

Digitaler Zwilling von Brücken

Beitrag zum Masterplan
Digitaler Zwilling Bundes-
fernstraßen



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Vorwort	3
Ziele und Adressaten des Dokumentes	4
Reallabor Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen	6
<hr/>	
1 – Einleitung	9
2 – Erhaltungsmanagement von Brücken im Bundesfernstraßennetz	17
3 – Was ist ein Digitaler Zwilling?	27
4 – Digitaler Zwilling und BIM im Kontext dieses Dokumentes	35
5 – BIM-Modell: Anforderungen und Aufbau	55
6 – Bauwerksprüfung: Die integrale und visuelle Bewertungsbasis	63
7 – Bauwerksdiagnostik: Detailinformationen aus dem Bauwerksinneren	73
8 – Bauwerksmonitoring: Die dynamische Datenquelle	83
9 – Data Analytics: Aggregation der Bauwerksinformationen	99
10 – Mensch-Maschine-Schnittstelle und Visualisierung	115
11 – IT-Architektur und Datenmanagement für den Digitalen Zwilling	125
12 – Digitaler Zwilling als Basis für ein nachhaltiges Bauwesen	137
13 – Auswirkung des Digitalen Zwillings auf Menschen, Arbeitsprozesse, Regelwerke und Richtlinien, Daten und Technologien	145
14 – Fazit und Ausblick	151
<hr/>	
Glossar Abkürzungen	155
Literaturverzeichnis	159

Vorwort

Brücken sind Meisterwerke der Baukunst. Sie prägen das Verkehrsnetz und unsere Landschaften. Sie überwinden Hindernisse, verbinden und führen zusammen. Sie sind Garanten für Mobilität und damit für Wachstum, Wohlstand und Arbeit. Geplant und umgesetzt werden sie entsprechend ihres Verkehrs- und Lastaufkommens. Die dafür in der Vergangenheit gewählten Dimensionen sind heute nicht mehr ausreichend, insbesondere mit Blick auf das gestiegene Schwerverkehrsaufkommen. Anzahl und Gewicht der Lkw-Transporte sind eine Herausforderung. In Deutschland gibt es im Bundesfernstraßennetz derzeit leider viele Brückenbauwerke, die in die Jahre gekommen sind und an ihre Belastungsgrenze stoßen. Oft wurden die nötigen Maßnahmen in der Vergangenheit nicht oder nicht rechtzeitig ergriffen, so dass nun dringender Handlungsbedarf besteht. Wir stellen uns dieser Aufgabe und arbeiten gemeinsam mit vielen Partnern der Baubranche daran, die betroffenen Brücken zu modernisieren und zukunftssicher zu machen.

Damit es künftig erst gar nicht zu akuten Situationen kommt, behalten wir die Brücken besser im Blick. Dabei hilft uns die Digitalisierung, genauer gesagt: der Digitale Zwilling von Brücken, um den es in diesem Dokument geht. Erstellt wurde dieser Beitrag in enger Zusammenarbeit zwischen der Hamburg Port Authority (HPA) und dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Die Basis bildet das Pilotprojekt *smartBRIDGE Hamburg*, mit dem die enormen Potenziale der Digitalisierung in die reale Welt pilotweise überführt wurden. Ein interdisziplinäres Team aus Ingenieuren, IT-Spezialisten und Bauwerksprüfern erprobte und testete dabei an der Köhlbrandbrücke neue Ansätze für die Zustandsbeurteilung, das Instandhalten und Erhalten. Als Ergebnis ist dabei der Digitale Zwilling der Köhlbrandbrücke entstanden.

Der Mehrwert besteht darin, dass eine virtuelle Abbildung der Brücke am Computer erstellt werden kann. Damit wird es möglich, die Erhaltung noch vorausschauender anzugehen. Dieser Digitale Zwilling ist mit dem realen Bauwerk dynamisch gekoppelt und vernetzt. Über Sensoren, die an der Brücke installiert sind, bekommt das virtuelle Modell Echtzeitdaten zu Zustand und Verhalten. Das ist in etwa so, als ob eine Art Puls gemessen wird, auf den dann reagiert werden kann. Hinzu kommen die Daten aus der regelmäßigen Bauwerksprüfung und -diagnostik. Durch das digitale Zusammenspiel dieser Informationen kann schnell erkannt werden, wie stark die Belastung ist, an welchen Stellen Schäden drohen und wo rechtzeitig instandgesetzt werden muss. So kann schneller reagiert werden, weil das Verhalten der Brücke prognostizierbarer wird.



Zum anderen lassen sich Defizite kompensieren, um eine weitere sichere Nutzung der Brücke auch über die geplante Nutzungsdauer hinaus zu gewährleisten. Getreu dem Motto: früh erkennen, früh handeln.

Für das Betreiben und Erhalten von Bauwerken sind solche objektiven, realistischen und aktuellen Bewertungen ein großer Fortschritt. Die Lebensdauer von Brücken – gerade der schon etwas älteren – kann mit dieser Hilfe entscheidend verlängert werden. Das ist nachhaltig, wirtschaftlich und gut für das Klima. Zudem erleichtert der Einsatz digitaler Methoden die Arbeit der Akteure, die sich mit dem Erhalt unserer Infrastruktur beschäftigen. Vieles geht schneller und effizienter. Genutzt werden kann diese Methode übrigens auch für das Erhalten und Sanieren der Bundesfernstraßen.

Damit sich die Innovationen möglichst breit durchsetzen und ihre Vorteile ausspielen können, müssen sie verstanden und erlebt werden. Dieser Beitrag hilft dabei. Neben der Dokumentation aller wichtigen Bausteine auf diversen Detailebenen enthält er erstmalig auch den Zugang zum Reallabor. Das heißt: Sie bekommen Zugriff auf den Testaccount des BMDV, der die Funktionen des Digitalen Zwillings der Köhlbrandbrücke demonstriert. Zudem gelangen Sie zur dazugehörigen Internetseite mit aufschlussreichen Expert:innenvideos. Nutzen Sie diese Chance! Lassen Sie sich von den digitalen Möglichkeiten begeistern und vor allem setzen Sie diese ein. Denn wie in anderen Bereichen gilt auch hier: Digital ist einfach – und einfach ist besser!

Dr. Volker Wissing, MdB
Bundesminister für Digitales und Verkehr

Ziele und Adressaten des Dokumentes

Das Pilotprojekt *smartBRIDGE Hamburg* stellt den ersten Großdemonstrator eines Digitalen Zwillings einer Bundesfernstraßeninfrastruktur an der Bundesstraße 3 (B3) im Realbetrieb dar. Das Projekt ist als Beispiel zu verstehen und soll das Entwicklungspotenzial hin zu höheren Reifegraden eines Digitalen Zwillings zeigen.

Mit diesem Digitalen Zwilling konnte die Hamburg Port Authority (HPA) dank eines innovativen Konzepts neue Anwendungsfälle und Technologien an der Köhlbrandbrücke erproben. Die cloud-basierte Echtzeit-Zustandsbeurteilung integriert Daten aus Bauwerksdiagnostik, Bauwerksmonitoring und aus der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 zu Zustandsindikatoren in einem gemeinsamen Konzept. Der Fokus im Projekt bezog sich primär auf die Ableitung aktueller und objektiver Zustandsindikatoren und auf die Entwicklung einer möglichst intuitiven Nutzeroberfläche unter Einbeziehung von BIM-Modellen. Dieses Projekt bildet einen wichtigen Baustein für die prädiktive Instandhaltung und ist grundsätzlich auf andere Anlagen des Bundesfernstraßenbaus skalierbar.

Die Erkenntnisse aus der Entwicklung dieses Digitalen Zwillings Brücke, die darauf aufbauenden Ableitungen sowie der branchenübergreifende status quo in Praxis und Forschung werden allen Straßenbauverwaltungen im Rahmen dieses Dokumentes zur Verfügung gestellt. Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) verfolgt damit das Ziel, bei der Etablierung der Testfelder „Digitaler Zwilling“ (vgl. [BMVI Masterplan, 2021]) auf einem hohen Erkenntnisgrad aufbauen zu können, um die Digitalisierung des Betriebs zu beschleunigen und Entwicklungsimpulse für die Auftragsverwaltungen, die Auftragnehmer:innen und die Forschung zu geben.

Neben diesem Dokument stellt das BMDV erstmals ein Reallabor des *Digitalen Zwillings Brücke* zur Verfügung, um die praxisnahen Anwendungsfälle am konkreten Projekt der *Köhlbrandbrücke Bundesstraße 3 (B3)* zu erleben. Kernelement des Reallabors ist die Softwareplattform *smartBRIDGE Hamburg*, die von allen Interessierten besucht werden kann. Zu Demonstrationszwecken

wurden Beispieldaten und -szenarien implementiert, wodurch Änderungen des Bauwerkszustands in Echtzeit beobachtet werden können. Eine Anleitung ermöglicht den schnellen Einstieg in die Software. Durch die Kombination von freier Navigation und vordefinierten Szenarien kann ein Digitaler Zwilling am Beispiel der Köhlbrandbrücke erlebt werden. Hiermit soll die Akzeptanz der Technologien des Digitalen Zwillings aus Auftraggeber:innen-Perspektive im Bundesfernstraßenbau erhöht werden. Basis des Reallabors ist das Brückenbauwerk als Großdemonstrator – bestehend aus BIM-Modell, IoT-Infrastruktur und über 500 installierten Sensoren. Neben dem Testaccount komplettiert eine Website mit mehreren Expert:innenvideos das Reallabor. Die Website fasst die Erkenntnisse des Dokumentes strukturiert zusammen und stellt den Digitalen Zwilling Brücke am Beispiel der Köhlbrandbrücke auf der Bundesstraße 3 (B3) in Hamburg vor. Dokument und Reallabor komplettieren sich zu einer Einheit. Wir ermuntern die Lesenden, beide Informationsquellen für den größten Effekt ergänzend zu nutzen. Die detaillierte Erklärung sowie der Zugang zum [Reallabor](#) befinden sich auf der Folgeseite.

Anlass und Ziel dieses Dokumentes

Die Digitalisierung im Bauwesen ist eine enorme Chance, um Infrastruktur im Bundesfernstraßennetz effektiver, wirtschaftlicher und ressourcenschonender zu planen und zu bauen – vor allem aber zu betreiben und zu unterhalten. Die Idee des Digitalen Zwillings koppelt unterschiedliche Disziplinen, Methoden und Entwicklungen zu einem Metakzept und kann so dabei unterstützen, die zuvor genannten Potenziale mit Hilfe konkreter Schritte auszuschöpfen. In diesem Dokument bezieht sich das Konzept konkret auf Brücken – es kann aber grundsätzlich auf andere Ingenieurbauwerke und Hochbauten übertragen werden.

Was aber ist ein Digitaler Zwilling? Wie kann uns dieses Konzept dabei unterstützen, effektiver, wirtschaftlicher und ressourcenschonender mit unserer Infrastruk-

tur umzugehen? Wie wird ein Digitaler Zwilling aufgebaut? Welche Erfahrungen ließen sich aus dem ersten konkreten Projekt *smartBRIDGE Hamburg* ableiten?

In diesem Dokument sollen diese und weitere Fragen anhand folgender Ziele beantwortet werden:

- Gemeinsames Verständnis durch Definition eines Digitalen Zwillings schaffen
- Einordnung des Digitalen Zwillings im Kontext des BIM-Masterplans: Abgrenzung, Anknüpfung und Schnittstellen zur konsequenten Überführung von BIM in die Betriebsphase
- Orientierung ermöglichen, wie sich ein Digitaler Zwilling in die aktuellen Prozesse, Standards und Strategien einbettet und welche Auswirkungen damit verbunden sind
- Nutzen und Ziele eines Digitalen Zwillings im Betrieb von Infrastrukturbawerken vorstellen
- Akzeptanz für diese Entwicklung erhöhen und Stakeholder motivieren, das Konzept des Digitalen Zwillings zu unterstützen und anzuwenden
- Stakeholder befähigen, das Konzept zu verstehen, selbst zu beschreiben und die Grundlagen für eine Umsetzung zu schaffen
- Vorstellung der Bausteine und Anforderungen für die Umsetzung eines Digitalen Zwillings
- Handlungsfelder identifizieren und Impulse für Standardisierung und Weiterentwicklungen geben

Adressaten des Dokumentes

Dieses Dokument richtet sich vorrangig an die Bundesfernstraßenverwaltungen: Es betrifft die Autobahn GmbH, weitere Infrastrukturbetreiber und die Auftragsverwaltungen der Länder. Auch weitere Akteure, die an der Bauwerkserhaltung mitwirken (z. B. Ingenieurbüros, Baufirmen) werden zur Zielgruppe gezählt.

Es werden Personen mit verschiedenen Funktionen adressiert, wobei unterschiedliche Ziele verfolgt und somit Informationen in unterschiedlichen Formaten bereitgestellt werden:

- Die strategische Führungsebene der Bundesfernstraßenverwaltungen soll vorrangig informiert und für das Konzept aufgeschlossen werden. Die Einleitung und die Kurzfassung zu Beginn jedes Kapitels stellt die notwendigen Informationen zusammen.
- Personal des Anlagenmanagements, Fachingenieur:innen, BIM-Manager:innen, Bauwerksprüfer:innen und weitere Akteure sollen für das Konzept aufgeschlossen und vorrangig befähigt werden, das Konzept zu verstehen, zu beschreiben und die Grundlagen der Umsetzung zu schaffen. Das Dokument als Gesamtwerk stellt dazu die erforderlichen Inhalte bereit. Teilweise werden auch die Grundlagen der Bauwerkserhaltung zusammengestellt. So können – für das Verständnis der Einbettung des Digitalen Zwillings in die Erhaltungsstrategie – die notwendigen Inhalte gebündelt werden. Auch für die Personen, die im Zuge ihrer Tätigkeit das Konzept in Teilen umsetzen und ausprobieren möchten, werden im Dokument Detailinformationen und im Reallabor zugehörige Beispiele bereitgestellt.

Einbettung im Masterplan BIM Bundesfernstraßen

Der *Masterplan BIM Bundesfernstraßen* [BMVI Masterplan, 2021] sieht ab Phase III der BIM-Implementierung „BIM-Testfelder Digitaler Zwilling“ in den Straßenbauverwaltungen der Länder und der Autobahn GmbH vor, um Anwendungsfelder des Digitalen Zwillings zu pilotieren (Abb. 3 und Kapitel 6.4. des zuvor erwähnten Masterplans).

Das Projekt *smartBRIDGE Hamburg* der Hamburg Port Authority AöR stellt den ersten Großdemonstrator eines Digitalen Zwillings einer Bundesfernstraßeninfrastruktur dar, in dem die Freie und Hansestadt Hamburg unterschiedliche Anwendungsfälle und innovative Technologien an der Köhlbrandbrücke pilotieren konnte. Mit diesem Beitrag sollen erste Erfahrungen nun dem BMDV, der Autobahn GmbH und den Auftragsverwaltungen der Länder zur Verfügung gestellt werden. Ebenso ist der Beitrag als Einladung an Fachleute zu verstehen, ihre umfangreiche Expertise im Sinne der laufenden digitalen Transformation einzubringen.

Reallabor Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen

Neben diesem Dokument stellt das BMDV erstmals ein Reallabor des „Digitalen Zwillings Brücke“ zur Verfügung, um die praxisnahen Anwendungsfälle am konkreten Projekt der Köhlbrandbrücke der Bundesstraße 3 zu erleben.

Das Reallabor besteht aus drei Elementen:

1. Digitaler Zwilling – was ist das und warum:

Hier wird die Essenz Dokumentes „Digitaler Zwilling von Brücken – Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen“ übersichtlich und leicht konsumierbar dargestellt.

2. smartBRIDGE Hamburg:

Hier wird *smartBRIDGE Hamburg* vorgestellt – die Kombination aus intelligenter IoT-Sensorik und dem Digitalen Zwilling der Köhlbrandbrücke.

3. Den Digitalen Zwilling erleben:

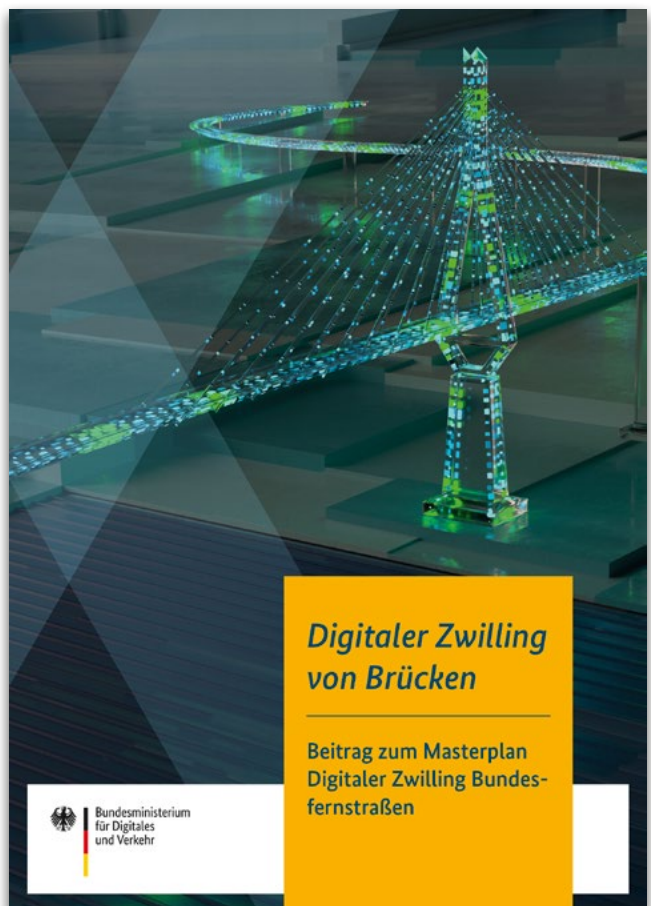
Hier können alle Interessierten eigenständig den Digitalen Zwilling erkunden und sich „durch die Software von *smartBRIDGE Hamburg* klicken.“

Die ersten beiden Elemente sind informativer Natur. Sämtliche Informationen sind in Form von Videos, Bildern und kurzen Texten komprimiert und leicht verständlich dargestellt. Hier können Sie sich über alle Aspekte des Digitalen Zwillings Brücke und der *smartBRIDGE Hamburg* informieren.

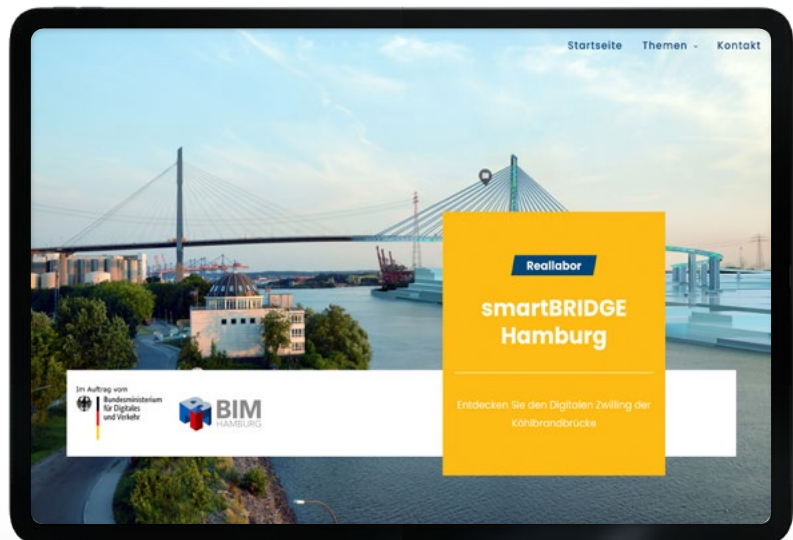
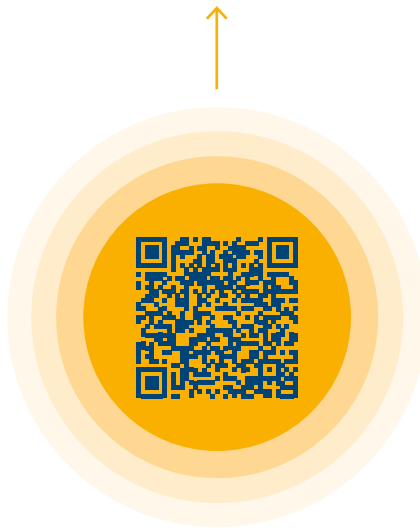
Das dritte ist das explorative Element. Alle Interessierten können den Digitalen Zwilling der Köhlbrandbrücke eigenständig entdecken.

Zu Demonstrationszwecken wurden Beispieldaten und -szenarien implementiert, wodurch Änderungen des Bauwerkszustands in Echtzeit beobachtet werden können. Eine Anleitung ermöglicht den schnellen Einstieg in die Software. Durch die Kombination von freier Navigation und vordefinierten Szenarien kann ein Digitaler Zwilling am Beispiel der Köhlbrandbrücke erlebt werden. Hiermit soll die Akzeptanz der Technologien des Digitalen Zwillings aus Auftraggeber:innen-Perspektive im Bundesfernstraßenbau erhöht werden.

Basis des Reallabors ist das Brückenbauwerk als Großdemonstrator auf der Bundesstraße 3 – bestehend aus BIM-Modell, IoT-Infrastruktur und über 500 installierten Sensoren.



Das vorliegende Dokument und das Reallabor komplettieren sich zu einer Einheit. Wir ermuntern alle Lesenden, beide Informationsquellen für den größten Effekt ergänzend zu nutzen. Alle digitalen Angebote finden Sie unter: bmdv.bund.de/digitalerzwilling-beitrag-koehlbrandbruecke





1 – Einleitung

Ausgangssituation

Rückgrat einer starken Volkswirtschaft ist eine funktionsfähige, leistungsfähige, verfügbare und sichere Verkehrsinfrastruktur. Brücken sind ein wichtiger Bestandteil des Bundesfernstraßennetzes und ermöglichen Tag für Tag Mobilität und Warenverkehr – sind aber zugleich ein fragiler Bestandteil: Der Großteil der sich heute in Betrieb befindlichen Brückenbauwerke wurde zwischen 1960 und 1985 erbaut (ABB 1.1). Bedingt durch das Alter der Bauwerke und den starken Verschleiß wird mit Stand 2020 der Zustand von ca. 12 % der Brückenfläche (entspricht ca. 4,5 % der Teilbauwerke [Bast, 2021]) im Bundesfernstraßennetz als „nicht ausreichend“ bzw. „ungenügend“ bewertet [BMVI Modern, 2020]. Dieser Zustand wird rein durch die im Zuge der äußeren und handnahen Sichtprüfung des Bauwerks aufgenommenen Schäden ermittelt.

Deutschland hat im internationalen Vergleich ein sehr gutes, einheitliches, konzeptionell schlüssiges und bewährtes System zur Erhaltung von Ingenieurbauwerken, das einen sicheren Betrieb der Bauwerke gewährleistet. Durch die Anwendung dieser Erhaltungsstrategie und das Einsetzen des Brückenmodernisierungsprogramms konnte der

Anteil der mit „nicht ausreichend“ und „ungenügend“ bewerteten Brücken seit 2005 verringert und seit 2019 ein Wiederanstiegen der mit „sehr gut“ und „gut“ bewerteten Brücken erreicht werden. Der Traglastindex, als weiteres Bewertungskriterium der Brücken im Bundesfernstraßennetz, berücksichtigt unabhängig von dem zuvor genannten Zustand die Tragfähigkeitsdefizite der Brücken, die Übereinstimmung mit dem Ziellastniveau der Brücken und rechnerische Defizite. In den letzten Jahren konnte durch Verstärkungen oder Erneuerungen von Brücken auch der Traglastindex verbessert werden.

Die Darstellungen zeigen, dass in der aktuellen Situation – trotz der genannten Verbesserungen – nach wie vor ein hoher Rückstau bei der Erhaltung im Sinne der RPE-ING besteht. Erhaltung geht aber nicht mit einem grundsätzlichen Neubau der defizitären Brücke einher. Ein flächendeckender Ersatz der alten Bausubstanz durch neue Bauwerke ist aus verschiedenen Gründen nicht möglich, nicht nötig oder nicht erstrebenswert. Deshalb ist der Erhalt von Brücken ein wesentlicher Baustein zur Aufrechterhaltung eines leistungsfähigen Netzes [BMDV, 2022].

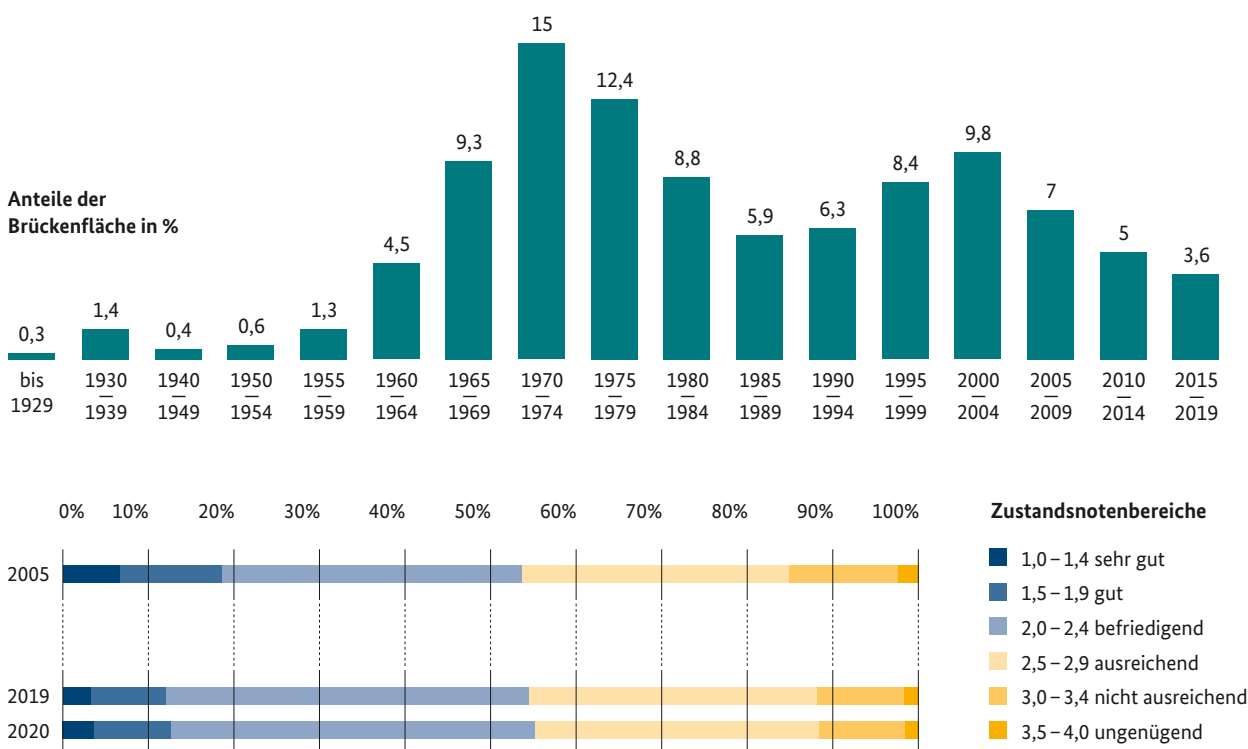


ABB 1.1 Altersstruktur der Brücken sowie Zustandsnotenverteilung in den Jahren 2005, 2019 und 2020 im Bestand der Deutschen Bundesfernstraßen nach Anteil an Brückenfläche [%] Stand: 01.09.2020 [BMVI Modern, 2020]

Ein Grund für Erhalt statt Neubau: Unser CO₂-Fußabdruck

Der Bausektor ist verantwortlich für 38 % der CO₂-Emissionen weltweit [UN, 2020], siehe auch **ABB 1.2**. Fast 10 % der globalen Emissionen können allein der Herstellung von Baustoffen, vor allem Zement und Stahl, zugeteilt werden. Dies macht deutlich, dass im Bauwesen ein Umdenken im Umgang mit unseren Ressourcen unumgänglich ist. Architekt:innen und Bauingenieur:innen besitzen mit ihren Entscheidungen einen großen Hebel für Veränderungen. Der effizientere Materialeinsatz und eine deutliche Reduktion der Materialnachfrage sind gem. [IEA, 2020] wesentliche Schlüssel, um CO₂-Emissionen zu reduzieren. Untersuchungen zeigen, dass Maßnahmen zum Erhalt und zur Verlängerung der Lebensdauer von Bauwerken einen wesentlichen Einfluss auf diese Reduktionsziele haben. Durch eine Änderung des Status Quo, hin zu nachhaltigeren Entwicklungen, könnte von allen Maßnahmen die Verlängerung der Lebensdauer 40 % der potenziellen Materialeinsparungen von Stahl und fast 70 % von Beton ausmachen (bezogen auf den Prognosezeitraum 2019 – 2070) [IEA, 2020].

Erhalt, aber nicht um jeden Preis

Der Erhalt der Bausubstanz und die damit verbundene Reduktion des Primärrohstoffverbrauchs muss allerdings zwingend mit der Beibehaltung der Standsicherheit und Verkehrssicherheit sowie der Aufrechterhaltung einer hohen Verfügbarkeit einhergehen.

Um auf diese konträren Ziele reagieren zu können, muss sich die Erhaltungsstrategie auf eine möglichst realistische und stetig aktuelle Bewertung des Zustands der Bauwerke stützen. Die derzeitigen Methoden in der Bauwerkserhaltung haben sich in den letzten Jahrzehnten bewährt. Um aber einen Übergang von der derzeit reaktiven zu einer weitgehend digitalen, integraleren und vorausschauenden Instandhaltung zu ermöglichen, müssen die manuelle Prüfung nach DIN 1076 sowie die rechnerischen Bewertungsprozesse optimiert werden. Die durch digitale Transformation entstandenen und entstehenden Technologien und Methoden werden die Basis für das Erhaltungsmanagement der Zukunft darstellen. Im Speziellen wird der Digitale Zwilling als übergeordnetes Konzept eine zunehmend wichtigere Rolle einnehmen.

Der Megatrend der digitalen Transformation und seine Auswirkung auf das Bauwesen

Die digitale Transformation ist eine Sprunginnovation in der menschlichen Entwicklung und ein Megatrend unserer

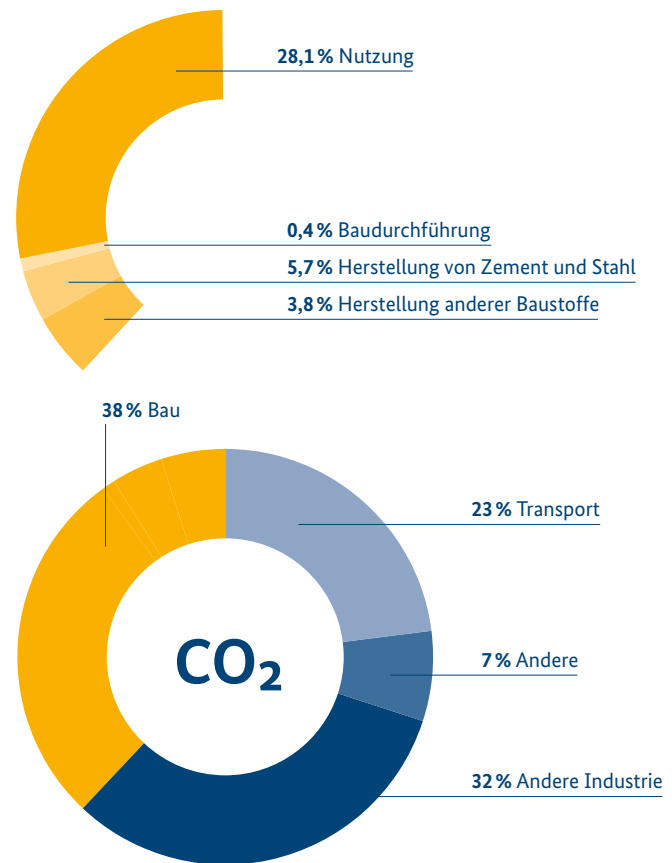


ABB 1.2 Globaler Anteil des Bauwesens an den Emissionen, 2019, adaptiert aus [IEA, 2020] und [UN, 2020]

Zeit. Diese sehr dynamische Entwicklung ist oft angebotsgetrieben: Technologische Durchbrüche in einer Disziplin führen zu neuen Möglichkeiten in anderen Disziplinen. Dieser Umwandlungsprozess führt nicht einfach zum Einsatz neuer digitaler Technologien – er verändert weltweit tiefgreifend die Wertschöpfungsketten, Managementstrategien und Unternehmenslandschaften.

Digitale Zwillinge verknüpfen eine Vielzahl von Technologien und Möglichkeiten der digitalen Transformation mit dem Ziel, virtuelle, dynamische, möglichst getreue Abbilder der realen Welt zu erstellen. Durch den Einsatz von Digitalen Zwillingen ergeben sich Vorteile für die Gesellschaft, die Wirtschaft, für Unternehmen und die Umwelt [Bolton et al., 2018]. Die Entwicklung hin zu einer steigenden Erstellung und Verwendung von Digitalen Zwillingen stellt branchenübergreifend ein künftiges Kerngeschäft und damit eine Kernkompetenz für viele interdisziplinär aufgestellte Unternehmen dar. Von diesem Wandel sind auch das Bauwesen und damit die öffentlichen Straßenbauverwaltungen unvermeidlich betroffen. Doch der für Gesellschaft und Umwelt gewinnbringende Einsatz von Digitalen Zwillingen und weiteren digitalen Methoden setzt grundlegende Änderungen der Branche voraus. Baufirmen, Ingenieurbüros, Straßenbauverwaltungen und weitere Dienstleister:innen im Bausektor stehen somit vor großen Herausforderungen.



ABB 1.3 Der Digitale Zwilling: ein virtuelles Abbild des realen Assets

Zukunftsbild Digitaler Zwilling

Im idealen Zukunftsbild verschmelzen reale und digitale Welt im Digitalen Zwilling (ABB 1.3). Diese Verschmelzung kann schon in der frühen Phase der Planung eines Bauwerks stattfinden, im Kontext des vorliegenden Dokuments wird aber aufgrund der großen Menge an älteren Bestandsobjekten und der damit einhergehenden Herausforderungen der Fokus auf den Betrieb und Erhalt von Brückenbauwerken gelegt.

Das virtuelle Abbild in diesem Zukunftsbild enthält die maßgebenden Eigenschaften zu Geometrie, Materialität und Zustand und passt sich dynamisch über eine direkte Kopplung mit dem Bauwerk mittels Sensoren an Änderungen an. Ein Digitaler Zwilling sieht nicht nur so aus wie das reale Asset, er verhält sich auch so. Im Gegensatz zum realen Objekt enthält der Digitale Zwilling aber weiterführende und auch historische Informationen, sodass er mehr als ein aktuelles Abbild des realen Objektes ist: Digitale Zwillinge verfügen über Informationen, die im gesamten Lebenszyklus des Bauwerks entstehen. Solche integralen Informationen ermöglichen den Aufbau eines komplexen Modells, das eine genaue Einschätzung der aktuellen Situation, ein Verständnis für die bisherige Entwicklung und kausale Zusammenhänge, aber parallel auch die Erstellung von Prognosen ermöglicht (ABB 1.4).

In diesem idealen Zukunftsbild mit hohem Reifegrad entsteht für den Betrieb und Unterhalt eines Bauwerks eine hochwertige und objektive Entscheidungsgrundlage: Der aktuelle Zustand kann anhand des Modells stets präzise bewertet, verschiedene Optionen zum Umgang mit dem sich entwickelnden Zustand können untersucht, die Notwendigkeit von baulichen oder verkehrlichen Maßnahmen kann abgewogen und somit der optimale Zeitpunkt der Realisierung von Maßnahmen definiert werden. Im Digitalen Zwilling werden die Realität nachgebaut, Szenarien simuliert und anhand von Modellen (die mit Hilfe der Historie stetig verbessert werden können) Prognosen erstellt. Die Erhaltungsstrategie wird dadurch prädiktiv.

Über den Maßstab eines einzelnen Objekts hinaus können im Zukunftsbild Digitale Zwillinge von Bauwerken zu Digitalen Zwillingen von Korridoren oder Verkehrsnetzwerken kombiniert und vernetzt werden [Bolton *et al.*, 2018].

Aktuelle Pilotprojekte zeigen, dass solch ein Zukunftsbild noch viele Entwicklungsschritte bis zum Erreichen eines hohen Reifegrads voraussetzt, die Vision aber enorme Chancen erkennen lässt. Durch das übergeordnete Konzept und den Aufbau auf der Building-Information-Modeling-Methodik (BIM) soll eine phasenübergreifende Durchgängigkeit der Daten und Modelle entstehen – es gibt keinen

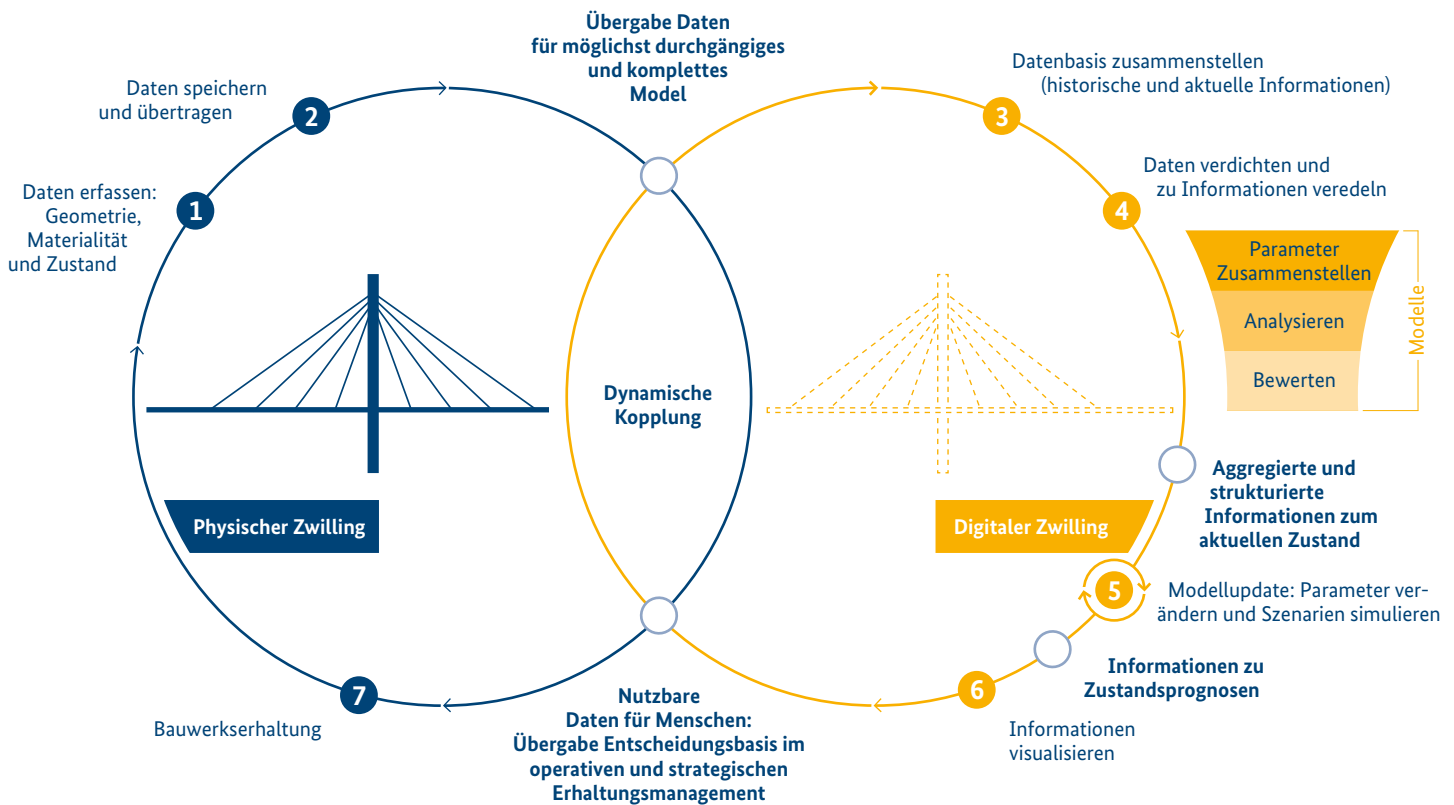


ABB 1.4 Die Wertschöpfungskette durch den Digitalen Zwilling mit hohem Reifegrad

Informations- und damit Wissensverlust zwischen den Phasen der Planung, des Bauens und des Betriebs.

Die Menge der Daten wächst mit dem Alter eines Bauwerks, und noch schneller durch die aktuellen technischen Möglichkeiten. Das Konzept des Digitalen Zwillings soll perspektivisch den lebenszyklusübergreifenden strukturierten Umgang mit umfangreichen heterogenen Daten ermöglichen.

Die Sammlung aller relevanten Daten ist eine wichtige Voraussetzung. Das Konzept des Digitalen Zwillings soll diese Daten aber vor allem zu Informationen transformieren und diese für den Menschen nutzbar darstellen. Pure Daten müssen über Modelle verarbeitet, möglichst automatisch zu aggregierten Informationen veredelt und nutzungsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Erst so wird der Mehrwert generiert.

Durch diese Entwicklungen entsteht zukünftig eine solide Entscheidungsbasis für den Betrieb und Erhalt von Bauwerken. Die aktuellen Informationen zum Bauwerkszustand und Bauwerksverhalten ermöglichen eine realitätsnähere und objektivere Beurteilung der Kriterien Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit. Vorhandene Tragreserven, die durch die Implementierung des Digitalen Zwillings festgestellt werden, können den Umfang von Instandsetzungsmaßnahmen optimieren oder die Nutzungsdauer des Bauwerks verlängern. Darüber hinaus ermöglicht die bessere Überwachung der Degradationsprozesse und die Prognose zu deren Entwicklung eine

vorausschauende planbare Erhaltung. Unter den Aspekten Verfügbarkeit und Nutzungsdauer werden Betrieb und Erhalt optimiert.

Skalierung des Digitalen Zwillings

In diesem Dokument wird das Konzept des Digitalen Zwillings konkret auf Brücken in der Betriebs- und Erhaltungsphase des Objekts bezogen. Dabei wird der Digitale Zwilling mit einem breiten Spektrum an Fähigkeiten verstanden und definiert: vom deskriptiven digitalen Modell, das anlassbezogen aktualisiert wird bis hin zu einem autonomen und selbstlernenden Zwilling, der Prognosen erstellt und Entscheidungen treffen kann. Die Fähigkeiten vom Digitalen Zwilling werden in diesem Dokument in eine 5-stufige Reifegrad-Skala eingebettet, siehe dazu auch [Kapitel 3](#).

Grundsätzlich gilt, dass perspektivisch jede Brücke im Bundesfernstraßennetz für die Nutzungsphase einen Digitalen Zwilling erhalten soll. Das zuvor beschriebene Zukunftsbild kann und muss allerdings nicht vollumfänglich bei allen Brücken des Verkehrsnetzes im höchsten Reifegrad umgesetzt werden. Vielmehr geht es darum, dass der Reifegrad mit der Relevanz des jeweiligen Objektes einhergeht und die strategische Netzbetrachtung hinsichtlich der Erhaltung unterstützt wird. Demnach ist ein Reifegrad von 2 und höher, ab dem der Bauwerkszustand mittels Sensordaten überwacht wird, im Wesentlichen für besonders exponierte Bauwerke im Sinne der RPE-ING anzustreben.



ABB 1.5 BIM und Digitaler Zwilling

Dies sind Bauwerke mit großer verkehrlicher Bedeutung oder solche mit Denkmalschutz. Auch Brücken mit schlechtem Zustand, schlechtem Traglastindex oder schlechter Inspezierbarkeit können einen hohen Reifegrad erfordern. Für weniger exponierte Bauwerke bzw. Bauwerke, die nicht den genannten Sachverhalten zuzuordnen sind, können Digitale Zwillinge mit einem Reifegrad von 1 ausreichend sein. Digitale Zwillinge von neu zu bauenden Brücken sollen aber heute schon so konzipiert werden, dass ein späterer Ausbau in einen höheren Reifegrad möglichst einfach zu realisieren ist. Dies lässt sich z. B. durch eine vollständige digitale Bauwerksdokumentation, durch den baubegleitenden Einbau von Sensoren in das Bauwerk im Hinblick auf eine spätere Einbeziehung zu Überwachungszwecken sowie durch Referenzmessungen vor Inbetriebnahme umsetzen. Der Wahl des Reifegrads sollte sowohl bei Neubauten als auch bei Bestandsbauwerken eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorgelagert werden.

BIM und Digitaler Zwilling: Was ist der Unterschied?

BIM im aktuellen Reifegrad ermöglicht eine konsistente Erfassung und Verwaltung der für den Lebenszyklus eines Bauwerks relevanten Informationen und Daten und eine transparente Kommunikation zwischen Beteiligten. Allerdings beschränkt sich die Methode in der Praxis heutzutage meist auf die Phasen der Planung und des Baus. Die Prozesse des Betriebs, der Bauwerkserhaltung und der strategischen Planung von Erhaltungsmaß-

nahmen werden bisher lediglich im Rahmen von Forschungsaktivitäten behandelt. Ein Digitaler Zwilling basiert auf der BIM-Methodik und auf BIM-Modellen, ermöglicht aber zusätzlich bei höheren Reifegraden eine dynamische Kopplung mit dem Bauwerk. Durch die Kombination von Sensordaten mit Simulationen kann der aktuelle Zustand und das Verhalten der Brücke beschrieben, aber auch auf Basis der entstehenden Datenhistorie und daraus abgeleiteten Modellen eine Entwicklung des Bauwerkszustands prognostiziert werden (ABB 1.5).

Deshalb stellt der Digitale Zwilling in den höheren Reifegraden eine Weiterentwicklung der aktuellen BIM-Methodik dar, mit dem Fokus auf die Entwicklung eines sich stets aktualisierenden Modells für die Betriebsphase von Bauwerken. Das Zukunftsbild des Digitalen Zwillings bettet sich aus diesem Grund in den *Masterplan BIM Bundesfernstraßen* ein, um diese Weiterentwicklung zu adressieren und die Umsetzung in die Strategie des Bundes zu implementieren.

Warum dieser Beitrag? Und warum jetzt?

Die digitale Transformation schafft ein Angebot vielfältiger Methoden sowie technologischer Lösungen und verursacht die Erzeugung von großen Datenmengen. Die Vielzahl an Möglichkeiten und die Dynamik der Entwicklung übersteigen das, was umgesetzt werden kann. Für Brücken müssen diese Optionen mit dem Ziel einer Optimierung der Bauwerkserhaltung priorisiert werden. Ein Digitaler Zwilling wird als Metakonzept den Rahmen für dieses Ziel vorgeben: Sämtliche Prozesse werden gebündelt, damit diese interagieren statt nebeneinander zu wirken. Um allerdings eine interoperable, modulare und nachhaltige Lösung zu entwickeln, sind grundlegende Anforderungen und Regeln erforderlich. Im Bauwesen entstehen im internationalen Raum bereits Richtlinien zur Definition notwendiger Schritte für das Vollziehen der Transformation (Beispiele: *national smart Construction guideline*, vereinigte Arabische Emirate [MEED, 2021] oder *Gemini principles*, Großbritannien [Bolton et al., 2018]).

Ziel dieses Beitrags ist die Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses des Digitalen Zwillings, die Vorstellung der Bausteine und Anforderungen für die Umsetzung von ersten Digitalen Zwillingen und damit die Schaffung einer Basis für Standards und Weiterentwicklungen. In diesem Beitrag wird sich im Speziellen auf den Betrieb von Brücken im Bundesfernstraßennetz bezogen – das Metakon-

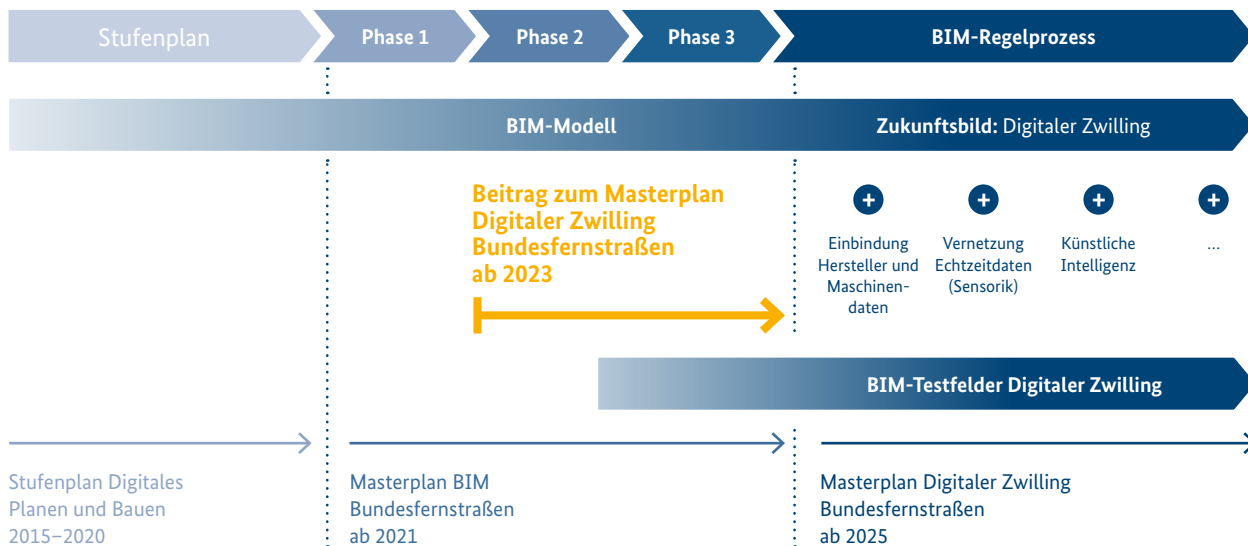


ABB 1.6 Phasenmodell der BIM-Implementierungsstrategie aus [BMVI Masterplan, 2021] erweitert um den Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen

zept ist aber grundsätzlich auf andere Ingenieurbauwerke und Hochbauten übertragbar.

Digitale Zwillinge sind langfristig alternativlos, um große Datenmengen und deren Komplexität zu beherrschen. Die Definition und die Einsatzzwecke werden sich mit der Zeit und neuen Möglichkeiten entwickeln. Es bedarf eines Anfangs und eines Rahmens, damit Investitionen zielorientiert getätigt, Erfahrungen gesammelt und Entwicklungen initiiert werden können. Dazu dienen dieses Dokument und die im *Masterplan BIM Bundesfernstraßen* vorgestellten BIM-Testfelder Digitaler Zwilling [BMVI Masterplan, 2021], welche ein breites Spektrum von Anwendungsfällen und innovativen Technologien pilotieren sollen (ABB 1.6).

In diesem Beitrag wird also als „Initialzündung“ eine aktuelle Darstellung für das Gebiet der Brücken im Bundesfernstraßennetz vorgenommen: Diese Publikation hat nicht den Charakter eines Regelwerks, verspricht keine Vollständigkeit und wird sich mit den Erfahrungen und den technologischen Möglichkeiten in den nächsten Jahren mit Sicherheit weiterentwickeln.

Zusammen mit dem [7 Reallabor](#) bildet sich eine Einheit – die Kombination gibt einen Überblick über aktuelle Erfahrungen und die daraus gewonnen Ableitungen.

Aufbau des Dokumentes

Das Dokument stellt eine Zusammenstellung des aktuellen Stands der Entwicklung zu den relevanten Aspekten des Themas „Digitaler Zwilling von Brücken“ dar. Durch den breiten Adressatenkreis beschränkt sich diese Publikation nicht nur auf die Neuentwicklungen und Neuerungen, sondern fasst auch den Status Quo des Umgangs

mit Brückenerhaltung in Deutschland zusammen und bietet so die Basis, alle notwendigen Schritte in Richtung des Zukunftsbildes zu verstehen. Neben Begriffsdefinitionen, die bei Einführung einer neuen Methodik notwendig sind, werden die verschiedenen Bausteine des Digitalen Zwillings und deren Zusammenspiel vorgestellt. ABB 1.7 stellt den Aufbau des Dokumentes in grafischer Form dar: Reihenfolge, Schwerpunkte und Zusammenhänge der Gliederung werden so auf einen Blick deutlich.

Die Herausforderungen

Bei der digitalen Transformation geht es nicht nur um Technologie, sondern um Veränderung. Um Digitale Zwillinge im Bauwesen umsetzen zu können, müssen technologische Hürden überwunden werden. Der Bausektor ist stark in konventionellen Arbeitsweisen verhaftet. Im Zusammenhang mit der Umsetzung von Digitalen Zwillingen im Immobiliensektor sind gem. [Short, 2020] „die größten Herausforderungen nicht technischer, sondern struktureller und kultureller Natur.“ Dies lässt sich ohne Einschränkung auch auf den Infrastrukturbereich übertragen.

Die Einführung neuer Technologien kann als Bedrohung für die traditionelle, bisher bewährte Arbeitsweise angesehen werden. Die fehlende Bereitschaft zur Akzeptanz und Übernahme ist ein Hindernis. Mit diesem Beitrag sollen diese neue Technologie und die damit verbundenen neuen Möglichkeiten als große Chance dargestellt werden: Ein Digitaler Zwilling ist eine Evolution – keine Revolution. Derzeit bewährte Methoden werden übernommen und komplettiert, sodass kein Bruch entsteht. Bisherige Erfahrungen und Beispiele zeigen, dass alle Betroffenen diesen Veränderungsprozess mit ihrem Mitwirken gestalten können.

Kontext

Vorstellung des Kontextes für dieses Dokument und Einbettung des Digitalen Zwillings in das Erhaltungsmanagement von Brücken

[↗ Kapitel 1](#) und [↗ Kapitel 2](#)

Digitaler Zwilling im Allgemeinen

Allgemeine Definition des Begriffs des Digitalen Zwillings und Vorstellung der verschiedenen Arten und Ausbaustufen von Digitalen Zwillingen.

[↗ Kapitel 3](#)

Digitaler Zwilling von Brücken

Definition des Digitalen Zwillings im Kontext für dieses Dokument und im Zusammenhang mit BIM sowie Definition der Akteure und des Prozesses

[↗ Kapitel 4](#)

Vorstellung der einzelnen Bestandteile des Digitalen Zwillings von Brücken und deren Zusammenwirken

BIM-Modell

[↗ Kapitel 5](#)

Bauwerksprüfung

[↗ Kapitel 6](#)

Bauwerksdiagnostik

[↗ Kapitel 7](#)

Bauwerksmonitoring

[↗ Kapitel 8](#)



Erklärung, wie die verschiedenen Daten zu Bauwerksinformationen aggregiert und in geeigneter Form bereitgestellt werden können.

Data Analytics

[↗ Kapitel 9](#)

Mensch-Maschine-Schnittstelle

[↗ Kapitel 10](#)

IT Anforderungen

Aufstellung der Anforderungen an die IT und IT-Architektur für die Realisierung und den Betrieb von Digitalen Zwillingen von Brücken

[↗ Kapitel 11](#)

Auswirkungen des Digitalen Zwillings

Aufzeigen der Auswirkungen des Digitalen Zwillings auf die Nachhaltigkeit, auf Menschen, Arbeitsprozesse, Regelwerke, Richtlinien, Daten und Technologien

[↗ Kapitel 12](#) und [↗ Kapitel 13](#)



2 – Erhaltungsmanagement von Brücken im Bundesfernstraßennetz

Kurzfassung

Das Erhaltungsmanagement im Bundesfernstraßennetz setzt sich aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Prozessen zusammen und regelt zusammengefasst die gesamte Erhaltung der bundesweiten Bauwerke ab Inbetriebnahme bis hin zum Rückbau. Primäres Ziel des Erhaltungsmanagements ist das Nachkommen der gesetzlichen Verpflichtung zur Sicherstellung der Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit aller Anlagen sowie das Schaffen einer größtmöglichen Verfügbarkeit für die Nutzer:innen.

Die Bundesrepublik Deutschland besitzt in diesem Kontext ein sehr gutes, aufeinander abgestimmtes und mit entsprechenden nationalen Regelwerken und Richtlinien abgesichertes Erhaltungsmanagement für Infrastrukturbawerke im Bundesfernstraßennetz. Alle 6 Jahre werden sämtliche Schäden am Bauwerk sowie der endgültige Bauwerkszustand über intensive Bauwerksprüfungen erfasst und für die weitere bundesweite Erhaltungsplanung genutzt. Zusätzlich erfolgen ebenfalls alle 6 Jahre, allerdings mit Versatz von 3 Jahren, weitere einfache Prüfungen des Bauwerks sowie bei Bedarf Sonderprüfungen. Neben der visuellen Beurteilung des Bauwerks durch die Bauwerksprüfung erfolgt eine Einstufung in den Traglastindex anhand möglicher Nachrechnungen oder Gegebenheiten des Bauwerks. Somit hat zusätzlich zum visuellen auch der rechnerische Zustand der Bauwerke einen Einfluss auf die Erhaltungsplanung des Bestands.

Das altersabhängig reaktive Erhaltungsmanagement wird in diesem Kapitel samt seiner Akteure, Prozesse,

Regelwerke und Richtlinien erklärt. Es bildet im Rahmen dieses Dokumentes die Grundlage für das Verständnis der Integration von Digitalen Zwillingen (und deren Mehrwert) in den Erhalt von Brücken der Bundesfernstraßen.

Ein Digitaler Zwilling ist als Werkzeug und Methode zu verstehen, welches/welche einerseits das zukünftige Erhaltungsmanagement für die Anwender:innen erleichtern soll, indem eine vollständige Informationsbasis an instandhaltungsrelevanten Bauwerksinformationen direkt im Modell vorliegt, und andererseits stets den aktuellen Zustand des Bauwerks über die Aggregation von Informationen aus Echtzeitmessdaten wiedergibt, um somit eine objektive, realistische und aktuelle Zustandsbewertung durchführen zu können. Akteure des Erhaltungsmanagements profitieren durch umfangreichere und qualitativ hochwertigere Informationen vom Digitalen Zwilling und können diese vorausschauend für eine effizientere Erhaltungsplanung des Infrastrukturbestands verwenden.

Das Kapitel stellt ebenfalls die Grenzen des heutigen Erhaltungsmanagements auf unterschiedlichen Ebenen vor – darauf aufbauend wird der Mehrwert des Digitalen Zwillings deutlich: Nutzungsdauer und Nachhaltigkeit der Bauwerke werden sich positiv beeinflussen lassen.

Der Einsatz von Digitalen Zwillingen wird zwangsläufig zu einer Änderung bei aktuellen Akteuren, in Prozessen, Regelwerken und Richtlinien führen. Die Umsetzung Digitaler Zwillinge einzelner Bauwerke ist der erste Schritt in Richtung Digitale Zwillinge eines Streckennetzes, welche zusätzlich eine Vernetzung untereinander aufweisen.

1 – Wer und was ist das Erhaltungsmanagement?

Definition Erhaltungsmanagement

Erhaltungsmanagement (in anderen Fachdisziplinen auch Instandhaltungsmanagement genannt) bezeichnet eine spezifische Teildisziplin des Anlagenmanagements und umfasst die Planung sowie Steuerung aller notwendigen Erhaltungsmaßnahmen, die kontinuierliche Verbesserung der technischen Anlagenverfügbarkeit, die Erhöhung der Betriebssicherheit sowie Aspekte bzw. Ansatzpunkte der Kostenoptimierung in den Erhaltungsprozessen. Das klassisch definierte Erhaltungsmanagement findet vorrangig während der Betriebsphase von Anlagen Anwendung.

In diesem Kapitel soll lediglich das Erhaltungsmanagement im Kontext von Brückenbauwerken der Bundesfernstraßen beleuchtet werden, um einen Einblick in die aktuellen Prozesse und Randbedingungen zu geben und anschließend den möglichen Mehrwert des Digitalen Zwillings bei den unterschiedlichen Prozessschritten aufzuzeigen. Die Konkretisierung des Digitalen Zwillings erfolgt ab [7 Kapitel 3](#).

Die Aufgaben des Erhaltungsmanagements

Nach § 4 des Bundesfernstraßengesetzes sowie den gleichbedeutenden Straßen- und Wegegesetzen der Länder sind die Träger der Straßenbaulasten dazu verpflichtet sicherzustellen, dass die Bauten den Forderungen der Sicherheit und Ordnung genügen. Als charakteristische Aufgaben für das Erhaltungsmanagement von Bauwerken im Bundesfernstraßennetz ergeben sich daraus die Sicherstellung der Bauwerkstragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit, der Dauerhaftigkeit und der Verkehrssicherheit. Außerdem soll das Erhaltungsmanagement darauf abzielen, eine größtmögliche Verfügbarkeit des Bundesfernstraßennetzes für die Nutzer:innen zu ermöglichen.

Ein Blick auf den Anlagenbestand zeigt schnell, weshalb dem Erhalt der Infrastrukturbauwerke im Verkehrsnetz eine größer werdende Rolle zuzusprechen ist. Das deutsche Bundesfernstraßennetz umfasst derzeit rd. 13.000 km Bundesautobahnen, rd. 38.000 km Bundesstraßen sowie ca. 39.500 Brücken. In Summe sind mehr als 31 Mio. m² Brückenfläche zu betreiben und zu erhalten [Bast, 2021] ([ABB 2.1](#)). Diese Bauwerke wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten und somit in verschiedenen Normepochen errichtet ([ABB 1.1](#)). Neben der unausgeglichenen Altersstruktur sowie den diversen klimatischen Einwirkungen setzt besonders der überproportionale Anstieg der Bauwerks-

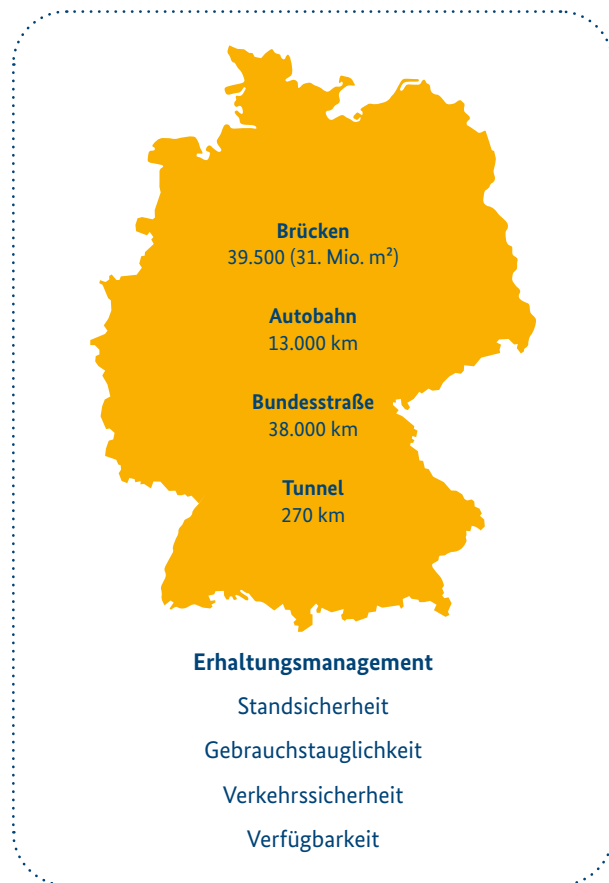


ABB 2.1 Erhaltungsmanagement in Deutschland: Anlagenbestand zum Stand 2021 und Aufgaben [Bast, 2021; Bast-Symposium, 2021]

belastung durch Schwerverkehr den Zuständen der Bauwerke zu. Unter dem Leitmotiv „Erhaltung vor Neubau“ rücken neben der reinen Instandsetzung der Bauwerke somit auch vermehrt Modernisierungsmaßnahmen in den Fokus [BMVI, 2016]. Bei der Koordinierung der Erhaltungsmaßnahmen sind die Einschränkungen der transeuropäischen Verkehrswege kleinzuhalten, wodurch das Erhaltungsmanagement zu einer vielschichtigen Aufgabe wird.

Richtlinien- und Regelwerkslandschaft

Um den interdisziplinären Aufgaben und Anforderungen des Erhaltungsmanagements für Ingenieurbauwerke gerecht zu werden, bedarf es koordinierter und geregelter Prozesse.

Prozessseitig ist das Vorgehen des Erhaltungsmanagements in mehreren, vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr herausgegebenen und eingeführten, Richtlinien und Regelwerken verankert. Allen voran steht die DIN 1076 [DIN 1076, 1999], sowie die RI-ERH-ING und die ASB-ING [BMVBS ASB-ING, 2013], die noch durch weitere Leitfäden und Richtlinien flankiert werden, z. B. OKSTRA oder LPI-ING [BMVI LPI-ING, 2020]. Die Richtlinien- und Regelwerkslandschaft in Bezug auf den Erhalt von Bauwerken ist in [ABB 2.2](#) zusammengefasst.

LEBENSZYKLUS

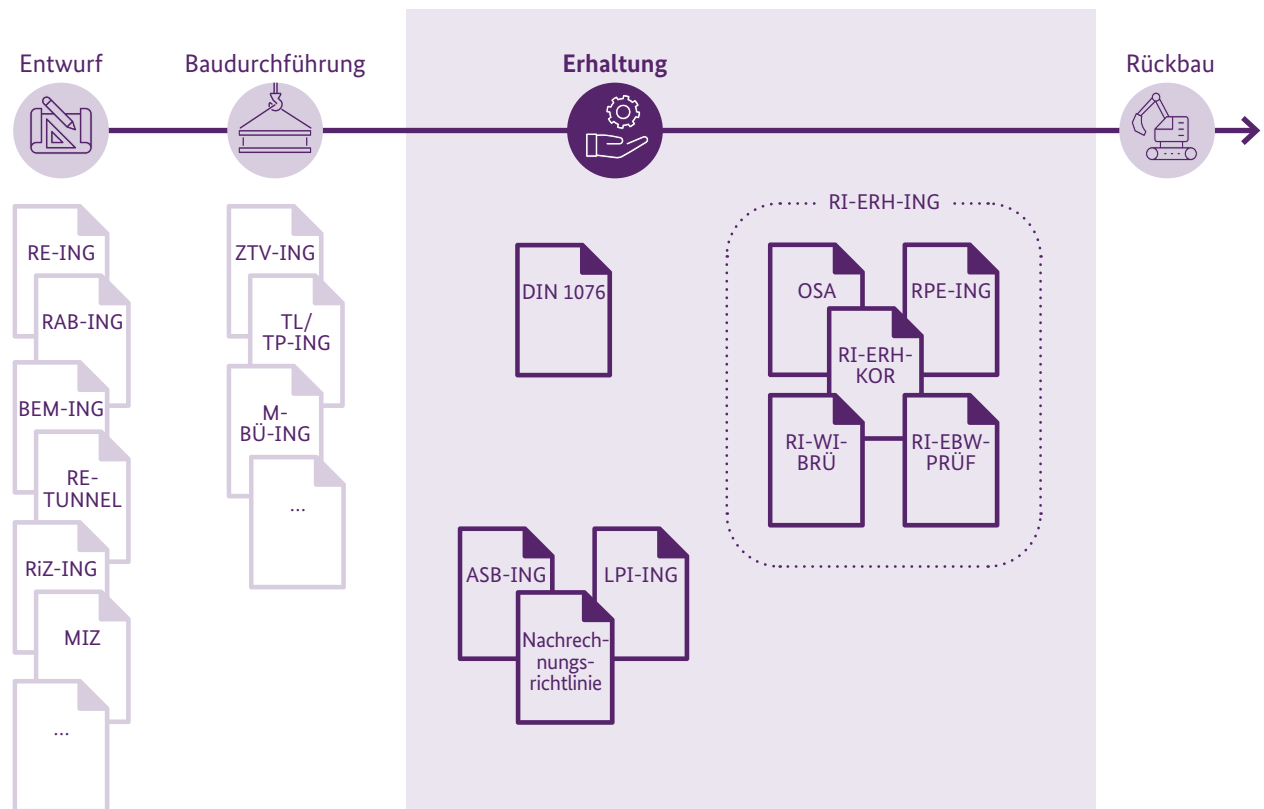


ABB 2.2 Regelwerke und Richtlinien für den Brücken- und Ingenieurbau der Bundesfernstraßen, in Anlehnung an [Bast Regelwerke, 2022]

Die DIN 1076 bildet seit Einführung im Jahr 1999 die wesentlichen Grundlagen für die Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit.

Die RI-ERH-ING subsummiert weitere Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken, welche das operative Geschäft abbilden. Die wichtigsten sollen hier explizit genannt werden:

- Richtlinien für die strategische Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken: RPE-ING [BMVI RPE-ING, 2020]
Die RPE-ING systematisiert und vereinheitlicht Erhaltungsplanung von Ingenieurbauwerken nach DIN 1076.
- Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076: RI-EBW-PRÜF [BMVI RI-EBW-PRÜF, 2017] inkl. Schadensbeispiele und spezifische Prüfhandbücher für Bauwerke und Bauteile mit konstruktiven Besonderheiten. Die RI-EBW-PRÜF konkretisiert die Regelungen zur Bauwerksprüfung nach DIN 1076, standardisiert die Erfassung von Bauwerksschäden anhand von Schadensbeispielen und vereinheitlicht deren Bewertung und Auswertung.

→ Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse:

Leitfaden OSA [BMVBS OSA, 2007]

Der Leitfaden OSA kommt zum Einsatz, wenn eine zweifelsfreie Schadensbewertung im Rahmen der Bauwerksprüfung nicht möglich ist und eine tiefere objektbezogene Schadensanalyse erfolgen muss.

→ Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/ Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken:

RI-WI-BRÜ [BMVBS RI-WI-BRÜ, 2007]

Die RI-WI-BRÜ regelt das objektbezogene Verfahren zur Betrachtung von technisch-wirtschaftlichen Vorteilen verschiedener Erhaltungsmaßnahmen als Hilfe für die Erhaltungsplanung.

→ Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand:

Nachrechnungsrichtlinie [BMVBS Nachrechnung, 2011]

Die Nachrechnungsrichtlinie ist Grundlage für die Berechnung der Tragfähigkeit/des Traglastindex für defizitäre Bestandsbauwerke.

Mit der „Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten, Teilsystem Bauwerksdaten“ (ASB-ING) werden essenzielle Definitionen und standardisierte Strukturen für die einheitliche Erfassung sowie Verwaltung von

Bauwerksdaten gegeben. Unter Bauwerksdaten werden Konstruktionsdaten, Prüfungs- und Zustandsdaten, Verwaltungsdaten und Sachverhaltsdaten verstanden. Der „Objektkatalog für das Straßen und Verkehrswesen“ (OKSTRA) liefert ergänzend eine standardisierte, IT-technische Beschreibung von Objekten im Straßen- und Verkehrswesen über den kompletten Lebenszyklus und ermöglicht damit eine verlust- und fehlerfreie Übertragung von Daten zwischen verschiedenen Straßen- und Verkehrsverwaltungen. Mit den entsprechenden Anforderungen werden Bauwerksdaten der mit ARS Nr. 3/1998 eingeführten Bauwerksdatenbank *SIB-Bauwerke* zur Verfügung gestellt, welche eine auf der ASB-ING und OKSTRA aufgebaute Informationsdatenbank für Ingenieurbauten der Straße darstellt und alle Informationen im Zuge des Erhaltungsmanagements speichert sowie verwaltet.

Der „Leitfaden zur Prüfung von Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken“ (LPI-ING) [BMVI LPI-ING, 2020] dient den Straßenbauverwaltungen als Hilfsmittel für die Entscheidung zwischen Instandsetzung/Ertüchtigung oder einem Ersatzneubau von Ingenieurbauwerken im Geltungsbereich der RI-EBW-PRÜF.

Die Regelwerke wurden mit der Zeit, den jeweiligen Anforderungen und Erfahrungen entwickelt, haben sich etabliert und bilden eine solide und bewährte Basis für das aktuelle Erhaltungsmanagement. Eine Weiterentwicklung von Prozessen in der Infrastrukturerhaltung muss auf den Grundsätzen der aufgezeigten Regelwerke und Richtlinien basieren. Die neuen Möglichkeiten, welche in diesem Dokument im Zusammenhang mit dem Digitalen Zwilling vorgestellt werden, müssen zudem bei der Aktualisierung bzw. Fortschreibung der Regelwerke und Richtlinien berücksichtigt werden ([7 Kapitel 13](#)).

2 – Prozesse des aktuellen Erhaltungsmanagements

Eine Weiterentwicklung der Prozesse der Bauwerkserhaltung und die Einführung des Digitalen Zwillings als neue Methode setzt profunde Kenntnisse der aktuell gültigen Primärprozesse zur Bauwerkserhaltung voraus – um darauf aufzubauen und daran anzuschließen. An dieser Stelle kann nur ein komprimierter Überblick gegeben werden, um grundsätzliche Zusammenhänge zu verdeutlichen. Eine ausgezeichnete Gesamtschau bietet der Beitrag „Die neue Erhaltungsstrategie für Brücken der Bundesfernstraßen“ im Beton-Kalender 2022 [Jackmuth et al., 2022].

Datengrundlage für das Erhaltungsmanagement

Grundlage des Erhaltungsmanagements sind Bauwerksdaten sowie aktuelle Zustandsinformationen zu den Bauwerken. Basierend auf der ASB-ING werden Bauwerksdaten entsprechend vordefinierten Strukturen aufgenommen und in der Bauwerksdatenbank *SIB-Bauwerke* gespeichert sowie vorgehalten. Zusätzlich zu den wichtigen Bauwerksdaten hält das System je nach Verfügbarkeit weitere Informationen zum Bauwerk vor, die einen Einfluss auf die Erhaltungsplanung haben können. Beispiele sind das Brückenalter, der Traglastindex bzw. Nachrechnungsergebnisse oder auch die Lage im Netz zur Bestimmung der Verkehrsbelastung. Auch vergangene Zustände sowie Informationen zu durchgeführten Inspektionen und Maßnahmen hält das System bauwerksspezifisch vor.

Bauwerksprüfung, Schadensanalyse und Nachrechnung

Der schematische Ablauf einer Erhaltungsplanung folgt stets gleichen standardisierten Prozessen. Die Beurteilung des Bauwerkzustands wird in den folgenden Absätzen vorgestellt und ist in [ABB 2.3](#) schematisch zusammengefasst.

Während einer Prüfung des Bauwerks alle 3 bzw. 6 Jahre wird der Zustand des Bauwerks und seiner Bauteile durch Bauwerksprüfer:innen festgestellt. Die Grundsätze dafür stellt die DIN 1076 und die RI-EBW-PRÜF konkretisiert unter anderem die aufzunehmenden Informationen während der Bauwerksprüfung sowie die Bewertungsansätze der Schäden und die Auswahl von Maßnahmenempfehlungen ([7 Kapitel 6](#)). Alle Schäden am Bauwerk werden aufgenommen und größtenteils noch herkömmlich in Bauwerksunterlagen (Skizzen, 2D-CAD-Pläne) verortet, wobei neue Forschungsarbeiten hier einen digitalen Fortschritt versprechen, z.B. [Bahlau et al., 2021]. Visuelle Prüfungen können durch eine OSA ergänzt werden. Im Zuge dessen finden teils diagnostische Verfahren ([7 Kapitel 7](#)) und seltener Monitoring-Verfahren ([7 Kapitel 8](#)) Anwendung, um gezielt die Ursachen und Auswirkungen spezifischer Schäden einzuschätzen. Der Zustand eines Bauwerks wird maßgeblich durch Zustandsnoten in dem Zahlenbereich zwischen 1,0 und 4,0 beschrieben und unter der Zusammenführung aller Schäden durch einen bundeseinheitlichen Bewertungsalgorithmus mit Berücksichtigung der Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D) errechnet ([7 Kapitel 6](#)). Zu jedem Schaden kann im Rahmen der Inspektion eine Maßnahmenempfehlung zur Schadensbeseitigung mit Informationen zum zeitlichen Rahmen der Beseitigung sowie dem voraussichtlichen Kostenrahmen angegeben werden.

BEURTEILUNG BAUWERKSZUSTAND (STATUS QUO)

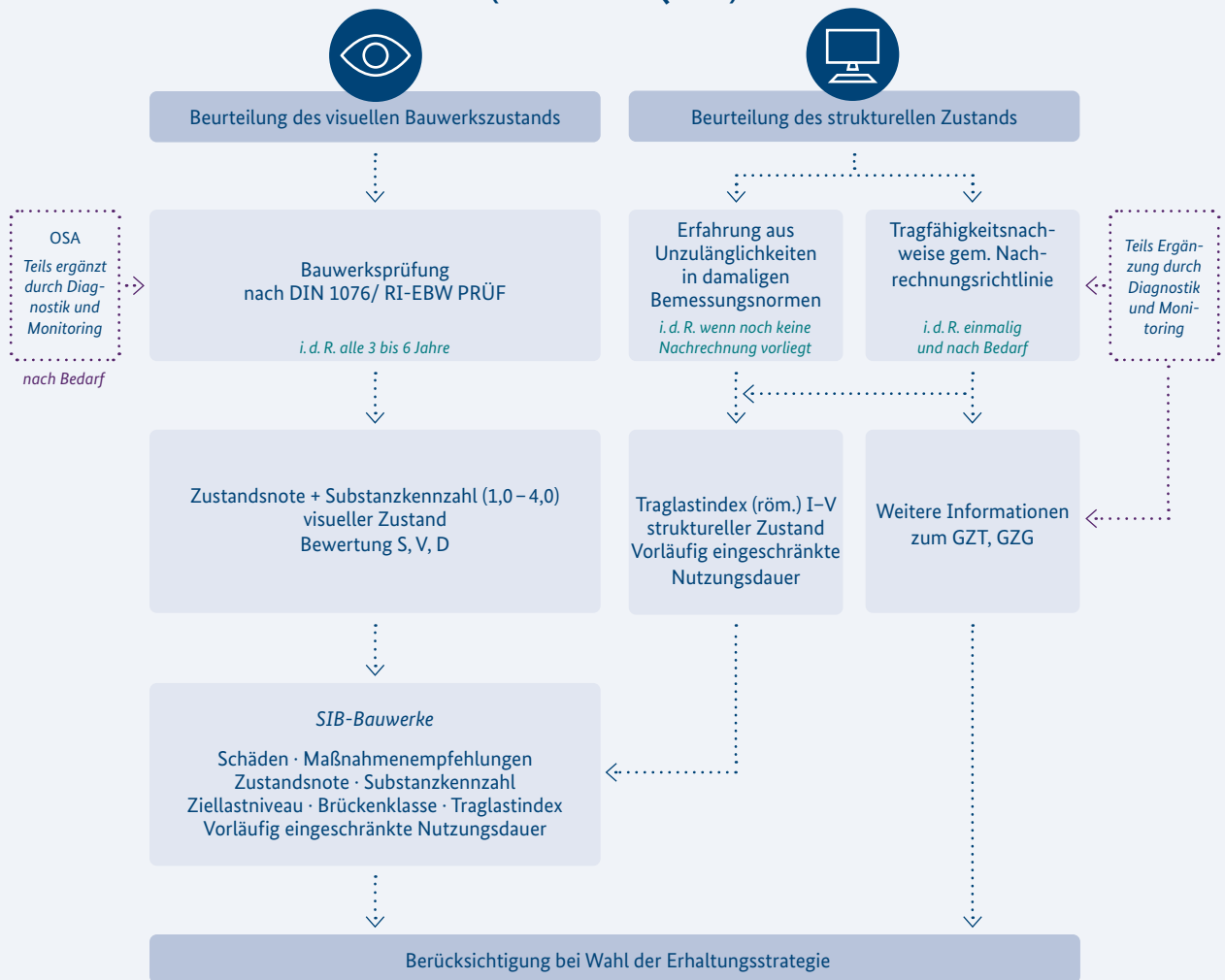


ABB 2.3 Ablauf der Beurteilung des Bauwerkszustands

Für Bauwerke mit bestimmten Randbedingungen (bspw. gewisse Herstellungsjahre) wird eine, i. d. R. über die Nutzungsdauer einmalige, Nachrechnung notwendig. In der Nachrechnung wird der Traglastindex nach der Nachrechnungsrichtlinie ermittelt. Er beschreibt einen Wert, der die vorhandene Tragfähigkeit des Bauwerks mit seinem Ziellastniveau vergleicht und somit neben dem visuell festgestellten Zustand des Bauwerks eine Information über die Defizite der tatsächlichen Tragfähigkeit (struktureller Zustand) wiedergibt. Liegt für ein Bauwerk noch keine Nachrechnung vor, wird der Traglastindex als Differenz zwischen dem Ziellastniveau und der Brückenklasse bestimmt und gibt eine erste grobe Einschätzung der Tragfähigkeit.

Sämtliche Informationen aus der Bauwerksprüfung und Nachrechnung werden im Programmsystem *SIB-Bauwerke* strukturiert gespeichert und dienen den weiteren Erhaltungsschritten. Informationen aus der Diagnostik ([Kapitel 7](#)) oder Monitoring-Verfahren ([Kapitel 8](#)) werden in den aktuellen Prozessen der Bauwerkszustandsbewertung sowohl im Zusammenhang mit einer OSA als auch in den höheren Stufen der Nachrechnungsrichtlinie berücksichtigt, wobei dies eine Ausnahme darstellt.

Wie [ABB 2.3](#) verdeutlicht, basiert die Bewertung des Bauwerkszustands heute i. d. R. auf punktuellen visuellen Beobachtungen sowie auf einmaligen rechnerischen Untersuchungen zur Beurteilung des strukturellen Zustands.

ERHALTUNG



Reaktive (korrigierende) Erhaltung

Erhaltungsmaßnahmen zur Behebung von Mängeln werden dann durchgeführt, wenn der Schaden bereits eingetreten ist. Diese Art der Erhaltung führt zu ungeplanten Einschränkungen der Verfügbarkeit der Anlage zu Reparaturzwecken. Außerdem kann die Verzögerung zwischen Schadenseintritt und Schadenserkenntnis zu Folgeschäden führen.

Präventive, zustandsunabhängige Erhaltung basierend auf festgelegten Zeitintervallen

Verschleißteile werden in fest definierten Abständen präventiv ausgetauscht. Der Abnutzungsvorrat der ausgetauschten Teile wird nicht ausgeschöpft. Die Gefahr unplanmäßiger Nutzungseinschränkungen wird verringert.

Präventive, zustandsorientierte Erhaltung

In diesem Fall wird der Zustand der Anlage überwacht, sodass Anomalien aufgedeckt werden und auf den Eintritt einer Anomalie reagiert werden kann. Die Wartung erfolgt dann präventiv und zusätzlich in Abhängigkeit vom Zustand des Assets.

Vorausschauende (prädiktive) Erhaltung

Auch die vorausschauende Erhaltung basiert auf einer permanenten Überwachung des Asset-Zustands. Im Vergleich zur präventiven, zustandsorientierten Erhaltung wird allerdings die Entwicklung der Zustandsänderung vorausgesagt, sodass der Zeitpunkt eines Schadenseintritts prognostiziert werden kann und Handlungen in Abhängigkeit der Prognose eingeleitet werden. Der Abnutzungsvorrat wird fast vollständig ausgenutzt, Schäden und somit auch Folgeschäden werden weitgehend ausgeschlossen. Gleichzeitig wird eine sehr hohe Anlagenverfügbarkeit garantiert.

ABB 2.4 Die verschiedenen Erhaltungsstrategien,
Quellen: [DBV Heft 51, 2022], [DIN EN 13306, 2018], [Haardt, 2003]

Weitere Prozesse des Erhaltungsmanagements

Die an die Bauwerksprüfung anschließenden Prozesse werden nachfolgend lediglich kurz aufgezählt, da der Digitale Zwilling primär an die anfänglichen Prozesse des Erhaltungsmanagements anknüpft. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf [Jackmuth et al., 2022] oder [Mertens, 2015] verwiesen. Nach der Bauwerkprüfung folgt die Wahl der Erhaltungsstrategie, die Priorisierung der Erhaltungsmaßnahmen, die Programmbildung sowie eine mögliche Erhaltungsbedarfsprognose.

3 – Zukunft des Erhaltungsmanagements und Rolle des Digitalen Zwillings

Die Grenzen der heutigen Vorgehensweise im Erhaltungsmanagement

Im Kontext der vorhergehenden Erläuterungen darf festgestellt werden, dass Deutschland für die Bundesfernstraßen ein sehr gutes, einheitliches und konzeptionell schlüssiges sowie bewährtes System zum Erhaltungsmanagement besitzt, welches durch entsprechende Richtlinien flankiert wird und dessen Methodik durch wissenschaftliche Erkenntnisse der Bundesanstalt für Straßenwesen abgesichert ist.

Die aktuelle Vorgehensweise im Erhaltungsmanagement stellt eine Mischung der reaktiven, präventiven und zustandsorientierten Erhaltungsstrategien dar (siehe Definitionen in ABB 2.4), wobei die Zustandserfassung der Anlage auf festgelegten Zeitintervallen basiert. Durch diese Vorgehensweise kann im schlimmsten Fall erst bei Feststellung eines ausgeprägten Schadensbildes reagiert werden. Unplanmäßige und teure Sofortmaßnahmen, einhergehend mit Verkehrseinschränkungen bzw. mangelnder Verfügbarkeit, sind Folgen. Die aktuelle Datengrundlage ermöglicht noch keine vorausschauende (prädiktive) Erhaltung. Prädiktive Verfahren sind bereits seit langem Bestandteil von wissenschaftlichen Untersuchungen unterschiedlichster Branchen, zeigen allerdings, dass im Bereich der messwertgestützten Prognosen für Brückenbauwerke noch Forschungsbedarf besteht (7 Kapitel 9.6).

Digitale Transformation im Bauwesen

Die im vorherigen Kapitel beschriebene Vorgehensweise stellt eine hervorragende Ausgangssituation dar, um die digitale Transformation, ausgehend von der BIM-Methodik (Planen und Bauen) bis hin zum Digitalen Zwilling, über den gesamten Lebenszyklus zu denken.

Seit 2021 ist die Planung von Neubauprojekten mit der BIM-Methodik Pflicht und bis 2025 soll diese flächendeckend Einsatz finden [BMVI Masterplan, 2021] ([↗ Kapitel 5](#)). Durch die lückenlose Weiterverwendung wird zukunfts-technisch die modellhafte Grundlage für Digitale Zwillinge in der Betriebsphase der Bauwerke geschaffen.

Die digitale Transformation im Bauwesen und die damit einhergehenden Lösungen, wie sie im vorliegenden Dokument mit dem Digitalen Zwilling vorgestellt werden, ermöglichen den Paradigmenwechsel von einer reaktiven bzw. präventiven zu einer prädiktiven Vorgehensweise, die auch für die langlebigen und stark individuellen Verkehrsinfrastrukturbauwerke Anwendung finden kann. Zum einen können detailtiefere und dynamischere Informationen zum Bauwerkszustand gewonnen werden und dadurch im Vergleich zur heutigen Vorgehensweise eine inhaltlich vollständigere Informationsbasis geliefert werden. Zum anderen können die komplexer, umfangreicher und vernetzter werdenden Informationen in einer Weise visualisiert werden, die für betroffene Personen gut rezipierbar ist.

Eine vollständigere Informationsbasis für das Erhaltungsmanagement

Durch den Bestandteil Bauwerksmonitoring in Digitalen Zwillingen mit höheren Reifegraden werden nahezu echtzeitaktuelle Zustandsinformationen zum Bauwerk zur Verfügung gestellt, zumindest für neuralgische Stellen des Bauwerks ([↗ Kapitel 8](#)). Der Zustand ist nicht nur zu den Zeitpunkten der Bauwerksprüfungen bekannt, sondern kann in Kombination mit einer geeigneten Datenanalyse, -fusion, und -aggregation zu beliebigen Zeitpunkten wiedergegeben werden ([↗ Kapitel 9](#)). In Kombination mit detailtieferen diagnostischen Untersuchungen ergänzend zur Inspektion ([↗ Kapitel 7](#)) steigen Aktualität und Qualität der Aussage über den Zustand. Die Wahl der Erhaltungsstrategie kann so beeinflusst werden, dass zukünftig prädiktive Strategien auf Einzelobjekt- und Netzebene umsetzbar sind.

Neben den möglichen Daten aus Monitoring und Diagnostik enthält der Digitale Zwilling die erhaltungsrelevanten historischen Informationen (bspw. durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen oder Prüfberichte), sodass er als Informationszentrum für das jeweilige Bauwerk dient. Notwendige Informationen für die Erhaltung werden zentral vorgehalten und sind über die komplette Nutzungsdauer des Bauwerks verfügbar – so können auch

unterschiedliche Akteure die komplette Bauwerkshistorie nachvollziehen. Damit unterstützt der Digitale Zwilling ebenfalls zum Ende der Nutzungsdauer mit Bestandsinformationen, wenn Nachrechnungen oder Rückbauplanungen notwendig werden.

