

[Matthias Haslbeck] (Hauptautor), [Sebastian Friedrich] (Co-Autor 1), [Iris Hindersmann] (Co-Autor 2), [Jennifer Bednorz] (Co-Autor 3), [Thomas Braml] (Co-Autor 4)

* Der Verlag behält sich vor, die Liste bei mehr als 4 Autoren bei Bedarf et al. abzukürzen. Die vollständige Liste aller Autoren befindet sich am Ende des Beitrags. Bitte kennzeichnen Sie in dieser Liste den Korrespondenzautor.

[Digitalisierung der Versuchsplanung – Messprojekte im Ingenieurbau planen mit MR-Brille, 3D-Druck und QR-Codes]

[Die Methodik des BIM zur Planung von Messprojekten für Monitoring und datengestützte Bestandsbewertung]

Die Digitalisierung und der Einsatz der BIM-Technologie werden für die Baubranche immer wichtiger. Doch nicht nur für die Planung und den Bau von Neubauten, sondern auch für die Umsetzung und den Betrieb von Messeinrichtungen an bestehenden Hoch- und Ingenieurbauten können die BIM-Methode und die visuelle Darstellung des Objekts in den physikalischen und virtuellen Modellen hilfreiche Werkzeuge sein.

Am Beispiel eines Projekts zur datengestützten Bewertung einer Bestandsbrücke wird gezeigt, wie BIM, 3D-Druck, QR-Codes und Mixed-Reality-Brillen die Planung von Messeinrichtungen unterstützen. Die einsetzende digitale Transformation im Bauwesen und der wachsende Bedarf an datenbasierten Nachweiskonzepten für alternde Verkehrsinfrastrukturobjekte eröffnet dabei ein enormes Potenzial für die Digitalisierung. Anhand einer geplanten Versuchskampagne zur **Anpassung von statischen Modellen an gemessene Daten durch Bayes'sches Updating** wird gezeigt, wie dieses Potential genutzt werden kann, um die Planung und Ausführung von Messprojekten an Bauwerken zu unterstützen und eine Steigerung der Qualität und der Effizienz zu erreichen. Durch die Erzeugung und Visualisierung von dreidimensionalen Bauwerksmodellen und die Bereitstellung von technischen Spezifikationen der Messeinrichtungen durch QR-Codes kann sowohl der Installationsprozess als auch die spätere Betreuung der Messtechnik unterstützt werden.

Stichworte [Digitalisierung im Bauwesen; Mixed Reality; 3D-Druck; Systemidentifikation; QR-Codes]

Digitization of test planning - Planning measurement projects in civil engineering with MR glasses, 3D printing and QR codes

Digitization and the use of BIM technology are becoming increasingly important for the construction industry.

The BIM method and the visual representation of the object in the physical and virtual models can be helpful tools not only for the design and construction of new buildings, but also for the implementation and operation of measurement facilities on existing buildings and engineering structures.

*Using the example of a project for data-based assessment of an existing bridge, we will show how BIM, 3D printing, QR codes and mixed reality glasses support the design of measurement facilities. The incipient digital transformation in the construction industry and the growing need for data-based recalculation concepts for aging transport infrastructure opens up enormous potential for digitalization. Based on a planned measurement for the data-driven update of the static system using Bayes' Theorem, it is shown how this potential can be used to support the planning and execution of measurement projects on structures, thereby achieving an increase in quality and efficiency. By generating and visualizing three-dimensional models of structures and providing technical specifications of the measurement equipment through QR codes, both the installation process and the **subsequent maintenance of the instrumentation** can be supported.*

Keywords [digitization in construction; mixed reality; 3d printing; system identification; QR codes]

1 Einleitung

1.1 Digitaler Wandel in der Baubranche

Die Möglichkeiten der Digitalisierung im Lebenszyklusmanagement sind im Bauwesen noch längst nicht ausgeschöpft. Eine Studie zum Digitalisierungsgrad verschiedener Wirtschaftssektoren zeigt, dass die Baubranche deutlich unter ihren Möglichkeiten bleibt und auf den untersten Rängen zu finden ist (vgl. Bild 1) [1]. Im Bereich der Planung, des Baus und der Bauüberwachung hält die Digitalisierung bereits Einzug, auch wenn eine durchgehende Prozesskette noch nicht vorhanden ist [2-5].

Auch für die Planung von Messeinrichtungen und die Visualisierung des Vorhabens bietet die digitale Transformation enormes Potenzial zur Unterstützung von Planungsprozessen und der Arbeitsvorbereitung. Schwachstellen in der Konzeption können aufgedeckt, die Anbringung der Sensorik erleichtert und technische Spezifikationen zum Messaufbau einfacher zugänglich gemacht werden. Neben der Methodik des Building Information Modeling (BIM) können dabei

Mixed Reality, 3D-Drucker und QR-Codes einen sinnvollen Beitrag zur erfolgreichen Projektrealisierung leisten [6].

