

Vom digitalen Zwilling zum digitalen Asset-Management

*Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Oeser, Dr. Iris Hindersmann, M.Sc. Yasser Alqasem,
M.Eng. Jennifer Bednorz, M.Sc. Sonja Nieborowski, M.Sc. Sarah Windmann
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach*

Kurzfassung

Der Digitale Zwilling Brücke unterstützt den Übergang von einer bisher reaktiven Erhaltung zu einem prädiktiven Lebenszyklusmanagement von Brücken. Damit wird das übergeordnete Ziel verfolgt, eine optimierte Unterstützung der Bauwerksbetreibenden bei der Gewährleistung der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit zu leisten. Der digitale Zwilling eines Ingenieurbauwerks kann als ein digitales Abbild eines realen Bauwerks verstanden werden und spiegelt sämtliche Eigenschaften und sein Verhalten anhand verschiedener Modelle über dessen gesamten Lebenszyklus hinweg. Der digitale Zwilling aktualisiert sich kontinuierlich, um den aktuellen Status des realen Bauwerks sowie die daraus ableitbaren Prognosen möglichst zeitnah darzustellen. Zu diesem Zweck greift er auf große Datenmengen zurück, die u. a. am realen Bauwerk, dem Reallabor, gesammelt werden.

Die Umsetzung des digitalen Zwillings für Brückenbauwerke ist aktuell Forschungsgegenstand, die Entwicklung einer Gesamtkonzeption für den Digitalen Zwilling Brücke und einzelner Komponenten steht aktuell im Fokus der BASt-Forschung. Hierbei sind die Anwendung von virtueller und erweiterter Realität in der Bauwerksprüfung, die KI-basierte (teil-)automatisierte Ableitung von Bestandsmodellen, und der Einsatz von KI-Verfahren zur Erkennung von Anomalien Beispiele für die Umsetzung einzelner Komponenten.

Ein möglicher Einsatz des digitalen Zwillings kann über verschiedene Anwendungsfälle erfolgen, neben dem Themenbereich „Erhaltungsplanung und -durchführung“ sind die Themenbereiche „Betriebsprozesse“ sowie „Strategisches Lebenszyklusmanagement“ von Relevanz. Für den Themenbereich „Erhaltungsplanung und -durchführung“ sind u. a. die Anwendungsfälle „Schadensanalyse“ und „Intervallbezogene Zustandserfassung“ von Bedeutung.

1 Motivation

Die Brücken im Netz der Bundesfernstraßen stehen einer Vielzahl von Herausforderungen gegenüber, die Ursachen hierfür sind vielfältig. Der Verkehr auf Bundesfernstraßen ist in den vergangenen Jahren stark angestiegen und der Güterverkehr hat dabei überproportional an Menge und Gesamtgewicht zugelegt. Zusätzlich sind die Verschlechterung des Erhaltungszustandes der Brücken, das hohe Bauwerkalter und die gestiegenen Anforderungen an Sicherheit, Verfügbarkeit und Dauerhaftigkeit zu nennen. Eine Möglichkeit, den aktuellen und künftigen Herausforderungen zu begegnen, ist die Entwicklung von der derzeit reaktiven Erhaltung hin zu einem prädiktiven Lebenszyklusmanagement. Die aktuellen Entwicklungen in der Digitalisierung stellen für den Übergang zu einem prädiktiven Lebenszyklusmanagement eine gute Grundlage dar und das Thema digitaler Zwilling nimmt zunehmend eine wichtige Rolle ein.

Politische Initiativen wie die Einführung des Masterplans BIM Bundesfernstraßen [1] und der hierin angekündigte Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen fördern die bundesweite Implementierung digitaler Methoden wie *Building Information Modeling* (BIM). Dank der durchgängigen Planung mit hohem Informationsgehalt zur Bauwerkserstellung werden wichtige Grundlagen für das prädiktive Lebenszyklusmanagement und den Aufbau von digitalen Zwillingen bereitgestellt [1]. Der Mehrwert eines Einsatzes digitaler Methoden wird vor allem in der Betriebsphase deutlich. Beispiele dafür sind die Ergänzung konventioneller Prüfungs- und Bewertungsverfahren, wie die handnahe Bauwerksprüfung, Nachrechnung oder objektbezogene Schadensanalyse (OSA) durch digitale Methoden der Bauwerksdiagnostik [2]–[4]. Der verstärkte Einsatz von z. B. Monitoring, virtueller und erweiterter Realität und datengetriebenen Auswertungsverfahren für die Bestimmung, Bewertung und Prognose des Zustands von Ingenieurbauwerken sowie das Betreiben von Reallaboren sind von großer

Bedeutung und stellen weitere Teilaspekte des digitalen Zwilling dar.

2 Digitaler Zwilling und Asset-Management

2.1 Konzept digitaler Zwilling

Ein digitaler Zwilling kann als digitales Abbild der realen Straßeninfrastruktur (Objekt-, aber auch Netzebene, beispielsweise ein Bauwerk oder ein Streckenzug) verstanden werden, das in Wechselwirkung mit der realen Struktur steht, sämtliche Eigenschaften über den gesamten Lebenszyklus hinweg erfasst (u. a. Geometrie-, Struktur- sowie Zustandsdaten) und aus den Daten Informationen zur Ent-

scheidungsunterstützung erzeugt (z. B. durch Anwendung von Vorhersagemodellen). Der digitale Zwilling aktualisiert sich kontinuierlich, um den aktuellen Zustand der realen Straßeninfrastruktur darzustellen [5], [6].

Der digitale Zwilling kann dabei durch die Dynamik und Aktualität der Daten als effizientes Werkzeug für die Betriebsphase in Bezug auf Analysieren, Vorhersagen, Steuern und Überwachen dienen, wie in Bild 1 veranschaulicht. Damit können z. B. Erhaltungs- und Ersatzinvestitionen perspektivisch optimiert geplant werden.

