen. Jedoch soll das Modell nur zur Visualisierung der Schadensorte dienen und nicht die Funktionen der einzigen Informationsquelle übernehmen. Die Informationen sollen weiterhin in dem bestehenden System SIB-BW gespeichert werden, da somit keine großen Veränderungen an dem Bestandssystem vorgenommen werden müssen und alle Daten mit der gleichbleibenden Struktur gespeichert werden. Das Modell soll lediglich als zusätzliche Informationsquelle dem Brückenbauwerk zugeordnet werden, wie es schon mit 2D-Skizzen und Bildern möglich ist. Da für die meisten in SIB-BW enthaltenen Brücken aufgrund ihres Entstehungsalters keine 3D-Planungsmodelle vorliegen, muss für diesen Optimierungsvorschlag für jedes Bauwerk ein 3D-Modell

erstellt werden. Für den Anwendungsfall der Schadensverortung muss der LOD des Modells nicht dem LOD eines Genehmigungsplanungsmodelles entsprechen. Es ist ausreichend, wenn das Modell die Brücke und dessen Teilbauwerke in der gleichen hierarchischen Struktur wie SIB-BW abbildet. Somit können die Schadensinformationen den entsprechenden Teilbauwerken als geometrische Objekte zugeordnet werden. Diesen Objekten können weitere wichtige Informationen als Attribute hinterlegt werden. So erfolgt durch die Zuweisung der Schadens-ID an dem Schadensobjekt in dem 3D-Modell eine eindeutige Beschreibung des Schadens. Erfolgt eine Veränderung des Schadens muss das 3D-Modell nur angepasst werden, sofern das geometrische Objekt die Ausdehnung des Schadens beschreibt. Alle weiteren Informationen sind in SIB-BW gespeichert und werden dort angepasst. Zusätzlich zu der Schadens-ID können weitere Informationen als Attribute mit Hilfe eines Links oder eines URLs verknüpft werden, wie zum Beispiel Bilder aus anderen Informationsquellen.

Da zum aktuellen Zeitpunkt für fast kein Bestandsbauwerk ein 3D-BIM Modell vorhanden ist, müssen diese für diesen Optimierungsansatz erst erstellt werden. In der Literatur werden dafür verschiedene Möglichkeiten zur Modellgenerierung genannt, die bereits in Kapitel 4.2.1 näher erläutert wurden. Im Zuge dieses Optimierungsansatzes müssen in kurzer Zeit sehr viele qualitativ gleichwertige Modelle erstellt werden. Somit eignet sich die manuelle Erstellung der 3D-Modelle auf Basis der 2D-Bestandspläne nicht. Diese Methode ist sowohl zeitaufwendig und bedarf für die Menge an Brücken vieler Bearbeiter, um die Modelle zeitnah zu erstellen. Die Erstellung der Modelle auf Basis von Punktwolkenscans bietet zwar die Option geometrisch genaue Modelle zu erstellen, jedoch müssen auch bei dieser Methode die Modelle manuell nachbearbeitet werden und auch die Erfassung der Bauwerke mittels Drohnen bedarf einer gewissen Vorbereitungszeit. Aktuell werden in der Bauindustrie noch keine vollautomatisierten Modellerstellungsverfahren verwendet, wie es in der Produktionsindustrie der Fall ist (Davila Delgado & Oyedele, 2021). Dies liegt zum einen an der geforderten Genauigkeit, zum anderen an der Varianz der verschiedenen Brückentypen. Da für den Anwendungsfall der Schadensverortung nur ein geringer LOD der Modelle gefordert ist und viele der zu erstellenden Brückenmodelle einfache Balkenbrücken mit nur geringer Varianz in der Konstruktion sind, könnte eine automatisierte Erstellung der Modelle auf Basis der in SIB-BW enthaltenen Bestandsdaten, wie zum Beispiel Bauwerksbreite, Bauwerkslänge, lichte Weite und Spannweite, erfolgen. Mit Hilfe diese parametrische Modellerstellung könnte für viele der vorhandenen Bauwerke ein ausreichend genaues

Modell generieren werden und für die Bauwerke, die von standardmäßigen Konstruktionsarten abweichen, könnte mit Hilfe der manuellen oder teilautomatischen Modellerstellungsmethode die notwendigen Modelle erstellt werden. Durch diese Kombination der Modellerstellungsmethoden wäre es demzufolge möglich, in kurzer Zeit viele Modelle mit einer ausreichenden Genauigkeit zu erstellen und diese zur Visualisierung der Schäden zu verwenden.

Aktuell basiert das reaktive Erhaltungsmanagement der Brücken auf einer periodischen Zustandserfassung, welche im sechs Jahresrhythmus erfolgt (DIN 1076). Für Brücken, welche eine kritische Gesamtzustandsnote besitzen, kann mit Hilfe des SHM der Zustand kontinuierlich überwacht werden, um schnell auf Zustandsveränderungen eingehen zu können (Varabei et al., 2022). Bei diesem Verfahren wird für die Brücke ein Monitoringkonzept erstellt. Aufbauend auf diesem Konzept werden die Sensoren, welche zur Überwachung der Zustände notwendig sind, ausgewählt und die Analyse- und Verarbeitungsverfahren für die gemessenen Sensordaten erstellt. Abschließend müssen die Sensoren an dem Bauwerk angebracht werden und parallel dazu in dem vorhandenen 3D-Modell verortet werden. Dazu müssen an dem BIM-Modell geometrische Objekte modelliert werden, deren Attribute die Beschreibung der Sensortypen und Analyseverfahren enthalten, des Weiteren können Links zu externen Datenbanken als Attribute hinterlegt werden, in denen die Sensordaten gespeichert werden. In den 3D-Modellen können die Ergebnisse der Analyse der Zustandsmessungen zusätzlich auch graphisch dargestellt werden, wie es bereits in dem Pilotprojekt 1 von CoDEC (Barateiro et al.) durchgeführt wurde und wodurch es möglich ist einen schnellen Überblick über die Ergebnisse des Brückenmonitorings zu erhalten. Die Übertragung der Sensorinformationen mittels IoT ermöglicht es zusätzlich die Zustandsänderungen in kurzen Abständen in dem 3D-Modell darzustellen, ohne die Sensoren manuell auszulesen (BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH, 2022, S. 9). Somit ist es möglich ausgewählte Zustandsdaten der Brücke unabhängig von manuellen Inspektionen zu erhalten und aufbauend auf diesen Daten Prognosen zu der vorhandenen Resttragfähigkeit sowie zu notwendigen Maßnahmen zu planen. Da diese Systeme einer umfangreichen Planung und Installation von Monitoringeinrichtungen bedürfen, ist dieser Optimierungsvorschlag nur für einzelne Brückenbauwerke und im geringen Umfang möglich.

Die Bestandsdaten der ZEB-Messungen, aus denen die Zustandswerte der 2D-Streckenbänder generiert wurden, werden von der BASt auf dem IT-ZEB-Server verwaltet.

Bestandteile dieser Rohdaten sind Fotos der Straßenoberflächen, welche von Bearbeitern ausgewertet werden. Wenn zu Analyse diese Bilder die Technologie Computer Vision verwendet wird, wie es bereits in Finnland erforscht wird (Mikko Haavisto, Anne Valkonen, Ville Jurkkola, Antti Hannuksela, 2020), können diese Bilder schneller und präziser ausgewertet werden. Dadurch wird die Qualität verbessert und der Arbeitsaufwand reduziert.

Aktuell werden die Zustandsdaten, welche in den digitalen Zwillingen gespeichert sind, an das KEB und externe Managementsysteme weitergegeben. So erfolgt die Vorhersage und Bewertung der Zustandsentwicklungen mit Hilfe des KEBs oder in Ausnahmefällen in den PMS und BMS. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden Maßnahmen aus einem Maßnahmenkatalog ausgewählt und anhand dieser Auswahl Prognosen zum finanziellen Mitteleinsatz getätigt.

