

Der Beitrag konzentriert sich vorrangig auf die Planung der Messeinrichtungen, die erfolgte Ablaufplanung zur Anbringung der Sensorik und die in einem weiteren Projektschritt geplante Anpassung des statischen Modells eines Ingenieurbauwerkes an die in einem Belastungsversuch gewonnenen Messdaten. Die Herangehensweise und Herausforderung bei der digitalisierten Planung des Projekts werden gezeigt und der Ablauf einer versuchsgestützten Bauwerksbewertung erläutert. Technologien wie die Bauwerksdatenmodellierung, die Nutzung von QR-Codes oder die Anwendung von 3D-Druckverfahren im Rahmen der Visualisierung des Vorhabens spielen hierbei ebenso eine Rolle wie die versuchs- und messtechnischen Aspekte des Vorhabens.

Für die bereits vorangeschrittene Schaffung einer durchgehenden Prozesskette in anderen Bereichen des Bauwesens, insbesondere der Schnittstellenproblematik, sowie der Entwicklung neuartiger Herstellungsverfahren wird auf [3] bzw. für die Planung von Neubauprojekten auf [4] verwiesen.

2 Versuchsbauwerk und Forschungsvorhaben

Am Autobahnkreuz Köln-Ost (BAB A3 und A4) wurde durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein Versuchsgelände eingerichtet. Auf diesem Versuchsgelände befindet sich eine Brücke, welche nie in Betrieb genommen wurde und die Möglichkeit bietet, Belastungsversuche an einem realen Bauwerk durchzuführen. Das Spannbetonbauwerk aus dem Jahre 1972 stellt mit seiner Ausbildung als Kastenbrücke und seiner Gesamtlänge von 66 m ein in seiner Konstruktionsart und Spannweite typisches Infrastrukturbauwerk an den Anschlussstellen des Bundesfernstraßennetzes dar. Auch durch die im Rahmen einer bereits durchgeführten Nachrechnung des Bauwerks erkannten Defizite in Bezug auf die Dekompression des Spannstahts und der Tragfähigkeit bei Querkraftbeanspruchung der Kastenstege ist eine häufig anzutreffende Thematik für Brücken dieses Alters. Für eine detaillierte Erläuterung der Konstruktion wird auf die Objektbeschreibung in [5] verwiesen. Eine Ansicht des Versuchsbauwerks mit darunter verlaufenden Zubringern zeigt Abbildung 2.



Abbildung 2: Ansicht des Versuchsbauwerks aus [5]

Im Rahmen eines Forschungsprojekts an der duraBASt wurden Planungen zur Ausstattung des Bauwerks mit Sensorik zur Dehnungs-, Beschleunigungs- und Durchsenkungsmessung durchgeführt. Das Ziel der Planungen war ein Konzept zur Identifikation der statischen Bauwerkseigenschaften auf Basis von Messdaten zu erarbeiten, welches eine verfeinerte Nachrechnung ermöglicht. Die Durchführung des Updating des statischen Modells beruht dabei auf einer probabilistischen Betrachtung des statischen Systems, was die Anwendung von Verfahren der statistischen Inferenz und Künstlichen Intelligenz für die Modellbildung im Ingenieurbau ermöglicht. Die Ableitung baupraktisch sinnvoller Strategien für eine Integration der Verfahren in die Nachrechnungspraxis stellt dabei einen der Kernpunkte in der Nutzung von kalibrierten FE-Modellen dar.

Neben den eingesetzten Algorithmen und der Umsetzung des Updating-Prozesses für die bisherigen statischen Nachrechnungsannahmen sind hierbei auch Fragen zur Datenerhebung und -qualität zu beantworten, welche eine entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche Anpassung des Finite-Elemente-Modells an die Messergebnisse darstellt.

Unter den geplanten Messgrößen befinden sich dabei unter anderem:

- Elektrische und faseroptische Dehnungsmessungen an der Unterseite des Überbaus
- Tachymetrische Verformungsmessungen zur Durchsenkungsbestimmung bei statischer Belastung durch ein Versuchsfahrzeug
- Beschleunigungsmessung zur Frequenzanalyse bei dynamischer Anregung
- Messung der Neigung des Überbaus bei vorhandener statischer Last

Für eine Beschreibung der für den Einsatz vorgesehenen Versuchseinrichtungen und die Anwendung in einem Vorgängerprojekt wird auf [6; 7] verwiesen.

