

# Erste Ansätze zum BIM-basierten Structural Health Monitoring (SHM)

Martin Köhncke M. Sc.<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Al-Hakam Hamdan<sup>3</sup>, Dr. rer. nat. Stefan Wege<sup>3</sup>,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sylvia Keßler<sup>1</sup>, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Sascha Henke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professur für Konstruktionswerkstoffe und Bauwerkserhaltung,

<sup>2</sup>Professur für Geotechnik

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

<sup>3</sup>A+S Consult GmbH

**Zusammenfassung:** Ein zielgerichtetes BIM-basiertes Structural Health Monitoring (SHM) erfordert auf die Bedürfnisse des BIM ausgelegte, allgemeingültige Bauteil- bzw. Objektkataloge für Sensoren sowie die weiteren Bestandteile von SHM. Hierbei sind sowohl die Informationen zur Geometrie als auch Merkmale sowie Workflows für den automatischen Datentransfer zwischen dem BIM-Modell und den Datenbanken notwendig. Dies beinhaltet sowohl die Messdaten an sich als auch Routinen für z. B. die Visualisierung der Messdaten. Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes zum BIM-basierten SHM für Autobahnbrücken werden derartige Objektkataloge und Workflows erarbeitet und erprobt. Die relevanten Aspekte hierzu werden am Beispiel einer Brücke demonstriert.

## 1 Motivation

Die Methode Building Information Modelling (BIM) wird bereits in vielen Lebenszyklusphasen von Bauwerken genutzt [1]. Allerdings beschränkt sich die Nutzung oft nur auf die Planung und Realisierung von Bauprojekten. Die Betriebs- und Instandhaltungsphase stehen bisher nicht im Fokus [2]. Dabei können auch in diesen Phasen die Reduktion von Informationsverlusten und damit verbundene Vermeidung von Doppelarbeit von Vorteil sein. In Anbetracht der langen Dauer der Betriebsphase ist sogar von einem großen positiven Effekt auszugehen, wenn BIM stringent weitergenutzt wird. Das Structural Health Monitoring selbst wird bereits in unterschiedlichen Phasen von Bauwerken eingesetzt unter anderem in der Herstellung, der Nutzung und dem Abbruch [3]. Im Fokus von SHM stehen Infrastrukturbauwerke, welche eine hohe gesellschaftliche Relevanz haben, wie zum Beispiel Brücken oder Windenergieanlagen. Dieser Beitrag fokussiert auf Brückenbauwerke, an denen anschaulich das bisherige Vorgehen und ein BIM-basiertes Vorgehen dargestellt wird.

Ein wichtiger Aspekt ist, die Reduktion der Unsicherheit bei der Einschätzung der Lebensdauer der Bauwerke. Wenn Monitoringdaten vorliegen, kann eine andere Stufe der Nachrechnungsrichtlinie verfolgt werden. Allerdings handelt es sich dabei oft um individuelle Lösung mit einem geringen Standardisierungsgrad, sodass in unterschiedlichen Projekten die Inhalte individuell zusammengesetzt werden müssen. Allerdings können die Inhalte wie Bausteine zusammengesetzt werden, wodurch ein Grad der Standardisierung erreicht werden kann. Durch die Bereitstellung eines allgemeingültigen Bauteil- und Objektkatalogs für SHM können diese Aufwände verringert werden. Dazu wird zunächst in einer Situationsanalyse das Vorgehen bei der Erstellung eines Monitoringkonzepts beschrieben und diesem das Vorgehen mit der Methode BIM gegenübergestellt. Anschließend wird das Vorgehen an einem Fallbeispiel verdeutlicht und die Erkenntnisse diskutiert, bevor ein Fazit gezogen wird und ein Ausblick gewährt wird.