Die Qualität dieser Prognosen ist abhängig von den vorhandenen Informationen. Da besonders bei vielen Teilen der Straßenbefestigung Informationen zu dem Aufbau und den verwendeten Materialien fehlen (Stöckner et al., 2021, S. 13), müssen diese vor der Analyse gezielt erfasst werden. Durch die Erforschung von Technologien zur gezielten Erfassung dieser Informationen und der konsequenten Speicherung dieser Informationen bei Neubaumaßnahmen kann die Datengrundlage und somit auch die Qualität der Prognosen erheblich verbessert werden. Ebenso kann durch die gezielte Forschung und Verbesserung des BMS und des PMS eine Verbesserung der Prognosen generiert werden, wodurch die finanziellen Mittel bestmöglich eingesetzt werden können.

Neben der Verbesserung der Analysesysteme kann durch die Darstellung der Prognoseergebnisse in einem neuen Layer in BAYSIS ein Überblick über alle für einen bestimmten Zeitpunkt festgelegten Maßnahmen gegeben werden. Dies ermöglicht den Planern die Auswirkungen von Baumaßnahmen auf die Bevölkerung abzuschätzen und Maßnahmen, welche in unmittelbarer Nähe zueinander liegen, gemeinsam zu planen und durchzuführen.

## 9 Industrie 4.0 in der Baubranche

Der Begriff industrielle Revolution 4.0 beschreibt den Wandel der Wirtschaft von den bestehenden Technologien hin zu digitalen Methoden. In der Bauindustrie ist das der Wandel von der klassischen 2D-Planung hin zu einer digitalen Planung am 3D-Modell (Roth, 2016, S. 1). Dieser Wandel findet sich im Bausektor in der Einführung von BIM und dem DT (Uhlenkamp et al., 2022) wieder. Die Industrie 4.0 kombiniert neueste Informations- und Kommunikationstechnologien mit neuen Fertigungsmethoden und hat zum Ziel, die Wertschöpfungskette von Produkten und Bauwerken über den gesamten Lebenszyklus zu verbessern (Roth, 2016, S. 1).

Die Digitalisierung der Bauindustrie schreitet im Vergleich zu anderen Industrien langsamer voran (Moretti & Merino, 2022). Dies kann zum einen auf die Besonderheit der Baubranche zurückgeführt werden (Oesterreich & Teuteberg, 2016). So weisen Bauprojekte einen hohen Grad an Komplexität auf. Jedes Projekt ist ein Unikat und stark an die geographischen Gegebenheiten gebunden (Flemming C., 2010, S. 119–125). Neben diesen Punkten ist ein Bauprojekt in die verschiedenen Gewerke unterteilt. Dies hat eine hohe Fragmentierung zur Folge und führt zu einer großen Streuung in der Digitalisierungsentwicklung der einzelnen Unternehmen durch unterschiedliche Unternehmensstrukturen (Oesterreich & Teuteberg, 2016)

BIM wird im Kontext der Industrie 4.0 als Kerntechnologie genannt und wird in allen Lebenszyklusphasen eines Bauwerks von der Planung über den Bau und den Betrieb bis hin zum Abriss verwendet (Oesterreich & Teuteberg, 2016). Zusätzlich zu der BIM-Technologie werden noch weitere innovative Technologien als Ergänzung zu der Industrie 4.0 gezählt, welche zusammen betrachtet zu einer engen Vernetzung und Digitalisierung der Baubranche führen. So werden zusätzlich die Verwendung von cloud-basierten Anwendungen, die mobile Nutzung der Planungsdaten, die Vernetzung von Maschinen und Gegenständen in Echtzeit sowie die Verwendung von Drohnen als zusätzliche Technologien der Industrie 4.0 genannt (Oesterreich & Teuteberg, 2016).

Die zunehmende Digitalisierung und die wachsende Kooperation zwischen den Gewerken im Bausektor, die durch die industrielle Revolution 4.0 hervorgerufen werden sollen, führen unter anderem zu einer Produktivitätssteigerung mit einhergehenden Kostensenkungen. Diese Vorteile werden auch in dem vom Bundesministerium für Verkehr und digitaler Infrastruktur veröffentlichten „Masterplan BIM



Bundesfernstraßen“ beschrieben (Meister et al., 2021). Jede technologische Neuerung hat sowohl Vorteile als auch Risiken:

## 9.1 Chancen und Risiken

Die gewünschte digitale Transformation des Bausektors infolge der Entwicklungen der Industrie 4.0 und die geforderten Ziele der Bundesregierung (Meister et al., 2021) stellen bestehende Produktionsabläufe und „Work-Flows“ in Frage und geben Anstoß das aktuelle System zu überdenken (Roth, 2016, S. 1). Einhergehend mit einer solchen Veränderung werden die Chancen und Risiken dieser Veränderung genauer hinterfragt. Abhängig von der Perspektive, aus der die Technologien BIM und DT betrachtet werden, zeigen sich unterschiedliche Chancen und Risiken (Jacobsson & Merschbrock, 2018). Diese werden im Folgenden näher erläutert.

### 9.1.1 Ökonomische Chancen und Risiken

Die Verwendung der kooperativen Arbeitsmethode BIM führt zu vielen ökonomischen Vorteilen. So wird als einer der größten Vorteile die Steigerung der Effizienz und Produktivität in den Vordergrund gestellt (Borrmann A. et al., 2019d). Des Weiteren wird neben der Kostensicherheit (Bryde, Broquetas & Volm, 2012) und besseren Terminplanung (Bryde et al., 2012) die Transparenz bei Entscheidungsfindungen als Vorteil genannt (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015). Diese Vorteile lassen sich durch eine Nutzung verschiedener technologischer Anwendungen an einem präzisen geometrischen Bauwerksmodell in einer gemeinsamen Datenumgebung (Jacobsson & Merschbrock, 2018) erzielen. Die an diesem Modell durchgeführte Kollisionsprüfung führt zu einer frühzeitigen Erkennung von Fehlern in der Planung und ermöglicht ein rasches Umplanen (Borrmann et al., 2021, S. 7), was zu einer Reduktion der Kosten im späteren Bauablauf führen kann.

Im Gegensatz zu der Anwendung von BIM fokussiert sich die DT-Technologie im Bausektor auf die Betriebsphase von Bauwerken und Infrastruktur, in der Informationen zu den Zuständen mittels Sensoren und anderen Zustandserfassungsverfahren aufgenommen werden (Khajavi, Motlagh, Jaribion, Werner & Holmstrom J., 2019). Der DT bildet mit diesen Informationen ein reales Objekt, dessen Struktur, Zustände, Funktionen und Erhaltungsmaßnahmenhistorie ab (Madni et al., 2019). Die Effizienz des Erhaltungsmanagements kann durch das Vorhalten dieser Informationen gesteigert werden (Evans et al., 2019). Die Daten bilden die Grundlage zur Berechnung von Zustandsgrößen und sind Basis der Erhaltungsentscheidungen. Diese Entscheidungen

sollen die Funktionen des physischen Assets optimieren und möglichst wirtschaftlich getroffen werden (Khajavi et al., 2019). Aus diesem Grund werden die gespeicherten Informationen für die Erarbeitung von Erhaltungsplänen genutzt. Unter Einbeziehung verschiedener Erhaltungsstrategien ermöglichen die Daten mittels weiterer Technologien die Vorhersage des Verhaltens des physischen Zwillings in bestimmten Situationen (Madni et al., 2019). Durch die Verwendung der Echtzeitdaten und Prognosen von zukünftigen Zuständen durch ML-Algorithmen können Kosten in der Erhaltungsplanung reduziert werden (Oreto et al., 2021; Pregnotato et al., 2022). Durch den DT können Informationssilos zwischen verschiedenen Bereichen aufgebrochen werden und ein besseres Verständnis für die Gesamtheit des Objektes geschaffen werden (Singh et al., 2021). So hat die Anwendung eines DTs für die Verwaltung der Straßeninfrastruktur in Oregon die Zeit zur Erstellung von Berichten um 66 % gesenkt und die Kosten für Datenverarbeitungen reduziert (Bentley, 2018b).