Auf Basis der Zustandserfassung und -bewertung beispielsweise über den Einsatz von Monitoringdaten, visueller Bauwerksprüfung,

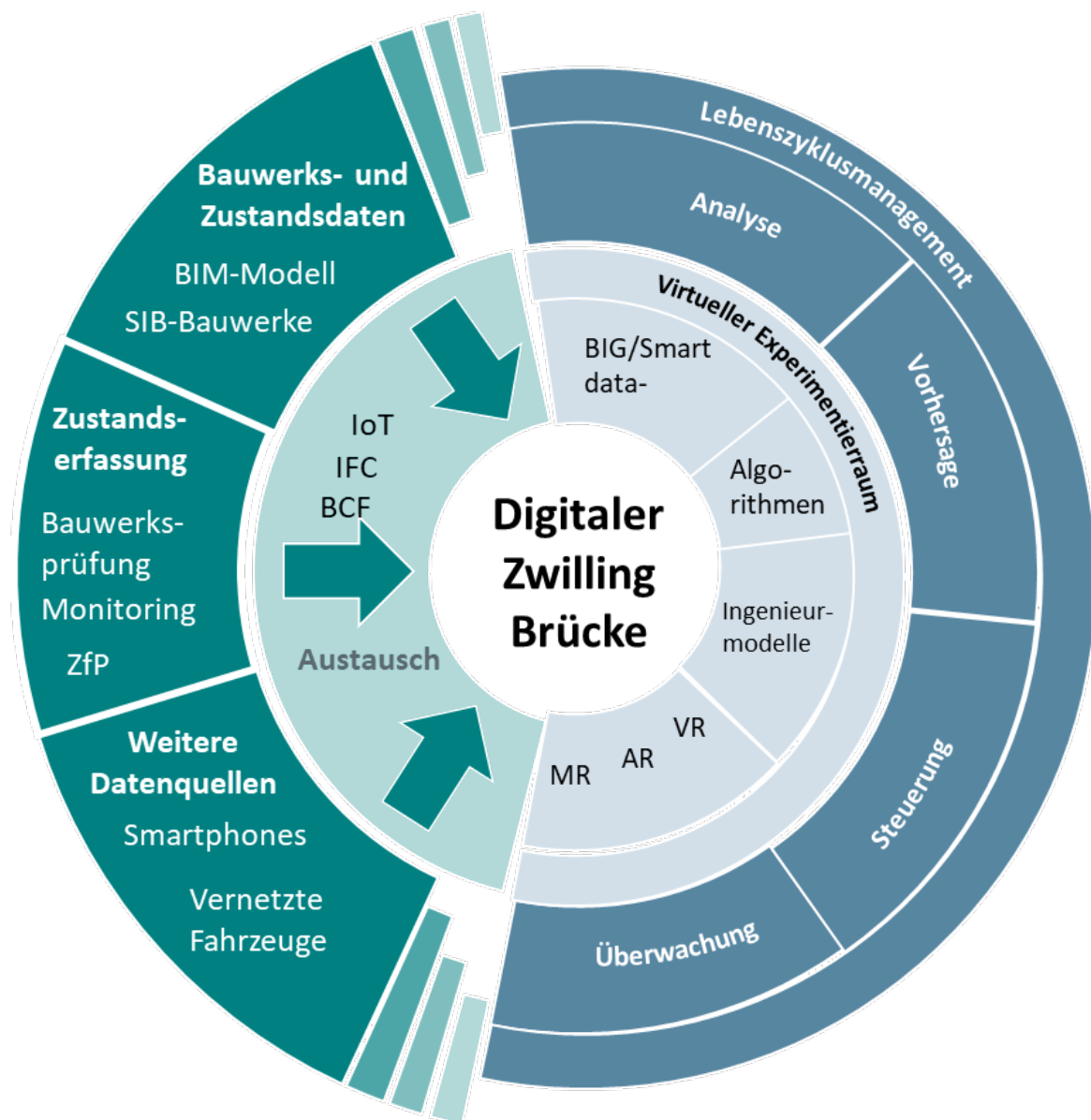


Bild 1 Komponenten des digitalen Zwilling

Grafik: Jennifer Bednorz

zerstörungsfreier Prüfmethode oder von bildgebenden Verfahren kann ein substanzerhaltendes Betreiben der Infrastruktur sichergestellt werden [1]. Neben der Berücksichtigung der grundlegenden Bauwerks- und Zustandsdaten aus der Straßeninformationsbank Bauwerke (SIB-Bauwerke) stellt die Einbindung aller für eine Zustandsentwicklung und -prognose erforderlichen (Echtzeit-)Daten und deren Einbindung in BIM-Modelle einen wesentlichen Aspekt für ein prädiktives Lebenszyklusmanagement mittels digitalem Zwilling dar. Dazu wird auf Daten zurückgegriffen, die u. a. am realen Bauwerk gesammelt oder von bereits bestehenden Systemen oder je nach Anwendungsfall erforderlichen neu zu installierenden Sensoren oder Systemen bereitgestellt werden. Darüber hinaus können Informationen aus unkonventionellen Datenquellen wie z. B. vernetzten Fahrzeugen, Smartphones und sozialen Medien genutzt werden. Mit diesen Daten können Hinweise zu bislang unentdeckten Veränderungen oder Schäden an den Ingenieurbauwerken aufgezeigt werden, wie beispielsweise Schäden im Fahrbahnbelag oder Verschmutzungen. Weiterhin können Hinweise zur Verkehrsauslastung und -zusammensetzung aus diesen Daten gewonnen werden. In Anbetracht der großen Datenmengen kommen Big-Data-/Smart-Data-Anwendungen sowie Algorithmen zur Datenanalyse und -bewertung zum Einsatz. Außerdem beinhaltet der digitale Zwilling einen virtuellen Experimentierraum, in dem szenariobasierte Untersuchungen und Prognosen hinsichtlich des Bauwerkszustandes erfolgen können. Der virtuelle Experimentierraum birgt aufgrund der umfangreichen Untersuchungsmöglichkeiten unter modellhaften Rahmenbedingungen das Potenzial, dass Innovationen schneller in die Praxis umgesetzt werden. Die daraus resultierenden Ergebnisse liefern Informationen sowie ggf. Handlungsanweisungen und können dem Nutzer z. B. über eine grafische Benutzeroberfläche angezeigt werden. Neben erforderlichen Forschungsaktivitäten in den zuvor aufgeführten Bereichen sind Schnittstellen für den Datenaustausch und Vorgaben für die Datenhaltung zu entwickeln [6].