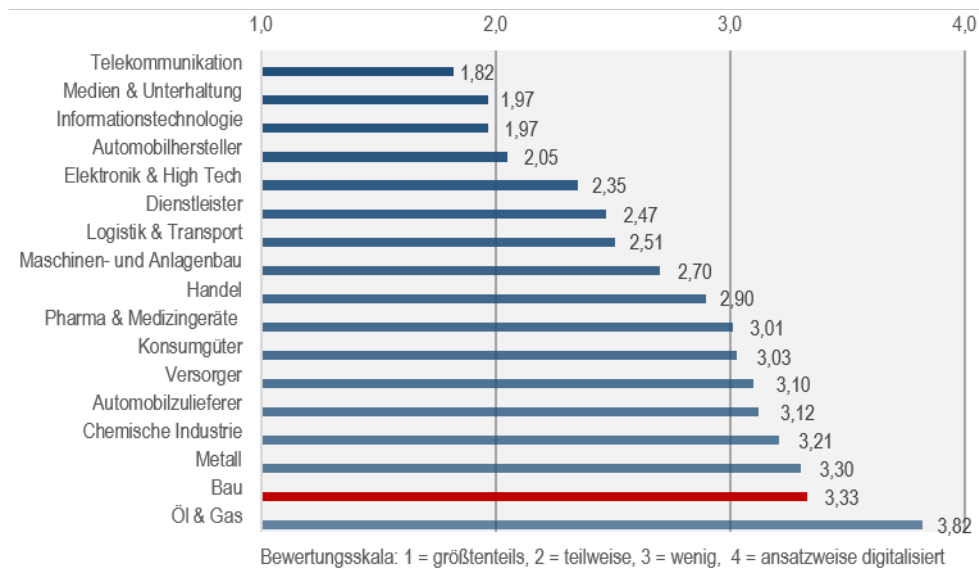


Bild 1 Bewertung des Digitalisierungsgrades verschiedener Branchen nach [1]

1.2 BIM in der Bestandsplanung

Als Building Information Modeling (BIM) wird eine kooperative Arbeitsweise bezeichnet, die für digitale Bauwerksmodelle alle relevanten Informationen eines Bauwerks auf Basis eines digitalen Modells konsistent erfasst und verwaltet, wobei besonderes Augenmerk auf den Austausch und die Übergabe von Informationen während des gesamten Lebenszyklus gelegt wird [7].

Die Methodik des BIM findet derzeit im Bereich des Erhaltungsmanagements und des Betriebs von Bestandsbauten seltener Anwendung als für die Planung von Neubauten, gewinnt aber zunehmend an Bedeutung [8–10]. Der Hintergrund hierfür ist, dass für bestehende Bauwerke zu meist keine digitalen dreidimensionalen Modelle vorliegen. **Die Integration von Sensorik in das BIM-Modell der Brücke erfolgt in der Regel erst nach deren Einbau und nicht schon im Planungsprozess.** In diesem Beitrag wird gezeigt, wie sich die Arbeitsweise des BIM nutzen lässt, um die Ausstattung von Bauwerken mit Messeinrichtungen effektiv zu planen und dass durch die Einbettung von Sensorik in ein BIM-Modell Vorteile im Hinblick auf ein intelligentes Erhaltungsmanagement entstehen. **Die Erstellung von BIM-Modellen für die Planung von Versuchs- und Überwachungseinrichtungen erfordert dabei auf Grund des geringeren Detaillierungsgrads deutlich weniger Aufwand als für die Bereitstellung von Modellen zum Zweck der**

Objektplanung und des Unterhalts notwendig wäre. Hierin sind beispielsweise auch Ausstattungsdetails, Einbauteile, Entwässerungseinrichtungen oder die Gründung darzustellen. Stattdessen genügt ein Modell mit vereinfachter Geometrie des Überbaus und der Unterbauten („Level of Detail“ ca. 200). Somit ist die Methodik auch dann einsetzbar, wenn kein bestehendes Modell der Brücke vorliegt oder sich die Planungen noch in einem sehr frühen Stadium befinden.

Auf die Möglichkeiten der umfassenden Modellierung aller Systemkomponenten wird in diesem Beitrag nicht näher eingegangen, sondern stattdessen auf [11] verwiesen, wo die Generierung eines as-built-Modells der hier betrachteten Brücke beschrieben wird.

1.3 Sensorinstallation und Datengewinnung

Bedingt durch die Alterung der Verkehrsinfrastruktur und die gleichzeitig steigenden Verkehrslasten gewinnen Methoden der datengestützten Bauwerksbewertung und des Monitorings an Bedeutung [12; 13]. Die richtige Wahl der Sensorik sowie der Ort der Anbringung hängen dabei vom Ziel der Messung und den Verfahren zur Bewertung des Ist-Zustands und der zukünftigen Entwicklung ab [14]. Je nach den örtlichen Gegebenheiten kann dabei eine detaillierte Vorplanung oder ein hoher Vorfertigungsgrad der einzusetzenden Technik notwendig werden, etwa um Eingriffe in den Verkehrsfluss zu minimieren. Sensorik, die langfristig am Bauwerk verbleiben soll, muss einer regelmäßigen Wartung und Kontrolle unterzogen werden. Diese machen es notwendig Informationen zur verbauten Technik jederzeit abrufbar zu machen.

2 Anwendung auf Messprojekte

2.1 Beschreibung des Bauwerks

Am Autobahnkreuz Köln-Ost (BAB A3/A4) wurde ein Versuchsgelände, das duraBAST (Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal), geschaffen, auf dem Versuche und Erprobungen aus allen Bereichen des Straßenwesens durchgeführt werden können. Neben zahlreichen Demonstrations- und Untersuchungsstrecken ist auch ein Brückenbauwerk Teil der Anlage (vgl. Bild 2), welches bereits 2016 mit Sensorik zur Erfassung von Dauerhaftigkeit und Verformung ausgestattet wurde. Die Brücke soll im Rahmen des Forschungsprojekts „Erstellung eines Finite-Elemente-Modells und Kalibration des Modells anhand von realen Messdaten einer Brücke auf dem Gelände des duraBAST (FE 89.0344/2019)“ mit weiterer Sensorik ausgestattet werden.

Die zweifeldrige Spannbetonkonstruktion aus dem Jahr 1973 weist eine Gesamtlänge von 66 m

auf, wobei auf die Einzelfelder Stützweiten von 30,5 m und 35,5 m entfallen. Der zweizellige Hohlkasten wurde mit einer konstanten Höhe von 1,40 m ausgeführt. Im Rahmen einer Nachrechnung des Bauwerks wurden Defizite in der Tragfähigkeit sowohl für die Nachweisführung nach Stufe 1 als auch nach Stufe 2 der Nachrechnungsrichtlinie [15] festgestellt, welche sich insbesondere auf die Nachweise zur Dekompression und der Querkrafttragfähigkeit beziehen.