3 Erstellung eines BIM-Modells

Als erster Schritt in der Digitalisierung der Planungen wurde ein vereinfachtes BIM-Modell des Bauwerks erstellt. Zur Erstellung der zu Grunde liegenden Zeichnungen wurden die Bestandsunterlagen verwendet. Für eine direkte Ableitung der Geometrie aus Punktwolken wird auf [8] verwiesen. Der Detaillierungsgrad konnte gegenüber einem Modell zur Neubauplanung vermindert werden, so dass auf geometrische Details oder weniger relevante Ausstattungselemente verzichtet werden konnte. [5]

Eine Übersichtsdarstellung des entstandenen Modells ist Abbildung 3 zu entnehmen. Um den Kastenquerschnitt des Bauwerks sichtbar zu machen, wurde eine Stützwand nicht bis an die Oberkante des Bauwerks gezogen.

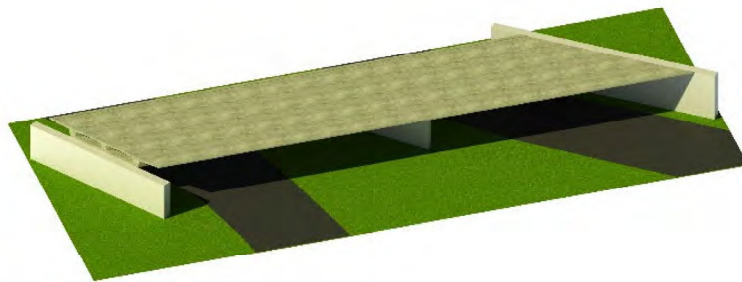


Abbildung 3: Rendering des erstellten BIM-Modells aus [5]

In einem weiteren Schritt wurden die geplanten Messsysteme in das Modell aufgenommen. Unter Verwendung von parametrisierten Objekttypen konnten die geplanten Sensoren und Reflexionsprismen durch symbolische Bauteilkörper repräsentiert werden, für die auch produktspezifische Zusatzinformationen hinterlegt werden konnten. Neben der Anreicherung des Modells durch Informationen innerhalb dieser Teilefamilien wurde insbesondere im Hinblick auf die spätere Ausführung auch eine Möglichkeit geschaffen, produktspezifische Informationen im Modell abrufbar zu machen. Mit Hilfe von QR-Codes, welche sowohl im Modell als auch auf abgeleiteten Plänen sichtbar sind, können Produktdatenblätter oder Arbeitsanweisungen jederzeit digital über das Handy eingesehen werden. Abbildung 4 zeigt sowohl die in das Modell integrierten Sensorsymbole als auch einen im Modell sichtbaren QR-Code. Der in Abbildung 4 dargestellte und in Abbildung 5 vergrößert abgebildete Code kann jederzeit gescannt werden und bietet Zusatzinformationen zu den geplanten Dehnmessstreifen. Auf eine Verwendung im Rahmen der späteren Kontrolle und einer Auslesung der gewonnenen Daten über QR-Codes wird in Abschnitt 5 eingegangen.