Auf der Grundlage von Daten unterstützt der Digitale Zwilling Brücke langfristig die Analyse, Vorhersage, Steuerung und Überwachung der Straßeninfrastruktur in der Betriebsphase und liefert somit wichtige Entscheidungsgrundlagen für ein optimiertes, prädiktives und nachhaltiges Lebenszyklusmanagement. In seiner höchsten Ausbaustufe ist die automatisierte Steuerung auf Basis von Erhaltungsprognosen durch den digitalen Zwilling denkbar.

In den für einen Digitalen Zwilling Brücke relevanten Bereichen, welche in Bild 1 dargestellt sind, wurden für Ingenieurbauwerke bereits wesentliche Grundlagen und Vorarbeiten in der BASt geleistet. Relevante Aspekte sind eine Konzeptentwicklung des Digitalen Zwillings Brücke [7], Performance-Indikatoren im Kontext des Lebenszyklusmanagements [8]–[10], Forschungscluster Intelligente Brücke [11], [12], künstliche Intelligenz u. a. in Kombination mit Systemen der erweiterten Realität [13] oder zur Erstellung (teil-)automatisierter BIM-Modelle [18], BIM in der Betriebsphase [14], Datenzusammenführung und -aufbereitung [15], virtuelle und erweiterte Realität [16] und datengetriebene Methoden aus den Bereichen *Machine Learning* und *Deep Learning* zur Detektion, Bewertung und Prognose [17]–[19].

Mit dem übergeordneten Ziel, dem Übergang von einem reaktiven zum prädiktiven Lebenszyklusmanagement auf der Grundlage eines digitalen Zwillings, wird im Rahmen des Projektes „Digital Twin Brücke“ eine Gesamtkonzeption für modulare digitale Zwillinge von Brückenbauwerken entwickelt [7]. Ein digitaler Zwilling einer Brücke in einem niedrigen Reifegrad kann beispielsweise Informationen hinsichtlich des Zustands, der Zuverlässigkeit und der Restnutzungsdauer des Bauwerks bereitstellen und eine frühzeitige Identifikation kritischer Bauwerkszustände ermöglichen. Im Sinne des prädiktiven Lebenszyklusmanagements können Zustände erfasst und bewertet werden, bevor diese kritisch werden. In höheren Reifegraden können Prognosen durchgeführt werden, die zukünftige Zustände der Bauwerke in verschiedenen Lebenszyklusphasen abbilden. Die Modularität des entwickelten Ansatzes wird durch Anwendungsfälle realisiert, die vorhandene heterogene Datenquellen integrieren und sich auf die Betriebsphase fokussieren. Der Begriff „Anwendungsfall“ wurde im Bauwesen maßgeblich von der Arbeitsmethodik *Building Information Modeling* (BIM) geprägt und bezeichnet Prozesse, die mittels digitaler Modelle zur Zielerreichung beitragen. Die Vielschichtigkeit eines digitalen Zwillings soll mit der Erarbeitung relevanter Anwendungsfälle heruntergebrochen und die Komplexität der Gesamtaufgabe verringert werden. Für die spätere Akzeptanz und Nutzung eines digitalen Zwillings ist die Entwicklung eines anwendungsorientierten Konzepts von Bedeutung, welches praxistaugliche und für den Anwender unterstützende Lösungen bereitstellt. Daher werden relevante Stakeholder in zentrale Prozessschritte der Konzeptentwicklung eingebunden und bedeutsame

Bedarfe und Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit dem zukünftigen Einsatz von digitalen Zwillingen berücksichtigt. Erste relevante Anwendungsfälle des digitalen Zwillings konnten in den Themenbereichen Betriebsprozesse, Erhaltungsplanung und -durchführung sowie Lebenszyklusmanagement identifiziert und diskutiert werden. Während einige Anwendungsfälle eindeutigen Aufgaben auf Brückenebene zuzuordnen sind, entfalten andere Anwendungsfälle erst bei Einbeziehung der Netzebene ihr vollkommenes Potenzial. Es wurde somit anhand der Diskussion der Anwendungsfälle außerdem eine Differenzierung von Aufgaben auf Bauteil-, Bauwerks- und Netzebene ermöglicht.

2.2 Digitales Asset-Management

Die Realisierung von prädiktivem Infrastrukturmanagement und digitalen Zwillingen hat gravierende Auswirkungen auf das Asset-Management von Verkehrsinfrastruktur. Asset-Management umfasst die Planung, den Betrieb, die Wartung und den Ersatz von physischen Vermögenswerten, wobei diese Prozesse durch die Integration von prädiktivem Infrastrukturmanagement und digitalen Zwillingen optimiert werden können. Potenzielle Ausfälle oder Schwachstellen können frühzeitig erkannt werden. Dies ermöglicht es Betreibern, gezielte Wartungsmaßnahmen durchzuführen, bevor ein tatsächlicher Ausfall eintritt. Auf diese Weise können Instandhaltungskosten gesenkt und die Verfügbarkeit der Infrastruktur erhöht werden.