Bild 2 Ansicht der Spannbetonbrücke am Autobahnkreuz Köln-Ost (Baujahr 1973), die mit weiterer Sensorik ausgestattet werden soll

2.2 Vorhabensbeschreibung

Mit dem Ziel eines datengestützten Updates des Finite-Elemente-Modells des Bauwerks soll im Rahmen des Projekts FE 89.0344/2019 auf dem duraBAST ein Konzept erarbeitet werden, das eine zielgerichtete Kalibrierung des statischen Modells anhand der zu gewinnenden Messdaten möglich macht. Durch ein an den Ist-Zustand angepasstes statisches Modell des Bauwerks kann so die Unsicherheit in der Bewertung des Bestands verringert werden.

Randbedingung der Planung für das Projekt war insbesondere die Notwendigkeit der Anbringung der Sensorik im laufenden Betrieb, um den Verkehrsfluss auf den unter der Brücke verlaufenden Autobahnzubringern gewährleisten zu können. Aus diesem Grund wurde auf eine detailgetreue Planung der gesamten Messkette und auf eine weitestgehende Vorkonfektionierung der anzubringenden Messeinrichtungen geachtet.

Die Planungen umfassen dabei sowohl Versuche zum dynamischen als auch zum statischen Verhalten des Bauwerks unter definierter Belastung. Dabei soll besonderes Augenmerk auf die Eignung verschiedenster Messsysteme gelegt werden, die eine Rückführung der gewonnenen Messdaten auf die Systemparameter ermöglichen. Auf Grundlage ausführlicher Literaturrecherchen und der Erfahrungen aus einem Vorgängerprojekt [12] ist die Verwendung folgender Messeinrichtungen geplant:

- Tachymetrische Verformungsmessungen am Überbau
- Optische Bewegungs- und Verformungsanalyse
- Dehnungsmessung unter Verwendung elektrischer Dehnmessstreifen
- Dehnungsmessung durch faseroptische Sensorik
- Beschleunigungsmessung
- Neigungsmessung

Für die Darstellung der technischen Hintergründe der Messeinrichtungen und deren Verwendung im Rahmen eines verwandten Messprojektes an einer Brücke im bayerischen Roding wird auf [12 ;16] verwiesen.

2.3 Erstellung des BIM-Modells der Brücke

Um die Möglichkeiten der ganzheitlichen Planung durch BIM und der Visualisierung durch virtuelle und physikalische Modelle nutzen zu können, wurde ein vereinfachtes BIM-Modell der Versuchsbrücke erstellt. Im Gegensatz zur Planung eines Neubaus oder zur Generierung eines umfassenden Modells für die Abbildung des gesamten Lebenszyklus wurde der Fokus auf die Darstellung der wichtigsten Tragwerkselemente gelegt, so dass die Einbindung der geplanten Sensorik optimal erfolgen kann. **Auf Basis der Bestandsunterlagen wurden lediglich der Überbau und die Pfeilerwände abgebildet und im Datenmodell abgelegt.** Bedingt durch die konstante Querschnittshöhe konnte dabei beispielsweise der Überbau vereinfacht durch Extrusion einer 2D-Liniengrafik erstellt werden. Um die Notwendigkeit von Eingriffen in den Verkehrsfluss erörtern zu können, wurden Grünflächen und Fahrbahnen der überführten Verkehrswege in das Modell aufgenommen. Auf die Integration von Ausstattungselementen wie der Lärmschutzwand konnte verzichtet werden, da alle Arbeiten von unterhalb der Brücke ausgeführt werden. Bild 3 zeigt ein Rendering des BIM-Modells mit allen berücksichtigten Konstruktionselementen. **Als Softwareprodukt kam Autodesk-REVIT zum Einsatz.** Eine Seite des Modells wurde bewusst nicht abgeschlossen, um den Querschnitt des Bauwerks sichtbar zu belassen.

Eine umfangreiche Erläuterung der Methodik des BIM und insbesondere der möglichen Detaillierungsgrade können [8; 17–20] entnommen werden.

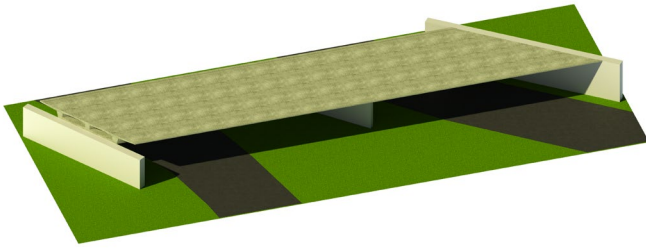


Bild 3 Rendering der Versuchsbrücke vor Integration der Sensorik

2.4 Integration der Sensorik

Ein zentraler Bestandteil der hier beschriebenen BIM-Anwendung war die Modellierung von Sensorik im Modell als Teil des Planungsprozesses für die Ausstattung des Versuchsbauwerks. Durch die Definition von Teilefamilien, d.h. parametrisierten Objekttypen, in denen die Kenngrößen der einzelnen Sensoren hinterlegt werden können, ist die Integration von Sensoreigenschaften im BIM-Modell möglich. Hierdurch können produktspezifische Informationen beispielsweise aus Datenblättern, oder auch auf den einzelnen Sensor angepasste Spezifikationen wie Kalibrierzertifikate zugänglich gemacht werden. Die bereits am Bauwerk befindlichen Sensoren zur elektrischen und faseroptischen Dehnungsmessung wurden dabei ebenso abgebildet wie auch die zusätzlich geplante Messtechnik mit den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Messeinrichtungen. Bild 4 zeigt eine Darstellung der Brücke mit der unter der Fahrbahndecke bereits befindlichen Sensorik. Änderungen in der Sensorposition oder das Einfügen zusätzlicher Sensoren sind problemlos möglich, was das Nachführen von Planungsänderungen oder das Einarbeiten von nach der Installation der Sensorik gewonnenen Informationen ermöglicht. Insbesondere die Nachführung von am Bauwerk bestimmten Sensorpositionen kann so Ungenauigkeiten und Fehler bei der Anbringung der Sensorik aufdecken und Fehlinterpretationen in der Datenanalyse vermeiden.