Jedoch birgt die Technologie des DTs nicht nur ökonomische Chancen, sondern auch Risiken. Um das volle Potenzial der Technologie auszuschöpfen, müssen zuerst Geld und Zeit in die Implementierung des Systems investiert werden. Neben den hohen Investitionskosten für die Erarbeitung des Systems müssen auch bestehende Workflows verändert und die Datenerfassung durch zum Beispiel Sensoren optimiert werden. Auch diese Maßnahmen beinhalten ein finanzielles Risiko für den Betreiber. Aus diesen Gründen ist eine Kosten-Nutzen-Rechnung vor der Implementierung der neuen Technologien sinnvoll (Singh et al., 2021).

### 9.1.2 Ökologische Chancen und Risiken

Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks bietet die Möglichkeit, bereits beim Beginn der Planung auf eine ressourcenschonende Materialwahl und eine mögliche Weiterverwendungen nach der Nutzung zu achten (Oreto et al., 2022). Zusätzlich werden Lösungsansätze untersucht, um bereits bei den ersten Variantenuntersuchungen eine einfache Ökobilanzierung durchführen zu können (Ungureanu & Hartmann, 2020, S. 254–263), damit die Trassenvarianten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Biotope untersucht werden können. Bei diesen Untersuchungen werden verschiedenen Varianten der Haupttrasse unter verschiedenen ökologischen Gesichtspunkten untersucht und ihre Umsetzbarkeit bewertet (Borrmann et al., 2021, S. 664).

Jede Technologie benötigt Energie zum Generieren, Speichern und Austauschen von Daten (du Plessis & Sherratt, 2020). Der Stromverbrauch von deutschen Rechenzentren ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich angestiegen. Im Jahr 2016 betrug der Verbrauch 12,4 Mrd. kWh und stieg bis zum Jahr 2020 auf 16 Mrd. kWh an (Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag, 2021). Die jährlichen Treibhausgasemissionen für 1 Terrabyte Speicherplatz in einem Rechenzentrum schwanken abhängig von den technischen Standards des Rechenzentrums zwischen 166 und 280 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Terabyte (Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag, 2021). Eine ganzheitlich in BIM organisierte Infrastrukturplanung und Verwaltung mit DTs ist somit auch mit ökologischen Auswirkungen verbunden.

### 9.1.3 Technologische Risiken

Infrastrukturbauwerke werden für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren bei Straßen und 100 Jahre bei Brücken (DIN EN 1990) geplant und gebaut. Die gleiche Zeitspanne muss folglich auch für die digitalen Modelle gelten, welche zu Beginn der Planungsphase mit unterschiedlichen Herstellersoftware erstellt werden. Um notwendige Änderungen am Modell durchzuführen zu können (Braml et al., 2022), müssen diese über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks geöffnet und bearbeitet werden können (Borrmann A. et al., 2019c). Es müssen demzufolge herstellerneutrale Datenformate wie zum Beispiel IFC von bS entwickelt werden, um eine Verwendung der Modelle über mehrere Jahrzehnte zu ermöglichen (Braml et al., 2022).

Das Kernkonzept des DT ist, verschiedenste Daten über den Lebenszyklus eines Bauwerks zu sammeln, zu speichern und als Grundlage für fundierte Entscheidungen zu nutzen (Khajavi et al., 2019). Diese Vernetzung von verschiedenen Systemen kann zu Schwachstellen für Hackerangriffe führen, welche über unzureichend gesicherte Systeme Zugriff auf sensible und kritische Infrastrukturdaten erhalten. Des Weiteren stellt das Urheberrecht der generierten Daten ein bisher ungelöstes Problem dar (du Plessis & Sherratt, 2020; Ghaffarianhoseini et al., 2016). Ein weiteres Problem kann die Verwendung der Daten durch unterschiedliche Beteiligte darstellen. Zwar kann der DT unter gewissen Umständen dazu beitragen Informationssilos aufzubrechen, jedoch kann ohne eine fest vorgegebene Datenverwendungsrichtlinie auch das Gegenteil erreicht werden. Des Weiteren kann es infolge der verschiedenen verwendeten Datenformate zu Interoperabilitätsproblemen kommen (Singh et al., 2021).

#### 9.1.4 Soziale Risiken

Der Bausektor ist gezeichnet durch die starke Spezialisierung in unterschiedliche Gewerke, weshalb der Faktor Mensch und die Kooperation zwischen allen Beteiligten eine wichtige Rolle für eine erfolgreiche Durchführung von Bauvorhaben ist. Eine große Herausforderung ist daher, einer möglichen Isolierung einzelner Gewerke durch die Einführung von BIM entgegenzuwirken. Aktuell wird BIM zum Großteil nicht interdisziplinär verwendet und nur vereinzelt zwischen verschiedenen Gewerken genutzt (Neff, Fiore-Silfvast & Dossick, 2010). Die Isolation kann durch verschiedene Probleme wie Informationsflut (Gangatheepan, Thurairajah & Lees, 2018), Datenschutzbedenken (Mahamadu et al., 2013) und fehlendes Vertrauen in die Technik verstärkt werden (Neff et al., 2010). Zusätzlich steigen die fachlichen Anforderungen an die Arbeitnehmer durch die steigende Digitalisierung, was zu Stress und Leistungsdruck führen kann (Vuori, Helander & Okkonen, 2018). Diese Bedenken beziehen sich nicht nur auf die Technologie BIM, sondern auch auf die des DTs. Die Technologie des DTs befindet sich noch in den Anfängen der Entwicklung, wodurch es nur wenig technisches und praktisches Wissen über die exakte Umsetzung des DTs gibt. Dies führt zu einem mangelnden Vertrauen in die Technik und erschwert deren Einführung (Singh et al., 2021).

## 10 Zusammenfassung und Fazit

Im Laufe der Arbeit wurde ein Überblick über die aktuelle Verwendung von BIM in der Planung im Infrastrukturwesen gegeben. Diese Technologie findet aktuell noch nicht flächendeckende Anwendung in der Planung von Neubau- und Erhaltungsprojekten. Aus diesem Grund wurden Richtlinien und Leitfäden für die schrittweise Einführung der Planungsmethode von der Bundesregierung entwickelt, auf welche in der Arbeit kurz eingegangen wurde.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde das System des digitalen Zwillings, welcher zur Verbesserung des Erhaltungsmanagement verwendet wird, definiert und von verwandten Themengebieten abgegrenzt. Zusätzlich wurde auf verschiedenen Möglichkeiten, den digitalen Zwilling zu beschreiben und zu bewerten, eingegangen sowie dessen Charakteristiken und verwendeten Technologien näher beschrieben. Im Anschluss daran wurde ein Überblick über internationale Systeme, welche zur Verwaltung von Straßen- und Ingenieurbauwerksdaten verwendet werden, gegeben sowie Forschungsprojekte dargestellt, welche sich mit der Optimierung des Datenaustausches zwischen der Bauphase und der Betriebsphase von Infrastrukturbauwerken beschäftigen.

Kern der Arbeit war die Analyse des bestehenden Erhaltungsmanagementsystems des Freistaates Bayern. Dieses besteht aktuell aus zwei getrennten Systemen: BAY-SIS, welches zur Verwaltung der Straßenzustandsdaten und aller weiteren Daten mit Bezug zum Straßennetz, wie zum Beispiel Unfalldaten, Wasserschutzgebiete und Verkehrsdaten, verwendet wird. Das zweite System SIB-BW wird deutschlandweit zur Verwaltung der Ingenieurbauwerksdaten verwendet. Die beiden Systeme besitzen nur im geringen Umfang eine Verbindung zueinander, wodurch nur wenige Informationen zu den Bauwerken in BAYIS verfügbar sind. Die Erfassung der Zustandsdaten, welche in den beiden Systemen gespeichert sind, erfolgen auf Basis von fest etablierten Richtlinien. Diese gemessenen Zustandsgrößen werden von den beiden Systemen zum Teil an bauwerksspezifische Managementsysteme weitergegeben oder mit Hilfe des ersatzweisen „Koordinierten Erhaltungs- und Bauprogramms“ analysiert. In dem Pavement-Management-System werden auf Basis der erfassten Daten Prognosen und Erhaltungsmaßnahmenpläne erstellt. Ebenso werden für die Ingenieurbauwerke mit Hilfe des Bauwerks-Management-Systems Prognosen und Erhaltungspläne erstellt.