Eine konsequente Visualisierung für einen vollständigen Überblick

Ein Digitaler Zwilling wird durch die konsequente Bündelung aller Informationen in einem Modell die visuelle Darstellung des Bauwerks und seines Zustands aufwerten.

Statt der modellunabhängigen Informationen in *SIB-Bauwerke* können mit dem Digitalen Zwilling sämtliche dort gepflegten Bauwerksinformationen verortet und am Bauwerk in dreidimensionalem Kontext dargestellt werden. Zusammen mit einer gut gepflegten Historie aller Bauwerksinformationen, vor allem der Schäden, bietet diese Vorgehensweise bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Bauwerkprüfung einen größeren Informationsgehalt. Den Bauwerksprüfer:innen werden mehr und vollständigere erhaltungsrelevante Informationen zu Verfügung gestellt, um fundiertere Entscheidungen hinsichtlich der Schadensbeurteilung, der Erhaltungsmaßnahmen und der Wahl der Erhaltungsstrategie treffen zu können. Besonders exponierte und für die Verkehrsführung bedeutsame Bauwerke profitieren vom Mehrwert des Digitalen Zwillings.

Hinsichtlich der zeitlichen Betrachtung über Generationen von Bauwerksprüfer:innen verbleiben wichtige Informationen am Modell – der Informationsverlust sinkt bzw. kann die Informationsverfügbarkeit erhöht werden.

Durch die Hinzunahme weiterer Informationsquellen (Diagnostik: [↗ Kapitel 7](#) und Monitoring: [↗ Kapitel 8](#)) entsteht eine im Vergleich zu heute vollständigere Datenbasis. Die Kombination aller Informationen ist darüber hinaus mehr als die Summe der einzelnen Informationen. Der Mehrwert dieser Vernetzung kann allerdings nur zum Tragen kommen, wenn die Informationen in geeigneter Weise für den Menschen visualisiert werden ([↗ Kapitel 10](#)).

Vom Digitalen Zwilling eines Bauwerks zum Digitalen Zwilling eines Netzes

Bei einem Blick in die Zukunft ist es zweckmäßig, die strategische und die operative Ebene getrennt zu betrachten, denn beide Ebenen haben einen jeweils anderen Fokus. Während auf der operativen Ebene das Einzelobjekt betrachtet und bezüglich Dimension Zeit eher kurz-

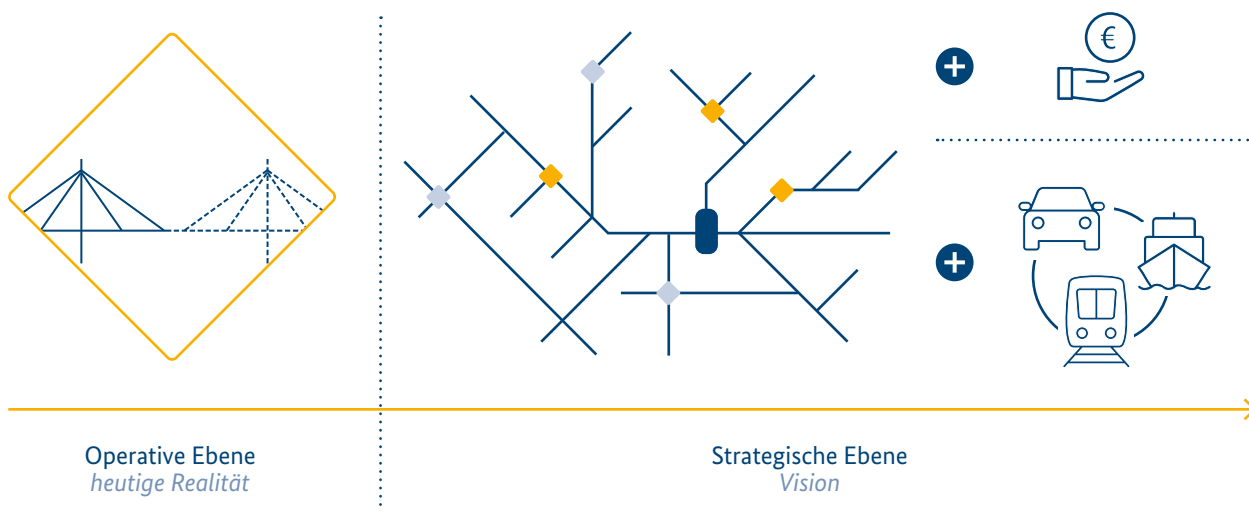


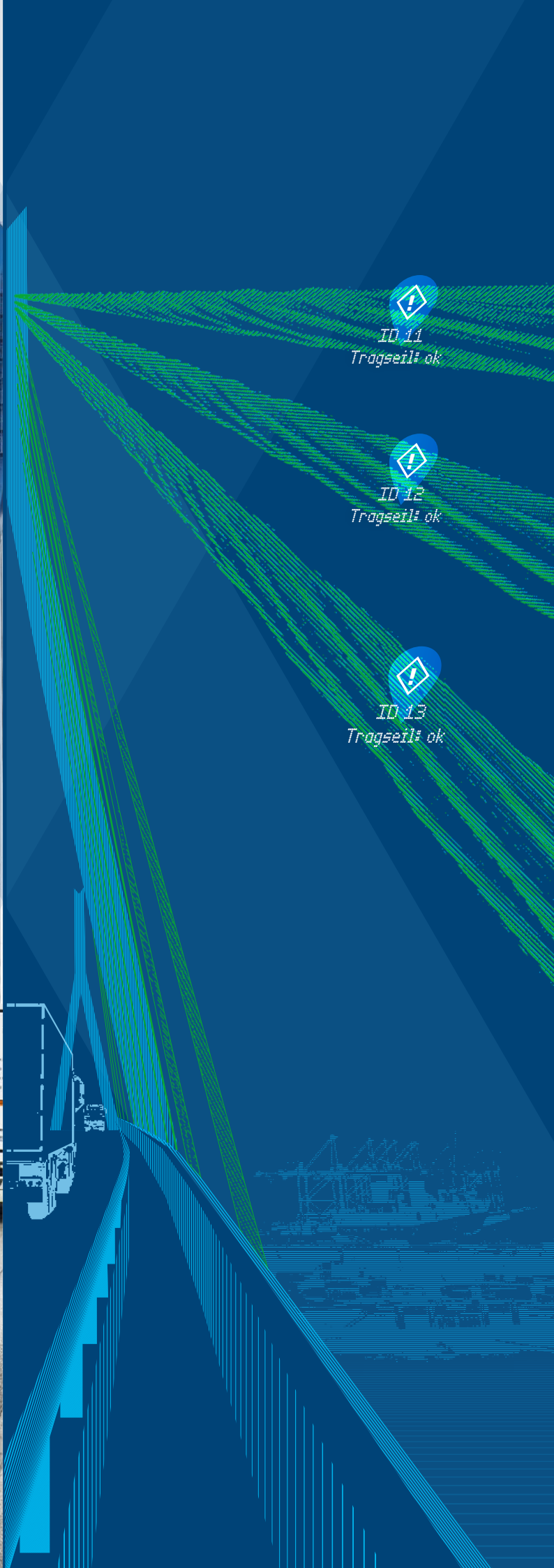
ABB 2.5 Vom Digitalen Zwilling (Objektzwilling) eines Bauwerks zum Digitalen Zwilling eines Netzes (Vernetzte Zwillinge)

bis mittelfristig agiert wird, sind auf der strategischen Ebene eher netzbezogene oder gar intermodale Aspekte interessant. Der Detaillierungsgrad des Digitalen Zwillings richtet sich dabei nach dem Zweck der Anwendung ([Kapitel 3](#)).

Auf operativer Ebene sollen entsprechend der vorherigen Abschnitte Daten möglichst vollständig über den gesamten Lebenszyklus des Objekts gepflegt und genutzt werden, sodass diese als ein adäquater Datenservice für die strategische Ebene bereitgestellt werden können.

Auf strategischer Ebene ist der Anspruch, beispielsweise in Echtzeit Zugriff auf die Zustandsdaten von 31 Mio. m² Brückenfläche zu haben. Dabei ist zu unterscheiden, in welchem Reifegrad Digitale Zwillinge für die Bauwerke vorliegen müssen ([Kapitel 4](#)). Nicht zwangsläufig ist für jedes Bauwerk ein Ansatz mit einem Bauwerksmonitoring notwendig, sondern ein deskriptiver sowie mit anderen Digitalen Zwillingen kompatibler Ansatz zur Verortung und Vereinigung der Zustandsinformationen ausreichend.

Man möchte netz- bzw. korridorbezogene Kennzahlen nach Belieben dynamisch clustern, pivotieren und analysieren können – sowie Szenarien bilden, Simulationen fahren und dabei (intermodale) Verkehrsdaten berücksichtigen. Auf Basis der Szenarien und Simulationen möchte man Aspekte der Finanzierung betrachten ([ABB 2.5](#)). Und nicht zuletzt möchte man Beschriebenes anschaulich visualisieren und gut konsumierbar aufbereiten. Zwangsläufig erfordert das eine andere Stringenz und Systematik in der Datenerhebung, eine höhere Qualität und Dynamik der Datenbereitstellung auf operativer Ebene – es werden nicht aktuelle Daten geliefert, vielmehr sind die Daten jederzeit aktuell. Das bringt die Vision einzelner Digitaler Zwillinge für die zu betrachtenden Korridore im Bundesfernstraßennetz oder des gesamten Verkehrsnetzes „Bundesfernstraßen“ (Systemzwillinge [Kapitel 3](#)) auf, welche wiederum Teil eines Digitalen Zwillings „Verkehrsnetz Deutschland“ oder „Verkehrsnetz Europa“ (Vernetzte Zwillinge [Kapitel 3](#)) sein können.



ID 11
Tragseil: ok



ID 12
Tragseil: ok



ID 13
Tragseil: ok

3 – Was ist ein Digitaler Zwilling?

Kurzfassung

Ein Digitaler Zwilling ist ein digitales Abbild eines physischen Systems, wobei das reale System und sein virtuelles Abbild bestenfalls über den gesamten Lebenszyklus durch einen automatischen Daten- und Informationsaustausch in Echtzeit miteinander verknüpft sind.

Je nach Komplexität und Reifegrad sammelt der Digitale Zwilling unterschiedliche Daten seines realen Zwillings, verwaltet, analysiert, bewertet und visualisiert diese und ermöglicht schlussendlich je nach Anwendungsfall zum Beispiel die Überprüfung des Soll-Ist-Zustandes oder die Anwendung prädiktiver Instandhaltungskonzepte. Er kann somit dem Nachvollziehen der Vergangenheit, der Kontrolle der Gegenwart und der Prognose der Zukunft dienen.

Um eine eindeutigere Beschreibung der Fähigkeiten eines Digitalen Zwillings zu ermöglichen, haben sich fünf Reifegrade etabliert. Beginnend mit Reifegrad 1 besteht ein Digitaler Zwilling einzig aus einer virtuellen Nachbildung des realen Objekts mit der Einbindung von objektbezogenen (Zustands-)Daten. Im Reifegrad 2 werden zusätzlich sensorbasierte Messdaten für dessen Zustandsbewertung in Echtzeit genutzt. Ein Digitaler Zwilling im Reifegrad 3 nutzt diese Daten weiterführend und erstellt Zustandsprognosen, aus denen er im Reifegrad 4 mit Hilfe von maschinellem Lernen eigenständig Handlungsempfehlungen entwickelt.

Im höchsten Reifegrad 5 ist der Digitale Zwilling autonom, lernt und handelt selbstständig. Aktuelle Entwicklungen gehen im Infrastrukturbereich allerdings noch nicht über den Reifegrad 3 hinaus.

Neben dem Reifegrad lassen sich auch verschiedene Arten von Digitalen Zwillingen unterscheiden. Grundsätzlich gibt es Komponentenzwillinge, Objektzwillinge und Systemzwillinge. Ein Komponentenzwilling bildet lediglich ein einzelnes funktionierendes Bauteil ab (Querträger, Hänger, Lager etc.). Ein Objektzwilling ist ein Abbild des gesamten baulichen Objekts mit mehreren internen Komponenten. Und ein System aus mehreren zusammenhängenden Objektzwillingen der gleichen oder ähnlichen Domäne lässt sich durch einen Systemzwilling abbilden.

Darüber hinaus existieren Prozesszwillinge und vernetzte Zwillinge, wobei erstere tendenziell Prozesse wie z. B. Lieferketten oder auch Erhaltungsprozesse abbilden; letztere domäneübergreifende Zwillinge (Wohngebäude, Infrastruktur, Fabriken etc.) miteinander verbinden.

Alle Arten von Digitalen Zwillingen haben in ihren unterschiedlichen Reifegraden das Ziel, einen Mehrwert zu erschaffen: Indem sie es ermöglichen, das Verhalten des realen Objekts genauer zu verstehen, um daraus abgeleitet präzisere und damit bessere Entscheidungen für das physische System zu treffen.

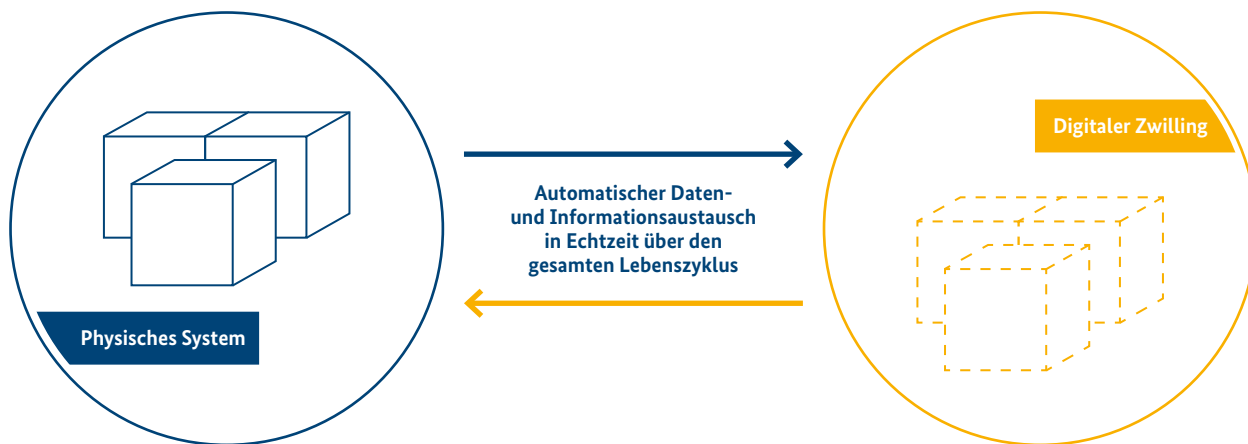


ABB 3.1 Interaktion zwischen physischem System und digitalem Zwilling

Allgemeine Definition des Digitalen Zwillings

In diesem Kapitel werden zunächst die allgemeine Definition des Digitalen Zwillings und seine Eigenschaften basierend auf dem Stand der Wissenschaft wiedergeben. Die beschriebenen Sachverhalte werden noch nicht in den Kontext von Brücken im Bundesfernstraßennetz gesetzt, jedoch erfolgen vereinzelt beispielhafte Bezüge zu Brücken, um die, teils abstrakt wirkenden, wissenschaftlichen Beschreibungen zu verbildlichen. Die Einbettung und Definition von Digitalen Zwillingen für Brücken im Bundesfernstraßennetz erfolgen explizit in [7 Kapitel 4](#).

In der Literatur existiert eine Vielzahl von verschiedenen Definitionen des Digitalen Zwillings, die insbesondere in Abhängigkeit von der jeweiligen Industriebranche variieren und eine Adaption an den jeweiligen Anwendungsfall erhalten haben [Brilakis et al., 2019], [Trauer et al., 2020]. Das Grundkonzept des Digitalen Zwillings hat jedoch seit seiner ersten Erwähnung im Jahre 2002 immer noch Bestand [Grieves & Vickers, 2017]. Ein Digitaler Zwilling ist demnach ein digitales Abbild eines physischen Systems, wobei beide bestenfalls über den gesamten Lebenszyklus durch einen automatischen Daten- und Informationsaustausch in Echtzeit miteinander verknüpft sind (ABB 1.4 und ABB 3.1). Ein Digitaler Zwilling kann 3D-Modelle, IoT-Geräte (Sensoren), 4G- oder 5G-Netzwerke, Cloud Computing und künstliche Intelligenz verwenden. Je nach Komplexität und Reifegrad sammelt der Digitale Zwilling unterschiedliche Daten seines realen Zwillings, verwaltet, analysiert, bewertet und visualisiert diese.

Mit Hilfe von geeigneten Simulationsmodellen, die auf sensorbasierte Echtzeitdaten zugreifen, verhält er sich genauso wie sein reales Gegenstück. Neben der Möglichkeit zur Überwachung bzw. Zustandsbeurteilung des realen Abbildes stellen Digitale Zwillinge weitere Informationen für präzisere Entscheidungsfindungen zur Verfügung. Je nach Anwendungsbereich ermöglichen sie z. B. die Überprüfung des Soll-Ist-Zustandes, eine Fehler- bzw. Schadenserken- nung, Prozessoptimierungen, die Anwendung prädiktiver Instandhaltungskonzepte bis hin zur Simulation von zukünftigen oder fiktiven Zustands- und Beanspruchungs- szenarien. Der Detaillierungsgrad des Digitalen Zwillings, der sich neben der Geometrie auch auf die möglichen Ver- haltenmodelle bezieht, hängt dabei von seinem beabsich- tigten Verwendungszweck ab. Digitale Zwillinge schaffen einen Mehrwert, indem sie es ermöglichen, das Verhalten des realen Objekts genauer zu verstehen und somit präzi- sere und bessere Entscheidungen für das physische System zu treffen. In diesem Zusammenhang ist grundsätzlich zwi- schen dem „Digital Twin“ und der „Digital Twin Platform“ zu unterscheiden. Unter *Digital Twin* wird das eigentliche Konzept eines Digitalen Zwillings verstanden. Die *Digital Twin Platform* beschreibt hingegen die technologische Basis für die Umsetzung eines Digitalen Zwillings.

Modell, Schatten und Zwilling

Je nach Datenintegrationstiefe bzw. Konnektivitätsgrad zwischen dem realen physischen System und seinem digitalen Abbild wird nach [Kritzinger et al., 2018] zwischen

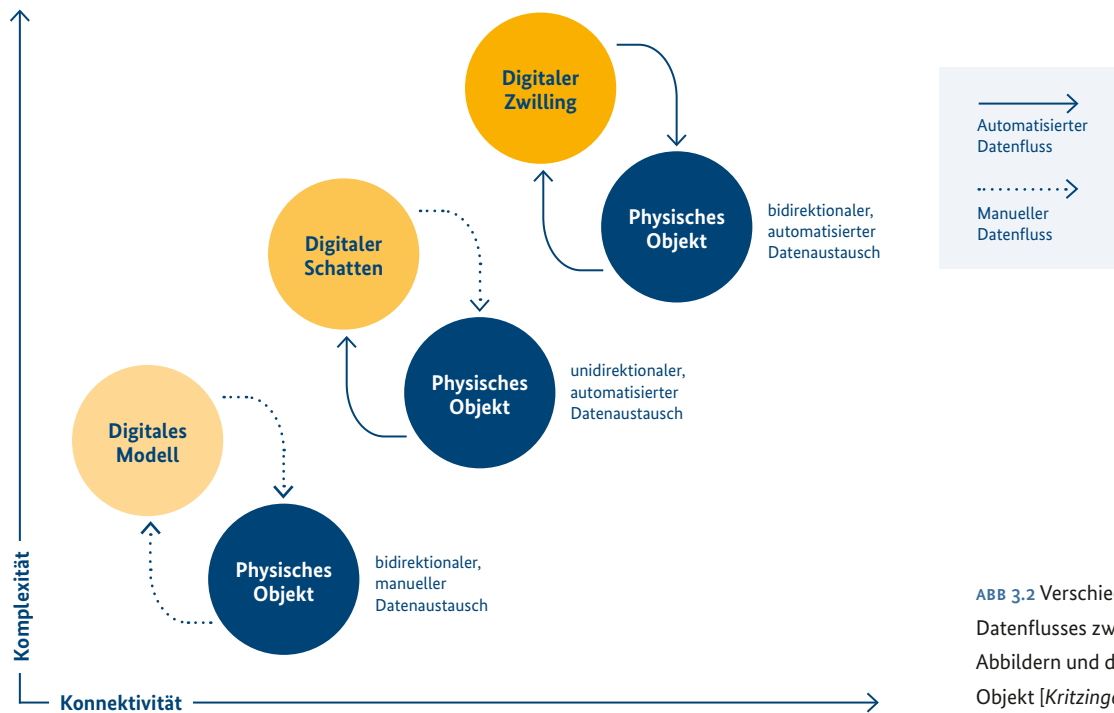


ABB 3.2 Verschiedene Stufen des Datenflusses zwischen digitalen Abbildern und dem physischen Objekt [Kritzinger et al., 2018]

einem digitalen Modell, einem digitalen Schatten und einem Digitalen Zwilling unterschieden, [ABB 3.2](#):

Ein *Digitales Modell* ist nach dieser Definition ein digitales Abbild eines physischen Objekts ohne die Nutzung eines beiderseitigen, automatisierten Datenaustauschs. Der gesamte Datenaustausch erfolgt auf manuellem Wege. Eine Zustandsänderung des physischen Objekts hat keine unmittelbare Auswirkung auf das digitale Modell und umgekehrt.

Ein *Digitaler Schatten* hingegen ist ein digitales Abbild eines physischen Objekts mit einem unidirektionalen, automatisierten Datenaustausch vom physischen Objekt zum digitalen Abbild. Eine Zustandsänderung des physischen Objekts hat eine unmittelbare Auswirkung auf den Zustand des Digitalen Schattens, aber nicht umgekehrt.

Ein *Digitaler Zwilling* besitzt in Erweiterung zum Digitalen Schatten einen bidirektionalen, automatisierten Datenaustausch. In diesem Fall kann der Digitale Zwilling sogar Daten oder Steuerinformationen an das physische Objekt übertragen.

Das Merkmal des bidirektionalen Datenaustauschs eines Digitalen Zwillings mit dem physischen Objekt lässt sich am Beispiel der industriellen Produktfertigung verdeutlichen. Abweichungen im Produktionsprozess oder des Zustandes der realen Produktionsanlage werden z. B. durch eine sensorbasierte Datenerfassung registriert und durch den Datenfluss an den Digitalen Zwilling weitergeleitet. Als Reaktion kann die reale Produktionsanlage automatisch nachjustiert oder prädiktiv

instandgehalten werden. Die Grundlage hierfür bildet z. B. ein durch Echtzeitdaten gespeistes Simulationsmodell, das sich idealerweise genauso verhält wie die reale Produktionsanlage. Somit lassen sich Stellgrößen oder Eingabeparameter anpassen oder Wartungsarbeiten in Art, Umfang und Zeitpunkt planen. Ähnliche Ansätze existieren bereits für Tragstrukturen von Windkraftanlagen. In solchen Tragstrukturen kann z. B. Materialermüdung zu Veränderungen der Struktureigenschaften führen. Mit Hilfe eines Digitalen Zwillings wird eine automatische Anpassung der Anlagenregelung ermöglicht [Botz & Große, 2020].

Das Konzept des Digitalen Zwillings ist zwar grundsätzlich nicht neu, befindet sich aber in Umsetzung und Anwendung in vielen Industriebranchen häufig noch in der anfänglichen Entwicklung. Dies und die Vielfalt der möglichen Anwendungsbereiche, Schwerpunkte und Zielstellungen führen dazu, dass der Begriff „Digitaler Zwilling“ in den zahlreich existierenden Veröffentlichungen, Berichten und Konzepten synonym für ein Digitales Modell oder einen Digitalen Schatten verwendet wird [Kritzinger et al., 2018]. In diesem Dokument wird der Begriff „Digitaler Zwilling“ ebenfalls generisch genutzt und bewusst auf die Begriffe Digitales Modell und Digitaler Schatten verzichtet. Zur Unterscheidung der Fähigkeiten, Komplexität und Konnektivität des Digitalen Zwillings wird hier die Aufteilung und Beschreibung entsprechend der Reifegrade favorisiert ([ABB 3.3](#)).

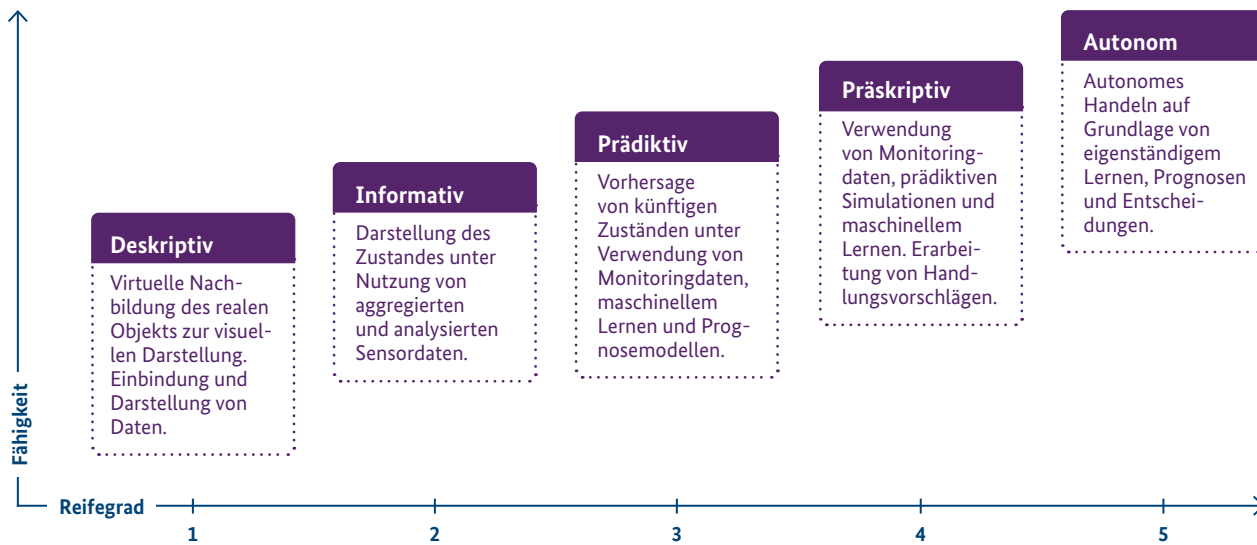


ABB 3.3 Reifegrade von Digitalen Zwillingen

Reifegrade von Digitalen Zwillingen

Für eine einheitliche Beschreibung der Fähigkeiten von Digitalen Zwillingen haben sich insgesamt fünf Reifegrade etabliert, siehe ABB 3.3 [ARUP, 2019], [BuildingSMART, 2022].

Der erste und einfachste Reifegrad beschreibt einen deskriptiven Digitalen Zwilling. Dieser entspricht einem digitalen visuellen Abbild des realen Objekts und hat hinsichtlich der Konnektivität und Komplexität den Charakter eines digitalen Modells gemäß ABB 3.2. Der deskriptive Digitale Zwilling enthält neben geometrischen Daten weitere von Benutzenden implementierte Informationen und stellt diese anderen Nutzer:innen zur Verfügung. Letztlich ist dies mit einem BIM-Modell des physischen Objekts (As-Built), das über die Nutzungsdauer manuell und anlassbezogen aktualisiert wird (As-Maintained), gleichzusetzen.

Der zweite Reifegrad beschreibt einen informativen Zwilling. Dieser nutzt sensorische Daten, aggregiert und analysiert diese und stellt den Benutzenden die daraus gewonnenen Informationen zur Verfügung. Er kann dadurch den aktuellen Zustand des physischen Objekts erkennen.

Digitale Zwillinge im dritten Reifegrad sind prädiktiv. Auf Grundlage von Monitoring-Daten und unter Verwendung von Data Science, maschinellem Lernen und Prognosemodellen werden bereits Vorhersagen über zukünftige Zustände getroffen. Diese Informationen werden für die Nutzenden visuell aufbereitet und dienen ihnen als Entscheidungsgrundlage für z. B. Lebensdauerbewertungen und prädiktive Wartungsmaßnahmen.

Im nächsten vierten Reifegrad wird der Digitale Zwilling präskriptiv. Der Zwilling lernt selbstständig aus verschiedenen Datenquellen. Er generiert durch maschinelles Lernen sowie prädiktive Simulationen umfangreiche Informationen und nutzt diese für eigenständige Entscheidungsfindungen. Diese werden den Benutzenden als Handlungsempfehlung vorgeschlagen.

Die Reifegrade zwei bis vier haben durch den als Voraussetzung vorliegenden unidirektionalen automatisierten Datenaustausch mindestens den Charakter eines digitalen Schattens gemäß ABB 3.2.

Im höchsten fünften Reifegrad ist ein Digitaler Zwilling autonom. Ihm werden Verantwortlichkeiten übergeben und er ist in der Lage, selbstständig zu lernen und zu handeln. Hierfür kann er Daten von mit ihm vernetzten anderen Digitalen Zwillingen innerhalb eines gemeinsamen Ökosystems verwenden.

Auch wenn die verschiedenen Entwicklungsstufen somit deutlich umrissen sind, zeigen Recherchen, dass die Anwendung von Digitalen Zwillingen bisher nicht über Reifegrad 3 hinausgeht [ARUP, 2019], [MEED, 2021]. Allerdings werden Digitale Zwillinge im Hinblick auf die Entwicklung hin zur „Wirtschaft 4.0“ kontinuierlich weiterentwickelt und in immer mehr Bereichen eingesetzt.

Arten von Digitalen Zwillingen

Je nach Anwendungsbereich können verschiedene Arten von Digitalen Zwillingen erstellt werden. Es können z. B. physische Objekte, angefangen bei Materialien auf der

ARTEN VON DIGITALEN ZWILLINGEN



Vernetzte Zwillinge (Network of Systems)

Netzwerk verschiedener System-, Objekt- oder Prozesszwillinge



Prozesszwilling (Process Twin)

Erhaltungsprozess, Verkehrsmanagement



Systemzwilling (System Twin)

Verkehrsstrecke bzw. Netz



Objektzwilling (Asset Twin)

Gesamtes Brückenbauwerk



Komponentenzwilling (Component Twin)

Brückenbauteil

Nanoebene bis hin zu ganzen Städten, Personen oder Prozessen, digital repräsentiert werden (ABB 3.4).

Hersteller von Flugzeug- oder Kraftwerksturbinen verwenden Digitale Zwillinge beispielsweise, um ihre Produkte zu entwickeln, digital zu testen, sie während ihres Betriebs in Echtzeit zu überwachen, zu optimieren und präventive Wartungsmaßnahmen vorzusehen [Rolls Royce, 2019]. Dabei können auch einzelne Turbinenteile als sogenannte **Komponentenzwillinge** (Component Twins) abgebildet werden. Um Komponentenzwillinge handelt es sich, wenn ein einzelnes funktionierendes Teil oder eine Komponente eines größeren Objekts (Schlüsselkomponente) digital repräsentiert wird. Bei einem Brückenbauwerk könnte dies ein einzelnes Brückenbauteil (z. B. Querträger, Hänger, Lager) oder auch ein Sensor sein.

Neben den einzelnen Bauteilen lassen sich auch die gesamten Maschinen oder ganze Gebäude bzw. Infrastrukturbauwerke digital abbilden. Die digitale Repräsentanz solcher maschinellen bzw. baulichen Objekte wird als **Objektzwilling** (Asset Twin) bezeichnet. Bei Objektzwillingen handelt es sich um Objekte, die aus mehreren internen Komponenten bestehen. Der Fokus liegt hierbei nicht mehr auf den Einzelteilen, sondern vielmehr auf dem gesamten Objekt und seiner Gesamtfunktion. Bei Digitalen Zwillingen von Brücken- bzw. Infrastrukturbauwerken, wie sie innerhalb dieses Dokumentes vorgestellt werden, handelt es sich um Objektzwillinge.

Existiert ein System aus zusammenhängenden Objekten, so kann dies wiederum durch einen **Systemzwilling**

ABB 3.4 Arten von Digitalen Zwillingen, adaptiert auf die Domäne der Verkehrsinfrastruktur

(System Twin) abgebildet werden. Zum einen lässt sich innerhalb des Systemzwillinges der Zustand des Gesamtsystems darstellen, zum anderen wird die Untersuchung der einzelnen Objekte und Komponenten ermöglicht. Ein Beispiel hierfür wäre ein Systemzwilling eines gesamten Gebäudes mit verschiedenen technischen Versorgungsanlagen – oder ein Systemzwilling, welcher mehrere Bauwerke eines zusammengehörenden Korridors oder Streckennetzes in sich vereint (siehe auch [Jackmuth et al., 2022]).

Systemzwillinge verbinden dabei tendenziell Objektzwillinge aus gleichen oder ähnlichen Domänen zu einer größeren Skala miteinander. Durch diese Verbindung werden auch Interaktionen zwischen den Objektzwillingen ermöglicht. Gegenüber anderen Digitalen Zwillingen ist das Nutzer:innen-Spektrum jedoch vergleichsweise begrenzt.

Darüber hinaus können Digitale Zwillinge domänenübergreifend zu **vernetzten Zwillingen** (Network of Systems) miteinander vernetzt werden. Somit wird die Digitalisierung von Stadtteilen, Städten oder gar Regionen denkbar. Solche vernetzten digitalen Abbilder können aus verschiedenen Arten von Digitalen Zwillingen verschiedener Domänen bestehen, wie z. B. aus Wohngebäuden, Fabriken, Energie- und Wassersystemen, öffentlichen Verkehrssystemen und Infrastruktur [Brilakis et al., 2019]. Innerhalb entsprechender virtueller Ökosysteme können die Digitalen Zwillinge miteinander kommunizieren und erzeugen somit einen erheblichen Mehrwert, der über ihren eigentlichen Anwendungsbereich hinaus geht und ein breites Spektrum von Nutzer:innen anspricht. Im Kontext der Verkehrsinfrastruktur können vernetzte Zwillinge beispielsweise durch die Verknüpfung der Digitalen Zwillinge von Brücken mit dem des intermodalen Verkehrs sowie den dazugehörigen Fahrzeugen entstehen (7 Kapitel 2.3). Digitale Brückenzwillinge können aber auch mit denen von Straßen oder Straßenkorridoren vernetzt werden, wodurch anschließend Informationen über die Verkehrs-, Umwelt-, Infrastruktur- und Straßenbedingungen sowie über Verkehrsmanagement, Fahrzeugregelungen u. v. m. ausgetauscht werden können.

Neben physischen Gegenständen lassen sich auch Digitale Zwillinge von Prozessen und Prozessketten erstellen. In der industriellen Produktion werden z. B. umfangreiche Automatisierungs- und Robotiksysteme eingesetzt und IoT-Technologien genutzt. Mit deren Daten kann ein Produktionsprozess durch einen **Prozesszwilling** (Process Twin) digital abgebildet werden. Mit dessen Hilfe lassen

ABB 3.5
The Gemini Principles
in Anlehnung an
[Bolton et al., 2018]

sich gesamte physische Prozesse oder Teilprozesse in Echtzeit überwachen, auf Basis von Prozessparametern optimieren sowie Probleme schnell erkennen und beheben. Solche Modelle können sogar über das eigentliche Unternehmen hinaus gehen und z. B. auf Lieferketten von Produktionsgütern erweitert werden. Beispielsweise lassen sich innerhalb der Logistikbranche verschiedenste Lieferketten durch Prozesszwillinge abbilden [Scheibe, 2018].

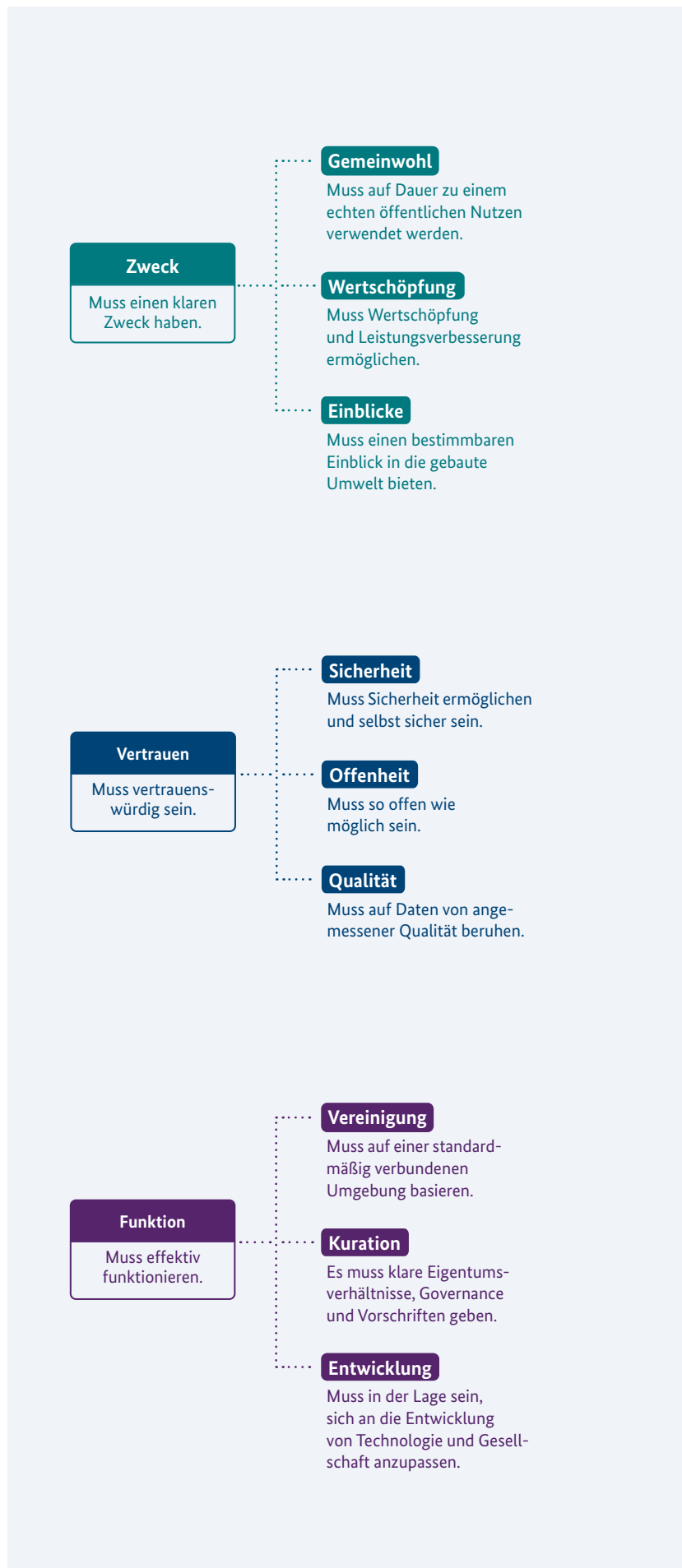
Im Kontext der Verkehrsinfrastruktur kann der Erhaltungsprozess in einem Prozesszwilling abgebildet werden, in dem von der Erfassung von Schäden, der Erkennung von Anomalien bis hin zur Umsetzung von Erhaltungsmaßnahmen beispielsweise die Zuständigkeiten, Termine und Wirtschaftlichkeit abgebildet werden. Dies sind typische Aufgaben von ERP-Systemen, die wiederum durch Informationen aus den Objektzwillingen gespeist werden können.

Ökosystem für vernetzte Zwillinge

Erste Leitlinien für die Entwicklung eines sinnhaften, vertrauenswürdigen und effizient funktionierenden nationalen Ökosystems von vernetzten Digitalen Zwillingen wurde auf internationaler Ebene bereits erarbeitet [Bolton et al., 2018]. Sie sollen einfache Grundsätze für eine abgestimmte Entwicklung von Digitalen Zwillingen bieten und gliedern sich in drei Kategorien: Zweck, Vertrauen und Funktion (ABB 3.5). Gemäß dem „Centre for Digital Built Britain“ (CDBB) sollen entsprechende Ökosysteme dem Gemeinwohl dienen, zur Wertschöpfung beitragen und Einblicke in die gebaute Umgebung erlauben, um bessere Entscheidungsfindungen zu ermöglichen. Sie sollen sicher, aber so offen wie möglich sein und müssen sich auf Daten von angemessener Qualität stützen. Darüber hinaus müssen sie auf einer standardisierten Umgebung beruhen, miteinander kompatibel sein, kuratiert werden, klaren Vorschriften folgen und in der Lage sein, sich an die technologische und gesellschaftliche Entwicklung anzupassen.

Digitale Zwillinge und die Zeit

Optimalerweise ermöglichen Digitale Zwillinge eine digitale Repräsentanz eines physischen Objekts über dessen gesamten Lebenszyklus hinweg in Echtzeit. Der Begriff „Echtzeit“ bedeutet in diesem Hinblick nicht, dass die Synchronisation unmittelbar erfolgen muss. Vielmehr muss sie innerhalb eines vorher definierten Zeitintervalls stattfinden, damit die Informationen für



eventuell notwendige Entscheidungen rechtzeitig zur Verfügung stehen. Im Englischen wird dabei zwischen real-time und right-time unterschieden, wobei zweites für die Belange des Digitalen Zwillinges zutreffend ist. Wie das physische Objekt und der Digitale Zwilling miteinander synchronisiert werden, hängt insbesondere vom Zweck des Digitalen Zwillinges ab. In bestimmten Anwendungsbereichen, wie z. B. bei Flugzeugturbinen, erfolgt die Aktualisierung in kurzen Zeitspannen, um den Triebwerkszustand schnell bewerten zu können. Für Bauwerke können diese Zeitspannen länger ausfallen. Je nach der gewünschten Aussagefähigkeit des Digitalen Zwillinges ist eine sinnvolle Aktualisierungsrate zu wählen. Soll der Digitale Zwilling einer Brücke dazu genutzt werden, um deren Zustand zu überwachen und mögliche Schadensereignisse – noch bevor sie eintreten – festzustellen, so sind im Vorfeld sorgfältige Überlegungen über die zu überwachende Schadensart anzustellen. Die Sensitivität des entsprechenden Prognosemodells sowie die sich im Falle eines Schadeneintritts anschließende Schadensprogression und Schadensfolge sollten dabei Berücksichtigung finden. Wird beispielsweise durch sensorbasiertes Monitoring der Ermüdungszustand eines Bauteils überwacht, so wäre auf der Grundlage einer zuvor durchgeführten Sensitivitätsanalyse ([7 Kapitel 8.2](#)) die Aktualisierung dieser Informationen ggf. einmal pro Monat ausreichend. Soll der Digitale Zwilling perspektivisch darüber hinaus auch zur Verkehrsbeeinflussung verwendet werden, indem bei Glatteisgefahr, zu hohen Windgeschwindigkeiten oder Stau automatisiert entsprechende Warnungen und Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Wechselverkehrszeichen angezeigt werden, so sind entsprechende Information in einer deutlich kürzeren Zeitspanne (z. B. minütlich) zu aktualisieren.

Darüber hinaus ist es nicht zwingend notwendig, dass ein Digitaler Zwilling den gesamten Lebenszyklus des physischen Objektes abbildet. Dies entspräche zwar im Hinblick auf den Informationsgrad dem Optimalfall, er kann aber auch erst während der Betriebsphase eines physischen Objektes (z. B. eines Bauwerks) entstehen. Nachträgliche Erweiterungen hinsichtlich der Anzahl der überwachten Komponenten und des Detaillierungsgrades des Digitalen Zwillinges sind jederzeit möglich.



Brücke

↑ Hoch → Kohlbrandbrücke → Westrampe →
→ Achse 100-118 → ID 32 - PTFE: Verschlissen

3.2

3.2

SCHADEN

**ID 32 - PTFE:
Verschlissen**

09:47 Uhr, 08.07.2020

MELDUNG
nicht ausreichender Zustand

BETRIFFT
Überbau, Gleitspalt, PTFE

BESCHREIBUNG
PTFE: Verschlissen

UMFASSUNG
19/H

STATÜGIGUNG
10/S1

STÄNDIG IN BIM

MENGE
Anzahl: 5 Stück

ORTSANGABE
keine Angabe

RICHTIG VERORTET
Ja

Genauswahl (5) @

3.2 TEILSCHADEN
Schaden ID 32, Teilschaden 1

4 – Digitaler Zwilling und BIM im Kontext dieses Dokumentes

Kurzfassung

In diesem Dokument wird der Digitale Zwilling im Kontext der Nutzungsphase, bestehend aus Betrieb und Erhalt von Brücken, eingebettet. Ziel des Digitalen Zwillings ist es, einen informationellen Mehrwert zu liefern, um die gegenwärtige und zukünftige Sicherheit von Infrastrukturbauwerken zu gewährleisten und die Anlagenverfügbarkeit zu erhöhen. Dafür greift der Digitale Zwilling auf eine Vielzahl von Datenquellen zurück, die in der Regel heterogene und unverarbeitete Daten enthalten. Diese Datenstränge werden im Digitalen Zwilling zusammengeführt und gesamtheitlich betrachtet, ausgewertet und zu Informationen verarbeitet. Die Informationen werden den Nutzer:innen über ein intuitives „Frontend“ in strukturierter und georeferenzierter Art und Weise zur Verfügung gestellt.

In Abhängigkeit des Reifegrades wird ein Digitaler Zwilling aus unterschiedlichen Datenquellen gespeist. Die wichtigste Komponente des Digitalen Zwillings ist allerdings das BIM-Modell. Diese fundamentale Datenquelle dient als Basis für die Navigation in der Visualisierung, zur Verortung von Datenquellen und zur Abbildung der Bauwerkstaxonomie. Darüber hinaus werden wichtige Informationen aus der Bauwerksprüfung, aus der Bauwerksdiagnostik und in Abhängigkeit des Reifegrades aus dem Bauwerksmonitoring innerhalb des BIM-Modells verortet sowie visualisiert. Zusätzlich können weitere zustandsrelevante Daten (z. B. Satellitenbilder, Fahrzeug- oder Smartphone-Daten) einbezogen werden. In höheren Reifegraden ist das Herzstück des Digitalen Zwillings die automatisierte Datenverarbeitung, durch welche die Rohdaten zu aggregierten Zustandsinformationen verarbeitet werden und auf deren Grundlagen Zustände

prognostiziert werden können. Aber auch nicht aggregierte Informationen von Dritten lassen sich innerhalb des Digitalen Zwillings importieren (Embedded-Data) oder verlinken (Linked-Data).

All diese Informationen werden den Nutzenden durch eine Mensch-Maschine-Schnittstelle strukturiert, bedarfsgerecht und intuitiv zur Verfügung gestellt. Wurde BIM bislang überwiegend für die Planung und den Bau von Infrastrukturbauwerken angewandt, ermöglicht der Digitale Zwilling die Überführung der BIM-Methode nun auch in den Bauwerksbetrieb, womit der BIM-Definition im *Masterplan BIM Bundesfernstraßen* entsprochen wird.

Die Erstellung von Digitalen Zwillingen für Infrastrukturbauwerke ist eine neue und interdisziplinäre Aufgabe. Die erforderlichen Teilaufgaben können derart spezifisch sein, dass Fachleute zur Koordinierung und Umsetzung dieser Aufgaben erforderlich sind. Darüber hinaus können die derzeitigen typischen Vergabemöglichkeiten für Ingenieur- oder Bauleistungen diesen neuen Entwicklungen noch nicht Rechnung tragen und sind deshalb i. d. R. ungeeignet, um entsprechende Leistungen auszuschreiben und zu vergeben. Daher werden nachfolgend auch die an der Erstellung von Digitalen Zwillingen beteiligten Akteure und die erforderlichen Prozesse vorgestellt. Dies bildet eine Grundlage für Auftraggeber- und Auftragnehmer:innen, um gerade in der Phase der Pilotierung, z. B. im Rahmen von digitalen Testfeldern, diese neue Aufgabe zu beschreiben, zu strukturieren und eine gemeinsame vertragliche Basis zu schaffen. Die Prozessbeschreibung ermöglicht damit eine zweckmäßige und geeignete Leistungsbeschreibung bzw. Ausschreibung.

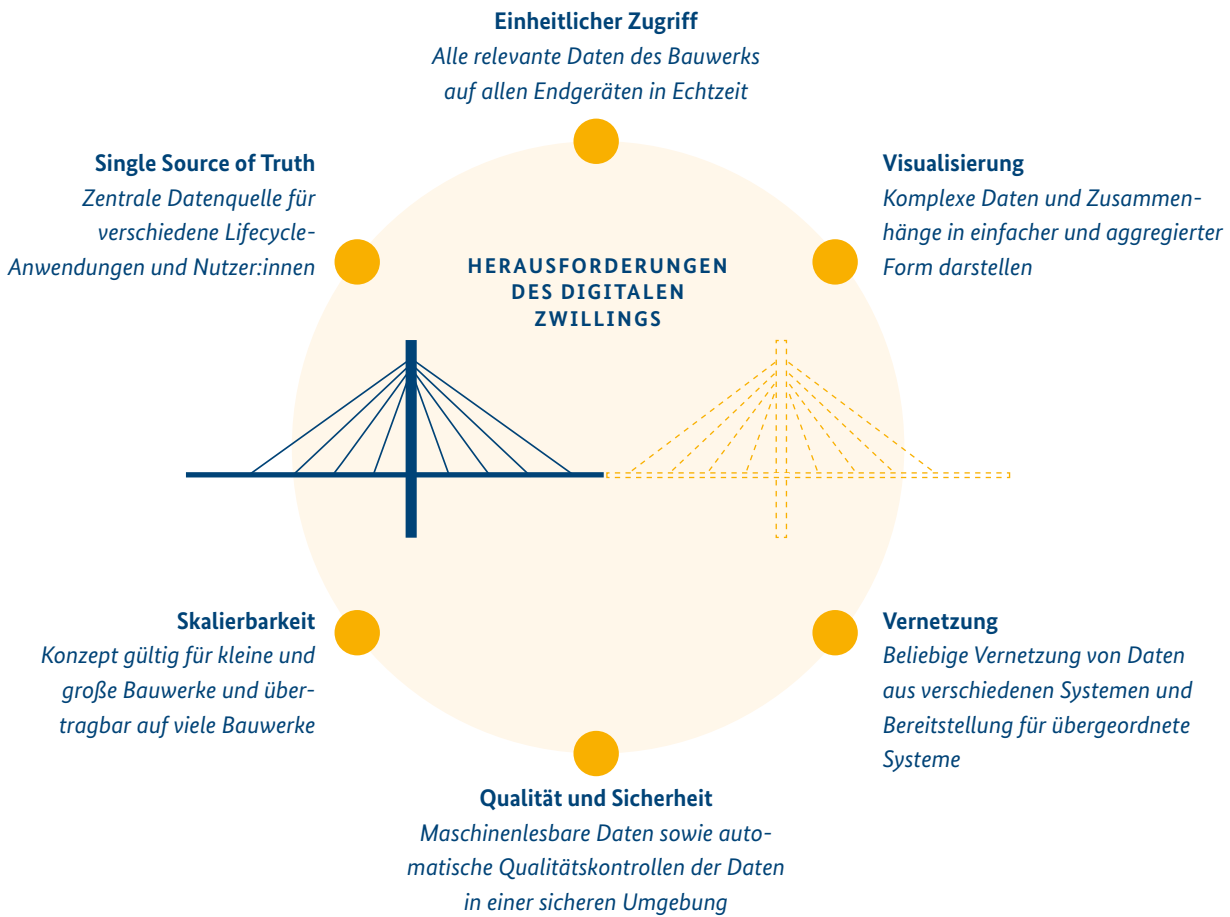


ABB 4.1 Herausforderungen des Digitalen Zwillings

1 – Digitale Zwillinge von Brücken in der Bundesfernstraßeninfrastruktur

Wie in [Kapitel 3](#) bereits beschrieben, adaptieren verschiedene Industriezweige den Begriff des Digitalen Zwillings auf ihren entsprechenden Anwendungsfall. In den nachfolgenden Abschnitten wird diese Adaption auf Brückenbauwerke im Bundesfernstraßennetz vorgenommen und der domänenspezifische Aufbau des Digitalen Zwillings dargestellt. Der Fokus in diesem Dokument liegt auf der Phase des Betriebs und Erhalts von Brücken.

Für weitere Ingenieurbauwerke des Bundesfernstraßennetzes wie beispielsweise Straßen oder Tunnel ist eine Übertragbarkeit des Grundkonzeptes aus [Kapitel 3](#) möglich, muss allerdings noch spezifiziert werden und ist kein Teil des vorliegenden Beitrags.

Die in diesem Kapitel vorgenommenen Definitionen und der Aufbau des Digitalen Zwillings für Brücken sind als erste Vorschläge zu verstehen und haben nicht den Charakter einer endgültigen Festlegung. Sie basieren auf der Analyse der aktuellen Bedarfe sowie auf den bisherigen Erfahrungen und werden sich in den nächsten Jahren mit Sicherheit weiterentwickeln.

Überführung der Definition auf Brücken der Bundesfernstraßen

Im Hinblick auf Brücken der Bundesfernstraßeninfrastruktur tritt an die Stelle des per Definition beschriebenen physischen Systems vor allem das reale Asset bzw. Brückenbauwerk während seiner Nutzungsphase. Demnach handelt es sich bei einem Digitalen Zwilling einer einzelnen Brücke um einen Objektzwilling. Durch die Verknüpfung mehrerer Objektzwillinge von Brücken in beispielsweise einem zusammengehörenden Streckenkorridor kann ein Systemzwilling entstehen.

Brückenbauwerke sind überwiegend statische Objekte bzw. Assets (Ausnahmen sind z. B. bewegliche Brücken), die keine Möglichkeit besitzen, ihren Zustand aufgrund eines automatischen Datenaustauschs mit einem Digitalen Zwilling selbstständig zu verändern bzw. anzupassen. In diesem Fall ließe sich der bidirektionale Datenaustausch aus der allgemeinen Definition in [ABB 3.2](#) vielmehr als indirekter Datenaustausch verstehen, indem auf Grundlage des Digitalen Zwillings das Instandhaltungspersonal automatisch über Zustandsänderungen oder Auffälligkeiten informiert wird und so notwendige Instandhaltungsmaßnahmen

ausgeführt werden können. Dadurch wird der Zustand des Bauwerks angepasst (ABB 1.4). Diese Überlegung lässt darauf schließen, dass prädiktive Instandhaltungsstrategien erst mit Hilfe von Digitalen Zwillingen entwickelt und sinnvoll angewendet werden können. Gelänge dies perspektivisch, könnte ein digitaler Brückenzwilling mit hohem Reifegrad bevorstehende Schadensereignisse erkennen und dem Menschen verschiedene fallspezifische Handlungsoptionen aufzeigen. Nach Erlangung einer Akzeptanz im Umgang mit dem Digitalen Zwilling könnte ein Brückenzwilling des höchsten Reifegrades eigenständig auf diese bevorstehenden Schadensereignisse reagieren. Zum Beispiel könnte er durch eine autonom geregelte Geschwindigkeitsreduktion die Schwingbeanspruchung vermindern, um Ermüdungsbeanspruchungen an einem kritischen Bauwerksteil zu begrenzen – oder eine Regulierung des Schwerverkehrs in Abhängigkeit von weiteren veränderlichen Einwirkungen (Wind, Temperatur) vornehmen, siehe auch Beschreibung der Reifegrade in [7 Kapitel 3](#).

Der zu wählende Reifegrad für einen zu erstellenden Digitalen Zwilling einer Brücke ist abhängig von der jeweiligen Relevanz des Objekts, sowie von der strategischen Netzbetrachtung aber auch dem zu betrachtenden Anwendungsfall. Eine Klassifikation, welche Bauwerke welchen Reifegrad des Digitalen Zwillings fordern, kann aktuell nicht ohne weiteres festgelegt werden. Für jede Brücke ist stets eine Einzelbetrachtung notwendig, allerdings können zumindest übergeordnete Sachverhalte genannt werden, bei denen sich Digitale Zwillinge mit höheren Reifegraden eignen würden: Bauwerke mit großer verkehrlicher Bedeutung, unter Denkmalschutz stehende Bauwerke oder Bauwerke mit sehr schlechtem Zustand oder großen Tragfähigkeitsdefiziten. Weiterhin ist die Entscheidung, welche Fähigkeiten der Digitale Zwilling besitzen soll auch Entscheidung von Anlagenbetreiber:in, Auftraggeber:in oder Bauherr:in.

Als Einordnung sollen im Ingenieurbau kurz die aktuellen Aktivitäten zum Digitalen Zwilling dargestellt werden. Bislang wurden stark vereinzelt Digitale Zwillinge von Brücken mit einem maximalen Reifegrad von 2 umgesetzt. Ein Digitaler Zwilling von Brücken bildet in diesem Reifegrad zum einen die reale Bauwerksgeometrie virtuell ab und reagiert zum anderen in Teilbereichen genauso wie das von ihm repräsentierte Asset. Der/die Nutzer:in wird automatisch über Änderungen oder Auffälligkeiten informiert. In der nächsten Dekade ist davon auszugehen, dass durch eine zunehmende Datenbasis und die Entwicklung

von Prognosemodellen Digitale Zwillinge zumindest in Teilen prädiktiv werden, also zunehmend im Reifegrad 3 Verankerung finden. Der Mensch wird zwar nach wie vor eine wesentliche Rolle im gesamten Erhaltungsprozess behalten, allerdings verbunden mit einer erheblichen technischen Unterstützung. Langfristig werden die Entwicklungen sicherlich zum Reifegrad 4 tendieren und der Grad der Automatisierung zu einer weiteren Unterstützung des Menschen bei der Entscheidungsfindung führen. Für Ingenieurbauwerke ist eine Entwicklung zum Reifegrad 5 eher unwahrscheinlich – aufgrund der Dimension und Einzigartigkeit der einzelnen Objekte sowie wegen bleibender manueller Prozesse im Zusammenhang mit den Erhaltungsaufgaben.

In diesem Dokument wird anhand des Projekts *smart-BRIDGE Hamburg* aufgezeigt, wie ein Digitaler Zwilling des Reifegrads 2 aufgebaut sein und funktionieren kann. Es soll für den Anwendungsfall „Nutzung für Betrieb und Erhaltung“, worauf in diesem Dokument der Fokus gelegt wird, gezeigt werden, was zum aktuellen Zeitpunkt für ein exponiertes Bauwerk umsetzbar ist. Die definierten Strukturen in [7 Kapitel 4.2](#), die Ausgangsbasis in [7 Kapitel 4.3](#) und die Akteure in [7 Kapitel 4.4](#) umfassen deutlich mehr Informationen, als diese beispielsweise für einen Digitalen Zwilling des Reifegrads 1 notwendig wären.

Bedingt dadurch, dass der Reifegrad 2 dem Reifegrad 1 folgt, stellen die Sachverhalte in den Unterkapiteln ebenfalls teils Bestandteile für Digitale Zwillinge in Reifegrad 1 dar. Strukturen, Akteure oder Prozesse, welche bereits für den Reifegrad 1 essenziell sind, werden an den entsprechenden Stellen gekennzeichnet. Jedoch sei hier erwähnt, dass dieser Ansatz auf den Erfahrungen der Autor:innen basiert und über die kommenden Jahre weiterentwickelt wird. Auf notwendige Strukturen, Akteure und Prozesse, welche explizit erst ab Reifegrad 2 notwendig werden, wird an entsprechenden Stellen ebenfalls deutlich hingewiesen.

Kernziel von Digitalen Zwillingen in der Bundesfernstraßeninfrastruktur

Laut [BMVI Masterplan, 2021] sollen Digitale Zwillinge perspektivisch für die Erhaltung und den Betrieb der Bundesfernstraßeninfrastruktur verwendet werden. Daher ist das langfristige Kernziel und Hauptanwendungsfall des Digitalen Zwillings im Hinblick auf Brückenbauwerke der Bundesfernstraßeninfrastruktur die Verbesserung des Übergangs von der reaktiven zur prädiktiven Erhaltungsstrategie, sowie die Vermeidung kritischer Situationen mit

schwerwiegenden Schadensfolgen und die damit einhergehende Reduktion von Ausfallzeiten (Brückensperrungen), Erhaltungsmaßnahmen und -kosten. Bevorstehende Erhaltungsmaßnahmen lassen sich mit Hilfe von Digitalen Zwillingen rechtzeitig erkennen, planen und durchführen. Etwaige Verkehrseinschränkungen werden somit auf ein Minimum reduziert und es wird eine bestmögliche Verfügbarkeit der Brücken ermöglicht. Bestenfalls lässt eine entsprechende Erhaltungsstrategie zu, die Nutzungsdauer des Bauwerks zu verlängern.

Um diesem Ziel gerecht zu werden, muss sich der Digitale Zwilling verschiedenen Herausforderungen stellen, die in **ABB 4.1** dargestellt sind. Das beschriebene Kernziel lässt sich in seiner vollumfänglichen Erfüllung nur mit Digitalen Zwillingen in hohen Reifegraden umsetzen. Die gezeigte Vision kann und muss nicht vollumfänglich bei allen Brücken des Verkehrsnetzes im höchsten Reifegrad umgesetzt werden. Vielmehr muss im Einzelfall des Bauwerks unterschieden werden, welche Fähigkeiten und damit einhergehend welchen Reifegrad der Digitale Zwilling der Brücken besitzen soll. Weiterhin sollte stets eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden. Dennoch strebt das BMDV an, dass jede Brücke einen Digitalen Zwilling mit mindestens Reifegrad 1 besitzen soll. Die zukünftig durchgängige Anwendung der BIM-Methode für Neubauten schafft dabei eine wichtige Grundlage für den Aufbau umfangreicher und flächendeckender Digitaler Zwillinge.

Der Wert des Digitalen Zwilling liegt in seinen Daten. Bereits die reine Erfassung und Darstellung von (Roh-) Daten, verknüpft mit einem visuellen 3D-Modell, liefert substanziellen Mehrwert gegenüber dem derzeitigen Vorgehen. Mit zunehmendem Reifegrad müssen unterschiedlichste relevante Daten gesammelt, aggregiert und unter Nutzung von automatisierten Analysemethoden, wie z. B. dem KI-basierten Machine Learning, ausgewertet werden. Die daraus resultierende, kombinierte Betrachtung aller Daten und die Aggregation von Rohdaten hin zu zustandsliefernden Informationen, einschließlich der Darstellung von Handlungsbedarfen bei entsprechend hohem Reifegrad, zeigen die Herausforderungen, aber auch das Potenzial des Digitalen Zwilling. [Bednorz et al., 2021].

2 – Die Struktur des Digitalen Zwilling

Um die o. g. Ziele zu erfüllen, werden diverse Anforderungen an die Struktur des Digitalen Zwilling gestellt, die in **ABB 4.2** dargestellt sind.

Das Brückenbauwerk stellt das Asset und somit den physischen Teil des Zwilling dar. Für dieses Asset existieren beliebig viele Datenquellen (oberer Teil von **ABB 4.2**), die heterogene geometrische und nicht-geometrische, semantische und in der Regel unverarbeitete Daten enthalten.

Die Fähigkeiten und die Struktur des Digitalen Zwilling richten sich nach dem gewählten Reifegrad, wobei höhere Reifegrade Fähigkeiten von niedrigeren Reifegraden inkludieren.

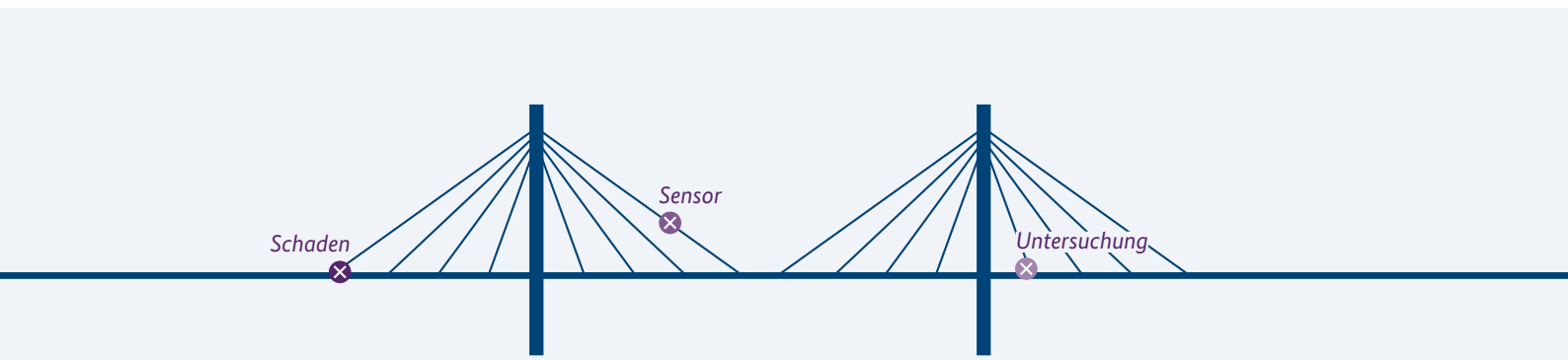
Ein Digitaler Zwilling des Reifegrads 1 ist gleichzusetzen mit einem BIM-Modell, das anlassbezogen über die Nutzungsdauer des Bauwerks mit Zustandsinformationen aus der Bauwerksprüfung oder aus diagnostischen Untersuchungen aktualisiert wird (As-Maintained Modell). Dafür ist nur ein Teil der in **ABB 4.2** aufgeführten Datenquellen und Funktionen notwendig. In diesem Dokument wird die Struktur des Digitalen Zwilling anhand eines Reifegrads von 2 beschrieben, bei dem eine sensorische Überwachung notwendig wird, um Zustandsinformationen automatisch zu generieren. Die höheren Reifegrade unterscheiden sich in der Ausprägung der automatisierten Datenverarbeitung (Data Analytics).

Die unterschiedlichen, zu Zustandsinformationen verarbeiteten, Daten müssen über entsprechende Benutzerschnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Durch die Visualisierung der Zustandsinformationen und das Handeln der entsprechenden Personen im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen findet eine Rückkopplung zum realen Zwilling statt. Die in der **ABB 4.2** dargestellten Bausteine beschreiben gleichermaßen auch die Anforderungen an den Digitalen Zwilling, die hier kurz beschrieben und in den folgenden Kapiteln näher erläutert werden sollen.

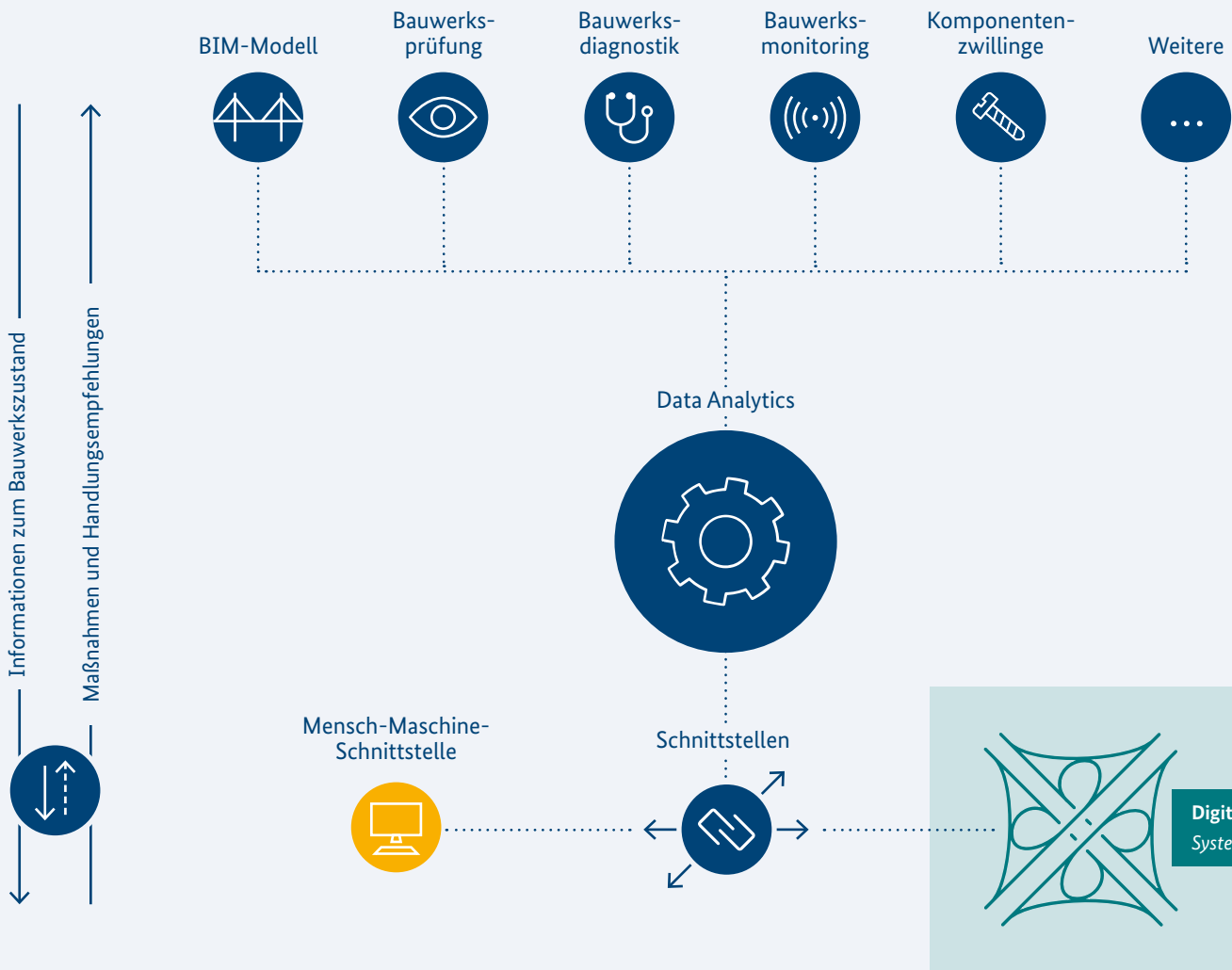


BIM-Modell

Das BIM-Modell übernimmt als Dreh- und Angelpunkt eine besondere Aufgabe im Digitalen Zwilling und wird im Kontext dieses Dokumentes als fundamentale Datenquelle identifiziert. Es bildet als 3D-Modell die Ausgangsbasis für die Navigation in der Visualisierung, vernetzt die Datenquellen, indem es diese im Modell geometrisch verortet und bildet die Bauwerkstaxonomie ab, welche für die spätere Datenverarbeitung und -aggregation benötigt wird. Je nach Anwendungsfall und Detaillierungsgrad sind im BIM-Modell weitere beschreibende Eigenschaften der Bauteile enthalten, wie beispielsweise Informationen aus der digitalen Bauwerksakte.



Physischer Zwilling



Digitale Zwilling Objektzwilling

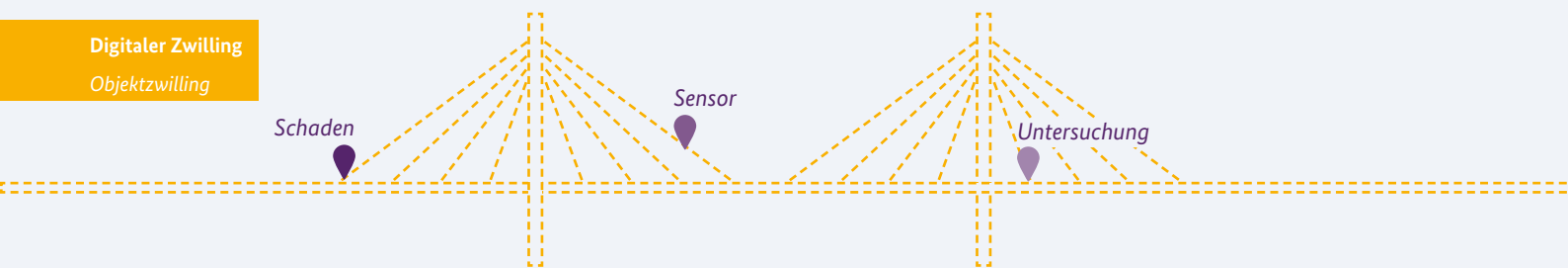


ABB 4.2 Aufbau und Anforderungen an den Digitalen (Objekt-)Zwilling (ab Reifegrad 2)

Für die Erstellung von 3D-Modellen und die Verortung von Informationen (Merkmale) hat sich im Bauwesen die BIM-Methode etabliert. Ein reines BIM-Modell wird durch die anlassbezogene Aktualisierung mit Zustandsinformationen aus der Bauwerksprüfung oder aus diagnostischen Untersuchungen zu einem deskriptiven Digitalen Zwilling (Reifegrad 1). Das BIM-Modell stammt im Neubau aus der Planungs- bzw. Ausführungsphase und kann unter bestimmten Voraussetzungen ([Kapitel 5](#)) als Grundlage für einen Digitalen Zwilling genutzt werden. Für Bestandsbauwerke liegt derzeit in der Regel kein BIM-Modell vor und ist entsprechend zu erstellen. Inzwischen existieren viele Werkzeuge zur teilautomatischen Erstellung solcher Modelle (photogrammetrische oder Laser-scanning-Verfahren), sodass die Hürde immer niedriger wird [Bednorz et al., 2021]. Die Anforderungen an das Modell aus Sicht des Digitalen Zwillings zeigt [Kapitel 5](#).

Ein BIM-Modell ist ein zwingender Bestandteil eines Digitalen Zwillings des Reifegrads 1 oder höher.



Bauwerksprüfung

Im Rahmen der regelmäßigen Bauwerksprüfung nach DIN 1076 werden Bauwerksschäden durch die Bauwerksprüfer:innen dokumentiert, aus welchen wiederum eine Zustandsnote für das Bauwerk ermittelt wird. Im Wesentlichen geht aus den Bauwerksschäden und der Zustandsnote der Erhaltungsbedarf hervor. Daher ist die Einbindung der Bauwerksprüfung in den Digitalen Zwilling unbedingt erforderlich. Die Dokumentation findet aktuell im Computerprogramm *SIB-Bauwerke* statt. Auf diesem Vorgehen beruht in Deutschland die Erhaltung von Infrastrukturbauwerken ([Kapitel 2](#)). Die Informationen sind dementsprechend zentraler Bestandteil des Erhaltungsmanagements ([ABB 4.2](#)). In Zuge einer Integration sollen einerseits Bauwerksschäden im 3D-Modell verortet werden, andererseits müssen die zugehörigen Schadensinformationen und die daraus abgeleiteten Zustandsinformationen im Digitalen Zwilling integriert und visualisiert werden. Für nähere Informationen zur Bauwerksprüfung siehe [Kapitel 6](#).

Für den Anwendungsfall „Nutzung für Betrieb und Erhaltung“ sind die Ergebnisse und Informationen aus den durchgeführten Bauwerksprüfungen ein zwingender Bestandteil eines Digitalen Zwillings bereits im Reifegrad 1.



Bauwerksdiagnostik

Bei der Bauwerksdiagnostik handelt es sich analog zur Bauwerksprüfung um eine Bestandsaufnahme zu diskreten Zeitpunkten. Im Gegensatz zur Bauwerksprüfung ist diese jedoch in der Regel anlassbezogen (z. B. OSA) und verfolgt eine spezifische Zielstellung, wie die Ermittlung bauwerksspezifischer Parameter. Sie geht über den visuell erkennbaren Eindruck der Bauwerksoberfläche hinaus und ermöglicht durch zerstörungsfreie sowie zerstörungsarme Untersuchungsmethoden die Erfassung von Detailinformationen aus dem Bauwerksinneren. Dies können beispielsweise Art, Verlauf und Verpresszustände von Spanngliedern oder Betondeckungsmessungen sein. Die Ergebnisse aus bauwerksdiagnostischen Untersuchungen tragen zu einer Präzisierung des Bestandsmodells hinsichtlich Materialien oder auch Konstruktionen bei und sollten im Sinne der Verknüpfung aller zustandsrelevanten Daten ebenfalls in den Digitalen Zwilling integriert werden. Sie dienen als Eingangsgrößen für rechnerische Bewertungen und Instandsetzungsplanungen oder liefern direkte Bestands- und Zustandsinformationen zu bestimmten Bauteilen. Für nähere Informationen zur Bauwerksdiagnostik siehe [Kapitel 7](#).

Informationen aus diagnostischen Untersuchungen am Bauwerk sind, falls durchgeführt, bereits Bestandteil eines Digitalen Zwillings des Reifegrades 1.



Bauwerksmonitoring

Das Bauwerksmonitoring ermöglicht die kontinuierliche messtechnische Überwachung von Ingenieurbauwerken und stellt damit die dynamische Verbindung zwischen dem physischen Objekt und einem digitalen Abbild dar. Es hat das Ziel, zusätzliche Informationen zum Bauwerksverhalten sowie Bauwerkszustand und deren Entwicklungen zu gewinnen. Diese dynamischen Informationen stehen, entgegen denen aus der Bauwerksprüfung, in „Echtzeit“ zur Verfügung. Weiterhin ermöglicht die Historie der hochfrequenten Daten ein eindeutiges Verständnis der Zusammenhänge zwischen Einwirkungen und Bauwerksreaktionen, sodass Modelle zur Beschreibung des Bauwerksverhaltens verbessert und zu Simulations- und Prognosezwecke eingesetzt werden können. Weitere Informationen zum Monitoring sind in [Kapitel 8](#) dargestellt.

Das Bauwerksmonitoring ist eine fundamentale Eigenschaft für Digitale Zwillinge ab einem Reifegrad 2, welche stets ein aktuelles digitales Abbild ihres physischen Zwillings darstellen sollen.



Komponentenzwillinge

Durch die aktuelle Entstehung des Ökosystems „Digitaler Zwilling“ ist naheliegend, dass auch zukünftig im Brückenbau Digitale Zwillinge von einzelnen Komponenten entstehen und von den Herstellern als weitere Leistung angeboten werden. Beispiele wären Brückentlager, Übergangskonstruktionen oder maschinentechnische Anlagen bei beweglichen Brücken. Diese Komponentenzwillinge nach der Definition in [7 Kapitel 3](#) und [ABB 3.4](#) liefern notwendige Zustandsinformationen und -prognosen und können unmittelbar in den Objektzwilling des Bauwerks als weitere Datenquelle integriert werden.

Komponentenzwillinge sind kein zwingender Bestandteil von Objektzwillingen, können aber integriert werden, wenn Komponentenzwillinge von einzelnen Bauteilen existieren. Die Integration von Komponentenzwillingen ist weniger eine Frage des Reifegrades, sondern hängt eher vom Aufbau des Digitalen Zwillings ab.



Data Analytics, automatisierte Datenverarbeitung

Der Baustein der automatisierten Datenverarbeitung ist ab einem Reifegrad 2 das Herzstück des Digitalen Zwillings. In ihm werden Daten zu Informationen – und damit zu Wissen – verarbeitet. Gerade die Daten aus dem Bauwerksmonitoring liefern in unverarbeiteter Form in der Regel noch keine Zustandsinformationen. Erst die Kontextualisierung und die ingenieurtechnische Bewertung der Daten lässt diese zu Informationen werden. Zusätzlich müssen diese (Teil-)Zustände nach einem bestimmten Konzept aggregiert werden, damit ein Gesamtzustand des Assets ersichtlich wird. Sogenannte „Condition Indicators“ übernehmen diese Aufgabe. Die Automatisierung dieser Prozesse ist eine zwingende Voraussetzung für den Digitalen Zwilling ab Reifegrad 2 im Sinne der Definition in [7 Kapitel 3](#). Auf diesen Baustein wird in [7 Kapitel 9](#) genauer eingegangen. Der Übergang von einem informativen zu einem prädiktiven oder präskriptiven Digitalen Zwilling (Reifegrad 2 zu 3 und 4) ist im Wesentlichen von den Fähigkeiten der Datenverarbeitung abhängig.



Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die Verbindung zwischen Nutzer:innen und dem Digitalen Zwilling. Sie hat als sog. „Frontend“ die Anforderung, Daten und Informationen adressatengerecht zur Verfügung zu stellen. In der Regel haben verschiedene Nutzer:innengruppen verschiedene Bedürfnisse an die

Datenaufbereitung und Informationsbereitstellung. Es bietet sich daher an, mehrere Ebenen zur Darstellung von Daten und Informationen zu nutzen. Aggregierte Informationen können in einer intuitiven und fokussierten Visualisierung und detailreiche Rohdaten in einer Expert:innenansicht dargestellt werden. Rohdaten sind unbewertet und erfordern Expert:innenwissen, um daraus weitergehende Zusammenhänge zu analysieren. Aggregierte Informationen werden aus den Rohdaten durch komplexe vordefinierte Algorithmen ermittelt und enthalten bereits eine Bewertung, benötigen also ein geringes Maß an Expertise. Je nach Größe oder Zugänglichkeit des realen Assets können für die Daten- und Informationsvisualisierung auch Technologien aus dem Bereich Virtual Reality (VR) oder Augmented Reality (AR) zum Einsatz kommen. Weiterhin sind Schnittstellen für die Eingabe oder Konfiguration von Daten erforderlich, siehe auch [7 Kapitel 10](#).

Eine Mensch-Maschine-Schnittstelle ist bereits im Reifegrad 1 des Digitalen Zwillings notwendig und kann in der einfachsten Form durch einen Viewer des BIM-Modells (As-Maintained) geschehen. Je nach Reifegrad des Digitalen Zwillings und Anforderungen an die Mensch-Maschine-Schnittstelle kann das „Frontend“ komplexer werden.



Datenintegration und Schnittstellen

Aus [ABB 4.2](#) wird ersichtlich, dass der Digitale Zwilling aus einer Verknüpfung unterschiedlicher Daten und Werkzeuge besteht, weshalb deren Interaktion eine fundamentale Rolle zukommt.

Bei der Integration aller Daten ist darauf zu achten, dass die Daten einen Orts- und Zeitbezug haben und maschinenlesbar sind. Ferner muss unterschieden werden, welche der Daten in den Digitalen Zwilling importiert/kopiert oder direkt erfasst werden (Embedded-Data) und an welchen Stellen die Daten im Ursprungssystem (Entstehungsort der Daten) enthalten bleiben und der Digitale Zwilling nur auf diese verweist (Linked-Data).

Bei letzterem fungiert die Ursprungsquelle der Daten als Single-Source-of-Truth (SSOT). Im Gegensatz zum Datenimport werden die Daten nicht in das System des Digitalen Zwillings kopiert, sondern die Visualisierung stellt die Daten aus Systemen Dritter lediglich dar, ohne sie selbst zu beinhalten – sofern eine eigene Weiterverarbeitung nicht benötigt wird. Dieses Vorgehen kann für bereits hochaggregierte Informationen sinnvoll sein, die nicht weiter aggregiert werden müssen, beispielsweise bei der Integration eines Komponentenzwillings in den

Objektzwilling. Andererseits kann der Datenimport sinnvoll sein, wenn die Ursprungsquelle nicht dauerhaft zur Verfügung steht oder die Daten noch weiterverarbeitet werden sollen.

Neben der Visualisierung sollten außerdem Schnittstellen für weiterführende Systeme (Application Programming Interface – API) enthalten sein. Sie stellen die Anbindung an weiterführende Systeme bzw. Digitale Zwillinge auf Systemebene (ABB 3.4) sicher und gewährleisten damit die Kompatibilität und damit auch die Akzeptanz von Digitalen Zwillingen. Diese Schnittstellen sind Voraussetzung für den flächendeckenden Einsatz von Digitalen Zwillingen – nicht nur auf Infrastrukturebene – und zu deren Integration in gesamthafte Assetmanagement-Prozesse.

Die Datenintegration sowie die entsprechenden Schnittstellen sind für alle Reifegrade relevant. Allerdings steigen die Anforderungen an die Fähigkeit der Datenintegration und der Schnittstellen mit höheren Reifegraden.



Bidirektionaler automatisierter Datenaustausch

Nach der allgemeinen Definition in ABB 3.2 wird für einen Digitalen Zwilling der bidirektionale automatisierte Datenaustausch vorausgesetzt, welcher allerdings für das Asset des Brückenbauwerks in [Kapitel 4.1](#) in den entsprechenden Kontext gerückt wurde. Mit der Bauwerksprüfung, -diagnostik und dem möglichen -monitoring sowie der (in höheren Reifegraden) automatisierten Datenverarbeitung wird der Datenfluss vom physischen Objekt zum Digitalen Zwilling erreicht. Die automatische Rückkopplung kann bei geringem Reifegrad des Digitalen Zwillingen beispielsweise über die Auslösung einer ereignisbezogenen Sonderinspektion oder bei höherem Reifegrad über sofortige und automatische Eingriffe in den Straßenverkehr (Sperrung von einzelnen Spuren oder ganzen Streckenabschnitten) erfolgen.

Dieser bidirektionale Datenaustausch ist kein zwingender Bestandteil des Digitalen Zwillingen im Reifegrad 1, kann dort allerdings bereits (nicht automatisiert) erfolgen.



Weitere (Datenquellen)

Grundsätzlich können beliebige weitere Datenquellen in den Digitalen Zwilling integriert und vernetzt werden, sofern sie zustandsrelevante Daten enthalten und/oder in Kombination mit anderen Datenquellen zu aufschlussreichen Informationen für die

Erhaltung des Bauwerks verarbeitet werden können. Um einige Beispiele zu nennen seien Satellitenbilder, Fahrzeug- oder Smartphone-Daten genannt, die z. B. zur Ermittlung der Verkehrsauslastung oder zur Bewertung des Fahrbahnbelagszustands herangezogen werden können [Bednorz et al., 2021].

Wetterdaten von benachbarten Messstationen oder weitere Fremddaten können im Digitalen Zwilling integriert werden, um redundante Installationen am eigenen Bauwerk zu vermeiden. Diese Daten werden auf „Data Marketplaces“ zur Verfügung gestellt und können für weitere Zwecke genutzt werden. Der Handel mit Daten wird perspektivisch deutlich an Bedeutung gewinnen und wird für die Entwicklung Digitaler Zwillinge und für die Erweiterung Ihrer Funktionalitäten von großer Bedeutung sein, siehe auch [Kapitel 11](#).

Als wichtige Datenquellen seien ebenfalls die Planungs- und Ausführungsphase eines Bauwerks genannt. An dieser Stelle entstehen sehr viele für den späteren Betrieb des Bauwerks relevante Daten, die derzeit noch nicht nachhaltig vorgehalten werden. Dazu gehören Protokolle zum Bauablauf, Betonagezeitpunkte, Prüf- und Materialprotokolle und Bewehrungsaufmaße, um nur einige zu nennen. Die Integration in den Digitalen Zwilling hilft bei der späteren Interpretation des Tragwerksverhaltens – Schadensursachen können leichter nachvollzogen werden.

Je nach Anwendungsfall und Datenart sind diese bereits Bestandteil eines gut gepflegten BIM-Modells und damit ebenfalls im Digitalen Zwilling enthalten. Jedoch kann nicht verallgemeinert werden, welche weiteren Datenquellen für welchen Reifegrad notwendig werden. Dies erfordert im Zweifel eine Einzelbetrachtung.