Darüber hinaus können digitale Zwillinge verwendet werden, um verschiedene Szenarien zu simulieren und deren Auswirkungen auf das Asset-Management zu bewerten. Optionen können virtuell getestet und deren Auswirkungen auf den Lebenszyklus untersucht werden. Die Verwendung von digitalen Zwillingen versetzt Asset-Manager in die Lage, fundierte Entscheidungen zu treffen und potenzielle Risiken und Auswirkungen auf die Infrastruktur frühzeitig zu erkennen und besser verstehen zu können.

Insgesamt haben prädiktives Infrastrukturmanagement und digitale Zwillinge das Potenzial, das digitale Asset-Management von Verkehrsinfrastruktur zu revolutionieren. Durch die Verwendung dieser Technologien können Maßnahmen zielgerichtet durchgeführt werden, wodurch die Verfügbarkeit der Infrastruktur deutlich verbessert werden kann.

3 Komponenten des digitalen Zwillings

3.1 Bauwerksdiagnostik

Die Bauwerksdiagnostik beschreibt die Erfassung, die Bewertung sowie die Abschätzung der wahrscheinlichen zukünftigen Entwicklung des Ist-Zustandes des Bauwerks. Um von der aktuell reaktiven Erhaltung zu einem prädiktiven Lebenszyklusmanagement zu kommen, werden neue digitale Methoden zur Ergänzung der konventionellen Prüfungs- und Bewertungsverfahren von Ingenieurbauwerken entwickelt. Bausteine der Bauwerksdiagnostik sind die Zustandserfassung über die visuelle Bauwerksprüfung und ergänzend digitale Methoden, wie Monitoring oder ZfP, die Bewertung und Prognose mittels Ingenieur-, digitaler Tragwerks- und Verhaltensmodelle und datengetriebener Bewertungsalgorithmen und das Zusammenführen, Bearbeiten, Auswerten und Visualisieren der Ergebnisse und Arbeitsabläufe [19].

Die Zustandserfassung kann beispielsweise über das Monitoring erfolgen. Monitoring hat für das Betreiben digitaler Zwillinge eine große Bedeutung, da kontinuierliche Daten zum Zustand des Bauwerks geliefert und damit Veränderungen am Bauwerk erkannt werden können. Monitoring beschreibt den Gesamtprozess zur Erfassung, Analyse und Bewertung von Bauwerksreaktionen und/oder der einwirkenden Größen mittels eines Messsystems über einen repräsentativen Zeitraum [20]. Der Einsatz von Monitoring ist aktuell zumeist auf wenige Anwendungsfälle auf Bauwerke mit bekannten Schäden und Defiziten beschränkt. Im Rahmen des Einsatzes von digitalen Zwillingen wird das globale Monitoring der Bauwerke ohne bekannte Schäden und Defizite deutlich an Bedeutung gewinnen. Auch der Anwendungsfall „Geburtszertifikat“ mit dem Ziel, das Verhalten des Bauwerks vor der Verkehrsfreigabe und damit eine Referenzzustand zu ermitteln, ist relevant.

Die Bewertung und Prognose kann beispielsweise über konkrete Ingenieurmodelle und Bewertungsverfahren für verschiedene Grenzzustände erfolgen. Beispiele hierfür sind die Beurteilung des Ermüdungswiderstandes älterer Spannbetonbrücken oder von Schädigungsmechanismen in orthotropen Fahrbahnplatten von Stahlbrücken. Neben der Entwicklung von konventionellen Ingenieurmodellen werden zunehmend auch datengetriebene Verfahren zur Detektion, Bewertung und Prognose erprobt (Abschnitt 3.2).

Die Bauwerksprüfung stellt einen Anwendungsbereich des digitalen Zwillings dar. Neue Technologien im Rahmen der digitalen Transformation haben das Potenzial, den Bauwerksprüfungsprozess nach DIN 1076:1999 zu optimieren [2]. Digitale Technologien finden im Prüfprozess bislang nur selten Anwendung. Unterstützungsbedarfe werden jedoch vor allem in der Verfügbarkeit und Visualisierung von Informationen, der Verortung und Trendverfolgung von Schäden sowie dem kollaborativen Arbeiten gesehen. Im Rahmen von Forschungsprojekten [13], [16] im Auftrag der BAST wurden der Ist-Zustand sowie der Soll-Zustand des Prozessablaufs unter Berücksichtigung einer Implementierung digitaler Prozessabläufe analysiert. Dabei konnten in allen Prozessschritten der Vorbereitung, Schadenserfassung, Aufzeichnung sowie Dokumentation entsprechende Ansatzpunkte festgestellt und diese prototypisch demonstriert werden.

Erweiterte und virtuelle Realität ermöglichen u. a. das immersive Erleben und die Visualisierung von Bauwerken zur besseren Vorstellbarkeit von Zusammenhängen. Das BIM-Modell als zentrale Informationsquelle unterstützt die



Bild 3 Praxistest des Demonstrators zur Unterstützung der Bauwerksprüfung Foto: [13]



Bild 2 Überlagertes 3D-Modell im entwickelten Demonstrator [16]
Grafik: Sonja Nieborowski (BAST)

kollaborative Arbeitsweise aller an einem Projekt Beteiligten. Durch Verschneidung der Potenziale können Schäden in der Bauwerksprüfung durch einfache Kameraaufnahmen über die erweiterte Realität verortet, mit dem 3D-Bauwerksmodell verknüpft und mit weiteren Informationen zur Unterstützung der lückenlosen Protokollierung über den Lebenszyklus versehen werden. Über eine Cloud können die aufgenommenen Daten bereits während der Prüfung übertragen und von Kolleginnen und Kollegen im Büro am 3D-Bauwerksmodell mittels virtueller Realität begutachtet und weitergehend analysiert werden. Informationen zu Schäden, die in vergangenen Prüfungen aufgenommen wurden, werden den Prüfenden vor Ort über das Tablet als digitale Überlagerung mittels erweiterter Realität angezeigt (Bild 2). In deutlich kürzerer Zeit können sie auf diesem Weg wiedergefunden und z. B. im Hinblick auf Schadensentwicklungen bewertet werden.