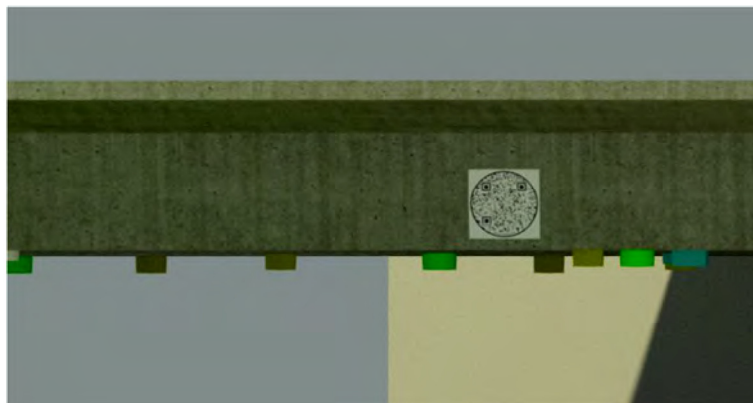


Abbildung 4: In das BIM-Modell integrierte Sensorsymbole und QR-Code

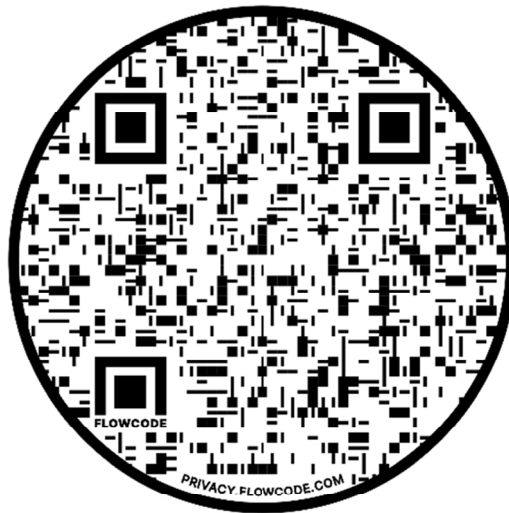


Abbildung 5: QR-Code für Zusatzinformationen zu den geplanten Dehnmessstreifen

Das BIM-Modell ermöglicht neben der Verortung der Sensoren inklusive QR-Code auch die Planung der gesamten Messkette von der Messstelle bis zur Datenerfassungseinheit, so dass eine detaillierte Versuchsvorbereitung ermöglicht wurde [5]. Hierfür wurden die benötigten Messkabel in das BIM-Modell einbezogen, wie in Abbildung 6 dargestellt.

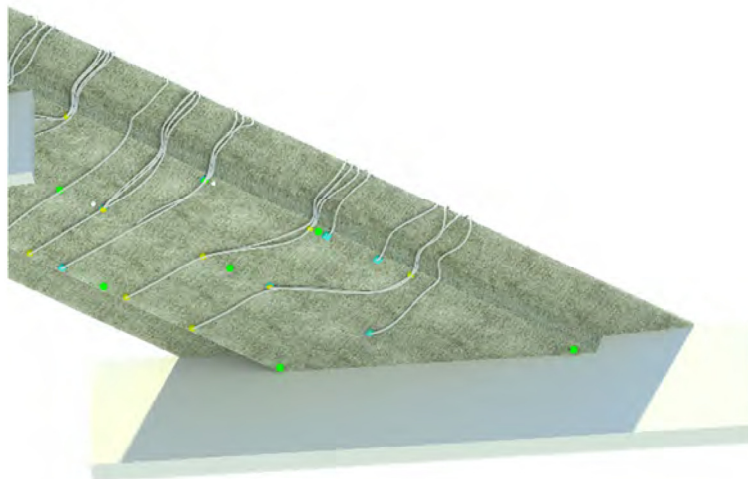


Abbildung 6: Darstellung der Messkabel der elektrischen Dehnmessstreifen im BIM-Modell nach [5]

4 Visualisierung des Modells

Um allen Projektbeteiligten einen Zugang zu den Planungen zu geben, wurden vielfältige Visualisierungsmöglichkeiten angewendet und überblicksmäßig dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung dieser Möglichkeiten findet sich in [5].

4.1 3D-PDF

Der Export von dreidimensionalen, skalier- und rotierbaren PDFs aus der BIM-Anwendung bietet insbesondere dann Vorteile, wenn von Projektbeteiligten nicht auf das Modell selbst zugegriffen werden soll oder kann. 3D-PDFs sind von kostenfrei zugänglichen Readern lesbar und ermöglichen so ein besseres Verständnis der Gegebenheiten vor Ort ohne die Notwendigkeit über eine Lizenz der BIM-Anwendung zu verfügen. [5]

Einen Screenshot aus einer Detailansicht des generierten 3D-PDF zeigt Abbildung 7. Hierin sind auch die Sensorsymbole sowie die Messkabelplanung dargestellt.