3 – Ausgangsbasis BIM-Methodik: Definition, Anwendung im Lebenszyklus und Übergang zum Digitalen Zwilling

Definition BIM-Methode und BIM-Modell

Die BIM-Methode ist eine kooperative Arbeitsmethode, bei der auf Basis digitaler Bauwerksmodelle die für den gesamten Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben

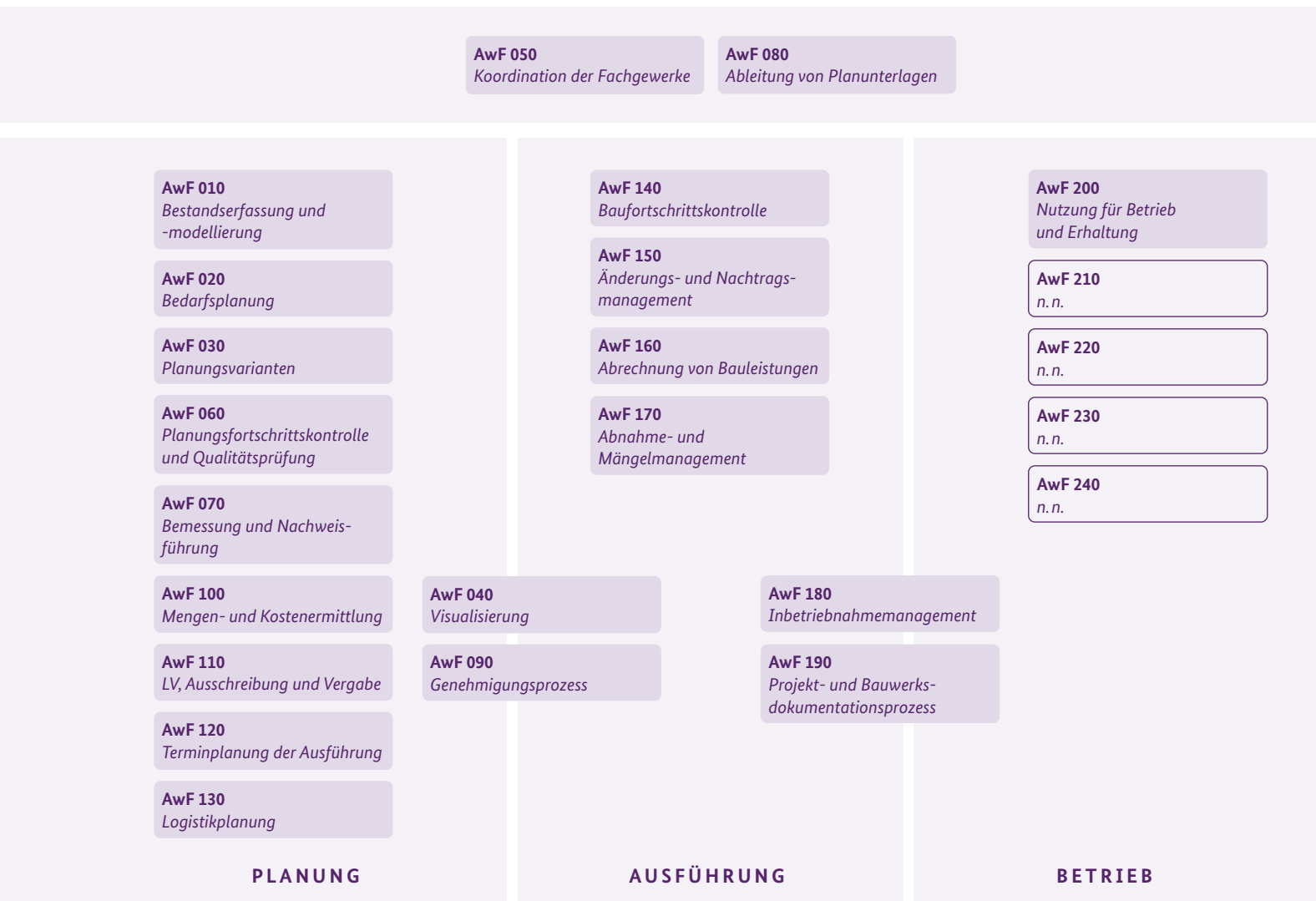


ABB 4.3 Liste der harmonisierten BIM-Anwendungsfälle und Aufteilung in die Lebenszyklusphasen eines Bauwerks

werden [BMVI Stufenplan, 2015]. Entsprechend dieser Definition und den Ausführungen im *Masterplan BIM Bundesfernstraßen* [BMVI Masterplan, 2021] ist BIM eine Methode, welche sich über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks von der Entwicklung über die Planung, die Erstellung, die Nutzung bis zum Rückbau erstreckt. Hierfür werden je nach Anforderung entsprechende BIM-Anwendungsfälle definiert, welche die zu erbringenden Leistungen im Kontext der jeweiligen Zielstellung beschreiben.

Generell sollte zwischen der BIM-Methode und dem BIM-Modell unterschieden werden. Das Erstellen und Verwenden von BIM-Modellen ist nicht mit dem Einsatz der BIM-Methode gleichzusetzen. Kern der Methode ist die kooperative Arbeitsweise, die sich durch die Kommunikation und das Datenmanagement in einer gemeinsamen Datenumgebung auszeichnet. Die BIM-Modelle sind in vielen der Anwendungsfälle die Grundlage bzw. ein Produkt der Methode. Ferner wird ein 3D-Modell erst

dann zu einem BIM-Modell, wenn es mit semantischen Informationen angereichert wird.

In der Ergänzung zu den Rahmendokumenten des *Masterplan BIM Bundesfernstraßen* [BMVI Masterplan, 2021] und der „Liste der standardisierten Anwendungsfallbezeichnungen“ wird eine Übersicht über die bisher abgestimmten und harmonisierten Anwendungsfälle (AwF) gegeben, siehe ABB 4.3.

Aktueller Übergang der BIM-Modelle von der Planung und Ausführung zum Betreiben und Erhalten

Die BIM-Methode soll den kompletten Lebenszyklus abbilden. Wie die harmonisierte Liste der Anwendungsfälle jedoch zeigt, lag der Fokus der Standardisierung bisher eher auf den Lebenszyklusphasen des Planens und Bauens. So wurden in den meisten der bisherigen BIM-Pilotprojekte die Anwendungsfälle dieser Lebenszyklusphasen erprobt und umgesetzt. Gerade im Kontext des Digitalen Zwillings ist der AwF190 „Projekt- und Bau-

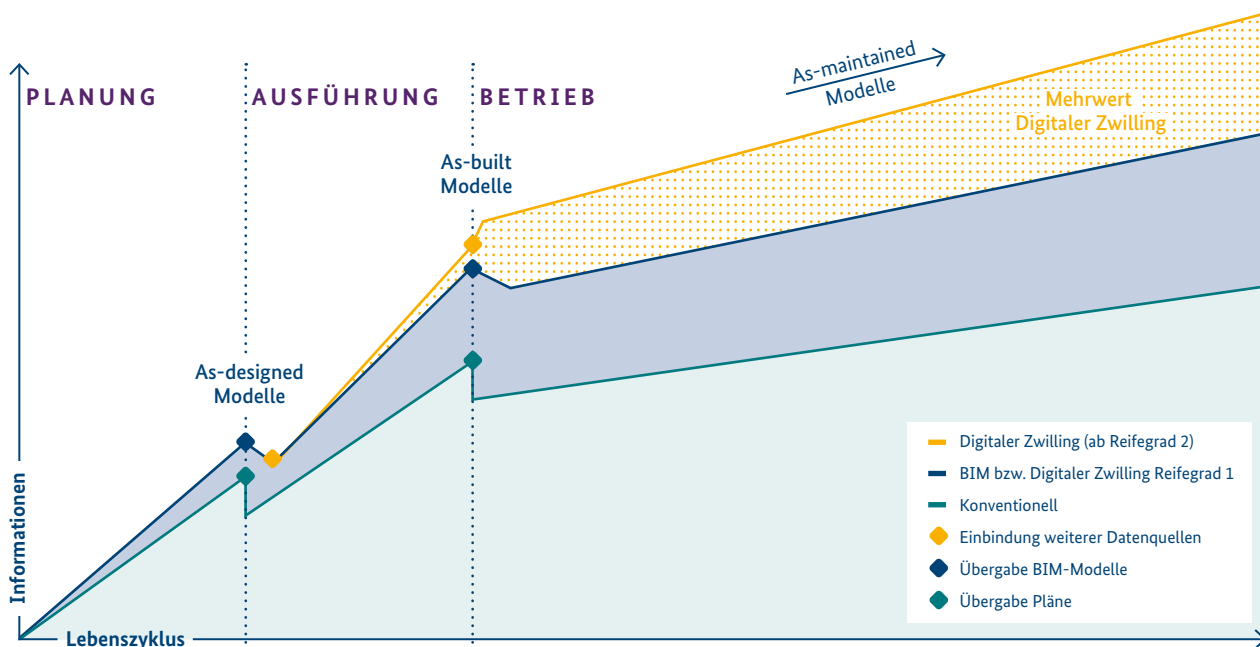


ABB 4.4 Informationsweitergabe zwischen Lebenszyklusphasen eines Bauwerks und Darstellung des Mehrwerts durch den Digitalen Zwilling, Vorschlag in Anlehnung an [Zinke et al., 2022]

werksdokumentation“ ein essenzieller Anwendungsfall. Hier entstehen die BIM-Modelle, welche die Grundlage für die Betriebsphase und für den Digitalen Zwilling darstellen. Diese BIM-Modelle bilden den „Wie-Gebaut“- bzw. „As-Built“-Zustand ab. Neben der Geometrie beinhalten die As-Built-Modelle detaillierte Informationen zur Ausführung, z. B. verwendete Materialien und Produkte sowie ggf. Verweise auf Prüfprotokolle und weitere Dokumente (Digitale Bauwerksakte). Entsprechend der oben dargestellten Liste der AwF soll die längste Lebenszyklusphase eines Bauwerks „Betreiben und Erhalten“ bislang über den einzigen AwF200 umgesetzt werden. Derzeit finden allerdings entsprechende Entwicklungen statt, die die Betriebsphase in weitere AwF unterteilt, wie ABB 4.3 bereits andeutet. Unter anderem wird sich beispielsweise einer dieser Anwendungsfälle mit dem Einsatz der BIM-Methode bei der Zustandserfassung beschäftigen (aktueller Forschungsgegenstand). Der Übergang in die Anwendungsfälle AwF200 und höher stellt den Übergang zum Digitalen Zwilling im Reifegrad 1 dar.

Entsprechend der Implementierungsstrategie des *Masterplan BIM Bundesfernstraßen [BMVI Masterplan, 2021]* (siehe auch ABB 1.6) soll die BIM-Methode ab 2025 über ein dreistufiges Phasenmodell in den Regelprozess übergehen und bildet damit eine essenzielle Grundsteinlegung für die flächendeckende Erstellung von Digitalen Zwillingen.

Übergang BIM-Modell zu Digitaler Zwilling

Während in der Einleitung dem Leser das Zukunftsbild des Digitalen Zwillingen nähergebracht wurde, soll nachfolgend beschrieben werden, wie zukünftig eine direkte/simple Überführung aus dem BIM-Modell in einen Digitalen

Zwilling mit hohem Reifegrad vorstellbar ist. Im Sinne des Dokumentes stellen BIM-Modelle die Grundlage für den Digitalen Zwilling dar (bis AwF190) bzw. bilden diesen bereits bei Reifegrad 1 (ab AwF200). BIM-Modelle dienen einerseits als eine Datenquelle zur Bereitstellung von Daten aus den Phasen Planen und Bauen, andererseits sind die BIM-Modelle eine essenzielle Grundlage zur Verortung von Informationen aus weiteren Datenquellen.

Wie ABB 4.4 zeigt, ist es ein Ziel der BIM-Methode, den Informationsverlust zwischen den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen zu minimieren und einen strukturierten Informationszuwachs zu gewährleisten. Die geometrischen und semantischen Informationen werden von Projektbeginn an so erfasst, dass sie auch in den folgenden Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen weiterverwendet werden können. So werden beispielsweise die Baustoffinformationen in der Planungsphase so erfasst, dass sie in der Ausführungsphase nur ergänzt oder aktualisiert werden. Im aktuellen Umgang mit BIM steht im Ergebnis der Planungs- und/oder Bauphase das 3D-Bauwerksmodell, das mit verschiedenen semantischen Informationen angereichert ist. Das Modell selbst besitzt dann jedoch nur Basisdaten über das Bauwerk und noch keine weitergehenden Informationen zu seinem Zustand. Der Übergang des Modells zwischen den Lebenszyklusphasen bzw. in die Betriebsphase ist in der Standardisierung und Entwicklung noch nicht so weit fortgeschritten wie in den anderen Lebenszyklusphasen, (ABB 4.3). Mit der Überführung eines As-Built-Modells zu einem As-Maintained-Modell entsteht ein Digitaler Zwilling im Reifegrad 1. Da der Aktualisierungsprozess des Modells manuell bleibt, wird aber weiterhin nur der Zustand zu bestimmten diskreten Zeitpunkten abgebildet.

Ein Digitaler Zwilling in einem hohen Reifegrad (ab 2) hat hingegen die Aufgabe und den Anspruch, die zustandsrelevanten Prozesse abzubilden und damit jederzeit einen aktuellen und objektiven Bauwerkszustand bereitzustellen. Da die Änderungs- bzw. Aktualisierungsrate eines reinen BIM-Modells gering ist und Anpassungen in der Regel manuell ablaufen, wird das reine BIM-Modell in Form des As-Maintained-Modells diesen Anforderungen nicht gerecht. Dafür muss es automatisiert mit weiteren informationsgebenden Prozessen verknüpft sowie relevante Daten aggregiert werden, um so zu einem Digitalen Zwilling mit hohem Reifegrad zu reifen, siehe auch [7 Kapitel 4.1](#).

Im Rahmen des Dokumentes zielt der Digitale Zwilling auf die Betriebsphase ab. Jedoch beginnt die Initiierung des Digitalen Zwillings bereits in der Planungs- und Ausführungsphase, weil die BIM-Modelle und Informationen aus diesen Phasen – im Ergebnis im As-Built Modell zusammengefasst – im späteren System genutzt werden sollen.

Um diese Ziele zu erreichen, ist noch viel Entwicklungs- und Standardisierungsarbeit für den Digitalen Zwilling, aber auch für den Einsatz der BIM-Methode zu leisten. Es muss unter anderem die Umsetzung der Anwendungsfälle aller Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen aufeinander abgestimmt werden – nur so kann ein hoher Automatisierungsgrad erreicht und der Informationsverlust minimiert werden.

4 – Akteure und Prozesse für die Erstellung von Digitalen Zwillingen

Ein interdisziplinäres Team und ein neuer Prozess

Für den aktuellen Erhaltungsprozess von Brücken im Generellen sind übergeordnete und allgemeingültige Regelwerke vorhanden ([7 Kapitel 2](#)). Durch die zukünftige Weiterentwicklung des Erhaltungsmanagements mit Hilfe von Digitalen Zwillingen müssen diese Regelwerke angepasst werden. Eine wesentliche Grundlage dafür ist die Identifizierung der Akteure sowie die Definition einer Prozessabfolge zur Erstellung und zum Betrieb von Digitalen Zwillingen.

Die Umsetzung von Digitalen Zwillingen setzt die Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen voraus. Die komplexen Zusammenhänge und die Vielzahl an fachspezifischen Teilaufgaben erfordert die Beteiligung vieler Akteure in einem Projektteam.

Bislang ist der Erstellungs- und Betriebsprozess von Digitalen Zwillingen noch kein etabliertes Verfahren. Die erfolgreiche Umsetzung eines Digitalen Zwillings ist aber maßgebend von einem strukturierten Ablauf abhängig, in dem klare Phasen definiert, die Leistungsbilder zwischen den verschiedenen Akteuren aufgeteilt und die Schnittstellen sowie Anforderungen an die verschiedenen Datenquellen zur Sicherstellung der Interoperabilität des Systems eindeutig sind.

Im Folgenden werden aus den bisherigen Erfahrungen des Autor:innen-Teams eine Aufstellung der Akteure sowie eine mögliche Strukturierung des Prozesses vorgestellt. Dieser in [ABB 4.5](#) grafisch aufbereitete Vorschlag dient als Ausgangspunkt und soll im Anschluss an die verschiedenen digitalen Testfelder (vgl. [*BMVI Masterplan, 2021*]) aktualisiert werden. Die Zusammenstellung der Akteure und der Ablauf sollen hier möglichst allgemein präsentiert werden. Je nach Projektgröße und -bedeutung sowie Reifegrad des Digitalen Zwillings können auch kleinere Teams und die Bündelung von Rollen bei einzelnen Akteuren in Betracht kommen.

Die Erstellung von Digitalen Zwillingen für Infrastrukturbauwerke ist somit eine neue interdisziplinäre Aufgabe. Die erforderlichen Teilaufgaben sind derart fachspezifisch, dass die neuen Prozesse – zumindest in der Einführungsphase des Digitalen Zwillings – nicht gänzlich durch Behörden übernommen werden können. Stattdessen sind externe Fachleute zur Koordinierung und Umsetzung der neuen Aufgaben heranzuziehen. Rollen und Verantwortungen müssen anhand der neuen Verhältnisse festgelegt werden. Nicht zuletzt müssen neue fachliche Anforderungen (z. B. an Datenqualität und -souveränität, [7 Kapitel 11](#)) definiert werden.

Die derzeit typischen Vergabemöglichkeiten für Ingenieur- oder Bauleistungen können diesen neuen Entwicklungen noch nicht Rechnung tragen und sind deshalb i. d. R. ungeeignet, um solche Leistungen auszuschreiben und zu vergeben. Der im Folgenden vorgestellte Prozess kann durch eine zweckmäßige und geeignete Leistungsbeschreibung eine wichtige Grundlage für die künftige Ausschreibung und Vergabe sein. Mit zunehmender Erfahrung können daraus entsprechende Standards entwickelt werden, um Diskrepanzen zwischen Erwartungswert der Auftraggeber:innen und erbrachter Leistung zu reduzieren, um hochwertige Digitale Zwillinge zu erzeugen und damit einen wesentlichen Beitrag bei der Optimierung des Erhaltungsmanagements von Brücken zu leisten.

PROZESS

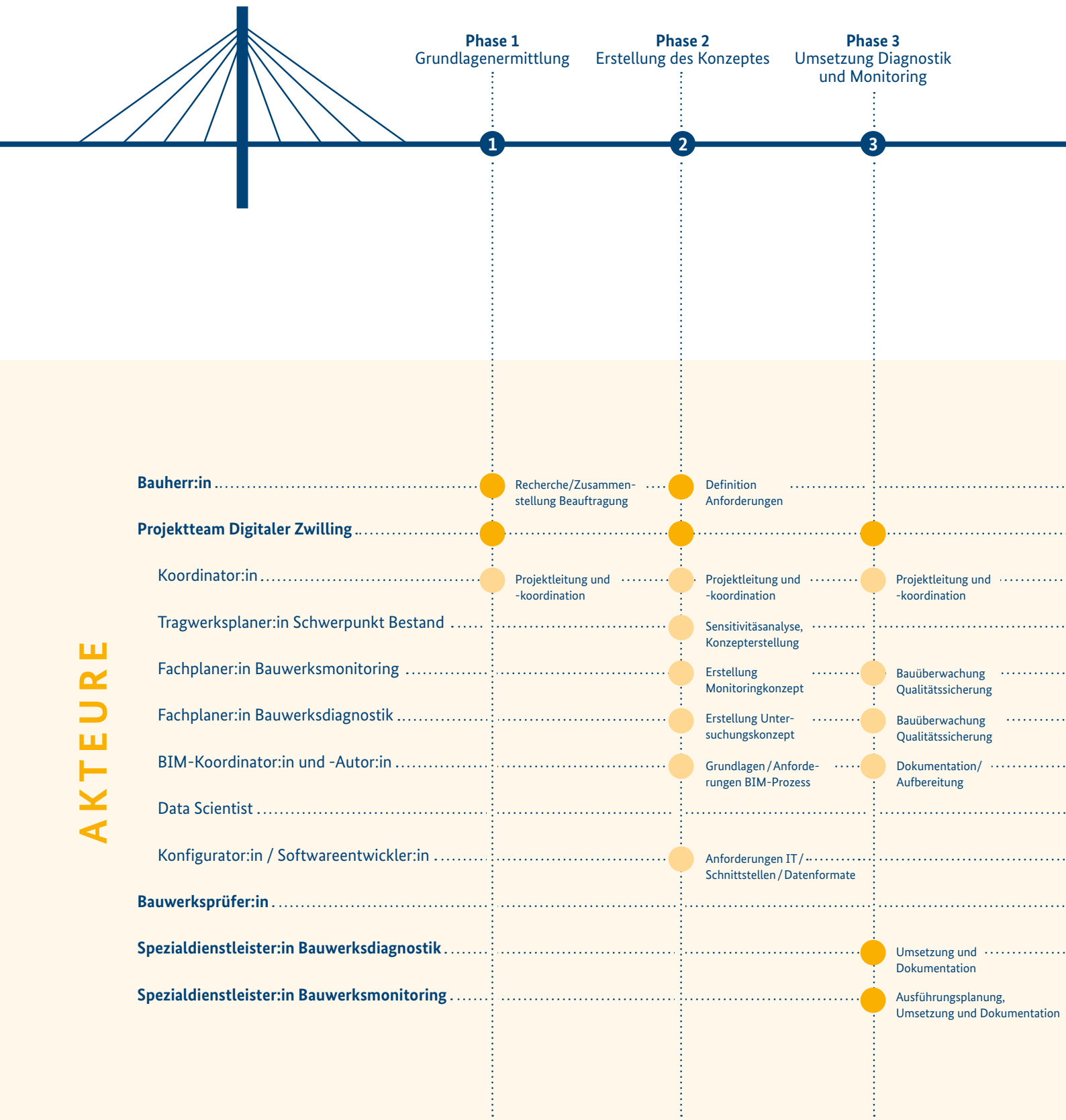
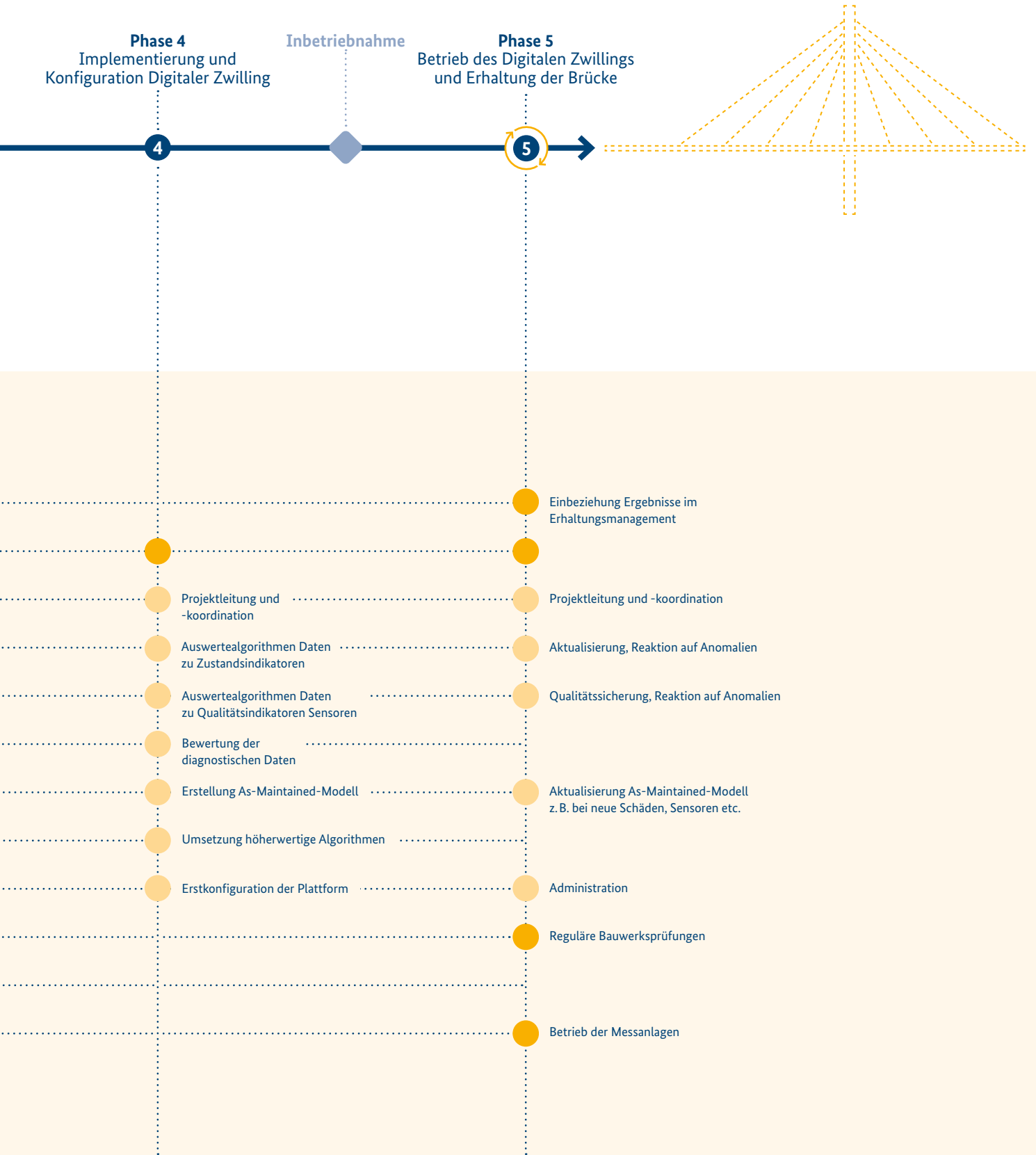


ABB 4.5 Prozesse und Akteure für die Erstellung von Digitalen Zwillingen

Phase 4
Implementierung und
Konfiguration Digitaler Zwilling

Inbetriebnahme

Phase 5
Betrieb des Digitalen Zwillings
und Erhaltung der Brücke



4.1 – Die Akteure

Bauherr:in

Bei Bundesfernstraßen ist der/die Bauherr:in Eigentümer:in des Bauwerks und Baulastträger:in. Er/sie ist somit für die Planung, den Bau, den Betrieb und den Erhalt des Bauwerks zuständig.

Die Straßenbaulast für die Bundesfernstraßen trägt in der Regel der Bund. Bauherr:in im Sinne dieses Dokumentes mit dem Fokus auf die Nutzungsphase der Brücken sind die Autobahn GmbH und die Auftragsverwaltungen der Länder, denen die Verwaltung der Bundesautobahnen resp. der Bundesstraßen obliegt.

Ein Digitaler Zwilling ist für Bauherr:innen unter anderem ein Werkzeug des Erhaltungsmanagements. Der/die Bauherr:in gibt die Erstellung und den Betrieb des Digitalen Zwillings in Auftrag. Er/sie definiert i. d. R. mit dem „Projektteam Digitaler Zwilling“ die Anforderungen für die Umsetzung des Projektes, u. a. den notwendigen Reifegrad des Digitalen Zwillings.

Projektteam Digitaler Zwilling

Die Vorbereitung, Konzeption, Erstellung und der Betrieb eines Digitalen Zwillings sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine bauwerksspezifische und interdisziplinäre Aufgabe. Ziel dieses Dokumentes ist es u. a., den/die Bauherr:innen zu befähigen, Digitale Zwillinge umsetzen zu lassen. Deshalb wird es als zielführend erachtet, dem/der Bauherr:in ein kompetentes Team als zentrale Anlaufstelle für die o. g. Aufgaben zu benennen (anstatt aller einzelnen Akteure). Das Auftragsverhältnis kann ähnlich einer Arbeitsgemeinschaft (ARGE) definiert werden. Die Organisation der Aufgaben erfolgt im Projektteam. Die einzelnen Rollen im Projektteam werden nachfolgend vorgestellt. Das Projektteam besitzt Aufgaben über den kompletten Prozess (ABB 4.5). Je nach Reifegrad des zu erstellenden Digitalen Zwillings können die Akteure im Projektteam variieren.

Koordinator:in

Der/die Koordinator:in spielt die Rolle des/der technischen Projektleiter:in und koordiniert die Aufgaben im Projektteam prozessübergreifend. Er/sie ist zentrale/r Ansprechpartner:in für den/die Bauherr:in und für die weiteren Akteure. Ein/e Koordinator:in kennt den Prozess und die einzelnen Aufgaben und hat technische Grundkenntnisse zum Erhalt von Ingenieurbauwerken. Der Kern seiner/ihrer Kompetenz bezieht sich auf das Projektmanagement.

BIM-Koordinator:in und -Autor:in

Basis des Digitalen Zwillings sind BIM-Modelle. Zur Definition der Anforderungen an die BIM-Modelle und an den BIM-Prozess, zur Erstellung und Pflege von Fachmodellen oder zur Koordination der Modelle spielen mehrere BIM-Akteure eine Rolle im Prozess des Digitalen Zwillings.

Die Anforderungen und Grundlagen im BIM-Prozess sind projektbezogen zu definieren und werden bereits in der Phase 2 durch den/die BIM-Koordinator:in in Abstimmung mit dem BIM-Management auf Seite der Auftraggeber:innen in den AIA definiert, siehe ABB 4.5.

Ab der Phase 3 sind diverse Fachmodelle zu erstellen. Ein/e BIM-Autor:in besitzt die Fertigkeit zur Erstellung von BIM-konformen Fachmodellen von Infrastrukturbauwerken. Grundsätzliches Ziel ist es, die Fachmodelle für die Nutzung in der Betriebsphase der Brücke im Hinblick auf die Verwendung im Digitalen Zwilling entsprechend den jeweiligen Anforderungen zu erstellen, anzupassen bzw. zu erweitern, siehe dazu [7 Kapitel 5.2](#). Die Aufgabe kann vereinfachend als Erstellung und Pflege des As-Maintained-Modells beschrieben werden.

Die Basis für die BIM-Modelle sind objektbasierte 3D-Modelle des Bauwerks. Die Grundlage dafür kann sehr unterschiedlich sein: entweder können vorhandene BIM-Modelle übernommen werden, oder es sind Modelle aus Plänen oder beispielsweise aus einer Punktwolke zu erstellen. Die Fertigkeiten des/der BIM-Autor:in müssen sich nach den spezifischen Projektanforderungen richten. Falls erforderlich sind weitere Akteure im Prozess einzubinden, z. B. Dienstleistende der Mobile-Mapping-Systeme.

Neben der Erstellung der Basis-Modelle gehören auch die Erstellung und Pflege der weiteren Fachmodelle (Monitoring, Schäden, Diagnostik, [7 Kapitel 5](#)) zum Aufgabenspektrum des/der BIM-Autor:in. Die Fachmodelle zur Dokumentation der Sensoren und der diagnostischen Untersuchungen können in der Phase 3 im „Projektteam Digitaler Zwilling“ oder direkt von den Spezialdienstleister:innen Monitoring und Bauwerksdiagnostik erstellt werden. Dies trifft auch für die Implementierung der Schäden im jeweiligen Fachmodell zu, die ggf. direkt durch den/die Bauwerksprüfer:in in Phase 5 erfolgen kann. Die konkrete Aufgabenverteilung wird in Phase 2 in den AIA festgelegt. Darüber hinaus sind die Koordinierung und Zusammenführung der verschiedenen Fachmodelle weitere Aufgaben des/der BIM-Koordinator:in.

Bauwerksprüfer:in

Ein Digitaler Zwilling kann und soll die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 nicht ersetzen, denn sie ist mit ihren Prüfergebnissen und Dokumentationen von Schäden die wichtigste Informationsquelle für die Instandhaltung und damit auch für den Digitalen Zwilling. Sie erfolgt durch den/die Bauwerksprüfer:in und wird für Brücken des Bundesfernstraßennetzes nach den in [7 Kapitel 2](#) aufgeführten Regelwerken durchgeführt. Die konkreten Aufgaben des/der Bauwerksprüfer:in werden im [7 Kapitel 6](#) detailliert aufgeführt. Dort wird auch darauf eingegangen, wie sich das Aufgabenspektrum der Bauwerksprüfer:innen in Zukunft durch den Digitalen Zwilling ändern wird. Grundsätzlich fokussiert sich deren Leistung auf die Phase 5 gem. [ABB 4.5](#).

Tragwerksplaner:in Schwerpunkt Bestand

Ein Digitaler Zwilling ist ein Werkzeug zur Verbesserung des Verständnisses des Bauwerksverhaltens und zur Erfassung des aktuellen Bauwerkszustands (in höheren Reifegraden). Für Digitale Zwillinge mit einem Reifegrad höher 1 ist eine wesentliche Komponente im Projektteam demnach das statisch-konstruktive Verständnis für das physische Bauwerk. Diese Fertigkeiten weisen in der Regel Tragwerksplaner:innen auf, die sich auf den Bestand spezialisiert haben. Die Aufgabe unterscheidet sich deutlich von der Bemessung im Neubau. Die Aufgaben bestehen in der möglichst realitätsnahen Beurteilung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit anhand aller vorliegenden Informationen. Ein/e Tragwerksplaner:in führt eine bauwerksspezifische Sensitivitätsanalyse durch, in der kritische Bauteile, Konstruktionsdetails und Degradationsprozesse identifiziert werden. Daraus leitet er/sie mit den Fachplaner:innen Monitoring und Diagnostik ab, ob ergänzende sensorbasierte Überwachungsmethoden oder bauwerksdiagnostische Untersuchungen durchzuführen sind. Ziel ist es, die Zustandsbewertung zu präzisieren oder die vorhandenen Defizite zu kompensieren. Der Umgang mit den Daten im Hinblick auf die Bewertung des Zustands erfordert z. B. Kenntnisse über die Hintergründe der Nachweise und über die Sicherheitstheorie im Bauwesen, Kenntnisse zur Statistik und zur Einbindung der Ergebnisse in Simulationen. Die Auswertung erfolgt zusammen mit dem/der Data Scientist.

Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik

Neben den Ergebnissen aus der Bauwerksprüfung und dem Bauwerksmonitoring können auch ergänzende bauwerks-

diagnostische Untersuchungen (im Sinne der Definition [7 Kapitel 8.1](#)) erforderlich werden, um den aktuellen Bauwerkszustand zu bewerten. Die Planung und die Durchführung der dafür notwendigen Untersuchungen werden durch eine/n Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik übernommen.

Der/die Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik besitzt umfangreiche Kenntnisse in der Bewertung des Ist-Zustands von vorhandener Bausubstanz, in der Analyse der verbauten Baustoffe und deren Eigenschaften.

Der/die Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik erfasst Schäden und beschreibt deren Ursachen, [7 Kapitel 8](#). Er/sie kennt die verschiedenen zerstörungsfreien oder zerstörungssarmen Prüfmethode, deren Einsatzgebiete und -grenzen sowie den Umgang mit deren Ergebnissen im Hinblick auf die Zustandsbewertung.

Ähnlich zum Bauwerksmonitoring arbeitet der/die Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik in der Konzeptionsphase Hand in Hand mit dem/der Tragwerksplaner:in zur Herausarbeitung von Erfordernissen, Umfang und Anforderungen an bauwerksdiagnostische Untersuchungen. Diese Anforderungen münden in einem detaillierten Untersuchungskonzept.

I. d. R. werden umfangreiche bauwerksdiagnostische Untersuchungen ausgeschrieben, sodass die Erstellung einer Ausschreibung Bestandteil der Leistung des/der Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik sein kann. Fokus der Ausschreibung ist die Definition von klaren Schnittstellen, sodass die Ergebnisdaten direkt im Digitalen Zwilling aufgenommen werden können ([7 Kapitel 8.2](#)). Dies erfolgt zusammen mit BIM-Koordinator:in und BIM-Manager:in. Ggf. fungiert der/die Fachplaner:in als Qualitätsüberwachende/r bei der Umsetzung und Dokumentation der Leistungen des/der Spezialdienstleister:in Bauwerksdiagnostik. In der Phase 4 übernimmt der/die Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik die Bewertung der Ergebnisse und zusammen mit dem/der Tragwerksplaner:in die Übertragung der Daten in die Aggregationsprozesse.

Fachplaner:in Bauwerksmonitoring

Digitale Zwillinge ab einem Reifegrad 2 ([7 Kapitel 3](#)) nutzen sensorische Messdaten. Die Erstellung der dafür nötigen Monitoringkonzepte übernimmt der/die Fachplaner:in Monitoring. Gemäß *[DBV Monitoring, 2018]* besitzt der/die Fachplaner:in Monitoring neben der fachlichen Expertise zur Konstruktion vor allem die Grundlagen der Messtechnik und der Datenverarbeitung.

In der Konzeptionsphase arbeitet der/die Fachplaner:in Monitoring Hand in Hand mit dem/der Tragwerksplaner:in zur Herausarbeitung des Erfordernisses und der Anforderungen an sensorbasierte Überwachungsmethoden. Im Detail besteht die Aufgabe des/der Fachplaner:in Monitoring in der Definition der geeigneten Messverfahren, des richtigen Sensorlayouts, der Anforderungen an die Sensoren, deren Umsetzung und an die Datenerfassung. Diese Informationen finden Eingang in das Monitoring-Konzept, s. a. Merkblatt [DBV Monitoring, 2018].

I. d. R. werden Monitoring-Leistungen ausgeschrieben – eine weiterführende Leistung des/der Fachplaner:in Monitoring kann die Erstellung von Ausschreibungsunterlagen sein. Der Fokus liegt darauf, die Anforderungen so festzulegen, dass die Dokumentation des Messsystems und die Daten mit den Schnittstellen des Digitalen Zwillinges kompatibel sind und dort direkt weiterverarbeitet werden können. Während der Umsetzung des Messsystems übernimmt der/die Fachplaner:in Monitoring die Funktion der Qualitätssicherung (ABB 4.5). Darüber hinaus unterstützt ein/e Fachplaner:in Monitoring eine/n Tragwerksplaner:in in der Phase 4 bei der Bewertung der Daten aus messtechnischer Sicht und bei der Implementierung von Algorithmen zur automatischen Analyse der Datenqualität.

Data Scientist

Wenn ein umfangreiches Monitoring Daten für den Digitalen Zwilling liefert, können große und heterogene Datenmengen entstehen. Die Auswertung der Daten im Hinblick auf die Datenqualität obliegt dem/der Fachplaner:in Monitoring. Die Auswertung der Daten im Hinblick auf den Zustand des Bauwerks obliegt dem/der Tragwerksplaner:in. Da die Auswertung großer Datenmenge auch eine eigene Disziplin ist, kann es empfehlenswert sein, eine/n Data Scientist im Projektteam aufzunehmen, falls diese Fertigkeiten nicht von den beiden zuvor genannten Akteuren aufgewiesen werden.

Der/die Data Scientist bringt weitere Fertigkeiten mit, sodass der gewinnbringende Einsatz von komplexen Algorithmen, zum Beispiel basierend auf Künstlicher Intelligenz und Machine Learning sowie deren Programmierung die Kompetenzen des Projektteams im Hinblick auf die Realisierung eines leistungsstarken Digitalen Zwillinges ergänzt. Durch unterschiedliche Datenvisualisierungsmethoden kann der/die Data Scientist die Informationsgewinnung anhand der Daten auf ein höheres Qualitätsniveau bringen.

Konfigurator:in / Softwareentwickler:in

Ein Digitaler Zwilling besteht aus einer Verknüpfung verschiedener Datenquellen, aus verschiedenen Auswertewerkzeugen und Visualisierungsoberflächen. Derzeit sind keine übergreifenden Softwareprodukte auf dem Markt, die allen Anforderungen des Digitalen Zwillinges gerecht werden, sodass noch eigene Lösungen entwickelt werden müssen. In dieser Phase der Entwicklung und Etablierung des Digitalen Zwillinges sind Softwarearchitekt:innen und Softwareentwickler:innen gefragt, die in Zusammenarbeit mit dem Projektteam und in Abstimmung mit dem/der Bauherr:in eine Plattform erstellen. Mittelfristig werden aber solche Plattformlösungen am Markt verfügbar sein (↗ Kapitel 10 und ↗ Kapitel 11).

Nichtsdestotrotz bleiben Bauwerke und folglich Digitale Zwillinge Unikate. Der/die Konfigurator:in ist IT-Spezialist:in und übernimmt die Aufgabe der Erstkonfiguration des Digitalen Zwillinges auf der Plattform, sodass alle Bestandteile eingebunden und die Abläufe automatisiert werden können. Er/sie wirkt bereits in der Konzeptionsphase mit, um die Anforderungen an die Datenformate, Schnittstellen usw. zu definieren. Er/sie unterstützt die weiteren Projektteam-Mitglieder in der Konfiguration und der Programmierung einzelner Funktionen, sodass diese in der Plattform eingebunden und in die automatischen Prozesse verlässlich integriert werden. Er/sie konfiguriert und administriert die IT-Landschaft (z. B. Cloud-Dienste). In der Phase des Betriebs (Phase 5) übernimmt der/die Konfigurator:in Aufgaben der Pflege und der Administration. Die verschiedenen Anforderungen an die IT-Infrastruktur und an das Datenmanagement sind im ↗ Kapitel 11 zusammengefasst.

Spezialdienstleister:in Bauwerksmonitoring

Gem. [DBV Monitoring, 2018] ist der/die Spezialdienstleister:in Monitoring ein/e Anbieter:in, welche/r über vertieftes Fachwissen und Praxiserfahrung auf dem Gebiet der Messtechnik sowie des Aufbaus und Betriebs von Messanlagen verfügt. Er/sie setzt das im Zuge der Phase 2 erstellte Monitoringkonzept unter Einhaltung der dort definierten Anforderungen um, betreibt das Messsystem und liefert Messdaten. Die Anforderungen an die Datenqualität sind sehr hoch. Der/die Spezialdienstleister:in Monitoring erstellt eine vollständige Dokumentation des Messsystems zur Einbindung in den Digitalen Zwilling, ggf. übernimmt er/sie auch die Erstellung des zugehörigen BIM-Fachmodells, vgl. Akteur BIM-Autor:in.

Neben den reinen Messdaten übermittelt er/sie auch weitere Metriken zur Überwachung des Zustands des Messsystems selbst und zur Nachvollziehung von Änderungen am System. Alle Daten werden im vereinbarten Format an die definierte Schnittstelle für die reibungslose Einbindung in die weiteren Prozesse übermittelt.

Spezialdienstleister:in Bauwerksdiagnostik

Der/die Spezialdienstleister:in Bauwerksdiagnostik ist ein/e Anbieter:in, welche/r auf die Durchführung zerstörungssarmer und zerstörungsfreier Untersuchungen spezialisiert ist. Er/sie setzt das im Zuge der Phase 2 erstellte Untersuchungskonzept unter Einhaltung der dort definierten Anforderungen um. Er/sie stellt die Ergebnisse in der definierten Form zusammen, sodass diese reibungsfrei in den Digitalen Zwilling integriert werden können. Ggf. übernimmt der/die Spezialdienstleister:in Bauwerksdiagnostik auch die Erstellung des zugehörigen BIM-Fachmodells, vgl. Akteur BIM-Autor:in.

4.2 – Der Prozess

Der Prozess wurde in 5 aufeinanderfolgende Phasen unterteilt, die nachfolgend vorgestellt werden (ABB 4.5). Grundsätzlich ist die Bandbreite der nachfolgend beschriebenen Arbeiten je Prozessschritt deutlich mit Blick auf die Erstellung eines Digitalen Zwillings ab Reifegrad 2 beschrieben.



Phase 1: Grundlagenermittlung

Die Notwendigkeit bzw. der Wunsch der Erstellung eines Digitalen Zwillings zusammen mit der Festlegung des zu erbringenden Reifegrades wird vor Beginn der Phase 1 vorausgesetzt. Grundlage für die Erstellung eines Digitalen Zwillings sind möglichst alle vorhandenen relevanten Bestands- und Zustandsinformationen des Bauwerks. In der Phase 1 werden durch den/die Bauherr:in Informationen, die für die Erstellung des Digitalen Zwillings eine Rolle spielen, zusammengestellt. Das sind beispielsweise Bestandspläne, Bestandsstatiken, Nachrechnungen, Bauwerksbücher, die *SIB-Bauwerke*-Datenbank, Gutachten, Informationen zu Verstärkungen, BIM-Modell(e). Diese Informationen sind Basis der folgenden Phase 2.

Bei älteren Bestandsbauwerken kann diese Phase durch die Anzahl an Dokumenten, die über die Lebensdauer entstanden sind, die fehlende Digitalisierung und die fehlende Strukturierung der Datenablage sehr auf-

wendig sein. Bei Neubauten, die nach den aktuellen Vorgaben geplant und hergestellt wurden [BMVI Masterplan, 2021], fällt diese Phase deutlich schlanker aus, da die meisten Informationen bereits im BIM-Modell vorgehalten werden.



Phase 2: Erstellung des Konzeptes

Die Realisierung eines Digitalen Zwillings im Sinne des [Kapitel 4.2](#) erfordert ein zielgerichtetes und inhaltlich schlüssiges Konzept. Dieses wird im Projektteam in der Phase 2 erstellt (ABB 4.5). Nachfolgend werden speziell für Digitale Zwillinge ab Reifegrad 2 notwendige Prozesse beschrieben. Eine Grundlage ist die detaillierte Analyse des Tragwerks und seines Zustands basierend auf den in Phase 1 gesammelten Informationen. Anschließend erfolgt eine bauwerksspezifische Sensitivitätsanalyse, in der kritische Bauteile, Konstruktionsdetails und Degradationsprozesse identifiziert werden, die entweder einer sensorbasierten Überwachung oder weiterführender bauwerksdiagnostischer Untersuchungen bedürfen. Darauf aufbauend werden mögliche Auswertekonzepte für die zusätzlichen Daten erarbeitet. Weiterhin werden das Monitoringkonzept sowie das Untersuchungskonzept für die bauwerksdiagnostischen Untersuchungen abgestimmt und erstellt. Neben den fachlich inhaltlichen Themen werden in diesen Dokumenten die Anforderungen an die Datenformate und -Schnittstellen durch den/die Konfigurator:in gegeben. Weitere Anforderungen an Hard- und Software sind basierend auf der konkreten Aufgabe in Phase 2 als Grundlage für die Umsetzung in Phase 3 festzulegen. In Phase 2 werden auch die BIM-Anforderungen (AIA, BAP) für das gesamte Projekt durch den/die BIM-Koordinator:in in Abstimmung mit dem/der BIM-Manager:in (Auftraggeber:innenseite) zugrunde gelegt.

Im Ergebnis der Phase 2 steht fest, welche zusätzlichen Untersuchungen und Überwachungen in welchem Umfang notwendig sind und wie die Daten aggregiert werden können. Weitere Details zur Methodik werden in den Folgekapiteln dieses Dokumentes gegeben.



Phase 3: Umsetzung Diagnostik und Monitoring

Nach erfolgter Konzepterstellung können die weiterführenden sensorischen Überwachungen bzw. bauwerksdiag-

nostischen Untersuchungen vergeben und entsprechend den Anforderungen umgesetzt werden. Es handelt sich um gewerbliche Dienstleistungen, die i. d. R. ausgeschrieben werden und von Spezialdienstleister:innen Monitoring und Bauwerksdiagnostik umgesetzt werden können. Für das Monitoring sind weiterführende Beschreibungen der Leistungen dem Merkblatt [DBV Monitoring, 2018] in den dort definierten Phasen 3 (Ausführungsplanung) und 4 (Installation, Betrieb, Datenerhebung) zu entnehmen.

Die Umsetzung der Konzepte kann von Fachplanenden aus dem Projektteam überwacht und qualitätsgesichert werden. Die Lieferung der Ergebnisse in der angeforderten Qualität und entsprechend den festgelegten Anforderungen ist dann die Grundlage für die Implementierung des Digitalen Zwillings und die Phase 4.



Phase 4: Implementierung und Konfiguration des Digitalen Zwillings

Auf Grundlage des Konzepts und der weiterführenden Daten kann der Digitale Zwilling implementiert werden. Es sei angemerkt, dass derzeit noch keine übergreifenden Softwareprodukte auf dem Markt existieren, die allen Anforderungen des Digitalen Zwillings gerecht werden, sodass eigene Lösungen entwickelt werden müssen. Mittelfristig ist davon auszugehen, dass solche Produkte verfügbar sein werden. In Abhängigkeit des Reifegrades der verfügbaren Produkte variiert der Implementierungs- und Konfigurationsaufwand.

Ein/e Konfigurator:in kann in dieser Phase die IT-Landschaft (Cloud-Services, Server, Domains, etc.) aufsetzen und die Datenzugänge, -schnittstellen und -Services konfigurieren (bspw. SIB-Bauwerke Adapter, Access Points für Messdaten, Auswertesoftware etc.). In dieser Umgebung können Tragwerksplaner:in, Fachplaner:in und Data Scientist die Logik des Digitalen Zwillings implementieren und testen. BIM-Koordinator:in und BIM-Autor:in können alle notwendigen Informationen in die BIM-Fachmodelle integrieren.

Im Anschluss an die Phase 4 kann der Digitale Zwilling in Betrieb genommen werden.



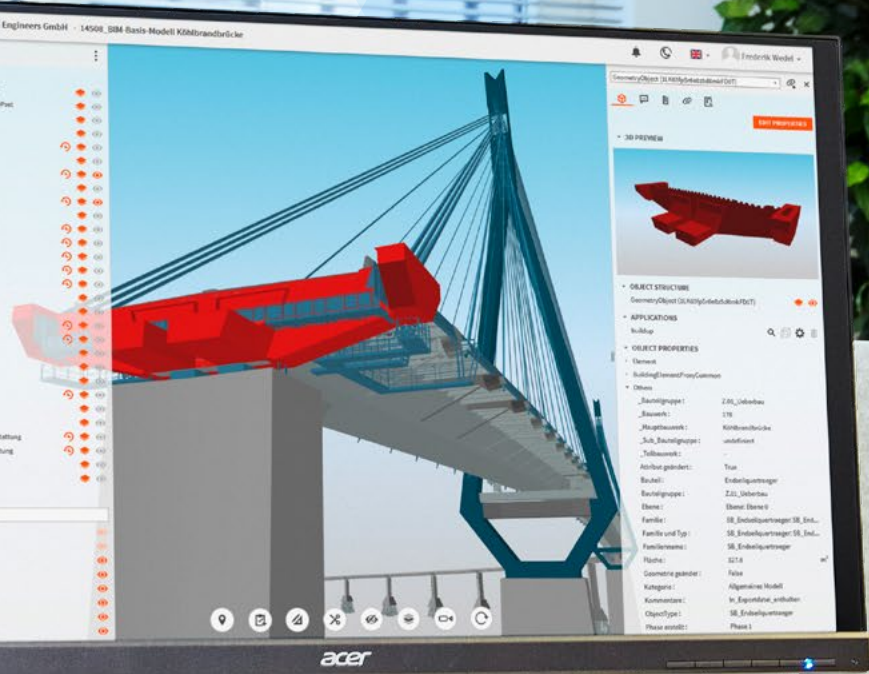
Phase 5: Betrieb des Digitalen Zwillings und Erhaltung der Brücke

Nach der Inbetriebnahme ist der Digitale Zwilling ein dynamisches Abbild der realen Brücke und wird zu einem zentralen Werkzeug im Erhaltungsprozess. Der/die Bauherr:in kann sich auf den Digitalen Zwilling stützen, um den Zustand des Objektes zu bewerten und Entscheidungen zu erforderlichen Maßnahmen zu treffen. An dieser Stelle findet die Rückkopplung vom Digitalen Zwilling zum realen Objekt statt.

Ein/e Bauwerksprüfer:in führt regelmäßige Prüfungen durch und aktualisiert das System mit Informationen zu neuen, geänderten oder sanierten Schäden und pflegt diese Informationen, die im Digitalen Zwilling aufgenommen werden. Die Softwareplattform, auf der der Digitale Zwilling aufgesetzt ist, wird durch eine/n Konfigurator:in administriert. Bei Erfordernis, beispielsweise bei Feststellung von Anomalien, Degradation oder im Falle einer neuen Informationslage, kann es erforderlich werden, neue Auswertungen zu implementieren oder bestehende anzupassen. Weiterhin kann es notwendig werden, das vorhandene Überwachungssystem zu komplettieren oder weitere Untersuchungen durchzuführen. Diese werden vom Projektteam konzipiert, von den Spezialdienstleister:innen umgesetzt und anschließend in die Auswerteprozesse eingebunden (Prozess ähnlich zu Phasen 2 bis 4).

Der Betrieb des Digitalen Zwillings bleibt – zumindest mittelfristig – eine komplexe Aufgabe, die von einem interdisziplinären Team bewerkstelligt werden muss. Deshalb sollte das Projektteam bestenfalls auch für den Betrieb beauftragt werden.

Im aktuellen Zustand wird die Plattform auf IT-Ressourcen des/der bzw. der Vertragspartner:innen des/der Bauherr:in betrieben. Dort erfolgt auch die Datenspeicherung und -vorhaltung nach den vertraglich vereinbarten Regelungen. Die Fragen zur Data Governance in Bezug auf Zustandsdaten von bundeseigener Infrastruktur ist derzeit Gegenstand der Forschung. Hierzu müssen mittelfristig Regelungen entwickelt werden, sodass für alle Akteure Klarheit zu Anforderungen und Rechten entsteht, [Kapitel 11](#).



5 – BIM-Modell: Anforderungen und Aufbau

Kurzfassung

Das BIM-Modell hat innerhalb des Digitalen Zwillings eine besondere Aufgabe – es bildet die Grundlage zur Erstellung des Zwillings. Darüber hinaus dient es als Basis für die dreidimensionale Visualisierung, die Verortung von Informationen und das Navigationskonzept innerhalb des „Frontends“.

Die Erstellung des BIM-Modells sollte nach der klassischen BIM-Methode erfolgen, wodurch die Zuständigkeiten und Akteure klar definiert sind. Die weiteren Anforderungen werden durch die Auftraggeber:innen-Informationsanforderungen (AIA) beschrieben und durch den BIM-Abwicklungsplan (BAP) aufgegriffen. Jeder Akteur ist dabei für sein eigenes Fachmodell verantwortlich. In einem CDE (Common Data Environment) können die Modelle verwaltet und versioniert werden.

Zur Nutzung des BIM-Modells im Digitalen Zwilling werden verschiedene Fachmodelle erforderlich. Die Grundlage bildet das Bauwerksmodell selbst. An dieses werden Mindestanforderungen bzgl. „Level of Detail“ und „Level of Information“ gestellt. Es sollte mindestens über einen solchen Detail- und Informationsgrad verfügen, dass die Informationen aus anderen Datenquellen mit ausreichender Genauigkeit verortet werden können. Eine genaue

Festlegung muss im Einzelfall und in Abhängigkeit von Use-Case, der Komplexität des Bauwerks und Datenquellen geschehen. Darüber hinaus enthält das Bauwerksmodell über seine Semantik die Taxonomie/Hierarchie des Bauwerks. Sie wird für Straßenbrücken durch die ASB-ING vorgegeben und muss im Digitalen Zwilling für die Navigation im Frontend – aber auch für die Datenaggregation bei höheren Reifegraden – zur Verfügung stehen.

Die Datenquellen Bauwerksinspektion, -monitoring und -diagnostik werden über eigene Fachmodelle mit eigenen zuständigen Akteuren in den Digitalen Zwilling integriert. Sie dienen hauptsächlich der Informationsverortung, können jedoch auch selbst Informationen (z. B. über Schäden, Sensoren und Untersuchungen) enthalten (Embedded-Data). Alternativ liegen die Informationen in anderen Systemen vor und es erfolgt eine Verknüpfung zwischen der Verortung im BIM-Modell und den weiteren Quellen (Linked-Data). Ob und inwieweit die Daten in den Fachmodellen selbst enthalten sind oder nur eine Verknüpfung zwischen Ort und Information über den Digitalen Zwilling stattfindet, muss im Einzelfall entschieden werden. Verschiedene Kriterien dafür werden in diesem Kapitel benannt.

1 – Die Rolle des BIM-Modells im Digitalen Zwilling

Das BIM-Modell ist eine Datenquelle für den Digitalen Zwilling und übernimmt verschiedene wichtige Aufgaben: Die Informationsverknüpfung und -verortung sowie die Bereitstellung der Bauwerkstaxonomie und eine Visualisierungsgrundlage. Es bildet damit eine wichtige Säule des Digitalen Zwillings, wie [ABB 4.2](#) bereits gezeigt hat.

Bauwerksmodell und -taxonomie

Eine der wichtigsten Aufgaben des BIM-Modells ist die Bereitstellung der Geometrie – darauf basiert ein großer Teil der späteren Visualisierung des Digitalen Zwillings. Insbesondere die interaktive Navigation im Frontend wird so überhaupt erst möglich. Es sollten sowohl das Bauwerk als auch seine technischen Ausstattungen (ggf. Fahrbahnbegrenzungen, etc.) und die Bauwerksumgebung modelliert werden. Dies führt zu einem besseren Verständnis der Situation vor Ort. Jede Informationsquelle wird dabei gemäß der BIM-Methode von einem/einer eigenen Fachplaner:in bzw. dem/der Spezialdienstleister:in als eigenes Fachmodell bereitgestellt, [7 Kapitel 4.4](#). Die BIM-Methode beschreibt das Vorgehen bei der Erzeugung eines Gesamtmodells, dem sog. Koordinationsmodell. Beim Neubau ist jeder/jede Fachplaner:in zuständig und verantwortlich für sein/ihr eigenes Fachmodell. Die Modelle werden üblicherweise in einem cloudbasierten CDE (Common Data Environment) durch offene Formate (bspw. IFC) zusammengeführt. Dies ist ein zentraler Speicherort, der jedem Akteur den entsprechenden Zugang bereitstellt. In dieser Umgebung wird das Modell verwaltet und versioniert, es besteht zudem die Möglichkeit der gezielten Abstimmung zu Überarbeitungsbedarfen oder Fehlerbehandlung. Von dort aus kann das Modell für den Digitalen Zwilling genutzt werden. Die Kommunikation zwischen den Akteuren findet in der Regel in Form von Tickets über das BIM Collaboration Format (BCF) statt. Gängige CDEs bieten entsprechende Schnittstellen an, um Modelle innerhalb des CDE automatisiert zu verwalten. Das BIM-Modell eines Bauwerks selbst kann bereits aus mehreren Fach- und Teilmodellen bestehen, welche jeweils unterschiedliche Zwecke, Fachdisziplinen und Inhalte beinhalten. Zusammengesetzt ergeben sie ein Koordinationsmodell ([ABB 5.1](#)). Außerdem ist die Erstellung von Fachmodellen der Bauwerksschäden, Untersuchungsstellen der Diagnostik und Sensorik aus dem Monitoring in Abhängigkeit des Reifegrads des Digitalen Zwillings erfor-

derlich. Sie wird von jeweiligen Fachplaner:innen und/oder Spezialdienstleister:innen bzw. dem/der Bauwerksprüfer:in übernommen. Diese Fachmodelle dienen der späteren Informationsverortung und -verknüpfung: In [ABB 5.1](#) kann „Akteur 1“ eine beliebige Person sein, beispielsweise der/die Bauherr:in selbst (weil möglicherweise bereits BIM-Modelle für sein/ihr Bauwerk zur Verfügung stehen), der/die BIM-Koordinator:in ([7 Kapitel 4.4.1](#)) oder ein/e externer/externe Dienstleister:in. Auch der/die Bauwerksprüfer:in muss sein/ihr Modell nicht selbst erstellen. Er/sie kann beispielsweise neuartige Software bei der Inspektion nutzen, die die Informationen bereits für ihn/sie direkt im BIM-Modell mit den notwendigen Informationen verortet (Software mit BIM-Schnittstelle, [7 Kapitel 6.2](#)) oder ebenfalls eine/n Dienstleister:in mit der Übertragung der Inspektionsergebnisse in ein BIM-Modell beauftragen.

Die reine Abbildung der Geometrie ist für die Nutzung im Digitalen Zwilling jedoch nicht ausreichend. Erst die semantische Anreicherung ermöglicht die Steuerung komplexer Prozesse innerhalb des Digitalen Zwillings. Jedes Brückenbauwerk ist einzigartig, dennoch folgt ihr innerer Aufbau einem definierten Schema. In Deutschland wird dieses für Straßenbrücken durch die ASB-ING [BMVBS ASB-ING, 2013] vorgegeben. Darin ist ein hierarchisches Ordnungssystem festgelegt, damit die Bauwerksdaten verschiedener Bauwerke einheitlich verarbeitet werden können. Ein Digitaler Zwilling folgt dieser Taxonomie, sodass die Kompatibilität mit weiteren Systemen (bspw. *SIB-Bauwerke*) und die Übertragbarkeit auf weitere Bauwerke über die Nutzung von Standards gegeben ist. Ferner ist die Bauwerkstaxonomie für die spätere Aggregation der Zustandsinformationen unbedingt erforderlich. Diese Anforderung an das Bauwerksmodell und weitere Anforderungen an die übrigen Fachmodelle sind in [7 Kapitel 5.2](#) dargestellt.

Informationsverortung und -verknüpfung

Ein Digitaler Zwilling hat die Aufgabe, alle Daten in einen räumlichen und zeitlichen Kontext zu setzen. Durch diesen Bezug werden verschiedene Informationsquellen miteinander verknüpft. Dazu gehören u. a. Daten aus der Bauwerksprüfung, dem Monitoring und der Diagnostik. Diese Daten können sowohl inhaltlich als auch technisch miteinander verknüpft werden. Bei der inhaltlichen Verknüpfung können beispielsweise aus dem Bauwerksmonitoring bekannte auffällige Bauwerksbereiche mit umliegenden Schäden aus der Bauwerksprüfung logisch miteinander in Verbindung gebracht werden – und so entsprechende

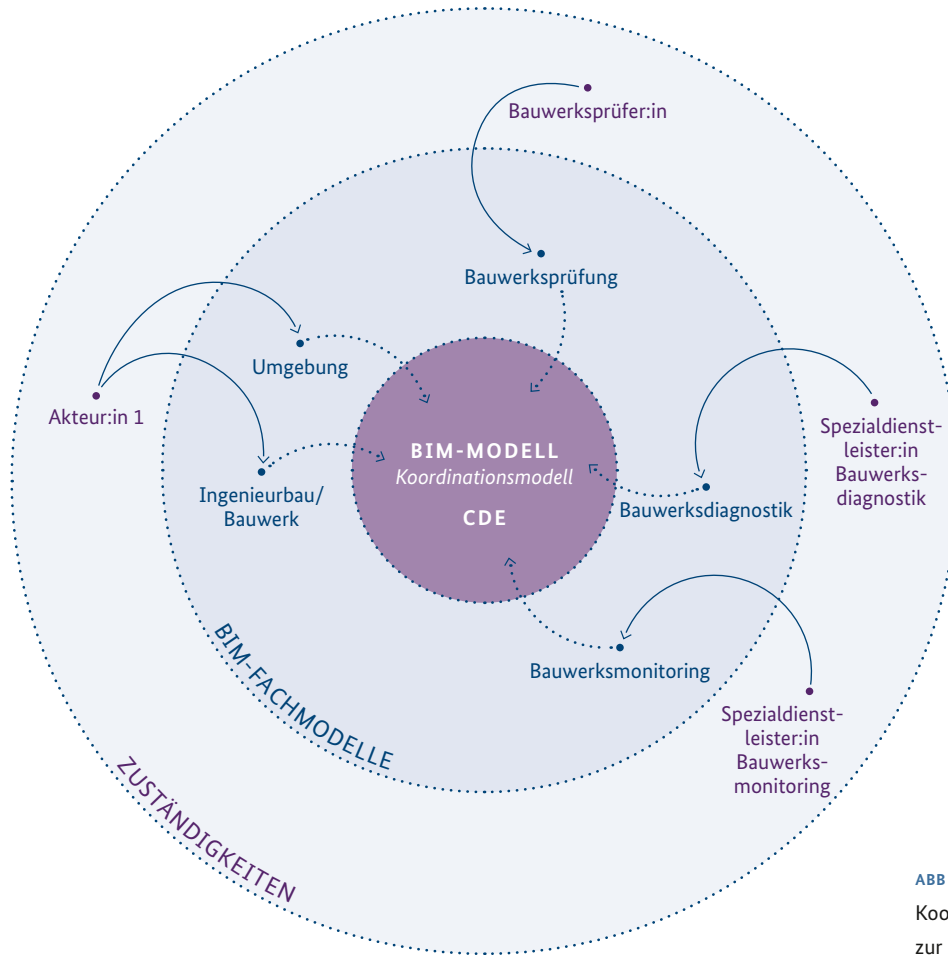


ABB 5.1 BIM-Prozess zur Erstellung des Koordinationsmodells (Gesamtmodells) zur Nutzung im Digitalen Zwilling (ab Reifegrad 2)

Rückschlüsse zulassen. Gerade die Verortung von Schäden ist bei komplexeren Bauwerken oder einer unübersichtlichen Anzahl an Schäden von besonderer Wichtigkeit, um einen schnellen Überblick zu ermöglichen.

Durch die Integration von Schäden, diagnostischen Untersuchungen oder Sensorik in ein BIM-Modell entsteht ebenfalls die technische Datenverknüpfung: Die Daten stammen in der Regel aus unterschiedlichen Systemen. Schäden werden nach einer Bauwerksprüfung üblicherweise in *SIB-Bauwerke* dokumentiert (↗ Kapitel 6.1), Monitoringdaten liegen häufig in großen cloudbasierten Datenbanken (↗ Kapitel 8), bei der Ablage von diagnostischen Untersuchungsergebnissen existiert derzeit noch keine einheitliche Regelung. Empfehlungen werden in ↗ Kapitel 7 gegeben.

Grundsätzlich existieren verschiedene Ansätze zur Datenintegration in BIM-Modellen: Bei dem Embedded-Data-Ansatz sind geometrische oder semantische Informationen direkt im Modell enthalten, während beim Linked-Data-Ansatz nur eine Verknüpfung zwischen dem BIM-Modell und einem weiteren System stattfindet. Im vorliegenden Fall übernimmt der Digitale Zwilling diese Aufgabe der Verknüpfung. Ob die Daten sinnvoller vollständig im BIM-Modell (Embedded-Data) oder nur teilweise (Linked-Data) integriert werden, lässt sich nach den folgenden drei Kriterien beurteilen:

→ Kriterium 1

Änderungsrate: Daten mit hoher Änderungsrate können nicht sinnvoll in ein BIM-Modell integriert werden und sollten über den Linked-Data-Ansatz damit verknüpft werden. Dazu gehören beispielsweise bewertete Daten von Sensoren des Monitorings.

→ Kriterium 2

Komplexität und Heterogenität: BIM-Modelle bzw. Austauschformate wie IFC lassen in der Regel nur alphanumerische Daten zu. Bild-Dateien können nicht integriert werden und sollten deshalb über den Linked-Data-Ansatz damit verknüpft werden.

→ Kriterium 3

Bestehen einer Single-Source-of-Truth (SSoT): Ist für ein System bereits eine SSoT vorhanden, so sollten diese Daten durch den Linked-Data-Ansatz integriert werden, damit es nicht zu einer redundanten Datenablage und doppeltem Pflegeaufwand kommt. Die Daten im BIM-Modell stellen dann ergänzende Informationen dar, die mit der SSoT kombiniert werden.

Die Verknüpfung der verschiedenen Datenquellen findet innerhalb des Digitalen Zwillings unabhängig davon über das BIM-Modell statt. Jedes Schadens-, Sensor- oder Untersuchungsobjekt lässt sich im BIM-Modell eindeutig identifizieren (bspw. über eine ID oder eine eindeutige Bezeichnung). Entweder enthalten die Objekte durch ihre

Semantik direkt selbst bestimmte Informationen (Embedded) oder über ihre ID werden die Daten von einer Datenbank geladen und angezeigt (Linked).

2 – Anforderungen an das BIM-Modell sowie seine Erstellung für die Nutzung im Digitalen Zwilling

Für die Nutzung im Digitalen Zwilling sollten die Modelle möglichst mit geringem Aufwand erstellt werden. Grundsätzlich lassen sich aber keine konkreten Aussagen zu den Anforderungen treffen, da sie durch Anwendende und die Use-Cases des Digitalen Zwillings selbst getroffen werden. Dennoch gibt das nachfolgende Kapitel einige Hinweise zur Nutzung von digitalen Modellen innerhalb des Digitalen Zwillings.

Erstellung des Bauwerksmodells

Im Idealfall werden BIM-Modelle für die Verwendung in einem Digitalen Zwilling in vorausgehenden Projekten bzw. Projektphasen (Planung oder Ausführung) erzeugt und übernommen. Wichtig ist in diesem Fall die (das Projekt abschließende) Bauwerksdokumentation ([Kapitel 4.3](#), AwF190), da hier die wesentlichen Informationen des Projekts in einem As-Built-Modell zusammengefasst werden. Letzteres ist, insbesondere für eine genauere Verortung von Bauwerksschäden, Voraussetzung für die Nutzung im Digitalen Zwilling. Der Übergang des Modells von der Bau- in die Betriebsphase ist derzeit noch ungeklärt und aktueller Forschungsgegenstand [Seitner et al., 2021], [Thewes et al., 2022], weshalb hier lediglich die Anforderungen an die Modelle beschrieben werden, nicht aber der Prozess selbst.

Im Bestand ist ein BIM-Modell derzeit in der Regel nicht vorhanden. In diesem Fall ist ein entsprechendes Modell zu erzeugen. Das ist momentan aufgrund des hohen manuellen Anteils mit einigem Aufwand verbunden. Die Quantität und Qualität der für die Modellierung zur Verfügung stehenden Informationen haben einen direkten Einfluss auf das BIM-Modell. Sind die Daten gut gepflegt und vollständig, kann ein hochqualitatives BIM-Modell entstehen. Sind die Daten unvollständig oder unlesbar, müssen die fehlenden Informationen erst beschafft werden, etwa durch erneutes Aufmessen, Laserscans oder Drohnenbefliegungen. Diese optischen Verfahren haben den Nachteil, dass nicht-sichtbare Bereiche des Bauwerks (Gründungen, Hohlräume etc.) nicht erfasst werden können. In diesem Fall ist abzuwägen, ob eine manuelle Modellierung not-

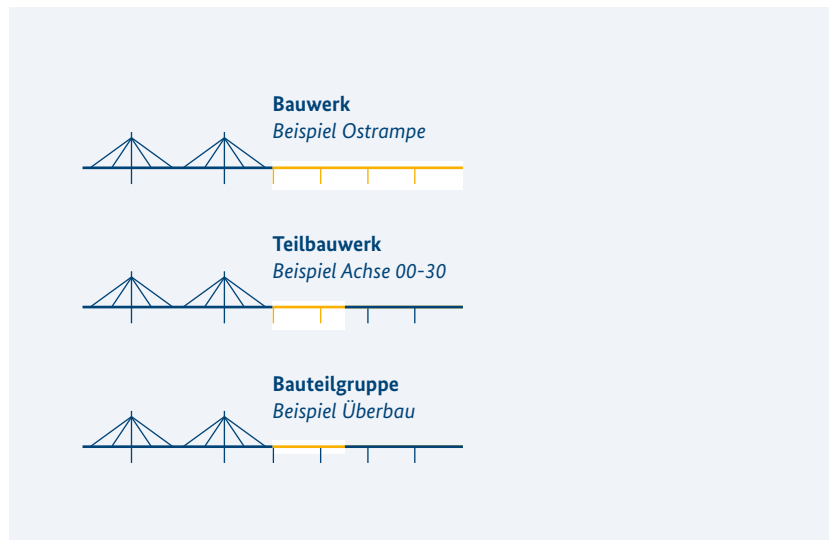


ABB 5.2 Bauwerkstaxonomie nach ASB-ING am Beispiel der Köhlbrandbrücke

wendig ist. In der Regel ist das erforderlich, wenn an diesen Stellen Informationen verortet werden sollen.

In Zukunft wird die Barriere für die Erstellung von BIM-Modellen weiter sinken. Heute ist es bereits möglich, mit üblichen Endgeräten wie z. B. Smartphones, ein Punktwolkenmodell zu erstellen. Dies kann in vielen Fällen und gerade bei kleineren Objekten einen großen Mehrwert darstellen. Aufmaße oder Punktwolken können dann dafür genutzt werden, die BIM-Modelle zu erstellen. Auch hier schreitet die Automatisierung weiter voran [Bednorz et al., 2021]. Die automatisierte Überführung von Punktwolkenmodellen oder Laserscans in objektbasierte Oberflächen- und Volumenmodelle ist aktueller Forschungsgegenstand (bspw. Forschungsprojekte „TwinGen“ oder „Entwicklung von Verfahren zur (teil-) automatisierten Erstellung von BIM-Modellen für Straßenbrücken im Bestand“). So ist in Zukunft davon auszugehen, dass auch für Bestandsbauwerke ein 3D-Modell mit geringem Aufwand erzeugt werden kann.

Neben der Geometrie spielt die Semantik eine wichtige Rolle. Das Modell muss zur Nutzung im Digitalen Zwilling mit einer entsprechenden Semantik angereichert sein – erst an dieser Stelle wird ein 3D-Modell zu einem BIM-Modell. Dabei geht es insbesondere um die Abbildung der Bauwerkstaxonomie, um Informationsergänzung (Embedded-Data) und um die Schaffung einer Grundlage für Informationsquellenverknüpfung (Linked-Data).

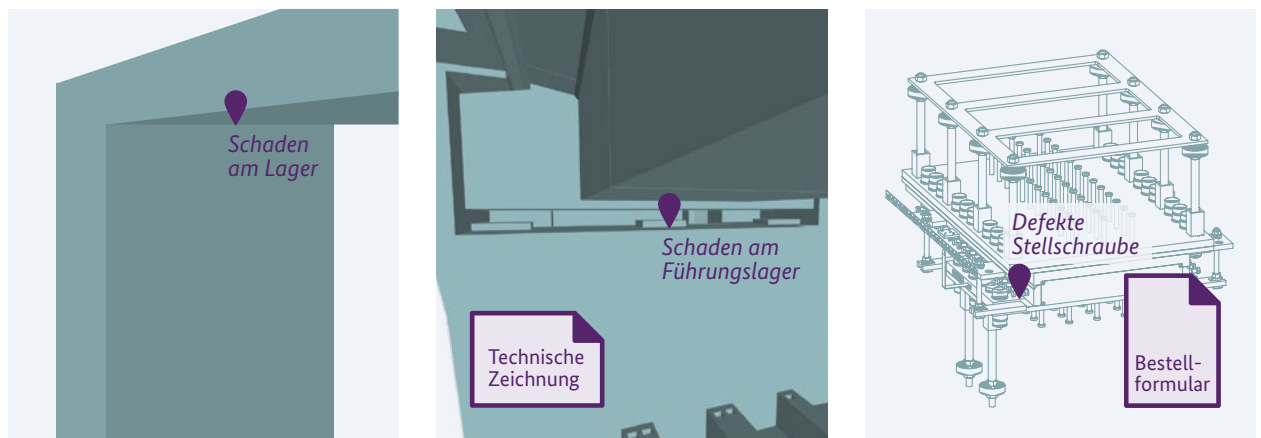


ABB 5.3 Darstellung eines Lagerschadens in verschiedenen Modellen unterschiedlicher Level of Geometry und Information

Bauwerkstaxonomie

Die Bauwerkstaxonomie bildet die Grundlage für die Aggregation der Zustandsdaten, für die Navigation im Frontend sowie das Hervorheben bestimmter Bauwerksbereiche oder Bauteile. Sie ist für Straßenbrücken durch die ASB-ING [BMVBS ASB-ING, 2013] vorgegeben und in ABB 5.2 beispielhaft dargestellt.

Insbesondere das Bauwerksmodell (aber auch alle anderen Fachmodelle) müssen diese Taxonomie in Form von Merkmalen enthalten. Es ist darauf zu achten, dass eine einheitliche Benennung/Schreibweise der Merkmale erfolgt. Dabei können Richtlinien wie der Bauteilkatalog Brücken [BIM Hamburg, 2018] als Grundlage hilfreich sein und dem Projekt zugrunde gelegt werden.

Ein Bauwerk kann aus beliebig vielen Teilbauwerken bestehen. Ein Teilbauwerk setzt sich aus verschiedenen Bauteilgruppen zusammen, die in der ASB-ING definiert sind (in ABB 5.2 ist beispielhaft nur „Überbau“ dargestellt). Eine Bauteilgruppe besteht aus beliebig vielen Bauteilen. Die Taxonomie kann im Kontext des Digitalen Zwilling nach Belieben und bei Erfordernis nach oben oder unten erweitert werden, ohne Widerspruch zur ASB-ING. Außerdem könnte darüber ein Systemzwilling und darunter ein Komponentenzwilling lt. ABB 3.4 stehen. Insbesondere letzteres spielt bei beweglichen Brücken eine besondere Rolle, [7 Kapitel 4.1](#) (Weitere Datenquellen).

Weitere Fachmodelle

Neben dem Bauwerksmodell existieren für die verschiedenen Datenquellen weitere Fachmodelle. Dabei handelt es sich je nach Reifegrad beispielsweise um ein Schadens-, Monitoring- und Diagnostikmodell. Sie haben im Wesentlichen die Aufgabe, die entsprechenden Informationen zu verorten und/oder dem Digitalen Zwilling die Möglichkeit zu geben, diese aus weiterführenden Datenquellen „on demand“ abzurufen. Letzteres ist bei Daten erforderlich, die nicht direkt im BIM-Modell enthalten sind, beispielsweise Monitoringdaten, [7 Kapitel 8.3](#). An die Fachmodelle werden jeweils verschiedene Anforderungen gestellt. Sie sind [7 Kapitel 6](#), [7 Kapitel 7](#) und [7 Kapitel 8](#) zu entnehmen. Für die Verknüpfung zwischen dem BIM-Modell und weiterführenden Datenquellen (bspw. Datenbanken) ist eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) für die Objekte innerhalb der Fachmodelle zu vergeben. Über diese eindeutige und einmalige ID kann der Digitale Zwilling Zusatzinformationen aus anderen Datenquellen abrufen und integrieren. Bei einem Sensor des Monitorings ist das beispielsweise der Sensorname, sofern dieser einmalig ist, oder eine ID. Bei einem Bauwerksschaden ist es die ID, die durch SIB-Bauwerke vorgegeben wird. Ein Digitaler Zwilling ist auch in der Lage, Daten aus den BIM-Modellen direkt anzuzeigen. In diesem Fall fungiert das BIM-Modell als Datenquelle (Embedded-Data) für den Digitalen Zwilling unter Verwendung des Linked-Data-Ansatzes.



ABB 5.4 Darstellung der Brücken-
karte der BAST und Markierung der
Köhlbrandbrücke im geojson-Format

Anforderungen an die Genauigkeit und den Informationsgehalt

Üblicherweise erfolgt die Festlegung zur Genauigkeit und dem Informationsgehalt über die im „Rahmendokument: Definition der Fachmodelle – Version 1.0, Abschnitt 4“ des *Masterplan BIM Bundesfernstraßen* beschriebenen Kennzahlen „Level of Information Need“ (LOIN) [BMVI *Masterplan*, 2021]. Der LOIN beschreibt den Umfang und die Detaillierung des Informationsaustausches im Sinne der Geometrie (LoG), Information (LoI) und Dokumentation (DOC). Genaue Angaben für die Nutzung im Digitalen Zwilling werden im Rahmen des Beitrags nicht getroffen, da dies nutzer:innenspezifisch und abhängig vom jeweiligen Use-Case des Digitalen Zwillings ist. Die projektbezogenen Anforderungen werden gem. 7 Kapitel 4.4.2 in der Phase 2 definiert.

ABB 5.3 zeigt den gleichen Lagerschaden in verschiedenen Modellen mit unterschiedlichem Level of Geometry und Level of Information. Es reicht von einer sehr rudimentären Darstellung und etwaigen Verortung des Schadens bis hin zu einer sehr detaillierten Modellierung des Führungslagers und einer exakten Ortsangabe sowie

Schadensbeschreibung. Mit den momentan verfügbaren technischen Mitteln und der aufwendigen manuellen Erstellung solcher Modelle bietet sich gerade im Bestand an, ein geringeres Level zu wählen. Künftig liegen detaillierte Modelle aus Planungsphasen ohnehin vor und können direkt integriert werden. Auch verbessert sich die automatische Erstellung von Bestandsmodellen, sodass auch hier ein immer höheres Level gewählt werden kann.

Empfehlenswert ist die Verwendung eines As-Built-Modells, um die Informationen möglichst genau zu verorten. Dieses Modell wird im Zuge der Nutzung innerhalb des Digitalen Zwillings zu einem As-Maintained-Modell, indem es ständig mit zusätzlichen Informationen aus der Instandhaltung auf aktuellem Stand gehalten wird. Dazu gehören die Integration von Bauwerksschäden, Instandhaltungsmaßnahmen oder andere Änderungen am Tragwerk.

Georeferenzierung/GIS

Alle Objekte bzw. Informationen sollten über Koordinaten in einem geodätischem Referenzsystem verortet werden. Durch die absolute Verortung entsteht die Vernetzung von

verschiedenen Digitalen Zwillingen auf unterschiedlichen Ebenen, da sie mit anderen georeferenzierten Daten ohne zusätzlichen Aufwand zusammengeführt werden können. **ABB 5.4** zeigt beispielhaft die absolute Verortung der Köhlbrandbrücke in Hamburg in der Brückenkarte der BAST. Außerdem sind dort verschiedene andere Bauwerke markiert, für die entsprechende Metadaten insbesondere zu ihrem Zustand hinterlegt sind. Künftig könnten dies alles Digitale Zwillinge sein. In Bezug auf **ABB 3.4** wären die Bauwerke als Objektzwillinge zu betrachten und die entsprechende Vernetzung in der Brückenkarte würde den Systemzwilling darstellen.

Im rechten Teil von **ABB 5.4** ist die Position der Köhlbrandbrücke im geojson-Format beispielhaft abgelegt. Dabei handelt es sich um ein standardisiertes GIS-Datenformat (Geoinformationssystem), wobei auch andere durchaus denkbar sind. Entscheidend ist die Nutzung offener und standardisierter Formate.

Die Anforderungen an die Genauigkeit der Verortung ist wiederum abhängig vom angestrebten Use-Case: Beispielsweise sind die Genauigkeitsanforderungen bei der Verortung eines Bauwerks geringer als bei der Verortung eines Schadens an diesem Bauwerk, siehe auch **ABB 5.3**.

Standardisierung der Merkmale

Metadaten bzw. alphanumerische Informationen innerhalb des BIM-Modells sollten über alle Fachmodelle hinweg ebenfalls standardisiert sein. Anderenfalls würde jeder Digitale Zwilling einen prototypischen Charakter aufweisen und eine Vernetzung deutlich erschwert. Aufgrund des niedrigen Standardisierungsgrades der BIM-Modelle ist es gegenwärtig noch nicht möglich, eine Nutzung der Modelle für Digitale Zwillinge zu standardisieren. Um die alphanumerischen Informationen in BIM-Modellen zu standardisieren, bietet sich die Nutzung von Objektkatalogen an. In diesen Objektkatalogen werden die alphanumerischen Informationen in Form von Merkmalen und Merkmalgruppen zusammengestellt und beschrieben. Wie diese beschrieben, erstellt und gepflegt werden, ist in der DIN EN ISO 23386 festgelegt. Die Erstellung dieser Objektkataloge und vor allem die interdisziplinäre Harmonisierung sollte idealerweise in auf DIN EN ISO 23386 abgestimmten Datenbanken erfolgen. Eine solche Datenbank (BIM-Portal) befindet sich in der Entwicklung und wird durch das BMDV zur Verfügung gestellt werden. Ein Beispiel für einen solchen Katalog ist der Bauteilkatalog Brücken [*BIM Hamburg, 2018*].

Weiterentwicklungsbedarf

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Anforderungen an BIM-Modelle einen direkten Einfluss auf den Digitalen Zwilling haben. Die mit den BIM-Modellen abgebildeten Fachdisziplinen sind im Vorfeld abzustimmen und im Hinblick auf den Nutzen innerhalb des Digitalen Zwillings auszuwählen. Gleiches gilt für den jeweiligen LOIN sowie die Ablageorte der BIM-Modelle. Trotz der voranschreitenden Etablierung der Methode BIM, und aller ihrer Einsatzgebiete, besteht noch großer Forschungsbedarf. Vor allem in den Bereichen der Automatisierung von Prozessen, etwa bei der Erzeugung der Modelle, ist dies der Fall. Die Erstellung von Modellen ist derzeit noch stark von händischer Arbeit geprägt. Hierzu gibt es bereits laufende Forschungsprojekte (bspw. TwinGen [*TwinGen, 2019*]). Zudem sind die Anwendungsgebiete der BIM-Modelle in der Phase des Betriebes noch nicht erschöpfend entwickelt, sodass sich hier ein großes Entwicklungspotenzial für den Digitalen Zwilling verbirgt. Abschließend ist zu beachten, dass viele der derzeit existierenden Datenbanken für Bauwerksinformationen nicht ausgereift für die Verwendung mit der BIM-Methode sind. Hier besteht ein großer Nachholbedarf, da viele dieser Datenbanken essenziell für das Bauwesen in Deutschland sind (bspw. *SIB-Bauwerke*).



6 – Bauwerksprüfung: Die integrale und visuelle Bewertungsbasis

Kurzfassung

Die Bauwerksprüfung, geregelt nach der DIN 1076 und weiter ausgeführt für Ingenieurbauwerke in der RI-EBW-PRÜF, findet regulär mindestens alle 3 Jahre in unterschiedlichen Arten statt. Sie erfasst den visuellen Zustand der einzelnen Bauteile sowie des gesamten Bauwerks. Geschulte Bauwerksprüfer:innen inspizieren zusammen mit einem Prüfrupp bei der Hauptprüfung das Bauwerk handnah, dokumentieren sämtliche Schäden sowie Mängel und verorten diese teils noch händisch auf Bauwerksplänen.

Auf Grundlage eines stetig wachsenden Schadenskatalogs werden alle Schäden bzw. Mängel nach ihrem Sicherheitsrisiko bezüglich Standsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit sowie Schadensschwere beurteilt. Darauf aufbauend berechnet ein bundesweit einheitlicher Algorithmus anhand aller vorhandenen Schäden und Mängel den Zustand der einzelnen Bauteile und vergibt eine Zustandsnote, die im Bereich von 1,0 bis 4,0 liegt. Die Zustände der einzelnen Bauteile folgen einem Aggregationsprozess und bilden schlussendlich den Zustand des gesamten Bauwerks. Die Dokumentation der Bauwerksprüfung findet bislang in der Informationsdatenbank *SIB-Bauwerke* statt.

Neben dem Traglastindex, der mit einem Vergleich zwischen Ziellastniveau und aktueller Brückentragfähigkeit die tatsächlichen Defizite der Tragfähigkeit darstellt – aber weitestgehend unabhängig vom visuellen Zustand vergeben wird –, ist die Zustandsnote des Bauwerks eine der wichtigsten Kennzahlen für die Erhaltungsplanung des gesamten Brückenbestands der Bundesfernstraßen.

Genauere Abläufe, Akteure und Prozesse zur Zustandsbewertung sowie Richtlinien der Bauwerksprüfung werden im ersten Teil dieses Kapitels detailliert vorgestellt. Anschließend werden die aktuellen Defizite aus Sicht der Autor:innen hervorgehoben.

Die Bauwerksprüfung bildet durch normative Vorgaben und ihre große Bedeutung in der Erhaltungsplanung neben dem Bauwerksmonitoring und der Bauwerksdiagnostik eine von drei fundamentalen Informationsquellen im Digitalen Zwilling, um den aktuellen Zustand des Bauwerks wiedergeben zu können. Neben den Zustandsinformationen sind besonders die Angaben zu Schäden und deren Verortung in einem 3D-Modell ein großer Vorteil gegenüber dem bisherigen Vorgehen mittels Bestandsplänen. Bauwerksprüfer:innen können sich im weiteren Verlauf der Nutzungsphase eines Bauwerks einfacher ein Bild des aktuellen Zustands der Brücke machen, die vorhandenen Schäden genauer identifizieren, verfolgen und zusätzliche Informationen aus Bauwerksmonitoring, Bauwerksdiagnostik sowie aggregierten Zustandsinformationen für eine objektivere Bewertung des Bauwerkszustands in Bauwerksprüfungen hinzuziehen.

Der zweite Teil des Kapitels diskutiert, wie die Bauwerksprüfung im Rahmen des Digitalen Zwillings zu verstehen ist, welche Veränderungen sich für die Prozesse ergeben werden und welche zukünftigen neuen Aufgaben in einer Bauwerksprüfung zu beachten sind – aber auch, welche Vorteile der Digitale Zwilling speziell für die Bauwerksprüfung bringt.

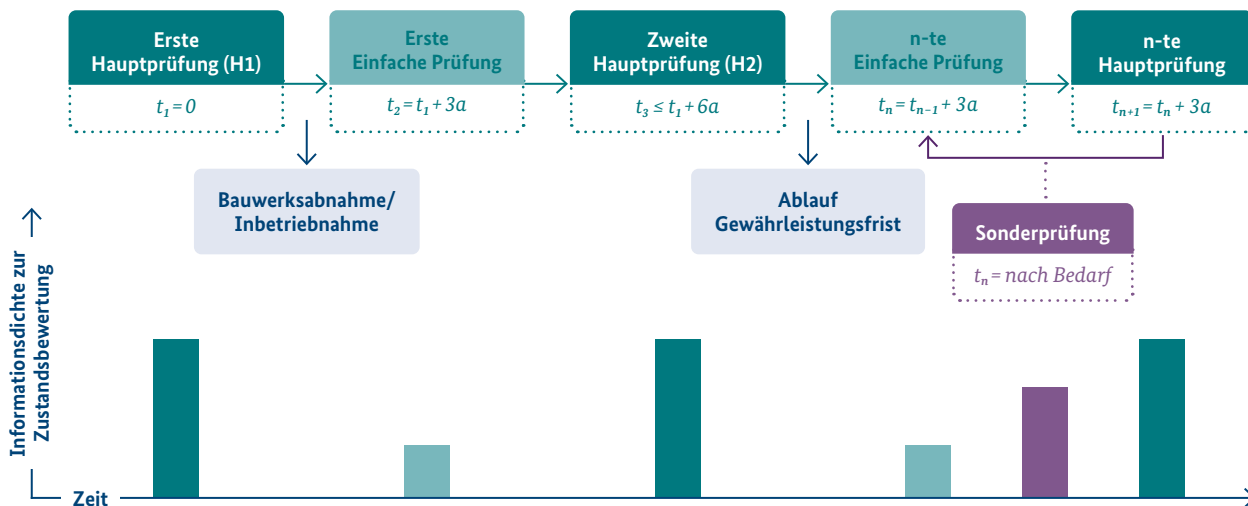


ABB 6.1 Zeitliche Darstellung der Bauwerksprüfungen mit Informationsdichte

1 – Überblick zur Bauwerksprüfung nach DIN 1076 und RI-EBW-PRÜF

Was bedeutet Bauwerksprüfung?