## 2 Situationsanalyse

Das steigende Alter von Infrastrukturbauwerken sowie die Zunahme der Verkehrslasten [4] stellen eine große Herausforderung für die Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit von Infrastrukturbauwerken dar. Die begrenzten Ressourcen für die Bauwerksverwaltung und die Auswirkung von zu vielen gleichzeitigen Baustellen verhindern eine umfassende Neubaukampagne für Brückenbauwerke, weshalb der sichere Weiterbetrieb von Brücken über die geplante Lebensdauer hinaus von großem Interesse ist. Hierbei kann ein Monitoring-system wichtige Informationen zum realen Bauwerksverhalten liefern. zu. Das Structural Health Monitoring wird für die Erfassung und die Bewertung des aktuellen Bauwerkszustands, die Vorhersage der Lebensdauer sowie zur Reduktion der Instandhaltungskosten durch frühzeitige Reparaturen verwendet [5].

Die Bewertung des Bauwerkszustandes erfolgt meist auf der Identifikation von Zustandsänderungen, also zeitlichen Vergleichen der Monitoringdaten.

Im Falle einer Nachrechnung können Maßnahmen der Dauerüberwachung genutzt werden, um die tatsächlichen Belastungen des Bauwerks und das reale Bauwerksverhalten zu erfassen, um die genutzten Berechnungsmodelle zu kalibrieren [5]. Dazu werden zunächst die Unterlagen zu den Bauwerken, welche meist nur in Papierform oder als gescannte PDF-Dateien vorliegen, gesichtet. Darauf aufbauend werden die Überwachungsgrößen festgelegt und eine entsprechende Sensorik ausgewählt. Insbesondere die Überprüfung von Angaben am Bauwerk ist kosten- und zeitintensiv.

Auf Basis der Bestandsunterlagen wird dann mit der Planung von Monitoringsystemen begonnen. Oft können anhand der Pläne die Kabelführungen mit den entsprechenden Längen nur händisch abgeschätzt werden und die Positionierung von Schalt- und Messschränken nur unter Vorbehalt durchgeführt werden. Die resultierenden Kabellängen haben einen Einfluss auf die Messgenauigkeit sowie die Messsignale und müssen in der Planung berücksichtigt werden. Die Erstellung von unterschiedlichen Varianten erfordert zudem ggf. die erneute händische Abschätzung der Kabellängen. Vorteilhaft ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass keine weitere Software für die Planung benötigt wird und die Abstimmungen zwischen den Projektbeteiligten anhand von Plänen und Zeichnungen stattfinden können.

Nach Abschluss der Planung erfolgt die Installation des Monitoringsystems. Allerdings kann es zu Abweichungen zwischen den Bestandsunterlagen als Planungsgrundlage und der tatsächlichen Situation am Bauwerk kommen. Im schlimmsten Fall führt dies zu Umplanungen während der Installation des Monitoringsystems. Hierbei können sich ebenfalls wieder Unstimmigkeiten zwischen den geplanten Positionen und den tatsächlichen Positionen der Sensoren einstellen. Eine umfassende Dokumentation des Monitoringsystems ist die Voraussetzung für einen störungsarmen Betrieb und schnelle Reparaturmaßnahmen an dem Monitoringsystems, damit keine größeren Messlücken entstehen. Die Bewertung der Messergebnisse erfordert eine möglichst genaue Dokumentation der Sensorpositionen und der verwendeten Sensoren sowie des Bauwerkszustands. Diese Informationen werden zurzeit allerdings oft in unterschiedlichen Bereichen dokumentiert und stehen oft nicht gebündelt an einem zentralen Punkt zur Verfügung.

Des Weiteren ist auch die Verwaltung der Messdaten zu bedenken. Bei großen Monitoringssystemen mit hohen Abtastfrequenzen können die entstehenden Datenmengen sich zu mehreren Gigabyte pro Tag akkumulieren. Bei diesen Datenmengen ist eine manuelle Auswertung nicht mehr abbildbar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für ein Monitoring an Infrastrukturbauwerken große Anforderungen an eine zentrale, umfangreiche und dauerhafte Dokumentation bestehen, die über Fachbereichsgrenzen hinausgehen. Zusätzlich sind auch weitere Daten, z.B. aus örtlichen Wetterstationen, für das Monitoring sinnvoll. Diese sind ebenfalls in dem Monitoringsystem zu berücksichtigen.