Aufbauend auf dieser Analyse wurden die beiden Systeme in Hinblick auf die Erfüllung der Definition des Begriffes des digitalen Zwillings und der damit verbundenen Systemstrukturen und Technologien, welche bei einem digitalen Zwilling Anwendung finden, analysiert. Im Verlauf dieser Analyse wurden einige Punkte identifiziert, welche durch eine gezielte Optimierung der Systeme die Funktionsfähigkeit und Leistungsfähigkeit der digitalen Erhaltungszwillinge verbessern können.

Bei der Erarbeitung des Optimierungskonzeptes wurde beachtet, dass beide Systeme bereits seit vielen Jahren im Erhaltungsmanagements des Freistaates Bayern verwendet werden und aus diesem Grund viele wichtige Bestandsdaten enthalten. Eine vollständige Umstrukturierung dieser beiden digitalen Zwillinge hätte einen Verlust eines Teiles der Bestandsinformationen zur Folge. Da besonders die Bestandsinformationen und Zustandsentwicklungsverläufe für das Erhaltungsmanagement von großer Bedeutung sind, wurden die Grundstrukturen der Systeme im Optimierungskonzept nicht verändert. Stattdessen war das Ziel, durch gezielte Maßnahmen die Datenverarbeitung, Informationsdarstellung und Zustandsvorhersage zu verbessern.

Das vorgestellte Optimierungskonzept sieht vor, das System BAYSIS als Hauptinformationsquelle beizubehalten. Dieser digitale Zwilling enthält fast alle für das Erhaltungsmanagement und für die Planung von Baumaßnahmen notwendigen Informationen und durch die gezielte Integration ausgewählter Bauwerksinformationen, welche aus SIB-BW entnommen werden, kann die Informationstiefe in dem System erhöht werden. Des Weiteren wurde eine Verbesserung der Schadensvisualisierung in SIB-BW durch die Verwendung von 3D-Modellen in dem Optimierungskonzept vorgeschlagen. Aufbauend auf diesen 3D-Modellen können künftig für Brücken mit einer kritischen Zustandsnote Structural Health Monitoringkonzepte entwickelt werden und die Ergebnisse der Sensoranalyse direkt in den Modellen visualisiert werden. Zusätzlich zu der Optimierung der Ergebnisdarstellung kann die Verarbeitung und Analyse der Messergebnisse durch die Anwendung von Computer Vision verbessert werden. Mit Hilfe dieser Technologie kann die Auswertung der Oberflächenbilder mit Hilfe von Algorithmen erfolgen und aufbauend auf diesen Ergebnissen Vorhersagen zu den Entwicklungen dieser Schäden generiert werden. Weiteres Optimierungspotential bieten die bereits in geringem Umfang verwendeten Pavement-Management- und Bauwerks-Management-Systeme. Durch zielgerichtete Forschungen zu den Schadensmechanismen und Schadensverläufen kann die Vorhersage der Zustandsentwicklungen

optimiert werden und aufbauend auf diesen Ergebnissen die Finanzmittelplanung für das Erhaltungsmanagement verbessert werden.

Da jede neue Technologie sowohl Chancen als auch Risiken birgt, müssen diese vor der Implementierung einer neuen Technologie abgewägt werden. So kann durch die Umsetzung der Optimierungsvorschläge das bestehende Erhaltungsmanagementsystem in Hinblick auf die Informationsbereitstellung und damit einhergehend der Effektivität verbessert werden. Jedoch müssen für die Weiterentwicklung der beiden Systeme sowohl neue Programme implementiert als auch bestehende Programme verbessert werden, womit finanzielle Risiken einhergehen. Zusätzlich birgt die Weiterentwicklung der Systeme technologische Risiken, wie zum Beispiel Sicherheitslücken. Auch muss bedacht werden, dass jede Veränderung des Systems auf die Bedürfnisse der Nutzer angepasst ist, damit diese einen Mehrwert aus der Veränderung gewinnen können und nicht durch die Weiterentwicklung das Vertrauen in das System und die Entscheidungen geschwächt wird.

Die bestehenden Systeme sind bereits gut an die Bedürfnisse des Erhaltungsmanagements des Freistaates Bayern angepasst und aus der Verwendung der beiden Systeme wird ein wirtschaftlicher Mehrwert generiert. Sie sind bereits unabhängig voneinander digitale Zwillinge, welche spezifischen Teile der bayerischen Infrastruktur abbilden. Die beiden Systeme bilden nicht nur die reinen Zustandsinformationen ab, sondern nutzen diese auch für anschließende Prognosen und Planungsmaßnahmen. Jedoch gibt es auch bei den beiden Bestandssystemen Funktionen, welche durch eine gezielte Veränderung und Erweiterung zu einer Optimierung der Bestandssysteme beitragen können. Diese vorgestellten Optimierungsvorschläge können dazu beitragen, das Erhaltungsmanagement, die Informationsbereitstellung und die Vorhersage von Zustandsentwicklungen zu optimieren und die Qualität der beiden digitalen Zwillinge zu verbessern.

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Master-Thesis selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die vorliegende Arbeit noch nicht einem anderen Prüfungsverfahren zugrunde gelegen hat.

München, 31. Oktober 2022

---

Franziska Lang-Scharli

Franziska Lang-Scharli

████████████████████

████████████████████

████████████████████



## Literaturverzeichnis

- Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J. M., Bilal, M. et al. (2021). *Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges*. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299>
- Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y. & Lu, Y. (2020). *Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model*. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
- Ait-Lamallam, S., Yaagoubi, R., Sebari, I. & Doukari, O. (2021). *Extending the IFC Standard to Enable Road Operation and Maintenance Management through Open-BIM* (8). <https://doi.org/10.3390/ijgi10080496>
- Ala-Laurinaho, R. (2019). *Sensor Data Transmission from a Physical Twin to a Digital Twin*.  
*AM4INFRA*.
- Amann, J. & Borrmann, A. (2015). *Creating a 3D-BIM-compliant road design based on IFC alignment originating from an OKSTRA-accordant 2D road design using the TUM Open Infra Platform and the OKSTRA class library*.
- Angjeliu, G., Coronelli, D. & Cardani, G. (2020). *Development of the simulation model for Digital Twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality*. <https://doi.org/10.1016/j.comp-struc.2020.106282>
- Arora, J. & Tushir, M. (2019). *Digital Twin - Towards a meaningful framework*. <https://doi.org/10.1201/9781003132868-2>
- Barateiro, J., Antunes, A., Marecos, V., Kokot, D., Bhusari S., Wijdeven, S. et al.. *CODEC Deliverable D3A Pilot projects report and consolidated implementation resources* (Connected Data for Effective Collaboration (CoDEC), Hrsg.). 2021.
- Barazzetti, L., Previtali, M. & Scaioni, M. (2020). *Roads Detection and Parametrization in Integrated BIM-GIS Using LiDAR* (7). <https://doi.org/10.3390/infrastructures5070055>

- Bárkányi, Á., Chován, T., Németh, S. & Abonyi, J. (2021). *Modelling for Digital Twins—Potential Role of Surrogate Models* (3). <https://doi.org/10.3390/pr9030476>
- BAST. (2017). *ZEB Verfahrensbeschreibung*.
- BAST. (2022a). *Bundesinformationssystem Straße (BISStra)*.
- BAST. (2022b). *EFA - Erfassungssystem zur Fahrbahnoberflächenanalyse*.
- BAST. (2022c). *Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA®)*.
- Bayerische Staatskanzlei. (1981). *BayStrWG Art. 9*.
- Bayerische Staatskanzlei (Bayerische Staatskanzlei, Hrsg.). (2001). *Bayern.Recht. RPE-Sta 01*.
- Bayerisches Staatsministerium für Wohnen & Bau und Verkehr. (2022a). *BIM-Leitfaden. Digitales Planen, Bauen und Betreiben im Bereich Straßen- und Brückenbau* (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, Hrsg.).
- Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr. (2021a). *Erhaltungsmangement der Bundes- und Staatsstraßen in Bayern. Pilotprojekt Tragfähigkeitsmessung. leben bauen bewegen, (01)*.
- Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr. (2021b). *Erhaltungsmangement der Bundes- und Staatsstraßen in Bayern. Zustandserfassung und -bewertung. leben bauen bewegen, (01)*.
- Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, Hrsg.). (2022b). *BAYSIS*. Verfügbar unter: <https://www.baysis.bayern.de/web/>
- Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr. (2022c). *BAYSIS Straßennetz*.
- Bednorz, J., Hindersmann, I., Jäger, K. & Marszalik, M. (2020). *Methoden zur Generierung von As-Built-Modellen für Bestandsbrücken*. *Bautechnik*, 97(4), 286–294. <https://doi.org/10.1002/bate.202000011>
- Beetz, J., Amann, J. & Borrmann, A. (2018). *Linked Data Analyse von Einsatzmöglichkeiten von verbundenen Informationen (Linked Data) und Ontologien und damit befassten Technologien (Semantic Web) im Bereich des Straßenwesens*.