Der fachübergreifende Begriff „Inspektion“ wird als regelmäßige Überprüfung von Anlagen hinsichtlich ihres Ist-Zustands verstanden. Einzelne Anlagenteile sowie die gesamte Anlage werden im Hinblick auf einen ordnungsgemäß funktionierenden und sicheren Zustand geprüft und die Ergebnisse dokumentiert.

Im Kontext von Brücken als Anlagenklasse sowie in Bezug auf die Richtlinien zur Erhaltung RPE-ING [BMVI RPE-ING, 2020] wird der Begriff „Bauwerksprüfung“ statt des gleichbedeutenden Begriffs „Inspektion“ verwendet. Die Bauwerksprüfung beschreibt einen wesentlichen Kernprozess des Erhaltungsmanagements von Brücken der Bundesfernstraßen (7 Kapitel 2) und prüft regelmäßig und sachkundig den aktuellen Zustand bzgl. der Kriterien Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit.

Notwendigkeit der Bauwerksprüfung von Ingenieurbauwerken

Bauwerke erfahren bereits ab der Herstellung unterschiedlichste Einwirkungen, die mit einer Veränderung des Zustands einhergehen. Das Erhaltungsmanagement wirkt der Zustandsverschlechterung durch geeignete Prozesse entgegen. Der dafür benötigte visuelle Bauwerkszustand wird in regelmäßigen Abständen durch Bauwerksprüfungen erfasst, der strukturelle Zustand wird bei Erfordernis durch rechnerische Untersuchungen ermittelt (7 Kapitel 2.2 und ABB 2.3).

Im Rahmen der Bauwerksprüfung werden Schäden identifiziert, bewertet und darauf aufbauend in Abhängig-

keit der Schadensschwere Maßnahmen für eine zeitnahe Schadensbeseitigung festgelegt, damit zukunftsnahe keine kritischen Schäden, die die Sicherheit sowie Verfügbarkeit des Bauwerks einschränken würden, auftreten.

Die Richtlinien- und Regelwerkslandschaft im Kontext des Erhaltungsmanagements wurde bereits in 7 Kapitel 2.1 vorgestellt.

Der/die Bauwerksprüfer:in als ausführende Instanz der Bauwerksprüfung

Bauwerksprüfungen sind durch sachkundige Ingenieur:innen, auch Bauwerkprüfer:innen genannt, durchzuführen, welche die konstruktiven und statischen Verhältnisse des Bauwerks beurteilen können. Weiterführende Informationen können auch der Quelle [Mertens, 2015] entnommen werden.

Grundlage für die Durchführung von Bauwerksprüfungen ist eine intensive Vorbereitung. Dazu sind Bestands- und Konstruktionsdaten zum Bauwerk sowie Zustandsinformationen aus bereits erfolgten Prüfungen notwendig. Das Programm SIB-Bauwerke stellt diese verschiedenen zusammengehörenden Informationen zur Verfügung. Anhand der Bauwerksdaten kann ein Überblick über das Bauwerk an sich sowie über die Gegebenheiten gewonnen werden. Ebenfalls kann festgestellt werden, in welchem Umfang die Bauwerksprüfung stattzufinden hat. Vorherige Prüfungen liefern Informationen zu kritischen Stellen des Bauwerks sowie zu deren aktuellem Zustand. Darüber hinaus können in vorherigen Prüfungen Schäden gekennzeichnet worden sein, die in der nächsten Prüfung besondere Aufmerksamkeit verlangen. Statiken oder Unterlagen zur konstruktiven Ausbildung können ebenfalls hinzugezogen werden.

Arten der Bauwerksprüfung

Die DIN 1076 unterteilt die Bauwerksprüfung in vier unterschiedliche Arten:

- Hauptprüfung (H)
- Einfache Prüfung (E)
- Prüfung aus besonderem Anlass (S)
- Prüfung nach besonderen Vorschriften (V)

In **ABB 6.1** sind die unterschiedlichen Prüfungsarten in einem zeitlichen Kontext dargestellt und qualitativ die Informationsdichten der unterschiedlichen Bauwerksprüfungen abgebildet.

Nachfolgend werden für die wichtigsten Prüfungsarten, „Hauptprüfung“ und „Einfache Prüfung“, der Umfang sowie die zeitlichen Randbedingungen kurz beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der weiteren Prüfungsarten ist der DIN 1076 zu entnehmen.

Hauptprüfung (H)

Die Hauptprüfung bildet die intensivste der Prüfungsarten und ist standardmäßig jedes sechste Jahr am Bauwerk durchzuführen. Der Umfang einer Hauptprüfung bezieht sich auf die handnahe Untersuchung aller, auch der schwer zugänglichen, Bauteile des Bauwerks. Der Untersuchungsumfang einzelner Bauteile ist in der DIN 1076 ausführlich definiert.

Einfache Prüfung (E)

Wie die Hauptprüfung findet auch die einfache Prüfung alle sechs Jahre statt, allerdings in einem dreijährigen Versatz. Bei der einfachen Prüfung handelt es sich um eine intensive, erweiterte Sichtprüfung.

Bewertung erfasster Schäden und Mängel der Bauwerksprüfung und Maßnahmenempfehlungen

Grundsätzlich wird in der RI-EBW-PRÜF zwischen **Mängeln** und **Schäden** unterschieden. Mängel sind Abweichungen vom planmäßigen Sollzustand oder von den zum Prüfzeitpunkt geltenden Regelwerken. Schäden hingegen sind (schädliche) Veränderungen des Bauwerkszustands. Nach dieser Definition ist z. B. eine unterschrittene Betondeckung ein Mangel, eine freiliegende Bewehrung ist ein Schaden, der infolge des zuvor genannten Mangels entstanden sein kann. In diesem Dokument wird zur Vereinfachung der Begriff „Schaden“ stellvertretend für Mängel und Schäden verwendet.

Während der Bauwerksprüfung vor Ort wird jeder einzelne Schaden erfasst. Die Erfassung bezieht sich auf die Schadensattribute sowie auf die Erstellung eines Schadens-

katasters als separate Skizze. Im Zuge der Datenpflege werden bei der Eingabe in *SIB-Bauwerke* i. d. R. mehrere gleiche Schäden am selben Bauteil gruppiert bzw. zusammengefasst und über den Schadensumfang bzw. die Menge abgebildet. Diesem Umstand entsprechend wird im Zuge des Dokumentes der Begriff der **Teilschäden** eingeführt, welcher die tatsächlich einzelnen Schäden am Bauteil beschreibt (in [Mertens, 2015] auch Detailschäden genannt). Im Sinne von *SIB-Bauwerke* bilden darauf aufbauend mehrere Teilschäden den zu bewertenden Schaden (auch Einzelschaden genannt) am Bauteil. Ist davon auszugehen, dass ein Teilschaden eine besondere Bedeutung für den Bauwerkszustand besitzt, erfolgt keine Gruppierung mit weiteren gleichen Teilschäden, der spezifische Teilschaden wird als Einzelschaden angelegt. Die eingeführte Definition stellt keine Veränderung zum aktuellen Vorgehen dar, sie spezifiziert lediglich im Zuge des Digitalen Zwillinges eine Begriffsdefinition, die bereits ohne die konkrete Namensgebung „Teilschaden“ umgesetzt wird.

Im Zuge einer Bauwerksprüfung wird für jeden erfassten Einzelschaden am Bauwerk eine separate Schadensbewertung nach den Kriterien Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D) durchgeführt.

Nachfolgend sind die drei Sicherheitskriterien entsprechend der RI-EBW-PRÜF beschrieben. Sie bilden die essenzielle Grundlage für die Zustandsbewertung der Bauwerke.

→ Standsicherheit (S)

Die Standsicherheit kennzeichnet die Eigenschaft eines Bauwerkes bzw. einzelner Bauwerksteile, um die planmäßigen Beanspruchungen (bei Nutzungsbeschränkungen entsprechend reduziert) schadlos aufnehmen zu können. Schäden mit besonderer Standsicherheitsrelevanz sind beispielsweise Schweißnahtrisse quer zur Krafrichtung mit mehr als 40 % der Nahtlänge (**ABB 6.2**)

→ Verkehrssicherheit (V)

Die Verkehrssicherheit ist ein Maß für die Bauwerksausbildung nach anerkannten Regeln der Technik zum jeweiligen Prüfzeitpunkt, welche die Anforderungen an Sicherheit und Ordnung hinsichtlich der gefahrlosen und bestimmungsgemäßen Nutzung des Bauwerkes beinhaltet. Sie schließt damit sowohl die Sicherheit für Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge als auch die Sicherheit für Personen und Sachen im Bauwerksumfeld ein. Schäden mit Verkehrssicherheitsrelevanz sind beispielsweise fehlende Geländer bei planmäßigem Fußgängerverkehr oder tiefe Spurrinnen in der Fahrbahn (**ABB 6.2**)

ABB 6.2 Schadensbeispiele mit ausgeprägten Sicherheitskriterien S, V und D



Schadensbeispiel 1: Standsicherheit

Schweißnaht am Querträger ist quer zur Kraftrichtung gerissen
S | V | D = 3 | 0 | 3



Schadensbeispiel 2: Verkehrssicherheit

Spurrinnen in Fahrbahn aus Gussasphalt, Tiefe > 3 cm
S | V | D = 0 | 3 | 1



Schadensbeispiel 3: Dauerhaftigkeit

Ankerplatte/Verankerung der Brückenseile ist stellenweise verrostet
S | V | D = 0 | 0 | 2

→ Dauerhaftigkeit (D)

Die Dauerhaftigkeit kennzeichnet die Widerstandsfähigkeit des Bauwerkes bzw. einzelner Bauwerksteile gegenüber Einwirkungen, um eine möglichst lange Nutzungsdauer unter Aufrechterhaltung der Standsicherheit und Verkehrssicherheit bei planmäßiger Nutzung und planmäßiger Bauwerksunterhaltung zu erreichen. Schäden mit Dauerhaftigkeitsrelevanz sind beispielsweise sich unter Verkehrslast bewegende Risse oder Korrosionserscheinungen (ABB 6.2)

Die Bewertung der Einzelschäden erfolgt grundsätzlich nach den Schadensbeispielen aus der RI-EBW-PRÜF [BMVI RI-EBW-PRÜF-Bsp, 2017]. Für jedes Schadensbeispiel ist eine Schadensbewertung der Kriterien S, V und D hinterlegt. Es handelt sich dabei um einen Vorschlag, der im Einzelfall verändert werden kann. Die Bedeutung der Schadensbewertungsstufen (0–4) im Zusammenhang mit den Sicherheitskriterien (S, V, D) ist in der RI-EBW-PRÜF verankert.

Bei der Erfassung der Prüfergebnisse in *SIB-Bauwerke* schlägt das Programm dem/der Bauwerksprüfer:in bei Eingabe des Schadensortes entsprechende Schadensbeispiele zur Auswahl vor. Die Auswahl bzw. die Schadensbewertung setzt Kenntnisse der Schadensursache voraus. Fehlt dieses Kenntnis, muss der/die Prüfer:in zwischen der Einordnung nach seiner fachlichen Einschätzung oder der Notwendigkeit einer OSA abwägen.

Im Rahmen der Bauwerksprüfung können Maßnahmenempfehlung zur Schadensbeseitigung getroffen werden. Für besonders kritische Einzelschäden hinsichtlich der Sicherheitskriterien ist die Angabe von Maßnahmenempfehlungen verpflichtend. Eine Verknüpfung zwischen einer Maßnahme und einem Schaden oder auch mehreren Schäden ist möglich. Die ASB-ING legt als Entscheidungshilfe eine Maßnahmenliste zugrunde.

Bewertung des visuellen Zustands zu einer Zustandsnote

Die Bewertung des visuellen Zustands von Bauwerken, Teilbauwerken sowie Bauteilgruppen erfolgt nach einem wissenschaftlich entwickelten Algorithmus [Haardt, 1999] mit der Berücksichtigung der in der Bauwerksprüfung erfassten Einzelschäden sowie deren Menge/Umfang und Schadensbewertung hinsichtlich S, V und D. Im Ergebnis werden auf den Ebenen der Teilbauwerke und der Bauteilgruppen Zustandsnoten zwischen 1,0 und 4,0 errechnet. Ein Brückenbauwerk besteht in diesem Zusammenhang aus mindestens einem Teilbauwerk. Nach der RI-EBW-PRÜF wird zwischen sechs Zustandsnotenbereichen differenziert,

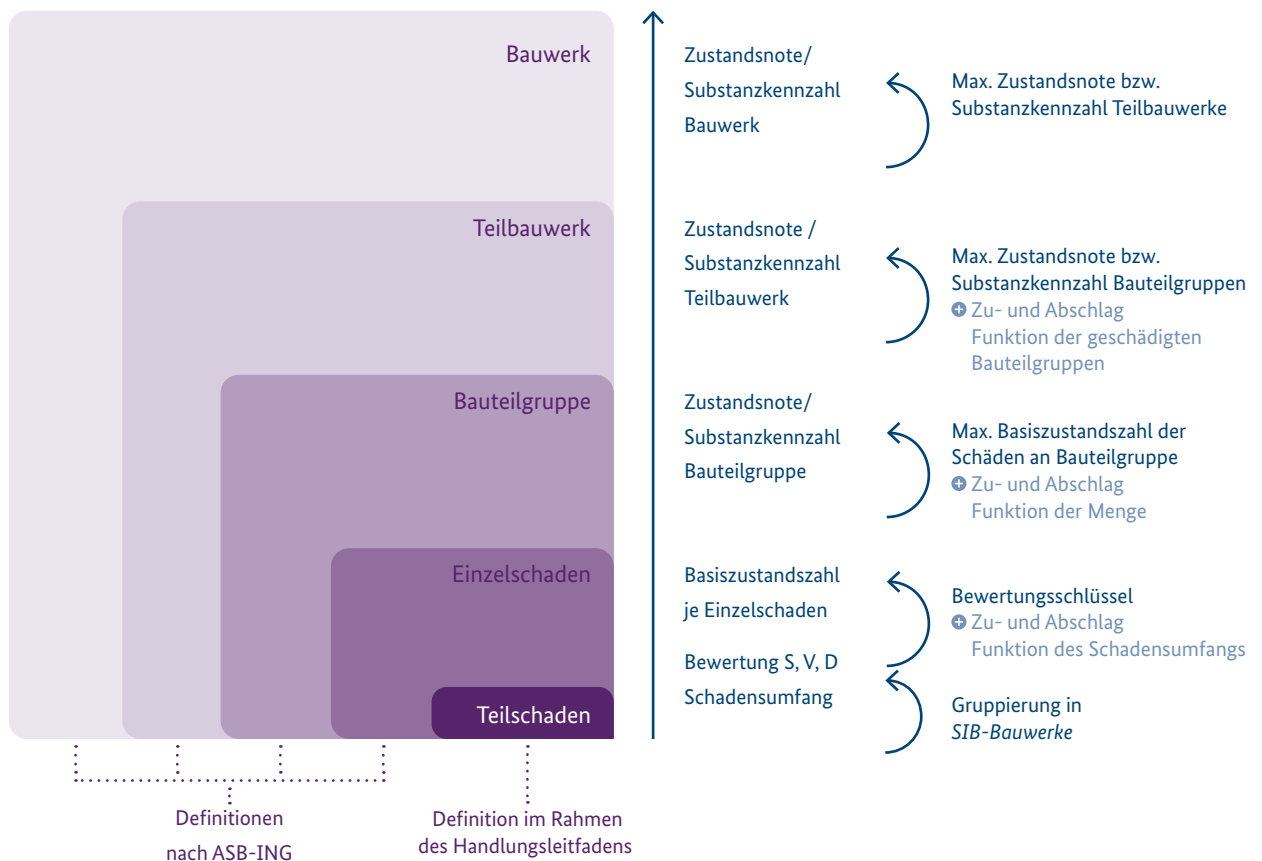


ABB 6.3 Schematische Darstellung der Aggregation der Zustandsnote

diese sind in ABB 6.4 dargestellt. Eine genaue Beschreibung der Gegebenheiten in den einzelnen Zustandsnotenbereichen ist der RI-EBW-PRÜF zu entnehmen.

Die Zustandsnote gibt Aufschluss über die Dringlichkeit der am Bauwerk notwendigen Maßnahmen. Durch die Zustandsnote werden weder direkte Informationen über Art, Aufwand oder Kosten der notwendigen Maßnahmen gegeben, noch ist damit eine Einschätzung der Substanz, des Restwerts oder der Restnutzungsdauer des Bauwerks möglich [Mertens, 2015].

Die Berechnung der Zustandsnote für das Teilbauwerk folgt einem Aggregationsprozess. Im ersten Schritt wird anhand der vorliegenden Schadensbewertung für S, V und D eine Basiszustandszahl für jeden erfassten Einzelschaden vergeben und bildet damit die Grundlage der Bewertung. Die Vergabe basiert auf den in [Haardt, 1999] definierten Bewertungsschlüsseln. Jeder Einzelschaden ist im Zuge der Verortung und der Wahl anhand der Schadensbeispiele einer nach der ASB-ING definierten Bauteilgruppe zugeordnet (z. B. Überbau, Lager, Vorspannung).

Basierend auf allen Einzelschäden einer Bauteilgruppe wird eine Zustandsnote der Bauteilgruppe berechnet. Die maximale Basiszustandszahl aller Schäden ergibt dabei die Zustandsnote der Bauteilgruppe. Das beschriebene Vorgehen erfolgt für alle Bauteilgruppen eines Teilbauwerks.

Zustandsnotenbereiche

- 1,0 – 1,4 sehr gut
- 1,5 – 1,9 gut
- 2,0 – 2,4 befriedigend
- 2,5 – 2,9 ausreichend
- 3,0 – 3,4 nicht ausreichend
- 3,5 bis 4,0 ungenügend

ABB 6.4 Differenzierung der verschiedene Zustandsnotenbereiche

Die Aggregation der Zustandsnote des Teilbauwerks erfolgt schlussendlich durch die Auswahl der maximalen Zustandsnote der Bauteilgruppen. Die maximale Zustandsnote der Teilbauwerke bildet die Zustandsnote des Bauwerks.

Durch die Aggregation von einer Ebene zur nächsten (ABB 6.3) ist immer der Eintrag mit der höchsten Bewertung maßgebend. Eine Navigation „nach unten“ bleibt dennoch notwendig, um die Ursachen für den aktuellen Zustand erörtern zu können.

Zusätzlich zu den Zustandsnoten der Bauteilgruppen und des Teilbauwerks wird auf beiden Ebenen die **Substanzkennzahl** ermittelt. Die Substanzkennzahl wird nach dem gleichen Aggregationsverfahren berechnet, wobei die Verkehrssicherheitsbewertung der Schäden nicht berücksichtigt wird ($V=0$). Im Gegenzug zur Zustandsnote ermöglicht die Substanzkennzahl dadurch die Einschätzung der Bauwerkssubstanz und kann bei Restwertermittlungen im Zuge von Bilanzwertberechnungen zum Einsatz kommen [Mertens, 2015].

Die zuvor genannte Vorgehensweise hat sich in den letzten Jahren bewährt und bildet deshalb eine wichtige Basis im Kontext des Digitalen Zwillings zur Einbindung des visuellen Zustands. Zustandsinformationen werden im Kontext des Digitalen Zwillings mit weiteren Informationen angereichert und gemeinsam aggregiert, [7 Kapitel 9](#).

Gespeicherte Informationen in der Bauwerksprüfung

Im Zuge der Bauwerksprüfung werden unterschiedlichste Informationen über das Bauwerk und dessen Zustand generiert. Sämtliche Informationen fließen konsolidiert in *SIB-Bauwerke* zusammen. Da das Programm als Desktopanwendung entwickelt wurde, finden die Informationen mit heutigem Entwicklungsstand allerdings i. d. R. erst im Nachgang zur Bauwerksprüfung Eingang.

Der Zeitpunkt sowie die Art der Prüfung werden im Kontext der Prüfungsdaten gespeichert. Darüber hinaus werden die Zeitpunkte der nächsten Bauwerksprüfungen festgehalten. Alle festgestellten Schäden werden im Nachgang an die Bauwerksprüfung in *SIB-Bauwerke* dokumentiert. Erfasst werden semantische Informationen in Form der Schadensattribute (u. a. textliche Beschreibung des Schadens, des Schadenumfangs, der Schadensverortung und Schadensbewertung). Zusätzlich zu den reinen Attributen kann für jeden Schaden ein Bild zur Verdeutlichung der Schadenssituation im Programm eingebunden werden. Darüber hinaus kann zur Lokalisierung der Schäden eine Schadensskizze, z. B. als Abwicklung der Bauteilgeometrie, angefertigt werden.

Weiterhin werden in *SIB-Bauwerke* Hinweise hinterlegt, auf welche Schäden bei den nächsten Prüfungen besonders zu achten ist. Die im Rahmen der Bauwerksprüfung vergebenen Maßnahmenempfehlungen werden ebenfalls in Bezug auf die zu beseitigenden Schäden in *SIB-Bauwerke* gespeichert.

Den Abschluss einer Bauwerksprüfung bildet ein Prüfbericht, der sämtliche Prüfungs- und Schadensdaten sowie

Maßnahmenempfehlungen des/der Prüfer:in auf Teilbauwerksebene beinhaltet. Zusätzlich ist ein Beiblatt beige-fügt, in dem die Zustandsnoten und Substanzkennzahlen der Bauteilgruppen und des Teilbauwerks enthalten sind und übersichtlich dargestellt werden. Prüfberichte für ein einzelnes Teilbauwerk liegen digital in *SIB-Bauwerke* vor.

Der Umfang der möglichen erfassbaren Informationen suggeriert eine vollständige, eindeutige und informative Grundlage über das Bauwerk und seinen Zustand. In der Realität erfolgt die Erfassung der zahlreichen Informationen in unterschiedlichsten Detailgraden, sodass häufig mit weniger informativen Dokumentationen zu rechnen ist. Insbesondere ist die Lokalisierung der Schäden bzw. Teilschäden in Schadensskizzen durch die redundante Erfassung in semantischer und zeichnerischer Form nicht immer eindeutig und verknüpft. Bei größeren und komplexeren Bauwerken führt dieser Sachverhalt zu Lücken in der Nachvollziehbarkeit der Schadenshistorie. Auch die Verknüpfung der Schäden und der Maßnahmenempfehlungen erfolgt in den wenigsten Fällen mit ausreichender Genauigkeit.

2 – Bauwerksprüfung im Rahmen des Digitalen Zwillings

Die Bauwerksprüfung als wichtige

Datenquelle – auch im Digitalen Zwilling

Ein Digitaler Zwilling kann und soll die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 nicht ersetzen. Die Prüfung des Bauwerks ist heute mit ihren Prüfergebnissen und Dokumentationen von Schäden die wichtigste Informationsquelle für das Erhaltungsmanagement, weshalb der Digitale Zwilling als Werkzeug zu verstehen ist, welcher auf dieser wichtigen Basis aufbaut und die Bauwerksprüfung in den oben beschriebenen Defiziten unterstützt.

Aktuelle Defizite von SIB-Bauwerke im Hinblick auf die Integration im Digitalen Zwilling

Seit der Einführung bildet *SIB-Bauwerke* einen etablierten bundesweiten Standard u. a. bei den Auftragsverwaltungen der Länder und ebenfalls bei der Autobahn GmbH. *SIB-Bauwerke* ist momentan die zentrale Speicherstelle für die digitale Erfassung und Speicherung von Konstruktions- und Zustandsinformationen.

Auch im Kontext des Digitalen Zwillings wird weiterhin eine einzige, zentrale und einheitliche Datenquelle (Single Source of Truth) für die visuellen Zustandsinformationen benötigt.

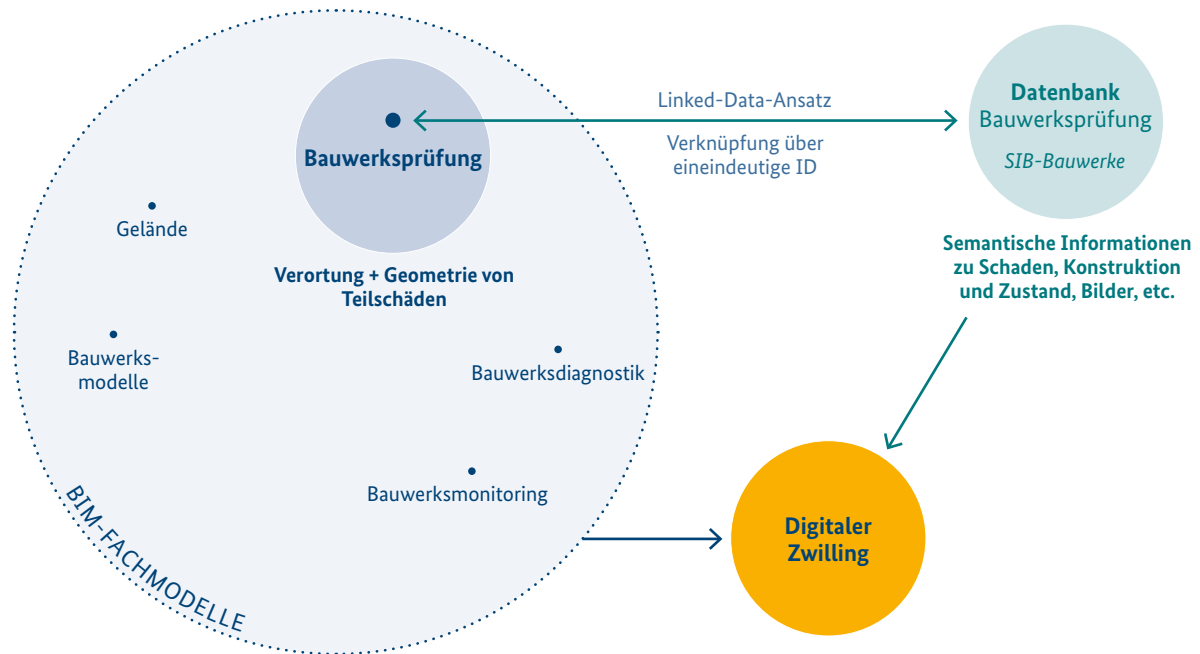


ABB 6.5 Verknüpfung mit dem BIM-Fachmodell „Bauwerksprüfung“ im Kontext des Digitalen Zwillings

Allerdings weist die aktuelle Version von *SIB-Bauwerke* Defizite auf, die eine Verwendung als nachhaltige Datenquelle im Rahmen des Digitalen Zwillings erschweren.

- Die Dokumentation der Schäden erfolgt derzeit schwerpunktmäßig über die Schadensattribute. Schadenskataster zur detaillierten Lokalisierung werden nicht immer konsequent erstellt, in mehreren unabhängigen nicht bearbeitbaren Dateien gehalten und können nicht direkt mit den Schadensattributen aus der Datenbank verknüpft werden. Dies bildet eine potenzielle Fehlerquelle bei der Datenpflege.
- BIM hat sich in den letzten Jahren zu einer zentralen Methodik entwickelt, um relevante Bauwerksinformationen über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks konsistent zu erfassen und zu verwalten sowie eine transparente Kommunikation zwischen den Beteiligten zu ermöglichen. Derzeit verfügt *SIB-Bauwerke* über keine direkte Schnittstelle zur BIM-Methodik.
- Der lokale dateibasierte Arbeitsprozess in *SIB-Bauwerke*, insbesondere mit beauftragten Ingenieurbüros oder Baufirmen, führt zu einer Einschränkung der Interoperabilität des Systems sowie Synchronizität des Datenbestands.

Die beschriebenen Defizite zeigen, dass der gegenwärtige Entwicklungsstand von *SIB-Bauwerke* für erste Prototypen von Digitalen Zwillingen genutzt werden kann. Mittelfristig ist allerdings eine Weiterentwicklung dieser Single Source of Truth notwendig, um direkt und automatisiert im Digitalen Zwilling eingebunden werden zu können. Erst dadurch entstehen die Mehrwerte der BIM-Methodik im Hinblick auf eine eindeutige Lokalisierung der einzelnen Teilschäden und eine Verknüpfung mit der Datenbank. An dieser Stelle sei auf die derzeitige Entwicklung des webbasierten Programms *SIB-Bauwerke 2.0* hingewiesen [*SIB-BW2.0*].

Weiterentwicklungsbedarf zur Abbildung von Informationen aus der Bauwerksprüfung im Digitalen Zwilling

Der Weiterentwicklungsbedarf resultiert unmittelbar aus den zuvor genannten Defiziten und kann in verschiedene Umsetzungslösungen münden. Eine präzise Beschreibung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt allerdings noch nicht möglich, da die Anforderungen für die Weiterentwicklung von *SIB-Bauwerke* als zentrales Programm für die Bundesfernstraßen durch die entsprechenden Gremien des Bundes definiert werden müssen. Nachfolgend wird deshalb eine Möglichkeit, basierend auf den Erfahrungen der Autor:innen, vorgestellt.

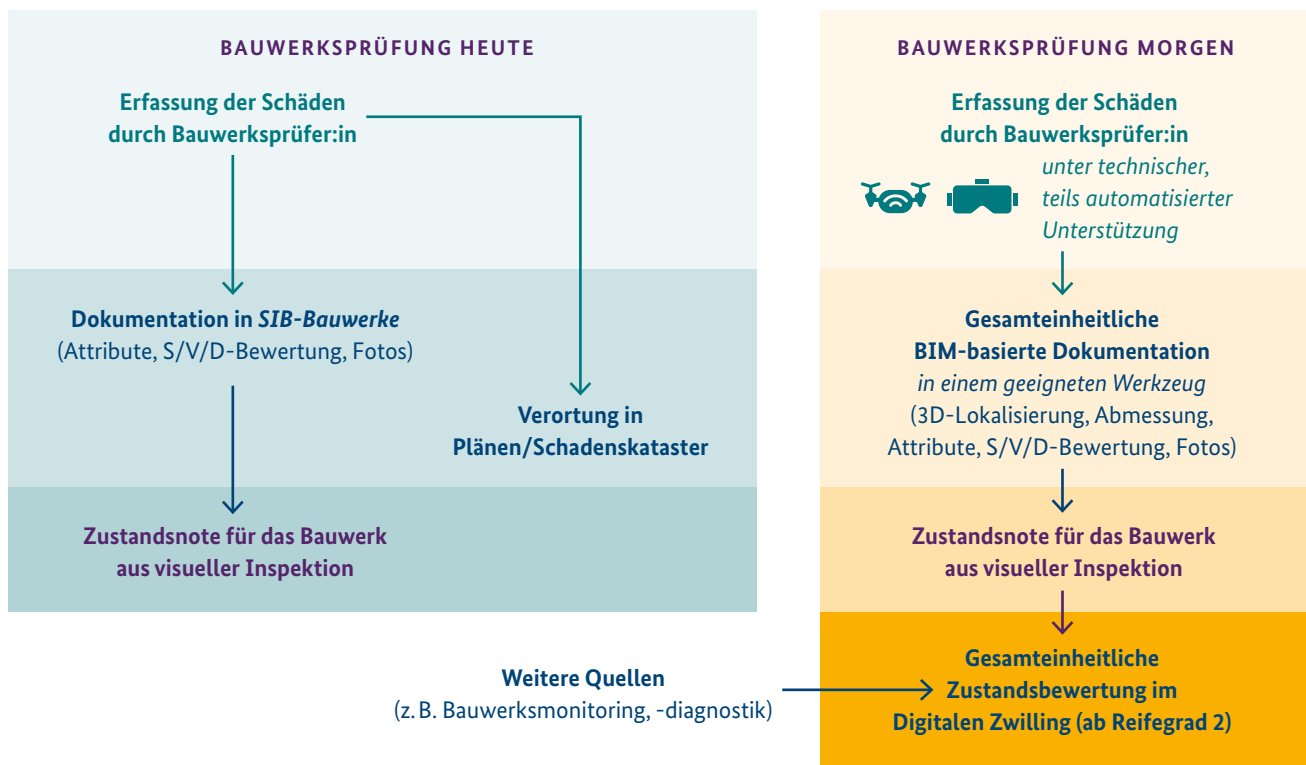


ABB 6.6 Bauwerksprüfung heute und morgen

Die Überführung von SIB Bauwerke zu einer cloud- und browserbasierten Anwendung mit Registrierung über verschiedene Nutzer:innenrollen erscheint unumgänglich. Der Zugang wird dadurch vereinfacht und die Anwendung besser administrierbar. Die Daten liegen zentral und der Zugriff für übergreifende Auswertungen wird simpler. Durch Verwendung offener und standardisierter Datenformate sowie durch Implementierung entsprechender Schnittstellen kann die beschriebene Weiterentwicklung von *SIB-Bauwerke* als Single Source of Truth durch einen automatisierten Datenaustausch im Digitalen Zwilling integriert werden. Je nach Reifegrad des Digitalen Zwillings kann der Datenaustausch im Digitalen Zwilling entweder rein konsumierend oder auch schreibend erfolgen, wenn unterstützende Funktionalitäten vorliegen.

Weiterhin erscheint auch die Implementierung einer BIM-Schnittstelle unerlässlich. Parallel zur Erfassung der Konstruktions- und Zustandsdaten in einer einheitlich strukturierten Datenbank könnten die Schäden in einem eigenständigen BIM-Fachmodell hinsichtlich ihrer Position, ihrer Form, ihrer Abmessung und Ausbreitung erfasst und nachgehalten werden. Durch die Zuweisung einer schadensspezifischen, einmaligen und eindeutigen ID können mit jedem Schaden weitere Informationen, wie beispielsweise Fotos der Schäden, entsprechend mit einem Linked-Data-Ansatz verknüpft werden. Ein weiterer Ansatz

ist die Überführung der ASB-ING in eine moderne objektorientierte Struktur, um anschließend einen Linked-Data Ansatz umzusetzen, der direkt Informationen aus *SIB-Bauwerke* übersetzen kann [Göbels & Beetz, 2021], [Göbels, 2021]. Das BIM-Fachmodell für Schäden (Fachmodell Bauwerksprüfung, 7 Kapitel 5) ersetzt den aktuellen Schadenskataster und ermöglicht eine direkte Verknüpfung der verorteten Teilschäden zum Schadenseintrag in der Datenbank, ohne die dort implementierten bewährten Prozesse tiefgreifend ändern zu müssen. Im Digitalen Zwilling werden die Informationen verknüpft dargestellt und weiterverwendet, siehe ABB 6.5.

Dieser Ansatz wurde im Projekt *smartBRIDGE Hamburg* umgesetzt [Wedel et al., 2022]. Im Rahmen des Demonstrators konnten für ausgewählte Schäden die Schadenskataster in das jeweilige BIM-Fachmodell überführt und mit den Inhalten aus *SIB-Bauwerke* verknüpft werden. Wegen der noch fehlenden Schnittstelle seitens *SIB-Bauwerke* musste der Import vorerst manuell erfolgen, das Ergebnis zeigt aber, dass die oben aufgeführten Ansätze funktionieren.

Im ersten Schritt muss die Pflege der Informationen (semantische Informationen, BIM-Fachmodell) weiterhin manuell von Bauwerksprüfer:innen erfolgen. Eine konsequente Erfassung der Informationen hätte den Vorteil, dass eine eindeutige und nachvollziehbare Schadenshistorie entsteht, sodass in Zukunft Schadensentwicklungen besser

beschrieben und bewertet werden können, was sich wiederum positiv auf die Erhaltung auswirkt. Die automatisierte Schadensverortung sowie Schadenserfassung für das BIM-Fachmodell muss in weiteren Schritten integriert werden und zuverlässig funktionieren, um die Pflege und Informationsaufnahme zu begünstigen.

Die Weiterentwicklung der Aufgabe des/der Bauwerksprüfer:in

Das grundsätzliche Erfordernis der Durchführung von Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 erfährt keine Änderung. Durch die Weiterentwicklung der Werkzeuge werden sich aber zukünftig die Aufgaben des/der Bauwerksprüfer:in entwickeln. So muss anfangs zusätzlich zu den bereits anfallenden Aufgaben eine detaillierte Erfassung der Teilschäden im BIM-Fachmodell erfolgen. Dies erfordert vor Ort besonderen Fokus auf die Aufnahme des genauen Schadensorts und der detaillierten Abmessungen, um diese später im Modell verorten und abbilden zu können. Sämtliche andere Aufgaben bleiben im ersten Schritt gleich.

Mit der Weiterentwicklung der Schadenserfassung und direkten Verortung durch unterschiedliche neue Technologien (Drohnen, Roboterhunde, AR-Brille o. ä.), wird der Aufwand für den/die Bauwerksprüfer:in im Hinblick auf die Erfassung und Dokumentation wiederum reduziert [z. B. *Bahlau, 2021*], [*Smarsly et al., 2022*], [*Mandirola et al., 2022*], [*Jeong et al., 2020*]. Verortungen müssen nicht mehr über den Zwischenschritt der Planzeichnung erfolgen, sondern können direkt im mitgeführten Modell über mobile Endgeräte wie Smartphones oder Tablets teils automatisch eingetragen werden (**ABB 6.6**). Das Forschungsvorhaben „Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität“ zeigte beispielhaft das Unterstützungspotenzial digitaler Methoden und Technologien in der beschriebenen Schadenserfassung vor Ort am Bauwerk [*Bahlau, 2021*].

Unterstützung der Bauwerksprüfung durch den Digitalen Zwilling

Ist der beschriebene und notwendige Weiterentwicklungsbedarf geschehen und der Digitale Zwilling liegt mit seiner Vollständigkeit sowie den zusätzlichen Zustandsinformationen ([7 Kapitel 7](#), [7 Kapitel 8](#) und [7 Kapitel 9](#)) vor, entfaltet sich der deutliche Unterstützungsmehrwert an unterschiedlichen Stellen in der Bauwerksprüfung.

Durch die dreidimensionale genaue Verortung der historisierten Schäden kann eine Bauwerksprüfung deutlich

effizienter vorbereitet und durchgeführt werden. Auch für neues Personal am Bauwerk vereinfacht sich der Einstieg. Insbesondere bei der Durchführung der Bauwerksprüfung vor Ort kann sehr schnell nachvollzogen werden, ob ein Schaden neu ist und, falls er schon bestand, wie sich dieser über die Zeit entwickelt hat. Dadurch kann die Bewertung objektiver erfolgen.

Bedingt durch die Verortung weiterer zustandsrelevanter Informationen unterschiedlichster Quellen und Arten in einem Modell, kann während der Bauwerksprüfung auch vereinfacht auf die Daten zugegriffen werden und die Nutzung der Informationen wird erleichtert. Datensilos in unterschiedlichen Programmen sowie unverortete Informationen werden vermieden. Informationen können somit effizienter in Zusammenhang mit neu gewonnen Erkenntnissen aus der Bauwerksprüfung gesetzt werden, wodurch wiederum qualitativere Schlussfolgerungen und Handlungen abgeleitet werden können.

Werden nun zudem Informationen aus dem Monitoring oder den diagnostischen Untersuchungen hinzugezogen, steht dem/der Bauwerksprüfer:in eine größere, echtzeitaktuelle und damit bessere Entscheidungsgrundlage für die Beurteilung des Bauwerkszustands zur Verfügung, die am Bauwerk direkt aufgerufen werden kann. So können bei Feststellung von neuen Schäden oder von Entwicklungen bestehender Schäden die zusätzlichen Informationen, die entweder in der Nähe verortet sind oder thematisch damit zusammenhängen, zur Definition der Ursache(n) oder zur Erklärung der Entwicklung herangezogen werden.

Mit der Weiterentwicklung der Verfahren zur automatisierten Schadenserfassung und direkten Verortung werden Pläne zur Markierung von Schäden nicht mehr notwendig, da das digitale Modell mitgenommen (bspw. als App auf mobilen Endgeräten) und zur Verortung der Schäden direkt im Modell verwendet werden kann. Bereits gut funktionierende Ansätze sind in diesem Zusammenhang beispielsweise die Erkennung von Rissen oder Betonabplatzungen mittels automatisierter maschineller Lernverfahren, welche als Eingangsdaten durch Drohnen oder ähnliche bildgebende Verfahren erfasste Fotoaufnahmen oder Scans des Bauwerks verwenden [z. B. *Morgenthal et al., 2019* oder *Hallermann et al., 2018*]. Die Arbeit des/der Bauwerksprüfer:in kann sich, statt auf Dokumentation, stärker auf die wertvolle Bewertung konzentrieren, wodurch Arbeiten am Bauwerk effizienter bei zudem höherer Qualität ausgeführt werden können.



7 – Bauwerksdiagnostik: Detailinformationen aus dem Bauwerksinneren

Kurzfassung

Die Fachdisziplin der Bauwerksdiagnostik bietet vielfältige Methoden und Messverfahren für die realitätsnahe Ermittlung von Bestands- und Zustandsinformationen, auch über den visuellen Eindruck hinaus. Sie ermöglicht einen Blick in das Bauwerksinnere und bietet damit die Möglichkeit, Digitale Zwillinge um wesentliche zustandsrelevante Tiefeninformationen zu erweitern. Bauwerksdiagnostische Untersuchungen gehen in der Tiefe im Allgemeinen über den Umfang einer Bauwerksprüfung hinaus. Sie tragen zu konkreten Untersuchungszeitpunkten und anlassbezogen dazu bei, wesentliche Grundlagen für beispielsweise rechnerische Bewertungen oder durchzuführende Erhaltungsmaßnahmen zu gewinnen. Materialparameter müssen dadurch nicht anhand von Bestandsunterlagen geschätzt werden, sondern werden direkt am Bauwerk gemessen. Die dafür erforderlichen Untersuchungen gelingen zunehmend durch zerstörungsfreie Messverfahren, ergänzt durch lokale minimalinvasive Eingriffe in die vorhandene Bausubstanz. Ein geregelter Anwendungsfall der Bauwerksdiagnostik ist die Objektbezogene Schadensanalyse (OSA), die schadensbezogen auf Anordnung der Bauwerksprüfung erfolgt und deren Ergebnisse unmittelbar Einfluss auf die Schadensbewertung im Rahmen der Bauwerksprüfung nehmen.

Um die Potenziale von Diagnostikdaten bestmöglich für Digitale Zwillinge und die damit verbundene Bauwerkszustandsbewertung nutzen zu können, existieren besondere Anforderungen. Die Basis diagnostischer Untersuchungen bildet das Untersuchungskonzept bzw. die Untersuchungsplanung mit Definition von Art, Umfang

und Lage der erforderlichen Untersuchungen sowie einer Beschreibung der Randbedingungen am Bauwerk. Bereits in dieser Konzeptphase werden Grundsteine für die optimale Datenbereitstellung nach Vorliegen der Untersuchungsergebnisse gelegt. Essenzielle Voraussetzung für die spätere Integration in Digitale Zwillinge sowie damit verbundene Aus- und Bewertungen ist eine strukturierte, zentralisierte Datenerfassung auf Grundlage eines möglichst nachhaltigen Datenmodells. Bestandteile der Dokumentation sind, neben den konkreten Messdaten, Angaben zur semantischen Verortung sowie zu Messbedingungen und -parametern. Im Hinblick auf die spätere Integration in BIM-Fachmodelle der Diagnostik sowie die räumliche Verknüpfung mit den weiteren Datenquellen des Digitalen Zwillings ist darüber hinaus die Verortung oder Georeferenzierung der erhobenen Daten von besonderer Bedeutung. Bei der Erstellung der BIM-Fachmodelle wird aufgrund der Komplexität und Heterogenität von Diagnostikdaten der Linked-Data-Ansatz verfolgt. Anhand einer eindeutigen ID werden die Objekte mit einer Diagnostikdatenbank verknüpft, in der Rohdaten und bewertete Daten sowie zugehörige Medien abgelegt sind.

Analog der Messdaten des Monitorings werden die Diagnostikdaten mehrstufigen Auswerte- und Aggregationsprozessen unterworfen, bevor sie in konsumierbarer Form als Informationen in Digitalen Zwillingen zur Verfügung stehen. Sie werden dort einerseits als Eingangsparameter für Zustandsindikatoren verwendet, können jedoch auch unabhängig davon Detailinformationen für die Bewertung konkreter Bauwerksbereiche oder Zustände liefern.

1 – Diagnostik als Datenquelle Digitaler Zwillinge

Bauwerksdiagnostik, Bauwerksprüfung und Bauwerksmonitoring

In Anlehnung an bestehende Definitionen beschreibt Diagnostik die umfassende Untersuchung eines Sachverhaltes, mit dem Ziel der Feststellung des Ursprungs oder der Ursache eines bestimmten Zustandes (i.A.a. [Stevenson, 2010]). Dieser Einordnung folgend, können auch die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 sowie die Umsetzung eines Bauwerksmonitorings als Diagnostik interpretiert werden. Im vorliegenden Beitrag erfolgt die Abgrenzung zu den anderen Datenquellen Digitaler Zwillinge daher anhand folgender Gesichtspunkte:

- Diagnostik meint Bauwerksuntersuchungen, die anlassbezogen durchgeführt werden und einem definierten Untersuchungsziel dienen. Diese Zielstellung kann sehr unterschiedlich sein und reicht von der Ermittlung tatsächlicher Materialeigenschaften bis hin zu komplexen Bestandsaufnahmen zur Kompensation mangelnder Bestandsunterlagen (i.A.a. [Assing et al., 2020]).
- Diagnostik meint darüber hinaus Bauwerksuntersuchungen, die in der Tiefe über eine visuelle Begutachtung und Inspektion hinausgehen, in der Breite im Gegensatz zur Bauwerksprüfung jedoch im Allgemeinen nur auf Teilbereiche eines Bauwerks ausgelegt sind (i.A.a. [BMVI LPI-ING, 2020]).

→ Im Gegensatz zum Bauwerksmonitoring finden diagnostische Untersuchungen in der Regel zu konkreten Untersuchungszeitpunkten statt, die Frequenz der Datenerfassung ist vergleichsweise gering (einmalig bis mehrmalig, nicht dauerhaft).

Potenziale für die Bestandsbewertung

Die vielfältigen Untersuchungsmethoden der Bauwerksdiagnostik besitzen eine große Relevanz für den Betrieb und die Erhaltung von Infrastrukturbauwerken. Sie alle haben gemein, dass sie neben dem visuellen, vorwiegend oberflächlichen Eindruck insbesondere auf Detailinformationen zum Bestand und Zustand eines Bauwerks aus dem Bauwerksinneren abzielen. Diagnostische Untersuchungen liefern damit wertvolle Grundlagen zur Bewertung von Schadensursachen und einen essenziellen Baustein für die Entwicklung effektiver sowie effizienter Erhaltungsmaßnahmen. Besondere Potenziale liegen in der Erkundung von Mängeln, verdeckten Schäden oder eingeschränkten Dauerhaftigkeiten, deren Folgen mitunter noch nicht sichtbar sind. In diesem Fall liefert Diagnostik, neben den Messdaten zur Beurteilung des Schadens selbst, wichtige Anhaltspunkte für künftige Bauwerksprüfungen oder auch eine messtechnische Dauerüberwachung des Zustands.

Entsprechend **ABB 7.1** können diagnostische Untersuchungen in unterschiedlichen Phasen der Bauwerkserhaltung und auch im Zuge der Planung sowie Durchführung des Rückbaus erfolgen. Je strukturierter und rückführbarer die Informationen über die Lebensdauer dokumentiert

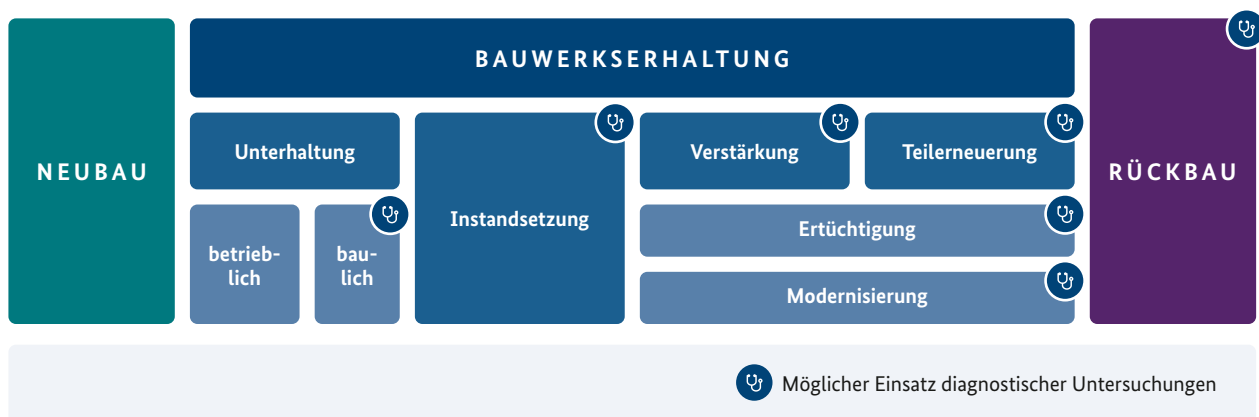


ABB 7.1 Diagnostik in der Bauwerkserhaltung in Anlehnung an [BMVI RPE-ING, 2020]

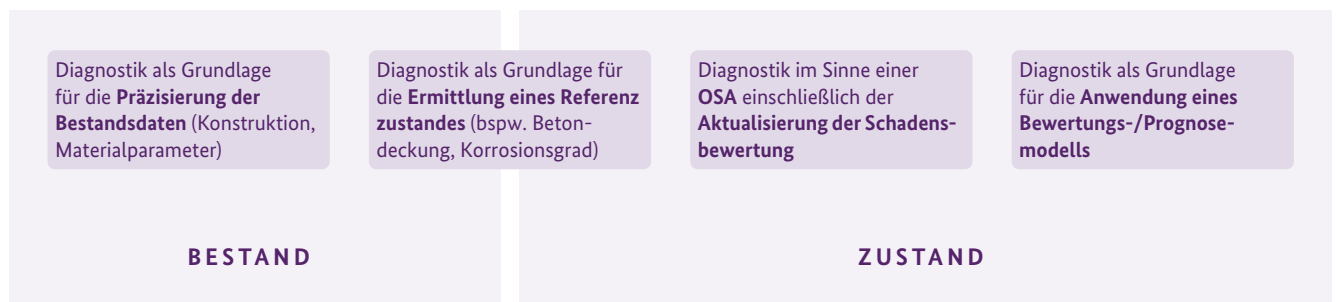


ABB 7.2 Einordnung von Diagnostikdaten zur Präzisierung und Konkretisierung Digitaler Zwillinge

sind, desto größer ist das Potenzial für die umfassende Bestandsbewertung, insbesondere über die Zeit betrachtet, sowie im Abgleich mit weiteren Daten aus Bauwerksprüfung und Monitoring. Weiterhin trägt eine strukturierte, zentralisierte Dokumentation zur Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Diagnostik bei, da einmalig erhobene Daten zu einem späteren Zeitpunkt weiterverwendet werden können. Dieser Sachverhalt besitzt auch im Neubau Relevanz, da bereits während der Bauphase diagnostische Daten erfasst werden, die im Lebenszyklus relevant für die Bestandsbewertung sind, wie beispielsweise Materialkennwerte aus Konformitätsprüfungen.

Ein weiterer Mehrwert diagnostischer Untersuchungen liegt in der Bereitstellung tatsächlich gemessener Bauwerks- bzw. Materialeigenschaften gegenüber der häufig auf Bestandsunterlagen oder gar Annahmen beruhenden Vorgehensweise. Zugrundeliegende Berechnungsmodelle können hinsichtlich des tatsächlichen Bestands und aktuellen Zustands präzisiert werden [Küttenbaum et. al., 2019].

Mehrwert diagnostischer Untersuchungen in Digitalen Zwillingen

Realitätsnahe Zustandsbewertungen basieren auf einer Kombination aus visuellem Eindruck an der Bauteiloberfläche, Strukturinformationen aus dem Bauwerksinneren und der Überwachung von Veränderungen über die Zeit. Im Sinne der Zusammenführung der wesentlichen zustandsrelevanten Daten ist die Diagnostik daher eine wichtige Datenquelle für Digitale Zwillinge. Mehrwerte entstehen insbesondere durch die Präzisierung bzw. Konkretisierung des zugrundeliegenden Bestandsmodells und der Eingangsparameter für rechnerische Bewertungen, Zustandsindikatoren oder Prognosemodelle (ABB 7.2). Beispielhafte Zielstellungen der Diagnostik im Kontext Digitaler Zwillinge sind:

- der Soll-Ist-Abgleich zwischen Planunterlagen und realem Bauwerk, beispielsweise im Hinblick auf Anzahl, Art und Verlauf von Spanngliedern

- die Ermittlung von Eingangsgrößen für die rechnerische Bewertung, beispielsweise durch Ermittlung der physikalischen Materialeigenschaften, z. B. Betondruckfestigkeit oder Stahlfestigkeit
- die Ermittlung von Eingangsgrößen für die Planung und Ausführung von Erhaltungsmaßnahmen, beispielsweise durch Messung der Betondeckungsverteilung und Schadsalzbelastung
- die Erkundung potenzieller verdeckter Zustände und Schäden zur Erhöhung der Aussagesicherheit von rechnerischen Bewertungen, beispielsweise durch Ermittlung des Verpresszustandes der Spannglieder
- die Ermittlung eines Referenzzustandes zum Untersuchungszeitpunkt t zur Erhöhung der Aussagesicherheit von rechnerischen Bewertungen, beispielsweise durch Ermittlung des Korrosionszustandes von Bewehrungselementen
- die Ermittlung von Eingangsgrößen für die Anwendung von Prognosemodellen, beispielsweise im Hinblick auf den Korrosionsfortschritt

Zusätzliche Informationen zur Datenaggregation und -bewertung im Sinne von Zustandsindikatoren und Prognostik können [Kapitel 9](#) entnommen werden.

Ein geregelter Sonderfall der Bauwerksdiagnostik ist darüber hinaus die objektbezogene Schadensanalyse (OSA, [Kapitel 2.1](#) und [Kapitel 2.2](#)). Anlass der Bauwerksuntersuchungen bietet in dem Fall ein konkreter Schaden oder ein Schadensbild der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (schadensbezogene Diagnostik). Die OSA wird im Zuge der Bauwerksprüfung zur Abklärung der Schadensursache und Beurteilung der Auswirkungen auf den dokumentierten Bauwerkszustand angeordnet. Eine Besonderheit gegenüber anlassbezogener, schadensunabhängiger Diagnostik ist die planmäßige Aktualisierung der Schadensbewertung hinsichtlich S, V und D ([Kapitel 6.1](#)). Anforderungen an die Planung und Durchführung einer OSA sind in der RI-ERH-ING im Leitfaden OSA geregelt [BMVBS OSA, 2007].

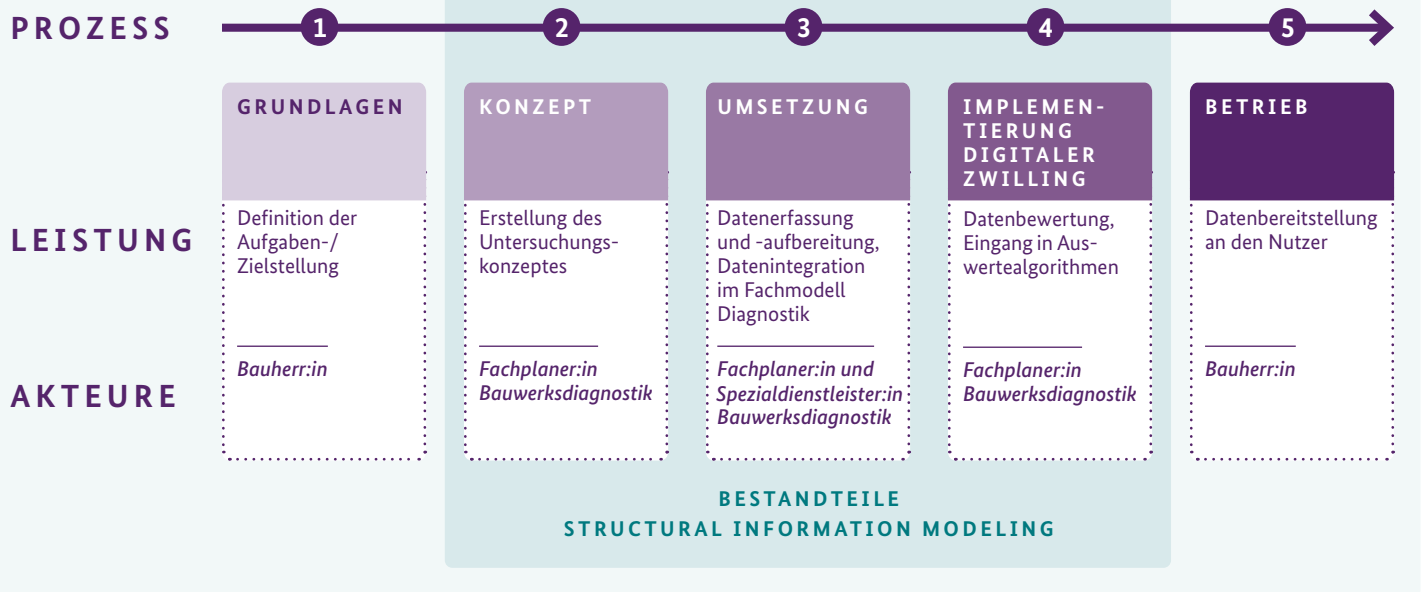


ABB 7.3 Prozesskette Bauwerksdiagnostik und Kennzeichnung der Leistungsbausteine des Structural Information Modeling aufbauend auf [Kapitel 4.4](#)

2 – Methodisches Vorgehen: Structural Information Modeling

Diagnostikdaten resultieren aus der Anwendung einer Vielzahl zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Untersuchungsmethoden im Rahmen anlassbezogener Bauwerksuntersuchungen. Entsprechend bilden sie den Bestand oder Zustand an konkreten Untersuchungsstellen zu konkreten Untersuchungszeitpunkten ab. Raum- und Zeitbezug sind bei der Datenbewertung von großer Relevanz.

Die Planung und Umsetzung von diagnostischen Untersuchungen im Bereich der Bundesfernstraßen ist normativ kaum geregelt. Orientierende Angaben zu durchzuführenden Bauwerksuntersuchungen an Ingenieurbauwerken sind im Leitfaden LPI-ING [BMVI LPI-ING, 2020] oder auch Leitfaden OSA dokumentiert [BMVBS OSA, 2007]. Die Normenlage bedingt heterogene Vorgehensweisen, insbesondere im Hinblick auf die Dokumentation und Bereitstellung der am Bauwerk gewonnenen Diagnostikdaten, sodass die Interoperabilität der Ergebnisse mit den weiteren am Bauwerk erhobenen Informationen, sowie deren Nachhaltigkeit und Rückführbarkeit, bisher eingeschränkt ist.

Um dem perspektivisch entgegenzuwirken, werden im nachfolgenden Kapitel Anforderungen an die Integration diagnostischer Daten in Digitale Zwillinge zusammengetragen. Die erforderlichen Prozessschritte und beteiligten Akteure sind ergänzend zu [Kapitel 4.4](#) schematisch in [ABB 7.3](#) dargestellt. Zur Beschreibung des methodischen Vorgehens wird dabei in Analogie zur BIM-Methodik der

Begriff Structural Information Modeling eingeführt: Die vernetzte Erfassung, Aufbereitung und Verarbeitung von Daten aus dem Bauwerks- und Bauteilinneren zur realitätsnahen Abbildung der Bauwerksstruktur für die kollaborative Bearbeitung und Bewertung (siehe auch [Schacht et. al., 2022]).

Das Untersuchungskonzept als Fundament diagnostischer Untersuchungen

Die wesentliche Basis diagnostischer Untersuchungen bildet das Untersuchungskonzept, vergleichbar mit dem Messkonzept des Monitorings ([Kapitel 8.2](#)). Insbesondere bei komplexen Brückenbauwerken kann die Konzeptphase auch zweistufig erfolgen: Mit der Erstellung eines Untersuchungskonzeptes zur Definition des Untersuchungsziels und der dafür erforderlichen Untersuchungsleistungen in Stufe 1 und einer darauf aufbauenden Konkretisierung von Art, Lage und Umfang der Untersuchungen in Form einer Untersuchungsplanung (vergleichbar mit einer Ausführungsplanung der Diagnostik) in Stufe 2. Zur Reduzierung der Komplexität wird nachfolgend ausschließlich von Untersuchungskonzepten gesprochen. Es obliegt dem/der Bauherr:in gemeinsam mit dem/der Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik zu entscheiden, ob projektspezifisch eine zweistufige Konzeptphase erforderlich ist.

Das Untersuchungskonzept beinhaltet eine Zusammenstellung der zur Erreichung eines spezifischen Untersuchungsziels erforderlichen Untersuchungsleistungen [Schacht et. al., 2022]. Es ist von einem/einer Fachplaner:in

Bauwerksdiagnostik aufzustellen, der/die mit den unterschiedlichen Konstruktionen und Materialien, Schäden und Mängeln sowie Untersuchungs- und Auswertemethoden vertraut ist (↗ Kapitel 4.4.1). Das zugrundeliegende Untersuchungsziel kann entsprechend ↗ Kapitel 7.1 sehr individuell sein und dementsprechend durch unterschiedliche Akteure definiert werden. Es ist teilweise klassisch problemorientiert, beispielsweise im Falle einer durch den/die Bauwerksprüfer:in angeordneten OSA. Es kann im Kontext Digitaler Zwillinge jedoch auch auf Grundlage einer Sensitivitätsanalyse definiert werden, u. a. bei Ermittlung der Grundlagen für die Anwendung eines Prognosemodells [DBV Heft 51, 2022].

Folgende Inhalte sind Bestandteil des Untersuchungskonzepts:

- Beschreibung des Untersuchungsziels
- Definition der erforderlichen Untersuchungen und Untersuchungsmethoden, damit verbunden auch Anforderungen an Genauigkeit, Auflösung oder Vertrauenswürdigkeit
- Definition des Untersuchungsumfangs (Anzahl und Lage der Untersuchungsstellen)
- Definition von Art und Umfang der Ergebnisaufbereitung
- Beschreibung der wesentlichen Randbedingungen (bspw. Zugänglichkeit, Umgebung, Einschränkungen aus Lage und Betrieb, besondere Anforderungen an den Arbeits- und Gesundheitsschutz)

Das Untersuchungskonzept bildet mit diesen Inhalten eine geeignete Abstimmungsgrundlage für die fachlich Beteiligten. Es kann dem/der Bauherr:in darüber hinaus als Hilfsmittel für die Ausschreibung und Vergabe bauwerksdiagnostischer Untersuchungen dienen. In Abhängigkeit der Komplexität des Bauwerks bzw. der Zielstellung kann die Erstellung einer Ausschreibungsgrundlage ebenfalls durch den/die Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik auf Basis des Untersuchungskonzepts erfolgen.

Im Kontext Digitaler Zwillinge kann mit Aufstellung des Untersuchungskonzeptes eine Fortschreibung der AIA und BAP durch den/die BIM-Koordinator:in in Abstimmung mit dem/der BIM-Manager:in hinsichtlich der Integration diagnostikspezifischer Inhalte erforderlich sein (↗ Kapitel 4.4.1). Weiterführende Hinweise zur Einbettung der Diagnostik in die BIM-Methodik sind nachfolgend im Abschnitt *Von der Datenerfassung zur Datenintegration* enthalten.

Anforderungen an Diagnostikdaten

Eine Zielstellung bei der Integration der Diagnostikdaten in Digitale Zwillinge ist die langfristige, nachhaltige und rückführbare Datenbereitstellung für die integrierte Bestandsbewertung. Idealerweise müssen dafür alle relevanten Daten einheitlichen Bezeichnungs- sowie Einheitenkonventionen folgen und in offenen, akzeptierten und möglichst dauerhaften Datenformaten vorliegen. Entsprechende Standards fehlen für Bestands- und insbesondere Diagnostikdaten bislang, sind jedoch Bestandteil aktueller Forschung (siehe auch [Borrmann et al, 2021] und [Braml et. al., 2022]).

Grundlegend müssen Diagnostikdaten drei wesentliche Anforderungen erfüllen: Jeder Datensatz benötigt eine eindeutige Bezeichnung (ID), einen Zeitstempel und einen Raumbezug (i. A. a. [Braml et. al., 2022] oder auch [Küttenbaum et. al., 2019]).

Darüber hinaus müssen die Diagnostikdaten durch beschreibende Informationen angereichert werden, sogenannte Metadaten. Art und Umfang der Metadaten können sich in Abhängigkeit der eingesetzten Untersuchungsmethoden deutlich unterscheiden. Insbesondere bei Messdaten der zerstörungsfreien Prüfverfahren ist der Anteil beschreibender Informationen, aufgrund der (für die Rückführbarkeit der Daten) relevanten Angaben zur eingesetzten Messtechnik, Messsoftware und Messkonfiguration, vergleichsweise hoch. Bestandteil der Metadaten sind unter anderem:

- Angaben zur semantischen Verortung entsprechend der Bauwerkstaxonomie (bspw. Bauwerk, Teilbauwerk, Bauteilgruppe nach [BMVBS ASB-ING, 2013] entsprechend ↗ Kapitel 5.2. Auf dieser Grundlage können die Diagnostikdaten, analog der Daten aus Inspektion und Monitoring, gefiltert und auch aggregiert werden.
- Angaben zu den Randbedingungen der diagnostischen Untersuchungen und Untersuchungsstellen (bspw. Wetter, Bewitterung, verwendete Mess- und Untersuchungstechnik).
- Angaben zur Zuverlässigkeit, Genauigkeit oder Vertrauenswürdigkeit der Daten. Dabei kann auch auf zugrundeliegende Normen und Richtlinien verwiesen werden. Rohdaten und bewertete Daten sind, zugunsten einer Beurteilung der Objektivität, voneinander zu unterscheiden.

Eine zusätzliche Herausforderung stellen zerstörungsfreie Prüfverfahren dar, wenn ihre Rohdaten in proprietären Dateiformaten gespeichert sind. Sofern möglich, sind die Messdaten für die Weiterverarbeitung und Datenintegration in offene Dateiformate zu transformieren (bspw. .csv).

Von der Datenerfassung zur Datenintegration

Diagnostikdaten werden mit Hilfe von unterschiedlichen zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Untersuchungen unmittelbar am Bauwerk bzw. an entnommenen Materialproben gewonnen. Der Anteil und die Akzeptanz der zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden steigen dabei stetig und invasive Eingriffe in das Bauwerk können deutlich reduziert werden [DBV ZfP, 2014].

Die Umsetzung und Dokumentation der Untersuchungsleistungen erfolgt durch eine/n Spezialdienstleister:in Bauwerksdiagnostik (↗ Kapitel 4.4.1). Die Datenerfassung vor Ort, im Labor und im Büro läuft dabei idealerweise digital entsprechend eines definierten Datenmodells und unter Einhaltung der vorbeschriebenen Anforderungen an Diagnostikdaten. Neben Hierarchien und Beziehungen können in Datenmodellen Merkmale, Einheiten und Datentypen definiert werden. Im Hinblick auf projekt- und bauwerksübergreifende Betrachtungen sind dabei möglichst offene Standards zu verwenden. Die Entwicklung von standardisierten Datenmodellen für die Strukturierung von Bestands- und Diagnostikdaten ist gegenwärtig Bestandteil der Forschung. Im Kontext der BIM-Methode existieren bisweilen keine IFC-Standards. Nachfolgend werden daher überspannende Anforderungen an die Datenstrukturierung und die darauf aufbauende Erstellung von BIM-Fachmodellen Bauwerksdiagnostik für Digitale Zwillinge dokumentiert, die im Rahmen des Pilotprojektes *smartBRIDGE Hamburg* entwickelt und prototypisch umgesetzt wurden.

Im Hinblick auf spätere Aggregations-, Filter- und Sortierprozesse werden Diagnostikdaten hierarchisch strukturiert (ABB 7.4). Die Informationen zur Durchführung, Aufbereitung und Bewertung einer Untersuchungsmethode werden in der zugehörigen Untersuchungsstelle dokumentiert. Jede Untersuchungsstelle ist eindeutig einer Bauteilgruppe, einem Teilbauwerk sowie einem Bauwerk zugeordnet. In umgekehrter Richtung kann jedes Bauwerk unendlich viele Untersuchungsstellen besitzen. Je nach Komplexität des Projekts kann die Einführung einer zusätzlichen Zwischenebene als Hilfsmittel zur Gruppierung der Diagnostikdaten hilfreich sein, beispiels-



ABB 7.4 Schematische Darstellung der Hierarchieebenen von Diagnostikdaten in Digitalen Zwillingen

weise anhand der Untersuchungsziele oder -methoden. Diese Hierarchie ist Bestandteil der Metadaten zur semantischen Verortung.

Die Untersuchungsstellen, als kleinste und lokalisierbare Einheit, bilden einen geeigneten Informationsträger. Als Grundlage für die weitere Datenverarbeitung, sowie zur Gewährleistung der Rückführbarkeit, werden daher jeder Untersuchungsstelle wie vorbeschrieben ID, Zeitstempel, Raumbezug und Metadaten sowie die eigentlichen Messdaten (Rohdaten und bewertete Daten) und etwaige Medien beigelegt. In dieser Form strukturiert werden die Daten nun in einer Diagnostikdatenbank abgelegt, welche auch als Grundlage für Datenauswerte- und Visualisierungsprozesse dient (↗ Kapitel 9 und ↗ Kapitel 10).

Wie in ↗ Kapitel 5.1 beschrieben, erfolgt die Integration der Diagnostik in Digitale Zwillinge mit Hilfe des BIM-Fachmodells Bauwerksdiagnostik. Dieses verweist auf statische Daten zu konkreten Untersuchungszeitpunkten und kann bei wiederholten Untersuchungen fortgeschrieben werden, beispielsweise bei periodischen Potenzialfeldmessungen zur Beurteilung fortschreitender Korrosionsprozesse. Wie vorbeschrieben werden die Untersuchungsstellen als Datenträger bzw. für die Verortung der Diagnostikdaten ausgewählt.

Bei der Erstellung des BIM-Fachmodells sind drei wesentliche Teilaspekte zu beachten:

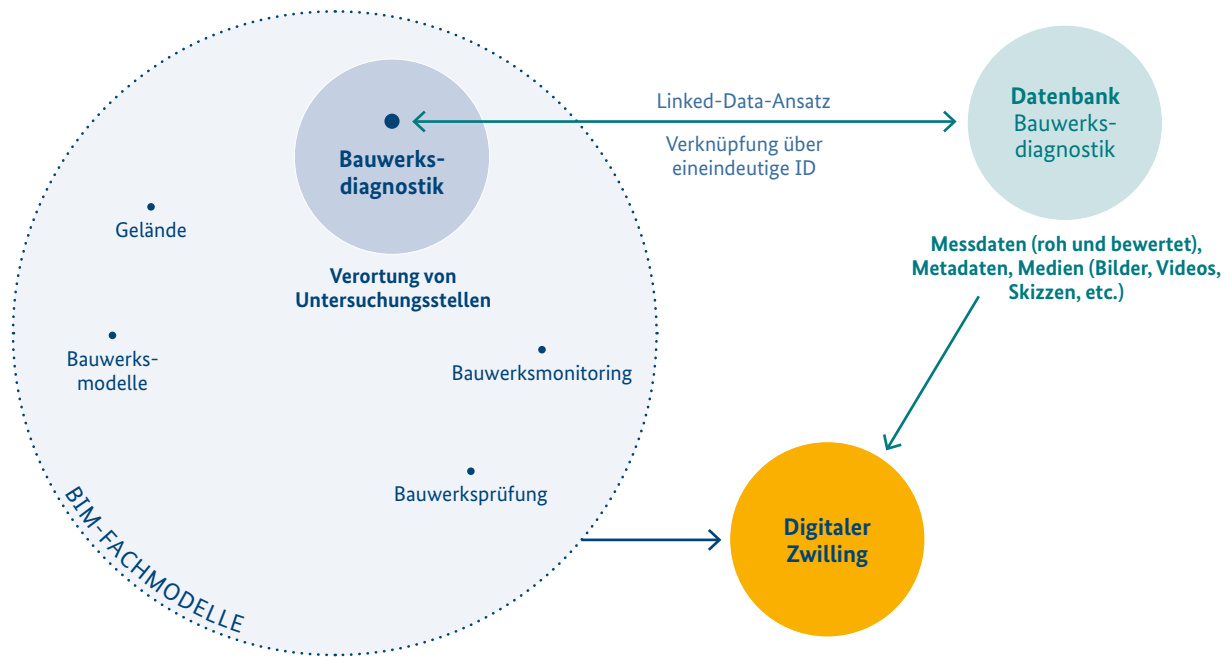


ABB 7.5 Verknüpfung mit dem BIM-Fachmodell „Bauwerksdiagnostik“ im Kontext des Digitalen Zwillings

→ **Georeferenzierung:**

Idealerweise sind Bauwerksmodell sowie Fachmodell Bauwerksdiagnostik einheitlich georeferenziert. Die relative Referenzierung von Untersuchungsstellen anhand markanter Bezugspunkte ist alternativ möglich, wird aufgrund des erhöhten Aufwands bei der Zusammenführung der Modelle und der reduzierten Lagegenauigkeit aber nicht empfohlen.

→ **Modellierung:**

Die geometrische Modellierung der Untersuchungsstellen ist nicht zwingend erforderlich, da für die Erstellung einer IFC-Datei die alphanumerischen Angaben zu ID und Lage ausreichen. Falls dennoch eine Modellierung erfolgt, wird die Verwendung einfacher prismatischer Körper empfohlen.

→ **Semantik:**

Die zu den Untersuchungsstellen gehörigen Diagnostikdaten sind hinsichtlich Art und Umfang sehr heterogen. Die Integration im BIM-Fachmodell über Merkmale (Embedded-Data-Ansatz) ist daher nicht geeignet. Anstelle dessen erfolgt die Verknüpfung des BIM-Fachmodells Bauwerksdiagnostik und der Diagnostikdaten in der Diagnostikdatenbank anhand der eindeutigen ID jeder Untersuchungsstelle (Linked-Data-Ansatz, [7 Kapitel 5.2](#)). Diese Vorgehensweise ist schematisch in [ABB 7.5](#) dargestellt.

Unter Beachtung der vorbeschriebenen Anforderungen und Empfehlungen ist auch die nachträgliche Übertragung von bereits in der Vergangenheit erhobenen Diagnostikdaten in Digitale Zwillinge möglich. Der manuelle Aufwand ist gegenwärtig hoch, forschungsseitig gibt es bereits Ansätze zur Verknüpfung unterschiedlicher Datenmodelle bzw. nachträglichen Überführung von Bestandsdaten in Datenmodelle, beispielsweise mit Hilfe semantischer Annotationen [*Braml et. al., 2022*].

Datenauswertung und -bewertung

Art und Umfang der Datenaus- und -bewertung hängen in erster Linie vom zugrundeliegenden Untersuchungsziel und den durchgeführten Untersuchungen ab. Dementsprechend vielfältig können sie ausfallen. Im Kontext Digitaler Zwillinge werden nachfolgend Besonderheiten adressiert, die zu einer integrierten Bewertung im Zusammenspiel mit den weiteren Datenquellen Bauwerksprüfung ([7 Kapitel 6](#)) und Bauwerksmonitoring ([7 Kapitel 8](#)) beitragen können.

Die Bewertung von Bauwerksprüfungsergebnissen im Sinne von Schäden bzw. Mängeln erfolgt in Form einer Schadensbewertung hinsichtlich S, V sowie D und darauf basierenden Basiszustandszahlen nach RI-EBW-PRÜF [*BMVI RI-EBW-PRÜF, 2017*]. Detaillierte Informationen dazu können [7 Kapitel 6.1](#) entnommen werden. Eine Adaption dieser Schadensbewertung für die Untersuchungsstellen

der Bauwerksdiagnostik ist nicht ohne weiteres möglich bzw. sinnvoll. Dennoch haben auch sie eine Bedeutung für die Bewertung des Bauwerkszustandes und sollen dahingehend in Digitalen Zwillingen Berücksichtigung finden.

Für die Messstellen des Bauwerksmonitorings kann alternativ eine qualitative Bewertung anhand verschiedener Qualitätsmerkmale vorgenommen werden (↗ Kapitel 8.4). Messstellen, die Anlass zur Begutachtung/ Beanstandung bieten, werden dadurch sichtbar, ein Handeln der Projektbeteiligten wird ausgelöst. Für die zeitlich diskreten Daten aus diagnostischen Untersuchungen ist eine qualitative Bewertung ebenfalls möglich, beispielsweise in Gestalt einer Dringlichkeitsbewertung auf Ebene der Untersuchungsstellen. Die Einordnung erfolgt aufbauend auf Untersuchungsergebnissen und anhand von aufgabenspezifischen Aufmerksamkeitsschwellen, eine mögliche Abstufung kann dabei sein:

→ **Keine Dringlichkeit:**

Kein Handlungsbedarf.

→ **Aufmerksamkeitsschwelle erreicht:**

Erhöhte Aufmerksamkeit im Zuge der anstehenden Bauwerksprüfung empfohlen.

→ **Warnschwelle erreicht:**

Kurzfristige Erhaltungsmaßnahmen empfohlen.

Die Dringlichkeit kann Attribute-Bestandteil der Diagnostikdatenbank sein oder über Bewertungsalgorithmen vergeben werden. Eine Aggregation der maximalen Dringlichkeitsbewertung in die übergeordneten Hierarchieebenen ist aufbauend darauf möglich. Die Definition der Aufmerksamkeits- und Warnschwellen kann in seltenen Fällen anhand von Normen erfolgen (bspw. Soll-Ist-Abgleich Betondeckungsverteilung anhand der normativen Mindestanforderungen), obliegt jedoch im Allgemeinen dem/der Fachplaner:in Bauwerksdiagnostik (siehe auch Phase 4 des Prozesses gemäß ↗ Kapitel 4.4.2).

Die qualitative Bewertung auf Ebene der Untersuchungsstellen kann dazu beitragen, das Augenmerk des Anlagenmanagements auf beachtenswerte oder auch kritische Zustände aus diagnostischen Untersuchungen zu lenken, beispielsweise eine erhöhte Korrosionswahrscheinlichkeit. Darüber hinaus können, aufbauend auf oder ergänzt durch diagnostische Daten, Zustandsindikatoren entwickelt werden, die eine quantitative Bewertung von Bauwerks- bzw. Bauteilgruppen ermöglichen (↗ Kapitel 9). Voraussetzung dafür ist die stufenweise Aggregation von Diagnostik- und weiteren zustandsrelevanten Daten.

Im Kontext von Zustandsindikatoren kann Diagnostik auf unterschiedliche Weise einen Beitrag leisten:

- Einerseits indirekt, durch Qualifizierung der zugrundeliegenden Bestands- und Zustandsinformationen als Eingangsgrößen der monitoringgestützten Zustandsindikatoren. Ein Beispiel dafür kann die Berücksichtigung einer am Bestand ermittelten Betondruckfestigkeit aus zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Untersuchung sein [*DIN EN 13791, 2020*].
- Andererseits direkt, im Rahmen objektbezogener Schadensanalysen oder durch diagnostikgestützte Zustandsindikatoren, die modell- bzw. datenbasierte Prognosen zum Schadensfortschritt erlauben. Ein Beispiel dafür können Prognosen zur Depassivierung des Bewehrungsstahls infolge Carbonatisierung und Chlorideintrag sein [*Fischer et. al., 2014*].

Visualisierung als integraler Bestandteil der Zustandsbewertung

Brücken sind häufig komplexe Ingenieurbauwerke mit großer Lebensdauer. Bereits die Verortung diagnostischer Untersuchungsstellen in dreidimensionalen Modellen und alphanumerische Beschreibung trägt zu einer verbesserten Zustandsbewertung bei. Insbesondere bei mehrstufigen und verschiedenartigen bauwerksdiagnostischen Untersuchungen während der Betriebsphase kann jedoch eine weiterführende Visualisierung von Diagnostikdaten wesentlich zur Bewertbarkeit individueller Zustände und Schadensursachen beitragen. Beispielsweise können teilflächige zerstörungsfreie Messungen anhand definierter Legenden in Farbstufengrafiken auf der Bauteiloberfläche visualisiert werden, um Nutzer:innen bei der Bewertung systematischer Veränderungen/Verläufe zu unterstützen.

Für die Visualisierung von Diagnostikdaten kann eine Aufschlüsselung des BIM-Fachmodells Diagnostik in mehrere Teilmodelle hilfreich sein. Kern des BIM-Fachmodells ist die Verortung der Untersuchungsstellen. Aufbauend darauf stehen in weiteren Teilmodellen beispielsweise folgende Möglichkeiten zur Verfügung, die Nutzer:innen bei der Interpretation der diagnostischen Daten helfen:

- das Einfärben der im Modell platzierten Objekte zur Darstellung der Untersuchungsstellen, bspw. entsprechend der Dringlichkeit
- die Integration und Visualisierung von Ergebnissen aus zerstörungsfreien Untersuchungen, z. B. mittels Farbstufengrafiken anhand einer definierten Legende für teilflächige Betondeckungs- oder Potenzialfeldmessungen

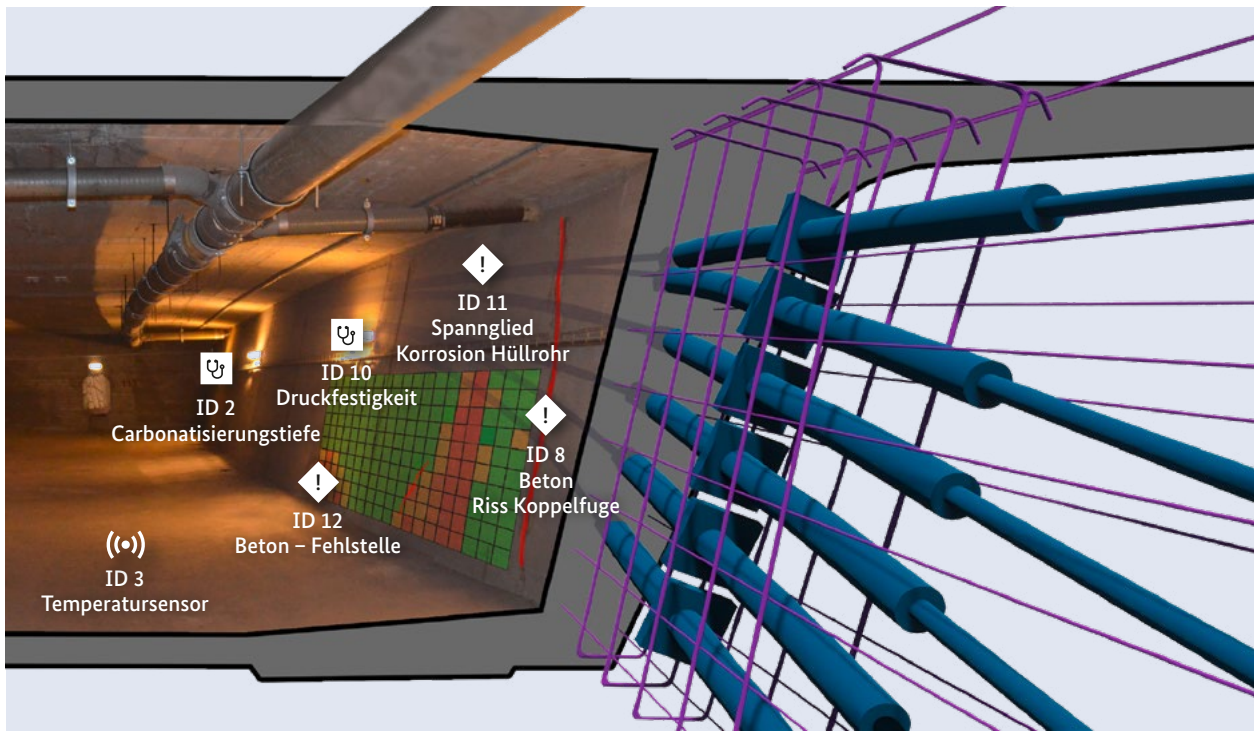


ABB 7.6 Exemplarische Visualisierung unterschiedlicher Diagnostikdaten nach [DBV Heft 51, 2022]

→ die Integration und Visualisierung von Ergebnissen aus zerstörungsfreien Untersuchungen, bspw. in Form des tatsächlichen Spanngliedverlaufs aus Radar- oder Ultraschalluntersuchungen

Viele dieser Arbeitsschritte sind bei konsequenter digitaler Datenerfassung skriptbasiert möglich oder können teilautomatisiert werden, der Mehraufwand seitens der Modellierung ist entsprechend begrenzt.

Die Unterteilung in Teilmodelle bietet darüber hinaus eine geeignete Grundlage für die nutzer:innenspezifische Datenvisualisierung in Digitalen Zwillingen: Basisinformationen zu Anzahl, Art und Lage durchgeführter diagnostischer Untersuchungen einschließlich der damit verbundenen Bewertungen sind für jede/n Nutzer:in zugänglich. Detailinformationen zu Untersuchungsergebnissen, Messbedingungen, Messkonfigurationen, etc. können darauf aufbauend bedarfsorientiert in einer Expert:innenumgebung konsultiert werden (ABB 7.6). Weitere Angaben zur nutzer:innenspezifischen Visualisierung in Digitalen Zwillingen können [Kapitel 10](#) entnommen werden.

3 – Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Planung und Durchführung von diagnostischen Untersuchungen sind normativ nicht durchgehend geregelt. Entsprechend heterogen sind die Daten, die aus diagnostischen Untersuchungen unterschiedlicher Fachingenieur:innen resultieren. Digitalen Zwillingen liegt ein

Datenmodell der Diagnostik zu Grunde, welches sowohl die Visualisierung als auch die Ausführung von Bewertungsalgorithmen speist. Im Ausblick auf Netz- bzw. Korridorbetriebsüberlegungen, welche Digitale Zwillinge und deren Daten von sehr vielen Bauwerken zusammenführen sollen, ist eine möglichst einheitliche Dokumentation von Diagnostikdaten anzustreben. Der Aufwand, bereits vorhandene Diagnostikdaten nachträglich in das projektspezifisch zugrundeliegende Datenmodell zu überführen, ist gegenwärtig noch überproportional hoch. Mittelfristiges Ziel ist daher die Entwicklung eines standardisierten Datenmodells für Diagnostikdaten und eine Standardisierung der Semantik im Kontext der BIM-Methode (vergleichbare Bestrebungen für Daten aus geotechnischen Untersuchungen in [Beck & Henke, 2021]) sowie die Weiterentwicklung von Verfahren zur nachträglichen Integration von Bestandsdaten.

Ein weiteres zentrales Forschungsgebiet im Kontext Digitaler Zwillinge ist die Entwicklung und Weiterentwicklung von Prognosemodellen für die prädiktive Instandhaltung. Insbesondere im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Baustoffen sowie die Berücksichtigung möglichst realitätsnaher Materialeigenschaften verwenden diese Prognosemodelle perspektivisch auch weitere diagnostisch erhobene Messdaten. Vergleichbar damit sind Weiterentwicklungen auf dem Gebiet des messdatenbasierten Tragfähigkeitsnachweises möglich, die neben Monitoring- auch Diagnostikdaten einschließen können.



U1StSo9F 30A8

8 – Bauwerksmonitoring: Die dynamische Datenquelle

Kurzfassung

Unter Bauwerksmonitoring wird die kontinuierliche und systematische Überwachung eines Bauwerks mittels eines sensorischen Messsystems verstanden.

Bauwerksmonitoring wird aktuell i. d. R. problembezogen und in Ausnahmefällen bei Brücken eingesetzt. Die Mehrwerte von Monitoring im Kontext einer kontinuierlichen Überwachung und prädiktiven Erhaltung werden noch nicht genutzt. Im Kontext des Digitalen Zwillings, wie er in diesem Dokument definiert wird, spielt das Bauwerksmonitoring ab einem Reifegrad von 2 ([Kapitel 3](#)) eine zentrale Rolle durch die automatische Generierung von Daten und deren Austausch in Echtzeit über den Lebenszyklus des Bauwerks. Deshalb wird das Monitoring als „dynamische“ Datenquelle bezeichnet.