### **3 Fallbeispiel Vahrendorfer Stadtweg**

Das Vorgehen wird an einem Beispiel einer Brücke über die Autobahn 7 in Höhe Marmstorf illustriert. Es handelt sich um eine Spannbetonbrücke in offener Rahmenbauweise mit einem Hohlkastenquerschnitt aus dem Jahr 1972. Die Gesamtlänge beträgt 50 m mit einer Breite von 10 m. Das BIM-Modell der Brücke ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Bestandsmodellierung wurde mittels eines Brückengenerators, welcher Bestandteil der Software KorFin ist, durchgeführt. Hiermit wird ein parametrisches Modell erstellt, welches in der Brückenmodellierungssoftware Allplan Bridge weiterverarbeitet werden kann. Parametrische Modelle haben den Vorteil, dass Anpassungen infolge einer verbesserten Datengrundlage leicht vollzogen werden können.



**Abbildung 1:** BIM-Modell Vahrendorfer Stadtweg

Die Ziele des Monitorings umfassen neben der Erfassung des aktuellen Bauwerkszustands auch die Abschätzung der Restlebensdauer des Bauwerks.

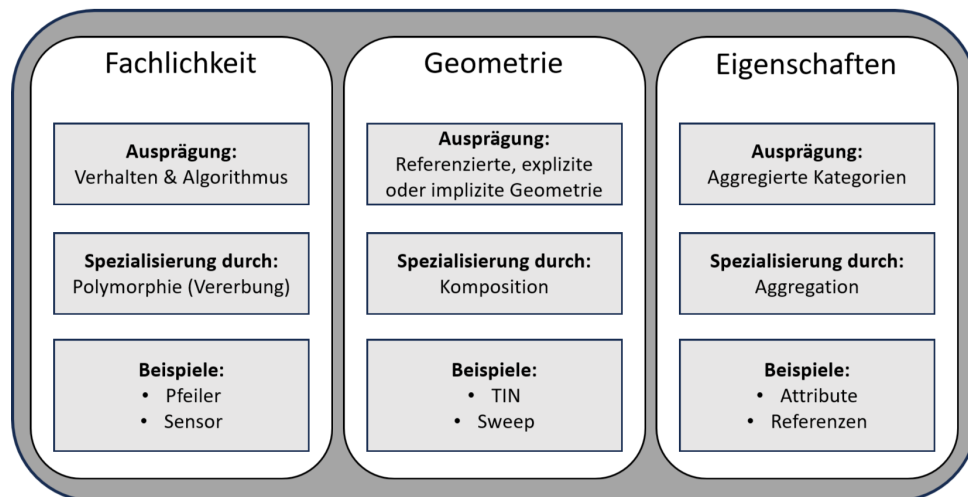
Dafür wurden an der Brücke insgesamt 123 Sensoren verbaut, welche sich auf folgende Sensortypen verteilen:

- Beschleunigungssensoren
- Neigungssensoren
- (Beton-)Dehnungssensoren
- Wegaufnehmer
- Bauteiltemperatursensoren
- Innenlufttemperatursensoren
- Asphalttemperatursensoren
- Luftfeuchtigkeit
- Wetterstation