Durch den Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) werden zusätzliche Unterstützungsmöglichkeiten gesehen, indem mögliche Schäden durch diese erkannt, vorausgewählt, bildlich markiert und intelligent mit Informationen versehen werden. Im Rahmen eines Forschungs-

projekts im Auftrag der BASt wurde die Kombination von erweiterter Realität und künstlicher Intelligenz und ihre Anwendung im Rahmen der Brückenprüfung untersucht [13]. Im entwickelten Konzept werden sichtbare Schäden am Bauwerk automatisiert erfasst und in Interaktion mit dem Prüfenden bewertet. Hierfür kommt eine Brille mit Funktionen der erweiterten Realität zum Einsatz, mit der Bilder von Schäden am Bauwerk aufgenommen werden (Bild 3). Eine trainierte KI-Netzarchitektur dient der Erkennung und entsprechend farblichen Markierung der Schäden anhand der aufgenommenen Bilder. Die Ergebnisse der KI werden den Prüfenden in der erweiterten Realität als virtuelle Überlagerung dargestellt und können in die Entscheidungsfindung einbezogen werden.

In Praxistests der entwickelten Demonstratoren konnten die Potenziale digitaler Unterstützungssysteme sowie die Bedarfe und Motivation zur Nutzung dieser bei den Anwendenden festgestellt werden. Eine konsistente und lückenlosen Protokollierung der Schäden über den Lebenszyklus bietet eine wichtige Informationsgrundlage für den digitalen Zwilling, der wiederum durch die zuvor geschilderten Anwendungen direkt für die Bauwerksprüfung herangezogen werden kann.

3.2 Algorithmen für prädiktives Lebenszyklusmanagement

Ein Algorithmus ist eine Folge von Anweisungen, die zu einem bestimmten Ziel führen soll. Im Rahmen der Erhaltung von Bauwerken ist insbesondere die Anwendungen von Algorithmen des maschinellen Lernens (ML) bei der Sicherheitsbewertung von Elementen der Infrastruktur von Bedeutung. Ziel des ML ist es, durch mathematische Funktionen, die in der Statistik verwurzelt sind, Zusammenhänge in Daten zu finden. Das tiefe Lernen (DL) ist ein Teilbereich des maschinellen Lernens und unterscheidet sich grundsätzlich durch die Lernfunktionen. Dabei werden Neuronen in mehreren Schichten eines tiefen Netzes verwendet, um Lösungsmöglichkeiten eines Problems zu lernen. Ergebnisse aus traditionellen ML-Modellen können einfacher interpretiert werden, da meistens für den Algorithmus Merkmale abgeleitet werden. Merkmale sind abgeleitete Größen, die charakteristische Eigenschaften und Informationen der Daten enthalten. Diese beinhalten Aussagen über die zusammenhängenden Parameter. Mit den fortschreitenden Entwicklungen auf dem Gebiet des maschinellen Lernens können heutzutage komplexe

Prognosemodelle abgebildet werden, die die Möglichkeit bieten, den Lebenszyklus der Infrastruktur auf der Grundlage großer Datenmengen zu bewerten.

Die Einschätzung des Zustandes eines Bauteiles anhand einer Menge von Daten kann durch die Anpassung (engl. *fitting*) eines Modells, z. B. eines Klassifizierungsmodells, eines Regressionsmodells oder einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, an die Daten erfolgen [21]. Es gibt verschiedene Arten von Techniken zur Vorhersage des Zustandes. Relevant sind modellbasierte, datengetriebene und hybride Verfahren. Zumeist wird im Infrastrukturbereich aufgrund der komplexen Systeme das datengetriebene Verfahren verwendet. Beim datengetriebenen Ansatz werden während des Betriebs in verschiedenen Belastungssituationen Daten gesammelt und verarbeitet, um den Zustand abzuschätzen [22].

Beim Monitoring werden Bauwerke entsprechend der zu überwachenden Elemente oder seiner Schwachstellen mit einem Messsystem ausgestattet, um kontinuierlich Informationen über das Verhalten und den Zustand zu erhalten. Somit sollen Schäden frühestmöglich erkannt und Erhaltungsmaßnahmen eingeleitet werden. Darüber hinaus werden zunehmend intelligente Methoden auf der Basis von Monitoringdaten entwickelt, um Entscheidungen über die Entwicklung des Zustands zu unterstützen [23]. Diese Methoden werden weltweit auf der Grundlage von Algorithmen des ML und DL entwickelt und eingesetzt [24], [25]. Das maschinelle Lernen gewinnt im Zusammenhang mit der Anomalieerkennung an Bedeutung, um Schäden bzw. anomales Verhalten von Brückenbauwerken möglichst schnell zu erkennen oder vorherzusagen. Dies bildet einen wesentlichen Baustein auf dem Weg zur Entwicklung von digitalen Zwillingen, die die aus Sensoren gesammelten Daten nutzen, um die Reaktion des Bauwerks im digitalen Raum zu reflektieren [26].