Brücken sind große, komplexe Bauwerke mit einer geplanten Lebensdauer von mehr als 100 Jahren und sehr langsam stattfindenden Zustandsentwicklungen. Eine kontinuierliche Überwachung zur Einbindung der Messergebnisse in die Bewertung des Bauwerkszustands bedarf deshalb bei der Konzeption und Definition der zu überwachenden Bereiche eines methodischen Vorgehens. Basierend auf den bisherigen Erfahrungen wird in diesem Beitrag eine Vorgehensweise in fünf aufeinanderfolgenden Schritten vorgestellt.

In Schritt 1 werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die zu überwachenden Sachverhalte, die maßgebende Schädigungsprozesse und neuralgische Bauwerksbereiche identifiziert und definiert. In Schritt 2 werden basierend auf dieser Analyse die geeignete Sensorik und das zugehörige Messlayout gewählt, wobei zwischen lokaler und globaler Bauwerksüberwachung unterschieden wird.

Danach wird in Schritt 3 definiert, wie die erhobenen Messdaten im Hinblick auf die Erzeugung von Zustandsinformationen analysiert werden. In Schritt 4 werden zur Erfüllung der Ziele die Anforderungen an die Messdatenerfassung und -übertragung definiert. In Schritt 5 werden all diese Informationen in einem strukturierten Dokument – dem Monitoringkonzept – zusammengeführt.

Es wird schnell ersichtlich, dass der erste Schritt (Sensitivitätsanalyse) am wichtigsten, aber auch am komplexesten ist. Im Beitrag wird für diesen Schritt eine Methodik vorgestellt, in der die Analyse der Brücke nach vier Kriterien erfolgt. Innerhalb der modellbasierten Analyse werden die statischen Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise analysiert. Im Rahmen der zustandsbasierten Analyse werden die erfassten und bereits vorhandenen Schäden und Mängel analysiert. Bei der erfahrungsbasierten Analyse hingegen werden die undokumentierten Erfahrungen der Objektbetreuenden (z. B. Brückenprüfer:in, Anlagenmanager:in) herangezogen. Diese Ansätze beziehen sich alle konkret auf das zu untersuchende Objekt. In Ergänzung dazu wird bei der entwurfsbasierten Analyse eine systematische Auswertung bestehender ähnlicher Brückenbauwerke herangezogen.

Ergänzend zur Konzeption werden in diesem Beitrag auch für Umsetzung und Dokumentation des Monitorings Hinweise für die Einbettung in den Digitalen Zwilling gegeben. Darüber hinaus werden spezifische Anforderungen an Daten und System in der Betriebsphase des Monitorings zusammengefasst.

1 – Ziel der sensorischen Überwachung, Rolle im Digitalen Zwilling

Monitoring – Status quo

Bauwerksmonitoring ermöglicht die kontinuierliche messtechnische Überwachung von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken mit dem Ziel, zusätzliche Informationen zu Einwirkungen, zum Bauwerksverhalten oder zu Veränderungen des Bauwerkszustands zu gewinnen. Wie bereits in [Kapitel 2.2](#) beschrieben, wird das Monitoring für die Zustandsbewertung von Bauwerken bereits im Rahmen von objektbezogenen Schadensanalysen (OSA) oder für Nachrechnungen ab der Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie bzw. als Kompensationsmaßnahme angewandt. Aber auch zur Überprüfung des Bauwerkverhaltens bei neuen Bauweisen kommt Monitoring zum Einsatz. Die Anzahl der praktischen Anwendungen bezogen auf den gesamten Brückenbestand ist allerdings sehr gering und stellt bislang i. d. R. eine Ausnahme dar. Es sei allerdings auch darauf hingewiesen, dass bei einzelnen Bestandsbauwerken aufgrund von geometrischen oder mechanischen Randbedingungen ein Monitoring im Hinblick auf die zu beantwortende Fragestellung nur bedingt angewandt werden kann.

Bauwerksmonitoring als solches kann nach den aktuellen Normen (DIN 1076 oder RI-EBW-PRÜF) noch nicht in die Zustandsbewertung einbezogen werden. Im Zuge von Sonderprüfungen ist es in Einzelfällen zwar möglich, Monitoring für eine Zustandsbewertung zu nutzen, Regelfall ist dies jedoch nicht. In Pilotprojekten der Vergangenheit, wie z. B. *smartBRIDGE Hamburg* oder *Intelligente Brücke* der BAST, wurden exemplarisch Möglichkeiten erarbeitet, wie äquivalent zu den bisherigen normierten Verfahren auch Bauwerkszustände aus Ergebnissen von Monitoringmaßnahmen ermittelt werden können, [Schneider et al., 2015], [Herbrand et al., 2022], [Windmann, 2022].

Die Perspektive des Einsatzes von Bauwerksmonitoring

Monitoring wird zukünftig in der Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken einen größer werdenden Stellenwert einnehmen. Allein durch die Absicht des BMDV [BMVI Masterplan, 2021] u. a. die Erhaltung und den Betrieb der Bundesfernstraßeninfrastruktur langfristig auf Basis von voll integrierten Digitalen Zwillingen zu organisieren, ist dies zweifelsfrei zu erwarten. Dabei könnten perspektivisch nicht nur Daten eines fest am Bauwerk installierten Messsystems allein eine Rolle spielen, sondern auch Daten, die

durch die darüberfahrenden Fahrzeuge oder Personen (mit Hilfe ihrer Smartphones z. B.) akquiriert und an den Digitalen Zwilling gesendet werden.

Grundsätzlich ist für ein Bauwerksmonitoring, welches für Digitale Zwillinge verwendet werden soll, eine methodische Planung erforderlich. Darüber hinaus bestehen besondere Anforderungen an die Umsetzung der Monitoringmaßnahmen sowie an die Daten und deren Verarbeitung, die nachfolgend näher erläutert werden. Die Vorgehensweise soll sowohl für bestehende Brücken als auch für neu entstehende Bauwerke im Sinne einer lebensdauerbegleitenden Überwachung gültig sein.

2 – Methodisches Vorgehen zur Erstellung eines Monitoringkonzepts für den Digitalen Zwilling

Die kontinuierliche Ermittlung von Zustandsinformationen ist ein fundamentaler Bestandteil der Nutzung von Digitalen Zwillingen mit Reifegrad ab 2. Die ständige Überwachung des Bauwerks und seiner Komponenten mit geeigneten und optimal platzierten Sensoren ist – neben den periodischen Bauwerksinspektionen und bedarfsweise auch diagnostischen Untersuchungen – Schlüssel zur Erzeugung der erforderlichen Datenbasis, um den aktuellen Brückenzustand in Echtzeit objektiv zu bewerten und seine zukünftige Entwicklung zu prognostizieren.

Um eine lebensdauerbegleitende messtechnische Überwachung im Rahmen der digitalen Instandhaltung zu ermöglichen, müssen in der Konzeptphase des Monitorings die in [ABB 8.1](#) zusammengefassten Punkte thematisiert werden.



Schritt 1: Definition der zu überwachenden Sachverhalte und Bauwerksbereiche – Sensitivitätsanalyse

Die bisherige Anwendung von Bauwerksmonitoring ist i. d. R. lokal begrenzt und problemorientiert. Beispiele sind die Überwachung von bereits bestehenden Schäden, die Erfassung der Bauwerksreaktion im Hinblick auf die Kalibrierung eines numerischen Strukturmodells oder die Erfassung standortspezifischer Einwirkungen im Zuge einer Nachrechnung bei Nachweisdefiziten. Die Überwachungszeit ist auf einige Monate bis wenige Jahre begrenzt und die zu überwachenden physikalischen Größen und deren

KONZEPTION EINES MONITORINGS IM KONTEXT DES DIGITALEN ZWILLINGS IN HOHEN REIFEGRADEN

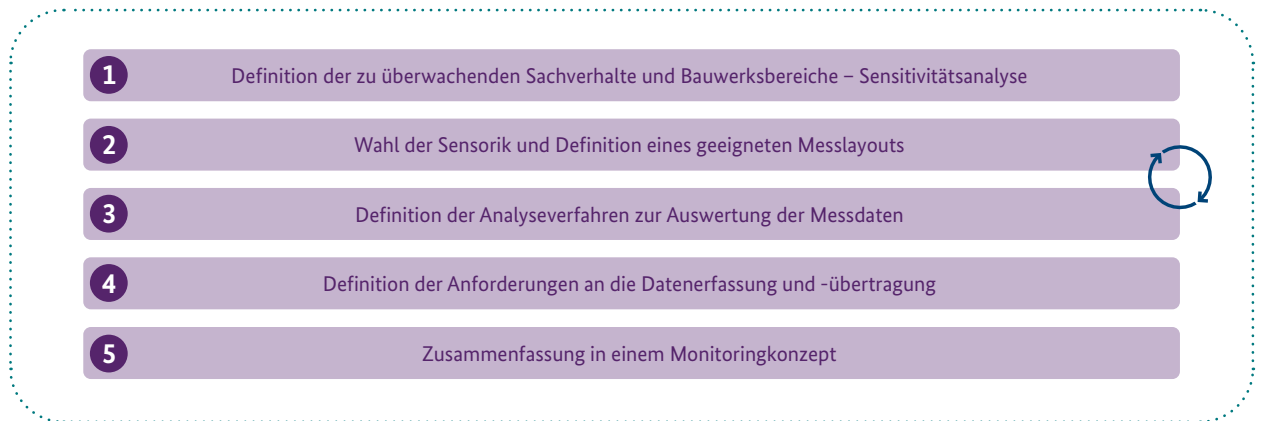


ABB 8.1 Methodisches Vorgehen innerhalb der Konzeptphase des Monitorings für einen Digitalen Zwilling in hohen Reifegraden

Wirkungsorte sind klar definiert. Diese Einsatzbereiche von Monitoring sind auch im Zusammenhang mit Digitalen Zwillingen von Relevanz, wie beispielsweise zur Kalibrierung interner Rechen- und Schädigungsmodelle, die einen Bauwerkszustand bzw. einen Handlungsbedarf ableiten, vgl. [7 Kapitel 9](#). Entsprechend sind sie beim methodischen Vorgehen zu berücksichtigen.

Das Bauwerksmonitoring im Rahmen von Digitalen Zwillingen muss darüber hinaus zusätzliche Aufgaben erfüllen. Neben der Überwachung von schon vorhandenen Defiziten bzw. Problemen gilt es zudem, potenziell mögliche Schäden zu erkennen, deren genauer Eintrittsort und -zeitpunkt zunächst unbekannt sind. Damit verbunden sind auch erheblich längere Überwachungszeiten von mehreren Dekaden bis hin zur gesamten Bauwerkslebensdauer.

Aufgrund der Größe von Brückenbauwerken, ihrer Einzigartigkeit, ihrer geplanten Nutzungsdauer von mindestens 100 Jahren sowie der überwiegend langsamen Schädigungsrate ist diese Aufgabe nicht trivial. Um maßgebende Schädigungsprozesse und neuralgische Bauwerksbereiche zu identifizieren, muss eine spezifische Sensitivitätsanalyse des Bauwerks stattfinden, denn eine integrale und vollständige sensorgestützte Überwachung von Brücken würde – allein durch ihre Größe – zu einem sehr dichten Sensornetz führen, was weder wirtschaftlich vertretbar noch technisch sinnvoll wäre. Es geht also darum, die „richtigen“ Ziele und Stellen für die Überwachung auszuwählen. Die nachfolgend erläuterte Methodik kann zur Durchführung dieser Sensitivitätsanalyse und zur Identifizierung des Überwachungsgegenstands und -umfangs angewendet werden. Die gewählte Vorgehensweise ist sowohl auf neue als auch auf bestehende Bauwerke anwendbar, was ihr einen allgemeinen Charakter verleiht. Sie ist zu wiederholen, sobald neue Informationen vorliegen, was zu einer dynamischen

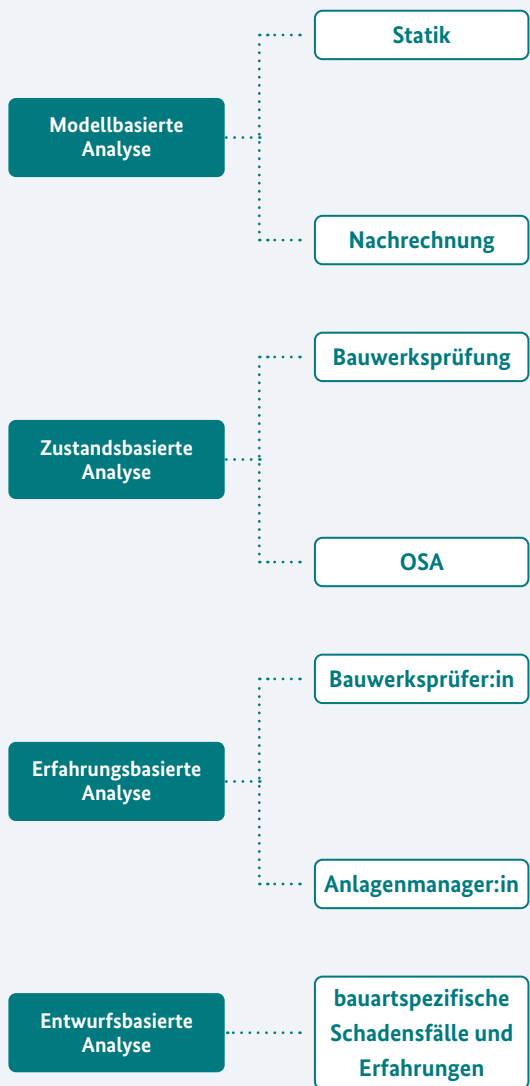
Anpassung der Ziele führen kann. Entsprechend der Erläuterungen im [7 Kapitel 4.4](#) wird die Sensitivitätsanalyse vom/von Tragwerksplaner:in, Fachplaner:in Monitoring und Fachplaner:in Diagnostik durchgeführt. Die Sensitivitätsanalyse ist die Grundlage für die Erstellung des Monitoringkonzepts, wird aber auch für weitere Untersuchungen (Bauwerksdiagnostik, zusätzliche Inspektionen) herangezogen.

Zu Beginn einer Sensitivitätsanalyse kann das Bauwerk in seine Bauteilgruppen unterteilt werden. Jede Bauteilgruppe wird anschließend nach den folgenden Kriterien analysiert ([ABB 8.2](#)).

Die modellbasierte Analyse

Innerhalb der modellbasierten Analyse werden die statischen Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise analysiert, die auf Grundlage eines oder von mehreren statischen oder numerischen Strukturmodellen des Bauwerks erstellt wurden. Das Strukturmodell des Bauwerks soll das Tragverhalten möglichst realistisch abbilden. Die damit erstellten Standsicherheitsnachweise und ggf. Nachrechnungen werden im Hinblick auf „Hot-Spots“ in Form von defizitären oder nachweislich hoch ausgelasteten Tragwerksstellen analysiert. Diese Analyse kann gleichermaßen bei neuen und bestehenden Bauwerken durchgeführt werden. Im Vergleich zu den klassischen Standsicherheitsnachweisen oder Nachrechnungen sollte der Fokus bei der modellbasierten Analyse auf der Identifikation von möglichen Veränderungen der Bauwerksreaktion liegen, welche bei einer Überlastung (z. B. infolge Verkehrs) auftreten können. Dadurch wird der Tatsache Rechnung getragen, dass Belastungssteigerungen nicht zu unabhängig voneinander stattfindenden Beanspruchungserhöhungen in verschiedenen Tragwerksteilen führen. Zusätzlich kann

ABB 8.2 Sensitivitätsanalyse



in der modellbasierten Analyse die Veränderung des globalen Tragwerksverhaltens für den Fall analysiert werden, dass sich bestimmte Schadensfälle ankündigen oder sogar eintreten. Dies ermöglicht eine globale Schadensüberwachung, mit der tendenziell fortschreitende Schädigungsprozesse detektiert und eine Schadensentstehung verhindert werden soll.

Die zustandsbasierte Analyse

Im Rahmen der zustandsbasierten Analyse von Bestandsbauwerken werden die im Zuge der Bauwerksprüfungen erfassten und bereits vorhandenen Schäden und Mängel herangezogen und analysiert. Eventuell vorliegende Ergebnisse von objektspezifischen Schadensanalysen (OSA, [↗ Kapitel 2](#)) oder weiterer spezifischer Untersuchungen ([↗ Kapitel 7](#)) können ebenfalls in der Analyse betrachtet werden. Diese Informationen geben wertvolle Hinweise auf zukünftig besonders zu überwachende Bereiche des

Bauwerks und stellen eine weitere Basis zur Ableitung der Untersuchungsbereiche sowie der zugehörigen physikalischen Messgrößen dar.

Die zustandsbasierte Analyse legt den Fokus auf ältere bestehende Brücken, wobei auch bei Neubauten initiale Schäden und Mängel eine wertvolle Basis für die Entwicklung eines Monitoringkonzeptes darstellen können.

Die erfahrungsbasierte Analyse

Bei der zuvor genannten zustandsbasierten Analyse werden dokumentierte Schäden und Mängel zu Grunde gelegt. Bei der erfahrungsbasierten Analyse werden hingegen die undokumentierten Erfahrungen der Objektbetreuenden (z. B. Brückenprüfer:in, Anlagenmanager:in) herangezogen. Die Informationen können vielfältig sein und sind abhängig von Personen, deren Erfahrungen und deren Erinnerungsvermögen, sodass diese Methode an dieser Stelle nicht stringent durchgeführt werden kann. Wichtige Informationen können z. B. Auffälligkeiten liefern, die im Sinne der Bauwerksprüfung weder als Schäden noch Mängel dokumentiert wurden, aber einer näheren Betrachtung bedürfen. Auch Erfahrungen aus Bau- oder Sanierungsmaßnahmen, aber auch Daten über einstige Unfälle können wertvoll zur Identifizierung von möglichen Schwachstellen sein.

Auch diese Art der Analyse legt den Fokus auf ältere bestehende Brücken. Bei Neubauten wären Erfahrungen aus der Bauausführungsphase heranzuziehen.

Die entwurfsbasierte Analyse

Die bisher präsentierten modell-, zustands- sowie auch erfahrungsbasierten Ansätze beziehen sich konkret auf das zu untersuchende Objekt. In Ergänzung dazu können Informationen aus einer Clusterauswertung herangezogen werden. Der clusterbezogene Ansatz basiert auf der systematischen Auswertung bestehender ähnlicher Brückenbauwerke. Dazu wird für das konkrete Untersuchungsobjekt aus dem Bauwerksbestand eine Vergleichsgruppe mit ähnlichen Eigenschaften gebildet. Im Falle von Straßenbrücken kann die Vergleichsgruppe anhand des Bauwerksmanagementsystems *SIB-Bauwerke* gebildet werden. Es können darüber hinaus auch gerade bei außergewöhnlichen Bauwerken (bewegliche Brücken, große Schrägkabelbrücken) Daten aus der internationalen Literatur herangezogen werden. Für diesen Cluster können einerseits die beobachteten Schädigungsprozesse identifiziert und ausgewertet werden. Andererseits können die erfass-

ten Schäden bewertet werden, um auf bauartspezifische Schäden zu schließen.

Ergebnis Sensitivitätsanalyse

All diese beschriebenen Analysen können in Form einer Sensitivitätsanalyse parallel – und sich gegenseitig ergänzend – durchgeführt werden. Als Ergebnis liefern die Analysen zum einen die bereits vorhandenen Defizite, zum anderen die Bereiche mit einer erhöhten Anfälligkeit für Degradationen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse können zusätzlich mit der Methode der FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) priorisiert werden. Diese Methode ist in vielen Industriezweigen verbreitet und ermöglicht es, potenzielle Probleme zu identifizieren und mit Hilfe einer Risikoprioritätszahl zu bewerten. Dadurch lassen sich die Auftrittswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers und die Bedeutung der Fehlerfolge beurteilen, sodass die Wahl der zu überwachenden Bereiche geschärft werden kann. Die hier präsentierte Methodik der Sensitivitätsanalyse stellt einen ersten Ansatz einer allgemein gültigen Vorgehensweise zum Entwerfen eines lebensdauerbegleitenden Monitorings im Kontext des Digitalen Zwillings dar. Die Präzisierung der Methode ist noch Forschungsgegenstand und soll z. B. im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Hundert plus – Verlängerung der Lebensdauer komplexer Baustrukturen durch intelligente Digitalisierung“ weiterentwickelt werden.



Schritt 2: Wahl der Sensorik und Definition eines geeigneten Messlayouts

Als Ergebnis aus Schritt 1 liegt die Identifikation der Sachverhalte und der Bauwerksbereiche vor, die im Sinne der kontinuierlichen Überwachung relevant sind. Wurden dabei vorhandene oder potenzielle Schäden sowie deren Schadensorte eindeutig identifiziert, kann eine lokale messtechnische Überwachung dieser Bauwerksstellen erfolgen. Sind die Deteriorationsprozesse oder die zukünftigen Schadensorte nicht eindeutig verortbar, so eignet sich eine globale Bauwerksüberwachung, um Änderungen durch die Auswirkung auf das Gesamttragwerksverhalten (durch die Messung von Tragwerksreaktionen) zu erkennen. Darüber hinaus ist häufig die Messung von Einwir-

kungen für die spätere Datenauswertung wichtig. Nachfolgend werden Hinweise zur Sensorwahl für die angesprochenen Überwachungsmethoden gegeben.

Sensorwahl bei lokaler Schadensüberwachung

Lokale Schäden oder stark beanspruchte Bereiche können mit Sensorik gezielt überwacht werden. Dies trifft z. B. auf riss- oder korrosionsgefährdete Bereiche wie Koppelfugen o.Ä. zu. Die zu verwendende Messtechnik ist in Art und Umfang auf die Überwachung des jeweiligen Schadensfortschritts individuell anzupassen und nur in den Schadensbereichen bzw. Hot Spots vorzusehen. Beispiele für Sensoren zur lokalen Verformungs- oder Dehnungsmessung sind Wegsensoren oder Dehnungsmessstreifen. Je nach Messaufgabe können auch andere Sensoren zur lokalen Schadensüberwachung zum Einsatz kommen. Typische Schäden von Massiv- und Stahlbrücken, deren Parameter mit geeigneten Sensoren erfasst werden können, sind [Schnellenbach-Held et al., 2015], [Sedlacek et al., 2011], [Hemmert, 2004]:

- Unzureichende Betondeckung
- Risse im Beton
- Korrosion von Bewehrung/Stahl
- Schäden am Vorspannsystem
- Bauteilverformungen/Durchbiegungen
- (Fundament-)Setzungen
- Lagerschäden
- Schäden an der Ausrüstung
- Risse in Schweißnähten/Blechen
- Beulen

Eine detaillierte Beschreibung eines Großteils der oben genannten Schäden und der sensorischen Überwachungsmöglichkeiten ist in [Schnellenbach-Held et al., 2015] zu finden.

Sensorwahl bei globaler Schadensüberwachung

Übliche, ortsdiskrete Sensorik ermöglicht zwar die kontinuierliche Überwachung eines Schadens oder eines Bauteils, bleibt jedoch zunächst auf einen sehr lokalen Bereich beschränkt. Die Detektion von Schäden, deren genauer Eintrittsort noch unbekannt ist bzw. nur sehr grob abgeschätzt werden kann, stellt eine besondere Schwierigkeit im Hinblick auf die Wahl von geeigneten Sensoren dar.

Um solche Schäden zu erkennen, können globale Überwachungsmethoden eingesetzt werden. Dabei wird versucht, Auswirkungen von Schäden auf das globale Tragverhalten zu identifizieren, um somit einen Schadens-

eintritt zu erkennen und diesen ggf. zu lokalisieren. Hierzu sind die entsprechenden Parameter (z. B. Beschleunigungen, Dehnungen oder Verformungen) i. d. R. an mehreren Stellen des Bauwerks zu erfassen [Schnellenbach-Held et al., 2015]. Diese können anschließend auch zu einer Systemidentifikation verwendet werden [Bergmeister & Wendner, 2010]. Um den genauen Schadensort bzw. einen sich ankündigenden Schaden zu erfassen, wäre tendenziell ein sehr dichtes Sensornetz über das gesamte Bauwerk erforderlich. Das wäre allerdings technisch höchst aufwendig und wirtschaftlich nicht vertretbar. Daher wird versucht, den Umfang an Sensorik zu begrenzen. Beispielsweise können Beschleunigungsmessungen sowie Neigungs- oder Durchbiegungsmessungen punktuell an mehreren begrenzten Bauwerksstellen erfolgen, um Steifigkeitsdegradationen und somit mögliche Schädigungen zu erfassen. Diese Stellen sind insbesondere zwischen Tragwerksplaner:in und Fachplaner:in Monitoring abzustimmen.

Neben den punktuellen Messmethoden existieren aber auch linienförmige, flächige oder räumliche Messprinzipien wie faseroptische Systeme, Photogrammetrie, Laserscans, KI-basierte Bilderkennungssoftware und Schallemissionsmessungen, welche Daten zur Beurteilung des Bauwerkszustandes über einen breiten Bauwerksbereich liefern [DBV Heft 51, 2022]. Diese Messmethoden sind derzeit noch unterrepräsentiert, aber für eine ganzheitliche, globalere Bauwerksüberwachung besonders geeignet. Ihre Anwendung in der Schadenserkenkung an Bauwerken und die Nutzung im Rahmen von Digitalen Zwillingen ist aktuell noch überwiegend Gegenstand der Forschung. Diese Methoden besitzen enormes Potenzial und werden mit hoher Wahrscheinlichkeit Einzug in die Messkonzepte für Digitale Zwillinge finden.

Sensorwahl bei Einwirkungsüberwachung

Kenntnisse über Einwirkungen sind wichtig für die spätere Datenauswertung und die Interpretation der gemessenen Bauwerksbeanspruchungen. Darüber hinaus dienen sie zusätzlich den verschiedenen Schädigungsmodellen als Eingangsparameter, welche u. a. für Zustandsprognosen verwendet werden.

Die folgenden Einwirkungen sind üblicherweise für das Monitoring von Brückenbauwerken relevant.

- Verkehrsbeanspruchung
- Umgebungs- und Umwelteinflüsse (Temperatur, Wind, Feuchte, Chloride/Tausalz, CO₂)

Mögliche Sensoren zur Erfassung dieser Einwirkungen sind in [Schnellenbach-Held et al., 2015] zusammengestellt. Diese Sensoren können je nach Platzierung sowohl globale Einwirkungen messen als auch zur lokalen Einwirkungsüberwachung verwendet werden.

Allgemeine Anforderungen an die Sensorwahl

Die Sensoren müssen stets individuell für die jeweilige Messaufgabe ausgewählt und an diese angepasst sein. Bei der Wahl der Sensorik ist besonderes Augenmerk auf das Messverfahren, den Messbereich, die Messgenauigkeit, die Messauflösung, die Messrate, die Sensorgröße, die Applikationsmöglichkeit, die Robustheit und die Dauerhaftigkeit zu legen.

Darüber hinaus sind Brückenbauwerke in der Regel für eine geplante Lebensdauer von mindestens 100 Jahren ausgelegt. Gleiches muss daher auch für das Monitoringssystem eines Digitalen Zwillings gelten. Dies bedingt besondere Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und den Schutz sowohl der Sensorik als auch des Messsystems. Hinsichtlich der Sensorik ist besonderes Augenmerk auf die Langzeitstabilität der Sensoren sowie auf die Ankopplung dieser am Bauwerk zu legen. Hierfür sind die entsprechenden Expositionen aus Temperatur, Feuchtigkeit, Wind, Sonneneinstrahlung, chemischen Beanspruchungen wie z. B. Salzen, Schwingungen aus Verkehrsbeanspruchung usw. zu berücksichtigen. Bei einer unklaren Langzeitstabilität könnten auch kontinuierliche Datenanalysen dazu verwendet werden, um eine schlechter werdende Datenqualität zu erkennen (7 Kapitel 8.4). Ein präventiver oder zustandsorientierter Sensortausch oder gar Messsystemaustausch sollte bereits bei der Planung bedacht werden. Der Wechselvorgang an sich als auch die Zugänglichkeit sind hierbei besonders zu berücksichtigen. Im Falle eines Sensorwechsels sollten unbedingt Referenzmessungen durchgeführt werden, sodass der Anschluss des „neuen“ Messwerts an die vergangenen erfolgen kann.



Schritt 3: Definition der Analyseverfahren zur Auswertung der Messdaten

Nach Festlegung des Messumfangs und -layouts in Schritt 2 muss in Schritt 3 definiert werden, wie die Messergebnisse im Hinblick auf die Erzeugung von Zustandsinformationen

analysiert werden. Die Definition der Analyseverfahren ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Erstellung des Monitoringkonzepts und kann auch einen Einfluss auf Schritt 2 haben (ABB 8.1). Durch die Definition der Analysevorgänge ergeben sich Bedarfe für weitere Messgrößen z. B. zur Kompensation oder Verrechnung von Effekten oder zur Erweiterung des Umfangs zu Redundanzzwecken. Deshalb empfiehlt es sich, die Schritte 2 und 3 im Arbeitsprozess parallel durchzuführen. Darüber hinaus hat die Auswahl des Analyseverfahrens einen direkten Einfluss auf die Anforderungen an die Datenerfassung: Abtastfrequenz, Datenqualität etc. und auf die dafür notwendige Messhardware (s. a. Schritt 4). Dies unterstreicht, dass zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Prozess des Monitoringkonzepts die Definition der Analyseverfahren und die Frage „Was passiert mit den Daten?“ geklärt werden muss.

Die Datenanalyse kann in zwei aufeinanderfolgende Phasen unterteilt werden, siehe auch [DBV Monitoring, 2018]:

- Datenaufbereitung
- Datenauswertung

Die Datenaufbereitung umfasst die Konditionierung der Daten mit dem Ziel, aus elektrischen Sensorsignalen richtige, saubere und physikalisch skalierte Messdaten zu erzeugen. Die Datenaufbereitung ist abhängig von der Technik bzw. Sensorik und weniger vom überwachten Objekt, sodass es im Zuge des Monitoringkonzepts ausreichend ist, die übergeordneten Anforderungen an die Sensorsignale zu formulieren. Diese Anforderungen stellen auch die Schnittstelle zwischen Tragwerksplaner:in Schwerpunkt Bestand und Fachplaner:in Monitoring dar (↗ Kapitel 4.4.1).

Die Datenauswertung stellt die darauf aufbauende Analyse der Daten, als Grundlage für die Bewertung des Bauwerkszustands, dar. In diesem Beitrag wird diese Phase zusammen mit der Datenaggregation detailliert im ↗ Kapitel 9 thematisiert. Die detaillierte und vollumfängliche Definition der Schritte für die Datenauswertung ist erst bei Vorlage der konkreten Messdaten im Zuge der Umsetzung der Algorithmen möglich. In der Phase des Monitoringkonzepts sollte aber die Vorgehensweise auf konzeptionelle Art mit den wesentlichen Etappen vorgegeben werden, siehe auch Beispiel in ABB 8.3. Damit können die weiteren Anforderungen an die Daten und an das Messsystem als Grundlage für die Umsetzung definiert werden.



Schritt 4: Definition der Anforderungen an die Datenerfassung und -übertragung

Um die Messdaten der einzelnen Sensoren zusammenzuführen und diese im Hinblick auf die beabsichtigte Informationsgewinnung aufzubereiten, ist zunächst ein Datenerfassungs- und -übertragungssystem erforderlich. Grundsätzlich werden bei der Erstellung des Monitoringkonzeptes die Anforderungen an die Hard- und Software für die Datenerfassung und -übertragung festgelegt. Die Auswahl der Technik ist Bestandteil der Umsetzung (↗ Kapitel 8.3 und Phase 3 in ↗ Kapitel 4.4.2).

Innerhalb des Monitoringkonzepts sollten die folgenden Randbedingungen thematisiert werden:

- Zugang zum Bauwerk
- Einschränkungen für Installationen (z. B. Lichtraumprofile, Herstellung von Löchern oder Durchbrüchen für Kabel oder Sensoren)
- Stromversorgung
- Internetanbindung

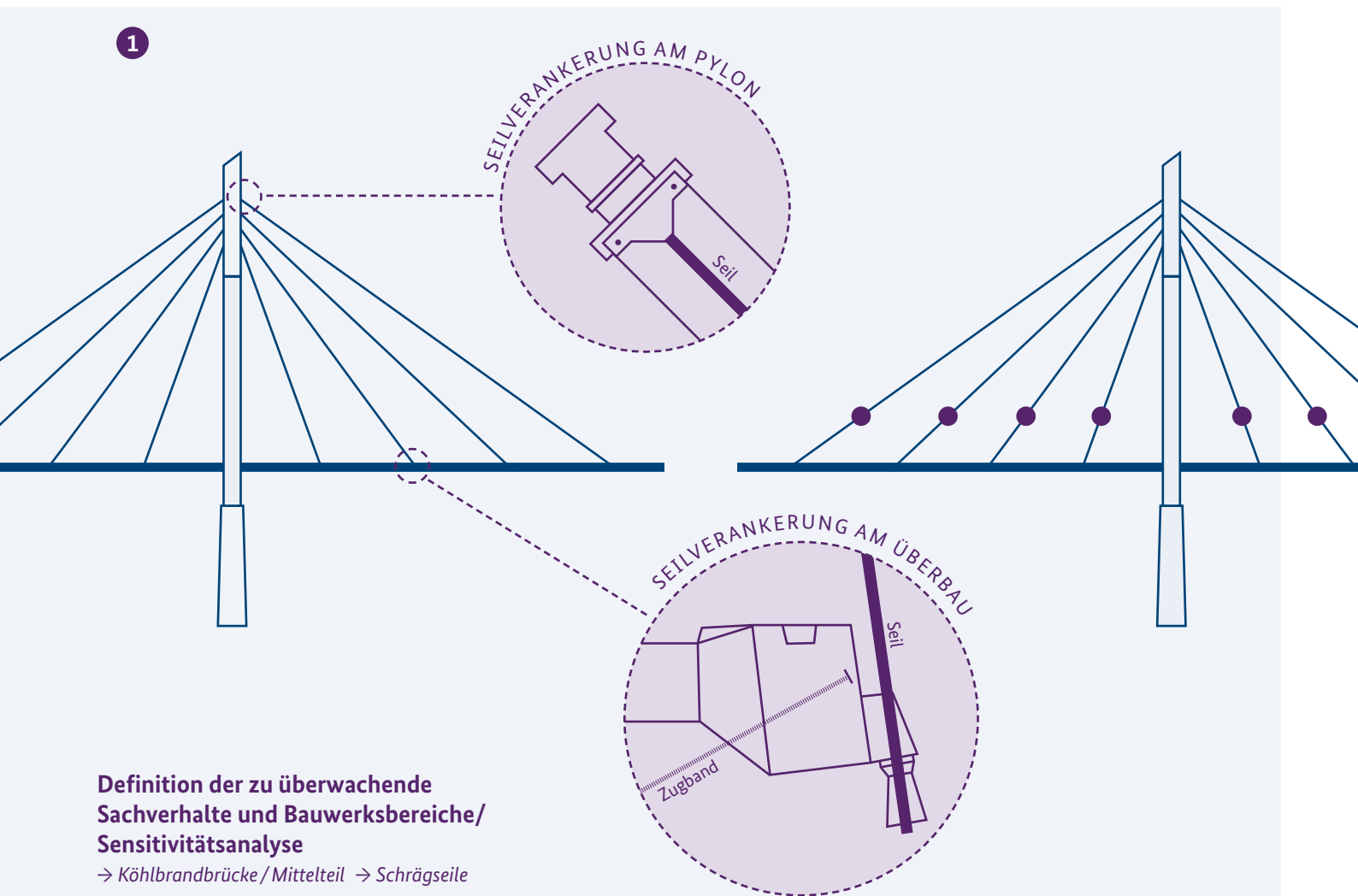
Weiterhin sollten die Anforderungen zu den folgenden Themen formuliert werden:

- Qualitätsansprüche (Installation)
- Dauerhaftigkeit und Schutz der Messtechnik
- Messunsicherheiten, Datenqualität
- Messregime (konstant, statisch, statistisch, dynamisch, tiggergesteuert)
- Funktionskontrollen, Plausibilitätsprüfungen
- Datensynchronisation
- Datenaktualität und -verfügbarkeit (zulässige Latenzzeit)
- Speicherung, Vorhaltung und Sicherung der Daten (ggf. Vorgabe einer Cloud-Speicherung)
- Datenintegrität
- konkrete Vorgaben für die Datenübertragung
- Datenformate
- Sicherheit und Datenschutz
- IOT-Protokolle bzw. Schnittstellen zur Kapselung von Sensordaten

Anhand der Randbedingungen und Anforderungen kann der/die Spezialdienstleister:in Monitoring (↗ Kapitel 4.4.1) eine geeignete Auswahl der Technologien im Zuge der Ausführungsplanung und Umsetzung treffen.

In ABB 8.3 sind die Schritte 1 bis 4 am Beispiel der Schrägseile der Köhlbrandbrücke beispielhaft und in stark reduzierter Form dargestellt.

1



Definition der zu überwachende Sachverhalte und Bauwerksbereiche/ Sensitivitätsanalyse

→ Köhlbrandbrücke / Mittelteil → Schrägseile

Allgemeines zur Konstruktion

Der Überbau der Strombrücke wird wesentlich durch die 88 Schrägseile getragen. Die Lasten der Fahrbahnplatte werden über Kragtraversen in die Seile eingeleitet und von dort über Einzelverankerungen in den Pylon übertragen.

Die Tragseile und die Verankerungskonstruktionen am Pylon sowie an den Querrahmen des Überbaus sind sensible Punkte des Tragwerkes. Ein Teilversagen bspw. eines einzelnen Seils kann kaum durch das Gesamtsystem kompensiert werden. Der Gesamtzustand der Tragseile wird durch den Zustand seiner einzelnen Konstruktionselemente beeinflusst. Hierzu zählen:

- Litzen/Drähte
- Seilummantelung
- Seilverankerung
- Seildämpfer

Modellbasierte Analyse

- Spannungsnachweise der Seile erfüllt
- Ermüdungsschäden sind rechnerisch nicht auszuschließen
- Seilausfall führt im Querrahmen und einigen Kragtraversen zu Spannungsüberschreitungen
- Seilausfall ist in den Pylonen nachweisbar

Entwurfsbasierte Analyse

- Dichtigkeit der Seile

Zustandsbasierte Analyse

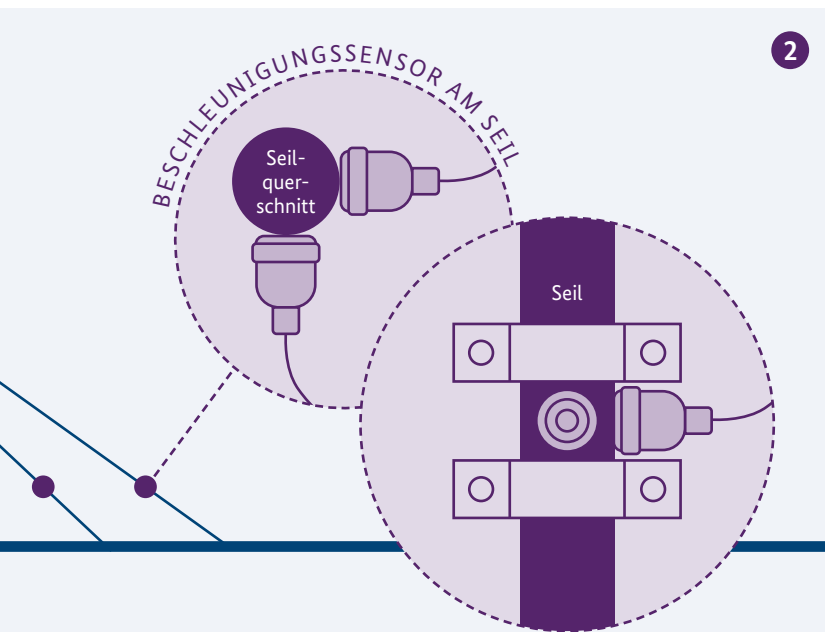
- 1980 Austausch aller Seile
- Neubeschichtung 1996/97
- Keine Schäden
- Bisherige Ultraschalluntersuchungen unauffällig

Erfahrungsbasierte Analyse

- Guter Zustand der Seile und Verankerungen
- Dämpfer neigen dazu fest zu werden

ABB 8.3 Durchführung der Schritte 1 bis 4 am Beispiel der Schrägseile der Köhlbrandbrücke (in stark reduzierter Form)

2



Wahl der Sensorik und Definition eines geeigneten Messlayouts

→ Köhlbrandbrücke / Mittelteil → Schrägseile
→ Seildämpfer

Allgemeines zur Konstruktion

Die Dämpfer werden durch die Seilschwingungen beansprucht. Die Funktionsfähigkeit der Dämpfer hat aber gleichzeitig auch einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Seile, so dass aus den gemessenen Schwingungen Rückschlüsse auf den Zustand der Dämpfer möglich sind.

Die Maßnahme AC wird neben der Zustandsbewertung der Schrägseile auch für die Zustandsbewertung der Seildämpfer vorgesehen. Dies erfolgt ergänzend zur visuellen Inspektion.

Sensoreigenschaften

- Beschleunigungssensor
- Frequenzbereich 0,1 bis 50 Hz
- Schwingungsamplituden 0,01 bis 5 m/s²
- Auflösung mind. 0,01 Hz
- Messrate 100 Hz
- Sensoranzahl 66 Stk.

Applikations- und Schutzbedingung

- Dauerhafte Applikation erforderlich
- Applikationsabstand 1/8 der freien Seillänge zur unteren Seilbefestigung
- Messrichtung ist Seilebene (lokale z-Achse)
- Schutzabdeckung erforderlich
- Kabellängen ≤ 50 m

3

Definition der Analyseverfahren zur Auswertung der Messdaten

→ Köhlbrandbrücke / Mittelteil → Schrägseile
→ Seildämpfer

Maßnahme

AC (Acceleration Cable)

Datenerhebung

→ Elektrische Signale

Datenaufbereitung

→ Skalierung auf physikalische Größe (Beschleunigungen)
→ 5 min. Datensamples

Datenauswertung

→ Fast Fourier Transformation (FFT)
→ Modalparameter als Funktion der Zeit
→ Subspace Identification
→ Dämpfung

Bewertung und Aggregation

→ Grenzwertanalyse
→ Schadensbewertung nach RI-EBW-PRÜF

4

Definition der Anforderungen an die Datenerfassung und -übertragung

→ Köhlbrandbrücke / Mittelteil → Schrägseile
→ Seildämpfer

Maßnahme

AC (Acceleration Cable)

Messunsicherheit

→ Genauigkeitsklasse Sensoren: 0,1 % FS
→ Genauigkeitsklasse AD-Wandler: 0,05 %

Synchronizität

→ Alle Messstellen untereinander auf ±1 ms synchronisieren

Vollständigkeit

→ Erfassung von mind. 95 % aller Messdaten innerhalb von 3 Monaten



Schritt 5: Zusammenfassung in einem Monitoringkonzept

Durch das zuvor beschriebene methodische Vorgehen (Schritte 1 bis 4) werden die wesentlichen Grundlagen für die Umsetzung des Monitorings geschaffen. Diese Grundlagen werden in einem Monitoringkonzept durch den/die Fachplaner:in Monitoring innerhalb der Phase 2 des gesamten Erstellungsprozesses eines Digitalen Zwillings ([Kapitel 4.4](#)) erstellt. Es wird empfohlen, das Monitoringkonzept technologieoffen zu formulieren. I. d. R. wird die Durchführung von Monitoringleistungen als gewerbliche Dienstleistungen auf Basis des Monitoringkonzepts ausgeschrieben, sodass der Fokus auf die Anforderungen, auf die Umsetzung und auf die Ergebnisse gelenkt werden sollte – statt auf die zu verwendenden Technologien. Die detaillierte Beschreibung der Messprinzipien, -geräte und Sensorapplikationen usw. erfolgt innerhalb der späteren Ausführungsplanung. Für den Fall, dass die Leistung des Monitorings ausgeschrieben wird, empfiehlt es sich, konkrete Anforderungen an die Installationsplanung und Installationsdokumentation festzulegen ([Kapitel 8.3](#)). Weiterhin sollten Qualitätssicherungsmaßnahmen definiert werden.

3 – Umsetzung und Dokumentation des Monitorings

Die Ausführungsplanung

Im [Kapitel 8.2](#) wurde gezeigt, wie die Grundlagen für die Messaufgabe in einem Monitoringkonzept zusammengetragen werden. Die Umsetzung des Monitorings selbst setzt jedoch eine präzise Ausführungsplanung (auch Installationsplanung genannt) voraus. Für die konkreten Inhalte der Ausführungsplanung wird auf das DBV Merkblatt [*DBV Monitoring, 2018*] verwiesen.

Es ist üblich, dass die Umsetzung des Monitorings ausgeschrieben wird. Die Ausführungsplanung ist in diesem Falle die erste Teilleistung des/der Spezialdienstleister:in Monitoring. Für die Qualitätsprüfung ist es empfehlenswert, dass der AG selbst oder ein Vertreter dessen die Installationsplanung aus fachtechnischer Sicht prüft. Die geprüfte Planung ist Voraussetzung für die Umsetzung.

Da im Zusammenhang mit dem Digitalen Zwilling die spätere Installationsdokumentation in einem BIM-Fachmodell erstellt wird, empfiehlt es sich direkt die Ausführungsplanung des Messsystems BIM-basiert zu erstellen.

Insbesondere für neue Bauwerke, bei denen die Objektplanung in BIM erfolgt, können Synergieeffekte genutzt werden. Kollisionsprüfungen können im BIM-Modell durchgeführt werden und die Abstimmung mit weiteren Gewerken und dem/der Prüfer:in kann modellbasiert erfolgen.

Die Installation

Nach der Erstellung des Monitoringkonzepts, der Vergabe der Leistungen, der Erstellung einer Ausführungsplanung und deren fachtechnischer Prüfung erfolgt die Installation des Monitorings durch eine/n Spezialdienstleister:in Monitoring, [Kapitel 4.4.1](#). Bei ausreichender Leistungsfähigkeit kann dies auch durch den/die Fachplaner:in Monitoring erfolgen. Die Umsetzung umfasst die Applikation der gesamten Messtechnik am Bauwerk, die Sensorkalibrierung, sowie die Initialisierung des Messsystems.

Nach Fertigstellung der Installationsarbeiten erfolgt die Inbetriebnahme des Monitoringsystems und die Abnahme der Leistung durch den/die AG oder seine/n Vertreter:in. Kriterien sowie Grundlagen für die Abnahme sollten möglichst im Monitoringkonzept aufgenommen werden.

Basis für die Bewertung des Bauwerkszustands im Sinne des Digitalen Zwillings sind verfügbare Messdaten mit einer hohen Qualität. Bereits bei der Installation und Konfiguration des Monitoringsystems sind durch geeignete Qualitätssicherungsmaßnahmen mögliche Installations- bzw. Konfigurationsfehler zu verhindern. Diese Maßnahmen sollen im Monitoringkonzept beschrieben werden. Durch eine fachlich korrekte Installation der Messtechnik durch Fachpersonal und durch eine anschließende Plausibilitätskontrolle soll die Richtigkeit und Präzision der Messwerte gewährleistet werden. Hierzu sind entsprechende Prüfungen zur Funktionstüchtigkeit der Messhardware, Zuordnungsprüfungen der Sensoren, Prüfungen der Stabilität der Messbasis (Messbasistest) sowie Überprüfungen des Messsignals hinsichtlich der Größe, Skalierung, Vorzeichenrichtigkeit etc. durchzuführen [*DBV Monitoring, 2018*]. Zur Plausibilisierung der Messwerte empfiehlt sich eine begrenzte Probelaufzeit des Monitoringsystems. Die Ergebnisse des Probelaufs sollen dokumentiert werden, Grundlage für die Abnahme des Messsystems sein und anschließend im Digitalen Zwilling hinterlegt werden.

In der Phase der Installation werden durch die o. g. Maßnahmen wichtige Grundlagen für die Qualitätssicherung gestellt. Diese Qualitätssicherung muss im laufenden Betrieb durch geeignete Mechanismen fortgeführt werden. Dazu zählen neben der Eigenüberwachung des Messsystems

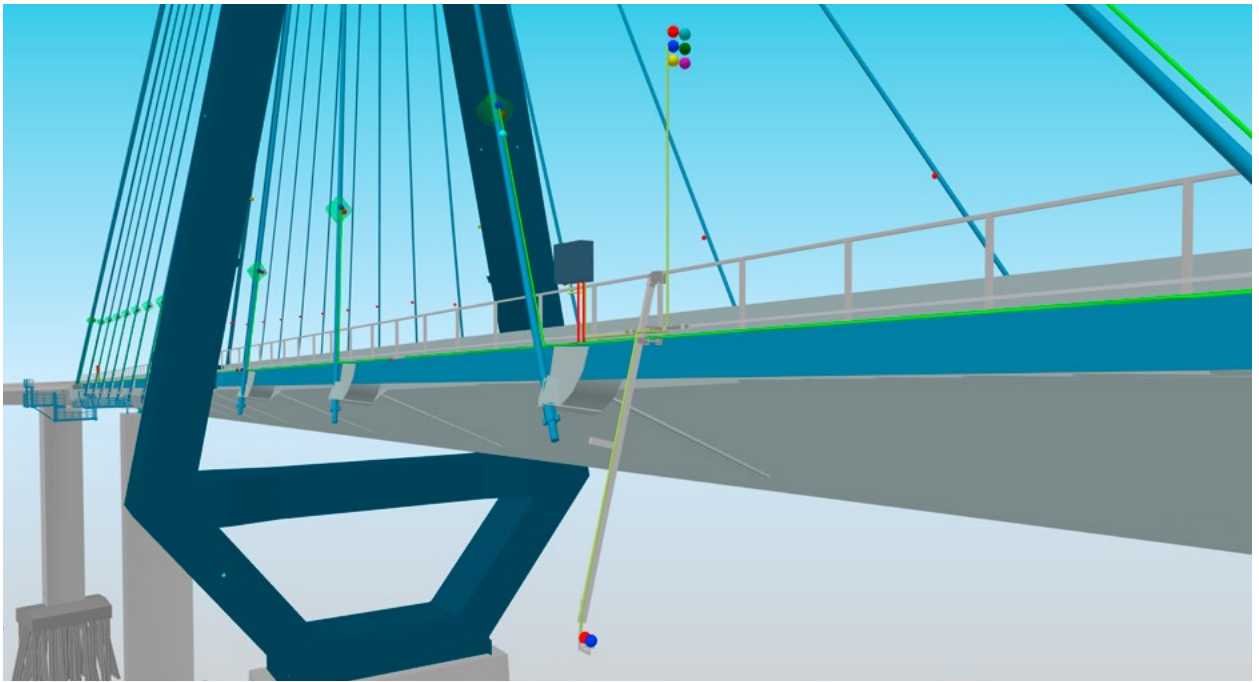


ABB 8.4 Geometrische Modellbildung in BIM-Fachmodell Bauwerksmonitoring der Köhlbrandbrücke [Ullerich et al., 2020]

zur Erkennung von technischen Problemen (z. B. Stromausfall, offensichtliche Sensorfehlfunktion) auch eine automatische Plausibilitätsanalyse der Messsignale im Zuge der Datenverarbeitung (↗ Kapitel 8.4).

Die Dokumentation

Weiterhin ist nach erfolgter Installation eine Installationsdokumentation über das komplette Messsystem im BIM-Fachmodell Bauwerksmonitoring zu erstellen. Diese soll die tatsächliche Lage, Eigenschaften und Ausführung der Messstellen, Kabel, deren Führungen sowie die Messsysteminfrastruktur aufführen. In der Dokumentation sind zudem die Ergebnisse der Funktions- und Plausibilitätskontrolle aufzunehmen: Zuordnungs-, Betrags- und Richtungsprüfungen der aufgebrachten Signaländerung sowie Messbasistest und ausgewertetes Ergebnis der Initialprobezeit. Die Dokumentation ist Grundlage für die Abnahme der Messanlage durch den/die AG und stellt für den weiteren Prozess eine wesentliche Basis dar. Insbesondere für die Erstellung der Datenauswertekonzepte und für die Programmierung von Algorithmen (↗ Kapitel 9) sind genaue Informationen zur Messtechnik erforderlich, um die richtigen Berechnungen durchführen zu können.

Im Kontext des Digitalen Zwillings werden die Messdaten der einzelnen Sensoren weiterverarbeitet und zu Zustandsindikatoren aggregiert. Für die Transparenz und die Nachvollziehbarkeit des Aggregationsprozesses ist eine Verknüpfung zwischen Ergebnis (Zustandsindikator bzw. Zwischenergebnisse) und Datenquelle (Sensor) wichtig.

Für jede Messstelle kann zwischen dem Datenstrom und den Metainformationen unterschieden werden. Der Datenstrom bildet das für die Datenverarbeitung nutzbare

Signal und stellt eine dynamische Größe dar. In Abhängigkeit von der Messrate entstehen erhebliche Datenmengen, die in dafür geeigneten Datenbanken vorgehalten werden sollen (↗ Kapitel 11). Die Metainformationen hingegen sind statische Informationen, die sich über die Zeit nicht oder selten ändern. Diese Metainformationen sind z. B. Installationsdatum, Art des Sensors, Foto, Lokalisierung usw. Sie werden im Kontext des Digitalen Zwillings an einem anderen Ort als die Messdaten gespeichert: Fotos können in einer geeigneten Datenbank gespeichert werden, Merkmale und Lokalisierung werden in einem BIM-Fachmodell integriert, siehe auch folgender Abschnitt. Die Zusammenführung der Informationen an einem gemeinsamen Ort muss in geeigneter Weise erfolgen: Jede Komponente des Monitoringsystems ist durch eine eindeutige ID zu beschreiben. Diese IDs müssen die einzelnen Daten und Dateien an den verschiedenen Speicherorten für eine Verknüpfung aller Informationen besitzen.

Während des Betriebs der Messanlage werden durch Wartungen und Reparaturen gewisse Änderungen vorgenommen. Diese Änderungen sind in der Betriebsdokumentation aufzunehmen und mit der Installationsdokumentation bzw. mit dem BIM-Fachmodell Monitoring über die ID der jeweiligen Messstellen zu verknüpfen.

Das BIM-Fachmodell Monitoring und die Datenverknüpfung

Es wurde soeben gezeigt, dass Daten in Abhängigkeit von der Art der Informationen an unterschiedlichen Stellen gespeichert und anschließend miteinander verknüpft werden müssen. Das BIM-Fachmodell spielt dabei eine wichtige Rolle (↗ Kapitel 5). Dort wird die Lokalisierung und Modellbildung der Elemente des Messsystems (Sensoren,

Messkabel, Messsystem, Stromversorgung und weitere Systemkomponenten) vorgenommen und die wesentlichen Merkmale der Installationsdokumentation werden gespeichert. Das BIM-Fachmodell ist als Datenquelle und Visualisierungsgrundlage für den Digitalen Zwilling notwendig. Die Erstellung des BIM-Fachmodells liegt unter Berücksichtigung der AIAs im Aufgabenbereich des/der Spezialdienstleister:in Monitoring (↗ Kapitel 4.4.1).

Die Modellbildung kann in der einfachsten Variante über 3D-Koordinaten in Form von Punkten oder Linien in einem georeferenzierten Modell erfolgen. Einen höheren geometrischen Detaillierungsgrad erfährt das Modell durch eine explizite 3D-Modellierung der verorteten Sensoren, Kabel usw., siehe auch Beispiel in **ABB 8.4**. Der Mehrwert des höheren Levels of Geometry (LOG) liegt bei der Planung von Applikations-, Wartungs- oder Reparaturarbeiten sowie in der Kollisionsprüfung, in der Regel ist aber ein geringer LOG für die Dokumentation ausreichend.

Die Vergabe von Merkmalen komplettiert die Modellierung und Verortung im 3D-Modell. Es existieren bislang noch keine standardisierten Bauteilkataloge und Attribuierungen für die Monitoringplanung und -dokumentation. Entsprechende Entwicklungen sind derzeit noch Gegenstand der Forschung. Eine mögliche Zuordnung von Merkmalen für einen Sensor ist beispielhaft in Tabelle rechts dargestellt. Die darin gezeigte ID ist über die gesamte Dauer des Monitorings unveränderlich. Durch die Angabe der angeschlossenen Kabel ist auch eine Verknüpfung zu den weiterführenden Elementen der Messkette möglich. Zusätzlich zu den in der Tabelle dargestellten Informationen können noch weitere Informationen, wie z. B. Änderungen oder Reparaturen, eingetragen werden.

Innerhalb des BIM-Fachmodells werden die Sensoren dem jeweils überwachten Bauteil zugeordnet. Jedes Bauteil ist gleichzeitig hierarchisch einer Bauteilgruppe, einem Teilbauwerk sowie einem Bauwerk zugewiesen, sodass ähnlich zu den weiteren Elementen im BIM-Modell eine Zuordnung nach der Taxonomie der ASB-ING möglich ist.

Die Metainformationen zur Messtechnik sind im BIM-Fachmodell durch die Positionierung sowie durch Merkmale hinterlegt und in separaten Datenbanken z. B. für Fotos, Detailzeichnungen der Installationsdokumentation, Betriebsdokumentation (Dokumentation aller Wartungs- und Reparaturaktivitäten an dem Messsystem) gespeichert. Die Messdaten selbst sind in einer weiteren geeigneten Datenbank abgelegt. Diese Informationen sollen im Digitalen Zwilling zusammengeführt werden. Das erfolgt

Modellelement/ Objekt

Sensor



Merkmalsname	Beispiel	Bemerkung
ID	5858af9b-aba4-43c8-9c74-6290334f670c	Generierte ID in Form einer UUID, Version 3, 4 oder 5
element_designation	Accelerometer	Sensorbezeichnung
sensor_type	ICP Accelerometer	Sensorart
sensor_model	PCB 393A03	Sensortyp
sensor_designation	27490AC-_Se10Suy	Messstellenbezeichnung
structural_component	Seil 16001	Bauteilbezeichnung
cable_designation	11E1	Angeschlossenen an Kabel
mount	yes	Halterungskonstruktion vorhanden?
installation_date	06.06.2020	
drawing	Verknüpfung mit Dokument	Link bzw. Bestandszeichnungsnummer

nach dem Linked-Data-Ansatz über die eindeutige ID, ↗ Kapitel 5. Der Zusammenhang der verschiedenen Datenquellen ist schematisch in **ABB 8.5** dargestellt. Bei den Merkmalen kann auch entschieden werden, diese nicht über den Embedded-Data-Ansatz im BIM-Fachmodell direkt zu verorten, sondern nach dem Linked-Data Ansatz – und somit nur eine Verknüpfung zwischen dem BIM-Fachmodell und weiteren Informationen herzustellen. Damit können die Eigenschaften der Elemente des Messsystems zusammen mit der Betriebsdokumentation in einem separaten und für diesen Zweck geeigneten Werkzeug gepflegt werden.

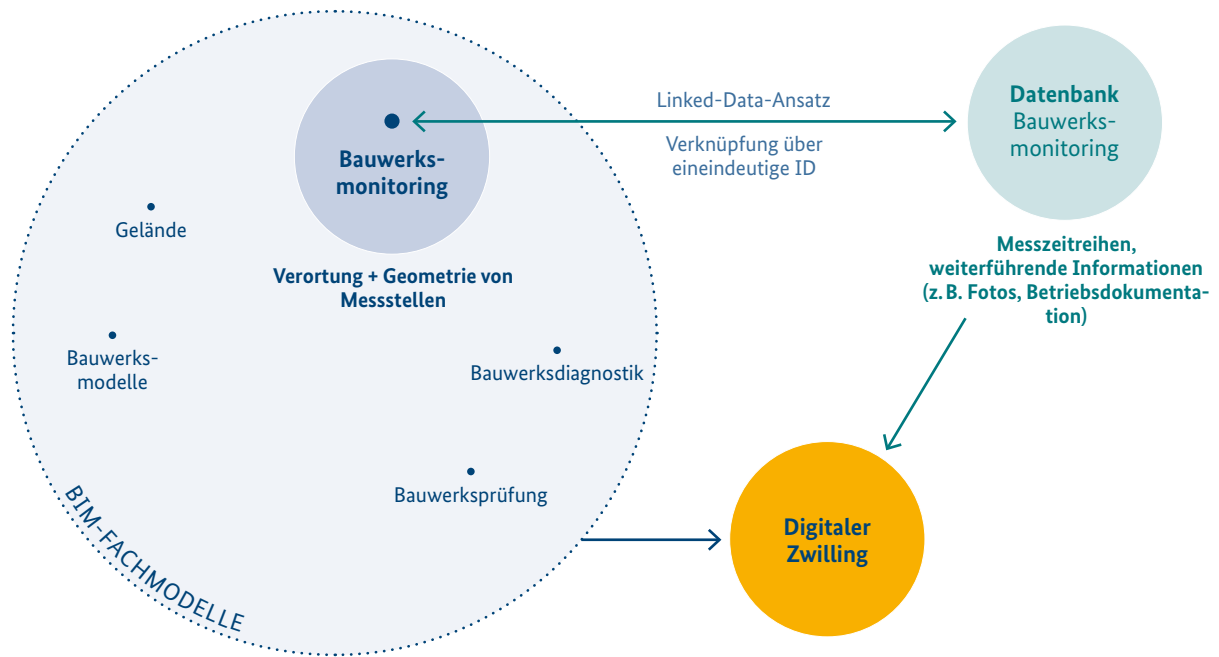


ABB 8.5 Verknüpfung mit dem BIM-Fachmodell „Bauwerksmonitoring“ im Kontext des Digitalen Zwillings

4 – Anforderungen an die Daten und an das System in der Betriebsphase des Monitorings

Datenqualität

Nach der Definition der zu überwachenden Sachverhalte im Zuge der Sensitivitätsanalyse, der Festlegung des geeigneten Messlayouts sowie der geeigneten Technik, ist die Sicherstellung der Qualität der Monitoringdaten die nächste wesentliche Voraussetzung für die Bewertung des Bauwerkszustandes.

Gerade im Kontext des Digitalen Zwillings, in dem mehrere Akteure die Daten verarbeiten (↗ Kapitel 4.4.1), die Messdaten direkten Eingang in die Bewertung des Bauwerkszustands finden und mehrere Stakeholder einen Echtzeit-Zugriff auf die Ergebnisse besitzen, spielt eine stringente Sicherung und eine transparente Dokumentation der Datenqualität eine wesentliche Rolle.

Es werden wesentliche Qualitätsmerkmale identifiziert, die im Prozess zu beachten sind:

- **Messtechnische Rückführbarkeit/Datenintegrität:**
bedingt die stetige Nachvollziehbarkeit des Zustandekommens der Messwerte, ausgehend von den elektrischen Rohdaten
- **Vollständigkeit:**
ist gegeben, wenn die Kontinuität im Zeitverlauf die Veränderung einer Messgröße sicher abbildet

→ **Aktualität und Verfügbarkeit:**

ist gegeben, wenn die Latenz zwischen dem Auftreten einer Änderung am überwachten Objekt und der Anzeige in der Visualisierung nach Signalprozessierung auf ein tolerables Maß beschränkt ist

→ **Zuverlässigkeit/Glaubwürdigkeit:**

bedingt die Richtigkeit der Messung und der darauf aufbauenden Verarbeitungsschritte.

Die Grundlage für eine qualitativ hochwertige Messung wird in der Phase der Installation gesetzt (↗ Kapitel 8.3). Die Überwachung der Qualität muss im laufenden Betrieb durch geeignete Mechanismen fortgeführt werden. Diese werden im folgenden Absatz vorgestellt.

Funktionsprüfung, Plausibilitätsprüfung und Fehlererkennung

Die kontinuierliche Überwachung des Messsystems (in Form einer Diagnose der Systemparameter) ermöglicht die Erkennung von Grundauffälligkeiten wie Unterbrechungen der Stromversorgung, Ausfall einzelner Komponenten oder Unterbrechungen der Datenübertragung. Damit können die Kriterien der Vollständigkeit, Aktualität und Verfügbarkeit überprüft werden.

Eine weitere Aufgabe betrifft die Überprüfung der Plausibilität des Signals und die Erkennung von Fehlern. Je nach Schwere der erkannten Fehler, können diese in den Daten im Zuge der Datenaufbereitung bereinigt werden.

Typische Fehler sind sensorspezifische Rausch- und Störeinflüsse, Drifts, Sprünge oder Ausreißer. Die Erkennung dieser Fehler setzt eine automatische und kontinuierliche Analyse des Messsignals für jeden Sensor voraus. Dazu sind einzelne Algorithmen nötig, die parallel zu den Zustandsindikatoren des Bauwerks ([↗ Kapitel 9](#)) die Daten zu Qualitätsindikatoren der Messtechnik analysieren und aggregieren. Oft sind die Auffälligkeiten im Messsignal nicht trivial zu erkennen. Die Entwicklung dieser Qualitätsindikatoren erfordert deshalb Know-How im Bereich der Messtechnik und die Einbeziehung von geeigneten Methoden. Hinsichtlich der Fehlererkennung existieren Verfahren auf Basis von physikalischen oder analytischen Redundanzen. Eine physikalische Fehlererkennung vergleicht die Messwerte eines Sensors mit den Messwerten von redundanten Sensoren. In analytischen Fehlererkennungen werden hingegen virtuelle Sensordaten basierend auf den inhärenten Korrelationen von Strukturantwortdaten verschiedener Sensoren berechnet [*Kraemer & Fritzen, 2007*]. Darüber hinaus können auch Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens für die Fehlererkennung zum Einsatz kommen.

Die Erkennung einer Auffälligkeit oder eines Fehlers ist Anlass für eine detaillierte Diagnose und, wenn erforderlich, für eine Wartung oder Reparatur. Im Kontext des Digitalen Zwillings und der automatischen Datenaggregation zu Zustandsindikatoren sind die Informationen zur Datenqualität bei der Bewertung des Bauwerkszustands zu berücksichtigen. Dadurch soll vermieden werden, dass ein Zustand anhand von unplausiblen Daten errechnet wird.

Datenerhebung und -speicherung

Die Daten sind im Sinne des Digitalen Zwillings in einem geeigneten Umfang zu erheben und über einen ausreichenden Zeitraum zu speichern, sodass die notwendigen Analysen durchgeführt werden können, eine Rückführbarkeit der aggregierten Daten möglich ist und eine ausreichende Historie vorliegt. Die Datenmenge sollte aber auf das erforderliche Minimum reduziert werden, um Ressourcen zu sparen.

Die hochfrequente Erhebung von Daten sollte deshalb möglichst ereignisgesteuert erfolgen. Die Triggerkriterien können bereits in der Monitoringkonzeptphase festgelegt werden und erfahren im Betrieb ihre Detaillierung.

Auch bei der Speicherung, Vorhaltung und Sicherung von Messdaten muss über Datenreduktion nachgedacht werden. Gerade bei einer lebensdauerbegleitenden

Überwachung fallen enorme Datenmengen an. Nicht alle Daten müssen beibehalten werden. Es ist im Projekt in Abstimmung mit dem/der Auftraggeber:in zu definieren, wie lange welche Daten gespeichert werden. Die Frage der Speicherung ist auch Bestandteil der Forschung: Ab wann können Rohdaten gelöscht werden? Welche aggregierten Daten müssen beibehalten werden? Wer ist für die Speicherung welcher Daten zuständig? Auch zur Klärung dieser Fragen sind Digitale Testfelder im Sinne des [↗ Kapitel 1](#) notwendig.

Datenformate

Die Messdaten müssen im Kontext des Digitalen Zwillings jederzeit auffindbar und von den verschiedenen Akteuren im Prozess lesbar sein. Dies erfordert eine klare Struktur des Datenformats. Grundsätzlich ist zur eindeutigen Identifizierung der Messdaten jeder Datenkanal mit einer eindeutigen ID zu versehen. Diese IDs sind im Zuge der Installationsplanung festzulegen, zu dokumentieren ([↗ Kapitel 8.3](#)) und sind über die gesamte Projektlaufzeit unveränderlich und gültig.

Das Datenformat sollte offenen Standards entsprechen (z. B. .csv) um einen langfristigen und einfachen Datenzugriff sicherzustellen. Folgend wird ein Vorschlag für die Formatierung gezeigt:

- Trennzeichen als Semikolon und Dezimaltrennzeichen als Punkt
- Kanal-ID in der ersten Zeile
- Zeitstempel durchgängig in deutscher Winterzeit oder im UTC Zeitformat
- Angabe des Zeitkanals mit einer ausreichenden Auflösung des Zeitstempels
- In der zweiten Zeile die physikalischen Einheiten, in eckigen Klammern eingeschlossen. Zum Beispiel: [°C]
- Messdaten mit 6 Nachkommastellen aufzeichnen
- Formatierung in UTF-8

5 – Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Hinsichtlich des Monitorings bestehen weiterhin Herausforderungen. Eine davon betrifft die Dauerhaftigkeit von Sensorik. Sollen Digitale Zwillinge das reale Bauwerk lebensdauerbegleitend digital abbilden, so ist auch die dazu notwendige Sensorik für die planmäßige Lebensdauer des Bauwerks auszulegen. Altern Sensoren, so können Defekte oder Messwertdrifts auftreten. Insbesondere Dehnungsmessstreifen können in Abhängigkeit von der Temperatur

und der Feuchtigkeit ausgeprägte Nullpunktdrifts aufweisen [Herrmann et al., 2015]. Die automatisierte Erkennung solcher Effekte ist essenziell für die kontinuierliche Erhebung von richtigen und präzisen Messdaten. In diesem Hinblick sind Maßnahmen zur Fehlererkennung, Wartung oder gar zum präventiven Austausch von Sensoren zu treffen. Darüber hinaus besteht weiterer Forschungsbedarf zur Langzeitstabilität von Sensorik sowie insbesondere bei drahtlosen Sensoren zu deren Datenübertragung und Energieversorgung.

Für ein lebensdauerbegleitendes Monitoring sind zudem die Methoden zur Erfassung von relevanten Parametern sowie die optimale Sensorplatzierung von besonderer Bedeutung. Diesbezüglich wird zwischen einer globalen und einer lokalen Überwachung zur Identifikation von Schäden bzw. deren Entwicklung unterschieden ([↗ Kapitel 8.2](#)).

Bei der globalen Überwachung werden die Auswirkungen von Schäden auf das Gesamttragwerksverhalten durch die Messung von Tragwerksreaktionen erfasst. Die Identifikation von Strukturänderungen komplexer Bauwerke auf Grundlage von Messungen verschiedener Parameter ist derzeit Gegenstand vieler Forschungsvorhaben.

Lokale Schäden haben mitunter nur sehr geringe Auswirkungen auf das Gesamttragwerksverhalten. Sie können nur durch direkte Messungen im Schadensbereich oder in ihrer unmittelbaren Nähe erkannt werden. Die frühzeitige Identifikation solcher Bereiche (Hot Spots) im Zuge einer Sensitivitätsanalyse stellt insbesondere bei neuen und mängelfreien Bauwerken eine besondere Herausforderung dar. Bis zum ersten Schadenseintritt können häufig mehrere Jahre vergehen. Für die messtechnische Erkennung von sich anbahnenden Schäden sind entsprechende Prognosemodelle notwendig, die auch die Individualität des Bauwerks berücksichtigen. Diese Modelle nutzen mitunter nicht nur einen Messwert, sondern greifen u. U. auch auf weitere Messwerte wie z. B. Temperatur, Feuchte etc. zurück. Die Entwicklung von umfangreichen Prognosemodellen ist bisweilen noch Gegenstand der Forschung. Neben der Entwicklung der eigentlichen Modelle bestehen derzeit noch Herausforderungen in der Verknüpfung von Echtzeit-Monitoringdaten mit diesen Prognosemodellen, sowie beim Umgang mit großen Datenmengen im Hinblick auf das Datenmanagement und die Data Governance.

Insbesondere durch das lebensdauerbegleitende Monitoring fallen enorme Datenmengen an. Eine derzeit noch nicht allgemeingültig beantwortbare Fragestellung betrifft

dabei die erforderliche Datenspeicherungsdauer. Derzeit werden noch individuelle, projektbezogene Datenspeicherzeiten vereinbart. Forschungsbedarf besteht insbesondere für die Beantwortung von Fragestellungen zu erforderlichen Mindestspeicherzeiten von Rohdaten und aggregierten Daten sowie zur Zuständigkeit der Datenspeicherung: „Wer speichert welche Daten wie lange?“, siehe auch Erläuterungen in [↗ Kapitel 11.1](#).

Darüber hinaus stellt die in [↗ Kapitel 8.2](#) präsentierte Methodik der Sensitivitätsanalyse einen ersten Ansatz für eine möglichst allgemeingültige Vorgehensweise zum Entwerfen eines lebensdauerbegleitenden Monitorings im Kontext des Digitalen Zwillinges dar. Diese Methodik ist derzeit ebenfalls Gegenstand der Forschung.

Im Hinblick auf die Digitalisierung der Bundesfernstraßeninfrastruktur sollten perspektivisch Überlegungen zur Schadenserkenntnis mit geeigneten Überwachungsmethoden und Sensoren an typisierten Brücken erfolgen. Damit könnten Empfehlungen zu sinnvollen Parametern und geeigneten Sensoren erarbeitet werden, die standardmäßig bei der Erstellung von Digitalen Zwillingen für typische Brückenkonstruktionen im Neubau, aber auch im Bestand, gemessen bzw. eingesetzt werden könnten.



9 – Data Analytics: Aggregation der Bauwerks- informationen

Kurzfassung

Aus den Fachdisziplinen der Bauwerksprüfung, -diagnostik, -monitoring sowie der rechnerischen Nachweisführung lassen sich Daten akquirieren, die den Zustand und die Tragfähigkeit eines Bauwerkes beschreiben. Diese unstrukturierten Daten sind in ihrer Rohform zunächst kontextfreie Angaben. Aus Daten werden Informationen, wenn sie verwaltet, analysiert und kontextbezogen interpretiert werden. Erst die Informationen führen zu einem Erkenntnisgewinn, wodurch Entscheidungen ermöglicht werden. Häufig können Informationen im Kontext zueinander existieren, sich gegenseitig beeinflussen oder gar bedingen. Eine Aggregation dieser Informationen kann folglich zu einer optimierten Bewertung des Bauwerkzustandes und der Tragfähigkeit beitragen. Der Digitale Zwilling bietet hierfür eine Grundlage. Die Informationen können in strukturierter, hierarchisierter Form an einem Bauwerksmodell exakt verortet werden. Der Mehrwert entsteht dabei nicht nur durch das verbesserte Datenmanagement, sondern auch durch die Möglichkeit, die Informationen durch die exakte Lokalisierung zu kontextualisieren.

Die Herausforderung besteht aktuell darin, dass die Vorgehensweisen der einzelnen Fachdisziplinen bei der Erfassung, Verarbeitung und Bewertung der Informationen keinem übergreifenden, einheitlichen Vorgehen folgen. Die Informationen münden zu unterschiedlichen Zeitpunkten in unterschiedlichen Zustandskennzahlen. Auch sorgt die variierende Art der Datenablage für erschwerte Bedingungen bei der Kontextualisierung der Einzelinformationen. Zur aggregierten Darstellung und Bewertung dieser Informationen im Digitalen Zwilling ist eine Vereinheitlichung der Prozesse von Vorteil. Damit dies gelingen kann, ist eine klare Strukturierung der Prozesse notwendig. Die Bauwerksprüfung und die rechnerische Nachweis-

führung stellen die unabdingbaren Hauptdisziplinen zur Bewertung des Bauwerkes dar. Beide münden in der Praxis in getrennten Zustandskennzahlen, welche einerseits durch die Erfassung von Schäden und Mängeln den Bauwerkzustand und andererseits durch die Untersuchung der Lastabtragungseigenschaften und Einwirkungsbedingungen die Tragfähigkeit und das Lastniveau beschreiben. Als unterstützende Disziplinen dienen hier das Monitoring und die Diagnostik durch die Generierung zusätzlicher, bauwerksspezifischer Informationen. Diese bauwerksspezifischen Informationen können entweder in den Zustandskennzahlen münden oder sie kennzeichnen einen Handlungsbedarf innerhalb der Hauptdisziplinen. Besonders das Monitoring bietet durch die Möglichkeit der hochfrequenten Messung eine höherfrequente Erfassung des Bauwerkzustandes und möglicher Veränderungen von Lastniveaus und Lastabtragungseigenschaften. Die aktuell primär reaktive Instandhaltungsstrategie kann durch die hochfrequente Überwachung in eine zustandsorientierte oder bei ausreichendem Datenbestand gar in eine prädiktive Instandhaltungsstrategie überführt werden. Dabei bestimmt die Ausprägung des Data-Analytics-Bausteins eines Digitalen Zwillings, ob es sich um einen Reifegrad von 2, 3 oder 4 handelt.

Es wird darüber hinaus ein alternativer Ansatz zur Zustandsaggregation aus dem Projekt *smartBRIDGE Hamburg* gezeigt, bei dem durch einheitlich bewertete Zustandsindikatoren eine Aggregation aller Informationen ermöglicht wird. Die Hauptdisziplinen der Bauwerksprüfung und rechnerischen Nachweisführung werden aufgrund der Tatsache, dass sie letztlich die Standsicherheit des Bauwerkes beschreiben, mit einheitlichen, zustandsnotenähnlichen Zustandskennzahlen bewertet.

1 – Wertschöpfung aus Daten

Daten und Informationen

Die Begriffe Daten und Informationen sind in unserer heutigen Gesellschaft allgegenwärtig und werden mitunter synonym verwendet. Allerdings ist deren Bedeutung verschieden. Daten sind die Grundlage der Informationsgewinnung – der Umwandlungsprozess von Daten in Informationen ist dabei ein grundlegender Bestandteil der eigentlichen Wertschöpfung [BVDW, 2018]. Zur genaueren Definition beider Begriffe wird in der wissenschaftlichen Literatur häufig eine auf die jeweilige Fachrichtung zugeschnittene Begriffsbildung verwendet [Herrmann et al., 2017]. Daten, die beispielsweise aus dem digitalen Bauwerksmonitoring hervorgehen, sind in dieser Hinsicht zunächst als kontextfreie Angaben zu verstehen, die aus interpretierbaren Zeichen bzw. Signalen bestehen, (ABB 9.1). Aus Daten entstehen dann Informationen, wenn sie mit Hilfe von Informationstechnologie verwaltet, analysiert und kontextbezogen interpretiert werden, sodass sie zu einem Erkenntnisgewinn führen [Witt, 2010]. Anhand dieser Definitionen wird auch deutlich, dass zwischen Datenverarbeitung und Informationsverarbeitung unterschieden werden muss [Herrmann et al., 2017]. Durch die Verarbeitung von Informationen und deren Verknüpfung mit Erfahrungen wird Wissen erlangt, welches letztlich Entscheidungen ermöglicht.

Ein objektiver Wert von Daten ist so gut wie nicht zu ermitteln. Denn erst die aus den Daten gewonnenen Informationen erhalten einen Wert, der stets im Kontext mit einer spezifischen Wertschöpfungskette steht [BVDW, 2018]. Demnach kann die Wertschöpfungskette, in der aus Rohdaten wertvolle Informationen entstehen, in fünf Stufen eingeteilt werden (ABB 9.2). Im Zuge der Datengewinnung werden Rohdaten gemessen oder auf andere Art und Weise akquiriert. Die Daten können aus verschiedenen Quellen stammen und über unterschiedliche Wege der Wertschöpfungskette zugeführt werden. In der anschließenden Datenaufbereitung und -auswertung werden die Rohdaten für die weitere Verarbeitung vorbereitet. Dies erfolgt stets im Hinblick auf die beabsichtigte Datennutzung und kann entsprechend auf verschiedenen Wegen erfolgen. So können die Daten beispielsweise sortiert, geprüft, bereinigt, synchronisiert, fusioniert oder auch mit weiteren Metadaten angereichert werden. Im Zuge der Informationsgewinnung werden die aufbereiteten Daten kontextualisiert und „veredelt“. Beispiele hierfür sind geeignete Analysen,



ABB 9.1 Wissenspyramide, in Anlehnung an [Herrmann, 2012] und [Herrmann et al., 2017]

die Zusammenführung von Einzeldaten, die miteinander im Kontext stehen, die Erstellung und die Anwendung von physikalischen und/oder statistischen Modellen sowie die Bildung von Prognosen. Dadurch lassen sich aus mitunter einfachen Daten wertvolle Informationen gewinnen. Die nun gewonnenen Informationen müssen im Zuge der Informationsbereitstellung in einem oder mehreren geeigneten technischen Systemen gespeichert und der beabsichtigten Nutzer:innengruppe zur Verfügung gestellt werden. Bestenfalls werden sie leicht konsumierbar, nachvollziehbar und plausibilisierbar in einer entsprechenden Nutzungsumgebung bereitgestellt, [7 Kapitel 10](#). So können Informationen in der beabsichtigten Art und Weise genutzt werden, beispielsweise indem Entscheidungen über geeignete Maßnahmen für die Bauwerkserhaltung oder -nutzung getroffen werden.

Von der Datenauswertung zur Informationsgewinnung

Die Datenaufbereitung und -auswertung ist von wesentlicher Bedeutung für die Informationsgewinnung. Die Aufbereitung für Monitoringdaten wurde bereits in [7 Kapitel 8.3](#) thematisiert. Darüber hinaus finden sich umfangreiche Informationen dazu in [Sawo et al., 2015]. Im Anschluss erfolgt die Datenauswertung. Hier findet die eigentliche Datenanalyse statt, indem die bereinigten und vollständigen Daten gesondert verarbeitet bzw. verrechnet werden. Beispiele dafür sind die Bildung von Mittelwerten, das Extrahieren von Minimal- und Maximalwerten, die Verrechnung von Wegmessdaten zu Krümmungen oder Verdrehungen, die Durchführung einer Modalanalyse, die Erstellung von Regressionen,

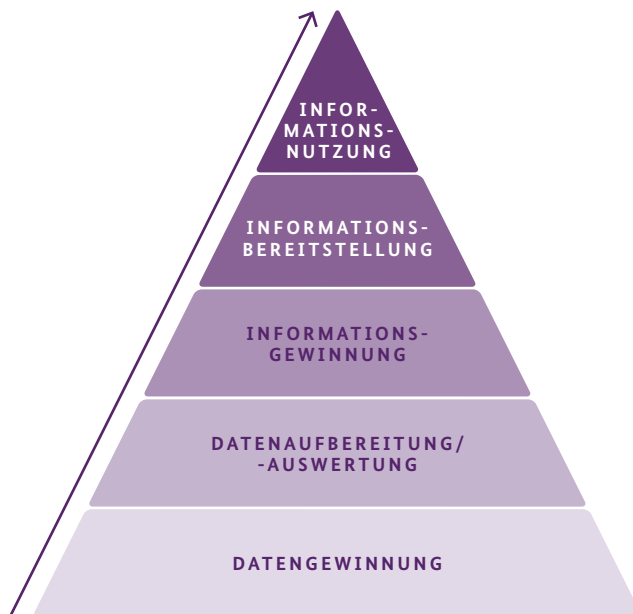


ABB 9.2 Vereinfachte Darstellung des Wertschöpfungsprozesses aus Daten [BVDW, 2018]

Zählungen, Klassifizierungen von Signalen, Signalfilterungen usw. [DBV Monitoring, 2018]. Diese ausgewerteten Daten lassen sich anschließend mit rechnerischen Annahmen bzw. Ergebnissen oder speziellen Grenzwerten vergleichen. Es können mit diesen Daten aber auch spezielle Condition Indicators (Zustandsindikatoren) und Prognosemodelle erstellt werden. Die dazu notwendigen Auswertalgorithmen und Bewertungsmaßstäbe werden innerhalb des Projektteams Digitaler Zwilling entwickelt bzw. angepasst ([Kapitel 4.4](#)) und im Monitoring- oder Untersuchungskonzept formuliert ([Kapitel 7.2](#) und [Kapitel 8.2](#)). Durch die Auswertung und Kontextbildung der Daten lassen sich schließlich Informationen über das Strukturverhalten des Bauwerks erlangen, die zur spezifischen Bewertung und Entscheidungsfindung herangezogen werden. Je nach Ausprägung der Datenaus- und Datenbewertung entscheidet die darüber, ob der Digitale Zwilling einem Reifegrad 2, 3 oder 4 zugeordnet werden kann. Darüber hinaus sollte die Auswertung automatisch und ausreichend zeitnah erfolgen, um die „Echtzeitfähigkeit“ des Digitalen Zwillings zu ermöglichen, [Kapitel 11.3](#). Zusätzlich ist auch eine Plausibilisierung der Auswertungsergebnisse angebracht. Hiermit sollen Mess- oder Auswertefehler sowie Fehlfunktionen erkannt und ggf. behoben werden, siehe [Kapitel 8.4](#).

Die Schwierigkeit bei der Informationsgewinnung bzw. bei der Erstellung von Zustandsindikatoren liegt unter anderem in der Heterogenität der vorhandenen Zustandsinformationen eines Bauwerks sowie in der Art und Weise ihrer Aggregation. Diese Thematik wird nachfolgend detailliert beleuchtet.

2 – Aggregation der Bauwerksinformationen

Heterogenität der Zustandsinformationen

Mit Hilfe der Zustandsnoten und Substanzkennzahlen aus der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 ([Kapitel 6](#)) lässt sich der Bauwerkszustand beschreiben. Demgegenüber beschreiben die rechnerischen Ausnutzungsgrade bzw. der Traglastindex aus den statischen Berechnungen die Tragfähigkeitseigenschaften eines Brückenbauwerks ([Kapitel 2.2](#)). Diese Bauwerksinformationen werden nach aktuellem Stand der Technik als unterschiedliche Kennzahlen betrachtet ([ABB 9.3](#)). Eine zusätzliche Heterogenität entsteht durch die Unterschiede in Periodizität und Frequenz der Zustandserfassung. Die Bauwerksprüfung unterliegt einer definierten Periodizität von 3 bis 6 Jahren. Eine rechnerische Nachweisführung erfolgt einmalig im Rahmen der initialen Bemessung bei der Ausführungsplanung sowie bei Bedarf im Zuge einer Nachrechnung und damit nicht periodisch. Einige Erkenntnisse aus sensorbasierten Überwachungen und diagnostischen Untersuchungen münden durch die Berücksichtigung in der Bauwerksprüfung und bei der rechnerischen Nachweisführung unmittelbar in die zuvor genannten Kennzahlen. Teilweise jedoch gelangen wichtige Informationen nicht unmittelbar oder nie in diese Kennzahlen. Dazu gehören Informationen aus z. B. Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen, Prüfberichten, gutachterlichen Stellungnahmen und ggf. auch Informationen, die durch die diagnostischen und sensorbasierten Untersuchungen gewonnen werden. Heterogenitäten bestehen zudem im Umfang bzw. der Reichweite der Zustandserfassung. Die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 kann aufgrund des manuellen Aufwands der Inspektion nicht immer alle Bereiche eines Bauwerkes abdecken. Die rechnerische Bewertung befasst sich mit dem Gesamttragverhalten sowie dem Tragverhalten der Einzelkomponenten und kann, aufgrund der im Vergleich zur Bauwerksprüfung digitalen und teilautomatisierten Vorgehensweise, mit überschaubarem Aufwand alle Bereiche des Bauwerkes abdecken. Die rechnerische Bewertung bildet jedoch im Vergleich zur Bauwerksprüfung nicht die Realität ab. Sie ist als Näherung zu verstehen, da i. d. R. zu Zwecken der Vereinfachung und aufgrund eines Informationsmangels konservative Rechenannahmen getroffen werden müssen. Die parallelen, heterogenen Bewertungsprozesse in Kombination mit einer variierenden Datenablage (digital oder Papierform, lokal oder dezentral) sorgen für einen erschwerten Bewertungs- und Entscheidungsprozess.