- Beetz, J. & Borrmann, A. (2018). *Benefits and Limitations of Linked Data Approaches for Road Modeling and Data Exchange*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91638-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91638-5_13)
- Bentley. (2018a). *Going digital to advance infrastructure delivery: The open information project*.
- Bentley. (2018b). *Oregon DOT Saves USD 6.1 Million Over Five Years with AssetWise Linear Network Management*.
- Bentley Systems. (2021). *AssetWise for Roads and Bridges*.
- BIM Hamburg und HPA & MKP GmbH. (2022). *Digitaler Zwilling: Handlungsleitfaden zur Einführung im Bundesfernstraßennetz*.
- Biswas, S., Wright, A., Kokot, D., Perovic, J., Barateiro, J., Marecos, V. et al. (2021). *CODEC Deliverable D0.4 CoDEC Final Project Report (Conference of European Directors of Roads, Hrsg.)*.
- Bizer, C., Heath, T. & Berners-Lee, T. (2009). *Linked Data - The Story So Far*.
- Blumenfeld, T. (2020). *Analyse und Prognose von Straßenzustandsdaten mit Hilfe von probabilistischen Methoden und der Strukturgleichungsmodellierung*. Technische Universität Darmstadt. <https://doi.org/10.25534/TUPRINTS-00013279>
- Böhms, M., Luiten, B., O'Keefe, A., Stolk, S., Wikström, L. & Weise, M. (2018). *D4. Principles for a European Road OTL (INTERLINK, Hrsg.)*.
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S. & Rezgui, Y. (2020). *Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research*. <https://doi.org/10.1016/j.aut-con.2020.103179>
- Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T. et al. (2018). *The Gemini Principles*. <https://doi.org/10.17863/CAM.32260>
- Borrmann, A., Elixmann, R., Eschenbruch, K., Forster, C., Hausknecht, K., Hecker, D. et al. (2019a). *Grundlagen und BIM-Gesamtprozess BIM4INFRA (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.)*.
- Borrmann, A., Elixmann, R., Eschenbruch, K., Forster, C., Hausknecht, K., Hecker, D. et al. (2019b). *Handreichung BIM-Fachmodelle und Ausarbeitungsgrad. Teil 7*.

- Borrmann, A., Elixmann, R., Eschenbruch, K., Forster, C., Hausknecht, K., Hecker, D. et al. (2019c). *Leitfaden und Muster für den BIM-Abwicklungsplan (BAP)* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.).
- Borrmann, A., Esser, S., Jaud, S., König, M. & Liebich, T. (2020a). *Abschlussbericht AP4: Validierung des Datenmodells*.
- Borrmann, A., Esser, S., Jaud, S., König, M. & Liebich, T. (2020b). *Begleitung der internationalen Standardisierungsprojekte IFC-Road & IFC-Rail. Abschlussbericht Gesamtprojekt*.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C. & Beetz, J. (2021). *Building Information Modeling*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4>
- Borrmann A., Elixmann R., Eschenbruch K., Forster C., Hausknecht K., Hecker D. et al. (2019a). *Leitfaden und Muster für Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA). BIM4INFRA 2020 Teil 2* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.). Berlin.
- Borrmann A., Elixmann R., Eschenbruch K., Forster C., Hausknecht K., Hecker D. et al. (2019b). *Leitfaden zur Leistungsbeschreibung. BIM4INFRA 2020 Teil 4* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.).
- Borrmann A., Elixmann R., Eschenbruch K., Forster C., Hausknecht K., Hecker D. et al. (2019c). *Neutraler Datenaustausch im Überblick. BIM4INFRA 2020 Teil 8* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.).
- Borrmann A., Elixmann R., Eschenbruch K., Forster C., Hausknecht K., Hecker D. et al. (2019d). *Steckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle. BIM4INFRA Teil 6* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.).
- Borrmann A., Elixmann R., Eschenbruch K., Forster C., Hausknecht K., Hecker D. et al. (2019e). *Technologien im BIM-Umfeld. BIM4INFRA 2020 Teil 10* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.).
- Bradley, A., Li, H., Lark, R. & Dunn, S. (2016). BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction*, 71, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019>

- Braml, T., Wimmer, J., Varabei, Y., Maack, S., Küttenbaum, S., Kuhn et al. (2022). Digitaler Zwilling: Verwaltungsschale BBox als Datenablage über den Lebenszyklus einer Brücke. *Bautechnik*, 99(2), 114–122. Zugriff am 25.04.2022. Verfügbar unter: <https://onlinelibrary-wiley-com.eac-cess.ub.tum.de/doi/epdf/10.1002/bate.202100094>
- Brown, R. (2016). *Asset Management in Oregon: Roadway Safety Data and Analysis Case Study*.
- Bryde, D., Broquetas, M. & Volm, J. M. (2012). *The project benefits of Building Information Modelling (BIM)* (7). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
- BuildingSMART. (2021). *Mitmachen und die offenen Standards der digitalen Infrastruktur mitgestalten*. Verfügbar unter: <https://www.buildingsmart.de/buildingsmart/aktuelles/mitmachen-und-die-offenen-standards-der-digitalen-infrastruktur>
- BuildingSMART International. (2022). *ifcOWL*. Verfügbar unter: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-formats/ifcowl/?sfw=pass1663570680>
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Hrsg.). (2019). *Erhaltung von Straßen*. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Strasse/Erhalt-Strassen-Bautechnik/erhalt-strassen-bautechnik.html>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2015). *Stufenplan Digitales Planen und Bauen*, 1–20.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung. (2013). *Sammlung Brücken und Ingenieurbau Erhaltung. Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten (ASB-ING)* (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Hrsg.). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33335-4\\_24636](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33335-4_24636)
- Buttgereit, A. & Heller, S.. *Integration von BIM im kommunalen Asset Management* (1. Auflage) (Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur (DTV)). Tübingen.
- Celik Y., Petri I. & Rezugi Y. 2021. *Co-creating our future: scaling-up innovation capacities through the design and engineering of immersive, collaborative, empathic and cognitive systems. 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) : Sophia Antipolis Innovation Park, France, 17-19*

June 2019. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Technology and Engineering Management Society.

- Chakraborty, S., Adhikari, S. & Ganguli, R. (2020). *The role of surrogate models in the development of digital twins of dynamic systems*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.037>
- Chen, L., Xie, X., Lu, Q., Parlikad, A. K., Pitt, M. & Yang, J. (2021). Gemini Principles-Based Digital Twin Maturity Model for Asset Management. *Sustainability*, 13(15), 8224. <https://doi.org/10.3390/su13158224>
- Chen K., Torbaghan M., Chu M., Zhang L. & Garcia-Hernández A. (2021). Identifying the most suitable machine learning approach for a road digital twin. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 174(3), 88–101. <https://doi.org/10.1680/jsmic.22.00003>
- Chong H., Lopez R., Wang J., Wang X. & Zhao Z. (2016). *Comparative Analysis on the Adoption and Use of BIM in Road Infrastructure Projects* (6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000460](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000460)
- Cooperative Research Centre for Construction Innovation (Hrsg.). (2007). *Adopting BIM for facilities management. Solutions for managing the Sydney Opera House*. Verfügbar unter: [http://www.construction-innovation.info/images/CRC\\_Dig\\_Model\\_Book\\_20070402\\_v2.pdf](http://www.construction-innovation.info/images/CRC_Dig_Model_Book_20070402_v2.pdf)
- Costin, A., Adibfar, A., Hu, H. & Chen, S. (2018). *Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>
- Dalibor, M., Jansen, N., Rumpe, B., Schmalzing, D., Wachtmeister, L., Wimmer, M. et al. (2022). A cross-domain systematic mapping study on software engineering for Digital Twins. *Journal of Systems and Software*, 111361. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111361>
- Davila Delgado, J. M. & Oyedele, L. (2021). *Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>
- Degelmann, R., Weller, O., Zettl, W., Schmerbeck, R., Ertl, G., Müller, C., Heller, S. et al. (2011). Erhaltungsmanagement an Straßen in Bayern. *bau intern*, (Sonderheft), 1–52.