3.3 (Teil-)Automatisierte Erstellung von BIM-Modellen

Die Anwendung von BIM im Infrastrukturmanagement wird derzeit intensiv erforscht. Aufgrund ihres individuellen Charakters, der komplexen Geometrie und der Vielzahl ihrer Bestandteile ist die automatisierte Erfassung von Brücken besonders komplex. Eine manuelle Erstellung entsprechender BIM-Modelle auf Grundlage vorhandener 2D-Pläne und Daten-

banken ist angesichts der Menge und Komplexität ein erheblicher Aufwand und birgt vielfältige Herausforderungen: fehlende, unleserliche oder widersprüchliche Plangrundlagen, undokumentierte Projektänderungen oder Erweiterungen am Bauwerk. Mit jüngsten Entwicklungen bei den 3D-Vermessungstechnologien und Fortschritten im Bereich der künstlichen Intelligenz ergeben sich neue Möglichkeiten, um Prozesse und Verfahren für eine automatisierte Generierung von BIM-Modellen für Brücken im Bestand zu entwickeln und diese auf reale Brückenbauwerke anzuwenden [14].

In einem Forschungsprojekt im Auftrag der BASt [14] wurde ein neuartiger, modularer Ansatz für die teilautomatisierte Umwandlung von Punktwolken in Ist-BIM-Modelle erarbeitet. Der Ansatz basiert auf einer Kombination von Anwendungen künstlicher Intelligenz und heuristischen Algorithmen. Neuronale Netze wurden mit synthetischen sowie realen Datensätzen typischer Brückenelemente trainiert und an Punktwolken tatsächlicher Bauwerke getestet. Die erkannten Brückenelemente werden dabei in ein trianguliertes Oberflächennetz umgewandelt. Anschließend können Volumenelemente mittlerer geometrischer Komplexität generiert werden. Das Endergebnis ist ein Ist-BIM-Modell einer Brücke und ihrer Elemente, angereichert mit semantischen Informationen aus der Bauwerksdatenbank SIB-Bauwerke (z. B. Typ, Eigenschaft, Beziehung, Material) und BISStra (Bundesinformationssystem Straße), im standardisierten und offenen IFC-Format (*Industry Foundation Classes*) für den Austausch von Bestandsmodellen. Der wesentliche Nutzen der realisierten (teil-)automatisierten Erstellung von Bauwerksmodellen im Bestand

besteht zum einen in einer deutlichen Beschleunigung der Modellerstellung gegenüber einer konventionellen manuellen Erstellung. Dadurch können die für den Erhaltungsprozess benötigten Bauwerksinformationen dem Anwender schneller zur Verfügung gestellt werden, um eine ganzheitliche Anwendung von BIM auch im Bestand zu ermöglichen. Zum anderen weist das Modell (Darstellung des Ist-, nicht des Soll-Zustands) eine wesentlich höhere Genauigkeit gegenüber herkömmlichen 2D-Plänen auf und bildet durch die Anreicherung mit semantischen Daten die Grundlage für die Zustandsbeurteilung und weiterführende Erhaltungsmaßnahmen in der Betriebsphase. Die generierten BIM-Modelle können dann als Grundlage für den Aufbau digitaler Zwillinge dienen. Das entwickelte Konzept (Bild 4) wurde in Form eines Prototyps umgesetzt und soll als Basis für künftige, großangelegte automatisierte Erfassungskampagnen von Ist-BIM-Modellen von Brücken im Bestand für zukunfts-fähige Brückenmanagementsysteme dienen.

3.4 Reallabor

Ein wichtiges Ziel der BASt-Forschung besteht in der Verfügbarmachung praxistauglicher Entwicklungen. Reallabore sind dafür geeignete Werkzeuge. Hierbei handelt es sich um Testumgebungen, in denen verkehrsinfrastrukturrelevante Innovationen unter realen Bedingungen erprobt, bewertet und weiterentwickelt werden können [27]. Erkenntnisse aus Reallaboren können einen entscheidenden Beitrag zur schnellen Implementierung neuer und innovativer Ansätze in der Praxis liefern. Überdies liefern sie Realdaten, die u. a. für die

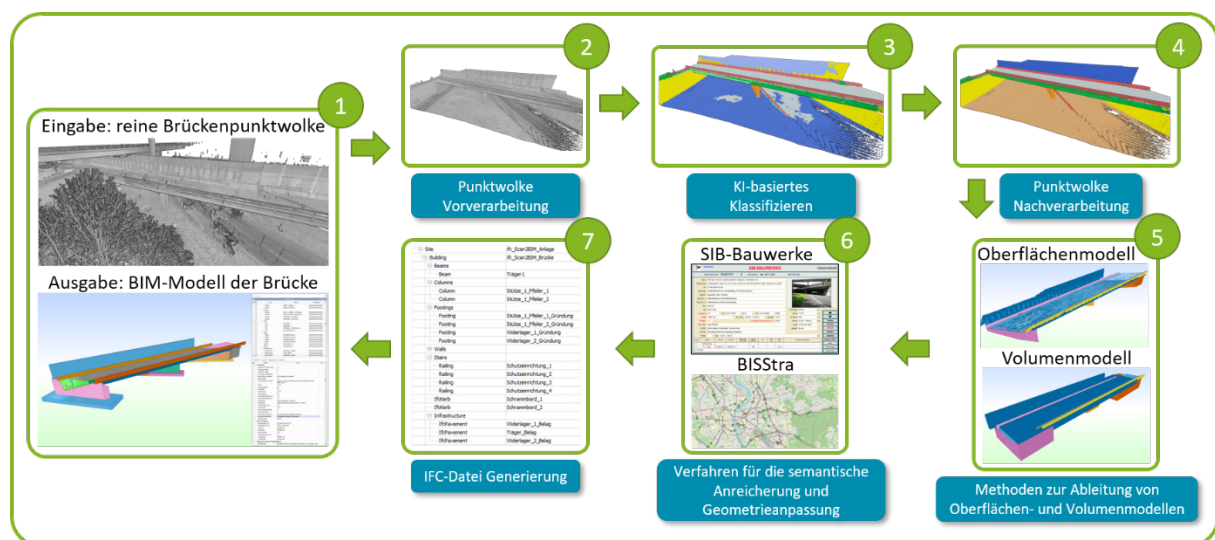


Bild 4 Modularer Ansatz für die (teil-)automatisierte Umwandlung von Punktwolken in Ist-BIM-Modelle
Grafik: nach [14]