Bauwerksprüfung nach DIN 1076 	Rechnerische Nachweisführung 	Sensorische Überwachung 	Diagnostische Untersuchung 
ERGEBNISART			
Visueller Eindruck, Schäden, Mängel	Tragfähigkeit unter einem Ziellastniveau	Tatsächliche Reaktionen und Einwirkungen	Tiefeninformationen, Materialparameter
ERFASSUNGSFREQUENZ			
mittel	niedrig	sehr hoch	mittel
KENNZAHL			
S, V, D Zustandsnote, Substanzkennzahl	Auslastungen GZT, Auslastungen GZG, Traglastindex	-	-
DIGITALISIERUNG			
teilweise	teilweise	vollständig	geringfügig
REICHWEITE			
nahezu global	global	lokal, global	lokal
REALITÄTSABBILDUNG			
gegeben	in Näherung gegeben	gegeben	gegeben

ABB 9.3 Gegenüberstellung der Methoden zur Zustandsbewertung

Zur Verdeutlichung werden in ABB 9.3 die heterogenen Charakteristika der genannten Prüfmethode beispielhaft gegenübergestellt.

Infrastrukturbetreiber:innen sind regelmäßig mit der Herausforderung konfrontiert, sich aus einer Vielzahl von Informationen einen Eindruck über den Bauwerkszustand zu verschaffen, um Entscheidungen zu Erhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahmen abzuleiten. Großes Potenzial bietet hier der Digitale Zwilling durch die Möglichkeit der exakten räumlichen Verortung, wodurch die Zusammen-

hänge der unterschiedlichen Informationen übersichtlicher und einfacher zu erfassen sind.

Weiteres Potenzial bietet das hochfrequente Bauwerksmonitoring zur Generierung und langzeitigen Überwachung des Bauwerkszustandes. Der reine Fokus der Zustandsbewertung auf die gering frequente Zustandserfassung aus der Bauwerksprüfung und der rechnerischen Nachweisführung kann zu einem primär reaktiven Vorgehen des Erhaltungsmanagements sowie zu sehr konservativen Entscheidungen führen. Der Zustand des

Bauwerkes ist nach aktuellem Vorgehen zu einem Zeitpunkt zwischen den Bauwerksprüfungen unbekannt und kann in der Zwischenzeit lediglich als der Zustand, der zum Zeitpunkt der letzten Prüfung ermittelt wurde, angenommen werden. Bei Auftreten einer tragsicherheitsrelevanten Schädigung, welche eine unverzügliche Handlung nach sich ziehen würde, kann eine Erhaltungsplanung nach aktuellem Vorgehen erst zum Zeitpunkt der Folgeprüfung eingeleitet werden, da die Schädigung erst zum Zeitpunkt der planmäßigen Prüfung erkannt wird. Je höher die Frequenz und Aktualität der Zustandserfassung, desto höher die Frequenz und Aktualität der Zustandsbewertung. Nur so kann eine Instandhaltung geplant werden, die auf einem aktuellen Bauwerkszustand beruht.

Visueller und struktureller Bauwerkszustand – Traglastindex vs. Zustandsnote

Die aktuelle Grundlage des baulichen Erhaltungsmanagements ist die visuelle Zustandserfassung im Rahmen der Bauwerksprüfung. Durch die visuelle Erfassung von Schäden und Mängeln wird der IST-Zustand des äußeren Erscheinungsbildes bewertet. Zusätzlich wird darauf basierend der Versuch unternommen, auf potenzielle Gefahrenquellen zu schließen, um eine Einschätzung über die Sicherheit des Bauwerkes gegenüber potenziellen bzw. zukünftigen Zuständen zu ermöglichen. Nicht sichtbare Gefahrenquellen, wie z. B. kritische Spannungszustände, bleiben im Zuge der Bauwerksprüfung weitestgehend unberücksichtigt, solange sie nicht zu augenscheinlichen Schäden geführt haben. Im Gegensatz dazu haben rechnerische Untersuchungen an Strukturmodellen von Bauwerken das Ziel, auch das innere Geschehen hinsichtlich mechanischer Spannungszustände abzuschätzen und damit den (von außen nicht sichtbaren) strukturellen Zustand zu bewerten.

Während die Zustandsnote einen Eindruck über den baulichen Schädigungszustand und ggf. vorhandene konstruktive Mängel vermittelt, spiegelt der Traglastindex die den verkehrlichen Nutzungsaufgaben zugrundeliegende aktuelle Tragfähigkeitsbewertung wider. Die Grundlage des Traglastindex sind somit rechnerische Untersuchungen von potenziellen Schädigungs- und Versagensszenarien (Nachweis der Grenzzustände) unter einem definierten Ziellastniveau. Da es sich beim Ziellastniveau um Lastmodelle bzw. fiktive, potenziell eintretende Beanspruchungen handelt, ist auch das Ergebnis der Nachweise und damit der Traglastindex als ein „Potenzial“ des Bauwerkes

zu verstehen. Im Hinblick auf den baulichen Schädigungszustand repräsentiert die Zustandsnote den Bauwerkszustand und der Traglastindex repräsentiert die Fähigkeit des Bauwerkes, Lasten abzutragen. In [Marzahn et al., 2020] wird darauf hingewiesen, dass bei der Definition des Traglastindex bewusst auf eine Kombination mit den Zustandsnoten verzichtet wurde und beide Kennzahlen separat darzustellen sind. In der aktuellen Erhaltungsstrategie werden die Zustandsnoten und der Traglastindex separat ermittelt und dienen unterschiedlichen Zwecken [Jackmuth et al., 2022].

Die **ABB 9.4** zeigt in den mit ❶ nummerierten Strängen die Vorgänge der Zustandsbewertung im Rahmen der Hauptdisziplinen „Bauwerksprüfung“ und „Rechnerische Nachweisführung“. Aus den zuvor genannten Gründen ist es zweckmäßig, dass auch im Digitalen Zwilling die Bewertungsergebnisse in den separaten Kennzahlen „Zustandsnote“ und „Traglastindex“ münden. Eine Aggregation der Zustandsinformationen findet innerhalb der beiden Vorgänge statt. Die Ergebnisse der Bauwerksprüfung werden zu einer Zustandsnote für das Bauwerk (Definition gem. ASB-ING) aggregiert. Der Traglastindex des Bauwerkes errechnet sich aus den maßgebenden Nachweisergebnissen. Im Rahmen der Auswertung der erfassten Zustände können sich die Informationen der Bauwerksprüfung und die der rechnerischen Nachweisführung dennoch gegenseitig beeinflussen. So können beispielsweise Schädigungszustände einzelner Bauteile in das rechnerische Strukturmodell des Bauwerkes integriert werden. Demgegenüber kann die Kenntnis über das Tragverhalten durch rechnerisch ermittelte Spannungszustände aus diesem Strukturmodell für eine Kritikalitätsbewertung von Schäden genutzt werden.

Integration von bauwerksspezifischen Informationen aus Monitoring und Diagnostik

Oftmals liegen dem/der Bauwerksprüfer:in und dem/der nachrechnenden Tragwerksplaner:in wichtige bauwerksspezifische Informationen, wie beispielsweise Gefügestand, Geometrien, Materialkenngrößen, Lasten und systembedingte Lastabtragungseigenschaften nur unzureichend vor. Um dem Anspruch einer möglichst realitätsnahen Zustandsbewertung und damit einer optimierten Erhaltungsstrategie gerecht zu werden, kommen zur Erweiterung des Informationsgehaltes häufig diagnostische und sensorbasierte Bauwerksuntersuchungen zum Einsatz ([7 Kapitel 7](#) und [7 Kapitel 8](#)). Das Erfordernis solcher ergänzenden Untersuchungen resultiert in der

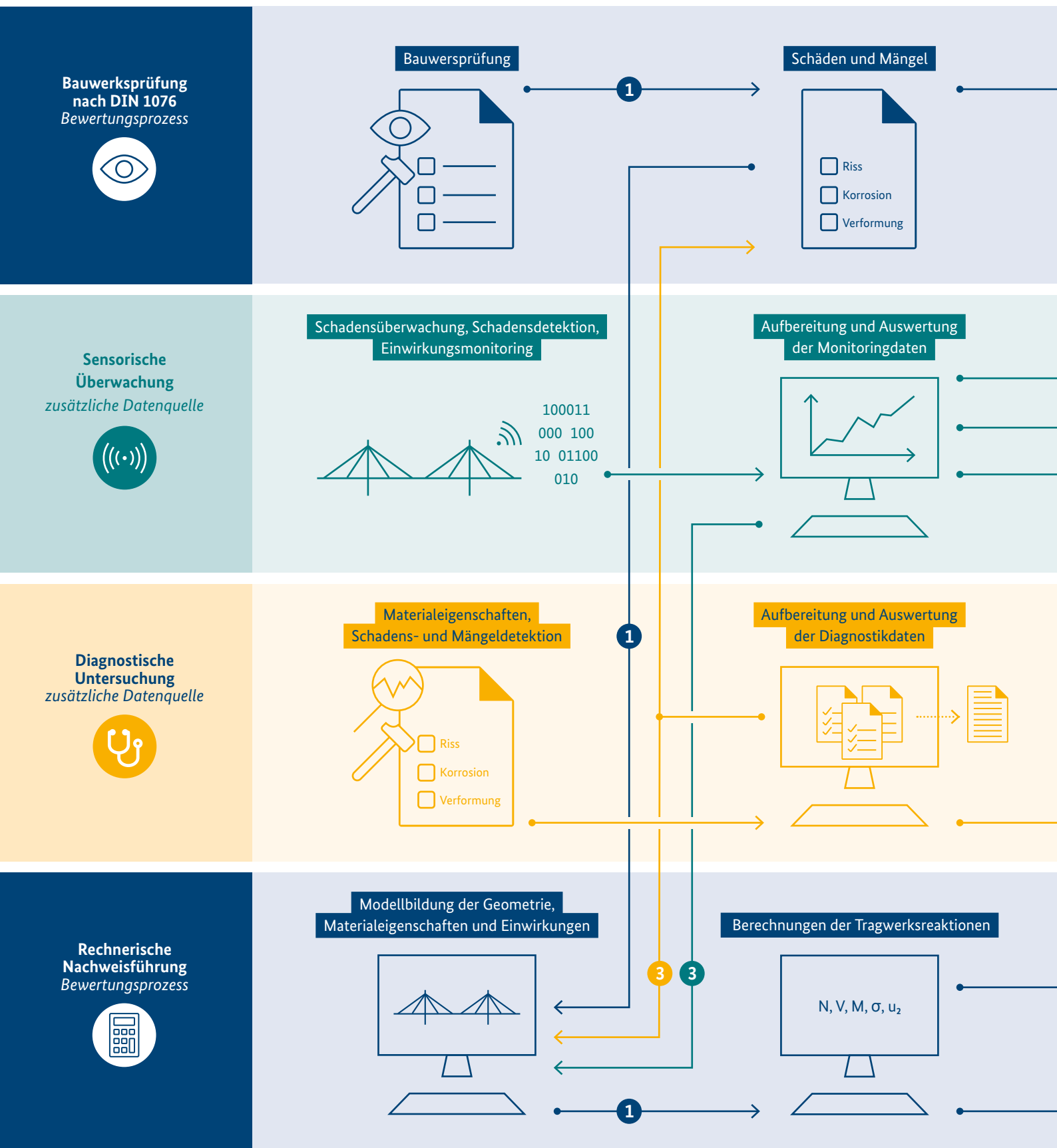


ABB 9.4 Eine Möglichkeit der Aggregation heterogener Zustandsinformationen im Digitalen Zwilling

Praxis weitestgehend aus dem Informationsmangel innerhalb der Einzeldisziplinen Bauwerksprüfung (z. B. im Rahmen einer OSA) und rechnerischer Nachweisführung (messwertgestützte Nachweisführung nach Stufe 3 und ggf. 4 der Nachrechnungsrichtlinie [BMVBS *Nachrechnung RL, 2011*]). Vor allem das Bauwerksmonitoring als Werkzeug für eine hochfrequente Erfassung realer Gegebenheiten hat sich in der Praxis mittlerweile etabliert. Durch die Möglichkeit einer hohen Verfügbarkeit aktueller Zustandsdaten bietet die sensorische Überwachung vielfältige Potenziale.

Monitoring und Diagnostik zur Unterstützung der klassischen Bauwerksprüfung

Ein Anwendungsfall der sensorischen Überwachung ist die kontinuierliche Überwachung von Schadensentstehung und -entwicklung. Die Maßnahmen der visuellen Bauwerksprüfung können ergänzt bzw. unterstützt werden, indem der Zustand neuralgischer Bereiche (Hot Spots) in kürzeren Abständen überwacht wird. Dies können Bereiche sein, an denen eine klassische Bauwerksprüfung aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit mit nur erheblichem Aufwand möglich ist und eine hohe Signifikanz hinsichtlich der Standsicherheit der Tragstruktur besteht. Oder es sind Bereiche, die aufgrund ihrer im Allgemeinen hohen Schadensanfälligkeit (konstruktionsbedingt oder durch eine hohe rechnerische Auslastung) eine höherfrequente Zustandserfassung erfordern. So können mögliche Zustandsänderungen und damit Sicherheitsmängel frühzeitig, auch außerhalb der Regelbegutachtungen, erkannt und Erhaltungsmaßnahmen rechtzeitig geplant werden.

Ein Beispiel hierfür ist die aktuell laufende Schallemissionsmessung an der Köhlbrandbrücke ([↗ Reallabor](#)), bei der durch die Überwachung der akustischen Signale, ergänzend auch außerhalb der Regelbegutachtungen der Bauwerksprüfung, potenzielle Drahtbrüche detektiert werden können. Weitere Beispiele zeigen u. a. [Freundt et al., 2014], [Schellenbach-Held et al., 2015], [Siegert et al., 2015].

Wird das Monitoring in Ergänzung zur regulären Bauwerksprüfung im Regelbetrieb von Bauwerken verwendet, sind die gewonnenen Messdaten so weit zu aggregieren und zu verarbeiten, dass sich für den/die Bauwerksbetreiber:in eine eindeutige Zustandsinformation ergibt und diese in einer zuvor festgelegten Weise in die Ermittlung einer Zustandsbewertung einfließen kann.

Bei der sensorischen Schadensüberwachung wird in [↗ Kapitel 8.2](#) zwischen lokaler und globaler Schadensüber-

wachung und -detektion unterschieden. Werden bereits vorhandene Schäden, wie z. B. die Rissbreiten, lokal überwacht, können die Informationen aus dem Monitoring analog zur Bauwerksprüfung nach dem Bewertungssystem der RI-EBW-PRÜF bewertet werden. Der Schaden bzw. die Schadensentwicklung lässt sich auf Grundlage der akquirierten Monitoringdaten automatisiert nach den S-, V-, D-Kriterien bewerten und einer Zustandskennzahl zuordnen. In diesem Fall wird auch die Aggregation mit den weiteren, aus der Bauwerksprüfung stammenden Zustandsinformationen ermöglicht. Darüber hinaus sind für den Fall des Überschreitens von Warn- oder Grenzwerten eindeutige Handlungsanweisungen für den verantwortlichen Personenkreis festzulegen.

Wird hingegen ein neuer bzw. potenzieller Schaden durch ein lokales oder globales Monitoring detektiert, wäre zur unmittelbaren Zustandsbewertung eine Zuordnung der Monitoringdaten zu Art, Ausprägung und Lage des Schadens erforderlich. In der Regel können diese Informationen durch das Monitoring noch nicht zur Verfügung gestellt werden. Das Ergebnis einer solchen Überwachung wäre hingegen eine Alarmierung mit ggf. dem Vorschlag einer Sonderbegutachtung als Handlungsempfehlung. Daraus lässt sich schließlich die erforderliche Zustandsinformation über das Bauwerk bzw. Bauteil ableiten.

Die Stränge [2](#) in der [ABB 9.4](#) zeigen die mögliche Erweiterung der Zustandsbewertung der Bauwerksprüfung um die Informationen aus Monitoring- und Diagnostikdaten. Die ausgewerteten Daten können entweder zur Aktualisierung der Schadensbewertung nach dem Konzept der RI-EBW-PRÜF dienen oder in einer Handlungsempfehlung münden. Das Monitoring bietet hier, durch eine hohe Erfassungsfrequenz der Messdaten, die Möglichkeit einer hohen Aktualisierungsrate der überwachten Zustände.

Zweckmäßig ist dabei nicht nur die Überwachung im Rahmen der planmäßigen Nutzungsdauer und unter planmäßiger Nutzung. Auch können sensorische Überwachungen aus besonderem Anlass, z. B. bei veränderter Nutzung, am Ende der planmäßigen Nutzungsdauer (oder begleitend zu Baumaßnahmen) als Maßnahme zur Gewährleistung einer ausreichenden Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit verwendet werden.

Monitoring und Diagnostik zur Unterstützung der rechnerischen Nachweisführung

Im Rahmen einer Bemessung werden neue Konstruktionen so ausgelegt, dass sie gegenüber äußeren Einwirkungen mit

ausreichender Sicherheit ihre Funktion der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dauerhaft und innerhalb der planmäßigen Nutzungsdauer erfüllen. Bestehen im Laufe der Nutzungszeit Zweifel an der Tragfähigkeit des Bauwerkes (z. B. durch bauzeitbedingte Unzulänglichkeiten in den Bemessungsansätzen, infolge einer Nutzungsänderung oder tragsicherheitsrelevanter Schäden) erfolgt im Zuge einer Nachrechnung eine erneute Führung relevanter Nachweise am Bestand. Neben möglichen Auffälligkeiten des visuellen Zustandes (aus Regelbegutachtungen,) kann auch ein Tragfähigkeitsdefizit als Ergebnis einer Nachrechnung Anlass für aufwendige Verstärkungsmaßnahmen, und/oder Verkehrseinschränkungen bis hin zu einem Ersatzneubau geben.

Beginnend mit der vermuteten Tragfähigkeit und der Schätzung eines Traglastindex bei Nichtvorhandensein einer Nachrechnung unterliegt der Traglastindex konservativen Annahmen. Auch in den Regelwerken für die Nachrechnung [BMVBS *Nachrechnung RL*, 2011] wird dem Informationsmangel zunächst durch konservative, rechnerische Vorgaben begegnet. Hier kann das Bauwerksmonitoring durch die Generierung zusätzlicher bauwerkspezifischer Informationen für eine Aktualisierung rechnerischer Nachweise sorgen. Das der Nachweisführung zu Grunde liegende Rechenmodell kann durch die zusätzlichen bauwerksspezifischen Informationen realitätsnäher abgebildet werden. System- und Lastannahmen können aktualisiert und die rechnerischen Nachweise realitätsnäher geführt werden, wodurch Tragreserven erkannt und die Standsicherheit für ggf. höhere Lastniveaus nachgewiesen werden kann. Zur Kalibrierung der Einwirkungs- und Widerstandsmodelle haben sich das zeitlich begrenzte Kurz- und Langzeitmonitoring (Tage bis mehrere Jahre) sowie die diagnostischen Untersuchungen zur Ermittlung der Materialkenngrößen und der Konstruktionseigenschaften etabliert. Die Messungen werden dabei häufig mit Probelastungen gekoppelt, um durch die Kenntnis der aufgetragenen Lasten die Beziehung zwischen Einwirkung und Tragwerksreaktion genauer zu ermitteln. Eine Übersicht über die messdatenbasierten Nachweismethoden ist u. a. in [Ralbovsky *et al.*, 2020] enthalten. Beispiele für deren Umsetzung zeigen u. a. [Fischer *et al.*, 2014], [Hindersmann, 2021], [Geißler *et al.*, 2019], [Krohn, 2014], [Weiher *et al.*, 2014].

Darüber hinaus kann es hilfreich sein, die Überwachung der Bauwerksreaktionen und Einwirkungsbedingungen in eine Dauerüberwachung zu überführen, um langfristig auf mögliche Änderungen der Gegebenheiten,

wie z. B. steigende Verkehrslasten oder allgemeine Nutzungsänderungen, und damit auf potenzielle Sicherheitsdefizite, aufmerksam zu machen. Ein Digitaler Zwilling kann auch hier in ein überwachendes Sicherheitssystem überführt werden, welches vorhandene Tragfähigkeitsreserven überwacht und durch Alarmierungen auf die Notwendigkeit einer Nachrechnung oder anderer Maßnahmen aufmerksam macht.

In **ABB 9.4** sind die beiden Anwendungsfälle von Monitoring und Diagnostik für die rechnerische Nachweisführung mit den Strängen ③ ergänzt. Zum einen dienen die Informationen zur Aktualisierung der rechnerischen Nachweisführung, wodurch die Tragfähigkeit realitätsnäher bestimmt und damit der Traglastindex angepasst werden kann. Da der Traglastindex das Verhältnis, zwischen dem planmäßig aufzunehmenden und dem aufnehmbaren Verkehrslastniveau widerspiegelt, ist eine stetige Aktualisierung des Traglastindex durch ein Dauermonitoring nicht sinnvoll. Zumal dazu die unter Gebrauchslasten gemessenen Größen auf das Soll-Verkehrslastniveau zu extrapolieren wären, welches nicht trivial ist. Das Monitoring kann jedoch als Dauerüberwachung genutzt werden, um auf mögliche Änderungen der Gegebenheiten aufmerksam zu machen und damit auch auf mögliche Änderungen der rechnerischen Annahmen. Das Resultat wäre eine stetige Überwachung eines Handlungsbedarfs, z. B. im Hinblick auf einen Nachrechnungsbedarf.

Beispielhafter Anwendungsfall – Überwachung der objektspezifischen Verkehrslasten

Durch den Ansatz normativer Verkehrslastmodelle (Ziellastniveau) im Rahmen einer Nachrechnung werden Tragreserven u. U. nicht voll ausgeschöpft, da die extremalen Verkehrsstärken und Verkehrszusammensetzungen des realen Verkehrslastniveaus ggf. überschätzt werden. Diese Tragreserven können durch Langzeit- bzw. Dauermonitoring der objektspezifischen Verkehrslasten bzw. realen extremalen Beanspruchungen erfasst werden (**ABB 9.5 C D**). Eine solche objektspezifische Betrachtung kann im Rahmen eines Langzeitmonitorings meist schon eine Aussage über alternative Festlegungen von Ziellastniveaus bzw. von erforderlichen Tragfähigkeiten ermöglichen. [Steffens, 2019], [Geißler *et al.*, 2019].

Da das objektspezifische Lastniveau den zum Zeitpunkt der Messung gegenwärtigen Verkehr repräsentiert und die zukünftige Verkehrsentwicklung nur sehr schwer abzuschätzen ist, kann es hilfreich sein, das Bauwerksmonitoring der

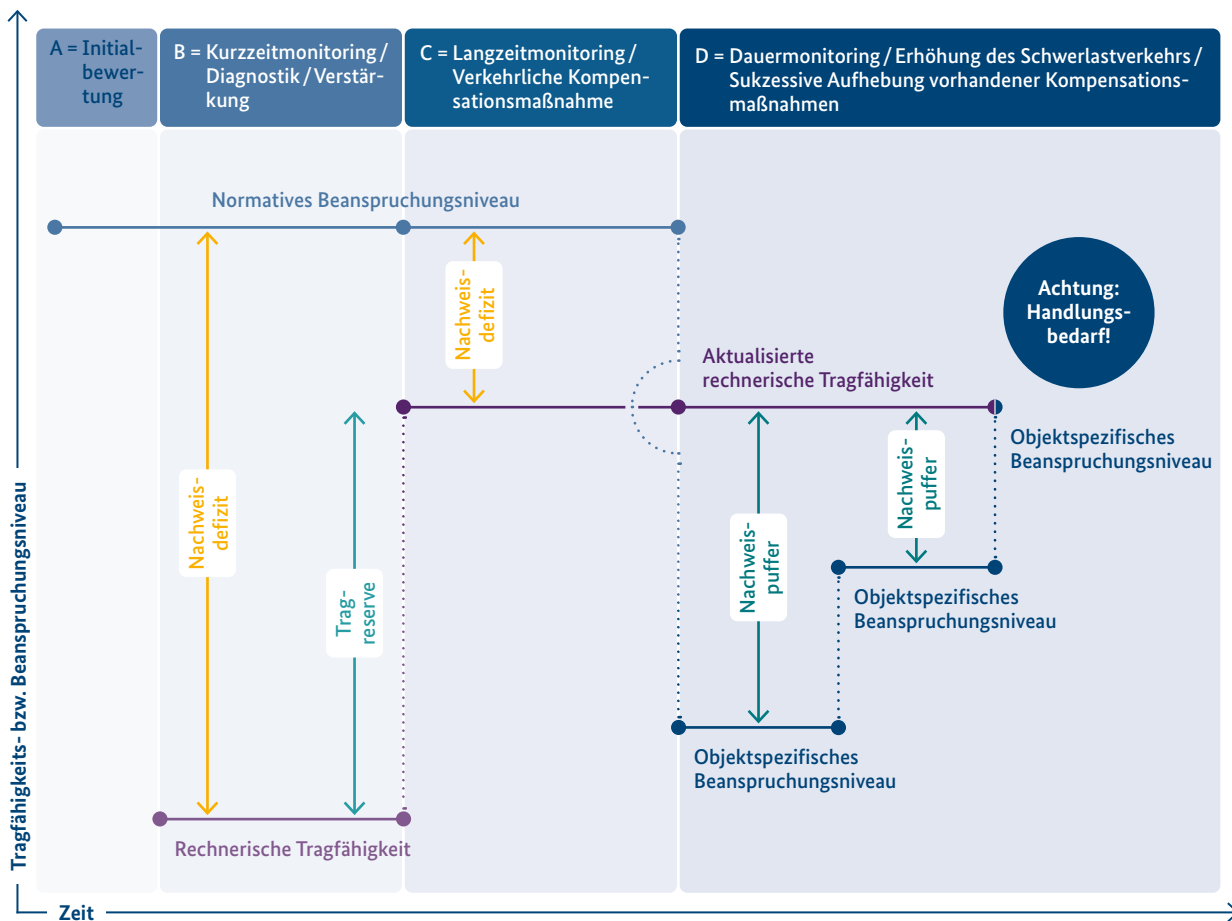


ABB 9.5 Beispielhafte chronologische Unterstützung der rechnerischen Nachweisführung durch ein Bauwerksmonitoring

Verkehrsbeanspruchung in eine Dauerüberwachung zu überführen. (↗ Reallabor) Diese Überwachung kann als Frühwarnsystem auf mögliche Sicherheitsdefizite hinweisen und einen Handlungsbedarf, z. B. in Form einer Nachrechnung, aufzeigen (ABB 9.5 D).

Sollten bedingt durch vermutete oder tatsächliche Standsicherheitsdefizite verkehrliche Kompensationsmaßnahmen wie Abstands- und Überholverbote oder Gewichtsbeschränkungen angeordnet werden, kann die messwertgestützte Dauerüberwachung auch genutzt werden, um die Zuverlässigkeit der zu Grunde gelegten Tragfähigkeitsbewertung durch die schrittweise Zunahme des Informationsbestands zu erhöhen. Darüber hinaus kann die Auswirkung einer sukzessiven Aufhebung von Kompensationsmaßnahmen (z. B. sukzessive Reduktion des Abstandsgebotes A25 à A15) überwacht werden. Während einer „Aufhebungstestphase“ kann das Monitoring selbst als Kompensationsmaßnahme dienen. Nach der „Aufhebungstestphase“ kann die Effektivität der Aufhebung überwacht werden. Dieses Vorgehen wäre analog zu dem zuvor beschriebenen Anwendungsfall (ABB 9.5 D). Jedoch wird in diesem Fall die

Erhöhung des objektspezifischen Lastniveaus durch die sukzessive Aufhebung der Kompensationsmaßnahmen bewusst initiiert.

Die Relevanz einer solchen Maßnahme ergibt sich vor allem aus dem Kriterium der Verfügbarkeit. Besonders exponierte Bauwerke bzw. verkehrlich hochbelastete Bauwerke haben eine hohe Bedeutung im Verkehrsnetz. Die beschriebene Maßnahme kann zur Vermeidung punktueller Behinderungen in besonderen Korridoren dienen.

Das Ergebnis einer solchen Dauerüberwachung kann als ein Indiz für die Notwendigkeit einer Nachrechnung verwendet werden (binär: erforderlich/nicht erforderlich). Das Ergebnis der Dauernachweisführung unmittelbar als Ersatz für eine Nachrechnung anzusehen und damit in einem dynamisch veränderlichen Traglastindex unterzubringen, erscheint einerseits nicht zweckmäßig, da dieser durch die Vorgabe der Betriebsfähigkeit des Bauwerkes, ähnlich einem Verkehrsschild, einen quasi-statischen Charakter besitzt. Andererseits besitzt der Traglastindex, ohne Vorhandensein einer Nachrechnung, in erster Instanz ebenfalls die Aufgabe, die Notwendigkeit einer (noch ausstehenden) Nachrechnung aufzuzeigen.

Weitere Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Im Falle der Dauerüberwachung objektspezifischer Lastniveaus und deren Auswirkung auf die Standsicherheit ist nicht nur der für den Traglastindex maßgebende GZT-Nachweis, sondern alle relevanten GZT-Nachweise in die Bewertung zu integrieren. Der Hintergrund ist, dass sich Kompensationsmaßnahmen bzw. Verkehrsentwicklungen auf Nachweisarten und Nachweisbereiche unterschiedlich auswirken können (Prinzip der Einflusslinien). Auch kann es zweckmäßig sein, Nachweise im GZG zu integrieren.

I. d. R. werden im Rahmen einer Bauwerksprüfung Defizite im GZG qualitativ durch eine Sichtprüfung geprüft. Es können jedoch auch in Bereichen Defizite im GZG auftreten, die nicht visuell inspizierbar sind. Als Beispiele seien hier der Dekompressionsnachweis oder Rissbreitennachweis bei Fahrbahnplatten an Betonbrücken oder Spannungsnachweise bei Schrägkabeln genannt. Diese Bereiche sind im Rahmen einer Sichtprüfung nicht (oder nur mit erheblichem Aufwand) einsehbar.

Auch hier können die Ergebnisse der GZT-Nachweise gekoppelt mit einem Dauermonitoring den Bedarf einer Nachrechnung aufzeigen. Im Falle der GZG-Nachweise wäre das Anzeigen der Notwendigkeit einer Bauwerksinspektion sinnvoll.

Kopplung der Messdaten mit einem statischen Rechenmodell

Im Rahmen einer messwertgestützten Nachweisführung können beim Vorhandensein eines kalibrierten statischen Rechenmodells, welches zumeist ein numerisches FE-Modell ist und die Bauwerksreaktionen realitätsnah abzubilden vermag, Teilm Informationen aus diesem Rechenmodell bestimmt und mit Messgrößen kombiniert werden. Eingeprägte Spannungszustände aus den ständig wirkenden Beanspruchungen sind i. d. R. nur mit erheblichem Aufwand diagnostisch oder messtechnisch zu erfassen. Aus diesem Grund besteht häufig der Bedarf, bei einer messwertgestützten Nachweisführung die ständig wirkenden Bauwerksreaktionen vom kalibrierten statischen Rechenmodell zu extrahieren und mit den veränderlichen Bauwerksreaktionen aus der Messung zu aggregieren.

Weiterhin kann ein kalibriertes statisches Rechenmodell verwendet werden, um Funktionen zu extrahieren, die für einzelne Nachweisbereiche die Beziehung zwischen Bauwerksreaktionen und Lasten widerspiegeln, sogenannte Einflusslinien. Diese Einflusslinien können die Beziehung

zwischen der Last und einer Vielzahl unterschiedlicher Reaktionsarten beschreiben, z. B. Dehnung, Verschiebung, Kräfte. Ggf. kann die Sensoranzahl so auf ein wesentliches Maß reduziert werden ([↗ Kapitel 8.2](#)), da für die Dauerüberwachung der rechnerischen Nachweise somit lediglich die Information zu Einwirkungszuständen vorliegen muss. Hier liegt jedoch auch eine Schwierigkeit, denn die Überwachung von Einwirkungszuständen impliziert u. a. die exakte Erfassung jeder möglichen Verkehrskonstellation (Achslasten, Achsabstände und Fahrzeugabstände) auf dem Bauwerk. Im Vergleich zu Eisenbahnbrücken unterliegen Straßenbrücken einer Vielzahl stetig wechselnder Verkehrskonstellationen, wodurch eine exakte Erfassung jeder Anordnung erschwert wird. Hinzu kommt, dass diese Einwirkungszustände häufig durch Wind- und Temperaturbeanspruchungen überlagert sind, die voneinander separiert werden müssen. Es ist zudem im Rahmen einer Dauerüberwachung darauf zu achten, dass sich das Tragverhalten mit der Zeit durch Degradationsprozesse verändern kann. Daher ist in regelmäßigen Intervallen (und bei Bedarf) eine Kalibrierung des statischen Rechenmodells durchzuführen.

Monitoring zur Überwachung des betrieblichen Zustandes

Auch können relevante Informationen zum Bauwerk entstehen, die einen Betriebszustand beschreiben. Diese sind für das Erhaltungsmanagement des Bauwerkes eher von untergeordneter Rolle, da die konkreten Maßnahmen im Sinne der RPE-ING in der Regel bauliche Schäden oder Mängel betreffen. Zu den Betriebszuständen gehören z. B. der Verkehrsfluss oder die Verkehrssicherheit bei Seitenwind ([↗ Reallabor](#)). Diese Zustände können für Gewerke und Behörden der Bauwerksunterhaltung von Bedeutung sein und können daher ebenfalls im Digitalen Zwilling verortet werden.

3 – Ein Ansatz aus smartBRIDGE Hamburg

Informationsgewinnung in Form von Zustandsindikatoren

Eine wichtige Aufgabe des Digitalen Zwillings ist es, aus unterschiedlichen, heterogenen Daten relevante Informationen über das reale Objekt einfach konsumierbar darzustellen. Das primäre Ziel ist es, daraus sinnvolle Entscheidungen und geeignete Maßnahmen der Bauwerkserhaltung zu optimalen Zeitpunkten abzuleiten. Die Aggregation heterogener Zustandsdaten zu einheitlichen Zustandsindikatoren

ist hierbei ein in der Praxis gängiges Instrument. Ein mögliches Konzept ist das Zustandsmonitoring, welches z. B. auf Grundlage von sensorbasierten Messdaten die Überwachung von Maschinenzuständen ermöglicht. Dabei werden in Zustandsindikatoren verschiedene Systemdaten vereint. Ändert bzw. verschlechtert sich das System, so ändert sich auch der Zustandsindikator. Auf diese Weise können ein fehlerhafter Betrieb oder etwa auch die verbleibende Nutzungsdauer erkannt werden. Zustandsindikatoren werden üblicherweise für präventive und prädiktive Instandhaltungskonzepte verwendet, siehe [Kapitel 9.4](#). Im Hinblick auf Brückenbauwerke entspräche ein Zustandsindikator somit einer aggregierten Bewertungskennzahl, die stets den aktuellen Bauwerkszustand widerspiegelt. Aus einer einheitlichen Bewertungslogik ließe sich ein unmittelbarer Handlungsbedarf ableiten.

Das Konzept smartBRIDGE Hamburg

Im Zuge des Projektes *smartBRIDGE Hamburg* wurde ein Konzept entwickelt, bei dem durch eine Vereinheitlichung des Bewertungsverfahrens die unterschiedlichen Zustandsinformationen automatisiert zu Zustandsindikatoren aggregiert werden. Das Vorgehen wird u. a. in [Herbrand et al., 2022] und [DBV Heft 51, 2022] beschrieben und stellt ein mögliches Konzept zur Optimierung der integralen Zustandsbewertung dar. Es wird im Folgenden erläutert.

Den Grundbaustein des Konzeptes stellt der Digitale Zwilling mit der Möglichkeit einer exakten Verortung von Bauwerksinformationen dar. Denn nur durch die Möglichkeit einer Zuordnung von Informationen kann eine Aggregation dieser ermöglicht werden. Als Ausdruck für eine aggregierte, ganzheitliche Zustandsbewertung wurde der Begriff Condition Indicator (CI) verwendet.

Die CI können sich aus den Zustandsbewertungen der Bauwerksprüfung, einer eventuellen Nachrechnung, dem Monitoring und der Diagnostik zusammensetzen. Die Ergebnisse dieser verschiedenen Untersuchungsmethoden stellen jeweils Teilindikatoren (Partial Condition Indicator – PCI) dar. Das Ergebnis der Bauwerksprüfung ist somit einer von mehreren PCI, aus denen sich der CI ergibt. Dieser PCI sowie die, welche sich aus Informationen aus Nachrechnungsergebnissen oder diagnostischen Berichten ergeben, ändern den Bauwerkszustand quasi statisch, bis eine manuelle Neubewertung erfolgt. Eine dynamische Zustandsänderung kann hingegen durch den PCI Monitoring erfolgen, welcher sich auf der Grundlage von Bauwerksmessungen in „Echtzeit“ aktualisiert. Darüber hinaus

lassen sich aus der vorhandenen Datenhistorie der aggregierten PCI differenzierte Zustandsprognosen entwickeln und Handlungsbedarfe erkennen. ([↗ Reallabor](#))

Die PCI werden analog zur Bewertungslogik der RI-EBW-PRÜF bewertet. Messwertgestützte Dauerüberwachungen sind ebenfalls PCI, die in ihrem Ergebnis die Notwendigkeit einer Nachrechnung oder detaillierten Begutachtungen aufzeigen und mit zustandsnotenähnlichen Kennzahlen analog zur Zustandskennzahl bzw. Zustandsnote von 1 bis 4 bewertet werden. Mit den in der jeweiligen Bauteilgruppe vorhandenen Zustandszahlen der Bauwerksprüfung werden diese entsprechend dem Vorgehen der RI-EBW-PRÜF auf die höheren Hierarchieebenen (Teilbauwerk, Bauwerk) zu Zustandsnoten aggregiert. Die Ergebnisse einer Nachrechnung finden Eingang in den Traglastindex, der übergeordnet für das Bauwerk dargestellt wird. Auch werden betriebliche Zustände überwacht. Da sich diese jedoch nicht auf den baulichen Zustand und damit auf keine Bauteilgruppe beziehen, werden diese als ganzheitliche übergeordnete Zustandsinformation angesehen.

Die beschriebene Methodik zeigt, wie innerhalb eines Digitalen Zwillings durch die Erstellung von Condition Indicators aus Daten wichtige Informationen über das Bauwerk gewonnen werden können. Werden diese Informationen übersichtlich und leicht konsumierbar innerhalb eines Digitalen Zwillings bereitgestellt, erhöht dies zusätzlich deren Wert, da sie so effizienter für die Bauwerkserhaltung genutzt werden können.

Dem Erhaltungsmanagement wird durch die übergreifenden Kennzahlen PCI und CI als Ausdruck der Homogenisierung des Bewertungssystems ein intuitiv verständlicher Eindruck vom Bauwerkszustand ermöglicht. Auch kann die Qualität der Bewertungen innerhalb der Einzeldisziplinen „Bauwerksprüfung“ und „rechnerischer Nachweisführung“ optimiert werden, da das gegenseitige Verständnis von Bauwerksprüfer:innen und Planer:innen durch die einheitlichen Bewertungskriterien verstärkt wird. Dies betrifft insbesondere das Verständnis hinsichtlich der abgeleiteten Konsequenzen (S, V, D), die aus einem erfassten Mangel oder Schaden resultieren.

4 – Vorteile der Zustandsaggregation

Von der reaktiven zur prädiktiven Instandhaltung

Die aktuelle Erhaltungsstrategie von Ingenieurbauwerken entspricht i. d. R. einer reaktiven Instandhaltung ([ABB 2.4](#)).

Dabei wird das Auftreten von Schäden dem Grunde nach zugelassen, wenngleich deren Entwicklung begrenzt werden soll. Festgestellte Schäden oder Mängel werden soweit möglich sofort oder verzögert behoben.

Neben der reaktiven Instandhaltung kommt derzeit auch die präventive Instandhaltung in der Erhaltung von Brückenbauwerken zur Anwendung, besonders in sehr hoch ausgelasteten Infrastrukturbereichen. Hierbei ist die zustandsunabhängige Instandhaltung verbreitet, bei der z. B. Brückenlager oder Übergangskonstruktionen in festgelegten Zeitabständen gewartet oder ausgetauscht werden. Der Abnutzungsvorrat des ausgetauschten Teils wird durch dieses Vorgehen allerdings nicht zwangsläufig ausgenutzt. Es tritt jedoch planmäßig kein Schaden ein.

Eine zustandsorientierte Instandhaltung, bei der der Zustand des Bauwerks durch Monitoring kontinuierlich sensorisch überwacht und analysiert wird, um Abweichungen vom Sollzustand zu erkennen, spielt für Bauwerke aktuell noch eine untergeordnete Rolle. Ausnahmen stellen z. B. die Projekte *smartBRIDGE Hamburg* und das *Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn* [Windmann, 2022] dar. Ziel dieser Erhaltungsstrategie ist es, den Abnutzungsvorrat durch den Vergleich der Messwerte mit zuvor festgelegten Grenzwerten nicht zu überschreiten, um somit präventiv agieren zu können, ohne dass es zu einer Schadensentwicklung kommt. Diese Instandhaltungsstrategie kann mit Digitalen Zwillingen ab dem Reifegrad 2 erfolgen (ABB 3.2).

Eine weitere Erhaltungsstrategie ist die prädiktive Instandhaltung. Diese basiert ebenfalls auf einer kontinuierlichen sensorischen Zustandsüberwachung des Bauwerks, wobei in diesem Fall die Entwicklung der Zustandsänderung vorausgesagt wird. Mit Hilfe von Prognosemodellen lassen sich Degradationsprozesse beschreiben und das Eintreten von Schäden oder weiterer kritischer Entwicklungen vorhersagen. In Abhängigkeit davon können geeignete Instandhaltungsmaßnahmen eingeleitet werden. Dies gelingt mit Digitalen Zwillingen ab dem Reifegrad 3 (7 Kapitel 3). Auf diese Weise lassen sich der Abnutzungsvorrat des betroffenen Bauteils ausschöpfen und gleichzeitig ein Schadenseintritt und somit auch Folgeschäden verhindern. Allerdings bedeutet der Begriff prädiktive Instandhaltung nicht zwangsläufig, dass keine Bauwerkschäden eintreten können. Vielmehr kann zwischen einer prädiktiven Schadenserkenkung und einer prädiktiven Schadensüberwachung unterschieden werden. Durch Letzteres wird die Entwicklung von bestehenden, aber bisher

noch unkritischen Schäden hin zu kritischen Schäden prädiktiv (z. B. bei Rissen von Betonbauteilen). Bei der Bewertung der Kritikalität sind neben dem Schadenseinfluss auf die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks auch weitere mögliche Schadensfolgen und die Wirtschaftlichkeit der Instandhaltung im Blick zu behalten. Die Verfügbarkeit des Bauwerks sollte durch die erforderlichen Instandsetzungsmaßnahmen so wenig wie möglich beeinträchtigt sein. Grundsätzlich zielt eine prädiktive Erhaltungsstrategie auf eine höhere Bauwerksverfügbarkeit als unter einer reaktiven Erhaltungsstrategie ab, da aufwendige Schadenreparaturen vermieden werden.

Letztlich zeigt sich, dass ein Übergang von der derzeitigen reaktiven Erhaltungsstrategie hin zu einer zustandsorientierten oder gar prädiktiven Bauwerkserhaltung nur mit einer geeigneten aggregierten Zustandsbewertung unter der Nutzung von Digitalen Zwillingen möglich wird.

Zustandsvorhersage

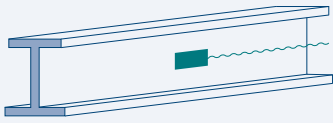
Für eine prädiktive Erhaltungsstrategie eignen sich Digitale Zwillinge ab dem Reifegrad 3 in besonderem Maße. Der Schlüssel und auch die Schwierigkeit für eine zutreffende Zustandsvorhersage liegen dabei in der Erfassung der richtigen Daten, die zugleich die benötigte Qualität aufweisen und in einer ausreichenden Menge vorliegen, um sie anschließend in geeigneten Prognosemodellen verarbeiten zu können. Als Daten werden hierfür solche aus der regulären Inspektion, der Diagnostik sowie aus der sensorischen Überwachung des Bauwerks genutzt. Gegenwärtig existieren noch nicht für alle relevanten Schädigungsprozesse allgemeingültige Prognosemodelle. Dementsprechend unterscheiden [Schneider et al., 2015] zwei Klassen von Schädigungsprozessen:

- Schädigungsprozesse mit Schädigungsmodell (z. B. Bewehrungskorrosion, Materialermüdung)
- Schädigungsprozesse ohne Schädigungsmodell (z. B. Schäden an Lagern, Fahrbahnübergängen, Abdichtungen)

Unter Schädigungsmodell wird dabei ein funktionaler Zusammenhang zwischen den im Modell berücksichtigten Schädigungsparametern und der Schädigung verstanden. Dieser Zusammenhang kann entweder durch ein physikalisch/chemisches Modell oder aber durch ein empirisches Modell beschrieben werden (ABB 9.6). Eine ausführliche Zusammenstellung von Schädigungsmodellen für die maßgebenden Schädigungsprozesse an Massivbaubridgen ist in [Schellenbach-Held et al., 2015] zu finden.

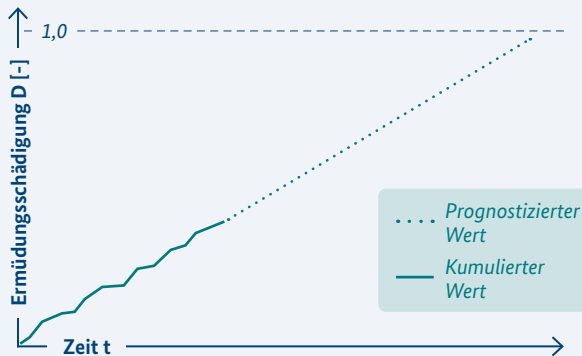
Zustandsvorhersage mit Schädigungsmodell

Materialermüdung



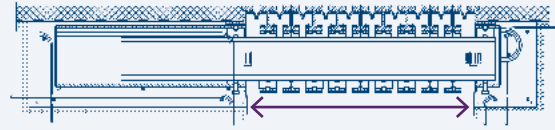
Messwert: Dehnung

$$\text{Schädigungsmodell: } D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1,0$$



Zustandsvorhersage ohne Schädigungsmodell

Fugenbewegung



Messwert: Verschiebung

Grenzwert: 14,0 cm

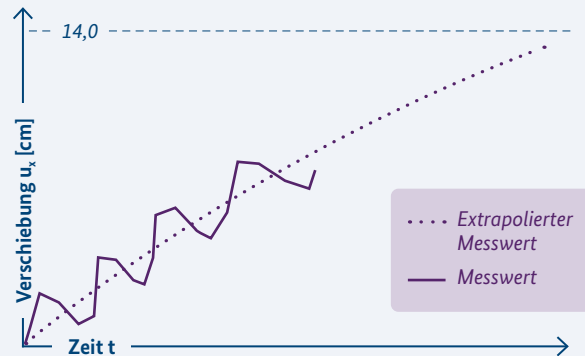


ABB 9.6 Zustandsvorhersage mit und ohne Schädigungsmodell

Existieren geeignete Schädigungsmodelle, so können die Schädigungsparameter durch sensorische Messungen erfasst werden, um den aktuellen Schädigungszustand zu bestimmen und um eine Zustandsvorhersage bzw. Prädiktorik im Erhaltungsprozess zu ermöglichen. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Materialermüdung. Mit Hilfe der vorhandenen Schädigungsmodelle lässt sich beispielsweise die Restlebensdauer eines ermüdungsbeanspruchten Bauteils prognostizieren (ABB 9.6). Grundlage hierfür sind zumeist Dehnungsmessungen am betroffenen Bauteil und die Annahme einer über die Restlebensdauer gleichbleibenden Verkehrsbelastung. Darüber hinaus könnten auch fiktive Beanspruchungsszenarien simuliert werden, um etwa den Einfluss einer erhöhten Verkehrsbelastung (z.B. Schwertransporte) auf die Restnutzungsdauer zu bestimmen. Solche Simulationsfunktionen lassen sich theoretisch mit allen Schädigungsmodellen realisieren, solange der Zusammenhang zwischen den Schädigungsparametern und der Bauwerks- bzw. Bauteilbelastung korrekt abgebildet werden kann. Damit ließen sich im Digitalen Zwilling verschiedene „Was-Wäre-Wenn-Szenarien“ innerhalb einer eigenen Simulationsumgebung abbilden, was wiederum verschiedene Bewertungsmöglichkeiten eröffnet.

Existieren keine Schädigungsmodelle, kann es dennoch möglich sein, bestimmte Messwerte den einzuhaltenden Grenzwerten gegenüberzustellen und daraus Informationen über den noch vorhandenen Abnutzungsvorrat eines Bauteils zu erhalten. Da jedoch kein Schadensmodell vorhanden ist, müssen der Messwert des Monitorings und der einzuhaltende Grenzwert dieselbe Einheit besitzen. Beispielhaft hierfür wäre die Messung von Lagerverschiebungen oder -verkippen zu nennen, die direkt den spezifischen Grenzwerten gegenübergestellt werden kann (ABB 9.6). Aus den Messwerten können darüber hinaus Regressionsanalysen erstellt werden, welche die Entwicklung der Messgrößen prognostizieren und somit eine empirische Einschätzung des aktuellen bzw. zukünftigen Bauteilzustandes ermöglichen.

Gleiches Vorgehen kann auch beim Monitoring von schon vorhandenen Schäden, wie z.B. Rissen, angewandt werden. Hierbei wird die tatsächliche Rissbreite gemessen und einzuhaltenden Grenzwerten gegenübergestellt. Eine Prognose der Rissentwicklung kann empirisch auf Grundlage der Messdaten erfolgen. Die Aussagekraft all dieser Methoden ist dabei umso höher, je mehr Daten, insbesondere durch eine sensorische Überwachung, zur Verfügung stehen.

5 – Qualität/Akzeptanz

In Deutschland besteht die staatliche Verpflichtung, die allgemeine Öffentlichkeit und die Nutzer:innen vor Schäden durch das Versagen von Bauwerken zu schützen. Dies wird im Zuge der Tragwerksplanung durch eine unabhängige bautechnische Prüfung nach dem Vier-Augen-Prinzip umgesetzt. Dieses Vorgehen hat sich in Deutschland etabliert, erfährt ein hohes Maß an Akzeptanz und sichert eine hohe Qualität. Darüber hinaus ist in DIN 1076 [DIN 1076, 1999] die Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Wegen hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit geregelt. Diese Prüfungen werden von sachkundigen Ingenieuren durchgeführt. Die vorhandenen Regelungen sowie das Fachpersonal gewährleisten auch für die Brückenprüfungen einen hohen Qualitätsstandard.

Eine Akzeptanz von Digitalen Zwillingen durch die Nutzer:innen wird dann erreicht, wenn sein Anwendungszweck klar beschrieben ist, Vertrauen in seine Sicherheit, Anwendbarkeit und (Daten-) Qualität herrscht und seine einwandfreie Funktionsfähigkeit gegeben ist. Insbesondere die Anwendenden müssen in ihrer operativen Arbeit einen klaren Nutzen aus dem Digitalen Zwilling ziehen können. Dementsprechend sollte er sich in seiner Anwendung und Funktionalität in das jeweils aktuelle Instandhaltungs- und Bewertungskonzept des Bauwerksbetreibers integrieren. Dies ist bereits bei der Konzepterstellung durch die verschiedenen Fachplaner:innen sicherzustellen, vgl. [Kapitel 4.4](#). Gleichzeitig ist bereits innerhalb des Planungsprozesses für die Zustandsindikatoren auf eine angemessene Qualitätssicherung zu achten. Dieser Qualitätssicherungsprozess ist bislang noch nicht normativ geregelt, er sollte aber generell die Qualität des Konzepts, der Daten und der letztlichen Bewertung in Form der Condition Indicators umfassen. Insbesondere die Daten müssen vollständig, fehlerfrei und sicher sein. In Anlehnung an die bautechnischen Prüfungen könnte diese Qualitätssicherung zukünftig auch anhand einer externen fachtechnischen Prüfung erfolgen.

6 – Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Bislang existiert lediglich eine überschaubare Anzahl von Schadensmodellen, die für messwertgestützte Zustandsprognosen von Bauwerken genutzt werden können. Um von der rein korrektiven Instandhaltungsstrategie hin zu einer auf Digitalen Zwillingen basierenden prädiktiven Instandhaltungsstrategie zu gelangen, besteht weiterhin Forschungsbedarf im Hinblick auf die Entwicklung geeigneter Schadens- und Prognosemodelle. Ein möglicher Ansatz wird in [Schneider et al., 2015] vorgestellt, in dem für die Modellierung des stochastischen Systemschädigungszustandes eines Brückensystems die Anwendung von dynamischen Bayes'schen Netzen vorgeschlagen wird. Nichtsdestotrotz ist derzeit eine Zustandsvorhersage, die sämtliche potenziellen Bauwerksschäden umfasst, noch nicht möglich. Dies zeigt deutlich weiteren Forschungsbedarf, um mit Digitalen Zwillingen zukünftig Zustände zu prognostizieren, die neben der Standsicherheit auch die Dauerhaftigkeit betreffen. In dieser Hinsicht sind parallel zur Entwicklung von analytischen Modellvorstellungen auch ausdrücklich KI-Methoden (Machine Learning, Deep Learning) angesprochen. Mit Hilfe solcher Methoden können digitale Werkzeuge entstehen, die beispielsweise anhand von Bauwerksabbildungen relevante Schäden erkennen, im Digitalen Zwilling verorten und deren Entwicklung prognostizieren.

Darüber hinaus bedarf es zukünftig normativer bzw. regelwerksseitiger Festlegungen zur Anwendung von monitoringbasierten Zustandsbewertungen an Bauwerken. Dies soll den Anwendenden zum einen die Rahmen- und Anwendungsbedingungen für entsprechende Zustandsbewertungen an die Hand geben. Zum anderen sollen die Festlegungen auch eine Handlungssicherheit bieten. Die derzeit diskutierte Aktualisierung der DIN 1076 und die beabsichtigte Aufnahme von Bauwerksmonitoring in die darin beschriebene Bauwerksprüfung ist in diesem Hinblick der erste Schritt.



structureVIEW

Betondeckungsmessung BD_10_1

LAGE
Hohlkasten, Stg. Außenseite, im Bereich der Koppelseile

MESSEBEREICH
Ausdehnung in x-Richtung: 180cm
Ausdehnung in y-Richtung: 20cm

GRENZWERTE
Mindestbetondeckung aus Exposition: 25mm
Mindestbetondeckung aus EN EN 1992-2 AA: 40mm

BEWERTUNG
Flächenanteil Mindestbetondeckung nach EC2 unterschritten:
17,4%
5% Quotient der Betondeckung: 32,5mm

ERFASSUNG
April 2021
MFP GmbH

Legende:
keine Füllung: Messbereich überschritten (Betondeckung > 100mm)
grün: Die Anforderungen aus EC 2 und Exposition sind erfüllt
gelb: Die Anforderungen aus EC 2 sind nicht erfüllt
rot: Die Anforderungen aus Exposition sind nicht erfüllt.



Betondeckungsmessung BD



10 – Mensch-Maschine-Schnittstelle und Visualisierung

Kurzfassung

Ein Digitaler Zwilling ist ein Konglomerat heterogener, jedoch kontextualisierter und strukturierter Daten und daraus entstehender Informationen. Um Zugang zu diesen Daten und Informationen zu erhalten oder um Einfluss auf solche Daten ausüben zu können, ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) erforderlich. Erst durch eine strukturierte und benutzer:innenfreundliche MMS können Mehrwert und Wissen aus den verknüpften Daten gehoben werden.

Aus den verschiedenen beteiligten Akteuren, die den Digitalen Zwilling entwickeln, betreiben und nutzen, können verschiedene Nutzer:innengruppen identifiziert werden, die unterschiedliche Verantwortlichkeiten, Aufgaben, Kompetenzen und Bedürfnisse besitzen.

Die MMS soll möglichst auf die Anforderungen und Rechte, aber auch auf die Bedürfnisse der verschiedenen Nutzer:innengruppen zugeschnitten sein. Die Aufgabe bei der Entwicklung der MMS besteht demnach nicht nur in der fachlich richtigen Wiedergabe von Informationen, sondern auch in der Art, wie die Inhalte dargestellt werden und wie eine einfache, intuitive und effiziente Bedienung möglich ist.

Um die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Nutzer:innengruppen berücksichtigen zu können, ist eine mehrstufige Mensch-Maschine-Schnittstelle aus heutiger Sicht die zweckmäßige Lösung. Diese kann aus den folgenden Ebenen bestehen:

1 – Eine aggregierte Gesamtübersicht mit abstrahierten Kennzahlen für einen schnellen und vollständigen Überblick über den aktuellen Bauwerkszustand. Die integrale aggregierte Gesamtübersicht mit Raumbezug in einem 3D-Modell ermöglicht gerade bei komplexen Tragwerken die Informationen und deren Zusammenhang intuitiv erfassen und verstehen zu können.

2 – Expertinnenansicht(en) zur Analyse der Detaildaten mit der Möglichkeit einer freien und individuellen Datenexploration. Bei Auffälligkeiten oder bei speziellen Fragen im Zuge der laufenden Erhaltungstätigkeiten haben Nutzer:innen damit die Möglichkeit, die Rohdaten bedarfsgerecht zu sichten und zu analysieren. Eine Verknüpfung zwischen der aggregierten Ansicht (1/) und Expert:innen-Dashboards (2/) ermöglicht eine lückenlose, intuitive, strukturierte sowie schnelle Exploration der Daten.

3 – Eingabe

Die verschiedenen Datensätze, die im Digitalen Zwilling einzubinden sind, müssen initial angelegt werden. Dazu sind entsprechende Eingabeschnittstellen notwendig.

4 – Konfiguration

Zur Initialisierung des Digitalen Zwillings ist eine anfängliche Konfiguration vorzunehmen. In der Betriebsphase sind Anpassungen oder Erweiterungen der Erstkonfiguration notwendig. Zu diesen Zwecken ist eine geeignete Konfigurationsschnittstelle vorzusehen.

1 – Die Wichtigkeit einer geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstelle

Ziel und Funktion der Mensch-Maschine-Schnittstelle

Ein Digitaler Zwilling ist ein Konglomerat heterogener, jedoch kontextualisierter und strukturierter Daten und daraus entstehender Informationen. Um Zugang zu diesen Daten und Informationen zu erhalten oder um Einfluss auf solche Daten ausüben zu können, ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) erforderlich. Erst so können Mehrwert und Wissen aus den verknüpften Daten gehoben werden. Bei der MMS können grundsätzlich zwei Funktionen unterschieden werden (ABB 10.2):

→ Das Beobachten (Lesen)

als rein konsumierende Funktion, um Informationen zur Kenntnis zu nehmen und diese für den weiteren Prozess und für Entscheidungen nutzen zu können

→ Das Bearbeiten (Schreiben)

zur Konfiguration, zur Korrektur, zur Pflege oder zur Ergänzung von Daten muss in definierten Fällen auf den Digitalen Zwilling (manuell) Einfluss genommen werden

Im Digitalen Zwilling wird eine Vielzahl von Daten gespeichert und in verschiedenen Stufen verarbeitet. Die Daten werden miteinander verknüpft und aggregiert. Unterschiedliche Nutzer:innengruppen haben unterschiedliche Kompetenzen, Funktionen und Anforderungen, benötigen einen unterschiedlichen Blick auf die Daten und interagieren unterschiedlich mit diesen. Das Konzept der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Kontext des Digitalen Zwillings soll diese verschiedenen Anforderungen berücksichtigen.

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle:

Mehr als nur ein technisches Dashboard

Eine optimale Mensch-Maschine-Schnittstelle ist das Ergebnis einer interdisziplinären Arbeit, in der Personen aus der Fachdomäne (Brückenbau, Monitoring, Diagnostik, Bauwerksprüfung) und Personen mit Kompetenzen im Bereich Informatik, Design, UX-Design und Psychologie zusammenarbeiten. Nicht nur technisch-inhaltliche Kriterien dürfen die Gestaltung und die Funktion einer Benutzerschnittstelle (engl. User Interface, kurz UI) prägen, sondern auch Kriterien der Benutzerfreundlichkeit und des Benutzererlebnisses (engl. User eXperience, kurz UX). Die Kriterien für die Entwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle eines Digitalen Zwillings können wie folgt zusammengefasst werden:

→ Struktur

Das Ziel des Digitalen Zwillings ist ein möglichst vollständiger Blick auf das Bauwerk. Um die komplexen Zusammenhänge zu zeigen und die umfangreichen Informationen auffassen zu können, müssen die Daten bereits bei der Erfassung und Ablage logisch strukturiert werden (↗ Kapitel 5 bis ↗ Kapitel 8). Dies ist auch eine Kernaufgabe der IT-Infrastruktur (↗ Kapitel 11). Die MMS soll diese Struktur so wiedergeben, dass jede/r Nutzer:in entsprechend seiner/ihrer Rolle und den damit erforderlichen Informationsanforderungen den Überblick bewahren kann. Das bedeutet nicht notwendigerweise eine Spiegelung der gespeicherten Datenstruktur an der sie visualisierenden Oberfläche, sondern es sollten die jeweilige Nutzer:innengruppe und der Kontext, in dem die Daten visualisiert werden, berücksichtigt sein.

→ Benutzerfreundlichkeit (engl. Usability)

Die MMS soll möglichst einfach, intuitiv und effizient zu bedienen sein. Diese subjektiv empfundenen und damit weichen Faktoren werden durch die „acht goldenen Regeln des User Interface Designs“ von Ben Shneiderman [Shneiderman et al., 2016] objektiviert. Eine nach diesen Kriterien optimierte Bedienung unterstützt die jeweiligen Nutzer:innen bedarfsgerecht im Umgang mit dem Digitalen Zwilling und ermöglicht es ihnen möglichst schnell und eindeutig, Aufgaben zu bewältigen und damit Ziele zu erreichen.

→ Ästhetik

Ein themenkonformes und modernes visuelles Design der MMS unterstützt die strukturierte Navigation und die Benutzerfreundlichkeit und ist gleichzeitig deren Voraussetzung. Ästhetisch visualisierte Anwendungen, die Daten strukturiert und gut nutzbar wiedergeben, steigern die Identifikation der Nutzdenden mit der MMS – die Interaktion im Digitalen Zwilling macht bestenfalls sogar Spaß und Nutzer:innen bewegen sich gerne in der Anwendung. Die Folge ist, dass Nutzer:innen das MMS des Digitalen Zwillings als „gelingen“ empfinden.

Die Erfassung sowie Verknüpfung der richtigen Bauwerksdaten und die technische Verarbeitung dieser Daten zu verlässlichen Zustandsindikatoren stellen den inhaltlichen Mehrwert des Digitalen Zwillings dar und ermöglichen eine Verbesserung der Erhaltungsprozesse von Brücken. Erst die Zusammenführung dieses technischen Mehrwerts mit einer strukturierten, benutzerfreundlichen und ästhetisch

ansprechenden Mensch-Maschine-Schnittstelle führt zur Akzeptanz bei den Nutzer:innen. Die MMS ist hiermit eine wesentliche Voraussetzung, um die Methodik des Digitalen Zwillings erfolgreich und nachhaltig einführen zu können.

2 – Die Nutzer:innengruppen und deren Anforderungen

Im [7 Kapitel 4.4.1](#) wurden bereits die maßgebenden Akteure vorgestellt. Daraus können verschiedene Nutzer:innen und -gruppen innerhalb des neuen Prozesses identifiziert werden, die unterschiedliche Verantwortlichkeiten, Aufgaben, Kompetenzen und Bedürfnisse besitzen. Im weiteren Verlauf werden zudem Nutzer:innenrollen unterschieden ([7 Kapitel 11.1](#)). Eine Kopplung der Rollen und Gruppen ist nicht zwingend.

Nutzer:innengruppe 1: Nutzer:innen in strategischer Ebene des Erhaltungsmanagements

Auf Seiten des/der Bauherr:in bzw. Eigentümer:in brauchen die Personen, die die Erhaltungsstrategie umsetzen, einen guten Überblick über ihr Asset-Portfolio im Sinne einer Netzbetrachtung. Dazu gehören möglichst hoch aggregierte Informationen zum Zustand der einzelnen Bauwerke. Auf Basis eines schnell erfassbaren Gesamtüberblickes zu jedem Bauwerk sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie ist der aktuelle Zustand des Bauwerks?
- Wie entwickelt sich der Zustand?
- Wie wirkt dieser Zustand auf die Verfügbarkeit des Bauwerks resp. Netzes
- Wie wirkt dieser Zustand auf die Betriebs- und Erhaltungskosten

Technische Details auf Objektebene sind für die Nutzer:innengruppe 1 nachrangig. Perspektivisch wird sich der Fokus dieser Nutzer:innengruppe auf den Digitalen Zwilling richten, wenn der Übergang zu einem Vernetzten Zwilling vollzogen ist und die technischen Informationen mit kaufmännischen Daten kombiniert werden, [7 Kapitel 2.3](#).

Diese Nutzer:innengruppe nutzt den Digitalen Objektzwilling im Sinne von [7 Kapitel 3](#) ausschließlich beobachtend. Der Objektzwilling bildet einen Datenservice für diese strategische Ebene, um im Dialog mit der operativen Ebene (Nutzer:innengruppe 2) zu priorisieren und Erhaltungsstrategien zu entwickeln. Sie wird im Falle von Veränderungen (z. B. Alarmierungen) informativ durch die operative Ebene angebunden.

Nutzer:innengruppe 2: Anlagenverantwortliche in der operativen Ebene des Erhaltungsmanagements

Auch Anlagenverantwortliche brauchen einen aggregierten Gesamtüberblick zum Bauwerkszustand, um im Falle von Veränderungen schnell identifizieren zu können, welche Zusammenhänge bestehen. Der/die Anlagenverantwortliche erhält die automatischen Meldungen des Digitalen Zwillings im Falle von Auffälligkeiten. Er/sie braucht jedoch auch einen Zugriff auf detailliertere Informationen, wie ausgewählte Messdaten oder Daten aus der Bauwerksdiagnostik, um diese für weitere Zwecke (z. B. zur Veranlassung weiterer Untersuchungen oder einer Nachrechnung) zu nutzen. Der/die Anlagenverantwortliche nutzt den Digitalen Zwilling i. d. R. ausschließlich beobachtend.

Nutzer:innengruppe 3: Bauwerksprüfer:in in der operativen Ebene des Erhaltungsmanagements

Die Anforderungen der Nutzer:innengruppe 2 sind auch auf Bauwerksprüfer:innen übertragbar. Detailliertere Informationen aus dem Monitoring oder aus der Bauwerksdiagnostik werden bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Bauwerksprüfung herangezogen, um Zusammenhänge zu erkennen und die Bewertung von Schäden zu schärfen. Der/die Bauwerksprüfer:in ist im Kontext des Digitalen Zwillings in bearbeitender Funktion, indem er/sie die Informationen aus der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 aktualisiert ([7 Kapitel 10.4](#), [3](#)).

Nutzer:innengruppe 4: Neue Nutzer:innen, die im Betrieb des Digitalen Zwillings mitwirken – Tragwerksplaner:in, Fachplaner:in Monitoring und Diagnostik

Im [7 Kapitel 4.4.1](#) sind mit dem Projektteam Digitaler Zwilling weitere Akteure genannt worden, die beim Betrieb des Digitalen Zwillings mitwirken. In dieser Phase begleiten die Tragwerksplaner:innen und die Fachplaner:innen Monitoring sowie Diagnostik die fachliche Zustandsbewertung und reagieren auf Auffälligkeiten, die entweder durch das Bauwerk hervorgerufen werden (Zustandsänderung) oder durch die eingesetzte Technik entstehen (z. B. Ausfall eines Sensors). Neben der hoch aggregierten Gesamtübersicht für den schnellen Überblick brauchen diese Nutzer:innen auch Expert:innenansichten, um ergänzend zu automatischen und vorgegebenen Analysen auch individuelle Auswertungen durchführen zu können. Durch einen freien, jedoch strukturierten, Zugang zu den Daten und die Möglichkeit individueller Analysen kann schnell Stellung zu Auffälligkeiten bezogen werden.

Zusätzlich zur Analyse und Interpretation von aufgezeichneten Daten ist diese Nutzer:innengruppe auch an der Weiterentwicklung des Digitalen Zwillings im Betrieb beteiligt: z. B. an der Optimierung von vorhandenen automatischen Analysen, der Implementierung neuer Zustandsindikatoren oder der Ergänzung von neuen Sensoren. Dazu brauchen diese Nutzer:innen zur Eingabe und Konfiguration sowohl lesende als auch schreibende Rechte.

Nutzer:innengruppe 5: IT-Konfigurator:innen

In der Phase der Erstellung des Digitalen Zwillings brauchen verschiedene technische Nutzer:innen entsprechende Schnittstellen für die Konfiguration des Digitalen Zwillings. Betroffen sind alle Beteiligten des Projektteams Digitaler Zwillings (↗ Kapitel 4.4.1).

Dabei bezieht sich die Aufgabe von Tragwerksplaner:in, Fachplaner:in Monitoring und Diagnostik vorrangig auf die Konfiguration basierend auf Fachwissen wie z. B. die Implementierung neuer Zustandsindikatoren. Diese Anforderungen wurden bereits in der Nutzer:innengruppe 4 adressiert.

Zusätzlich braucht es für die IT-Konfiguration weitere Schnittstellen, die von Konfigurator:innen (↗ Kapitel 4.4.1) betreut werden.

Nutzer:innengruppe 6: Neue Datenlieferant:innen

Die Spezialdienstleister:innen Monitoring und Bauwerksdiagnostik sind verantwortlich für die Erfassung und Lieferung der Datengrundlagen für die Zustandsbewertung des Bauwerks. Im Wesentlichen erfolgt die Interaktion mit dem Digitalen Zwillings über klar definierte Datenschnittstellen (↗ Kapitel 7 und ↗ Kapitel 8), sodass keine weiteren Anforderungen an Schnittstellen für die Bearbeitung entstehen. Es ist aber sinnvoll, dass die Spezialdienstleister:innen den gleichen Zugang zu den detaillierten Daten des Digitalen Zwillings wie die Nutzer:innengruppe 4 erhalten (Expert:innenansichten), sodass die verschiedenen Beteiligten im Falle von Problemen dieselbe Ansicht nutzen können.

3 – Nutzer:innentypen und Nutzungsparadigmen

Neben den Nutzer:innengruppen ist in einer optimierten MMS zu berücksichtigen, dass es übergreifend über alle Gruppen unterschiedliche Nutzer:innentypen gibt. Sie unterscheiden sich in Altersstufen, Vorwissen oder

der generellen Erfahrung im Umgang mit digitalen Anwendungen. Eine im Sinne der o.g. Usability optimierte MMS begegnet dem, indem unterschiedliche Bedürfnisse erkannt und berücksichtigt werden. Die Anforderung an die Gestaltung der MMS bekommt damit nochmals mehr Gewicht. So wäre es beispielsweise sinnvoll, ein Tutorial für Anfänger:innen bereitzustellen oder Expert:innen spezifische Abkürzungen (Shortcuts) anzubieten.

In diesem Zusammenhang ist der Übergang zum Nutzungsparadigma fließend. Nutzer:innengruppen und Nutzer:innentypen folgen in ihrer Denkweise und Art, digitale Anwendungen zu nutzen, bestimmten Mustern und tun dies meist völlig unbewusst. Es ist daher essenziell, dass eine optimale MMS die typischen Nutzungsparadigmen unterstützt. Im Wesentlichen ist hier die Unterscheidung in navigatorische, ergebnisorientierte und explorierende Nutzungsmuster zu betrachten.

Ein navigatorisches Nutzungsmuster erfordert den strukturierten Aufbau aller Inhalte, Daten und Informationen, etwa in Menüs, Listen und Aufzählungen, wie in **ABB 10.1** die scrollbare Liste von Schäden (auf der linken Seite). Solche Ansichten und Interaktionsformen unterstützen eine sehr strukturierte Denkweise, die stets einen Überblick über das eigene Arbeitsfeld, Wissen um die eigene Position darin und der Einordnung von Informationen in einen Kontext bedarf.

Ein ergebnisorientiertes Nutzungsmuster basiert auf einem hohen Maß an Vertrauen in die Anwendung. Meist ist hiermit die Eingabe in einen Suchschlitz und die Verarbeitung des nachfolgenden Ergebnisses verbunden. Zwar nutzen Expert:innen in spezifischen Anwendungen eine Suche ähnlich einem Shortcut, jedoch sagt umgekehrt dieses Nutzungsparadigma nicht notwendigerweise etwas über den Erfahrungsgrad des/der Nutzer:in aus. So nutzen die allermeisten Internetnutzer weltweit den Google-Suchschlitz, weil sie darauf vertrauen, dass das Ergebnis (der ersten Ergebnisseite) das relevanteste ist.

Ein explorierendes Nutzungsparadigma ist schließlich typisch menschlich, meist sind es lediglich äußere Zwänge, wie z. B. Zeitdruck, die ein forschendes Vorgehen unterdrücken. Exploratismus zeigt sich im Nutzungsverhalten, wenn die Anwendung in nahezu spielerischer Weise untersucht wird. Eine darauf optimierte MMS bietet beim Explorieren additive Informationen, die Nutzer:innen leiten, wie etwa die Einfärbung von Schäden in der 3D-Ansicht in **ABB 10.1**.

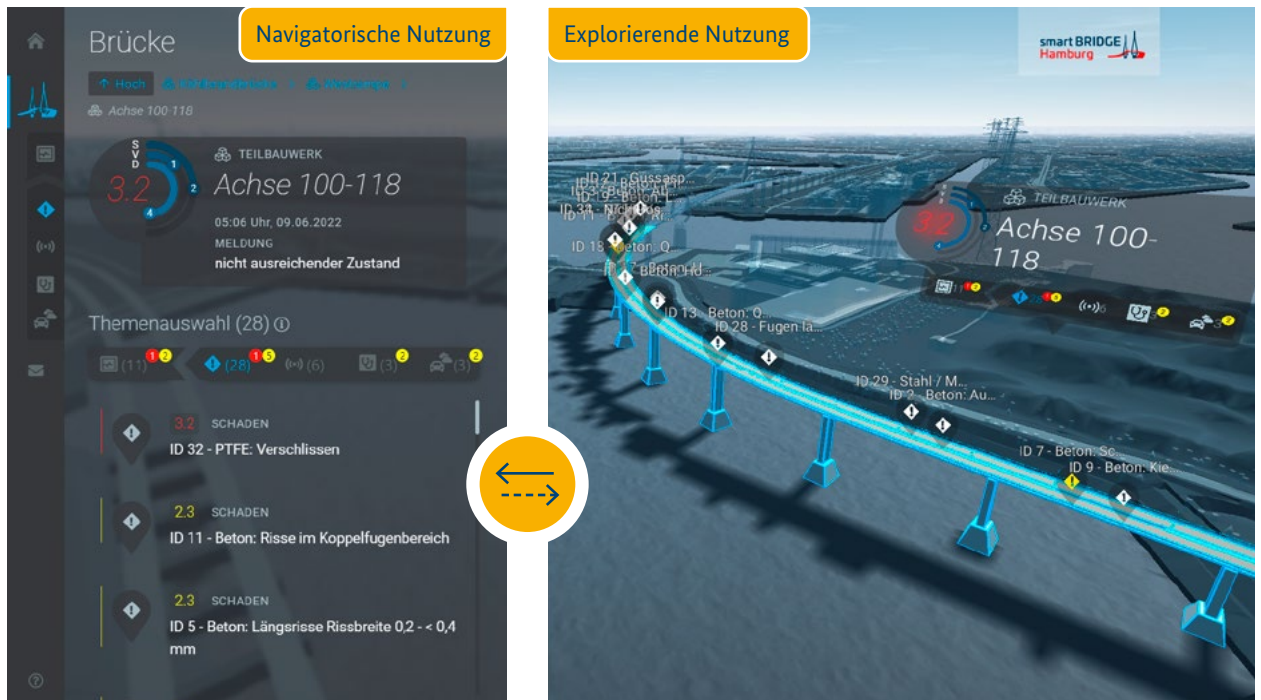


ABB 10.1 Beispiel einer MMS mit der Kombination eines navigatorischen und eines explorierenden Ansatzes im Projekt smartBRIDGE Hamburg

4 – Eine mehrstufige Mensch-Maschine-Schnittstelle

Um die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Nutzer:innengruppen aus den vorigen Kapiteln berücksichtigen zu können, ist eine mehrstufige Mensch-Maschine-Schnittstelle aus heutiger Sicht eine zweckmäßige Lösung. Ein Vorschlag für die Differenzierung in Stufen kann ABB 10.2 entnommen werden. Dieser Vorschlag basiert auf den bisherigen Erfahrungen der Autor:innen und wird im Folgenden detailliert. Die einzelnen Stufen werden hier als separate Funktionen vorgestellt. Eine Zusammenführung mehrerer Funktionen in einem Werkzeug ist nicht ausgeschlossen, aus heutiger Sicht durch die sehr heterogenen Anforderungen allerdings noch nicht realistisch.

1 Aggregierte Gesamtübersicht

Für die meisten Nutzer:innen ist eine Interaktion mit dem Digitalen Zwilling auf hohem Aggregationsniveau mit abstrahierten Kennzahlen erforderlich, um einen schnellen und vollständigen Überblick über den aktuellen Bauwerkszustand zu erhalten. Diese integrale aggregierte Gesamtübersicht soll sowohl von Entscheider:innen (Nutzer:innengruppen 1 und 2) als auch von Fachspezialisten (Nutzer:innengruppen 3, 4 und 5) genutzt werden.

Der Raumbezug von den verschiedenen Zustandsindikatoren, Schäden, Sensoren und Untersuchungsstellen stellt einen gemeinsamen Nenner dar, um gerade bei komplexen Tragwerken die Informationen und deren

Zusammenhang intuitiv erfassen und verstehen zu können. Deshalb ist für die aggregierte Gesamtübersicht ein explorierbares 3D-Modell für die Verknüpfung aller Informationen eine grundlegende Voraussetzung.

Eine weitere Voraussetzung neben dem Raumbezug ist die thematische und kontextuelle Strukturierung. Bereits in 7 Kapitel 4 bis 7 Kapitel 9 wurde gezeigt, dass die Daten nach verschiedenen Kriterien zu strukturieren sind:

- Taxonomie nach ASB-ING
- Thematische Zuordnung (Zustandsindikatoren, Schäden, Sensoren, Diagnostik, ggf. weitere)
- Hierarchische Zuordnung innerhalb eines Themas (Beispiel: Zustandsindikatoren teilen sich in verschiedene partielle Zustandsindikatoren auf)

Ziel der aggregierten Gesamtübersicht ist die Wiedergabe dieser Struktur in Form eines Drilldowns von der Asset-Ebene bis zur Detailkomponente oder der Schadensebene.

Die in der aggregierten Gesamtübersicht bereitgestellten Inhalte werden im Zuge der Konfiguration implementiert. Nutzer:innen können keine direkten Anpassungen vornehmen.

Neben der Gesamtübersicht sind weitere, individuellere Expert:innenansichten 2 erforderlich, wobei die Abstrahlungsmöglichkeit aus der integralen Übersicht möglich sein soll.

Mit der aggregierten Gesamtübersicht soll es möglich sein, trotz der Komplexität der zugrundeliegenden Daten und Zusammenhänge, diese intuitiv konsumierbar bereitzustellen und gleichzeitig an jeder Stelle in die Tiefe der Daten eintauchen zu können. Eine beispielhafte Umsetzung wird in ABB 10.3 vorgestellt.

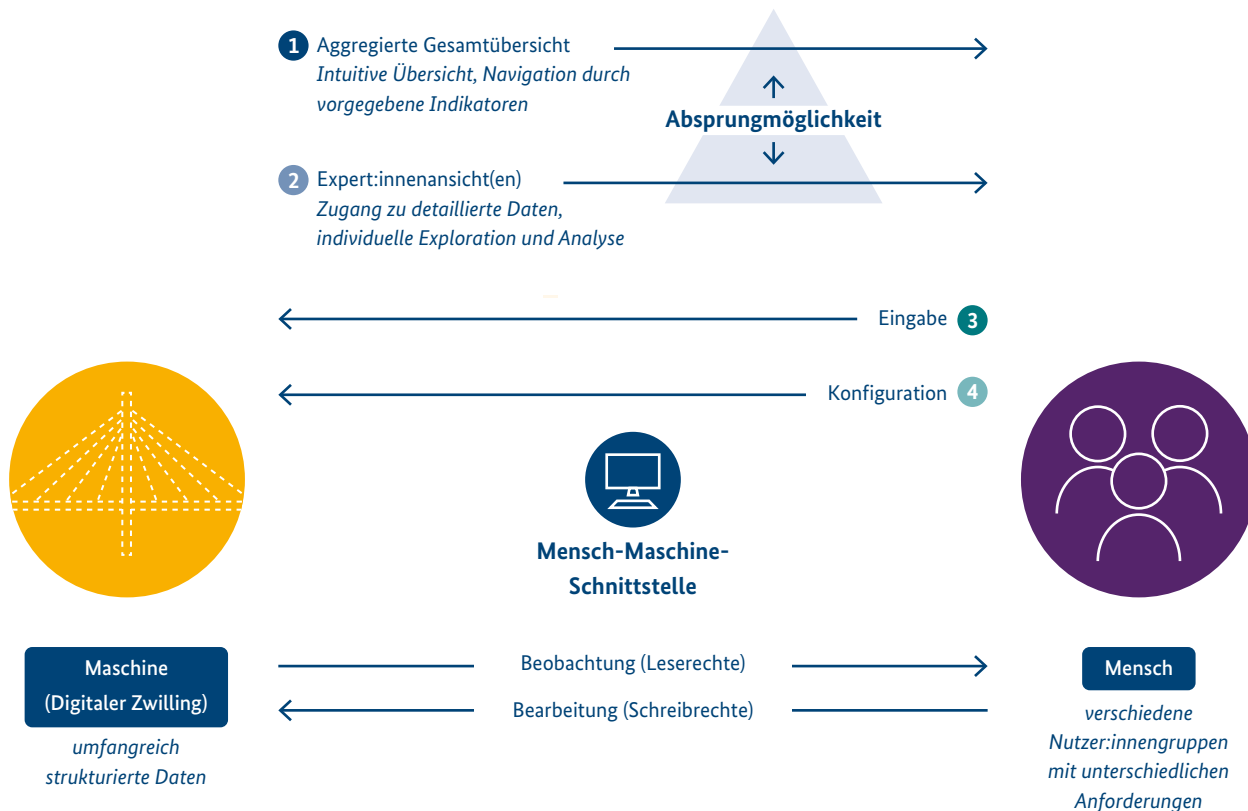


ABB 10.2 Unterteilung in adressatengerechte Schnittstellen

2 Expert:innenansicht(en)

Für die Nutzer:innen der Gruppen 2 bis 6 (7 Kapitel 10.2) kann es erforderlich werden, für ausgewählte Inhalte eine entsprechende Expert:innenansicht zur Analyse der Detaildaten vorzuhalten. Bei Auffälligkeiten in den aggregierten Indikatoren oder bei speziellen Fragen im Zuge der laufenden Erhaltungstätigkeiten (z. B. Bauwerksprüfung, Nachrechnung) haben Nutzer:innen damit die Möglichkeit, die Rohdaten zu sichten und bedarfsgerecht zu analysieren. Im Gegensatz zur aggregierten Ansicht 1 sollte in den Expert:innen-Dashboards die Möglichkeit einer freien und individuellen Datenexploration bestehen, wie z. B. eine Änderung des dargestellten Zeitraums (Herein- oder Herauszoomen), die Durchführung von einfachen Operationen/Datenanalysen (Additionen, Offset, etc.) oder das Zusammenstellen individueller Diagramme. Eine Verknüpfung zwischen der aggregierten Ansicht 1 und den Expert:innen-Dashboards 2 ermöglicht durch die intuitive Navigation in der aggregierten Ansicht eine schnelle strukturierte Exploration der Daten.

Je nach Inhalten oder Nutzer:innengruppe können mehrere Expert:innen-Dashboards sinnvoll sein, beispielsweise zur Exploration der Monitoringdaten oder zur Darstellung von Untersuchungsergebnissen der Bauwerksdiagnostik. Beispiele sind ABB 10.4 zu entnehmen. Weiterhin

können bei sehr speziellen Datenquellen (z. B. geodätische Messungen, Photogrammetrie) oder bei speziellen Auswertemethoden (z. B. Nutzung von Künstlicher Intelligenz) separate Expert:innen-Dashboards notwendig werden, um einen geeigneten Zugang zu den Ergebnissen zu erhalten.

3 Eingabe

Die verschiedenen Datensätze, die im Digitalen Zwilling einzubinden sind, müssen initial angelegt werden. Beispielsweise müssen BIM-Fachmodelle, Datensätze für das Monitoringsystem oder die *SIB-Bauwerke*-Datenbank erstellt werden. Bei Änderungen des Schadensbildes, bei zusätzlichen Sensoren oder weiteren diagnostischen Untersuchungen müssen neue Datensätze erstellt werden bzw. die vorhandenen aktualisiert oder erweitert werden. Dazu sind entsprechende Eingabeschnittstellen notwendig. Auf Basis dieser Grundlage kann die anschließende Konfiguration 4 vorgenommen werden.

Die Eingabeschnittstellen sind häufig schon existent: BIM-Software, Datenbanktools oder *SIB-Bauwerke*. Im Zusammenhang mit der Verbreitung von Digitalen Zwillingen ist zu erwarten, dass die vorhandenen Eingabeschnittstellen weiterentwickelt werden und auf Weiterverwendung optimierte Datenschnittstellen entstehen.