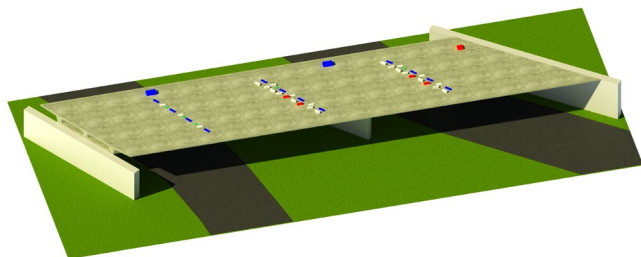


Bild 4 Auf der Versuchsbrücke befindliche optische und elektrische Dehnungssensorik und Temperaturmesseinrichtungen

Neben der Hinterlegung im Programm lassen sich zusätzliche Informationen zur verwendeten

Messtechnik auch in den gedruckten Plänen auf einfache Weise darstellen. Durch die Verwendung von QR-Codes, welche direkt aus dem Modell in abgeleitete Zeichnungen übernommen werden, können auch in den Plandarstellungen **Zusatzinformationen zu den eingesetzten Messsystemen oder zum geplanten Arbeitsablauf einfach zugänglich gemacht werden. Durch die webbasierte Ablage kann beispielweise eine umfangreiche technische Dokumentation der eingesetzten Messtechnik, der Datenblätter zu den eingesetzten Sensoren oder der Arbeitsanweisungen zur Sensoranbringung genau dann abrufbar gemacht werden, wenn diese auch tatsächlich benötigt wird.** Die in vielen Bereichen der Industrie bereits weit verbreitete Technologie des QR-Codes [21; 22] kann auch in der Planung von Messprojekten des Bauwesens erfolgreich eingesetzt werden. Durch die Integration der 2-dimensionalen Codes im Modell und auf gedruckten Plänen können mittels einer hinterlegten URL-Information beliebige Sensorangaben zur Verfügung gestellt werden. Bild 5 zeigt einen Ausschnitt eines aus dem BIM-Modell abgeleiteten Plans, in dem sowohl ein elektrischer Dehnmessstreifen als auch der zugehörige QR-Code dargestellt sind. Mittels eines QR-Code-Scanners, wie er in den meisten Smartphones, Tablets oder auch MR-Brillen standardmäßig verfügbar ist, können sensorspezifische Informationen ständig abgerufen werden, was neben der Planung von Projekten auch die Anbringung und Weiternutzung von Messeinrichtungen erleichtert. Der in Bild 5 dargestellte QR-Code zeigt nach dem Abruf mittels eines QR-Scanners alle notwendigen Informationen.

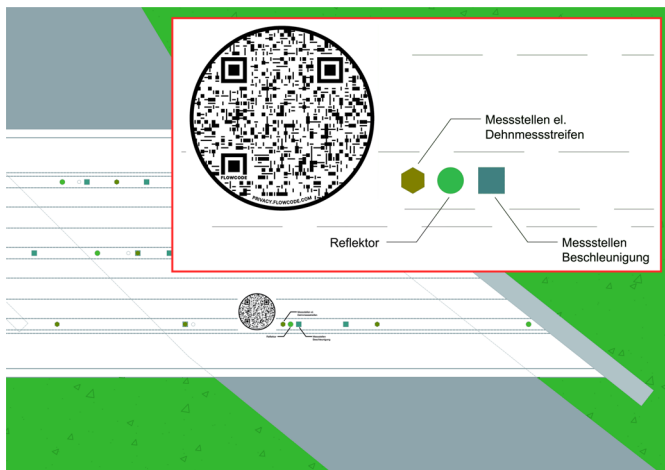


Bild 5 Ausschnitt aus einem vom BIM-Modell abgeleiteten Plan mit Symbolisierung eines Dehnmessstreifens vom Typ PML-120-11 und zugehörigem QR-Code

2.5 Dreidimensionale Visualisierung der Planung

Neben dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen Verfahren zur Integration von Sensorkonzepten in das Datenmodell des Bauwerks bieten sich auch Methoden der Erstellung von 3D-PDFs, des

3D-Drucks und der Nutzung von Mixed-Reality-Brillen (MR-Brillen) an, um den Austausch unter den Projektbeteiligten zu fördern und den Stand der Planungen leicht zugänglich und übersichtlich zu vermitteln.

2.5.1 3D-PDF

Skalier- und drehbare Abbildungen des 3D-Modells können neben der Darstellung im Konstruktionsprogramm selbst auch durch 3D-PDFs generiert werden. Diese zeichnen sich insbesondere durch ihre moderate Dateigröße und die Universalität des Dateiformats aus und lassen sich auch in Textdokumente einbetten [23]. 3D-PDFs können aus REVIT, **ALLPLAN oder anderen BIM-Anwendungen direkt oder durch Plug-Ins erzeugt und von vielen gängigen PDF-Readern gelesen werden**. Diese Eigenschaften ermöglichen es, Modelldarstellungen als Mail-Anhang zu senden und durch den Einsatz von zumeist bei allen Projektbeteiligten vorhandener Software auch mit Verantwortlichen außerhalb des Baubereichs ohne Lizenzierung der CAD **bzw. der BIM-Anwendung** zu teilen. In Bild 6 ist ein Screenshot aus einer 3D-PDF abgebildet, in dem sowohl die Brücke als auch die geplante Sensorik dargestellt sind. Ein Abruf weiterführender Daten zum Modell, wie die Art der Sensorik, ist in solch einem Format leider nicht möglich. Einschränkungen in der Abrufbarkeit der dreidimensionalen Darstellung ergeben sich häufig auf Mobilgeräten, die zumeist keine standardmäßige Unterstützung von 3D-Dateien bieten, sondern erst die Installation eines Readers aus externer Quelle erfordern.