- Deutsch, J.-O. (2007). *Entwicklung einer Infrastruktur zur regelbasierten Verarbeitung von RDF/OWL Spezifikationen.*
- DIN 31051 (Juni 2019). *DIN 31051.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN, 1990 (2021). *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 16739-1. *DIN EN ISO 16739-1:2021-11.*
- DIN 1076 (1999). *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Du Plessis, C. & Sherratt, F. (2020). *Construction 4.0 and built assets in-use: creating an e-topia or dystopia?* (4). <https://doi.org/10.1680/jmapl.19.00054>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. & Liston, K. (2008). *BIM handbook. A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors.* Hoboken N.J.: Wiley.
- Empelmann, M. (2008). *Infrastrukturbauwerke—Eine Ingenieuraufgabe der Zukunft.* Verfügbar unter: [http://ftp.sofistik.de/pub/infoline/sofistik-seminar/2008/v01\\_empelmann.pdf](http://ftp.sofistik.de/pub/infoline/sofistik-seminar/2008/v01_empelmann.pdf)
- Europäische Union (Europäische Union, Hrsg.). (2022a). *INSPIRE Consolidated UML Model.*
- Europäische Union (Europäische Union, Hrsg.). (2022b). *INSPIRE KNOWLEDGE BASE.*
- European Commission. (2022a). *Data Specifications.*
- European Commission. (2022b). *INSPIRE KNOWLEDGE BASE.*
- Evans, S., Savian, C., Burns A. & Cooper, C. (2019). *Digital twins for the built environment. An introduction to the opportunities, benefits, challenges and risks* (Atkins, Hrsg.).
- Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung. (2018a). *Anweisung Straßeninformations-Bank. Begriffsbestimmungen.*
- Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung. (2018b). *Anweisung Straßeninformations-Bank. Querschnitt und Aufbau.*

- Fachgruppe „ASB“ der Dienstbesprechung. (2018c). *ASB Anweisung StraßeninformationsBank. Kernsystem.*
- Fang, X., Wang, H., Liu, G., Tian, X., Ding, G. & Zhang, H. (2022). *Industry application of digital twin: from concept to implementation (7-8)*. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09632-z>
- Fastrich, A. (2011). *Entwicklung, Bewertung und Optimierung von lebenszyklusorientierten Erhaltungsstrategien im Strassenunterhalt*. Zugl.: Zürich, Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 19553, 2011. Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-006550351>
- FGSV. (2006). *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen*. ZTV ZEB-StB. 50999 Köln: FGSV.
- Flemming C., W. M. (2010). Betriebliche Anforderungen an die diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation von Prozessen zur Planung und Fertigung von Unikaten. In H.-J. Bargstädt (Hrsg.), *Baubetriebliche Anforderungen an die diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation von Prozessen zur Planung und Fertigung von Unikaten* (S. 119–125).
- Gangatheepan, S., Thurairajah, N. & Lees, L. (2018). *From Information Transmission to Engagement in Practice: A Study on BIM Enabled Construction Projects*. Belfast.
- Gao, Y., Qian, S., Li, Z., Wang, P., Wang, F. & He, Q. (2021). Digital Twin and Its Application in Transportation Infrastructure, 298–301. <https://doi.org/10.1109/DTP152967.2021.9540108>
- Gargoum, S. & El-Basyouny, K. (2017). *Automated extraction of road features using LiDAR data: A review of LiDAR applications in transportation*. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047822>
- Geem, C., Biswas, S. & Proust, J. (2021). *Literature Review and Stakeholder Engagement on Legacy Data and the Data Dictionary*.
- Gerber, A., van der Merwe, A. & Barnard, A. (2008). *A Functional Semantic Web Architecture* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Hrsg.). [https://doi.org/10.1007/978-3-540-68234-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68234-9_22)
- Ghaffarianhoseini, A., Tookey, J., Ghaffarianhoseini, A. Naismith, N., Azhar, S., Efimova, O. & Raahemifar, K. (2016). *Building Information Modelling (BIM) uptake:*



- Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges.*  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
- GIS Consult. (2022). *Managementsysteme für Straßenbauverwaltungen.*
- Grabe, M., Ullerich, C., Wenner, M. & Herbrand, M. (2020). smartBridge Hamburg – prototypische Pilotierung eines digitalen Zwillings. *Bautechnik*, 97(2), 118–125.  
<https://doi.org/10.1002/bate.201900108>
- Graf, K. (2018). *BauSIM2018 - 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz : 26.-28. September 2018, Karlsruhe, Germany ; Tagungsband* (Both, P. von & Wagner, A., Hrsg.). <https://doi.org/10.5445/IR/1000085743>
- Grontmij - Carl Bro. (2005). *RoSy Base.*
- Gürdür Broo, D., Bravo-Haro, M. & Schooling, J. (2022). *Design and implementation of a smart infrastructure digital twin.* <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104171>
- Haardt, P. (2003). *Entwicklung eines Bauwerks-Management- Systems für das deutsche Fernstraßennetz. Stufen 1 und 2* (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, Bd. 43). Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für Neue Wiss.
- Hajdin, R., Rakić, L., Diederich, H., Richter, R., Hildebrand, J. & Schulz, S. (2022). *Entwicklung von Verfahren zur (teil-)automatisierten Erstellung von BIM-Modellen für Straßenbrücken im Bestand.*
- Hakdaoui, S., Emran, A. & Oumghar, F. (2020). Mobile Mapping, Machine Learning and Digital Twin for Road Infrastructure Monitoring and Maintenance: Case Study of Mohammed VI Bridge in Morocco, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfg-let.2014.12.001>
- Hamer, C., Zwierzak, I., Wyre, J., Freeman, C., Scott, R. & Eyre, J. (2018). *Feasibility of an immersive digital twin: The definition of a digital twin and discussions around the benefit of immersion.*
- Hertwig, I. (2007). *Rohdaten der Straßenzustandserfassung Formatdefintion auf XML-Basis.*
- Hesse W. (Gesellschaft für Informatik, Hrsg.). (2005). *Ontologie(n).*
- Hettwer, J. (2019). *Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen Basiskonzepte im OKSTRA. N0135* (OKSTRA-Pflegestelle, Hrsg.).

- Highway Agency. (2009). *Highway Agency Network Management Manual. Part 2-Asset Management Records*.
- Hitzler, P., Krötzsch, M., Rudolph, S. & Sure, Y. (2008). *Semantic Web. Grundlagen* (eXamen.press). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Holst, R. (2006). *Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstrassennetz, Stufe 3* (Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, Bd. 50). Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft.
- Huang, S., Wang, G., Yan, Y. & Fang, X. (2020). *Blockchain-based data management for digital twin of product*. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.01.009>
- Ice (ICE Asset Management Group 2015, Hrsg.). (2015). *BIM and Asset Management*.
- Jacobsson, M. & Merschbrock, C. (2018). *BIM coordinators: a review* (8). <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2017-0050>
- Josifovska, K., Yigitbas, E. & Engels, G. (2019). *Reference Framework for Digital Twins within Cyber-Physical Systems*. <https://doi.org/10.1109/SEsCPS.2019.00012>
- Kahlen, F. J., Flumerfelt, S. & Alves, A. (Hrsg.). (2017). *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*: Springer International Publishing Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C. & Holmstrom J. (2019). *Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>
- Kim, H., Orr, K., Shen, Z., Moon, H., Ju, K. & Choi, W. (2014). *Highway Alignment Construction Comparison Using Object-Oriented 3D Visualization Modeling* (10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000898](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000898)
- Kinnaird C. & Geipel M. (2017). *Blockchain Technology. How the Inventions Behind Bitcoin are Enabling a Network of Trust for the Built Environment* (Arup, Hrsg.).
- Klein, M., Maschler, B., Zeller, A., Talkhestani, B. A., Jazdi, N., Weyrich, M. et al. (2019). *Architektur und Technologiekomponenten eines digitalen Zwillings*. <https://doi.org/10.51202/9783181023518-89>