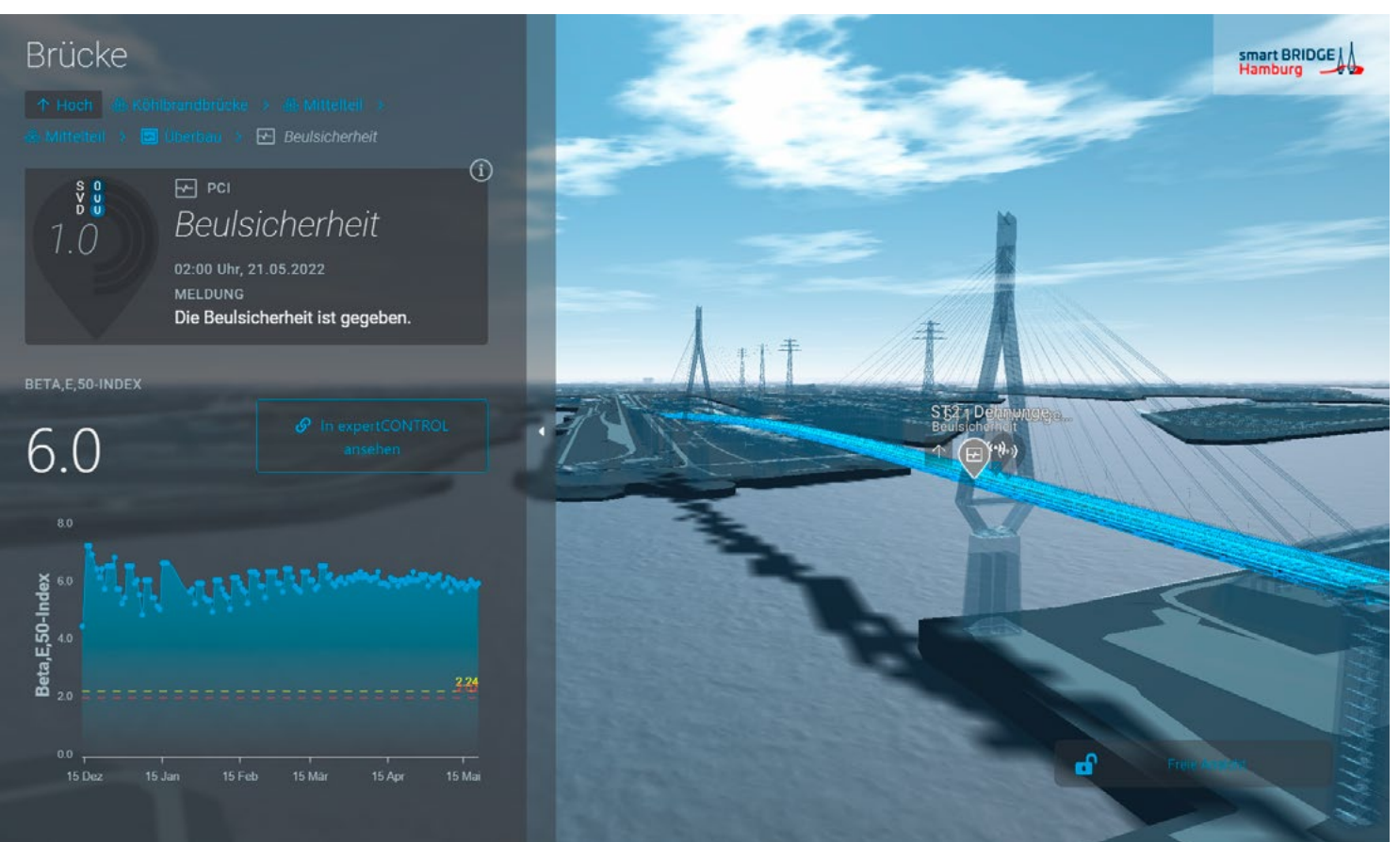
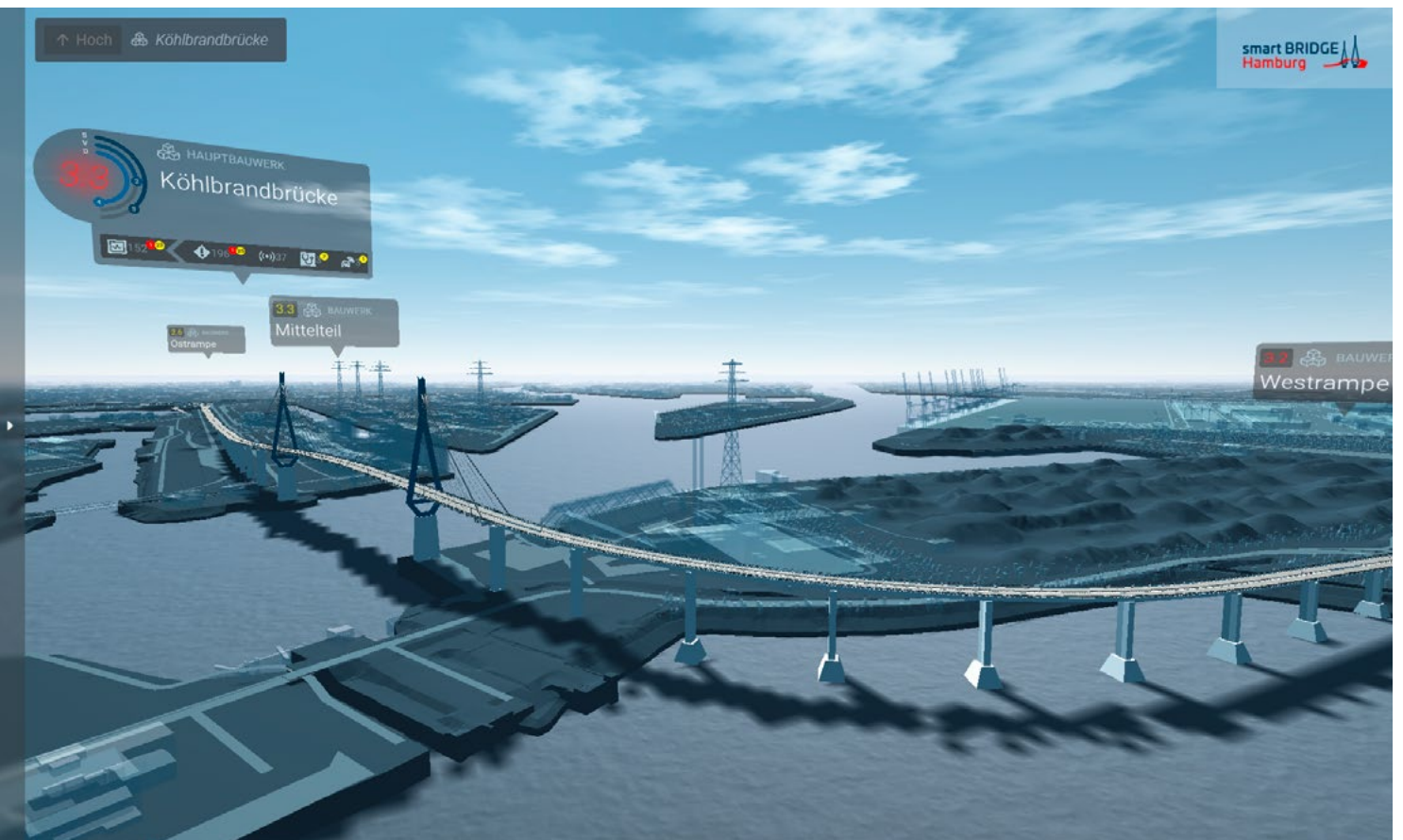


ABB 10.3 Beispiel einer aggregierten Gesamtübersicht aus dem Projekt smartBRIDGE Hamburg, oben: integrale Ansicht des Bauwerks, unten: Darstellung eines partiellen Zustandsindicators

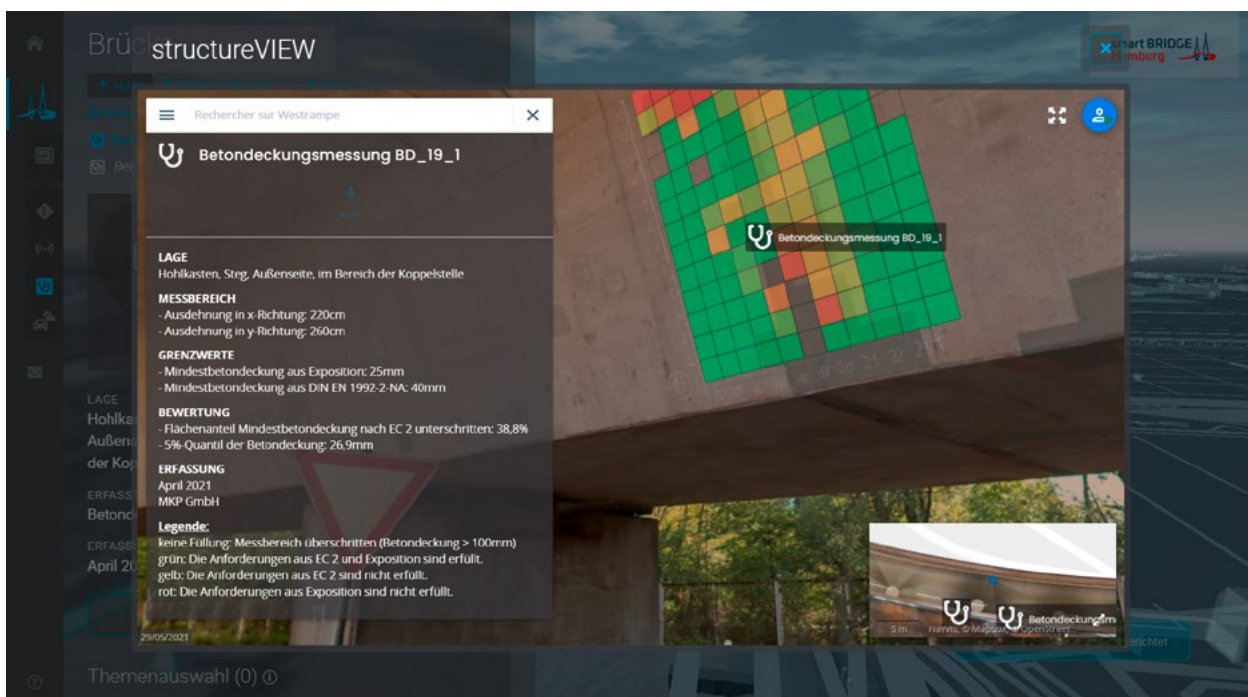
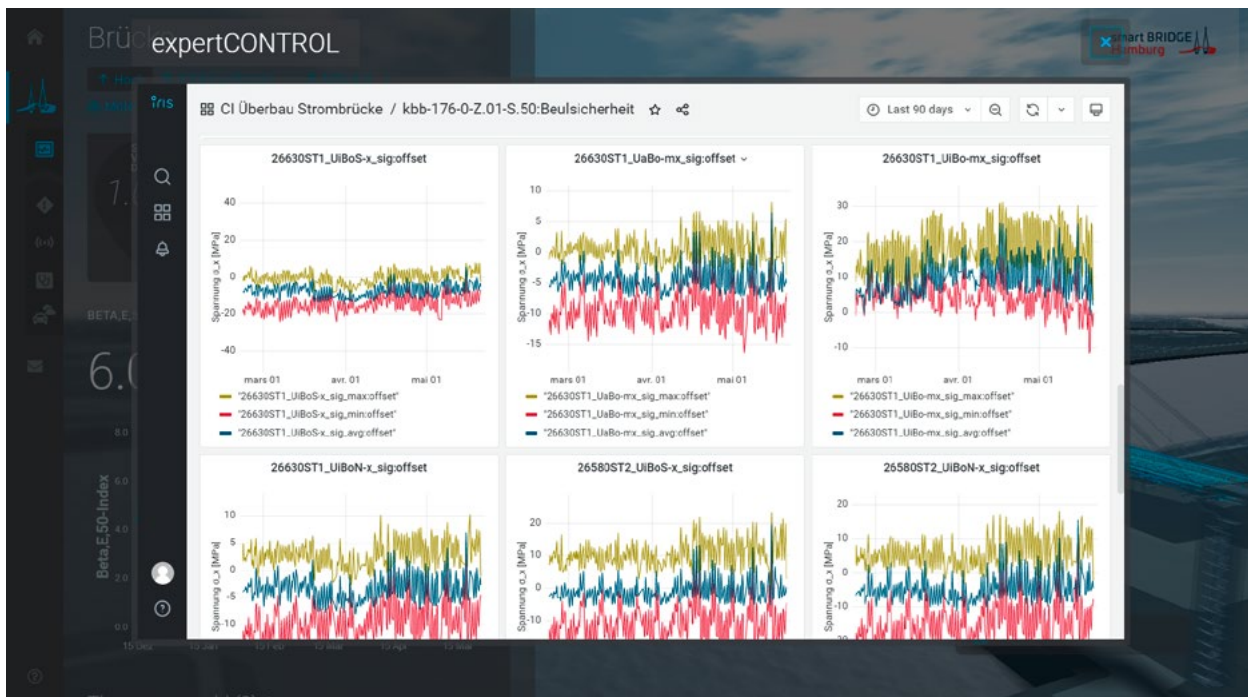


ABB 10.4 Beispiel von Expert:innenansichten aus dem Projekt *smart-BRIDGE Hamburg*, oben: Expert:innen-Dashboard für Sensordaten (expertCONTROL), verlinkt mit der aggregierten Gesamtübersicht (ABB 10.3) für eine thematisch vernetzte Detailexploration, unten: Expert:innen-Dashboard für Ergebnisse von bauwerksdiagnostischen Untersuchungen (structureVIEW) mit einem Mapping der Untersuchungsergebnisse auf ein fotorealistisches 3D-Modell



ABB 10.5 Blick durch die AR-Brille und lagegerechte Visualisierung der Informationen aus dem Digitalen Zwilling (Foto: customQuake)

Gerade im Hinblick auf Weiterentwicklungen ist ein Fokus auf die Kollaboration zwischen Vor-Ort- und Bürotätigkeiten zu legen. Ziel ist es, mit wenig Aufwand viele Daten vor Ort teils automatisch zu erheben, deren Verknüpfung herzustellen und diese ohne Weiterverarbeitung in den Digitalen Zwilling einzubinden. Bedarf besteht hier insbesondere für *SIB-Bauwerke* zur Erfassung von Schäden (Kapitel 6.2) und anderen Dokumentationsschnittstellen, beispielsweise zur Dokumentation von Sensoren oder diagnostischen Maßnahmen.

4 Konfiguration

Zur Initialisierung des Digitalen Zwillings ist eine anfängliche Konfiguration vorrangig durch die Nutzer:innengruppen 4 und 5 vorzunehmen. In der Betriebsphase des Digitalen Zwillings wird die Plattform von den gleichen Nutzer:innengruppen administriert und gewartet, wobei auch Anpassungen oder Erweiterungen der Erstkonfiguration notwendig sind. Diese Tätigkeiten sind im Kapitel 4.4.2 in den Phasen 4 und 5 zugeordnet. Für diese Zwecke ist eine geeignete Konfigurationsschnittstelle notwendig.

Formen der Interaktion und Interface-Technologien

Noch stellen Bildschirme die typischen Interaktionsflächen für Mensch-Maschine-Schnittstellen dar. Die verschiedenen vorgestellten Funktionen 1 bis 4 lassen sich auch bei

Einbeziehung von 3D-Modellen als Navigationsbasis sehr gut über Bildschirme umsetzen (Bsp. in ABB 10.3, ABB 10.4).

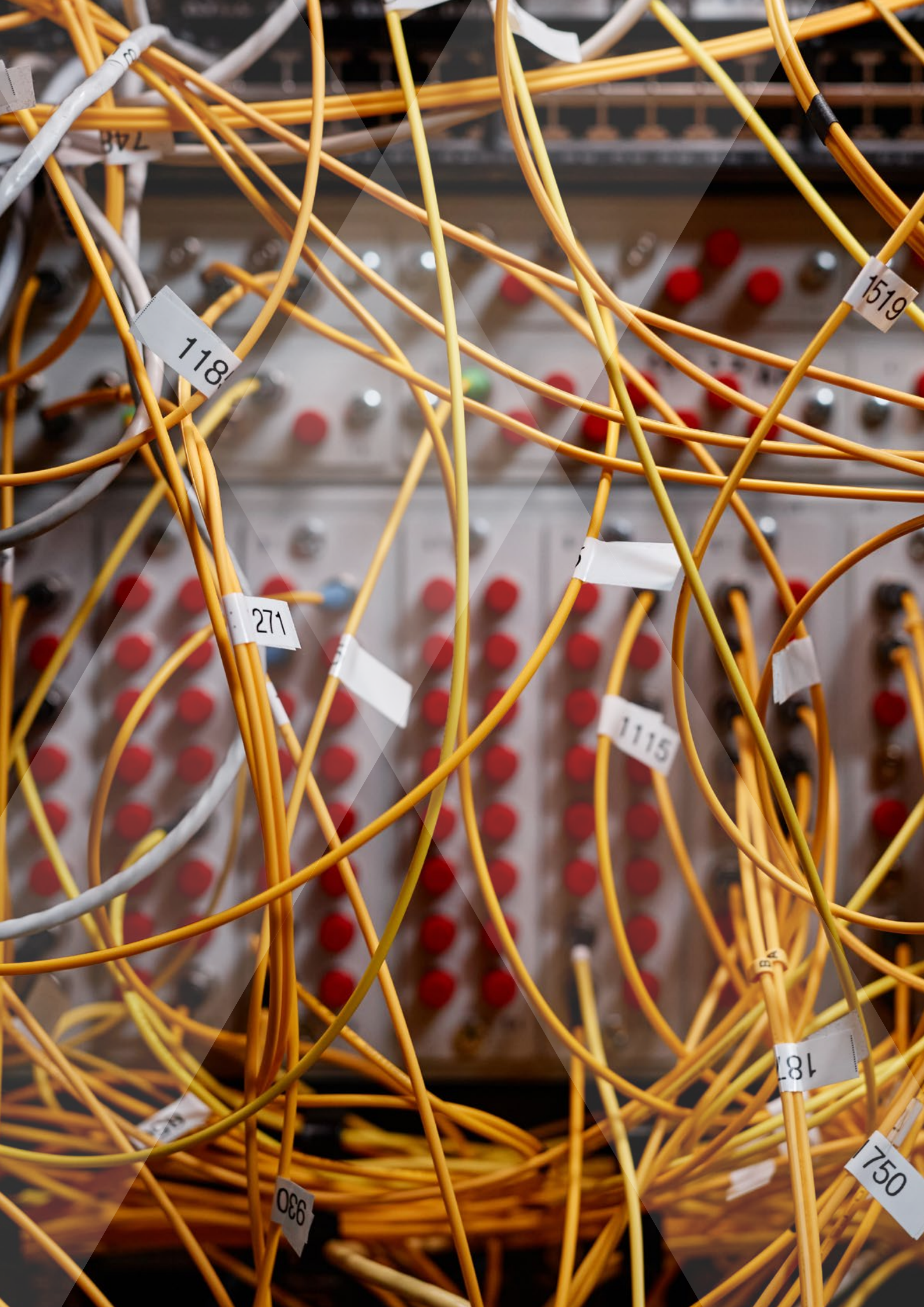
Mit der Weiterentwicklung der Technologien *Augmented Reality* (AR) und *Virtual Reality* (VR) eröffnen sich neue Möglichkeiten sowohl zum Beobachten als auch zum Bearbeiten von Daten.

Für die Visualisierung räumlich kontextualisierter Daten direkt am Bauwerk oder auch für die Dokumentation von Informationen am Bauwerk mit einem örtlichen und fotografischen Bezug eignet sich die AR-Technologie hervorragend. Durch das Augmentieren der Realität um die Informationen aus dem Digitalen Zwilling erhalten Personen vor Ort eine bisher nie da gewesene Informationsdichte für den gerade beobachteten Bereich des Objekts (ABB 10.5).

Die VR-Technologie hingegen gewinnt bei der Analyse der Daten und Informationen im Büro an Bedeutung, insbesondere im Kontext kollaborativer Arbeitssituationen.

Der Einsatz von AR und VR bei der Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung der Bauwerksprüfung ist unter anderem ein Anwendungsfall, welcher untersucht wurde. [Bahlau, 2021].

Die Technologien sind für den Einsatz an Brücken gegenwärtig noch nicht voll ausgereift, besitzen aber ein großes Potenzial und werden sich positiv auf die Entwicklung des Digitalen Zwillings auswirken.



748

118

1519

271

1115

181

750

086

11 – IT-Architektur und Datenmanagement für den Digitalen Zwilling

Kurzfassung

Ein Digitaler Zwilling als Abbild eines realen Bauwerks setzt sich aus diversen fachlichen, datenbasierten, technischen und geometrischen Daten zusammen. Aus dieser Datenvielfalt kann durch fachlich gestützte Betrachtung der Mehrwehrt aus einem Digitalen Zwilling gewonnen werden. Aufgrund der daraus resultierenden hohen Datenlast kann die Zusammenführung, Betrachtung und Bewertung dieser Daten nur stichprobenartig manuell erfolgen. Daher ist eine Softwareplattform zur fortlaufenden automatisierten Prozessierung neuer und bestehender Daten erforderlich. Ergebnisse kontinuierlich laufender, wiederkehrender und rekursiver Verarbeitungsprozesse reflektieren den Zustand des Digitalen Zwillings. Für einen aktuellen Zustand ist eine hohe Verfügbarkeit und Aktualität dieser Daten Voraussetzung und kann durch eine leistungsstarke IT-Architektur realisiert werden.

Zur Verarbeitung und Bewertung von Daten ist Fachlogik erforderlich, die Eingang in die automatisierte Verarbeitung finden muss. Die Übersetzung von Fachlogik in

Softwarecode stellt oftmals eine Hürde dar. Durch eine klare architektonische Trennung von implementierter Fachlogik und Architektur zur automatisierten Datenverarbeitung kann ein System langfristig gewartet und gepflegt werden. Geeignete Datenaustauschformate und Schnittstellen ermöglichen eine fortlaufende fachliche und technische Erweiterbarkeit und lösen Abhängigkeiten von Programmiersprachen bei der Umsetzung und Entwicklung.

In diesem Kapitel wird auf die Trennung einer reinen Architektur zur Verarbeitung großer Datenmengen im Big-Data-Ansatz und der Implementierung von Fachlogik eingegangen. Eine geplante Zielarchitektur soll projektspezifische Anforderungen an Skalierbarkeit, Robustheit, Sicherheit und Erweiterbarkeit erfüllen. Daher sind Teile der Architektur je nach Projektanforderungen und Umfang auszulegen. Die beschriebenen Architekturgrundlagen sind auf die Anforderungen kleiner und großer Architekturen übertragbar.

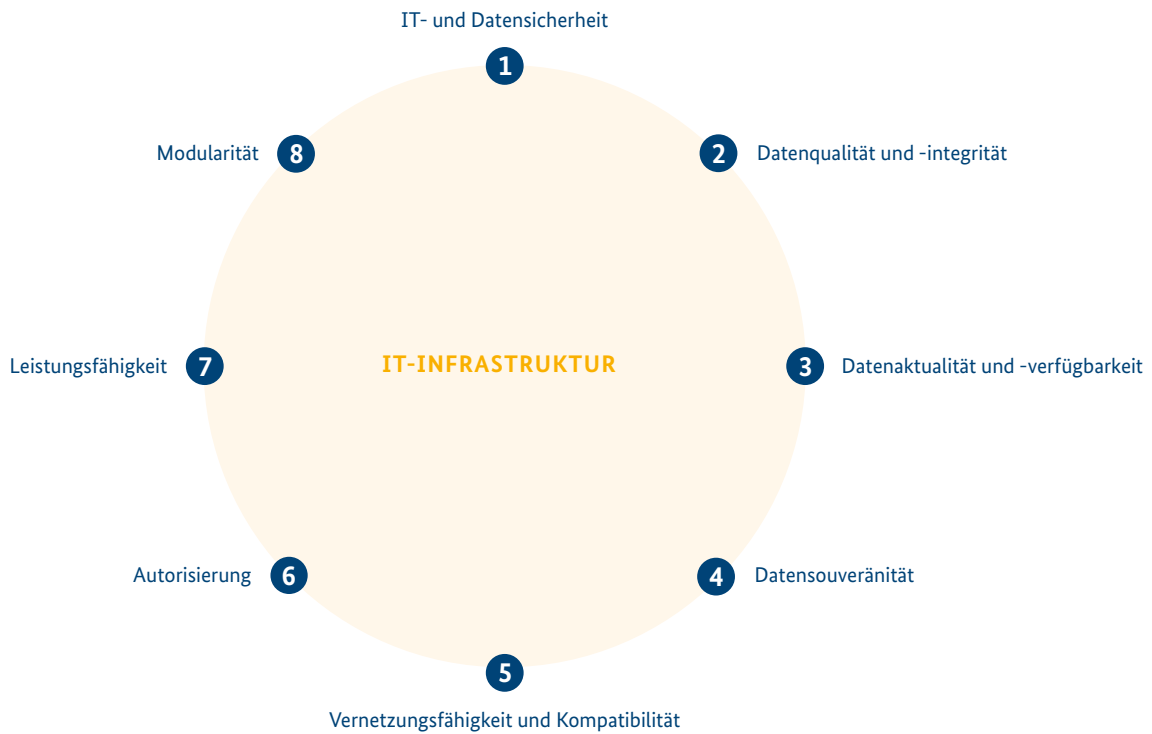


ABB 11.1 Überblick über die Anforderungen an die IT Architektur

1 – Übergeordnete Anforderungen

Der Zweck des Digitalen Zwillings besteht in der Verarbeitung von Daten unterschiedlichster Art und Herkunft zu Informationen, um eine homogene Bewertung und Prognose des Zustands eines Bauwerkes zu ermöglichen. Um diese umfangreichen heterogenen Daten fachgerecht zu verarbeiten, ist eine bedarfsgerechte leistungsfähige und resiliente IT-Architektur erforderlich. Im vorliegenden Dokument wurden bisher fachlich und inhaltlich getriebene Ziele des Digitalen Zwillings aufgeführt. Derzeit sind keine übergreifenden Softwareprodukte auf dem Markt, die all diese Ziele bedienen können. Im Rahmen der Pilotierungsphase zur Entwicklung und Etablierung des Digitalen Zwillings ([Kapitel 1](#)) werden demnächst eigene IT-Lösungen entwickelt, woran die Anforderungen an die IT-Architektur im Zusammenspiel zwischen Bauherr:in und Projektteam geschärft werden können. Im Folgenden werden aus heutiger Perspektive der Autor:innen die wesentlichen Anforderungen an die IT-Architektur vorgestellt, die zur Erfüllung dieser Ziele notwendig sind (ABB 11.1).

Es sei anzumerken, dass der Bedarf einer Definition von Regeln und Anforderungen in Bezug auf die Bewirtschaftung von Daten (Data Economy) grundsätzlich durch

die digitale Transformation und ihre Auswirkungen auf Unternehmen und Behörden zunimmt. Auf übergeordneter Ebene wird das Rahmenwerk, welches die Grundlage für den Umgang mit und die Bewirtschaftung von Daten in einem Unternehmen bzw. einer Behörde für alle Stakeholder bildet, unter dem Begriff Data Governance [Krotova & Eppelsheimer, 2019] zusammengefasst und definiert.



IT- und Datensicherheit

Im Digitalen Zwilling wird eine hohe Dichte von relevanten Daten und Informationen für den Erhalt von öffentlichen Brückenbauwerken gespeichert und verarbeitet. Es bestehen hohe Anforderungen an die Datensicherheit, um die Unversehrtheit von Daten sicherzustellen und einen unberechtigten oder potenziell schädlichen Datenzugriff (Datenverlust, Datenmanipulation) durch Unbefugte zu verhindern. Im Zuge der Konzeption und Erstellung der IT-Architektur sowie im Betrieb sind die geeigneten technischen und organisatorischen Maßnahmen in Form von Prozessen, Technologien oder Abläufen zu treffen, um

Daten gegen Angriffe von außen zu schützen. Nicht zuletzt ist eine erfolgreiche Datensicherheit die Voraussetzung für die Einhaltung der DSGVO. Technische Richtlinien, wie die BSI-Richtlinie [BSI, 2022], sollten als Grundlage bei der Entwicklung der Architektur verwendet werden.

Einige Ansätze werden folgend aufgelistet:

- „Zero Trust“ für alle gehosteten Services und Dienste zur Absicherung von Datenaustausch- und Kommunikationswegen
- Authentifizierung und Autorisierung nicht nur für Nutzer:innen, sondern auch für System-Interaktionen. Nutzung von IP-Whitelists für Systemschnittstellen.
- Absicherung durch sichere Zugangsdaten von Services, die von außen erreichbar sind. Einführung von ergänzenden Zugangsbeschränkung durch IP-Whitelists.
- Verwendung von Verschlüsselungstechnologien für Datenspeicher und Datenübertragungen
- Kontinuierliche Überprüfung verwendeter Libraries im Source Code auf bekannte kritische Fehler und Sicherheitslücken. Systematische Bedrohungsanalysen, Überprüfung gegen gängige TOP-Sicherheitslücken per Checkliste (zum Beispiel mittels OWASP)



Datenqualität und -integrität

Grundlage für den Digitalen Zwilling sind vertrauenswürdige Daten. Die Qualität entsteht im Wesentlichen bereits bei der Erzeugung der Daten, sodass die IT-Architektur in dieser initialen Phase noch keinen direkten Einfluss darauf hat. Für den Fall der Monitoringdaten wird im [7 Kapitel 8.3](#) und [7 Kapitel 8.4](#) deutlich, welche Kriterien für die Qualität bestimmend sind. Die IT-Architektur muss allerdings Sorge tragen, dass die vorhandene Qualität von eingehenden Daten durch die verschiedenen nachlaufenden Arbeitsschritte (Speicherung, Verarbeitung) erhalten bleibt. Diese Anforderung wird auch in der Literatur unter dem Begriff der Datenintegrität definiert. Sie bezeichnet die Sicherstellung der Korrektheit, Vollständigkeit und Konsistenz von Daten sowie den Schutz vor Manipulationen über den gesamten Lebenszyklus der Daten und ist eng mit der Datensicherheit verknüpft. Dazu sind ebenfalls bei der Konzeption und im Betrieb der IT-Architektur für den Digitalen Zwilling entsprechende Prozesse, Regeln und Technologien festzulegen.



Datenaktualität und -verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit und Aktualität von Informationen sind fundamentale Eigenschaften des Digitalen Zwillings (Definition in [7 Kapitel 3](#)). Die IT-Architektur muss in der Lage sein, mit den großen Datenmengen umzugehen, diese zu empfangen, zu speichern und zu verarbeiten, sodass die Anforderungen an die Datenaktualität für alle Daten erreicht werden. Dies benötigt eine hohe Zuverlässigkeit, Robustheit und Ausfallsicherheit der genutzten Hard- und Software. Darüber hinaus müssen die Daten verfügbar sein, sodass z. B. auf eine Historie zurückgegriffen werden kann. Bei diesen großen Datenmengen ist es empfehlenswert, die erforderliche Verfügbarkeit der Daten in Abhängigkeit von Ihrer Wichtigkeit zu definieren, sodass nur wichtige Daten bzw. Informationen über einen langen Zeitraum vorgehalten werden und weniger wichtige Daten nach einem definierten Zeitraum entweder dezimiert oder komplett gelöscht werden können. In der aktuellen Entwicklungszeit neigt man oft dazu, möglichst alle Daten unter der Erwartungshaltung zu behalten, dass die Daten für andere Zwecke noch genutzt werden können. Im Hinblick auf eine ressourcenschonende Vorgehensweise muss in Zukunft bei der Skalierung der Anzahl und Umfang der Projekte von Beginn an ein Datenmanagementplan erstellt und mit dem/der Auftraggeber:in vereinbart werden. Die Entwicklung intelligenter Methoden zur gezielten Daten-dezimierung ist Bestandteil des Forschungsbedarfs.



Datensouveränität

Die Eigentumsfähigkeit von Daten ist mangels Sachqualität rechtlich nicht eindeutig. Bei einer zunehmenden Erzeugung von Daten und bei einer zunehmenden Abhängigkeit von diesen Daten zur Entscheidungsfindung, gerade im Kontext von Bundesfernstraßen und Brücken im Eigentum des Bundes, ist die Frage der Datenkontrolle wichtig. Der Begriff Datensouveränität bedeutet die Kontrolle über Daten und ihre Erhebung, Speicherung und Verarbeitung. Im Falle von *SIB-Bauwerke* beispielsweise ([7 Kapitel 6.1](#)) besitzt der Bund durch die öffentlichen Bauherr:innen sowie durch die BAST die Datensouveränität. Für den Digitalen Zwilling und die dazugehörige IT-Architektur für das Datenmanagement sind der rechtliche Rahmen und

die Datensouveränität noch nicht definiert. Diese Randbedingungen müssen geklärt werden, damit der Bund seiner hoheitlichen Aufgabe nachkommen kann.



Vernetzungsfähigkeit und Kompatibilität

Bereits ein Digitaler Zwilling besitzt eine große Datenvielfalt. Um die Erkenntnisse aus diesen Daten weiterführend auf andere Bauwerke zu projizieren, sowie Modelle und Ingenieurslogik zu übertragen und auszutauschen, ist eine Standardisierung von Austauschformaten und Datenübertragungswegen anzustreben. Auch ein direkter Austausch von Daten zwischen Digitalen Zwillingen kann so langfristig ermöglicht werden, s. a. [Bolton et al., 2018].

Das setzt voraus, dass Daten unterschiedlichster Datenquellen in einem System miteinander verarbeitet werden können. Damit dies gelingt, können offene Standards, wie OGC Sensorthings API [OGC Sensorthings API, 2022], Datenaustauschformate, wie JSON, XML, und Methodiken, wie openBIM, unter Berücksichtigung bestehender Sicherheitsanforderungen [BSI, 2022] verwendet werden.



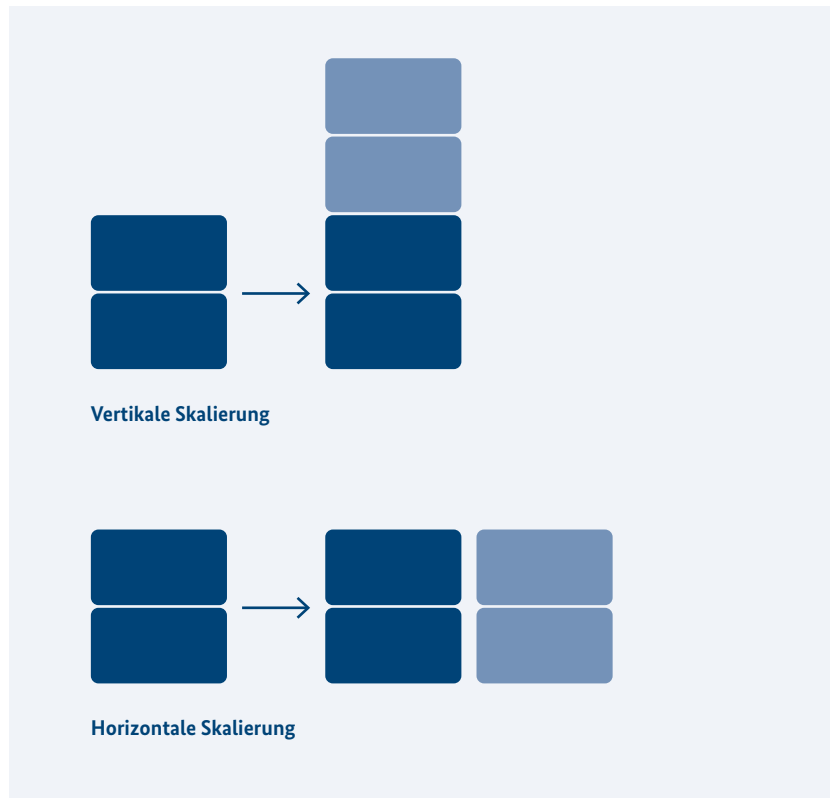
Autorisierung

Damit jede/r Nutzer:in die für sich erforderlichen Rechte besitzt, um mit dem Digitalen Zwilling zu arbeiten, sind Nutzer:innenrollen erforderlich. Jede/r Nutzer:in kann mehreren Rollen zugehörig sein. Die Rechte eines/einer Nutzer:in ergeben sich aus der Vereinigung der Rechte über alle zugewiesenen Rollen hinweg. Das dahinterstehende Rollen- und Rechtesystem kann je nach Anforderungen einfach oder auch komplex aufgebaut sein, mindestens sollten aber die Rollen der Administration, Nutzer:innen mit Schreibrechten und Änderungsrechten und Nutzer:innen mit reinen Leserechten abgebildet sein. Auch Fragen des An- oder Ausschlusses von Alarmierungswegen ist eine Frage der Rollenvergabe.



Leistungsfähigkeit

Neben Anforderungen an eine Infrastruktur, wie eine ausreichende Rechenleistung, IOPs, Arbeitsspeicher und Speicherkapazität, sollten bei der Planung der IT-Architektur



performante Komponenten gewählt werden, die eine nachträgliche Skalierung der Architektur ermöglichen und Infrastrukturre Ressourcen effizient nutzen. Die entstehende Grundlast durch alle erforderlichen Systeme für den Digitalen Zwilling gibt die Mindestanforderung an die notwendigen technischen Infrastrukturre Ressourcen vor. Diese Systeme müssen nicht physisch bereitgestellt werden, in den meisten Anwendungsfällen eignen sich virtualisierte Systeme, um eine bestmögliche Skalierbarkeit zu erzielen. Entstehende Lastspitzen können durch das Hinzufügen von Infrastrukturre Ressourcen oder Instanzen abgefangen werden.

Ein dauerhaft hoher Ausnutzungsgrad der Infrastrukturre Ressourcen sollte vermieden werden, um die Stabilität einzelner Systeme nicht zu beeinträchtigen. Andernfalls sollten die Infrastrukturre Ressourcen durch Hinzufügen von Systemressourcen angepasst werden, wie die Anzahl virtueller CPUs oder Speicher. Das Hinzufügen von Systemressourcen wird als vertikale Skalierung bezeichnet, siehe ABB 11.2.

Da die Leistungsfähigkeit eines einzelnen Systems durch die vertikale Skalierung von Systemressourcen limitiert sein kann, kann ein weiteres gleichartiges System aufgesetzt werden. Diese Art der Skalierung wird als horizontale Skalierung bezeichnet, siehe ebenfalls ABB 11.2. Der horizontalen Skalierung sind im Gegensatz zur vertikalen Skalierung technisch keine Grenzen gesetzt, es können nahezu beliebig viele Systeme parallel laufen. Diese

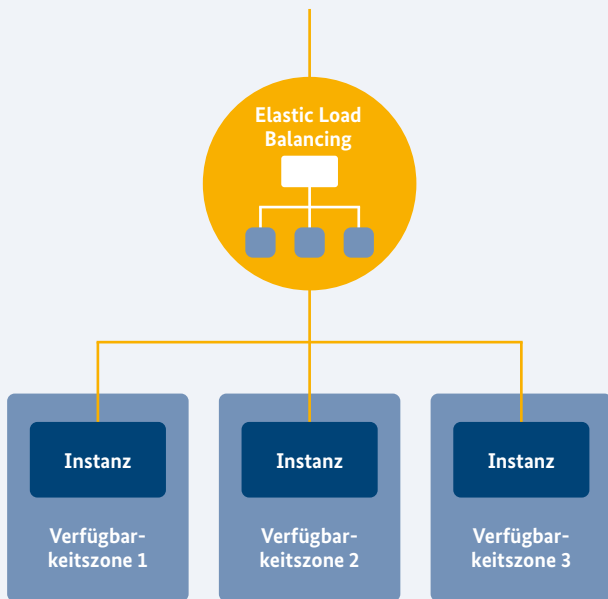


ABB 11.3 Automatische Lastverteilung auf redundante Systeme, sog. „Load Balancing“

Systeme werden als Nodes bezeichnet und werden durch eine verwaltende Infrastruktur orchestriert. Durch die Überwachung von Systemmetriken der Nodes kann eine Skalierung der Infrastruktur bei Bedarf auch automatisch erfolgen. Daher sollte diese Art der späteren Skalierbarkeit angestrebt und von Beginn an architektonisch berücksichtigt werden. So lassen sich zum Beispiel im laufenden Betrieb weitere Sensoren, virtuelle Sensoren oder Berechnungskanäle und -logiken beliebig hinzufügen.

Damit nicht nur die Infrastruktur skaliert wird, sondern auch die Ressourcen der Infrastruktur bestmöglich ausgenutzt werden, verteilt ein Service zum automatischen Lastausgleich (Elastic Load Balancing) die laufenden Services auf die Nodes. Einige Services lassen sich auf diese Weise ebenfalls automatisch nach Metriken wie Last oder Verfügbarkeit skalieren (ABB 11.3).

Werden Ressourcen nicht mehr benötigt, kann ein automatisches Herunterskalieren für Services als auch für die Infrastruktur erfolgen.

Durch eine automatische Verteilung auf redundante Infrastrukturen in unterschiedlichen Verfügbarkeitszonen, die lokal oder global voneinander getrennt sein können, steigt zusätzlich die Verfügbarkeit und Fehlertoleranz, siehe ebenfalls ABB 11.3.

Eine containerbasierte Bereitstellung von Diensten bietet die Möglichkeit, Ressourcen von Infrastrukturen bestmöglich auszunutzen. Mit Hilfe geeigneter Systeme können Container-Anwendungen automatisiert bereitgestellt,

skaliert und verwaltet werden. Gemanagte Infrastrukturen von Cloudanbietern sollten bei der Auswahl mit in Betracht gezogen werden, denn so lassen sich komplexe Systeme langfristig wirtschaftlich betreiben und administrieren (Infrastructure-as-a-Service (IaaS), Platform-as-a-Service (PaaS), Software-as-a-Service (SaaS)).



Modularität

Die Architektur für einen Digitalen Zwilling begleitet das Bauwerk über eine längere Zeitspanne. Währenddessen können Aktualisierungen und ggf. auch Anpassungen an der Architektur erforderlich sein, wenn beispielsweise die Leistung eines Systems nicht mehr ausreichend ist oder Technologien durch neue und besser geeignete ersetzt werden können. Dafür eignet sich eine modular aufgebaute Architektur. Diese erhöht die Wartbarkeit, Resilienz und kann laufende Kosten minimieren.

Das betrifft ebenfalls die erforderliche Fachlogik zur ingenieurtechnischen Auswertung, Bewertung und Veredelung von Daten. Die Erweiterung eines Systems um Fachlogik sollte im laufenden Betrieb unterbrechungsfrei möglich sein (↗ Kapitel 11.3).

Mit dem Ansatz „everything as code“ lassen sich Bereitstellungsprozesse, automatisierte Tests von Code und Services, Weiterentwicklungen der gesamten Architektur und die Übertragbarkeit symmetrischer Architekturen für unterschiedlicher Projekte im laufenden Betrieb ohne Ausfallzeit realisieren. Ebenso lässt sich der Ansatz der horizontalen Skalierbarkeit (siehe voriger Punkt Nr. 7 „Leistungsfähigkeit“) umsetzen.

2 – IT-Architektur

Um eine Systemarchitektur für ein Projekt auszulegen, ist eine sorgfältige Planung im Vorfeld erforderlich. Ein Digitaler Zwilling gibt dabei den erforderlichen Leistungsrahmen vor. Die Leistungsfähigkeit einer Architektur ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig und lässt sich für die Planung in Anforderungen an Infrastruktur (u. a. Hardware, Software, Daten, Netzwerk), Management (u. a. Datensicherheit, Verfügbarkeit, Lastverteilung, Kapazitätsverteilung) und Schnittstellen unterteilen. Bei der Planung der Architektur müssen spätere mögliche Engpässe identifiziert werden. Die folgende Auflistung kann zur groben Planung dienen:

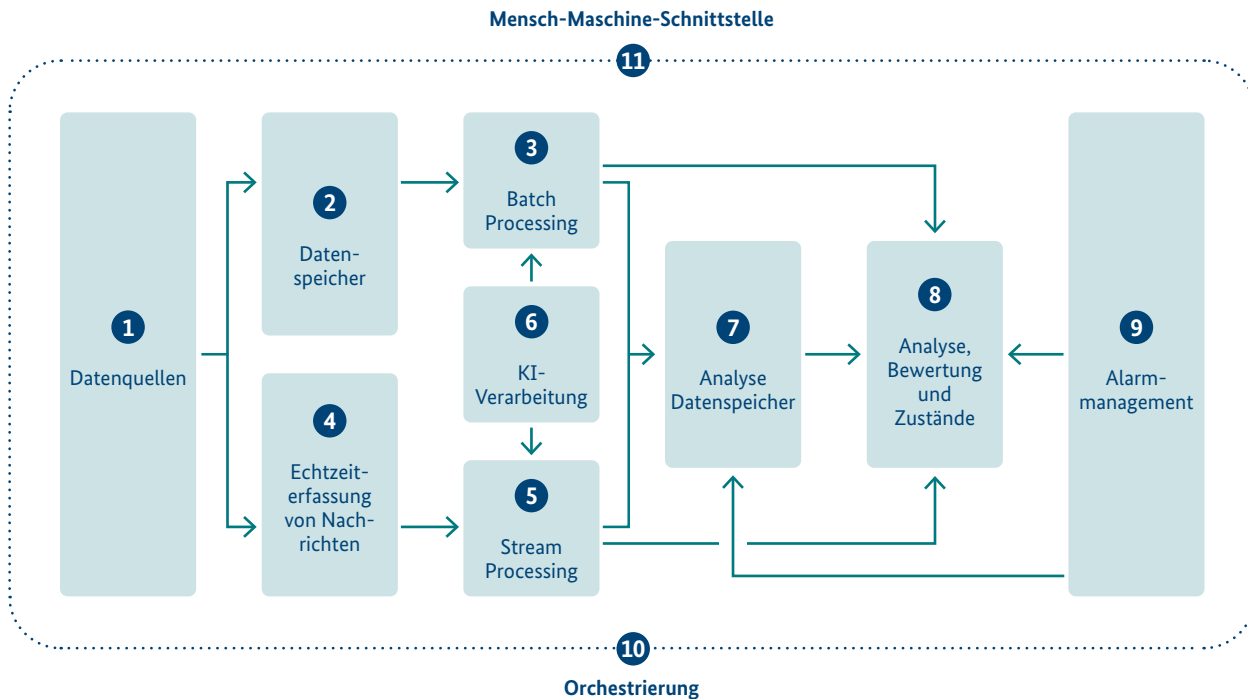


ABB 11.4 Mögliche Architekturkomponenten für einen Digitalen Zwilling, adaptiert aus [MS AZ, 2022]

- Laufzeit eines Projektes
 - Dauer der Wartung und Pflege der Infrastruktur
- Entstehende Datenmengen durch unterschiedliche Datenquellen
 - Planung des erforderlichen Speicherplatzes
 - Speicherebenen, Sicherungen, Archivierung
 - Auswahl geeigneter Speichertechnologien
- Datenhaltung
 - Geeignete Datenbanksysteme
 - Datenszenen
 - Zugriffszeiten
- Standort von Daten
 - Cloudbasiert
 - Dezentral
- Anforderungen an die Datenaktualität
 - Auslegung von Datenübertragungswegen
 - Berücksichtigung von Übertragungs- und Verarbeitungszeiten
- Anforderungen an die Datenveredelung
 - Zu verarbeitende Datenmengen pro Tag
 - Anforderungen an die laufende Erweiterbarkeit
- Komplexität des Modells zur Exploration des Digitalen Zwillings
 - Integration von Daten, Zuständen und Geometrieinformationen
 - Nutzer:innenanwendung zur Darstellung auf Endgeräten

Im Folgenden werden auf Basis der Erfahrungen im Projekt *smartBRIDGE Hamburg* Ableitungen für eine IT-Architektur getroffen. Genannte Architekturkomponenten werden mit Hilfe von Technologie und Technik bereitgestellt. Die Beschreibung dieser Komponenten und Technologien werden durch exemplarisch genannte technische Lösungen und Produkte gestützt. Diese Ausführung hat den Charakter eines Vorschlags und repräsentiert nicht das Marktangebot oder die Marktvielfalt. Alle genannten Produkte dienen als exemplarische Aufführung. Die Auswahl von geeigneten Lösungen muss im Rahmen der Projekt-, Ausschreibungs-, Datensicherheits- sowie Datensouveränitätsanforderungen erfolgen. Die hier exemplarisch aufgeführten technischen Lösungen erfüllen nicht per se die zuvor in [Kapitel 11.1](#) genannten Anforderungen. Für jede Architekturkomponente können Open-Source-Entwicklungen, verwaltete kommerzielle Produkte oder auch selbst bereitgestellte Produkte genutzt werden.

Der Unterbau für den Digitalen Zwilling

Ein Bauwerk erzeugt im Laufe seines Lebens eine große Menge an Daten. Ein Digitaler Zwilling soll diese vorhalten und das Ebenbild seines realen Zwillings sein. Neben qualitativen Daten, die einen Überblick über den Zustand des Bauwerks liefern, sind für genau diese Bestimmung auch quantitative Daten erforderlich. Das bedeutet, es fallen große Datenmengen an, die unterschiedlicher Struktur

und unterschiedlichen Typs sein können. Es ist eine leistungsstarke IT-Architektur erforderlich, um die Erfassung, die Verarbeitung und die Analyse der Daten performant und latenzarm zu ermöglichen (ABB 11.4). Das Ziel, das mit dieser Architektur verfolgt wird, bleibt unabhängig von der Datenmenge identisch – eine performante Verarbeitung kontinuierlich auflaufender Daten inklusive einer geeigneten Datenhaltungsstruktur. Das Intervall der auflaufenden Daten kann sich dabei stark unterscheiden. Einige Daten gehen seltener ein, im Zusammenhang mit einem Digitalen Zwilling können dies zum Beispiel manuelle zyklische Bauwerksprüfungen sein. Andere Daten werden kontinuierlich hochfrequent automatisiert übertragen, wie etwa Schallemissionsmessungen. Hinzu kommen Verarbeitungsprozesse, die zyklisch auf Datenbestände ausgeführt werden. Hierbei können Datensätze großer Zeitbereiche, beispielsweise Jahrzehnte, verarbeitet werden.

1 Datenquellen

Der Datenbestand wird auf Grundlage von Datenquellen aufgebaut. Die Datenquellen eines Digitalen Zwillings können unterschiedlicher Art sein und unterschiedliche Daten zur Verfügung stellen (↗ Kapitel 4.2). Um alle erforderlichen Daten für den Digitalen Zwilling entgegenzunehmen, sind unterschiedliche, zum Teil auch individuelle Schnittstellen erforderlich, an die Edge-Devices (dezentrales Netzwerkgerät, das einen Einstiegspunkt in ein Kernnetzwerk von Unternehmen oder Diensteanbietern bereitstellt), Messanlagen oder andere Dienste ihre Daten für den Digitalen Zwilling übermitteln können. Als Beispiele:

- Dateibasierte Messdaten
- IoT-Geräte, die ihre Daten in Echtzeit liefern
- Ergebnisse aus Bauwerksprüfungen
- Ergebnisse aus zuvor verarbeiteten Datensätzen
- Nichtrelationale und relationale Datenbanken
- Webdienste (z. B. Wetterdaten von Servicedienstleistungsunternehmen)

Bei der Implementierung von individuellen Schnittstellen ist ein einheitliches, standardisiertes, offenes Datenaustauschformat anzustreben.

Nachrichten können in wortreicher XML- oder JSON Darstellung formatiert übertragen werden. Zur Reduzierung der Datenlast empfiehlt es sich, leichtgewichtige Protokolle, wie MQTT, XMPP oder CoAP für Edge-Devices einzusetzen. Steht eine ausreichende Bandbreite zur Verfügung, können Daten auch über Protokolle wie http, gRPC oder über RESTful-APIs übermittelt werden.

Auch eine dateibasierte Übertragung über einen abgesicherten FTPs- oder sFTP-Server stellt eine Möglichkeit zum Empfangen von Daten dar, die darüber hinaus auch manuell ohne große Fachkenntnisse bedient werden kann.

Für jede der erforderlichen Übertragungsprotokolle sind bei der Planung der Architektur zusätzliche Komponenten zu berücksichtigen, die nach außen eine abgesicherte Schnittstelle zur Verfügung stellen und den empfangenen Datensatz für die Weiterverarbeitung über geeignete Datenquellen intern bereitstellt.

2 Datenspeicher

Daten, die über eine Batchverarbeitung (siehe 3) prozessiert werden sollen, werden in der Regel auf einem verteilten Datenspeicher gespeichert. Diese Daten können unterschiedlichen Typs sein, wie zum Beispiel CSV Dateien, Bilder oder spezielle Formate, und in großen Datenmengen auflaufen [MS AZ, 2022]. Wie in 1 beschrieben, können Datensätze unterschiedlicher Herkunft durch unterschiedliche APIs und Dienste als Batch im Datenspeicher zur Zwischenspeicherung abgelegt werden. Weiterführende Prozesse bedienen sich an diesem Datenbestand und arbeiten diese eingehenden Daten zyklisch fortlaufend ab. Als Speichertechnologie eignen sich moderne Objektspeicherplattformen, zum Beispiel ein einfacher cloudbasierter Objektspeicher, wie MinIO, LeoFS, Azure-BLOB-Speicher oder Amazon s3.

3 Batchverarbeitung

Ein Batchprozess dient dazu, viele Datensätze am Stück aufzubereiten, zu aggregieren, zu filtern oder für weitere Verarbeitungsprozesse vorzubereiten. Eingehende Daten müssen dafür zunächst durch diesen Prozess eingelesen werden. Als Datenquelle können dateibasierte Speicher als auch Datenbanken verwendet werden. Große Datensätze in einem Batch können zu langen Verarbeitungszeiten führen – um die Verarbeitung auch dann aufrecht und performant zu halten, kann für die Verarbeitung selbst eine horizontal skalierbare microservicebasierte Architektur verwendet werden, ↗ Kapitel 11.3.

4 Echtzeiterfassung von Nachrichten

Werden Daten auch in Echtzeit erfasst und übertragen, müssen diese durch die Architektur erfasst und gespeichert werden können. Die eingehenden Nachrichten können zur Verarbeitung auf einem einfachen Datenspeicher abgelegt werden. Ebenso kann dieser Speicher als Puffer

dienen, um diese Nachrichten zwischenspeichern und Lastspitzen abzufangen. Dieser Speicher muss horizontal skalierbar sein, eine zuverlässige Übermittlung sowie weitere Semantik für das gesicherte Abarbeiten von Nachrichten (Queueing) unterstützen [MS AZ, 2022]. In einer Streamingarchitektur wird dieser Teil häufig als Streampuffer bezeichnet. Mit Hilfe geeigneter Event-Streaming-Plattformen können Datenströme gespeichert und verarbeitet werden. Schnittstellen ermöglichen das Laden und Exportieren von Daten unterschiedlicher Dienste.

Als Event-Streaming-Plattform können aktuell Umgebungen wie Apache Kafka, Azure Event Hub oder Confluent zum Einsatz kommen.

5 Streamverarbeitung

Eingehende Daten, die über Echtzeitnachrichten an das System übermittelt werden, müssen für die Weiterverarbeitung aufbereitet werden. Diese folgen Regeln, die sich je nach Nachrichtentyp/Inhaltstyp und Nachrichtenursprung unterscheiden können. Die Ergebnisdaten werden in eine Datensenke geschrieben und stehen dann weiteren Verarbeitungsprozessen zur Verfügung.

Für diese Streamingaufgaben können Umgebungen wie Apache Spark, Apache Flink, Apache Storm, Microsoft Azure Stream Analytics oder Amazon Kinesis verwendet werden.

6 KI-Verarbeitung

Mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (KI) können automatisierte Analysen und Prognosen erzeugt werden. Das dahinterstehende IT-System besitzt die Eigenschaft, menschenähnliche intelligente Verhaltensweisen zu zeigen. Je nach KI-Konzept, z. B. maschinelles Lernen, werden Musteranalysen, Mustererkennungen oder Mustertvorhersagen berechnet. Somit können Trends, Anomalien oder auch Schädigungen an einem Bauwerk in einem Digitalen Zwilling erkannt und aufgezeigt werden. Große Datenmengen können auf diese Weise effizient qualitativ als auch quantitativ automatisiert betrachtet werden und ermöglichen die manuelle Plausibilisierung erkannter Muster.

Für die Entwicklung von KI-Algorithmen über Programmiersprachen steht ein wachsendes System von Bibliotheken zur Verfügung. Eine Vielzahl der Bibliotheken können mit Python, einer höheren interpretierten Programmiersprache, genutzt werden. Dazu gehören beispielsweise TensorFlow, scikit-learn oder PyTorch. Entwickelte

Algorithmen und trainierte KI-Modelle können mit Hilfe von KI-Plattformen fortlaufend automatisiert Daten verarbeiten.

Ein weiterer Trend ist das automatisierte maschinelle Lernen (unsupervised Learning). Während die traditionelle Umsetzung von Algorithmik und Betrieb eines KI-Systems viel Fachwissen und Zeit kostet, um Modelle zu trainieren und diese zu prüfen, ist das Ziel des unsupervised Learnings eine einfache Anwendung durch Automatisierung von zeitaufwendigen, iterativen Aufgaben. Dies vereinfacht die Integration von künstlicher Intelligenz in automatisierte Verarbeitungsprozesse [MS AZ AML, 2022].

Als KI-Plattform stehen OpenSource-Lösungen oder verwaltetet Cloudumgebungen zur Verfügung, wie zum Beispiel MLflow, Neptune, Amazon SageMaker oder Azure Machine Learning.

7 Analysespeicher

Ursprungsdaten, Zwischenergebnisse und Ergebnisse aus einem Batch- oder Streamprozess werden in strukturierter Form auf einem Analysedatenspeicher abgelegt. Auf diesen Speicher können weitere Verarbeitungsprozesse, Analysetools und auch Visualisierungsframeworks zugreifen und diesen als Datenquelle verwenden (siehe 1). Daher ist der Analysespeicher ein quantitativer Datenspeicher, in dem große Datenmengen langfristig vorgehalten werden.

Der Analysespeicher kann technologisch durch eine relationale Datenbank, im Kimball- oder Immon-Stil, oder auch durch eine NoSQL-Datenbank realisiert werden. Insbesondere bei großen Datenmengen, wie hochfrequente Zeitreihen, ist eine passende Speichertechnologie zu wählen, um bestmögliche Zugriffszeiten zu erzielen.

Darüber hinaus hilft eine effiziente Mess-/Daten-Logistik unter Verwendung einer geeigneten Speichertechnologie, große Datenmengen langfristig wirtschaftlich und performant zu speichern und wieder bereitzustellen. Dafür sollten zum Beispiel niederfrequente (statische) Daten von hochfrequenten (dynamischen) Daten getrennt werden. Daten, die nach einer definierten Zeit quantitativ nicht mehr benötigt werden, können durch dedizierte Prozesse oder datenbankbasierte Aggregationsfunktionen in ihrem Umfang auf ein wesentliches Maß reduziert werden. Dies gilt für Ursprungsdaten als auch für jede weitere Datenaggregationsebene. Das größte Optimierungspotenzial besteht bei voluminösen Daten mit hohem Datenaufkommen und Messraten.

Als Zeitreihendatenbanken kann zum Beispiel eine PostgreSQL-Datenbank mit Timescale-Erweiterung eingesetzt werden, oder eine NoSQL-Datenbank (wie InfluxDB). In speziellen Fällen bieten auch dokumentenorientierte Datenbanken (wie MongoDB) Vorteile, um Daten strukturiert oder objektorientiert abzuliegen.

8 Analyse, Bewertung und Zustände

Bewertungen, Zustandsinformationen und alle weiteren hochaggregierten Daten, die das Modell des Digitalen Zwillings qualitativ stützen, werden in einem hierarchisierten Datenmodell zusammengeführt. Diese Hierarchisierung beschreibt, an welcher Position im Geometriemodell des Digitalen Zwillings eine Information verortet ist, inklusive erforderlicher Metadaten und Informationen, wie Aggregationen zur Gesamtzustandsbewertung des Digitalen Zwillings erfolgen. Das Bauwerkshierarchiemodell kann sich je nach Bauwerk, Bauwerkstyp und Regelwerk unterscheiden. Im Falle von Brücken der Bundesfernstraßen entspricht das Hierarchiemodell der Taxonomie nach ASB-ING. Neben numerischen Zustandsbewertungen fließen hier ebenfalls Daten ein, die aus Bauwerksprüfungen, diagnostischen Untersuchungen oder externen Datenquellen stammen. Dieser Speicher stellt somit qualitativ den Datenkern des Digitalen Zwillings dar.

Um diese Daten in erforderlicher Form organisieren zu können, ist eine strukturierte Datenform erforderlich. Für die Datenablage eignen sich dokumentenorientierte Datenbanken oder auch relationale Datenbanksysteme. Ebenso können IoT-Frameworks, wie die OGC SensorThings API, eine umfassende Grundlage zur Strukturierung von Daten liefern.

In der prototypischen Umsetzung im Projekt *smart-BRIDGE Hamburg* erfolgte die Implementierung eines komplexen und umfassenden Bauwerkshierarchiemodells über eine OGC SensorThings API. Über die offenen Schnittstellen der API ist eine nahtlose Integration und somit eine Anbindung des Datenkerns des Digitalen Zwillings in nahezu beliebige Systeme möglich.

9 Alarmmanagement

Um den aktuellen Bauwerkszustand nicht nur durch Exploration der Daten zu erfahren, ist ein Alarmmanagementsystem erforderlich, das gezielt Empfängerkreise bei Zustandsänderungen informiert sowie diese Zustandsänderungen konsumierbar aggregiert. Ebenso sollte ein solches Alarmmanagementsystem in der Lage sein, schwankende Zustandsänderungen um einen Benachrichtigungs-

wert zu glätten, um den Benachrichtigungsstatus über ein definiertes Intervall zu stabilisieren. Geeignete Frameworks bieten Schnittstellen, um Zustandsinformationen über eine REST-API zu empfangen und diese zu kanalisieren, zu aggregieren und bei Bedarf Empfängerkreise nach Regelwerk zu kontaktieren. Ein Alarmmanagement sollte rollenspezifisch aufgebaut sein und auch z. B. Ausfälle von Sensorik oder anderen Komponenten berücksichtigen. Benachrichtigungen an Empfängerkreise können zum Beispiel über eine E-Mail-Benachrichtigung erfolgen.

So kann ein Teil eines Verarbeitungsprozesses einer Batch- oder Streamverarbeitung datenbasiert einen Zustand bestimmen und diesen an das Alarmmanagementsystem übertragen. Das Alarmmanagementsystem verarbeitet den übermittelten Zustand, informiert jedoch nur bei einer Veränderung des Zustandes. Dazu wird der neue Zustandswert mit einem vorherigen abgeglichen. Über die REST-API können ebenso andere Dienste auf diese Zustandsinformationen und Zustandshistorie zugreifen und die aggregierten Zustandsänderungen abrufen.

10 Orchestrierung

Ein Großteil der erforderlichen Datenverarbeitungsvorgänge folgen einem wiederkehrenden Prozessierungsablauf, der technisch in einem Workflow beschrieben wird. In einem Workflow können einzelne Prozessierungsschritte miteinander verbunden und verzweigt werden. Die einzelnen Prozessierungsschritte können zum Beispiel durch eine Microservice-Architektur umgesetzt werden, um bei auftretender Last eine bestmögliche Performance zu erzielen. Weitere Details zur Separierung von Verarbeitungslogik in Microservices ist in [7 Kapitel 11.3](#) zu finden.

Zur Orchestrierung von Workflows können Frameworks wie Netflix Conductor, Apache Oozie oder Azure Data Factory verwendet werden.

11 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Alle Systeme in der Architektur eines Digitalen Zwillings erfordern manuelle Eingriffe während des Betriebs zur Administration, Pflege und Konfiguration. Außerdem müssen alle erzeugten Daten und Datenbestände einsehbar sein. Hierfür sind geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen erforderlich, die in [7 Kapitel 10](#) erläutert sind.

Aufbauend auf Kapitel 10 müssen übergeordnet den Nutzer:innenkreisen folgende „beobachtende“ und „bearbeitende“ Interaktionsmöglichkeiten mit dem Digitalen Zwilling geboten werden:

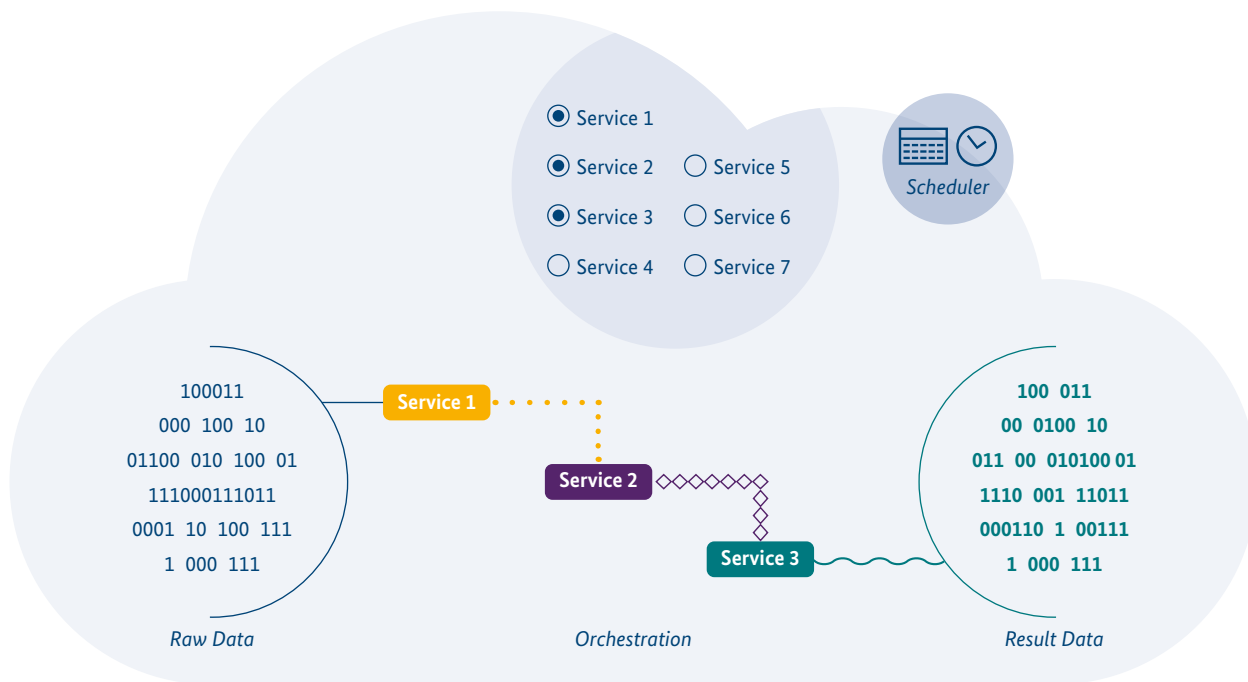


ABB 11.5 Prinzip der automatisierten, microservicebasierten Datenprozessierung

- Initialisierung eines Hierarchiemodells, siehe 8
- Gegebenenfalls Kopplung eines Geometriemodells
- Konfiguration von Verarbeitungsregeln für Daten, siehe 3, 5 und 6
- Konfiguration von Visualisierungen und Darstellungsformen
- Konfiguration des Alarmmanagementsystems, siehe 9
- Exploration aller übermittelten, verarbeiteten und generierten Daten siehe 1, 2, 4, 7 und 8.
- Exploration des Bauwerkzustandes über den Digitalen Zwilling, inkl. Einsehen der Zustandshistorie und Zustandsänderungen aus dem Alarmmanagementsystems, siehe 7, 8 und 9.

Um den heterogenen Datenbestand des Digitalen Zwillings auch explorierbar zur Verfügung zu stellen, können unterschiedliche Visualisierungsframeworks in die Architektur eingebettet werden. Visuelle Schnittstellen sollten generell über eine browserbasierte GUI erreichbar sein und sich auf unterschiedlichen Endgeräten darstellen lassen (responsive webdesign). Für die Darstellungsform ist inhaltlich der Detailgrad der darzustellenden Daten sowie der Kreis der Nutzer:innen entscheidend. Darauf abgestimmt können Übersichtsseiten (Dashboards) mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad Nutzenden die Daten in unterschiedlicher Komplexität bereitstellen.

Daten können in einer geeigneten Darstellungsform, wie Diagramme, Tabellen oder Bar-Darstellungen, formatiert

werden. Diese Dashboards enthalten häufig eine hohe Dichte an Fachinformationen, welche von Endnutzer:innen interpretiert werden müssen. Dafür kann Fachwissen und Know-How erforderlich sein.

Um einen niederschweligen Zugang zu Daten zu bieten, kann ein weiteres Framework zur Darstellung des Bauwerkzustandes die komplexe Darstellungsform ergänzen. Dabei kann die Navigation an dem in 8 beschriebenen Hierarchiemodell erfolgen. Ein Gesamtzustand kann so über eine „Drill-Down“-Navigation intuitiv bis zum Ursprung zurückverfolgt werden. Diese Navigation kann, muss aber nicht, in einem 3D-Modell erfolgen. Wird ein Geometriemodell zur Exploration des Digitalen Zwillings verwendet, dann ist eine Integration der darzustellenden Zustandsinformationen in dieses Modell erforderlich. Zur optimalen Nutzbarkeit sollte das Geometriemodell nur als Basisinformationsträger verwendet werden. Voluminöse Daten, wie Zeitreihen, können in dieses Modell über den Linked-Data-Ansatz referenziert integriert werden (Embedded-Data). Die Daten liegen dann nicht im Geometriemodell selbst, sondern in einer Datenbank und können bei Bedarf von dort abgerufen und bedarfsgerecht visualisiert werden.

Eine Umsetzung eines solchen Navigationskonzeptes und Visualisierungsframeworks ist Bestandteil des Projekts *smartBRIDGE Hamburg* – Eindrücke aus der Visualisierung sind dem 7 Kapitel 10 zu entnehmen.

3 – Automatisierung der Datenauswertung

Auswertelgorithmen

Neben der Erhöhung des Informationsbestandes durch die Erfassung bauwerksspezifischer Daten kann durch die sensorische Überwachung auch die Frequenz der Zustandserfassung erhöht werden. Die so ermöglichte hohe Aktualität der Zustandsbewertung setzt eine hohe Aktualität der Datenauswertung voraus. Die zur Datenauswertung verwendeten Algorithmen sind vorab zu konzeptionieren und die Ausführung dieser möglichst zu automatisieren. Der automatisierte Prozess wird, wie in [Kapitel 11.2](#) beschrieben, durch Batch-, Streaming- und/oder KI-Verarbeitungen auf eingehende Daten und zyklisch auf bestehende Daten angewendet. Je nach Problemstellung können sich für ein Bauwerk verschiedenste Auswertekonzepte ergeben. Diese sind individuell für das jeweilige Projekt zu planen, da das Bauwerk i. d. R. ein Unikat mit individuellen neuralgischen Bereichen darstellt.

Die Auswertekonzepte beinhalten die Beschreibungen zu den Operationen, welche die am Bauwerk erfassten Rohdaten in eine konsumierbare Form, aus der ein Bauwerkszustand ersichtlich wird (z. B. Zustandsnote nach RI-EBW-PRÜF), transformieren. Zur Automatisierung gehören zudem Algorithmen zum Laden und Speichern von Daten.

Auch wenn jedes Bauwerk eine spezifische Konfiguration benötigt, können sowohl konzept- als auch bauwerksübergreifend Einzeloperationen in analoger oder sogar identischer Form übertragen werden.

Microservices – „Do one thing and do it well“

Für die modulare Strukturierung der Auswertelgorithmen in Einzeloperationen bietet sich das Microservice-Architekturmuster an. Die umfangreichen Algorithmen werden in einzelne Programmmodule, sogenannte Microservices aufgeteilt, wobei jeder Microservice einem Algorithmus auf möglichst hoher Abstraktionsebene entspricht und dabei möglichst wenige Aufgaben erledigt. Wie bereits in [Kapitel 11.2](#) erläutert, bedarf es einer Orchestrierung, also Verwaltung dieser Microservice, um die Laufzeit, Last und Verfügbarkeit sicherzustellen. Durch eine Komposition mehrerer Microservices zu einem Prozessablauf, auch Workflow genannt, kann die Gesamtauswertung erfolgen, siehe [ABB 11.5](#). Auch diese Workflows unterliegen wieder einer Orchestrierungsplattform, mit deren Hilfe alle Ausführungen unterschiedlicher Workflows administriert, konfiguriert und überprüft werden können.

Durch die hohe Abstraktion der Microservices werden diese flexibel und vielfältig anwendbar. Synergien können genutzt werden, es bedarf lediglich einer projektspezifischen Konfiguration. Auch werden durch den geringen Umfang der Algorithmen innerhalb der Microservices (und der dadurch einfacheren Nachvollziehbarkeit) Weiterentwicklungen oder Neuimplementierungen erleichtert. Die Microservices agieren unabhängig voneinander, dies erhöht den Automatisierungsgrad und ermöglicht einen kontinuierlichen Datentransfer. Je nach Bedarf können einzelne Services unabhängig voneinander ressourcensparend skaliert werden.

Scheduling

Automatisch zyklisch ausgeführte Verarbeitungsvorgänge können durch ein definiertes Zeitintervall Datenbestände aktuell halten. Die Zeitintervalle sind je nach Anforderung und Zielstellung an die Datenaktualität und verfügbarer Datenhistorie zu wählen.

Dokumentation

Die Auswerteprozesse, d. h. die Beschreibung der Reihenfolge von Auswertelogik, die in Microservices implementiert ist, deren Konfigurationen, sowie die Zeitintervalle zur Ausführung sollten detailliert und einheitlich dokumentiert sein. Bei unbekanntem Gegebenheiten oder in Testphasen werden häufig Algorithmen entwickelt oder Konfigurationen definiert, die nach einer Testphase nachträglich verändert werden müssen. Eine gute Dokumentation ist hier zur Optimierung der Prozesse obligatorisch. Auch für die externe bzw. bautechnische Prüfung der angewandten Datenauswertungskaskaden und Algorithmen ist eine solche Dokumentation fundamental wichtig ([Kapitel 13.2](#)).



12 – Digitaler Zwilling als Basis für ein nachhaltiges Bauwesen

Kurzfassung

Die Welt verändert sich merkbar – der Klimawandel schreitet voran und die weitere prognostizierte klimatische Entwicklung ist beunruhigend. Das Auftauen der Permafrostböden wird durch den enormen CO₂-Ausstoß weltweit angetrieben und die ausgesprochenen Klimaziele, u. a. das Erreichen des 2-Grad-Ziels, könnten bereits in den nächsten Jahrzehnten als gescheitert bezeichnet werden.

Um den Klimawandel noch abzuschwächen, gilt das Hauptziel, den CO₂-Ausstoß maßgeblich zu verringern. Dass die Baubranche hier einen wesentlichen Treiber des Klimawandels darstellt und dementsprechend einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes leisten kann und muss, zeigen folgende Zahlen: Dem Bausektor können rund 35 % des Energiebedarfs sowie 38 % der gesamten CO₂-Emissionen zugeordnet werden. Ein Großteil lässt sich dabei auf die Zementproduktion zurückführen. Darüber hinaus fallen ca. 55 % des Gesamtabfallaufkommens und 50 % der inländischen Rohstoffentnahme auf den Bausektor. Folgerichtig sollten bei zukünftigen Bauprojekten der ressourcentechnische Aufwand und der CO₂-Ausstoß einen bedeutenden Stellenwert bekommen.

Dabei liegt in der Nutzung vorhandener Bausubstanz eines der größten Potenziale des nachhaltigen Bauens. Durch die längere Nutzungs- und Lebensdauer von Bauwerken kann der Zeitpunkt von ressourcenintensiven Investitionen maßgeblich nach hinten verschoben und so umweltschädliche Emissionen verringert werden.

70 % des gesamten Potenzials der Reduzierung des Zementverbrauchs liegen in der längeren Nutzungs- und Lebensdauer von Bauwerken.

Dass insbesondere in den Infrastrukturbauwerken viel Handlungspotenzial steckt, zeigt die alternde Bauwerksstruktur in Deutschland. Die meisten Brücken wurden in den Jahren 1960 bis 1985 erbaut, wobei die Anforderungen an die Bauwerke stets gestiegen sind: Höhere Verkehrslasten und der voranschreitende Altersprozess reduzieren die angestrebte Sicherheit. Das Resultat: Die Nachrechnungen erfüllen die Nachweise, im Vergleich zu Neubauten, nicht und der Ersatzneubau ist oftmals die Konsequenz. Dabei bleibt der wahre Bauwerkszustand meist unbeachtet.

Ein Digitaler Zwilling verspricht die Möglichkeit, Bauwerke realistischer zu bewerten und die tatsächlichen Zustands- und Bestandsinformationen mit der rechnerischen Bewertung der Sicherheit in Einklang zu bringen. Die Kombination aus Diagnostik, Monitoring und entsprechender Datenanalyse ermöglicht, das Bauwerk objektiv zu betrachten und den aktuellen Zustand kontinuierlich zu bewerten. So können Tragreserven verfügbar gemacht werden, ohne die erforderliche Standsicherheit einzubüßen.

Digitale Zwillinge stellen damit nicht nur ein Werkzeug dar, um Bauwerke länger zu erhalten und so einen wesentlichen Beitrag zum nachhaltigen Bauen zu leisten, sondern bieten einen großen Mehrwert für die Baubranche: Geringere Kosten durch Erhalt, Verringerung der Abfallproduktion und eine Chance für die Einhaltung der Klimaziele.

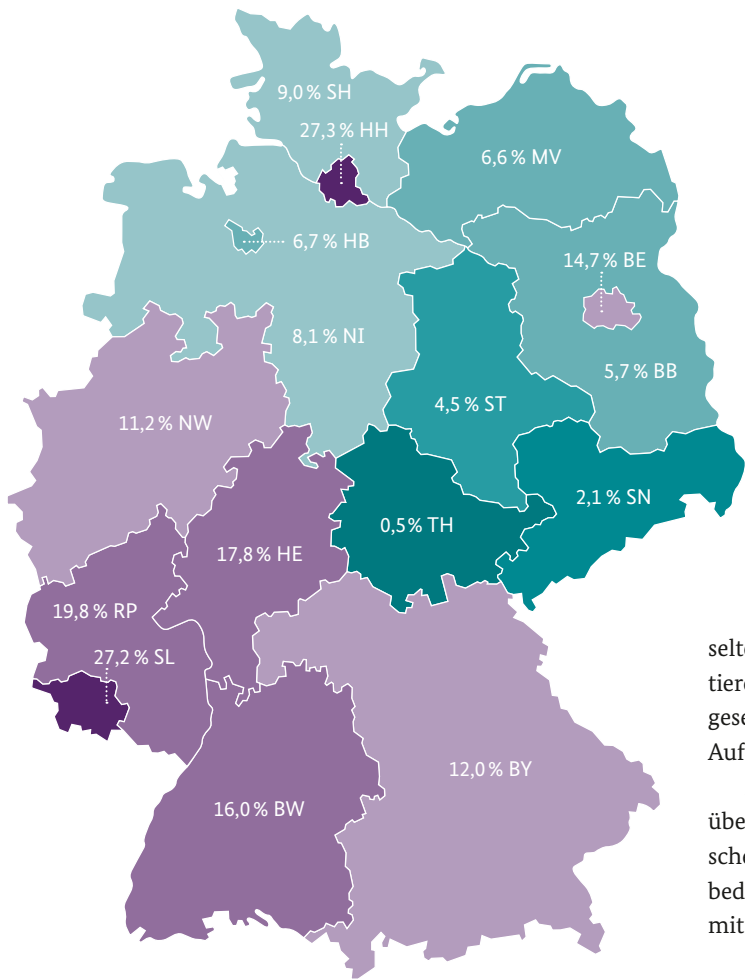


ABB 12.1 Prozentualer Anteil der Brückenflächen von Fernstraßenbrücken pro Bundesland, bei denen der Zustand als „nicht ausreichend“ bzw. „ungenügend“ bewertet wird. Datengrundlage BAST-Brückenstatistik 2020, [Zinke et al., 2021]

Ausgangssituation: Unsere alternde Infrastruktur

Unsere Infrastruktur altert! 2020 befanden sich im Netz der Bundesfernstraßen ca. 40.000 Brücken (entspricht etwa 31 Mio. m² Brückenfläche), von denen die meisten in den Jahren von 1960 bis 1985 gebaut worden sind [BMVI Modern, 2020]. Seitdem haben sich die Anforderungen an diese Brücken stark verändert: Die Tragwerke sind wesentlich höheren Verkehrslasten ausgesetzt als in ihrer Bemessung berücksichtigt – und voranschreitende Alterungsprozesse reduzieren die Widerstandsseite zusätzlich. Diese Entwicklungen haben Spuren hinterlassen, denn bei 12 % der Brückenfläche im Bundesfernstraßennetz wird der Zustand als „nicht ausreichend“ bzw. „ungenügend“ bewertet [BMVI Modern, 2020], siehe auch ABB 12.1.

Wie kann diesem Problem der alternden Bauwerksstruktur entgegengetreten werden? Welche Anforderungen gilt es neben der Einhaltung des Zuverlässigkeitsniveaus und der Sicherheit noch zu erfüllen?

Aus konstruktiver Sicht sind die Bauwerke für die aktuell normativ geregelten Einwirkungen zu bemessen und deren Widerstandsfähigkeit unter Berücksichtigung des derzeitigen (gealterten) Bauwerkszustand zu bewerten. Dafür steht den Ingenieur:innen u. a. die Nachrechnungsrichtlinie zu Verfügung, mit der sich die Standsicherheit und Restnutzungsdauer der Bauwerke beurteilen lässt [BMVBS Nachrechnung RL, 2011]. Aus der rein statischen Bewertung ist ein vollständiger Nachweis wie für Neubauten aber

selten erfolgreich und ein Ersatzneubau ist oft die (resultierende) Konsequenz. Dies bedeutet einen immensen gesellschaftlichen, finanziellen und ressourcentechnischen Aufwand.

Aus gesellschaftlicher Sicht und Verantwortung gegenüber der Umwelt ist insbesondere der ressourcentechnische Aufwand gesondert zu bewerten und sollte einen bedeutenden Stellenwert bei der Festlegung des Umgangs mit Bestandsbauwerken erhalten.

Der Bausektor – ein Treiber des Klimawandels

Die aktuelle Lage im Hinblick auf die klimatische Entwicklung ist beunruhigend. Der Klimawandel schreitet voran und das Ziel des Pariser Klimaabkommens, die Klimaerwärmung gegenüber der vorindustriellen Zeit auf 2 Grad zu begrenzen (2-Grad-Ziel) könnte bereits in den nächsten Jahrzehnten als gescheitert bezeichnet werden. Dabei ist der CO₂-Ausstoß ein maßgebender Treiber der Klimaerwärmung. Um die Klimaziele zu erreichen und den „Point of no return“, also das Auftauen der Permafrostböden und die Freisetzung des dort gespeicherten CO₂ und Methan noch abzuwenden, ist der CO₂-Ausstoß maßgeblich zu reduzieren [Curbach et al., 2021].

Dass Bauingenieur:innen hierbei einen wesentlichen Beitrag leisten können – und vor allem müssen – wird durch den Anteil der jährlichen Treibhausgasemissionen deutlich, der allein durch den Bausektor verursacht wird. 2019 konnten rund 35 % des Energiebedarfs und 38 % des CO₂-Ausstoßes dem Bausektor weltweit zugeordnet werden [UN, 2020]. Darüber hinaus erreichte das Gesamtabfallaufkommen laut statistischem Bundesamt [Destatis Abfall, 2020] 2018 den höchsten Stand seit Beginn der Erfassung 2006: Ca. 55 % des Abfallaufkommens fällt nur auf den Bausektor – Tendenz steigend. Überdies ist nach Angaben des Umweltbundesamts [UBA, 2018] der Bausektor für ca. 50 % der gesamten inländischen Rohstoffentnahme verantwortlich (siehe ABB 12.2). Diese Baumineralien umfassen größtenteils Kiese, gebrochene Natursteine, Bausande, Kalk- und Gipsstein, Anhydrit und Kreide [UBA, 2018].

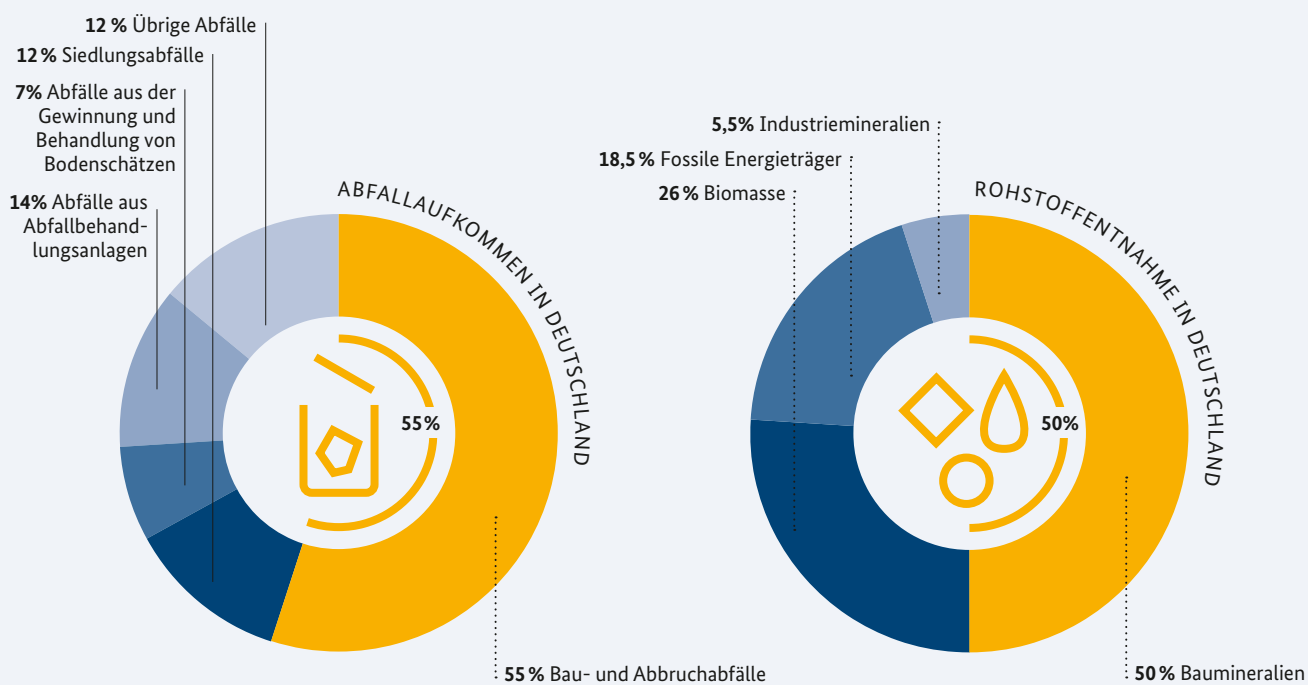
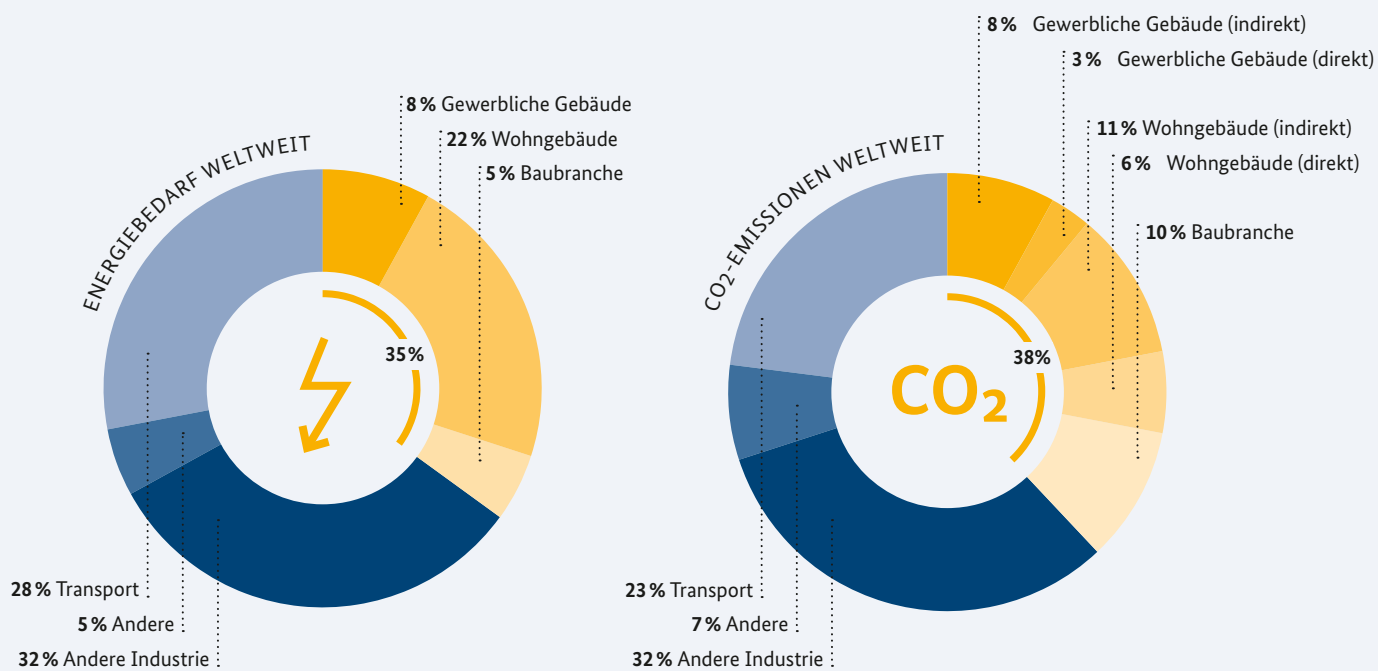


ABB 12.2 Der Fußabdruck des Bausektors in 4 Zahlen: Weltweiter Anteil an Energiebedarf und Emissionen im Bauwesen, 2019, adaptiert aus [UN, 2020]; Abfallaufkommen in Deutschland, 2019, adaptiert aus [Destatis Abfall, 2020]; Rohstoffentnahme in Deutschland, 2015 [UBA,2018]

Ein hoher Anteil dieser Emissionen aus dem Bausektor wird durch die Zementherstellung verursacht. 6–7 % der anthropogenen CO₂-Freisetzung entstehen durch die Zementherstellung [DAfStb Nachhaltig Bauen, 2021]. Davon wird etwa die Hälfte des Zementverbrauchs für den Bau von Gebäuden, die andere Hälfte auf den Bau verschiedener Infrastrukturen (Straßen, Eisenbahnen und Energieanlagen) zurückgeführt. Nach Wasser ist Beton die am meisten verbrauchte Ressource auf der Erde: Eine halbe Tonne Zement wird jährlich pro Kopf verbaut [IEA, 2020].

Folgerichtig sollte dadurch der Neubau von Betonbauwerken in den gesellschaftlichen und umweltverantwortlichen Fokus rücken. Den globalen Herausforderungen der Rohstoffknappheit, des begrenzten Deponieraums und der CO₂-Reduzierung gilt es sich als Ingenieur:in zu stellen [Koalitionsvertrag, 2021].