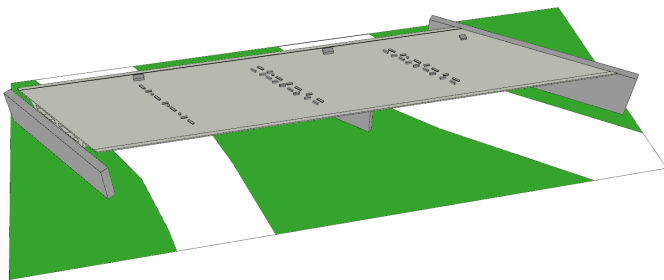


Bild 6 Screenshot aus einem skalier- und drehbaren 3D-PDF der Projektbrücke

2.5.2 Mixed Reality – Brille

Mixed Reality (MR) beschreibt grundsätzlich die Anreicherung der natürlichen Wahrnehmung durch künstliche Elemente. Dabei bleibt die Umgebung für die AnwenderInnen sichtbar und wird durch 3D-Hologramme ergänzt. Somit stellt die Mixed Reality ein Zwischenstück zwischen der reinen Anzeige von Zusatzinformationen (Augmented Reality) und einer vollständig computergenerierten Umgebung dar (Virtual Reality) [24].

Zur Darstellung von Objekten werden zumeist Brillen eingesetzt, die die Umgebung durch Hologramme ergänzen und auch bei Änderung der Blickrichtung oder des Standorts des Nutzers im Raum ortsfest verankert sind. Die angezeigten Objekte sind dabei jederzeit intuitiv skalierbar und drehbar und können frei verschoben werden. Die Bilder 7 und 8 veranschaulichen die Anwendung dieser Technologie aus der Perspektive des Nutzers im Rahmen der Planung und in einer Besprechungssituation. Auch eine gemeinsame Betrachtung durch mehrere NutzerInnen wäre bei Synchronisation mehrerer Brillen möglich. Vorteile bietet die Technologie bei Fragen zur Planung von Messsystemen, sowie bei Vorbesprechungen mit dem ausführenden Personal durch die detailgetreue Darstellung im dreidimensionalen Modell. Dabei besteht nicht nur die Möglichkeit eine Gesamtansicht im Raum zu erzeugen, sondern auch so zu sagen in das Modell „einzutauchen“, indem sich der Nutzende auf das Hologramm zubewegt, was in Bild 9 dargestellt ist.

Anwendung im Zusammenhang mit dem Building-Information-Modeling (BIM) findet diese Technologie beispielsweise bereits für die Ergänzung von historischen Gebäuden durch fehlende architektonische Elemente. [25]



Bild 7 Verwendung einer MR-Brille im Rahmen der Versuchsplanung



Bild 8 Mittels der MR-Brille erstellter Screenshot der Versuchsbrücke in einer typischen Besprechungssituation

Für die Planung der Projektbrücke auf dem Gelände des duraBAST wurde eine MR-Brille verwendet, die die oben genannten Möglichkeiten bietet. Insbesondere für Fragen zur Anbringung von Sensorik ist die detailgetreue Darstellung von großem Nutzen für die Planung. Im Rahmen von Vorbesprechungen mit dem ausführenden Personal, in denen explizite Messstellen besprochen werden und die Anbringung virtuell durchgespielt werden soll, können mögliche Problemstellen bereits vorab erkannt und beseitigt werden.

Die verwendete Mixed-Reality-Brille ist dabei in der Lage, die exportierten Daten zu Geometrie, Material und Darstellungsoptionen zu lesen und mittels eines Viewers anzuzeigen.

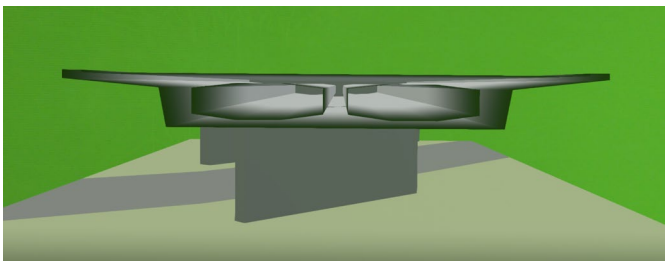


Bild 9 Detailansicht des Kastenquerschnitts beim „Eintauchen“ in die Brückengeometrie

2.5.3 3D-Druck

Zusätzlich zu den virtuellen Modellen wurde auch ein physisches Modell mittels eines 3D-Druckers angefertigt. Durch den Export des BIM-Dateiformats zu einer Lithographie und Einlesen in die druckerspezifische Slicing-Software können aus den Modellinformationen Druckbefehle abgeleitet werden, so dass durch eine Abfolge von zweidimensionalen Druckvorgängen additiv ein dreidimensionales Objekt entstehen kann.

Zur Fertigung des in Bild 10 dargestellten Modells wurde ein professioneller 3D-Drucker verwendet, welcher durch seinen Bauraum von ca. 30 x 25 x 30 cm auch den Druck größerer Modelle zulässt und sich insbesondere für die Veranschaulichung von Planungen im größeren Kreis nutzen lässt.