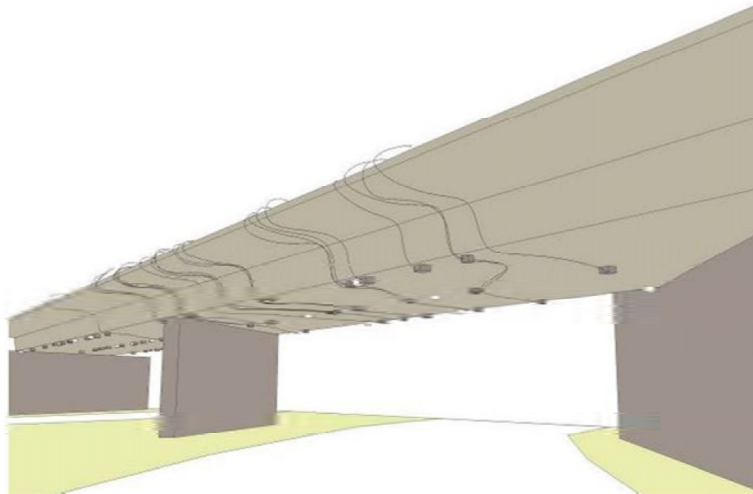


Abbildung 7: Screenshot aus dem 3D-PDF mit Sensorsymbolen und Kabellage

4.1 3D-Druck

Eine physische Repräsentation des Bauwerks kann auf unkomplizierte Weise durch einen 3D-Druck gewonnen werden. Hierbei ermöglichen Schnittstellen zwischen der BIM-Anwendung und der zumeist druckereigenen Software zur Generierung von Druckbefehlen eine durchgängige Prozesskette von der Geometrieerstellung bis zum fertigen Modell. Der in **Abbildung 8** und **9** dargestellte Druck wurde in einem handelsüblichen 3D-Drucker erstellt und soll im Projekt zur Erläuterung der Randbedingungen der Planung verwendet werden.

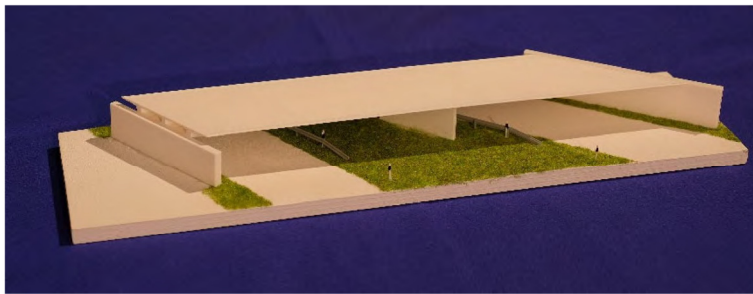


Abbildung 8: Ansicht des 3D-Drucks

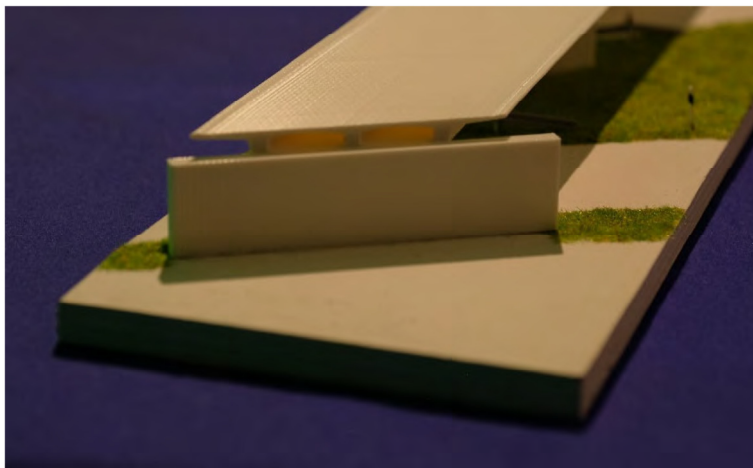


Abbildung 9: Blick in den gedruckten Kastenquerschnitt

4.2 Anzeige eines Hologramms durch eine Mixed-Reality-Brille

Als visuelle und kollaborativ einsetzbare Möglichkeit der Darstellung baulicher Strukturen ist die Verwendung von Mixed-Reality-Brillen (MR-Brillen) eine ausgezeichnete Möglichkeit die Intention von Mess- und Überwachungsmaßnahmen zu veranschaulichen und im Team Besprechungen durchzuführen.

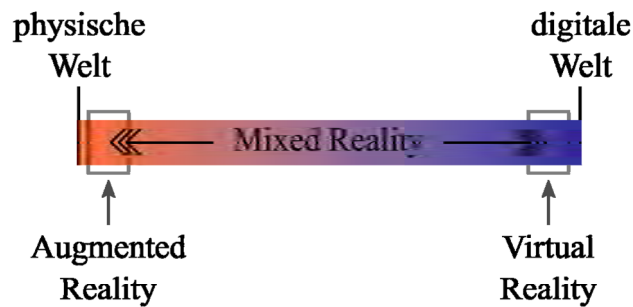


Abbildung 10 Einordnung der Mixed Reality

Der Begriff der Mixed-Reality (MR) kann zwischen der Einblendung von reinen Zusatzinformationen zu einem Objekt (Augmented Reality) und einer vollständig computergenerierten Umgebungsdarstellung, die als Virtual Reality bezeichnet wird [9]. Abbildung 10 zeigt eine Einordnung der Begriffe zwischen physischer und digitaler Welt. Charakteristisch für die MR ist die Darstellung künstlicher Geometrielemente innerhalb der physischen Umgebung des Nutzers. Das Modell wird dabei aus der BIM-Anwendung exportiert und als Hologramm in der MR-Brille dargestellt. Abbildung 11 zeigt das Hologramm beim Blick durch die MR-Brille.