Bewertung des Bauwerkszustands essenziell sind. Eine vollständige Variation aller in der Praxis vorkommenden Randbedingungen ist im Reallabor nur eingeschränkt möglich. Dieser Limitierung kann mit einem digitalen Zwilling und dessen virtuellem Experimentierraum begegnet werden [11]. Der digitale Zwilling ist eng mit seinem physischen Asset, das gleichzeitig als Reallabor konzipiert sein kann, über Realdata verbunden. Technologien, Dienstleistungen oder Ansätze, die im Gesamtkonzept eines digitalen Zwillings Anwendung finden, sollen in der Forschungs- und Entwicklungsphase innerhalb eines Reallabors geprüft werden [7].

Im Kontext des BAST-Forschungsschwerpunkts „Intelligente Brücke“ [12] hat die BAST über Reallabore umfangreiche Erfahrungen mit dem Betrieb von Messsystemen unter realen Bedingungen gesammelt und diese im Rahmen von Auftragsforschung weiterentwickelt.

Innerhalb des vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr im Jahr 2015 eingerichteten Digitalen Testfelds Autobahn wurde die 2016 neugebaute Spannbeton-Hohlkastenbrücke im Autobahnkreuz Nürnberg mit vier Messsystemen ausgestattet. Zur Ausstattung gehören ein Bauwerksinformationssystem, instrumentierte Lager und Fahrbahnübergänge sowie ein drahtloses Sensornetz. Über einen Zeitraum von fünf Jahren wurden in Forschungsprojekten der BAST kontinuierlich Messdaten erfasst und mittels geeigneter Algorithmen vollautomatisiert ausgewertet. Als Ergebnis werden kontinuierlich aktualisierte Kennwertverläufe hinsichtlich des Zustands der Brücke und ihrer Bauteile sowie Verkehrsdaten in einer eigens entwickelten Webanwendung angezeigt. Damit handelt es sich bei der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn um die Realisierung von Teilaspekten eines digitalen Zwillings. Die Autobahn GmbH des Bundes plant, den Betrieb über einen Zeitraum von weiteren fünf Jahren wieder aufzunehmen [12].

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der digitale Zwilling nimmt im Rahmen der digitalen Transformation eine Schlüsselrolle ein und kann durch seine vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dazu beitragen, den Herausforderungen im Bereich des Bundesfernstraßennetzes zu begegnen. Die BAST leistet seit einigen Jahren einen großen Beitrag zur Entwicklung des Themas digitaler Zwilling und hiermit eng verbundenen Themen im Rahmen der Bearbeitung unterschiedlicher Forschungsfragen. Es

hat sich gezeigt, dass der digitale Zwilling vielschichtig und komplex ist und daher die Erarbeitung eines modularen Konzepts für den Digitalen Zwilling Brücke unter Berücksichtigung relevanter Anwendungsfälle, Eigenschaften und Kernkomponenten des digitalen Zwillings zielführend ist. Einzelne Komponenten konnten im Rahmen von Forschungsprojekten bereits prototypisch demonstriert werden.

Potenziale des digitalen Zwillings werden z. B. in optimierten Betriebsprozessen, reduzierten und optimierten Erhaltungsmaßnahmen durch kontinuierliche Zustandserfassung sowie im strategischen Lebenszyklusmanagement anhand szenariobasierter Prognosen gesehen. Durch die umfangreiche Datenerfassung und -analyse lassen sich potenziell Entscheidungsverfahren zukünftig auch unter Einbeziehung von Nachhaltigkeitsaspekten über den gesamten Lebenszyklus anhand des digitalen Zwillings unterstützen. Der digitale Zwilling von Ingenieurbauwerken schafft insgesamt das Potenzial, bei maximaler Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Bauwerks den Einsatz von Ressourcen zu reduzieren und damit eine Verbesserung der Nachhaltigkeit der Straßeninfrastruktur zu erreichen.

Um die Potenziale des Digitalen Zwillings Brücke möglichst breit zu erschließen, sind weitere Entwicklungen zu verfolgen, die über die Teilumsetzungen für einzelne Bauwerke hinausgehen. Mit den aktuellen Arbeiten wird das Ziel einer anwendungsorientierten Konzeptentwicklung angestrebt, das verschiedene Ausbaustufen des Digitalen Zwillings Brücke berücksichtigt und damit eine zielgerichtete Umsetzung des digitalen Zwillings in die Praxis unterstützt. Auf diesem Weg werden bedeutende Entwicklungen im Rahmen von Forschungsaktivitäten der BAST unter Realbedingungen, wie an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn und der Brücke duraBAST, erprobt, bewertet und weiterentwickelt.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMVI, Hrsg.): Masterplan BIM Bundesfernstraßen. 2021 – https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bim-rd-masterplan-bundesfernstrassen.pdf?__blob=publicationFile (geprüft am 21.04.2023).
- [2] DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung.