Materialreduzierung durch längere Nutzungs- und Lebensdauer von Bauwerken

Die Baubranche ist sich einig, dass eine neue Denkweise mit dem Umgang von Ressourcen unverzichtbar ist. Ingenieur:innen können durch innovative Lösungsansätze dazu beitragen die Baubranche ressourcenschonender aufzustellen und dadurch der gesellschaftlichen Verantwortung gerecht werden. Was im Bereich der Planung, des Bauens und des Betriebens von Gebäuden bereits durch den „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ durch das BMI vorangetrieben wird [BMI LF NB, 2019], ist im Sektor des Infrastrukturbaus in dieser Form noch nicht vorhanden.

In der längeren Nutzung vorhandener Bausubstanz liegt eines der größten Potenziale für nachhaltiges Handeln. Es liegt auf der Hand, dass die Erhaltung von Bauwerken gegenüber dem Ersatzneubau eine große Menge an CO₂ einsparen würde.

Gemäß der IEA (International Energy Agency) [IEA, 2020] lässt sich der Materialverbrauch durch eine verlängerte Nutzung von Bauwerken maßgeblich verringern. 70% des Gesamtpotenzials zur Reduzierung des Zementverbrauchs (in der Betrachtungsdauer von 2019 bis 2070) kann durch die Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer erzielt werden.

Die verschiedenen Einsparungspotenziale für den Fall des Zements sind in **ABB 12.3** zusammengefasst. Bei Stahl zeigt sich ein ähnliches Bild: Durch die längere Nutzung der Objekte können ca. 40 % des Gesamtpotenzials zur Ressourcenminimierung erzielt werden.

Ein vielversprechender Ansatz:

Die digitale Transformation des Bauwesens

Investitionen in die Pflege, Erhaltung und Instandsetzung von Bauwerken sind aus ressourcensparender, finanzieller und damit gesamtgesellschaftlicher Sicht dem Neubau vorzuziehen. Daran schließt der Koalitionsvertrag 2021 an, in dem der Erhalt und die Sanierung von Bundesfernstraßen fokussiert wird. Der dafür benötigte Etat der Erhaltungsmittel soll bis 2025 entsprechend zur Verfügung gestellt werden [Koalitionsvertrag, 2021].

Die Nachrechnungsrichtlinie stellt ein Werkzeug dar, mit dem Ingenieur:innen ein Bauwerk im Hinblick auf seine Erhaltung bewerten können. Diese rein statisch konstruktive Betrachtungsweise bildet aber nicht zwangsläufig die wahre Tragfähigkeit ab. Das Wissen über das Bauwerk ist meist lückenhaft – Bestandspläne stellen keine ausreichenden Informationen zur Verfügung und der Zustand des Bauwerks ist den Unterlagen nicht zu entnehmen. Ergebnisse aus regelmäßigen Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 oder darüber hinausgehende bauwerksdiagnostische Untersuchungen spielen für eine verlässliche Bewertung des Bestandsbauwerks eine wesentliche Rolle, finden allerdings derzeit nur bedingt Einzug in die Nachrechnung von Bestandsbauwerken [BMVBS Nachrechnung RL, 2011]. Der tatsächliche Bauwerkszustand wird in den Nachrechnungen nicht ausreichend berücksichtigt und vorhandene Tragreserven können nicht vollumfänglich erkannt werden.

Digitale Zwillinge versprechen enormes Potenzial, um die tatsächlichen Zustands- und Bestandsinformationen mit der rechnerischen Bewertung der Sicherheit in Einklang zu bringen. Durch das Monitoring des Bauwerks werden Informationen zu den tatsächlich auftretenden Einwirkungen und den Bauwerksreaktionen gesammelt. Eine Reduktion der Bestandsunsicherheiten aus Geometrie und Materialverteilung kann mit Hilfe der Diagnostik und den kontinuierlich gesammelten Bauwerksdaten erfolgen [Reiterer, 2022]. Die gigantischen Datenmengen unterschiedlicher Herkunft und Struktur können im Anschluss verknüpft werden. Geeignete Datenanalysen und Aggregationskonzepte ermöglichen durch einheitliche Indikatoren und kalibrierte Simulationsmodelle die rechnerische Bewertung von Defiziten auf Grundlage aktueller Daten aus dem Monitoring und der Diagnostik. Dies ermöglicht, das Bauwerk objektiv zu betrachten und den aktuellen Bauwerkszustand durch die Kompensation von Defiziten ständig zu beurteilen. Durch den Digitalen

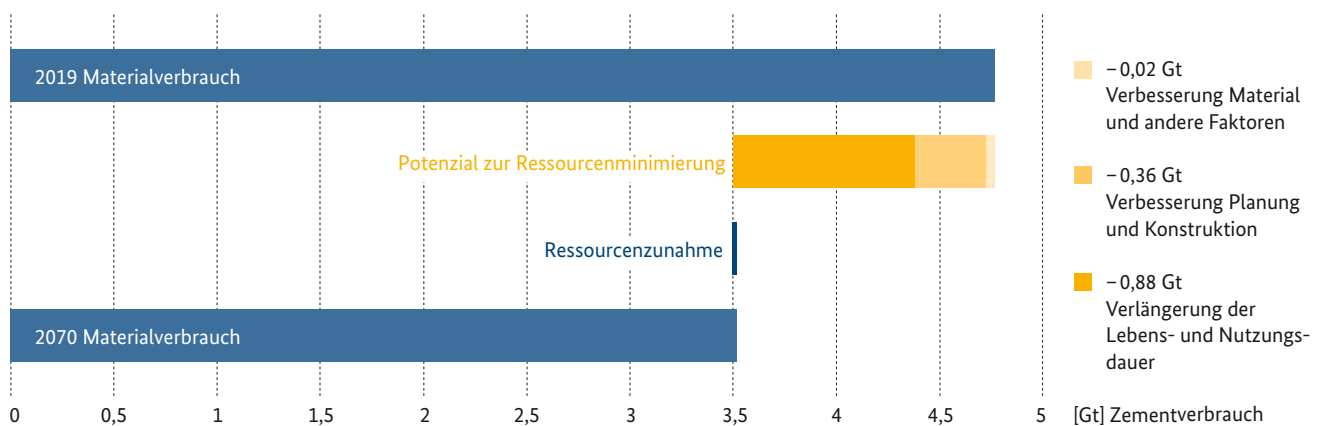


ABB 12.3 Potenzial zur Ressourcenminimierung im Bausektor. Betrachtetes Szenario 2019-2070. adaptiert aus [IEA, 2020]

Zwillinge werden so Tragreserven verfügbar gemacht, jedoch ohne die erforderliche Sicherheit einzubüßen.

Digitale Zwillinge und die entsprechenden Methoden der Digitalisierung im Bauwesen stellen ein Werkzeug dar, um Bauwerke länger zu erhalten und damit einen wesentlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit zu leisten [BMDV, 2022]. In diesem Dokument wurde der Fokus auf den Bauwerkserhalt gelegt, da darin der größte Hebel im Hinblick auf Nachhaltigkeit gesehen wird. Aber Digitale Zwillinge sind auch durch das strukturierte Vorhalten der relevanten Bauwerksdaten, u. a. Materialien, Qualitäten, Mengen, Historie, ein wesentlicher Schlüssel für ein zirkuläres Bauen – ein weiterer Aspekt der Nachhaltigkeit.

Dass diese Entwicklung des nachhaltigen Denkens und des ressourcenschonenden Bauens nicht nur von gesellschaftlich verantwortungsbewussten Ingenieur:innen abhängig ist, zeigt die aktuelle politische und gesamtgesellschaftliche Entwicklung.

Politische Entwicklung: Fördern des nachhaltigen Bauens und des Digitalen Zwillings

Mit dem European Green Deal im Jahr 2019 [Green Deal, 2019] wurde durch die Staats- und Regierungschefs der EU das Ziel einer Klimaneutralität bis 2050 vereinbart. Als gesetztes Zwischenziel gilt es bis 2030, den Ausstoß der Netto-Treibhausgase um mindestens 55 % gegenüber 1990 zu reduzieren [Europäische Kommission, 2019]. Eine Präzisierung erfolgte durch die 2021 veranlasste Änderung des Klimaschutzgesetzes (KSG) von 2019. Das geschärfte Gesetz verpflichtet die Staaten aktiv vorzubeugen, so dass es in Zukunft zu keinen unverhältnismäßigen Einschränkungen der Freiheitsgrundgesetze der heute noch jüngeren Menschen kommt. Die Zielvorgaben für den CO₂-Ausstoß

wurden angehoben, sodass Deutschland den Treibhausgas-Ausstoß bis 2030 um 65 % gegenüber den ausgestoßenen Mengen an CO₂ im Jahr 1990 zu verringern hat. Ziel ist die Klimaneutralität bis 2045. [KSG, 2021]

Als Maßnahmenpaket zur Unterstützung des Green Deals (2019) als auch des KSG (2021) dient die 2020 veröffentlichte und verabschiedete Taxonomieverordnung. Zum Erreichen der Umweltziele werden in dieser drei Leitsätze formuliert, siehe auch ABB 12.4:

- Die Wirtschaftsaktivität muss einen wesentlichen Beitrag zu mindestens einem Umweltziel leisten.
- Die Wirtschaftsaktivität verletzt oder beeinträchtigt keines der anderen Umweltziele.
- Die Wirtschaftsaktivität erfüllt bestimmte Mindestanforderungen, u. a. die internationalen Standards und Erfüllung der OECD-Leitsätze (Verhaltenskodex für Unternehmen, Menschenrechte, Soziales etc.)

Mit der Taxonomieverordnung wurden nicht nur die wesentliche Umweltziele und deren Maßnahmen formuliert, sondern gleichzeitig Bewertungskriterien geschaffen, die Bauvorhaben (abgesehen von den bisherigen Kriterien Kosten, Tragfähigkeit und Ästhetik) im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit bewerten. Die Taxonomieverordnung soll nachhaltige Investitionen erleichtern und fördern [Taxonomie, 2020].

Dazu gehört auch der Bereich der Digitalen Zwillinge. Er besitzt diesbezüglich ein erhebliches Potenzial, das wir nutzen müssen, um unsere gesellschaftlich formulierten Ziele zum Klima- und Umweltschutz erreichen zu können.

Mit Hilfe Digitaler Zwillinge können Bauwerke realistischer bewertet und der Zustand dieser kontinuierlich überwacht werden. Die Lebensdauer der Bauwerke kann verlängert und der Zeitpunkt, an dem ressourcenintensive



Investitionen getätigt werden müssen, kann maßgeblich „nach hinten“ verschoben werden. Für den Bausektor bedeutet die längere Lebensdauer von Bauwerken die Reduktion von umweltschädlichen Emissionen.

Damit bieten Digitale Zwillinge einen Mehrwert für die Baubranche: Geringere Kosten durch Erhalt, Vorantrieb des Klimaschutzes, Verringerung der Abfallproduktion und Chance für die Einhaltung der Klimaziele.


Ein Appell an die Ingenieur:innen

Es ist jetzt Aufgabe der Ingenieur:innen, anhand des durch die Politik gestellten Rahmens und der gesetzlichen Anforderungen, konkrete Lösungen zu entwickeln. Mit der Taxonomieverordnung und den daraus resultierenden Maßnahmen wird das ressourcenschonende Bauen gefördert, neue Bewertungskriterien für Bauvorhaben geschaffen und den Ingenieur:innen die Möglichkeit gegeben, durch innovative Ansätze für einen Entwicklungssprung in der Baubranche zu sorgen. Gleichzeitig sollen u. a. auch laut Koalitionsvertrag die Potenziale der Digitalisierung für mehr Nachhaltigkeit genutzt werden, weshalb durch die Bundesregierung Digitale Zwillinge als eine Maßnahme zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs gefördert werden [Koalitionsvertrag, 2021]. Politischer Rahmen, technischer Reifegrad und anerkannte Potenziale sind für die Einführung und Umsetzung von Digitalen Zwillingen als Werkzeug zum Bestandserhalt also jetzt vorhanden.

Es liegt nun in der Verantwortung der Ingenieur:innen, jegliche Möglichkeit zu nutzen, den Klimaschutz voranzutreiben und das zur Verfügung stehende innovative Know-How anzuwenden, um einen wertvollen Beitrag für unsere Gesellschaft, die Menschen und die Natur, zu leisten. Ein Digitaler Zwilling gibt ihnen die Möglichkeit dazu.

ABB 12.4 Umweltziele aus der Taxonomieverordnung, adaptiert aus [BMWK Taxonomie, 2020]





13 – *Auswirkung des Digitalen Zwillings auf Menschen, Arbeitsprozesse, Regelwerke und Richtlinien, Daten und Technologien*

Kurzfassung

Die Einführung des Digitalen Zwillings und seine Integration in das Erhaltungsmanagement wird zu einer echtzeitfähigeren und objektiveren Aussage über den visuellen und strukturellen Zustand des Bauwerks und seiner Bauteile führen. Die neue Methode des Digitalen Zwillings wird demnach eine erhebliche Auswirkung auf diverse Aspekte des bisherigen Erhaltungsmanagements sowie alle seiner Komponenten haben.

Im Dokument werden bereits in allen Kapiteln aus Sicht der Autor:innen die Auswirkungen auf unterschiedliche Bereiche beschrieben und festgehalten. In diesem Kapitel werden diese Aspekte stichpunktartig, geordnet und zusammengefasst, in fünf unterschiedlichen Bereichen dargestellt. Dem Leser soll damit abschließend nochmals konzentriert aufgezeigt werden, wo zukünftig Auswirkungen durch den Einsatz des Digitalen Zwillings zu erwarten sind.

Das Zukunftsbild des Digitalen Zwillings hat einen unmittelbaren Einfluss auf die bisher bekannte Handhabung von Bauwerken in der Betriebsphase. Insgesamt können fünf unterschiedliche Bereiche differenziert werden, die von den Auswirkungen des Digitalen Zwillings betroffen sind und damit Handlungsfelder darstellen:

- Mensch
- Arbeitsprozesse
- Regelwerke und Richtlinien
- Daten
- Technologien

Die Auswirkungen werden nachfolgend aus der heutigen Perspektive zusammengefasst.

1 – Auswirkung des Digitalen Zwillings auf Menschen

Ein Digitaler Zwilling, wie er in diesem Dokument vorgestellt wurde, ist sowohl eine Methode als auch ein Werkzeug. Er ersetzt nicht den Menschen, sondern unterstützt ihn primär in der Bewertung des Bauwerkszustands und beim Treffen von fundierten und objektiven Entscheidungen im Zuge des Erhaltungsmanagements. Der Mensch spielt eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung, aber vor allem auch bei der Nutzung des Digitalen Zwillings im ständigen Prozess der Bauwerkserhaltung. Wie sich der Digitale Zwilling auf den Menschen auswirken wird, fasst nachfolgend die Sicht der Autor:innen zusammen:

- Die Einführung des Digitalen Zwillings hat zur Folge, dass weitere Rollen und Akteure für die Entwicklung, Umsetzung und Nutzung in dem Erhaltungsprozess entstehen müssen und die Arbeit interdisziplinär wird (↗ Kapitel 4.4). Rollenprofile mit neuen Fachkompetenzen müssen durch kompetentes Fachpersonal besetzt werden. Bestehende Rollen, wie beispielsweise die des/der Bauwerksprüfer:in, ändern sich durch die neuen Werkzeuge, die Änderung der Prozesse und die Arbeit in einem sich interdisziplinär und kollaborierend entwickelnden Team.
- Durch die Änderung der Prozesse ergeben sich neue Anforderungen an die Kompetenzen und Ausbildung der Menschen. Es sind neue Spezialisierungen bei Ausbildungs- und Studiengängen notwendig, um die neuen Profile zu besetzen. Zeitgleich wird voraussichtlich das Interesse an Berufen im Erhaltungsmanagement durch den Einsatz innovativer Technologien und durch eine realitätsnahe, moderne Darstellung und Interaktion des Digitalen Zwillings geweckt.
- Weiterhin sind für die bestehenden Akteure Weiterbildungen notwendig, um den Umgang mit dem neuen Werk-

zeug und die daraus entstehenden Möglichkeiten zu lernen. Durch die automatische Aktualisierung des Zustands entstehen neue Situationen. Auch der Umgang mit automatischen Meldungen oder Warnungen, welche zu jedem beliebigen Zeitpunkt ausgelöst werden können, sowie die Interpretation von aggregierten Bauwerkszuständen muss fortlaufend in Weiterbildungen geschult werden.

- Die Einführung des Digitalen Zwillings wird ein längerer Prozess sein. Die heute handelnden und die neu dazukommenden Akteure werden in diesem Prozess beteiligt. Um die Mehrwerte des Digitalen Zwillings perspektivisch ausschöpfen zu können, ist es fundamental wichtig, eine Akzeptanz in der definierten Zielgruppe zu erreichen.
- Liegt der Digitale Zwilling vor, bietet dieser einen detaillierten und aktuellen Einblick in den Bauwerkszustand, sowie eine hochwertige Mensch-Maschine-Schnittstelle für eine intuitive Interaktion mit den großen Informationsmengen. Es entsteht ein vollständigeres Bild des Bauwerkszustands, das wiederum die Menschen in ihrer Arbeit unterstützt und zu qualifizierteren und fundierteren Aussagen befähigt. Weiterhin führt die Einbindung von Sensorik und von Robotern zu einer teilweisen Automatisierung der aktuellen Arbeiten. Bauwerksprüfer:innen erhalten dadurch weitere Werkzeuge, womit sie ihren Fokus und ihre Zeit noch mehr auf die Bewertung statt auf die Erfassung des Bauwerkszustands richten können.
- Das Anlegen von Digitalen Zwillingen für Bestandsbauwerke sowie die Anreicherung mit erhaltungsrelevanten Informationen stellen neue Aufgaben dar, die entweder durch das Personal des Erhaltungsmanagements oder durch externe Unternehmen zu lösen sind. Mit zunehmender Zeit wird der Prozess für das Anlegen durch die Entwicklung entsprechender Software/Technologie effizienter werden und die Menschen dadurch entlastet. Weiterhin werden zunehmend Synergieeffekte durch die BIM-Strategie des Bundes entstehen (vgl. [BMVI Masterplan, 2021]). Neubauten werden bereits mit der BIM-Methode geplant und können als Basis für Digitale Zwillinge weiterverwendet werden. In diesem Kontext muss ebenfalls die Finanzierung der Akteure und Prozesse durchdacht werden.

2 – Auswirkung des Digitalen Zwillings auf Arbeitsprozesse

Aktuell sind die Arbeitsprozesse bei der Bauwerkserhaltung klar definiert, ↗ Kapitel 2. Mit dem Digitalen Zwilling ergeben sich neue Möglichkeiten und Anforderungen, die zu einer Anpassung und Weiterentwicklung dieser bestehen-

den Prozesse führen müssen. Mit den komplexer werden- den Zusammenhängen im Erhaltungsmanagement von Brücken ist nicht ein linearer Prozess betroffen, sondern eine Vielzahl miteinander interagierender Prozesse. Nachfolgend sind die aus Sicht der Autor:innen größten zu erwartenden Auswirkungen auf die Arbeitsprozesse im Kontext des Digitalen Zwillings zusammengefasst:

- Zunächst muss der Prozess zur Erstellung und zum Betrieb des Digitalen Zwillings definiert werden. Im 7 Kapitel 4.4.2 wurde bereits ein Prozess entworfen, der die verschiedenen Schritte von der Grundlagenermittlung über die Konzeption, die Umsetzung, Implementierung, Konfiguration und Betrieb beinhaltet. Dieser erste Entwurf stellt eine grundsätzliche Basis dar und soll in der Entwicklungs- und Einführungsphase des Digitalen Zwillings erprobt und bei Bedarf angepasst werden.
- Das Bauwerksmonitoring kann ein zentraler Baustein des Digitalen Zwillings in höheren Reifegraden sein. Noch wird Monitoring bei Brücken i. d. R. problembezogen angewandt. Im Kontext des Digitalen Zwillings soll Monitoring für eine vorausschauende Bauwerkserhaltung eingesetzt werden. Aus dieser Zielstellung heraus ergeben sich der Bedarf nach einer geänderten Konzeption von Monitoring und ein geeigneter Prozess, um Monitoring gewinnbringend einzusetzen. Auch dazu wurde in diesem Dokument ein erster Entwurf in 7 Kapitel 8.2 erstellt, der mit zunehmender Erfahrung weiterentwickelt werden soll.
- Die Bauwerksprüfung bleibt eine wesentliche Informationsquelle zur Bewertung des Bauwerkszustands. Die dazugehörigen Arbeitsprozesse werden allerdings durch die neuen Technologien und Anforderungen angepasst werden müssen. Bauwerksprüfungen werden häufiger anlassbezogen durchgeführt, durch die detailliertere Informationsgrundlage können sie intensiver vorbereitet werden. Die Vorgehensweise bei der Erfassung von Schäden wird, bedingt durch die Entwicklung der Werkzeuge und die erforderlichen Daten, ebenfalls angepasst werden müssen.
- Derzeit sind die Arbeitsprozesse für die Beurteilung des Bauwerkszustands auf Basis der Ergebnisse der Bauwerksprüfung klar vorgegeben. Im Digitalen Zwillings erfolgt die Beurteilung auf Basis von aggregierten sowie echtzeitaktuellen Informationen. Die Entstehung, Prüfung, Umsetzung und Überwachung solcher Zustandsindikatoren sind derzeit nicht geregelt. Es gibt dafür noch keine Prozesse. Diese müssen so entwickelt werden, dass die aktuellen Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen aufrechterhalten werden können. Als Beispiel für einen fehlenden Baustein im Arbeitsprozess sei die

bautechnische Prüfung genannt. Eine Ausführungsstatik oder eine Nachrechnung unterliegt einer Prüfung durch eine/n bautechnische/n Prüfer:in. Bei der Entwicklung und beim Betrieb eines Zustandsindikators, der auch auf statischen Modellen beruht, gibt es noch keine Prüfung. Dies hat neben dem Prozess auch noch Einfluss auf die Regelwerke und damit auf die Menschen.

- Bedingt durch den Baustein des Monitorings werden sämtliche bisherigen Prozesse durch die in Echtzeit vorliegenden Daten schneller und spontaner. Zu jeder Zeit können Alarmierungen oder Warnmeldungen auftreten. Dies erfordert neue Prozesse, die beschreiben, welche Reaktionen und Handlung von welchen handelnden Personen notwendig werden. Zeitgleich haben diese Prozesse Auswirkung auf die Menschen.
- Bei Weiterentwicklung des Reifegrads von Digitalen Zwillingen werden Prognosen möglich (prädiktive Bauwerkserhaltung). Die aktuellen Prozesse des Erhaltungsmanagements sind darauf noch nicht ausgelegt, sodass sie adaptiert werden müssen.
- Ein Ziel des Digitalen Zwillings besteht in der zentralisierten Erfassung und Analyse aller zustandsrelevanten Daten. Dadurch haben alle Akteure Zugriff auf die selben Informationen. Die Arbeitsprozesse werden dadurch kollaborativer. Zeitgleich muss aber auch gewährleistet werden, dass die Daten aktuell und richtig sind sowie die erforderliche Qualität aufweisen. Aspekte der Datenpflege gewinnen an Stellenwert und erfordern ebenfalls neue Prozesse. Diese Prozesse müssen eine klare Zuständigkeit der Akteure und eine klare Zuordnung ihrer Pflichten und Rechte gewährleisten, sodass die Kollaboration möglichst reibungsfrei und strukturiert erfolgen kann.

3 – Auswirkung des Digitalen Zwillings auf Regelwerke und Richtlinien

Für das Arbeiten mit Digitalen Zwillingen im Erhaltungsmanagement des Bundesfernstraßennetzes muss im ersten Schritt eine Regelwerkslandschaft erstellt werden (Leitfäden, Modellierungsrichtlinien, Objektkataloge etc.). Aktuell gibt es keine nationalen oder internationalen Regelwerke, die einen Digitalen Zwillings im Bauingenieurwesen definieren, sodass in diesem Dokument durch die Autor:innen eine auf der Wissenschaft fundierte Definition und Aufbereitung geschaffen wurde.

Regelwerke und Richtlinien sind wichtig, um den Akteuren/Beschäftigten in der Autobahn GmbH, den Auftragsverwaltungen der Länder und den weiteren Beteilig-

ten einen verlässlichen Handlungsrahmen für die neue digitale Arbeitsweise mit Digitalen Zwillingen im Betrieb zu geben. Nachfolgend sind die aus Sicht der Autor:innen größten zu erwartenden Auswirkungen des Digitalen Zwillings auf Regelwerke und Richtlinien zusammengefasst:

- Zunächst muss ein Masterplan für den Digitalen Zwillings im Rahmen der Bundesfernstraßen erstellt werden. Der Beitrag liefert eine erste Grundlage dafür.
- Bestehende Erhaltungsregelwerke müssen auf die Integration des Digitalen Zwillings und seiner Informationen für die Bauwerkszustandsbewertung angepasst werden, damit zukünftig die Erhaltung auf Grundlage von Digitalen Zwillingen geregelt ist. Erst dann ist die Nutzung von Digitalen Zwillingen für die Erhaltung netzübergreifend möglich. In der Erweiterung der Regelwerke für sämtliche Aspekte des Digitalen Zwillings sollte stets offengehalten werden, dass eine prädiktive Erhaltung von Bauwerken auf Grundlage von Prognosen des Bauwerkszustands möglich sein kann.
- Eine Implementierung des Monitorings in die DIN 1076 zur zusätzlichen Informationsanreicherung für die Bauwerksprüfung ist vorzunehmen. Monitoring soll die Bauwerksprüfung nicht ersetzen, sondern diese ergänzen und abseits der Prüfungszeitpunkte Echtzeitinformationen über das Bauwerks liefern, damit der Bauwerkszustand zu jedem Zeitpunkt über aggregierte Zustandssindikatoren ersichtlich wird.
- In Anlehnung an die Prüfung von unterschiedlichen Planungsphasen ist auch die Prüfung der Zustandsindikatoren zu regeln. Die Entstehung, Prüfung, Umsetzung und Überwachung solcher Zustandsindikatoren muss so geregelt werden, dass dies den aktuellen Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen gerecht wird.
- Die Bauwerksprüfung in Form der Hauptprüfung ist nach DIN 1076 als handnahe Prüfung aller Bauwerksteile, auch der schwierig zugänglichen, geregelt. Durch das Einbeziehen des Digitalen Zwillings, den dort vorhandenen Informationen aus Monitoring- sowie Diagnostikdaten und auch darüber hinaus aus neuen Technologien (wie AR in der Bauwerksprüfung oder unbemannten Fahrzeugen) zur Schadenserfassung wird sich die Bauwerksprüfung nicht mehr auf ausschließlich handnahe Untersuchungen beschränken. Der Prozess der Bauwerksprüfung wird sich verändern und ist demnach in den Regelwerken ebenfalls anzupassen.
- Im Zuge der Anwendung von Digitalen Zwillingen werden Daten in einer großen Menge erhoben und von vielen Akteuren bearbeitet, analysiert und verwendet. Es entstehen neue Anforderungen an diese Daten und

an deren Behandlung. Data Governance beschäftigt sich mit den Regeln, Strukturen sowie Verantwortlichkeiten, die implementiert werden müssen, um mit den Daten grundsätzlich umgehen zu können. Weiterhin müssen die Kriterien an Datenqualität, -integrität, -qualität, -aktualität, -verfügbarkeit und -souveränität definiert werden. Diese Themen sind derzeit noch nicht geregelt, sind aber zwingend notwendig, um eine verbindliche Basis zwischen Auftraggeber:innen und Auftragnehmer:innen zu schaffen (↗ Kapitel 11.1).

- Für die beiden Bestandteile Diagnostik (↗ Kapitel 7) und Monitoring (↗ Kapitel 8) werden im Zuge des Digitalen Zwillings eigenständige Regelwerke notwendig, welche u. a. Dokumentation und Kompatibilität der erhobenen Daten für eine Anwendung im Digitalen Zwillings regeln. Weiterhin sind, im Rahmen der BIM-Modellierung, Objektkataloge für beide Fachbereiche zu definieren. Auch für das Fachmodell der Schäden ist ein Objektkatalog zu erstellen.

4 – Auswirkung des Digitalen Zwillings auf Daten

Im Rahmen der Anwendung von Digitalen Zwillingen für den Betrieb von Ingenieurbauwerken entsteht über die Lebensdauer eine Vielzahl von Daten aus unterschiedlichsten Quellen. In diesem Zusammenhang wird von Big Data gesprochen. Durch die Heterogenität der Daten werden die herkömmlichen Anforderungen aus den bisher bekannten unterschiedlichen Fachdisziplinen oder Systemen überstiegen. Das Erfassen, Speichern, Aggregieren und Darstellen der Informationen verändert sich mit dem Digitalen Zwillings und muss teils neu angegangen werden. Nachfolgend sind die aus Sicht der Autor:innen größten zu erwartenden Auswirkungen des Digitalen Zwillings auf Daten zusammengefasst:

- Die Anforderungen an die Daten erhöhen sich generell. Daten müssen eine grundlegend hohe Qualität und Nachvollziehbarkeit besitzen, damit Informationen im Digitalen Zwillings sicher und transparent dargestellt werden können und konsumierbar bleiben. Zu jedem Zeitpunkt muss ein aggregierter Zustandsindikator auf Grundlage seiner Eingangsdaten nachvollzogen werden können. Die Qualität der Daten hat einen unmittelbaren Einfluss auf Handlungsableitungen und die Aussagekraft des Digitalen Zwillings.
- Generell ist eine Homogenisierung/Standardisierung der Daten für eine Kompatibilität zwischen unterschiedlichen Objektzwillings bzw. in Systemzwillings

herzustellen. Das bildet eine der Grundlagen, um über den Objektzwilling hinaus Systemzwillinge und vernetzte Zwillinge umzusetzen.

- Auch für die Datenquellen Bauwerksmonitoring und Bauwerksdiagnostik ist im Sinne der Interoperabilität eine Standardisierung der Datenformate und des zu übergebenden Datenumfangs notwendig. Nur so kann eine Skalierung des Konzepts des Digitalen Zwillings auf eine Vielzahl von Bauwerken bei sehr unterschiedlichen Datenlieferanten erreicht werden.

5 – Auswirkung des Digitalen Zwillings auf Technologien

Der in dem Dokument beschriebene Ansatz eines Digitalen Zwillings für Brückenbauwerke ist als eine neue sich in der Entwicklungsphase befindende Methode/Technologie anzusehen. Die Einführung des Digitalen Zwillings wird zur Folge haben, dass sowohl neue Technologien für die Lösung diverser Fragestellungen entwickelt als auch bestehende Technologien um die Anwendungsfelder des Digitalen Zwillings im Betrieb erweitert bzw. weiterentwickelt werden müssen. Ein Digitaler Zwilling und alle im Zusammenhang stehenden Technologien bieten letztendlich einen Nutzen oder Mehrwert für den Betrieb von Infrastrukturbauwerken der Bundesfernstraße. Nachfolgend sind die aus Sicht der Autor:innen größten zu erwartenden Auswirkungen des Digitalen Zwillings auf Technologien im Kontext des Digitalen Zwillings zusammengefasst:

- Grundsätzlich wird der Digitale Zwilling zu einer Veränderung bestehender Technologien führen. Beispielsweise wird neue Messtechnik entwickelt werden, die dezentral eine Fehlerprüfung der Daten sowie eine direkte Aggregation mit weiteren Sensordaten zu Condition Indicators ermöglichen soll. Neue zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden für die Diagnostik werden entwickelt werden, um genauere und vielfältigere Bestandsinformationen erfassen zu können. Besonders Technologien zur georeferenzierten und automatisieren Schadenserfassung durch den/die Bauwerksprüfer:in oder auch durch unbemannte Fahrzeuge sind zu entwickeln, um die Instandhaltung effizienter, ressourcenschonender, aussagekräftiger und digitaler zu machen.
- Bestehende Technologien unterschiedlichster Art, welche in Echtzeit am Bauwerk messen, (bspw. Messtechnik, Bilderfassung mit unbemannten Fahrzeugen, Laserscan, Photogrammetrie usw.) müssen hinsichtlich ihrer Datenqualität, Kompatibilität aber auch Massentauglichkeit weiter ausgebildet werden, um ein

breites Anwendungsfeld zu schaffen und zuverlässige Daten und, darauf aufbauend, Handlungsableitungen zu liefern.

- Die Erfassung und Verarbeitung großer Datenmengen ist eine Konsequenz des Einsatzes von Digitalen Zwillingen. Das Erhaltungsmanagement von Brücken wird damit zu einem weiteren Entwicklungsfeld für die Technologien des „Internet of Things“ für die Erfassung – oder des „Machine Learnings“ für die Verarbeitung von Big Data. Weiterhin müssen Daten der Digitalen Zwillinge zentral gespeichert werden. Hierfür bedarf es einer Entwicklung eines Datenhaltungsmanagements.
- Für die Erstellung der BIM-Modelle als Basis für Digitale Zwillinge sind Methoden und Technologien zu entwickeln, die Bestandsbauwerke hinreichend genau und mit wenig Arbeitsaufwand aufnehmen sowie erstellen können, da für diese Bauwerke häufig Bestandsdokumentationen fehlen oder nur mangelhaft vorliegen bzw. nicht mehr dem tatsächlichen Bauwerk entsprechen.
- Für die Anwendung der Digitalen Zwillinge im Erhaltungsmanagement der Bundesfernstraßen ist die Entwicklung einer Schnittstelle zu *SIB-Bauwerke* oder die Entwicklung eines neuen Werkzeugs unabdingbar. Instandhaltungsrelevante Informationen und zustandsbeschreibende Daten können auf diesem Weg als „Single Source of Truth“ in den Digitalen Zwilling eingebettet werden.
- Für die freie Nutzung unterschiedlicher Akteure im Instandhaltungsmanagement muss der Digitale Zwilling von überall zugreifbar sein. Die dafür notwendige Technologie muss weiterentwickelt bzw. anwendungsfähig werden, um auch an Orten ohne Netzanbindung zuverlässig funktionieren zu können (Offline-Modus).
- Insbesondere AR wird als eine Kerntechnologie große Anwendungsmöglichkeiten bei Digitalen Zwillingen finden und muss an die Umgebungen und Randbedingungen von Brückenbauwerken angepasst und weiterentwickelt werden. Schlecht beleuchtete Bauteile, wenig Netzempfang sowie kein GPS-Empfang sind Beispiele für Herausforderungen der AR-Technologie. Die Potenziale von AR im Kontext von Brückenerhaltung bringen einen großen Nutzen bei den bestehenden sowie den entstehenden Arbeitsprozessen und ermöglichen eine optimale Vernetzung der verschiedenen Informationen an den beobachteten Bereichen.



14 – Fazit und Ausblick

Kontext und Ziel des Dokumentes

Die Digitalisierung im Bauwesen hat in den letzten Jahren vielfältige Facetten angenommen:

- die BIM-Methodik wird immer konsequenter in der Phase der Planung und Ausführung von Bauwerken eingesetzt
- Mobile Mapping Lösungen ermöglichen eine immer schnellere, detailliertere und präzisere Erfassung und Abbildung der Geometrie und Oberflächen von Bauwerken
- immer häufiger ermöglichen Sensoren die Erfassung der Veränderung von Bauwerksreaktionen und Einwirkungen über die Zeit
- Zerstörungsfreie Prüfverfahren ermöglichen einen immer detaillierteren Blick in die Struktur und Beschreibung des Verborgenen
- Fortentwicklungen von Methoden (z. B. Künstliche Intelligenz) sowie von Software ermöglichen die Bearbeitung großer Datenmengen und die Automatisierung von Prozessen, sodass aus Daten mehr und qualitativ hochwertigere Informationen bezogen werden können
- AR und VR ermöglichen eine neue Form der Interaktion mit den digitalisierten Informationen

Diese Technologien und Entwicklungen stellen lediglich eine Auswahl dar, zeigen aber: Das digitale Abbild von Bauwerken bildet die Realität stetig besser ab.

Im Kontext der digitalen Transformation im Bauwesen etabliert sich gerade der Begriff des Digitalen Zwillinges. Mit dem vorliegenden Beitrag wird ein gemeinsames Verständnis des Digitalen Zwillinges von Brücken im Bundesfernstraßennetz geschaffen. Reifegrade, Bausteine und Anforderungen für die Umsetzung erster Digitaler Zwillinge werden vorgestellt, um eine Basis für Standards und Weiterentwicklungen zu schaffen. Zudem soll dieses Dokument als Grundlage für die im *Masterplan BIM Bundesfernstraßen* vorgestellten BIM-Testfelder Digitaler Zwilling dienen [BMVI Masterplan, 2021].

Das den Beitrag ergänzende [7 Reallabor](#) zeigt am konkreten Beispiel der Köhlbrandbrücke, wie ein Digitaler

Zwilling im Reifegrad 2 aussehen kann und welche Vorteile er bietet. Sowohl Beitrag als auch Reallabor sind als eine aktuelle Darstellung von Digitalen Zwillingen für das Gebiet der Brücken im Bundesfernstraßennetz zu verstehen. Diese Darstellung trägt nicht den Charakter eines Regelwerks, hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit und wird sich mit den Erfahrungen und technologischen Möglichkeiten der nächsten Jahre weiterentwickeln. Dieser Prozess soll 2025 in einem *Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen* Eingang finden, der den Rahmen für die grundsätzliche Umsetzung des Zukunftsbildes darstellen wird.

Definition und Einbettung im Erhaltungsmanagement

In der allgemeinen Definition ist ein Digitaler Zwilling ein digitales Abbild eines physischen Systems, wobei beide bestenfalls über den gesamten Lebenszyklus durch einen automatischen Daten- und Informationsaustausch in Echtzeit verknüpft sind. Je nach Funktionalität und Aufwand kann der Reifegrad und damit die Fähigkeiten eines Digitalen Zwillinges sehr unterschiedlich ausfallen ([7 Kapitel 3](#)). Die heutigen Aktivitäten im Bundesfernstraßennetz lassen sich in die Reifegrade 1 („Deskriptiv“) und 2 („Informativ“) einsortieren, wobei der Reifegrad 2 im Fokus dieses Beitrags steht. Ein Digitaler Zwilling ermöglicht in diesem Reifegrad die Darstellung des Bauwerkszustandes unter Einbeziehung aggregierter aktueller Sensordaten. Schon dieser Reifegrad ermöglicht für Brücken in Kombination mit einer geeigneten Visualisierung einen vollständigeren und aktuelleren Zustandsüberblick. Die Verwendung von Digitalen Zwillingen des Reifegrads 2 erlaubt eine Verbesserung der aktuell bewährten Methode nach DIN 1076 und RI-EBW-PRÜF. Doch auch im Reifegrad 2 bleibt die Erhaltung von Bauwerken reaktiv. Erst ab Reifegrad 3 werden Digitale Zwillinge stufenweise „prädiktiv“ und „präskriptiv“. Funktionen zur Vorhersage von künftigen Zuständen bis hin zur Erarbeitung von Handlungsvorschlägen werden dabei implementiert. So können fundierte Entscheidungen im Hinblick auf eine wirtschaftliche Erhaltung getroffen werden:

Umfang und Zeitpunkt von Instandsetzungsmaßnahmen können optimiert, die Nutzungsdauer des Bauwerks kann verlängert und seine Verfügbarkeit erhöht werden. Werden Digitale Zwillinge dieser hohen Reifegrade von Bauwerken eines Verkehrsnetzes gekoppelt und mit intermodalen Verkehrsdaten verknüpft, können komplette Verkehrsnetze abgebildet und optimal betrieben, gesteuert und erhalten werden. Das Erreichen dieses Idealzustands setzt allerdings weitreichende Entwicklungen voraus, und muss in Zukunft aus wirtschaftlichen Gründen auf wichtige Verkehrskorridore fokussiert werden. Zudem müssen nicht alle Bauwerke gleichbehandelt werden. Perspektivisch soll jede Brücke im Bundesfernstraßennetz einen Digitalen Zwilling erhalten. Ein messtechnisches Monitoring (Reifegrad 2 und höher) kann auf besonders exponierte Brücken oder solche mit schlechtem Zustand, schlechtem Traglastindex oder schlechter Inspizierbarkeit begrenzt werden. Bei anderen Bauwerken ist ein Digitaler Zwilling des Reifegrads 1 („Deskriptiv“) i. d. R. ausreichend sein und soll flächendeckend realisiert werden.

Bei Neubauten sollte grundlegend mit Entstehung des Bauwerks ein Digitaler Zwilling des Reifegrads 1 zur virtuellen Nachbildung des Objektes erstellt werden. Bereits in der Planungsphase ist im Hinblick auf mögliche Degradationsprozesse zu definieren, welche Informationen von Anfang an im Digitalen Zwilling aufgenommen werden. Es sollte auch untersucht werden, ob bereits beim Bau Sensoren vorsorglich in die Tragstruktur integriert werden können, sodass über die Lebensdauer des Bauwerks der Reifegrad stufenweise erhöht werden kann.

Aufbau des Digitalen Zwillings und konkrete Unterstützung im Erhaltungsmanagement

Der Digitale Zwilling in diesem Beitrag fokussiert sich auf die Phase des Betriebs der Brücken und soll eingesetzt werden, um eine zentrale, möglichst vollständige und objektive Informationsbasis zum Zustand der abgebildeten Bauwerke zu erhalten. Dafür wurde im Dokument eine klare Struktur für den Aufbau des Digitalen Zwillings erarbeitet ([↗ Kapitel 4](#)):

→ Das BIM-Modell bildet als 3D-Modell die Ausgangsbasis für die Navigation in der Visualisierung und vernetzt die verschiedenen Datenquellen, indem diese im Modell geometrisch verortet werden. Es bildet die Bauwerks-

taxonomie ab, welche für die Datenverarbeitung und -aggregation benötigt wird. Das As-Built-Modell stellt selbst eine wichtige Datenquelle dar und beinhaltet viele Informationen aus der Bauphase. Die BIM-Methode, die aktuell stark in den Phasen der Planung und Ausführung fokussiert wird, erhält im Digitalen Zwilling weitere Anwendungsfälle in der Betriebsphase – so kommen wir dem Ziel einer Durchgängigkeit der BIM-Methode über den kompletten Lebenszyklus von Bauwerken näher.

- Die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 ist eine fundamentale und zwingend erforderliche Datenquelle. Die Aufnahme im Digitalen Zwilling führt vorerst zu keinen zusätzlichen Informationen, der Mehrwert entsteht allerdings durch die Verknüpfung der Prüfungsergebnisse mit anderen Datenquellen (Monitoring und Bauwerksdiagnostik), zudem durch die konsequente Verortung und Visualisierung im Raum. Die aktuellen Prozesse der Bauwerksprüfung sind allerdings noch nicht kompatibel mit Digitalen Zwillingen. Erst durch konsequente Digitalisierung der Erfassung und Dokumentation des Zustands sowie eine georeferenzierte Verortung kann der Prozess der Bauwerksprüfung optimiert werden – und der o.g. Mehrwert entsteht.
- Die Bauwerksdiagnostik ergänzt die Bauwerksprüfung, erfolgt aber im Gegensatz zu letzterer anlassbezogen und verfolgt eine spezifische Zielstellung. Sie geht über den visuell erkennbaren Eindruck der Bauwerksoberfläche hinaus und ermöglicht durch zerstörungsfreie bzw. -arme Untersuchungsmethoden die Erfassung von Detailinformationen aus dem Bauwerksinneren. Die Ergebnisse dienen als Eingangsgrößen für rechnerische Bewertungen und Instandsetzungsplanungen oder liefern direkte Bestands- und Zustandsinformationen zu bestimmten Bauteilen. Sie sind damit in Verknüpfung mit anderen Datenquellen ein wichtiger Baustein des Digitalen Zwillings. Durch Integration der Bauwerksprüfung und der Bauwerksdiagnostik (Zustandsinformationen) im BIM-Modell entsteht ein Digitaler Zwilling im Reifegrad 1.
- Das Bauwerksmonitoring ermöglicht die kontinuierliche messtechnische Überwachung und stellt damit die dynamische Verbindung zwischen Brücke und

digitalem Abbild dar. Das Monitoring ist für Digitale Zwillinge ab Reifegrad 2 ein fundamentaler Bestandteil, um Einwirkungen und Bauwerksreaktionen ständig zu überwachen, sodass Modelle zur Beschreibung des Bauwerksverhaltens verbessert und zu Simulations- und Prognosezwecken genutzt werden können. Eine kontinuierliche Überwachung zur Einbindung der Messergebnisse in die Bewertung des Bauwerkszustands bedarf bei der Konzeption und Definition der zu überwachenden Bereiche eines methodischen Vorgehens. Basierend auf den bisherigen Erfahrungen wird im Dokument eine Vorgehensweise in fünf aufeinanderfolgenden Schritten vorgestellt, die für jede Brücke angewendet werden kann.

All diese Daten werden an einer zentralen Stelle zusammengeführt. Es entsteht eine Single Source Of Truth, die das Bauwerk bestenfalls über den kompletten Lebenszyklus begleitet, seine Historie beschreibt und ständig angereichert wird. Die Informationen sind für alle Beteiligten eindeutig dokumentiert. Diese Daten stellen die Basis für die Erhaltung, für Nachrechnungen oder für künftige Planungen bis hin zur Rückbauplanung dar.

Ein Digitaler Zwilling ist aber deutlich mehr als nur eine digitale Bauwerksakte. Der Mehrwert resultiert aus der strukturierten Verknüpfung dieser heterogenen Daten und insbesondere bei Reifegrade höher 2 aus der Analyse und Aggregation dieser Daten zu Zustandsinformationen. Dies gilt insbesondere für Sensordaten aus dem Bauwerksmonitoring. Es ist Ingenieur:innen-Knowhow aus den Fachdisziplinen des Bauwesens, der Informatik und der Data-Science erforderlich, um die Daten zu analysieren, zu kontextualisieren und zu bewerten. So können Informationen zum Bauwerkszustand automatisch ermittelt und Prognosen durchgeführt werden. Konkret können dadurch kritische Situationen mit schwerwiegenden Schadensfolgen vermieden, Erhaltungsmaßnahmen bzgl. Umfang und Zeitpunkt optimiert, Erhaltungskosten und Verkehrseinschränkungen reduziert und bestenfalls die Nutzungsdauer verlängert werden.

Bei steigender Komplexität und vergrößertem Umfang der Informationen gewinnt auch die Interaktion

mit den Daten und Informationen an Wert. Erst mit einer geeigneten Nutzer:innen-Schnittstelle können die Informationen in strukturierter Weise bereitgestellt und erlebbar zugänglich gemacht werden.

Digitale Zwillinge werden das Erhaltungsmanagement von Brücken grundlegend verändern. Für die Konzeption, Initialisierung und den Betrieb von Digitalen Zwillingen sind ein interdisziplinär aufgestelltes Team und neue Akteure erforderlich. Aktuelle Prozesse und Aufgaben müssen weiterentwickelt oder neu gedacht werden, um die neuen Anforderungen zu berücksichtigen und die Möglichkeiten zu nutzen.

Diese Veränderungen erfordern unmittelbar eine angepasste Regelwerkslandschaft, um einen verlässlichen Handlungsrahmen für die neue Arbeitsweise mit Digitalen Zwillingen zu geben.

Ausblick

Digitale Zwillinge sind langfristig alternativlos, um die Herausforderungen der Bauwerkserhaltung im Bundesfernstraßennetz zu meistern, aber auch, um die steigenden Datenmengen und -komplexitäten zu beherrschen. Neben der Zusammenstellung heutiger Möglichkeiten wurden in diesem Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen auch viele Fragen und Potenziale identifiziert.

Diese Felder sollen in den nächsten Jahren durch Forschungsarbeiten untersucht werden, um Methoden, Technologien und Prozesse weiterzuentwickeln und der Vision von Digitalen Zwillingen Schritt für Schritt näher zu kommen. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wird die praktische Erprobung an Demonstrator-Bauwerken sein. Das ist Ziel der im *Masterplan BIM Bundesfernstraßen* vorgestellten BIM-Testfelder Digitaler Zwilling [BMVI Masterplan, 2021].

Glossar | Abkürzungen

Digitaler Zwilling ist ein Zukunftsbild, das sich in Entwicklung befindet und erste Definitionen erfährt. Das Thema besitzt viele Schnittstellen zu bereits bestehenden Bereichen und Methoden. Um im Kontext dieses Dokumentes eine klare sprachliche Regelung treffen zu können, finden Sie folgend ein Glossar mit den wichtigsten Begriffen und Abkürzungen. Dieses Glossar richtet sich nach den vorhandenen veröffentlichten Dokumenten ([*BIM4INFRA*, 2019], [*Borrmann et al*, 2021] [*BMVI Masterplan*, 2021]), nimmt aber bereichsweise Anpassungen im Kontext des Digitalen Zwillings vor. Für weitere Begrifflichkeiten im BIM-Kontext wird auf die zuvor genannten Dokumente verwiesen.

Aggregation: Im Zusammenhang mit Daten bezeichnet die Aggregation den Prozess der Verdichtung von Daten. Große Datenmengen werden zu geringeren, verdichteten und informationsreicheren Datenmengen verarbeitet.

AIA: Auftraggeber-Informationen-Anforderungen umfassen alle BIM-spezifischen Festlegungen, die ein/e Bauherr:in von den Auftragnehmenden einfordert.

Anthropogen: Alles durch Menschen Beeinflusste, Entstandene, Hergestellte oder Verursachte.

Anwendungsfall (AWF): Anwendung der BIM-Methode für eine spezielle Leistungserbringung im Projekt.

„As-Built“-Modell: BIM-Modell zur Baudokumentation der abgeschlossenen Baumaßnahme. Dabei werden die BIM-Modelle an das tatsächlich gebaute Bauwerk angepasst. Es gibt den Ist-Zustand bis zum gewählten Detaillierungsgrad in Gänze wieder. [*BIM4INFRA*, 2019]
Synonym: „wie-gebaut“

„As-Designed“-Modell: Digitales Modell eines Bauwerks (BIM), welches, im Gegensatz zum As-Built-Modell, den Soll-Zustand des Bauwerks abbildet und dokumentiert.
Synonym: „As-Planned“ „Wie-Geplant“

„As-Maintained“-Modell: Im Laufe der Nutzungszeit des Bauwerks ändert sich sein Zustand (z. B. Auftreten von Schäden), entstehen neue Erkenntnisse (z. B. Durchführen von Materialprüfungen) oder der Bestand wird angepasst (z. B. Durchführung von Sanierungs- oder Verstärkungsmaßnahmen). Das „As-Maintained“-Modell stellt die Weiterführung des As-Built-Modells mit den über die Nutzungszeit auftretenden Änderungen dar.
Synonym: „wie-instandgehalten“ und „Betriebsmodell“

Asset: „Element, Sache oder Entität, das bzw. die für eine Organisation einen potenziellen oder tatsächlichen

Wert besitzt“ [*DIN EN ISO 19650-1*, 2018]. Dieser englische Begriff wird innerhalb dieses Dokumentes im Sinne eines baulichen Vermögensgegenstandes bzw. eines Bauwerks oder einer Brücke verwendet.

Attribut: Datenelement für die rechnerinterpretierbare Beschreibung eines Merkmals, einer Merkmalsgruppe. Ein Attribut beschreibt lediglich ein einziges Detail eines Merkmals oder einer Merkmalsgruppe. [*DIN EN ISO 23386*, 2020]

Attribuierung: Bei der Attribuierung werden Modellelemente eines 3D-Modells mit erforderlichen Merkmalen (Eigenschaften) angereichert.

Augmented Reality (AR): Computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung. Wobei der Blick auf die reale Umgebung mit virtuellen Einblendungen ergänzt bzw. überlappt werden; deutsch: erweiterte Realität.

Bauwerkserhaltung / Erhaltung: Die Bauwerkserhaltung umfasst alle Maßnahmen der betrieblichen und baulichen Unterhaltung, der Instandsetzung und der Modernisierung (Verstärkung, Bauwerkserneuerung) an Ingenieurbauwerken. Bei diesen Maßnahmen wird von Erhaltungsmaßnahmen gesprochen. [*Jackmuth et al.*, 2022]

Bauwerkserneuerung: Die Bauwerkserneuerung beinhaltet sowohl bauliche Maßnahmen der Teilerneuerung als auch vollständige Ersatzneubauten.

Die Teilerneuerung steht hierbei für die Erneuerung einzelner (z. B. eines Überbaus) oder mehrerer Bauteilgruppen (z. B. leistungsfähigere Schutzeinrichtungen gemeinsam mit Kappen). Da diese Maßnahmen zu einer wesentlichen Verbesserung gegenüber dem Ursprungsentwurf führen, ist dies mit einer Gebrauchswerthöhung verbunden. [*Jackmuth et al.*, 2022]

Bauwerksprüfung: Eine nach DIN 1076 sachkundige und regelmäßige Prüfung eines Ingenieurbauwerks zur Erfassung des aktuellen Zustands unter den Kriterien der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit. [*DIN 1076*, 1999]

Bestand: Mit der Erbauung definierte Bauwerks-/ Bauteil-/ Materialeigenschaft.

Betrieb und Unterhaltung: Nach Fertigstellung eines Bauwerks wird es in die Phase des Betriebs und der Unterhaltung überführt. [*BIM4INFRA*, 2019]; Synonym: Nutzung

Building Information Modeling (BIM): BIM bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethodik, bei der auf Basis digitaler Bauwerksmodelle die für ihren gesamten Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst,

verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden. Die hier vorliegende Definition des Begriffes BIM wird maßgebend vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) angewandt und ist Bestandteil des Masterplans [BMVI Masterplan, 2021]

BIM-Modell: Digitales Bauwerksmodell gemäß BIM-Masterplan bzw. digitales Bauwerksinformationsmodell gemäß [DIN EN ISO 19650-1, 2018]

Ein- oder mehrdimensionales Modell, welches mit zusätzlichen Daten angereichert ist. Unter dem Begriff „Daten“ werden z. B. zusätzliche Bauteil-, Zeit- und Kosteninformationen verstanden. Der Begriff BIM-Modell wird als Synonym für Fach-, Koordinations-, Teil- oder Gesamtmodell verwendet.

BIM-Testfeld Digitaler Zwilling (BIM-TDZ): Ein BIM-TDZ ist ein Digitaler Zwilling einer physischen Bestandsinfrastruktur auf Bundesfernstraßen mit einer angemessenen Betriebslänge und Komplexität, um ein breites Spektrum von Anwendungsfällen und innovativen Technologien zu pilotieren, siehe Kapitel 6.4 des Masterplans [BMVI Masterplan, 2021]

CSV: Das Dateiformat CSV steht für englisch Comma-separated values und beschreibt den Aufbau einer Textdatei zur Speicherung oder zum Austausch einfach strukturierter Daten. CSV-Dateien sind Textdateien, die sowohl von Menschen als auch von Maschinen lesbar sind.

Dashboard: Im Kontext des Informationsmanagements bezeichnet ein Dashboard eine grafische Benutzeroberfläche zur Visualisierung von Daten

Diagnostik/Bauwerksdiagnostik: Im Sinne des Dokumentes bezeichnet Diagnostik die anlassbezogene ingenieurtechnische Beurteilung eines Bauwerkes mit Hilfe spezifischer Bestands- und Zustandsuntersuchungen im Laufe der Nutzungsphase, welche in der Tiefe über eine Bauwerksprüfung nach DIN 1076 hinausgehen.

Digitaler Zwilling (wissenschaftlich): Ein Digitaler Zwilling ist eine virtuelle dynamische Abbildung eines physischen Systems, die damit über seine Lebensdauer durch einen bidirektionalen, automatischen Datenaustausch verbunden ist. Hinsichtlich seiner Konnektivität unterscheidet sich ein Digitaler Zwilling von einem Digitalen Abbild und einem Digitalen Schatten. Die Fähigkeiten eines Digitalen Zwillings werden über seinen Reifegrad beschrieben. Unter dem Digitalen Zwilling wird im Rahmen dieses Dokumentes sowohl die Methode als auch das Werkzeug verstanden; englisch: Digital Twin.

Digitaler Zwilling (im Rahmen des Dokumentes): Im Rahmen des Dokumentes wird keine Unterscheidung zwischen einem Digitalen Modell, einem Digitalen Schatten und einem Digitalen Zwilling gemacht. Der Begriff „Digitaler Zwilling“ umschließt in diesem Beitrag alle drei Begriffe und die Fähigkeit wird lediglich über den Reifegrad unterschieden.

Drilldown: Unter Drilldown wird die Navigation in hierarchischen Daten verstanden und das schrittweise „Hineinzoomen“ in immer detailliertere Daten.

Echtzeit: Ein Digitaler Zwilling in hohen Reifegraden hat den Anspruch, den Bauwerkszustand in Echtzeit zu berechnen. Der Begriff Echtzeit ist in dem jeweiligen Kontext zu definieren und richtet sich im Wesentlichen nach den Anforderungen an die tolerablen Latenzen zwischen der Erfassung und die Bereitstellung einer Information. Echtzeit bedeutet nicht unbedingt „ohne Verzug“, sondern vielmehr „rechtzeitig“ im jeweiligen Kontext. Diese Definition ist vereinbar mit der in [ISO/IEC 2382, 2015]. Im Englischen wird unterschieden zwischen „Realtime“ und „Right Time“. Im Rahmen des Dokumentes wird der Begriff Echtzeit mit dem Begriff „Right Time“ in Verbindung gebracht.

Erhaltungsmanagement: Für Bauwerke im Bundesfernstraßennetz umfasst der Begriff Erhaltungsmanagement alle Handlungen und Maßnahmen der Bestandserfassung (inkl. Bauwerksprüfung, Zustandserfassung und -bewertung) sowie der Planung, der Verwaltung und der Ausführung von Maßnahmen, die dem Erhalt eines Bauwerkes über den gesamten Lebenszyklus dienen [BMVI RPE-ING, 2020]

ERP-System: Ein ERP-System (Enterprise-Resource-Planning) ist eine Software zur Planung, Steuerung und Unterstützung der Geschäftsprozesse und wird somit zur Ressourcenplanung eingesetzt.

Frontend: Unter Frontend wird die grafische Benutzeroberfläche verstanden.

Inspektion: Fachübergreifender Begriff für regelmäßige Überprüfung von Anlagen hinsichtlich ihres ordnungsgemäßen, funktionierenden und sicheren Ist-Zustands. Im Kontext von Brückenbauwerken wird der Begriff „Bauwerksprüfung“ gleichbedeutend mit „Inspektion“ verwendet.

Instandhaltung: Der Begriff zur Beschreibung und Einteilung der Instandhaltung ist in Deutschland nicht einheitlich geregelt, alle Ansätze haben aber gemeinsam, dass sie Maßnahmen zum Erhalt von Bauwerken und Bauteilen während ihrer Nutzungsdauer definieren. Hier wird die DIN 31051 (2019) zu Grunde gelegt, nach der Instandhaltung definiert ist als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.“ Die Instandhaltung kann in die Einzelmaßnahmen der Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung unterteilt werden. [Zinke, 2016] Im Kontext dieses Dokumentes wird der Begriff „Instandhaltung“ gleichbedeutend zu „Erhaltung“ bzw. „Bauwerkserhaltung“ verwendet.

Instandsetzung: Unter Instandsetzung wird die Summe der baulichen Maßnahmen größeren Umfangs verstanden, die der Wiederherstellung des planmäßigen Zustands eines Bauwerks oder seiner Bauteile dienen. Die Instandsetzung

stellt somit (im Vergleich zur Bauwerkserneuerung oder -verstärkung) keine Gebrauchswerterhöhung dar. [Jackmuth et al., 2022]

Internet of Things: Das Internet of Things (IoT) verbindet physische Objekte mit der virtuellen Welt. Sensoren und Maschinen sind dabei miteinander und mit dem Internet vernetzt und ermöglichen die Interaktion mit dem Menschen; deutsch: Internet der Dinge.

Interoperabilität: Fähigkeit unterschiedlicher Systeme, möglichst nahtlos zusammenzuarbeiten.

Linked-Data: Strukturiert miteinander verbundene Informationsressourcen, die über Netzwerke und offene Standards verknüpft, geteilt und abgefragt werden können. Die Wiederverwendung gemeinsamer Datenformate, Sprach- und Wortschätze sowie Semantik fördert die Interoperabilität zwischen heterogenen Informationssystemen. [Borrmann et al, 2021]

Mangel: Ein Mangel im Sinne der Bauwerksprüfung ist die Abweichung der Bauwerks- oder Bauteilbildung vom planmäßigen Sollzustand oder von den zum Prüfzeitpunkt geltenden Regelwerken. Er kann eine Beeinträchtigung der Standsicherheit, der Verkehrssicherheit und/oder der Dauerhaftigkeit darstellen. [BMVI RI-EBW-PRÜF, 2017] Siehe auch Unterschied zu Begriff *Schaden*

Mapping: Im Kontext der Visualisierung (↗ Kapitel 10) bezeichnet das Mapping das Aufeinanderabbilden von Datenelementen aus zwei verschiedenen Datenmodellen.

Merkmal: Inhärente oder erworbene Eigenschaft eines Datenelements. [DIN EN ISO 23386,2020]

Alphanumerische Eigenschaft eines Modellelements, Merkmale werden mit Attributen (z. B. Name, Datentyp, Einheit, Werte etc.) beschrieben. Oft werden Merkmale nach DIN 23386 auch als Attribut bezeichnet.

Modernisierung: Die Modernisierung von Ingenieurbauwerken umfasst die Verstärkung von Bauwerken und die Bauwerkserneuerung. [Jackmuth et al., 2022]

Monitoring: Im Sinne des Dokumentes ist Monitoring die sensorbasierte bzw. messtechnische Überwachung eines Objekts, siehe auch Definition in [DBV Monitoring, 2018].

Prädiktiv: Vorausschauend, vorhersagbar

Reallabor: Im Kontext des hier beschriebenen „Digitalen Zwilling von Brücken“ ergänzen sich Reallabor und Beitrag. Das Reallabor wird als Testraum für Innovation verstanden und ermöglicht es, das neue Konzept an einem Beispiel zu erproben. Kernelement des Reallabors ist die Softwareplattform *smartBRIDGE Hamburg*, in der der Digitale Zwilling der Köhlbrandbrücke und verschiedene implementierte Anwendungsfälle als Demonstrationsumgebung erprobt werden können.

Schaden: Ein Schaden im Sinne der Bauwerksprüfung ist die Veränderung des Bauwerks- oder Bauteilzustands und kann zu einer Beeinträchtigung der Standsicherheit, der Verkehrssicherheit und/oder der Dauerhaftigkeit führen. [BMVI RI-EBW-PRÜF, 2017] Siehe auch Unterschied zu Begriff *Mangel*

Taxonomie: Der Begriff der Taxonomie wird im Kontext dieses Dokumentes für eine hierarchische Klassifikation verwendet. Die Taxonomie nach ASB-ING entspricht der Hierarchisierung eines Bauwerks in verschiedene Klassen: Bauwerk, Teilbauwerk, Bauteilgruppe.

Verstärkung: Die Verstärkung umfasst bauliche Maßnahmen, die eine Tragfähigkeitsverbesserung über die Ursprungtragfähigkeit hinaus beinhalten. Verstärkungsmaßnahmen werden i. d. R. in Verbindung mit der Erneuerung oder Ergänzung einzelner oder mehrerer Bauteile oder Bauteilgruppen durchgeführt und stellen insofern eine Gebrauchswerterhöhung dar. [Jackmuth et al 2022]

Virtual Reality (VR): Als Virtual Reality wird die Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung der Wirklichkeit und ihrer physikalischen Eigenschaften in einer in Echtzeit computergenerierten, interaktiven virtuellen Umgebung bezeichnet. [BIM4INFRA, 2019]; deutsch: Virtuelle Realität

Wirtschaft 4.0: Als Wirtschaft 4.0 wird die digitale Transformation der gesamten Wertschöpfungskette und des gesamten Lebenszyklus eines Produkts verstanden.

Zustand: Bauwerks-/Bauteil-/Materialeigenschaft zu einem Zeitpunkt t, die sich über den Lebenszyklus dynamisch verändert, bspw. der Korrosionszustand oder der Abnutzungsgrad.

Abkürzungen

AR	Augmented Reality
AwF	Anwendungsfall (in BIM-Kontext)
ASB-ING	Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten, Teilsystem Bauwerksdaten
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
DZ	Digitaler Zwilling
ERP	Enterprise Resource Planning
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
IOPs	Input/Output Operation per second
IoT	Internet of Things deutsch: Internet der Dinge
LPI-ING	Leitfaden zur Prüfung von Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken
MMS	Mensch-Maschine -Schnittstelle englisch: HMI: Human-Machine-Interface
OKSTRA	Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen
OSA	Objektspezifische Schadensanalyse [BMVBS OSA, 2007]
UI	User Interface deutsch: Benutzerschnittstelle
UX	User eXperience deutsch: Benutzererlebnis
VR	Virtual Reality

Literaturverzeichnis

[ARUP, 2019] ARUP: Digital Twin – Toward a meaningful framework. London, November 2019.

[Assing et al., 2020] Assing, M.; Burkhardt, R.; Hahn, O.; Hoffmann-Berling, F.; Kappes, K.; Karrasch, A.; Krontal, L.; Marx, S.; Müller, C.; Strube, K.; Weitendorf, N.: Arbeitshilfe zum Umgang mit historischen Eisenbahnbrücken, Herausgebende: DB Netz AG, Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege, MKP GmbH, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Januar 2020. www.marxkrontal.com/files/redaktion/leistung/Veroeffentlichungen/20200131_Arbeitshilfe_zum_Umgang_mit_Eisenbahnbruecken.pdf

[Bahlau et al., 2021] Bahlau, S.; Hill, M.; Klein, F.; Kukushkin, A.; Oppermann, L.; Riedlinger, U.: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt 15.0666 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Abschlussbericht zu 15.0666. 2021. Veröffentlichung in Vorbereitung.

[Bast, 2021] Bundesanstalt für Straßenwesen: Brückenstatistik. Datum 17.11.2021. www.bast.de/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.html

[Bast Regelwerke, 2022] Bundesanstalt für Straßenwesen: Regelwerke zum Download, Brücken- und Ingenieurbau www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Regelwerke-B_node.html (konsultiert am 03.03.2022)

[Bast_Symposium, 2021] Bundesanstalt für Straßenwesen: 9. BAST-Tunnelsymposium. Tagungsband. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau. BAST-Heft B 157. 2021.

[Beck & Henke, 2021] Beck, J.; Henke, S.: Building Information Modeling – zur Attribuierung des Fachmodells Baugrund. Bautechnik 98 (12), S. 953 – 961, 2021.

[Bednorz et al., 2021] Bednorz, J.; Nieborowski, S.; Windmann, S.; Hindersmann, I.: BIM – auf dem Weg zum Digitalen Zwilling. Straße und Autobahn, Heft 11, S. 917 – 924, 2021.

[Bergmeister & Wendner, 2010] Bergmeister, K.; Wendner, R.: Monitoring und Strukturidentifikation von Betonbrücken. In: Beton-Kalender 2010: Brücken, Betonbau im Wasser. Herausgegeben von Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2010.

[BIM Hamburg, 2018] BIM.Hamburg: Bauteilkatalog Brücken nach ASB-ING 2013. Version 004, Hamburg, 2018.

[BIM4INFRA, 2019] BIM4INFRA: Anhang – Glossar. Handreichungen und Leitfäden – Glossar. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. April 2019 www.bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/07/BIM4INFRA2020_AP4_Glossar.pdf

[BMDV, 2022] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Zukunftspaket leistungsfähige Autobahnbrücken, Dokument vom 10.03.2022 www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/zukunftspaket-leistungsfae-hige-autobahnbruecken.pdf?__blob=publicationFile

[BMI LF NB, 2019] Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat: Leitfaden Nachhaltiges Bauen – Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden, Berlin, 2019.

[BMVBS ASB-ING, 2013] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: Anweisung Straßeninformationbank, Segment Bauwerke (ASB-ING), Bonn, 2013.

[BMVBS Nachrechnung RL, 2011] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), Bonn, 05/2011.

[BMVBS Nachrechnung, 2011] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), Bonn, 05/2011, 1. Ergänzung, 04/2015.

[BMVBS OSA, 2007] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA), Bonn, 2007.

[BMVBS RI-WI-BRÜ, 2007] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs- / Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ), Bonn.

[BMVI, 2016] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bundesverkehrswegeplan 2030. August 2016. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile

- [BMVI LPI-ING, 2020] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Leitfaden zur Prüfung von Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken (Abgrenzung Ersatzneubau), LPI-ING, Stand 2020/10.
- [BMVI Masterplan, 2021] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Masterplan BIM Bundesfernstraßen*. September 2021. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bim-rd-masterplan-bundesfernstrassen.pdf
- [BMVI Modern, 2020] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bericht „Stand der Modernisierung von Brücken der Bundesfernstraßen“, Stand 2020/12 www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bericht-modernisierung-bruecken-0212.pdf?__blob=publicationFile
- [BMVI RI-EBW-PRÜF, 2017] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN1076 (RI-EBW-PRÜF), Bonn, 2017.
- [BMVI RI-EBW-PRÜF-Bsp, 2017] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN1076 (RI-EBW-PRÜF) – Schadensbeispiele, Bonn, 2017.
- [BMVI RPE-ING, 2020] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinien für die strategische Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken, RPE-ING, Stand 2020/12.
- [BMVI Stufenplan, 2015] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Stufenplan Digitales Planen und Bauen. 2015.
- [BMWK Taxonomie, 2020] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Stufenplan Digitales Planen und Bauen. 2015. www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2020/09/kapitel-1-6-sustainable-finance-taxonomie.html
- [Bolton et al., 2018] Bolton, A.; Enzer, M.; Schooling, J.; et al.: The Gemini Principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework. Centre for Digital Built Britain and Digital Framework Task Group. 2018.
- [Borrmann et al, 2021] Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J (Hrsg.): *Building Information Modeling*, 2. Auflage, VDI-Buch (Fassung 2021). Springer- Vieweg, 2021.
- [Botz & Große, 2020] Botz, M.; Große, C.: *Monitoring im Rahmen eines digitalen Bauwerkszwillings*. Fachtagung Bauwerksdiagnose 2020.
- [Braml et al., 2022] Braml, T.; Wimmer, J.; Varabei, Y.; Maack, S.; Küttenbaum, S.; Kuhn, T.; Reingruber, M.; Gordt, A.; Hamm, J.: *Digitaler Zwilling: Verwaltungsschale BBox als Datenablage über den Lebenszyklus einer Brücke*. *Bautechnik* 99 (2), S. 114 – 122, 2022.
- [Brilakis et al., 2019] Brilakis, I.; Fischer, H.; Pan, Y.; Borrmann, A.; Mayer, H.-G.; Rhein, F.; Vos, C.; Pettinato, E.; Wagner, S.: *Built Environment digital Twinning*. Report of the international Workshop on built environment Digital Twinning presented by TUM Institute for advanced Study and Siemens AG, December 2019.
- [BSI, 2022] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Technische Richtlinien des BSI (BSI-TR) für angemessene IT-Sicherheitsstandards. 2022. www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/standards-und-zertifizierung_node.html
- [BuildingSMART, 2022] BuildingSMART: *Take BIM Process to the next level with Digital Twins*. 2022. www.buildingsmart.org/take-bim-processes-to-the-next-level-with-digital-twins/
- [BVDW, 2018] Bundesverband Digitale Wirtschaft: *Data Economy – Datenwertschöpfung und Qualität von Daten*. Düsseldorf, 2018. www.bvdw.org/fileadmin/bvdw/upload/publikationen/data_economy/BVDW_Datenwertschoepfung_2018.pdf
- [Curbach et al., 2021] Curbach, M.; Bergmeister, K.; Mark, P.: *Baukulturingenieure – Civil Engineering Goes Green*. S. 39–44. In: *Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz*. Herausgegeben von Bernhard Hauke. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU); Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. -DGNB-, 2021.
- [DAfStb Nachhaltig Bauen, 2021] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: *Nachhaltig bauen mit Beton – Roadmap des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton für einen klimage-rechten u. ressourceneffizienten Betonbau (Version 1.0)*, 2021.
- [DBV Heft 51, 2022] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.: *Digitaler Zwilling – Strategie für den Bestandserhalt*. DBV-Heft 51. Fassung Oktober 2021.
- [DBV Monitoring, 2018] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.: *DBV-Merkblatt „Brückenmonitoring“*. Berlin, Fassung August 2018.
- [DBV ZfP, 2014] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.: *DBV-Merkblatt „Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen“*. Berlin, Fassung Februar 2014.
- [Destatis Abfall, 2020] Statistisches Bundesamt: *Pressemitteilung Nr. 195 vom 2. Juni 2020*. www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/06/PD20_195_321.html
- [DIN 1076, 1999] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN 1076 Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung*. Beuth Verlag, Berlin, November 1999.
- [DIN EN 13306, 2018] Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 13306 Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*. Beuth Verlag, Berlin, Februar 2018.

- [DIN EN 13791, 2020] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 13791 Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken und Bauwerksteilen. Beuth Verlag, Berlin, Februar 2020.
- [DIN EN ISO 19650-1, 2018] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 19650-1 Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierungen (BIM) – Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Begriffe und Grundsätze. Deutsche Fassung EN ISO 19650-1:2018. Beuth Verlag, Berlin, 2019.
- [DIN EN ISO 23386, 2020] Deutsches Institut für Normung e.V.: Bauwerksinformationsmodellierung und andere digitale Prozesse im Bauwesen – Methodik zur Beschreibung, Erstellung und Pflege von Merkmalen in miteinander verbundenen Datenkatalogen (ISO 23386:2020); Deutsche Fassung EN ISO 23386:2020. Beuth Verlag, Berlin, 2020.
- [Fischer et al., 2014] Fischer, J.; Schneider, R.; Thöns, S.; Rücker, W.; Straub, D.: *Intelligente Brücke* – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau. BASt-Heft B 99, 2014.
- [Freundt et al., 2014] Freundt, U.; Vogt, R.; Böning, S.; Michael, D.; Könke, C.; Beinersdorf, H.: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau. BASt-Heft B 106, 2014.
- [Geißler et al., 2019] Geißler, K.; Steffens, N.; Stein, R.: Grundlagen der sicherheitsäquivalenten Bewertung von Brücken mit Bauwerksmonitoring. Stahlbau 88 (4), S. 338 – 353, 2019.
- [Göbels, 2021] Göbels, A.: Conversion of infrastructure inspection data into Linked Data models. In: 32. Forum Bauinformatik 2021, Darmstadt, 2021.
- [Göbels & Beetz, 2021] Göbels, A.; Beetz, J.: Conversion of legacy domain models into ontologies for infrastructure maintenance. In: Proceedings of the 9th Linked Data in Architecture and Construction Workshop- LDAC 2021, Luxembourg. CEUR-WS, p. 12., 2021
- [Green Deal, 2019] Europäische Kommission: Der europäische Grüne Deal. Brüssel, 2019. ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
- [Grieves & Vickers, 2017] Grieves, M.; Vickers, J.: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, F.-J.; Flumerfelt, S.; Alves, A. (Eds.): Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 85 – 113. 2017.
- [Haardt, 1999] Haardt, P.: Algorithmen der Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau. BASt-Heft B 22, 1999.
- [Haardt, 2003] Haardt, P.: Entwicklung eines Bauwerk-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau. BASt-Heft B 43, 2003.
- [Hallermann et al., 2018] Hallermann, N.; Helmrich, M.; Morgenthal, G.; Schnitzler, E.: UAS-basierte Diagnostik von Infrastrukturbauwerken – Teil einer digitalen Instandhaltungsstrategie. Bautechnik 95 (10), S. 720 – 726, 2018.
- [Hemmert, 2004] Hemmert-Halswick, A.: Erfahrungssammlungen: Schäden an Stahlbrücken – wetterfeste Stähle – Seile. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt-Heft B 45, 2004.
- [Herbrand et al., 2022] Herbrand, M.; Lazoglu, A.; Ullerich, C.; Marx, S.; Zehetmaier, G.: Aggregation von Zustandsindikatoren aus Inspektions- und Monitoringdaten im Brückenbau. Bautechnik 99 (2), S. 95 – 103, 2022.
- [Herrmann, 2012] Herrmann, R.: Wissenspyramide. IT-Management, 2012. www.derwirtschaftsinformatiker.de/2012/09/12/it-management/wissenspyramide-wiki/
- [Herrmann et al., 2015] Herrmann, R.; Stockmann, M.; Marx, S.: Untersuchungsstrategie zur Bewertung der Langzeitstabilität von Dehnungsmessstreifen. Bautechnik 92 (7), S. 451 – 460, 2015.
- [Herrmann et al., 2017] Herrmann, R.; Rabe, J.; Bolle, G.; Marx, S.: Konzepte für Datenqualität und Datenablage bei Entwurf und Umsetzung von Monitoringsystemen. Bauingenieur 92 (12), S. 537 – 545, 2017.
- [Hindersmann, 2021] Hindersmann, I.: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau. BASt-Heft B 163, 2021.
- [IEA, 2020] International Energy Agency: Energy Technology Perspectives 2020, IEA, Paris, 2020. [iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf](https://www.iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf)
- [ISO/IEC 2382, 2015] International Organization for Standardization: ISO/IEC 2382:2015(en) Information technology – Vocabulary. Englische Fassung. Mai 2015.
- [Jackmuth et al., 2022] Jackmuth, A.; König, W.; Marzahn, G.; Mertzsch, O.; Pinnel, R.: Die neue Erhaltungsstrategie für Brücken der Bundesfernstraßen. In: Beton-Kalender 2022: Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung. Herausgegeben von Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2022.
- [Jeong et al., 2020] Jeong E.; Seo J.; Wacker J.: Literature Review and Technical Survey on Bridge Inspection Using Unmanned Aerial Vehicles. Journal of Performance of Constructed Facilities 34 (6), 2020.
- [Koalitionsvertrag, 2021] SPD, Bündnis90/Die Grünen und FDP: Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerech-

tigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis90/Die Grünen und FDP. Koalitionsvertrag der 20. Legislaturperiode, Berlin, 2021

[Kraemer & Fritzen, 2007] Kraemer, P.; Fritzen, C.-P.: Sensor Fault Identification Using Autoregressive Models and the Mutual Information Concept. *Key Engineering Materials* 347, pp. 387–392, 2007.

[Kritzinger et al., 2018] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-Papers-OnLine* 51 (11), pp. 1016–1022, 2018.

[Krohn, 2014] Krohn, S.: Messwertgestützte Ermüdungsnachweise an bestehenden Straßenbrücken. Dissertation, Band 16 der Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Berlin, 2014.

[Krotova & Eppelsheimer, 2019] Krotova, A.; Eppelsheimer, J.: Was bedeutet Data Governance? – Eine Clusteranalyse der wissenschaftlichen Literatur zu Data Governance. Hrsg: Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V., Eine Veröffentlichung im Rahmen des BMWi-Verbundprojekt DEMAND. 2019. www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF/2019/Gutachten_Data_Governance_DEMAND_Template.pdf

[KSG, 2021] Deutscher Bundestag: Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes, Berlin, 2021.

[Küttenbaum et al., 2019] Küttenbaum, S.; Maack, S.; Braml, T.; Taffe, A.; Haslbeck, M.: Bewertung von Bestandsbauwerken mit gemessenen Daten. *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (6), S. 370–382, 2019.

[Mandirola et al., 2022] Mandirola, M.; Casarotti, C.; Peloso, S.; Lanese, I.; Brunesi, E.; Senaldi, I.: Use of UAS for damage inspection and assessment of bridge infrastructures. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 72, 2022.

[Marzahn et al., 2020] Marzahn, G.; Mertzsch, O.; Kramer, L.: Der Traglastindex – ein neuer Kennwert zur Bewertung struktureller Eigenschaften von Straßenbrücken. *Bautechnik* 97 (7), S. 508–516, 2020.

[MEED, 2021] Middle East business intelligence: Digital Evolution, the critical Impact of digital Twins on Middle East construction, November 2021.

[Mertens, 2015] Mertens, M. (Hrsg.): *Handbuch Bauwerksprüfung – Standsicherheit, Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln 2015.

[Morgenthal et al., 2019] Morgenthal, G.; Hallermann, N.; Kersten, J.; Taraben, J.; Debus, P.; Helmrich, M.; Rodehorst, V.: Framework for Automated UAS-based Structural Condition Assessment of Bridges. *Automation in Construction* 97, pp. 77–95, 2019.

[MS AZ, 2022] Microsoft: Datenarchitekturleitpfaden. 2022. docs.microsoft.com/de-de/azure/architecture/data-guide/big-data/

[MS AZ AML, 2022] Microsoft: Was ist automatisiertes maschinelles Lernen (AutoML)? 2022. docs.microsoft.com/de-DE/azure/machine-learning/concept-automated-ml

[OGC Sensorthings API, 2022] Open Geospatial Consortium: OGC SensorThings API. 2022. www.ogc.org/standards/sensorthings

[Ralbovsky et al., 2020] Ralbovsky, M.; Prammer, D.; Lachinger, S.; Vorwagner, A.: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau*. Heft B 151, 2020.

[Reiterer, 2022] Reiterer, A.: Geodäsie und Nachhaltigkeit: Nur mit geodätischen Messdaten können wir die Ziele der globalen Nachhaltigkeitsstrategie erreichen. *Allgemeine Vermessungsnachrichten avn*, Gast-Editorial, 01–02/2022.

[Rolls Royce, 2019] Rolls Royce: How Digital Twin technology can enhance Aviation. 2019 www.rolls-royce.com/media/our-stories/discover/2019/how-digital-twin-technology-can-enhance-aviation.aspx

[Sawo et al., 2015] Sawo, F.; Klumpp, V.; Beutler, F.: Intelligente Bauwerke – Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Dastellungsform. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau*. Heft B 114, 2015.

[Schacht et al., 2022] Schacht, G.; Fritsch, C.; Voigt, C.; Ewert, E.; Arndt, R.: Structural Information Modeling – Die digitale Transformation der Bauwerksdiagnostik. *Bautechnik* 99 (3), S. 213–221, 2022.

[Scheibe, 2018] Scheibe, H.-G.: Digital Process Twin – Effizienzschub für die Fertigung. *ROI Dialog* Ausgabe 55. ROI Management Consulting AG, 2018.

[Schellenbach-Held et al., 2015] Schellenbach-Held, M.; Peeters, M.; Miedzinski, G.: *Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton*. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau*. BAST-Heft B 110, 2015.

[Schneider et al., 2015] Schneider, R.; Fischer, J.; Straub, D.; Thöns, S.; Bügler, M.; Borrmann, A.: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau*. BAST-Heft B 117, 2015.

[Sedlacek et al., 2011] Sedlacek, G.; Paschen, M.; Feldmann, M.; Geßler, A.; Möller, S.; Steinauer, B.: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau*. BAST-Heft B 76, 2011.

- [Seitner et al., 2021] Seitner, M.; Probst, R.; Borrmann, A.; Vilgertshofer, S.: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau. Schlussbericht zu FE 15.0622/2016/RRB (BASt), 2021. (Veröffentlichung in Vorbereitung)
- [Shneiderman et al., 2016] Shneiderman, B.; Plaisant, C.; Cohen, M.; Jacobs, S.; Elmqvist, N.: Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction. Sixth Edition, Pearson, May 2016.
- [Short, 2020] Short, S.: How smart can a smart building be? Ernst&Young, 2020.
www.ey.com/en_gl/real-estate-hospitality-construction/how-smart-can-a-smart-building-be
- [SIB-BW2.0] ITKo: Fachgruppe „NGBW-SIB BW 2.0“ – Neugestaltung SIB Bauwerke 2.0. itko-strassenwesen.de/was-wir-tun/die-fachgruppen-des-itko/fachgruppe-neugestaltung-sibbw/
- [Siegert et al., 2015] Siegert, C.; Holst, A.; Empelmann, M.; Budelmann, H.: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau. BASt-Heft B 118, 2015.
- [Smarsly et al., 2022] Smarsly, K.; Worm, M.; Dragos, K.; Peralta, J.; Wenner, M.; Hahn, O.: Mobile structural health monitoring using quadruped robots. In: Proceedings of the SPIE Smart Structures/NDE Conference: Health Monitoring of Structural and Biological Systems. Long Beach, CA, USA, 03/06/2022.
- [Steffens, 2019] Steffens, N.: Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring. Dissertation, Band 26 der Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Berlin, 2019.
- [Stevenson, 2010] Stevenson, A.: Oxford Dictionary of English. Oxford University Press, 2010.
- [Taxonomie, 2020] Europäische Union: Verordnung über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnungen 2019/2088, 2022.
- [Thewes et al., 2022] Thewes, M.; Vollmann, G.; Wahl, H.; König, M.; Stepien, M.; Riepe, W.; Weißbrod, F.: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau (FE 15.0623/2016/RRB). Projektbericht der Ruhr-Universität Bochum und des Ingenieurbüros BUNG im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2022. (Veröffentlichung in Vorbereitung)
- [Trauer et al., 2020] Trauer, J.; SchweigertRecksiek, S.; Engel, C.; Spreitzer, K.; Zimmermann, M.: What is a digital twin? – Definitions and insights from an industrial case study in technical product development. – In: Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 2020.
- [TwinGen, 2019] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Technologien zur Generierung Digitaler Zwillinge als Grundlage für Betrieb und Instandhaltung baulicher Infrastruktur – TwinGen. Forschungsvorhaben. 08/2019 – 07/2022. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/TwinGen.html
- [UBA, 2018] Umwelt Bundesamt: Inländische Entnahme von Rohstoffen und Materialimporte. 2018.
www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/rohstoffe-als-ressource/inlaendische-entnahme-von-rohstoffen#konkurrenz-um-rohstoffe
- [Ullerich et al., 2020] Ullerich, C.; Grabe, M.; Wenner, M.; Herbrand, M.: smartBRIDGE Hamburg – prototypische Pilotierung eines Digitalen Zwillings. Bautechnik 97 (2), S. 118 – 125, 2020.
- [UN, 2020] United Nations Environment Programme (2020): 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi, 2020.
- [Wedel et al., 2022] Wedel, F.; Opitz, D.; Tiedemann, C.; Meyer-Westphal, M.: Das 3-D-Modell als Grundlage des Digitalen Zwillings. Bautechnik 99 (2), S 104 – 113, 2022.
- [Weiher et al., 2014] Weiher, H.; Runtmund, K.; Ullerich, C.: Monitoring an den Koppelfugen der Köhlbrandbrücke (Rampe Ost) in Hamburg. In: Tagungsband 1. Kolloquium Brückenkolloquium – Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken, Esslingen, 2014.
- [Windmann, 2022] Windmann, S.: *Intelligente Brücke* – Reallabor *Intelligente Brücke* im Digitalen Testfeld Autobahn. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau. BASt-Heft B 178, 2022.
- [Witt, 2010] Witt, B. C.: Datenschutz kompakt und verständlich. Vieweg+Teubner, 2010.
- [Zinke, 2016] Zinke, T.: Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken, Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2016
- [Zinke et al., 2021] Zinke, T.; Müller, M.; Ummenhofer, T.: Ganzheitliche Analyse und Bewertung von Infrastrukturprojekten: In: Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz. Herausgegeben von Bernhard Hauke. S. 257 – 270, Ernst und Sohn, 2021.
- [Zinke et al., 2022] Zinke, T.; Reymer, S.; Kosse, S.; König, M.; Wedel, F.; Marx, S.: Konzeptionelle Untersuchung zur Zusammenführung von Komponenten des Digital Twins Brücke. Zwischenbericht zu FE 15.0677/2020/IRB (BASt). Laufendes Forschungsprojekt. 2022.

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Digitales und Verkehr
Invalidenstraße 44
10115 Berlin

Auftraggeber

Bundesministerium für Digitales und Verkehr
Referat StB 27
Straßenverkehrstelematik, Rastanlagen, BIM, IT im Straßenbau
Andreas Meister

Projektleitung

Felix Scholz, BIM.Hamburg

Autor:innen

Marc Wenner¹, Caroline Barr¹, Adrian Bartsch¹, Friedrich Böhme², Johannes Diers¹, Daniel Dombeck², Christina Fritsch¹, Alex Lazoglu¹, Andreas Meister³, Hubert Naraniecki¹, Momme Petersen², Sebastian Schneider¹, Felix Scholz², Christof Ullerich², Frederik Wedel¹

¹ MKP GmbH

² HPA, Hamburg Port Authority AöR und BIM.Hamburg

³ BMDV, Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Fachliche Begleitung/Review

Prof. André Borrmann, Dr. Andreas Bach
BIM Deutschland

Prof. Steffen Marx
Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau

DirProf. Dr. Jürgen Krieger und RDir Dr. Dirk Jansen
BASt Bundesanstalt für Straßenwesen

Stand

Oktober 2023

Titelbild

Der Digitale Zwilling der Köhlbrandbrücke,
MKP GmbH und Hamburg Port Authority AöR

Gestaltung, Illustrationen, Layout und Satz

Goldwiege | Visuelle Projekte, Weimar