Neben der Möglichkeit des Heranzoomens, der Rotation und des Verschiebens des Modells durch einen einzelnen Nutzer ist bei Kopplung mehrerer Brillen auch die gemeinsame Arbeit an einem einzigen Modell möglich. Diese Darstellungsart kann sehr gut in der Versuchsplanung und der Vorstellung des Projektes Anwendung finden. Abbildung 12 zeigt das Hologramm in einem Besprechungsraum.

Zur Einweisung von Personal und Abstimmungen im Vorfeld der Anbringung der Sensorik kann das dreidimensionale Modell ebenfalls genutzt werden. Dabei können die Sensorpositionen in Augenschein genommen und die Anbringung geplant werden. Die maßstabsgetreue Darstellung und die Skalier- und Drehbarkeit ermöglichen es so, intuitiv einen Zugang zum Projekt zu erhalten. Auch Personal, das nicht von Projektbeginn an in die Planungen eingebunden war und ggf. mit Plandarstellungen wenig vertraut ist, kann so effektiv eingewiesen und praktische Fragestellungen erörtert werden. Insbesondere für die Begrenzung der Zeiten für die Installation der Sensoren und damit verkehrseinschränkenden Maßnahmen kann das Durchspielen des Einsatzes am virtuellen Modell Problempunkte klären und die Anbringung zeiteffizient gestaltet werden. [5]

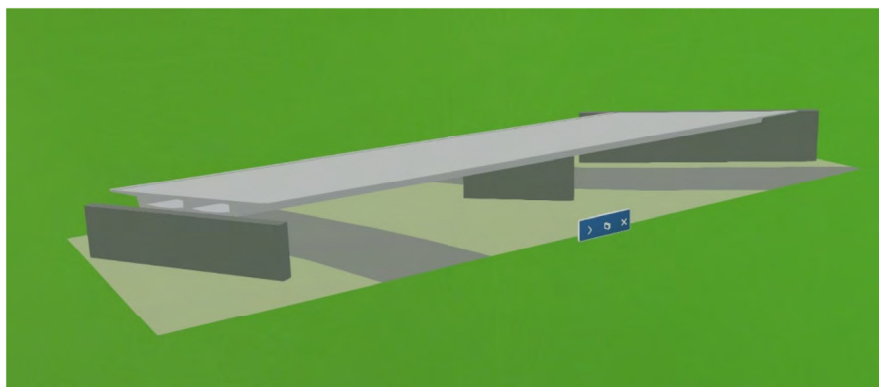


Abbildung 11: Modell der Brücke beim Blick durch die MR-Brille

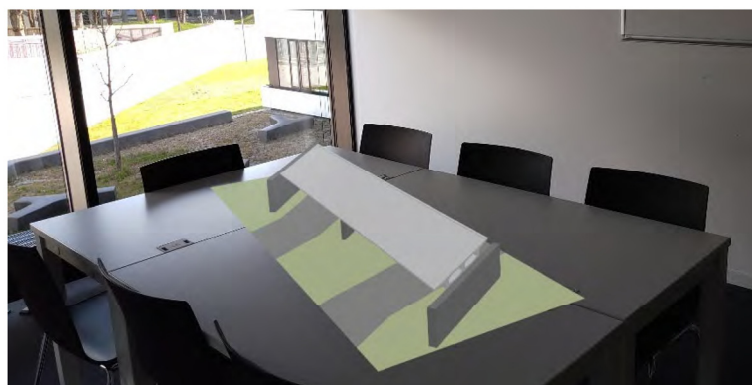


Abbildung 12: Blick durch die MR-Brille in einer Besprechungssituation



Abbildung 13: Blick durch die MR-Brille mit dargestellten Sensorsymbolen

5 Planung der Arbeiten

Bisherige Erfahrungen in der Ausführung von Messprojekten haben gezeigt, dass insbesondere die Positionierung der Sensorik am Bauwerk die Ausführenden vor große Herausforderungen stellt. Für die Anbringung gemäß der Planung war deshalb ein Konzept zu entwickeln, das die Bestimmung der geplanten Messstellen mit einfachen Mitteln von Hubarbeitsbühnen aus ermöglicht.