- [3] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, Hrsg.): Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). 2011.
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, Hrsg.): Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING – Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA). 2007.
- [5] Bednorz, J.; Nieborowski, S.; Windmann, S.; Hindersmann, I.: BIM – auf dem Weg zum Digitalen Zwilling. *Straße + Autobahn* (2021) 11, S. 917–924.
- [6] Nieborowski, S.; Windmann, S.; Bednorz, J.; Hindersmann, I.; Zinke, T.: Digitaler Zwilling Brücke im Betrieb – Mögliche Anwendungsfälle. *Bautechnik* 100 (2023) 2, S. 86–93 – DOI: 10.1002/bate.202200089
- [7] Zinke, T.; Reymer, S.; Kosse, S.; König, M.; Wedel, F.; Marx, S.: Konzeptionelle Untersuchung zur Zusammenführung von Komponenten des Digital Twin Brücke. Unveröffentlichter Schlussbericht zu 15.0677/2020/IRB, 2023.
- [8] Morgenthal, G.; Hallermann, N.; Rau, S.; Schellenberg, K.; Martín-Sanz, H.; Schubert, M.; Kübler, O.: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken. Unveröffentlichter Bericht zu FE 69.0006, 2023.
- [9] Hajdin, R.; Schiffmann, F.; Blumenfel, T.; Tanasic, N.: Zukünftige Entwicklung eines Tools für ein indikatorgestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerke. Unveröffentlichter Bericht zu FE 69.0007, 2023.
- [10] Lehardt, A.; Seiler, D.; Gerdas, A.; Bombeck, A.; Lennerts, K.: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur. Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau*, B159, Bremen: Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG, 2020.
- [11] Dabringhaus, S.; Neumann, S.; Hindersmann, I.: Monitoring, Intelligente Brücke, Digital Twin. Positionspapier der Abteilung B Brücken- und Ingenieurbau der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht). 2020.
- [12] Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau*, B178, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2022.
- [13] König, M. K.; Ceik, F.; Embers, S.; Faltin, B.; Herbers, P.; Zentgraf, S.; Braun, J.-D.; Schammler, D.; Steinjan, J.: Kombination von Augmented/Mixed-Reality-Systemen mit weiteren digitalen Technologien. Unveröffentlichter Bericht zu 69.0008, 2023.
- [14] Hajdin, R.; Richter, R.; Isailović, D.; Diedrich, H.; Hildebrand, J.: Entwicklung von Verfahren zur (teil-)automatisierten Erstellung von BIM-Modellen für Straßenbrücken im Bestand. Unveröffentlichter Bericht zu FE 02.0436, 2023.
- [15] Bednorz, J.; Hindersmann, I.: Konzeptionelle Vorarbeiten zur Umsetzung der digitalen Bauwerksakte der duraBASt-Brücke. Unveröffentlichter interner Bericht. 2022.
- [16] Bahlau, S.; Hill, M.; Klein, F.; Kukushkin, A.; Oppermann, L.; Riedlinger, U.; Mertens, M.; Lambracht, C.: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau* B 185, 2022.
- [17] Alqasem, Y.; König, M.: Szenarien basierte Schadenserkenkung: Anwendungen der künstlichen Intelligenz. In: Isecke, B.; Krieger, J. (Hrsg.): *Tagungsband TAE Brückenkolloquium*, Esslingen: Expert Verlag, 2022, S. 137–146.
- [18] BASt (Hrsg.): *Nachrechnung bestehender Brücken*. Fachveröffentlichung der BASt zur Tagung *Nachrechnung bestehender Brücken* (online), 09/2021.
- [19] BASt (Hrsg.): *Digitale Methoden zur Unterstützung der Bauwerksdiagnostik*. *BASt aktuell* (2022) 2, S. 1.
- [20] DBV (Hrsg.): *Merkblatt Brückenmonitoring*. 2018.
- [21] Soons, Y.; Dijkman, R.; Jilderda, M.; Duijvesteyn, W.: Predicting Remaining Useful Life with Similarity-Based Priors. In: Berthold, M. R.; Feelders, A.; Krempf, G. (Hrsg.): *Proc. of 18th Int. Symp. on Intelligent Data Analysis – IDA 2020*, 27.–29.04.2020 in Konstanz, Cham: Springer Int. Publ, 2020.
- [22] Chen, Z.; Cao, S.; Mao, Z.: Remaining Useful Life Estimation of Aircraft Engines Using a Modified Similarity and Supporting Vector Machine (SVM) Approach. *Energies* 11 (2018) 1 – DOI: 10.3390/en11010028
- [23] Çelik, F.; König, M.: A sigmoid-optimized encoder-decoder network for crack segmentation with copy-edit-paste transfer learning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 37 (2022) 14, S. 1875–1890 – DOI: 10.1111/mice.12844
- [24] Li, X.; Jiang, H.; Liu, Y.; Wang, T.; Li, Z.: An integrated deep multiscale feature fusion net-

work for aeroengine remaining useful life prediction with multisensor data. Knowledge-Based Systems 235 (2022), S. 107-117 – DOI: 10.1016/j.knosys.2021.107652

[25] Zhao, R.; Yan, R.; Chen, Z.; Mao, K.; Wang, P.; Gao, R. X.: Deep learning and its applications to machine health monitoring. Mechanical Systems and Signal Processing 115 (2019), S. 213-237 – DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.050

[26] Ullerich, C.; Wenner, M.; Herbrand, M.: smartBRIDGE Hamburg – prototypische

Pilotierung eines digitalen Zwillings. In: Krieger, J. (Hrsg.): Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, Esslingen: Expert Verlag, 2021, S. 247-256.

[27] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, Hrsg.): Reallabore – Innovation ermöglichen und Regulierung weiterentwickeln. 2020 – https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/II/info-reallabore.pdf?__blob=publicationFile&v=20 (Zugriff am 21.04.2023).

www.sandstrahl-schuch.de

SANDSTRAHL SCHUCH

• STAHL • BETON • STEIN

- Anwendung diverser Strahlverfahren
- Korrosions- und Brandschutz
- Betoninstandsetzung
- Abdichtung
- Fußbodensanierung
- Rissinjektion
- Bauteilverstärkung
- Steinreinigung & -instandsetzung
- Graffiti - Entfernung & -Schutz



02826 Görlitz • Holteistraße 10 • Tel. (03581) 8 38 38 • Fax (03581) 70 42 22
02788 Hirschfelde • Siliziumstr. 1/2 • Tel. (035843) 2 74 - 0 • Fax (035843) 2 74 - 44