- König, M., Borrmann, A., Stöckner M., Radenberg, M., Hagedorn, P., Jaud, S. et al.. *BIM- basiertes Erhaltungsmanagement im Straßenbau. Endbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 04.0299/2016/MRB.*
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lamb, K. (2019). *Principle-based digital twins: a scoping review* (Center for Digital Built Britain, Hrsg.).
- Landesamt für Digitalisierung.. *Geodateninformationsstruktur Bayern. INSPIRE.*
- Lee, D., Lee, S. H., Masoud, N., Krishnan, M. S. & Li, V. C. (2021). *Integrated digital twin and blockchain framework to support accountable information sharing in construction projects.* <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103688>
- Liu, L., Hagedorn, P. & König, M. (2021). *An ontology integrating as-built information for infrastructure asset management using BIM and semantic web.* <https://doi.org/10.35490/EC3.2021.167>
- Liu, Z., Meyendorf, N. & Mrad, N. (2018). *The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin.* <https://doi.org/10.1063/1.5031520>
- Lu, Q., Parlikad, A. K., Woodall, P., Don Ramasinghe, G., Xie, X., Liang, Z. et al. (2020). *Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus* (3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000763](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763)
- Ma, L., Li, Y., Li, J., Wang, C., Wang, R. & Chapman, M. (2018). Mobile Laser Scanned Point-Clouds for Road Object Detection and Extraction: A Review. *Remote Sensing*, 10(10), 1531. <https://doi.org/10.3390/rs10101531>
- Madni, A., Madni, C. & Lucero, C. (2019). *Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering* (1). <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- Mahamadu, A.-M., Mahdjoubi, L. & Booth, C. (2013). Challenges to BIM-Cloud Integration: Implication of Security Issues on Secure Collaboration, 209–214. <https://doi.org/10.1109/CloudCom.2013.127>
- Mallela, J., Blackburn, A., Grant, R., Kennerly, M., Petros, K. & Yew, C. (2020). *Building Information Modeling (BIM) Practices in Highway Infrastructure. FHWA Global Benchmarking Program Report* (US Department of Transportation, Hrsg.).

- Marcovaldi, E. (2018a). *Application of the design model final report. D3.3* (AM4INFRA, Hrsg.).
- Marcovaldi, E. (2018b). *Business blueprint of an Asser Information Management Core System. D3.2* (AM4INFRA, Hrsg.).
- Marcovaldi, E. & Biccellari, M. (2018). *Asser data dictionary. D3.1* (AM4INFRA, Hrsg.).
- Meister, A., Scholz, F. & Banemann, S. (2021). *Masterplan BIM Bundesfernstraßen. Digitalisierung des Planens, Bauens, Erhaltens und Betriebens im Bundesfernstraßenbau mit der Methode Building Information Modeling (BIM)* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.).
- Mikko Haavisto, Anne Valkonen, Ville Jurkkola, Antti Hannuksela. (2020). *Developing the pavement repair project using computer vision. Repair contract computer vision pilot of Pirkanmaa Centre for Economic* (Finnish Transport Infrastructure Agency, Hrsg.). Helsinki.
- Mischo, H., Seifried, J., Thiele, K., Schanzenbach, S. & Grassl, M. (2019). Vom 3-D-Laserscan zum BIM-Modell. Ein Erfahrungsbericht aus dem Stahlbrückenbau. *Bautechnik*, 96(7), 564–571. <https://doi.org/10.1002/bate.201900031>
- Moretti, N. & Merino, J. (2022). Overview of typical digital twin implementations: capabilities, drivers and Gemini Principles, 2159, 29–54. <https://doi.org/10.1680/dtbe.65802.029>
- Müller C. (Hrsg.). (2019). *Lebenszykluskosten von Straßen. Umsetzungsformen, Modulare Kalkulation, Optimierungspotentiale* (Research). Dissertation. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-29462-5>
- Naraniecki, H., Hartung, R., Marx, S. & Klemm-Albert, K. (2022). Zustandsprognose von Ingenieurbauwerken auf Basis von digitalen Zwillingen und Bestandsdaten. *Bautechnik*, 99(3), 173–181. Zugriff am 20.04.2022. Verfügbar unter: <https://online-library-wiley-com.eaccess.ub.tum.de/doi/epdf/10.1002/bate.202100100>
- National Highways (National Highways, Hrsg.). (2021a). *Delivery Plan 2022-2023*. Verfügbar unter: [www.nationalhighways.co.uk](http://www.nationalhighways.co.uk)
- National Highways (National Highways, Hrsg.). (2021b). *Digital Roads 2025 Roadmap*.
- National Highways (National Highways, Hrsg.). (2021c). *Digital Roads Safer construction and operations - Faster delivery - Better customer experience*.

- National Infrastructure Commission. (2017). *Data for the public good*.
- Neff, G., Fiore-Silfvast, B. & Dossick, C. S. (2010). *A CASE STUDY OF THE FAILURE OF DIGITAL COMMUNICATION TO CROSS KNOWLEDGE BOUNDARIES IN VIRTUAL CONSTRUCTION* (4). <https://doi.org/10.1080/13691181003645970>
- NVDB Transportportal. (2022). *API-Dokumentation*.
- Nwogu, C., Lugaresib, G., Anagnostou, A., Matta, A. & Taylor, S. (2022). *Towards a Requirement-driven Digital Twin Architecture*. Verfügbar unter: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren, für Bau und Verkehr. (2015). *Verkehrs- und Unfallgeschehen auf Straßen des überörtlichen Verkehrs in Bayern*.
- Oesterreich, T. D. & Teuteberg, F. (2016). *Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Bauindustrie im Kontext von Industrie 4.0 - Situationsanalyse und Zieldefinition im Zuge einer Technikfolgenabschätzung. Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Bauindustrie im Kontext von Industrie 4.0 – Situationsanalyse und Zieldefinition im Zuge einer Technikfolgenabschätzung* (Heinrich C. Mayr, Martin Pinzger, Hrsg.). Bonn.
- OKSTRA-Pflegestelle.. *Okstra. Version 2.020* (OKSTRA-Pflegestelle, Hrsg.).
- Opoku, D.-G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R. & Rashidi, M. (2021). *Digital twin application in the construction industry: A literature review*. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2021.102726>
- Oreto, C., Biancardo, S. A. [Salvatore A.], Veropalumbo, R., Viscione, N., Russo, F. & Dell'Acqua, G. (2022). *BIM-LCCA Integration for Road Pavement Maintenance*. <https://doi.org/10.1177/03611981221074368>
- Oreto, C., Massotti, L., Biancardo, S. A. [S. A.], Veropalumbo, R., Viscione, N. & Russo, F. (2021). BIM-Based Pavement Management Tool for Scheduling Urban Road Maintenance. *Infrastructures*, 6(11), 148. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110148>
- Papic, D. & Cerovsek, T. (2019). *Digital built environment maturity model: Digital twins advancing smart infrastructure asset management*. <https://doi.org/10.35490/EC3.2019.234>

- Park, K. t., Lee, D. & Noh, S. D. (2020). *Operation Procedures of a Work-Center-Level Digital Twin for Sustainable and Smart Manufacturing* (3). <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00227-1>
- Parrott A. & Warshaw L. (2017). *Industry 4.0 and the digital twin Manufacturing meets its match* (Deloitte, Hrsg.).
- Pauwels, P. & Terkaj, W. (2015). *EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.003>
- Pauwels, P., Zhang, S. & Lee, Y.-C. (2016). *Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.003>
- Pedersen, L. G. (2013). *VEJREFERENCE MODELLEN*.
- Peraka, N. S. P. & Biligiri, K. P. (2020). *Pavement asset management systems and technologies: A review*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103336>
- Perera, S., Nanayakkara, S., Rodrigo, M., Senaratne, S. & Weinand, R. (2020). Block-chain technology: Is it hype or real in the construction industry? *Journal of Industrial Information Integration*, 17, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100125>
- Pregolato, M., Gunner, S., Voyagaki, E., Risi, R. de, Carhart, N., Gavriel, G. et al. (2022). Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure. *Automation in Construction*, 141, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421>
- Qi, Q. & Tao, F. (2018). *Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Radenberg, M., Müller, D., König, M. & Hagedorn, P. (2021). *Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko. Schlussbericht zum FE 02.0427/2018/ARB* (Ruhr-Universität Bochum Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Hrsg.).
- Radenberg, M., Müller, D., König, M., Hagedorn, P., Geistefeldt, J., Hohmann, S. et al. (2021). „Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko“. *Schlussbericht zum FE 02.0427/2018/ARB* (Ruhr-Universität Bochum, Hrsg.).