Bei der Installation wurde darauf geachtet, dass die Beschleunigungssensoren im Hohlkasten in einem Raster von 40 cm entlang der Längsachse der Brücke versetzt werden können. Es wurden zwei Wetterstationen an der Brücke verbaut, damit sowohl die Umwelteinflüsse auf als auch unter Brücke erfasst werden können. Eine Wetterstation erfasst neben der Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck auch die Windgeschwindigkeit und -richtung sowie die Niederschlagsmenge und die Strahlungsenergie. Zusätzlich werden auch die Lufttemperatur und -feuchtigkeit im Hohlkasten erfasst. Die Beschleunigungen werden in allen drei Raumrichtungen erfasst, während die Neigungen nur in Längs- und Querrichtung der Brücke erfasst werden. Die Veränderungen an den Fahrbahnübergängen werden mit vier Wegaufnehmern untersucht. Ein beispielhaftes Vorgehen für SHM mit BIM kann bei Valinejadshoubi et al. gefunden werden [6]. Der Hauptunterschied stellt die digitale Datengrundlage für die Planung dar. Das Monitoring kann direkt am BIM-Modell geplant werden, in dem bspw. die Abschätzung der Kabellängen automatisch erfolgen kann.

Die digitalen Repräsentationen von Bauteilen und Sensoren, die im BIM-Modell zu verwalten sind, werden in sogenannten Fachobjekten abgebildet. Ein Fachobjekt wird aus einem übergeordneten Bauplan bzw. einer Vorlage erstellt, die als Fachobjektklasse bezeichnet wird [7]. Ein Fachobjekt besteht aus den drei Bestandteilen Fachlichkeit, Geometrie und Eigenschaften, die jeweils mit unterschiedlichen Konzepten spezialisiert werden. Der Zusammenhang ist in Abbildung 2 dargestellt. Die drei Bestandteile existieren unabhängig voneinander und können von unterschiedlichen Fachobjektklassen wiederverwendet werden. Hierdurch können Fachlichkeit, geometrische Darstellung und anhängige Eigenschaften beliebig spezialisiert und kombiniert werden. Ein Kernaspekt jedes Fachobjektes ist das fachbezogene Verhalten, das von Algorithmen gesteuert wird und eine Interaktion mit anderen Fachobjekten ermöglicht.

## Fachobjektklasse



**Abbildung 2:** Struktur eines Fachobjektes

Kernbestandteil eines Fachobjektes ist die Fachlichkeit, deren Spezialisierung für Bauteile mittels Vererbung in einer objektorientierten Datenstruktur erfolgt. Der fachliche Bestandteil kann über Verknüpfung mit Geometrie, die sich z. B. aus Triangulated Irregular Networks (TIN) oder Sweep-Körpern zusammensetzen, sowie Eigenschaften, die als Attribute, veränderliche Parameter oder Referenzen ausgeprägt sind, erfolgen. Die Fachobjektklassen wurden gemäß der ASB-ING und DGZfP Merkblatt B9 in Kataloge überführt, die die Fachlichkeit, Geometrie und Eigenschaften von Brückenbauteilen sowie Sensorik für SHM-Prozesse wiedergeben.

Zur Realisierung des BIM-gestützten SHM wird ein zentrales BIM-Modell über eine Datenbank in einer entsprechenden Plattform eingebettet und mit einer dazugehörigen REST-Schnittstelle verknüpft (siehe Abbildung 3). Das BIM-Modell enthält alle Fachobjekte, die zur Repräsentation von Bauteilen und Sensorik innerhalb eines digitalen Modells vonnöten sind. Parallel dazu wird eine Sensor-Datenplattform zur Speicherung und Aufbereitung von Sensordaten vorgehalten, die mit der verbauten Sensorik an den zu überwachenden Brücken kommuniziert und die Datenbasis kontinuierlich synchronisiert.

Über ein Graphical User Interface (GUI) kann aus dem BIM-Modell ein Datensatz aus überwachten Bauteilobjekten selektiert werden, für den dann eine Anfrage an die Sensor-Datenplattform geschickt wird. Die Datenplattform liefert anschließend aufbereitete Sensordaten, die in entsprechenden Graphen für den Nutzer innerhalb der GUI visualisiert werden. Über benutzerdefinierte Skripte ist zudem eine statistische Auswertung der Daten innerhalb der BIM-Plattform möglich.