Als Druckmaterial des Baukörpers wurde Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) verwendet, welches sich durch Widerstandsfähigkeit und die vielfältigen Möglichkeiten der Weiterverarbeitung auszeichnet. Die längste Diagonale des Überbaus konnte mit 390 mm realisiert werden. Auf Grund der Limitierung des Bauraums wurden die Widerlagerwände separat gedruckt und nachträglich zusammengefügt.

Gerade für Vorbesprechungen mit technischem Personal bietet das 3D-Modell einen Vorteil, wenn konkrete Fragestellungen, beispielsweise im Hinblick auf Zugänglichkeit etc. an einem „anfassbaren“ Modell besprochen werden können. **Die Position der Sensoren lässt sich entweder durch entsprechende Symbole mitdrucken oder nachträglich anzeichnen. Im Rahmen des vorgestellten Projekts wurde das erstellte Modell jedoch ausschließlich zur Erläuterung der Randbedingungen bezüglich der örtlichen Situation der Anbringung und zur Planung der Verkehrssperrung verwendet, so dass in dieser Projektphase noch keine Integration der Sensorik in das Modell nötig war.**

Durch die Überführung des digitalen Modells des Bauwerks in ein physisches Abbild mit Hilfe des Additiven Fertigungsverfahrens des 3D-Drucks lassen sich das Vorhaben und dessen Randbedingungen für alle Beteiligten „begreifbar“ machen [8], erfordern jedoch auch die Anwesenheit der Projektpartner in Besprechungen. Die Materialkosten für den Druck liegen bei ca. 10,- €.



Bild 10 Fotoaufnahme des physischen Modells aus dem 3D-Drucker

2.6 Planung des Messequipments und Ablaufplanung

Über die reine Integration der Sensorik hinausgehend lässt das erstellte Modell auch die Planung der Arbeitsabläufe und eine geometrische Prüfung zu [19]. Beispielhaft soll die Bestimmung eines geeigneten Tachymeterstandorts zur geodätischen Deformationsbestimmung und die Planung der Kabelführung und Kabelkonfektionierung gezeigt werden.

Die geeignete Wahl des Tachymeterstandorts ist nicht nur für die Planung der Versuchsdurchführung von Bedeutung, auch die Wahl der Reflektorpositionen wird hiervon beeinflusst. In Vorbereitung auf die Messung wurde die Distanz des Vermessungsgeräts zu den Reflektoren bestimmt, um die zu erwartenden Messunsicherheiten abschätzen zu können, sowie eine geometrische Prüfung zur Sicherstellung der Identifizierbarkeit aller Reflektoren vorgenommen. Leider stehen zum gegenwärtigen Zeitpunkt für die Anwendung des BIM noch keine spezialisierten Hilfsmittel für die Planung von Messeinrichtungen zur Verfügung, so dass die Teilefamilie „Rohre“ zur Darstellung der Sichtverbindung zwischen Tachymeter und Reflektor zum Einsatz kam.

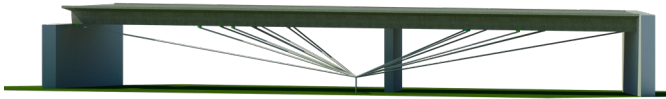


Bild 11 Kollisionsprüfung und Distanzbestimmung im Rahmen der Planung der Verformungsmessung

Zur Vorkonfektionierung der Messkabel und der Planung der Kabelführung wurden diese ebenfalls im BIM-Modell modelliert und deren Längen ausgelesen. Auf diese Weise wird eine gezielte Bereitstellung der einzuplanenden Längen vor Ort ermöglicht und auch die Beschaffung der benötigten Kabel lässt sich effektiver gestalten. Dies gilt ebenso für die Kostenplanung. Eine Darstellung des Kabelführungskonzepts im Modell ermöglicht zudem die Veranschaulichung der Planungen für alle Projektbeteiligten.

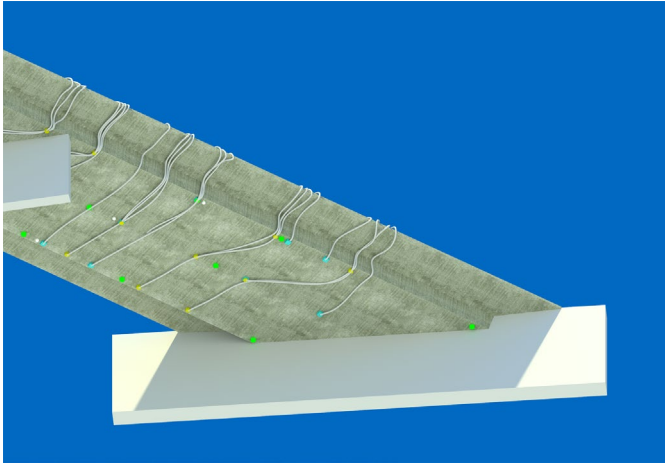
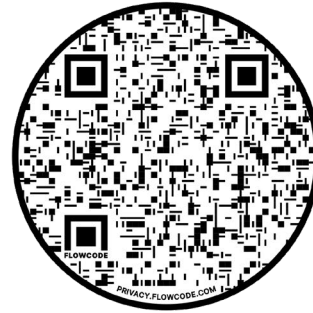