- Raj, P. (2021). *Empowering digital twins with blockchain*. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2020.08.013>
- Roth, A. (2016). *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48505-7>
- Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S. & Girolami, M. (2020). *Construction with digital twin information systems* (Cambridge University Press, Hrsg.). <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L. & Wartzack, S.. *Shaping the digital twin for design and production engineering* (1). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- Schmidt, W., Borgert, S., Fleischmann, A., Heuser, L., Müller, C. & Schweizer, I. (2015). *Smart Traffic Flow* (4). <https://doi.org/10.1365/s40702-015-0146-0>
- Shim, C., Dang, N., Lon, S. & Jeon, C. (2019). *Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model* (10). <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1620789>
- Siegert, C., Holst, A., Empelmann, M. & Budelmann, H. (2015). *Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit* (Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 118). Bremen: Fachverlag NW.
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E., Qiao, Y., Murray, N. & Devine, D. (2021). *Digital Twin: Origin to Future* (2). <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
- Sinhal, R., Mbah, N., Scott, P. & Gibb, M. (2018). *Framework for adopting whole life and risk-bases approach in Europe. D2.3* (AM4INFRA, Hrsg.).
- Smith, I. F. C. (Hrsg.). (2006). *Intelligent computing in engineering and architecture. 13th EG-ICE Workshop 2006, Ascona, Switzerland, June 25-30, 2006 revised selected papers* (Lecture notes in computer science Lecture notes in artificial intelligence, Bd. 4200). Berlin: Springer.
- Soilán, M., González-Aguilera, D., del-Campo-Sánchez, A., Hernández-López, D. & Del Pozo, S. (2022). Road marking degradation analysis using 3D point cloud data

- acquired with a low-cost Mobile Mapping System. *Automation in Construction*, 141, 104446. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104446>
- Steinberg, A. N. & Bowman, C. L. (2001). *Handbook of multisensor data fusion*.
- Steiner, R., Kytzia, S. & Mathis, L. (2020). *Untersuchung zum aktuellen Stand der Anwendung von BIM im Infrastrukturbau* (VSS Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute, Hrsg.) (11). Zürich.
- Stöckner, M., Sagnol, L., Brzuska, A., Wellner, F., Blasl, A., Sommer, V. et al. (2021). *Abschätzung des Restwertes im PMS am Ende des Bewertungszeitraums. =Estimation of the residual value in the PMS at the end of the valuation period* (Störckner, M., Sagnol, L., Brzuska, A., Wellner, F., Blasl, A., Sommer, V., Krause, G. & Komma, C., eds.) (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen S, Straßenbau). Bremen: Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft; Technische Universität Dresden; HELLER Ingenieurgesellschaft; Bundesanstalt für Straßenwesen; Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für Neue Wissenschaft.
- Syafrudin, M., Alfian, G., Fitriyani, N. L. & Rhee, J. 2018. *Performance Analysis of IoT-Based Sensor, Big Data Processing, and Machine Learning Model for Real-Time Monitoring System in Automotive Manufacturing* (9). <https://doi.org/10.3390/s18092946>
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L. & Nee, A. (2019). *Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison* (4). <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Teisserenc, B. & Sepasgozar, S. (2021). *Adoption of Blockchain Technology through Digital Twins in the Construction Industry 4.0: A PESTELS Approach* (12). <https://doi.org/10.3390/buildings11120670>
- Terkaj, W. & Šojić, A. (2015). *Ontology-based representation of IFC EXPRESS rules: An enhancement of the ifcOWL ontology*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.010>
- Uhlenkamp, J., Hauge, J., Broda, E., Lütjen, M., Freitag, M. & Thoben, K. (2022). *Digital Twins: A Maturity Model for their Classification and Evaluation*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3186353>
- Ungureanu, L. & Hartmann, T. (Eds.). (2020). *EG-ICE 2020 proceedings: International Workshop on Intelligent Computing in Engineering. 1st-4th July 2020, online*,



- Technische Universität Berlin*. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin.  
<https://doi.org/10.14279/depositonce-9977>
- VanDerHorn, E. & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 1–11.  
<https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Varabei, Y., Wimmer, J. & Braml, T. (2022). *Ingenieurbauwerke als intelligente Systeme – Erhaltungsmanagement mit Structural Health Information Patterns (SHIPs)* (7). <https://doi.org/10.1002/best.202200028>
- Vegdata.no. (2022). *Data vi ikke publiserer*.
- Vejdirektoratet (Vejdirektoratet, Hrsg.). (2021). *Dataudveksler*. Verfügbar unter: <https://du-portal-ui.dataudveksler.app.vd.dk/>
- Vejdirektoratet. (2022a). *Asset Management med dTIMS* (Vejdirektoratet, Hrsg.).
- Vejdirektoratet (Vejdirektoratet, Hrsg.). (2022b). *Katalog over vejmyndighedssamarbejde 2022*.
- Vejdirektoratet (<https://www.vejdirektoratet.dk/side/standardisering-af-vej-og-trafik-data>, Hrsg.). (2022c). *Standardisering af vej- og trafikdata*. Verfügbar unter: <https://www.vejdirektoratet.dk/side/standardisering-af-vej-og-trafikdata>
- Venkatesan, S., Manickavasagam, K., Tengenkai, N. & Vijayalakshmi, N. (2019). Health monitoring and prognosis of electric vehicle motor using intelligent-digital twin. *IET Electric Power Applications*, 13(9), 1328–1335. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5732>
- Vuori, V., Helander, N. & Okkonen, J. (2018). *Digitalization in knowledge work: the dream of enhanced performance* (2). <https://doi.org/10.1007/s10111-018-0501-3>
- W3C (W3C, Hrsg.). (2004). *OWL Web Ontology Language Guide*.
- W3C (W3C, Hrsg.). (2007, 30. März). *Semantic Web Layer Cake*. Zugriff am 11.08.2022.
- W3C. (2013). *Web Ontology Language (OWL)*.
- W3C (W3C, Hrsg.). (2015a). *LINKED DATA*.
- W3C. (2015b). *SEMANTIC WEB*.

- Weise, M., Schmidt, I. & Hettwer, J. (2018). *OKSTRA, IFC und BIM: Neue Wege im Umgang mit Straßeninfrastrukturdaten*.
- Weller, C. (2021). *Zustandsbeurteilung von Ingenieurbauwerken. Methodik zur Reduzierung subjektiver Bewertungseinflüsse*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32680-7>
- Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag. (2021). *Energieverbrauch von Rechenzentren. WD 8 - 3000 - 070/21* (Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag, Hrsg.).
- WPM-Ingenieure. (2019). *SIB-Bauwerke Dokumentation 1.93*.
- Xiang, F., Zhang, Z., Zuo, Y. & Tao, F. (2019). *Digital Twin Driven Green Material Optimal-Selection towards Sustainable Manufacturing*. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.015>
- Zentralstelle Straßeninformationssysteme (ZIS) bei der Landesbaudirektion Bayern. (2019). *BAYSIS. Bayrisches Straßeninformationssystem (7.)* (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, Hrsg.). <https://doi.org/10.1515/9783110636413-004>
- Zhang, Y. (2020). *Application of Information Technology to Maintenance Management of Civil Infrastructure with BIM Collaboration Platform*. Thesis. Hokkaido University, Sapporo. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/2115/79410>