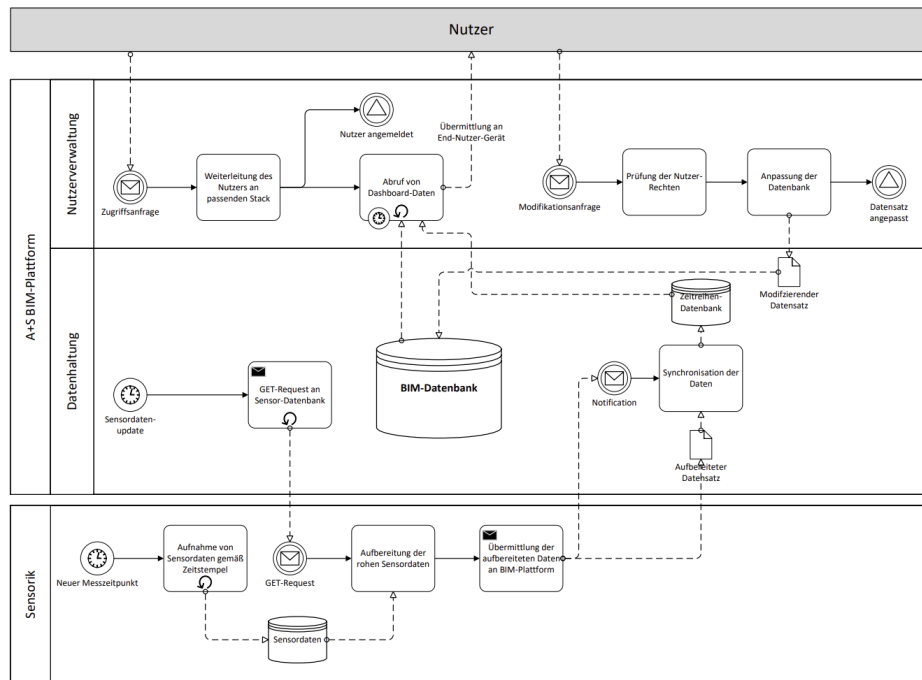


Abbildung 3: Workflow für ein BIM-basiertes SHM

## 4 Diskussion

Das „klassische“ Vorgehen auf Basis von Bestandsunterlagen in Papierform kann ohne zusätzliche Software von allen Infrastrukturbetreibern genutzt werden. Allerdings sind Mehraufwände für Zusammenstellung der Unterlagen, händische Berechnungen und Abschätzungen ein nicht zu unterschätzender Zeit- und Kostenfaktor für die Planung und Umsetzung von SHM-Vorhaben. Dagegen bietet das BIM-basierte Vorgehen einige Vorteile. Neben der zentralen Bereitstellung von Informationen zu den Bauwerken, den Sensoren, Bauwerkszustand und wichtigen Rahmenbedingungen sind auch die Automatisierung von Mengengerüsten zum Beispiel für die Kabellängen oder die Überprüfung der Einhaltung von maximalen Kabellängen zu nennen. Die Verwendung von Bauteil- und Objektkatalogen ermöglicht die schnelle und effiziente Entwicklung von BIM-Modellen, welche nicht nur für die Planung und Realisierung, sondern auch für die Verwaltung und den Betrieb geeignet

sind. Insbesondere die dauerhafte und zentrale Bereitstellung von Informationen und den Messdaten des SHM über die Lebensdauer der Bauwerke sind als Vorteil hervorzuheben.