Bild 12 Visualisierung der Kabelführung unter der Brücke

2.7 Dokumentation der angebrachten Sensorik am Bauwerk

Neben der Möglichkeit der Hinterlegung von relevanten Daten in den Planungsunterlagen und im digitalen Modell bietet die in Abschnitt 2.4 bereits angesprochene Technologie der QR-Codes auch die Möglichkeit, sämtliche Unterlagen zur Projektplanung und zu Art und Eigenschaften der einzelnen Sensoren direkt vor Ort am Bauwerk zu hinterlegen. Diese Anwendung bietet insbesondere für Aufgaben der dauerhaften Zustandsüberwachung Potential bei der regelmäßigen Wartung und Kontrolle der Messeinrichtungen, sowie beim Austausch einzelner Komponenten. Bild 13 zeigt beispielhaft einen QR-Code, welcher im Rahmen eines Vorversuchs zum hier beschriebenen Projekt an einem Stahlbetonbalken angebracht wurde. **Als Trägermaterial wurde ein UV- und witterungsbeständiger Kunststoff verwendet, so dass der Abruf der hinterlegten Informationen auch langfristig möglich ist.** Das Abrufen der Sensorinformationen am Bauwerk selbst ermöglicht neben der direkten Kenntnis aller technischen Daten perspektivisch auch die Möglichkeiten der Einsichtnahme in die vom Messsystem aufgezeichneten Daten. Hierzu ist die Erstellung einer URL mit den laufend aktualisierten Sensordaten notwendig, welche in einen dynamischen QR-Code eingebettet ist und bei bestehender Internetverbindung jederzeit abgerufen werden kann. Grundvoraussetzung hierfür ist eine zuverlässige und manipulationssichere Datenspeicherung, welche in der Lage ist, die abgelegten Informationen auf einem Webserver abzulegen und unabhängig vom Dateiformat der Rohdaten darzustellen und ggf. zu visualisieren.



El. Dehnmessstreifen PML-120-11

Bild 13 Auf einem Betonbauteil befestigter, gedruckter QR-Code, der im Rahmen eines Vorversuchs zum Messprojekt angebracht wurde

Die vor Ort verwendeten Hinweise auf die angebrachten Systeme lassen sich auch im digitalen Modell hinterlegen und sind so in Renderings oder PDF-Ausdrucken sichtbar. Bild 14 zeigt ein Rendering des Überbaus mit einem hinterlegten Bild des erzeugten QR-Codes in direkter Nähe zum anzubringenden Dehnmessstreifen.

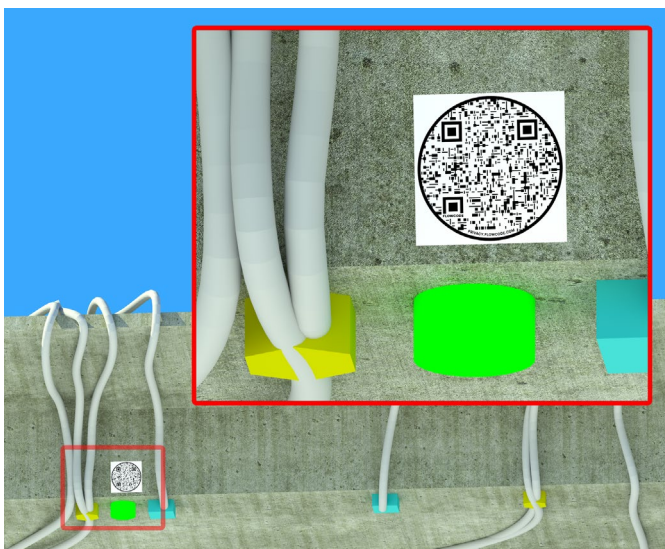


Bild 14 Rendering mit einem im BIM-Modell angezeigten QR-Code

3 Fazit und Ausblick

Der zunehmende Bedarf an messtechnischer Ausstattung von Hoch- und Ingenieurbauwerken bietet ein enormes Anwendungsspektrum für den Einsatz digitaler Technologien in der Planung, Ausführung und Begleitung von Messprojekten.

Sofern bereits ein BIM-Modell aus vorangegangenen Planungen besteht, kann dieses weiter genutzt werden, jedoch verspricht die Methodik des Building-Information-Modeling auch bei feh-

lender Vorarbeit große Vorteile bei der Planung von Messprojekten. Der Aufwand zur Neuerstellung eines Modells lässt sich durch den geringen erforderlichen Detaillierungsgrad moderat halten. Das entstehende Datenmodell kann sowohl für die technisch-wissenschaftliche Planung der Messeinrichtung, zur Spezifizierung und Vorkonfektionierung der Teilkomponenten als auch zur optimierten Konzeptionierung der Versuchsvorbereitung und späteren Durchführung dienen. Die Kosten für das Erstellen eines BIM-Modells egalieren sich dabei sehr rasch. Im Rahmen des zumeist zyklischen Planungsprozesses können virtuelle und physische Modelle des Untersuchungsobjekts und der geplanten Messeinrichtungen helfen, das Vorhaben zu veranschaulichen und damit den Projektbeteiligten leicht zugänglich zu machen. Die digitale Transformation bietet hierbei vielfältige Möglichkeiten von der automatisierten Herstellung mittels 3D-Drucktechniken bis zur Ableitung von 3D-PDFs oder Hologrammen aus BIM-Modellen. Trotz der bereits existierenden Lösungen zur Umsetzung des BIM-Konzepts in Softwarepaketen für die Objektplanung ist gerade die Planung von Zustandsüberwachungssystemen an Ingenieurbauwerken häufig noch durch Restriktionen zu den vordefinierten Teilefamilien oder zur freien Zeichenbarkeit im Raum beschränkt. Dennoch konnte beispielhaft gezeigt werden, dass BIM zur Planung von Messkampagnen einen entscheidenden Mehrwert bringt, insbesondere, wenn komplexe Installationsbedingungen oder zeitliche Einschränkungen eine detaillierte Vorplanung notwendig machen. Bei Verwendung von QR-Codes können die im Modell hinterlegten Informationen zur Sensorausstattung auf einfache Weise, z.B. per Smartphone, abrufbar gemacht [22] und auch laufend aktualisiert werden. Die zunehmende Verbreitung der BIM-Methodik für die Planung von Neubauprojekten bietet zudem die Möglichkeit, Sensorinformationen direkt in bestehende Informationsmodelle zu übernehmen.