Um eine zielgenaue Positionierung zu erleichtern wurden deshalb in den Plan markante Punkte am Bauwerk mit entsprechender Bemaßung aufgenommen. Dabei konnten beispielsweise Fugen an der Brücke genutzt werden. Diese sind zwar nicht in den Planunterlagen aufzufinden, jedoch konnten durch einen Abgleich mit 3D-Laserscandaten Betonierfugen im Abstand von 7,8 m ausfindig gemacht werden und in die Arbeitsanweisung integriert werden. Auf diese Weise können auch weit vom eigentlichen Startpunkt der Anbringung entfernte Sensoren positionsgenau angebracht werden ohne dass sich Fehler in der Streckenmessung aufsummieren.

Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt aus der Punktwolke, in der die regelmäßig angeordneten Betonierfugen eingezeichnet und vermaßt wurden. Aus Gründen der besseren Übersicht ist hierin die damals geplante Sensorik nicht mit angegeben.

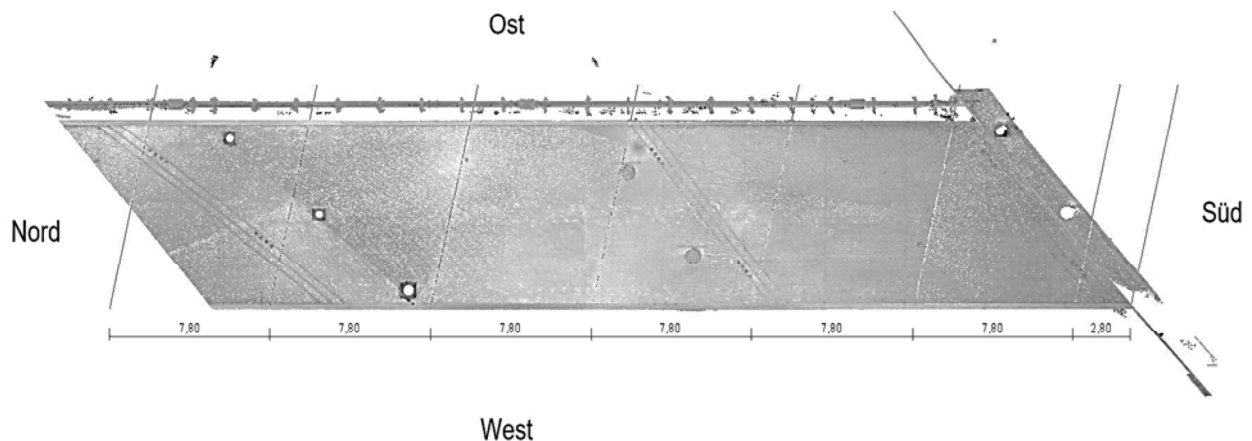


Abbildung 14: Einbindung einer 3D-Punktwolke in die zeichnerische Darstellung zur einfacheren Orientierung am Bauwerk und als Hilfestellung zur Positionierung der Sensorik (Sensorik nicht eingezeichnet)

6 Vorversuch und Dokumentation am Bauwerk

Neben der Hilfestellung bei Planung und Durchführung von Messprojekten können digitale Instrumente auch zur Dokumentation der vorhandenen Ausstattungselemente und zur Nachvollziehbarkeit bei späteren Messungen verwendet werden.

Im Rahmen der umfangreichen Vorbereitungen zum Forschungsvorhaben wurden anhand eines einfachen Versuchs balkens sowohl die verschiedenen Messeinrichtungen erprobt als auch die Dokumentation am Bauwerk beispielhaft gezeigt.



Abbildung 15: Versuchsanordnung

Abbildung 15 zeigt die Versuchsanordnung des 4-Punkt-Biegeversuchs. Begleitend zur Anbringung der Sensorik wurde eine berührungslose Messung mittels optischer Bewegungs- und Verformungsanalyse (Digital Image Correlation, kurz DIC) durchgeführt. Hierbei wird die Veränderung in der Position eines zuvor aufgetragenen Musters von Stereo-Kameras aufgezeichnet. Im Anschluss werden aus diesen Daten Verformungen und Dehnungen berechnet. Für eine detailliertere Darstellung der theoretischen Hintergründe des Verfahrens und dem Einsatz im Rahmen eines Vorgängerprojekts wird auf [10; 11] verwiesen.

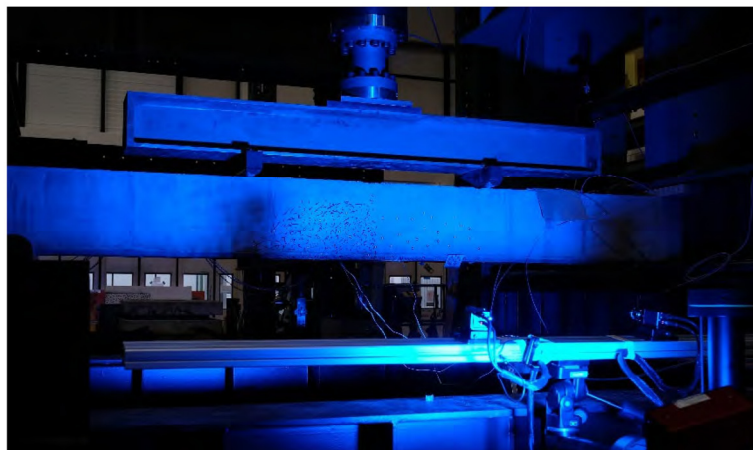


Abbildung 16: Zur besseren Mustererkennung in Blaulicht angestrahelter Balken bei der Messung mittels DIC

Die Anbringung der Sensorik wurde sowohl auf Plandarstellungen dokumentiert als auch am Messobjekt selbst. Mit dem bereits in Abschnitt 3 vorgestellten QR-Code können so auch am Bauwerk alle relevanten Informationen auf einfache Weise hinterlegt und direkt vor Ort abgerufen werden. Hierbei können sowohl während des laufenden Projekts als auch im Fall einer Dauerüberwachung noch Jahre später die Bezeichnung des Sensors, technische Informationen und Installationsangaben abgerufen werden. Zudem lassen dynamische QR-Codes auch eine Aktualisierung der Sensorinformationen zu, was sowohl die Dokumentation von Überprüfungs- und Reparaturarbeiten als auch die Hinterlegung aktueller Sensordaten ermöglicht. [5]

Wie in Abbildung 17 dargestellt, wurde der QR-Code aus Abbildung 5 mit Hilfe einer witterungsbeständigen Trägerplatte auf den Versuchsbalken aufgeklebt und ermöglicht so den Abruf von Informationen zum an dieser Stelle befindlichen und mit schwarzem Abdeckband geschützten Dehnmessstreifen. Dieser kann mittels Smartphone jederzeit auf der Baustelle abgerufen werden.



Abbildung 17: Dokumentation der Sensorik beispielhaft gezeigt anhand eines Dehnmessstreifens

7 Verfolgter Ansatz zur Ableitung zutreffender statischer Modelle

Ein Ziel, welches mit der Nutzung von Finite-Element-Modellen verbunden werden kann, ist Updating des FE-Modells über Messdaten.

Die derzeit gebräuchliche Modellierung baupraktischer Systeme basiert zumeist auf Erfahrungswerten, Planunterlagen oder wie im Fall von Materialparametern auf normativen Vorgaben. Mittels der Untersuchungen soll ein Ansatz gefunden werden die vorliegenden Modelle so zu verbessern, dass diese die gemessenen Bauwerksreaktionen optimal erklären und damit eine realistische Abbildung der baulichen Struktur ermöglichen. Alle bedeutenden Eingangsparameter werden dabei durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben, welche durch die in den Messungen gewonnenen Informationen (Beobachtungen) zutreffender formuliert werden können. [12; 13]

Theoretische Grundlage der Methodik bietet der Satz von Bayes [12; 13], der es ermöglicht, das mathematisch als Inverses Problem aufzufassende Aufgabenstellung zu lösen. Die vor der Messung bekannte Verteilungsfunktion der Systemparameter $p(x)$ kann mit Hilfe der aus den Messergebnissen \tilde{Y} hinzugekommenen Information, welche in $p(\tilde{Y}|x)$ enthalten ist, angepasst werden und resultiert in der Posterior-Wahrscheinlichkeitsverteilung $p(x|\tilde{Y})$. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung (1) beschrieben.

$$p(x|\tilde{Y}) = \frac{p(x) p(\tilde{Y}|x)}{p(\tilde{Y})} \quad (1)$$

Ergebnis des Prozesses ist eine multivariante Verteilung, welche auf analytischem Weg nicht sinnvoll gelöst werden kann. Aus diesem Grund sollen Verfahren der Monte-Carlo-Simulation Anwendung finden. Mit Hilfe der Markov-Chain-Monte-Carlo-Methodik können durch die Bildung von Zufalls-Stichproben mehrdimensionale Wahrscheinlichkeiten des Posteriors ermittelt werden. [14–16]

Aus den numerischen Berechnungen kann sowohl dasjenige Modell ausgewählt werden, welches am besten die Messwerte beschreiben kann, als auch für die einzelnen Parameter eine Wahrscheinlichkeitsdichte ermittelt werden [17], die in eine probabilistische Nachrechnung Eingang finden.

8 Fazit und Ausblick

Das in diesem Beitrag vorgestellte Forschungsvorhaben dient der Überführung digitaler Ansätze in der Planung und der Auswertung von Messungen am Bauwerk in die Ingenieurpraxis.

Nach einer Darstellung des enormen Potentials, das sich durch die Anwendung technologischer Entwicklungen im Bereich der datengestützten Bestandsbewertung ergibt, wird anhand der bereits durchgeführten Planung gezeigt, wie die Digitalisierung genutzt werden kann, um Mess- und Überwachungsprojekte effizienter zu planen und durchzuführen. Hierbei wurden sowohl das Konzept des Building Information Modeling, die Visualisierung des Bauwerks durch 3D-Drucke und PDFs, sowie die Darstellung als Hologramme eingesetzt. Die Verknüpfung von physischer Sensorik und technischen Daten wurde mittels QR-Codes realisiert und anhand eines Vorversuchs gezeigt, dass digitalisierte Planungsansätze auch die Anbringung und Wartung von Messeinrichtungen unterstützen können.

9 Literatur

- [1] Haslbeck, M.; Hertle, T.; Braml, T. (2021) *Application of mobile devices for the rapid assessment of masonry arch bridges – worked example and benchmarking* in: *IABSE Congress, Ghent 2021: Structural Engineering for Future Societal Needs*. Ghent, Belgium. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Zurich, Switzerland, S. 793–800.
- [2] Braml, T.; Haslbeck, M.; Hiller, E. (2020) *Daten im Ingenieurbau – Möglichkeiten der bauwerksspezifischen Beurteilung* in: Siebert, G. [Hrsg.] *Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig: Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau*, S. 51–58.
- [3] Zöllner, R. et al. (2022) *Entwicklung von Prozessen zur automatisierten Planung und Herstellung von Stahlbetonbauteilen* in: *Beton- und Stahlbetonbau*. <https://doi.org/10.1002/best.202100102>
- [4] 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>
- [5] Haslbeck, M. et al. (2021) *Digitalisierung der Versuchsplanung im Ingenieurbau – Planung von Messprojekten mit MR-Brillen, 3-D-Druck und QR-Codes für Monitoring und datengestützte Bestandsbewertung* in: *Bautechnik*. <https://doi.org/10.1002/bate.202100071>
- [6] Haslbeck, M.; Merkl, C.; Braml, T. (2020) *Daten als Grundlage für KI-Anwendungen – Beispielprojekt Brücke Roding* in: Krieger, J.; Isecke, B. [Hrsg.] *4. Brückenkolloquium: Fachtagung für Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken : Tagungshandbuch 2020*. Tübingen: expert, S. 205–214.
- [7] 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*.
- [8] 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>
- [9] Schart, D.; Tschanz, N. (2018) *Augmented und Mixed Reality – Für Marketing, Medien und Public Relations*. 2. Aufl. Konstanz, München: UVK Verlagsgesellschaft.
- [10] Krieger, J.; Isecke, B. [Hrsg.] (2020) *4. Brückenkolloquium – Fachtagung für Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken : Tagungshandbuch 2020*. Tübingen: expert.
- [11] GOM GmbH *GOM Testing – Grundlagen der digitalen Bildkorrelation und Dehnungsberechnung (Technisches Dokument ab V8 SR1)*.
- [12] (2004) *Bayesian data analysis*. 2. ed. Boca Raton, Fla.: Chapman & Hall/CRC.
- [13] Koch, K.-R. (2000) *Einführung in die Bayes-Statistik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [14] (1998) *Markov chain Monte Carlo in practice*. Boca Raton, Fla.: Chapman & Hall.
- [15] Barbu, A.; Zhu, S.-C. (2020) *Monte Carlo Methods*. Singapore: Springer Singapore.
- [16] Liang, F.; Liu, C.; Carroll, R. J. (2010) *Advanced Markov Chain Monte Carlo Methods – Learning from past samples*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- [17] Yuen, K.-V. (2010) *Bayesian Methods for Structural Dynamics and Civil Engineering*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.