Auf der Nachteilsseite ist allerdings auch die zusätzlich benötigte Software, zusammen mit möglichen Schulungs- und Lizenzkosten, zu nennen. Diese werden zwar durch die Verwendung des freien IFC-Austauschformats gemildert, aber nicht vollständig aufgehoben. Weiterhin fehlen aktuell auch die BIM-Modelle der Brücken in den die Informationen integriert werden können. Die Erstellung dieser Modelle kann je nach Detailgrad sehr aufwendig sein. Weshalb zunehmend der Ansatz von vereinfachten, parametrischen BIM-Modellen verfolgt wird. Ein weiterer Aspekt ist der Aufwand zur Digitalisierung der Bestandsunterlagen, so dass diese integriert und genutzt werden können. Dieser sollte allerdings mit den Vorteilen über die gesamte Restlebensdauer des Bauwerks verglichen werden. Zudem ist hervorzuheben, dass durch die fortschreitende allgemeine Digitalisierung im Bauwesen zukünftig weniger Daten in nicht maschinenlesbarer Form vorhanden sein sollten.

## 5 Fazit und Ausblick

Die Nutzung von BIM in Kombination mit SHM bietet wesentliche Vorteile, welche die Verwaltung von Infrastrukturbauwerken erleichtern können. Allerdings sind noch mehrere Schritte für eine flächendeckende Nutzung zu gehen. Jedoch liegen momentan zu wenige Infrastrukturbauwerke ebenfalls in ihrer digitalen Form vor, um einen gemeinsamen BIM-basierten Ansatz im Erhaltungsmanagement zu beschreiten. Die teilautomatisierte Erstellung von Geometriemodellen stellt hier einen vielversprechenden Weg dar. Auch die Nutzung von Laserpunktwolken als Grundlage für die automatisierte Erstellung von BIM-Modellen scheint ein Weg zur Effizienzsteigerung bei der Erstellung dieser Modelle zu sein. Die Digitalisierung der Bestandsunterlagen scheint durch die Nutzung moderner Datenverarbeitungssysteme ebenfalls voran zu schreiten [8]. Diese Entwicklungen können die weitere Verbreitung von BIM-basierten Ansätzen im SHM unterstützen.

## Literatur

- [1] Borrmann, A.; König, M.; Koch, C. et al.: Die BIM-Methode im Überblick. In: Borrmann, A.; König, M.; Koch, C. et al. (Hrsg.): Building Information Modeling, VDI-Buch. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2021, S. 1-31.
- [2] O'Shea, M.; Murphy, J.: Design of a BIM Integrated Structural Health Monitoring System for a Historic Offshore Lighthouse. In: Buildings 10 (2020), Heft 7, S. 131. <https://doi.org/10.3390/buildings10070131>.
- [3] Hindersmann, I. (Hrsg.): Dauerüberwachung von Bestandsbrücken - Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen – = Continuous monitoring of existing bridges - quantification of reliability and benefits. Bundesanstalt für Straßenwesen; Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für Neue Wissenschaft, Berichte der Bundesanstalt für StrassenwesenHeft B 163, Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, Bremen, 2021.

- [4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verkehr in Zahlen 2021/2022, 2022, [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2021-2022-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2021-2022-pdf.pdf?__blob=publicationFile) [Zugriff am: 04.10.2022].
- [5] Mischo, H.; Sanio, D.; Strobusch, J. et al.: Monitoring für Ingenieurbauwerke – Ein Anwenderbericht aus der Sicht eines Ingenieurbüros. In: Bautechnik 99 (2022), Heft 7, S. 556-564. <https://doi.org/10.1002/bate.202200048>.
- [6] Valinejadshoubi, M.; Bagchi, A.; Moselhi, O.: Development of a BIM-Based Data Management System for Structural Health Monitoring with Application to Modular Buildings: Case Study. In: Journal of Computing in Civil Engineering 33 (2019), Heft 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000826](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000826).
- [7] Molzahn, M.; Bauer, J.; Henke, S. et al.: Das Fachmodell Baugrund. In: geotechnik 44 (2021), Heft 1, S. 41-51. <https://doi.org/10.1002/gete.202000040>.
- [8] Schönfelder, P.; Al-Wesabi, T.; Bach, A. et al.: Information Extraction from Text Documents for the Semantic Enrichment of Building Information Models of Bridges. In: Linner, T.; García de Soto, B.; Hu, R. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2022.