Literatur

- [1] Peter, B.; Oppe, M. (2017) Die Digitalisierung im Bauwesen ist eine Chance in: Stahlbau 86, H. 3, S. 202–207. <https://doi.org/10.1002/stab.201710477>
- [2] Breitenberger, M.; Kreutz, J.; Braml, T. (2018) Effizientes BIM für die Planung von Infrastrukturmaßnahmen in: Beton- und Stahlbetonbau 113, H. 1, S. 68–76. <https://doi.org/10.1002/best.201700059>
- [3] Herfs, T. (2019) Neubaustrecke HS2 London – Birmingham: Innerstädtisches Bauen im Bereich historischer Eisenbahninfrastruktur/HS2 London – Birmingham: Construction at Euston in close proximity to historic railway in: Bauingenieur 94, 07-08, S. 255–265.

- [4] Hertz, J. et al. (2021) BIM2CAFM – Prozessdefinition zur Informationsüberführung auf Basis von Information Delivery Manuals/BIM2CAFM – Process Definition for Information Transfer based on Information Delivery Manuals in: Bauingenieur 96, H. 04, S. 103–113.
- [5] Nöldgen, M.; Bach, A. (2018) BIM-gerechter Entwurf von Brücken – Erfahrungen aus der praktischen Anwendung/BIM-adequate design of bridges – Experiences from practical Application in: Bauingenieur 93, H. 02, S. 81–87. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2018-02-61>
- [6] Kraus, M. A.; Braml, T.; Breitenberger, M. (2019) Using Data Glasses inside a modern BIM approach for the Planning, Construction and Maintenance of Structures in: IABSE Congress, New York, New York 2019: The Evolving Metropolis. New York, New York, USA. Zurich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), S. 2197–2202.
- [7] **Bramann, H.; May, I. (2015), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [Hrsg.]** Stufenplan Digitales Planen und Bauen – Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff am: 02. Sep. 2021].
- [8] Borrmann, A. et al. (2015) Building Information Modeling. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [9] Borrmann, A.; Günthner, W. A. (2011) Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen – Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert. Dordrecht, New York: Springer.
- [10] Grabe, M. et al. (2020) smartBridge Hamburg – prototypische Pilotierung eines digitalen Zwillings in: Bautechnik 97, H. 2, S. 118–125. <https://doi.org/10.1002/bate.201900108>
- [11] Bednorz, J. et al. (2020) Methoden zur Generierung von As-Built-Modellen für Bestandsbrücken in: Bautechnik 97, H. 4, S. 286–294. <https://doi.org/10.1002/bate.202000011>
- [12] Haslbeck, M.; Kraus, M. A.; Braml, T. Bayesian Reliability Assessment and System Identification for Existing Concrete Bridge Structures – Elaboration of a template for existing civil engineering structures in: Proceedings of the 17th International Probabilistic Workshop, Edinburgh, **11. bis 19. Sept 2019.**

- [13] Wedel, F.; Marx, S. (2020) Prognose von Messdaten beim Bauwerksmonitoring mithilfe von Machine Learning in: Bautechnik 97, H. 12, S. 836–845.
<https://doi.org/10.1002/bate.202000073>
- [14] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. [Hrsg.] (2018) DBV-Merkblatt Brückenmonitoring – Brückenmonitoring – Planung, Ausschreibung und Umsetzung.
- [15] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung - Abteilung Straßenbau (5/2011) Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie).
- [16] Krieger, J.; Isecke, B. [Hrsg.] (2020) 4. Brückenkolloquium – Fachtagung für Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken: Tagungshandbuch 2020. Tübingen, Ostfildern: expert; TAE, Technische Akademie Esslingen.
- [17] Hausknecht, K.; Liebich, T. (2015) Building Information Modeling BIM. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [18] Nöldgen, M. (2016) BIM im Brücken- und Ingenieurbau. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [19] Scharfenberg, P.; Wellensiek, T. (2017) BIM-Ratgeber für Bauunternehmer – Grundlagen, Potenziale, erste Schritte. Köln: Rudolf Müller.
- [20] Race, S. (2012) Bim demystified – An architect's guide to Building Information Modeling/Management (BIM). London: Riba Publishing.
- [21] Uitz, I.; Harnisch, M. (2012) Der QR-Code – aktuelle Entwicklungen und Anwendungsgebiete in: Informatik-Spektrum 35, H. 5. <https://doi.org/10.1007/s00287-012-0608-5>
- [22] Lenk, B. (2012) QR Code. Kirchheim unter Teck: Monika Lenk Fachbuchverlag.
- [23] Görsdorf, K. (2008) 3D-PDF – Einbettung interaktiver 3D-Modelle in Textdokumente. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller.
- [24] Schart, D.; Tschanz, N. (2018) Augmented und Mixed Reality – Für Marketing, Medien und Public Relations. 2. Aufl. Konstanz, München: UVK Verlagsgesellschaft.
- [25] Bolognesi, C.; Villa, D. (2021) From Building Information Modelling to Mixed Reality. Cham: Springer International Publishing.

Autoren

Matthias Haslbeck (Korrespondenzautor)
matthias.haslbeck@unibw.de
Universität der Bundeswehr München
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg

Sebastian Friedrich
Universität der Bundeswehr München
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg

Dr. Iris Hindersmann
hindersmann@bast.de
Bundesanstalt für Straßenwesen
Abteilung Brücken- und Ingenieurbau
Referat B1 – Betonbau
Brüderstraße 53
51427 Bergisch Gladbach

Jennifer Bednorz, M.Eng.
bednorz@bast.de
Bundesanstalt für Straßenwesen
Abteilung Brücken- und Ingenieurbau
Referat B2 – Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung
Brüderstraße 53
51427 Bergisch Gladbach

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml
thomas.braml@unibw.de
Universität der Bundeswehr München
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg