

## PreMainSHM

Präventives Bauwerksmonitoring mit intelligenten, vernetzten Systemen

<b>Programm / Ausschreibung</b>	Mobilität der Zukunft, Mobilität der Zukunft, MdZ - VIF 2020	<b>Status</b>	abgeschlossen
<b>Projektstart</b>	01.07.2021	<b>Projektende</b>	31.12.2024
<b>Zeitraum</b>	2021 - 2024	<b>Projektaufzeit</b>	42 Monate
<b>Keywords</b>	Autarke Sensorsysteme; Sensordatenbasierte Zustandsbewertung; Monitoring; KI-Methoden; Prädiktive Instandhaltung		

### Projektbeschreibung

Das Projekt PreMainSHM verfolgt das Ziel den Bereich des präventiven Bauwerksmonitorings (Structural Health Monitoring - SHM) auf eine neue Ebene von vernetzten Systemen zu heben. Dies betrifft nicht nur die Vernetzung von autarken Sensoren und deren Sensordaten, sondern auch die Vernetzung und Nutzbarmachung relevanter Informationen für Systeme der Bauwerkszustandsbewertung und des Bauwerkmanagements. Wesentliches Projektziel ist, die Komponenten im Zusammenwirken der verschiedenen Systeme für einige exemplarische Anwendungsszenarien weiterzuentwickeln und in ein cloudbasiertes, skalierbares, gleichsam aber hochgradig effizientes und praxistaugliches System zu integrieren.

Ausgangslage für die weiteren Entwicklungen bilden die vorhandenen Technologien der Antragsteller sowie das vorhandene Know-how im Bereich drahtloser Sensornetze und faseroptischer Systeme. Die Monitoringkonzepte sehen dabei eine Trennung von passiver, bauteilintegrierbarer Sensorkomponente und austauschbarer Messelektronik vor. Ziel ist es kostengünstige, robuste, bauteilintegrierbare, und wenn nötig kalibrierbare, auf elektrischen Messprinzipien beruhende punktuelle Sensoren zur permanenten Installation am Bauwerk bereitzustellen und diese mit verteilten faseroptischen Messverfahren (DFOS) in einem Monitoringgesamtpaket zusammenzufassen.

Zur Gewinnung bauwerksmanagementrelevanter Informationen werden geeignete Analyse- und Prognoseprozeduren mit dem Ziel der bauwerksseitigen Datenbereinigung und gleichzeitigen Datenreduktion bzw. Datenfusion weiterentwickelt, adaptiert und evaluiert. Hierzu werden neben modelbasierten Verfahren, Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) eingesetzt und in ein interoperables Softwareframework integriert. Letzteres ermöglicht über Webuserinterfaces eine Darstellung der Zustandsinformationen in Form eines digitalen Zwillings als auch über weitere Schnittstellen die Einbindung der Zustandsinformationen in Bauwerkmanagementsysteme.

### Abstract

The project PreMainSHM aims to raise the area of preventive structural health monitoring (SHM) to a new level of networked systems. This applies not only to the networking of self-sustaining sensors and their sensor data, but also to the networking and utilization of relevant information for the building condition assessment and building management. The main aim of the project is to further develop existing components in the interaction of the various systems for exemplary application scenarios and to integrate them into a cloud-based, scalable, but also highly efficient and interoperable system.

The starting point for further developments is provided by the applicants' existing technologies as well as their existing know-how in the field of wireless sensor networks and fiber optic systems. The proposed monitoring concepts are based on a separation into passive, embeddable sensor components and exchangeable measurement electronics. The aim is to provide cost-effective, robust, embeddable sensors based on electrical measurement principles that can be calibrated if necessary, for permanent installation on the building and to combine them with distributed fiber optic sensors (DFOS) in a complete monitoring solution.

In order to obtain information relevant to the building management, suitable analysis and prognosis procedures are being further developed, adapted and evaluated with the aim of on-site data cleansing and simultaneous data reduction and data fusion. In addition to model-based algorithms, artificial intelligence (AI) methods are used and integrated into an interoperable software framework. The latter enables the status information to be displayed in the form of a digital twin via web user interfaces, as well as the integration of the status information in building management systems via other interfaces.

## **Endberichtkurzfassung**

### Motivation und Hintergrund

Dem Bauwerksmonitoring, das heißt der fortlaufenden Überwachung von Bauwerken mittels geeigneter Technologien, kommt insbesondere im Zusammenhang mit dem zunehmenden Alter von Bauwerken wie auch ansteigenden Anforderungen an deren Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit eine immer größere Bedeutung zu. Visuelle Bauwerksuntersuchungen, wie sie häufig vorgenommen werden und für Brückenbauwerke auch vorgeschrieben sind, stoßen allerdings manchmal an ihre Grenzen. Vereinzelt besteht der Bedarf, weitere charakteristische Bauwerksdaten mittels geeigneten Messsystemen zu erfassen und auszuwerten.

Im Projekt PreMainSHM wurden umfangreiche Aktivitäten im Bereich des Bauwerksmonitorings durchgeführt und ein Leitfaden mit einem Überblick über Sensoren und Sensorsysteme zur Dauerüberwachung von Brückenbauwerken erstellt. Hierin wird erläutert, für welche Fragestellungen Monitoringsysteme eingesetzt werden und welche Ergebnisse mittels geeigneter Analysemethoden erzielt werden können. Hierzu zählen Fragen zur Verkehrsbeanspruchung, zur Gebrauchstauglichkeit und Tragwerkssicherheit, zur Lebensdauer und dem Bauwerksmanagement u.v.a. Schädigungsprozesse wie auch das Bauwerksverhalten unter verschiedenen Einwirkungen. Es werden insbesondere drahtlose wie auch faseroptische Messsysteme vorgestellt und aktuelle Entwicklungen hierzu aufgezeigt. Intelligente, drahtlose Sensoren und Sensornetzwerke ermöglichen z.B. ein breiteres Anwendungsspektrum, da derartige Monitoringsysteme gegenüber drahtgebundenen Systemen einfacher zu applizieren und kostengünstiger sind. Auch bei faseroptischen Sensoren wurden in den vergangenen Jahren insbesondere hinsichtlich der Ortsauflösung bedeutende Fortschritte gemacht.

Sensoren und Monitoringsysteme werden allerdings nicht nur im Hinblick auf reine Hardwarelösungen bewertet. Vielmehr ist für den Nutzer ausschlaggebend, welche Informationen (z.B. Restlebensdauer, Instandhaltungsaufwand, Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit) er aus einem Bauwerksmonitoring erhält. Datenreduktions-, Datenanalyse- und Dateninterpretationsverfahren ist daher ein hoher Stellenwert zuzuordnen. Ansätze hierzu werden aufgezeigt. Auch langfristige Ziele eines Bauwerksmonitorings, wie zum Beispiel deren Nutzung für das Bauwerksmanagement auf Netzebene werden erläutert. Dabei wird auch konkreter Bezug auf die laufenden Aktivitäten vorwiegend in Deutschland (Stichwort

„Intelligente Brücke“) und gültige Richtlinien und Merkblätter genommen, ohne die darin bereits aufgeführten Erläuterungen noch einmal explizit zu wiederholen. Hierzu zählen z.B.:

RVS 13.03.01 Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken, 2012

RVS 13.04.11 Bauwerksdatenbank Brückenbauwerke, 2009.

DGZfP-Merkblatt B09 – Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken, 2022

DBV-Merkblatt "Brückenmonitoring - Planung, Ausschreibung und Umsetzung", 2018

## Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Derzeit existieren meist nur proprietäre Monitoringsystemlösungen, die häufig auch nur reine Messwerte liefern. Schnittstellen zu anderen Systemen, wie z.B. zu GIS- oder BIM-Systemen, zu Analyse- bzw. Berechnungs- und Nachrechnungstools oder gar zu Bauwerksmanagementsystemen fehlen. Analysen und Bewertungen werden daher häufig außerhalb der eingesetzten Monitoringsystemlösung vorgenommen. Dies ist auch dem Umstand geschuldet, dass Analyse- und Bewertungsmethoden andere Fachkompetenzen bzw. Tools benötigen und auch Daten aus diversen, mitunter sehr heterogenen Quellen (z.B. Bauwerksinspektion) in eine Bewertung mit aufgenommen werden müssen. Das Feld des Bauwerksmanagements ist zudem durch verschiedene Akteure besetzt, den Bauherren, den Monitoringfachleuten und Monitoringsystemfachleuten sowie fachtechnischen Bauwerksprüfern. Zwar wurden erste Ansätze zu ganzheitlichen Systemen zum Informationsaustausch in der Vergangenheit bereits angegangen und für Österreich teilweise in Richtlinien verankert, jedoch nicht nachhaltig umgesetzt. Den Informationsaustausch zu verbessern war ein Ziel des Projekts, wobei ein wesentlicher Aspekt in der Einfachheit liegen sollte. Die Beachtung von FAIR data principles (Daten, die den Grundsätzen der Auffindbarkeit, Zugänglichkeit, Interoperabilität und Wiederverwendbarkeit entsprechen) ist bei der Datenakquisition und -haltung essentiell, was bedingt, sich bevorzugt etablierten Standards zu bedienen oder bestehende Standards entsprechend zu erweitern. Innerhalb des Projektes wurden zustandsbeschreibende Eigenschaften und Ontologien unter Beachtung vorhandener Standards definiert, sodass sie in BIM (ggfs. auch in GIS-Systemen bzw. Bauwerksmanagementsystemen), oder umgekehrt, in der SHM-Software genutzt werden können. Die präferierte Ontologie für das Bauwerksmonitoring entspricht dabei weitgehend der für die Bauwerksinspektion, was erhebliche Vorteile bei der Datenintegration und -verwaltung sowie der Datenverwertung bringt, da z.B. bei der ASFiNAG die Integration der Ergebnisse von Bauwerksinspektionen in das im eigenen Haus eingesetzte Bauwerksmanagementsystem bereits etabliert ist. Welche aufzubereitenden Schlüsselinformationen wie und in welcher Form in die Bauwerksmanagementsysteme eingebracht werden sollen, hängt stark von den verfolgten Monitoringzielen und der Bewertung der Monitoringergebnisse ab. Elemente und Formen dieser Schlüsselinformationen können beispielsweise sein:

Direkt im Managementsystem abgelegte, manuell oder automatisiert generierte Reports der laufenden oder abgeschlossenen Monitoringmaßnahmen,

Verlinkungen zu Datenrepositorys zum Abruf von Reports oder Daten,

Verlinkungen zu Onlinediensten/-portalen zur Einsichtnahme von Monitoringdaten,

Direkt über Datenaustauschschnittstellen vom Monitoringsystem automatisiert generierte und fortlaufend aktualisierte

Zustandsdaten bzw. -noten.

Idealweise sind alle vier Formen von den eingesetzten Softwaresystemen zu unterstützen. Um eine generische Nutzung von Monitoringdaten auch außerhalb von Softwaresystemen mit strukturiert abgelegten Objektdaten zu ermöglichen, wurde daher ein simpel aufgebauter, und leicht verständlicher digitaler Zwilling in ein cloudbasiertes Softwareframework integriert. Hierüber können sowohl Objekt-, und Bauteilebenen als Entitäten verwaltet und visualisiert werden als auch die gesamten Sensoren einschließlich der damit erfassten Monitoringdaten. Dabei werden alle über die Zeit vorgenommenen Änderungen am System vollständig und automatisiert mitsamt ihrer Historie erfasst, so dass im Sinn der FAIR data Principles jederzeit zurückverfolgt werden kann, was, womit, zu welchem Zeitpunkt, an welchem Ort und an welchem Bauteil erfasst und analysiert wurde. Inkludiert sind in dieses Softwaresystem auch generisch angelegte Tools zur multivariaten Datenanalyse und Datenauswertung, die sowohl für das Postprocessing als auch für ein Realtimeprocessing der Daten eingesetzt werden kann. Dabei wurde ein System entwickelt, welches eine Parallelverarbeitung von Analyseprozessen bzw. Services ermöglicht und dabei hochgradig skalierbar und performant ist. Gerade diese Anforderungen werden bislang oft unterschätzt, stellen aber auf lange Sicht hin Bottlenecks in Bezug auf die Langzeitnutzbarkeit von Monitoringdaten dar.

Im Projekt wurde der Fokus auf zwei Monitoringsystemarten gelegt, die ein breites Anwendungsspektrum versprechen. Dies sind einerseits faseroptische Systeme und andererseits drahtlose Sensorsysteme. Während sich das Potenzial drahtloser Sensorsysteme (IoT) erst so langsam wirklich erschließt, werden faseroptische Sensoren bereits seit längerer Zeit erfolgreich für das Bauwerksmonitoring eingesetzt. Die Vor- und Nachteile beider Konzepte, deren technische Möglichkeiten und Restriktionen sowie ihre Anwendungsgebiete wurden im Projekt im Detail betrachtet. Zudem wurde der aktuelle Stand der Technik an einem Brückenbauwerk demonstriert und evaluiert. Insbesondere in Bezug auf die Praxistauglichkeit der Systeme konnte demonstriert werden, dass ein Monitoring in der realen Umwelt enorme Anforderungen an das Monitoringsystem stellt und dass die Erstellung eines Monitoringkonzepts und einer Monitoringlösung eine komplexe Aufgabe ist, die bereits bei der Ausschreibung berücksichtigt werden muss.

So wurde z.B. mittels einer umfangreichen Recherche zu Monitoringanwendungen (insbesondere innerhalb der Projektschiene „Intelligente Brücke“ der BASt) sowie eigenen durchgeföhrten Analysen ermittelt und zusammengestellt, welche Anforderungen Sensoren bzw. Sensorsysteme zu erfüllen haben. Hierzu zählen neben Faktoren wie Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit auch Aspekte wie die Sensorgenaugkeit im Zusammenspiel mit der erforderlichen Genauigkeit aus der Messaufgabe am Bauwerk. Dies sind alles Punkte, die zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer in Bezug auf die Machbarkeit und das Monitoringziel vor der Durchführung einer Monitoringmaßnahme geklärt werden müssen. Im Ergebnis der Recherchen und darauffolgenden Labortests an einer Auswahl von drahtlosen und faseroptischen Sensorsystemen konnte überdies gezeigt werden, dass eine große Diskrepanz zwischen der von Sensorherstellern deklarierten Genauigkeit und Präzision und der an einem Bauwerk erzielbaren Genauigkeit vorliegt. Und dies, obwohl eine Kalibrierung über entsprechende Zertifikate von vielen Herstellern bescheinigt wird. Das Problem, welches hier vakant ist, besteht in der Vorgehensweise bei der Kalibrierung, welche meist nicht die tatsächlichen Messbedingungen vor Ort am Objekt abbildet. Es wurden daher innerhalb des Projekts Konzepte und Vorgehensweisen zur praxisgerechten Kalibrierung erarbeitet, die vor einer Installation, aber auch während einer Monitoringmaßnahme in Intervallen angewendet werden sollten. Zumindest eine der beiden folgenden Kalibrierverfahren sollten danach für die Sensorsysteme eingefordert werden:

Laborkalibrierung über den angestrebten Messbereich mit Variation von Temperatur (evtl. auch Feuchte, Vibration) unter Berücksichtigung von Alterungseffekten

Kalibrierung am Bauwerk unter Verwendung von Bezugsnormalen bzw. Referenzen

Monitoringsysteme sind unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und der Dauerhaftigkeit so auszulegen, dass die hiermit erzielten Ergebnisse einen Mehrwert im Rahmen der Bauwerkssicherheit oder des Bauwerksmanagements liefern. Daher wurde evaluerit, wie Soft- und Hardwarekomponenten flexibel und skalierbar einsetzbar und die Daten zur weiteren Verwendung auf Plausibilität und Validität geprüft werden können. Maßgeblich wird Effizienz jedoch erst durch ein ganzheitliches Monitoringkonzept erreicht, welches die intelligente Datenaggregation und -analyse und die Visualisierung der Ergebnisse sowie die Interoperabilität mit anderen Systemen umfasst. Möglichkeiten zur teilautomatisierten und automatisierten Analyse bis hin zur Anwendung von KI-Methoden wurden daher recherchiert und zusammengestellt. Darüber hinaus wurden konkrete, modelbasierte Verfahren und Korrelationsanalysen an den am Demonstrationsbauwerk erfassten Daten angewendet und visualisiert. Die Ergebnisse decken sich auch mit den Erfahrungen aus einer Vielzahl anderer Monitoringprojekte; nämlich dass meist erst durch Anwendung einer multivariaten Datenanalyse eine zielgerichtete, quantifizierbare Dateninterpretation und damit ganzheitliche Bewertung möglich wird. Dies betrifft sowohl Daten zum Bauwerksverhalten als auch zum (veränderlichen) Bauwerkszustand bzw. zum Schädigungsfortschritt. Konkrete Analysen zum Schädigungsfortschritt bzw. zur Lebensdauerprognose sowie die Anwendung von Methoden der KI konnten aufgrund der hierfür zu kurzen Monitoringzeiträume am Demonstrationsprojekt nicht sinnvoll eingesetzt werden. Auch konnten keine KI-Methoden sinnvoll bei den durchgeführten Belastungstests angewendet werden, da durch die Umstellung der ursprünglich statisch angedachten Belastungstests in dynamische Belastungstests das hochauflösende faseroptische Messsystem für eine großen Zeitraum an vielen Orten keine verwertbaren Daten geliefert hat. Um ausreichend Trainingsdaten für das Langzeitmonitoring zu sammeln wären z.B. automatisierte Messungen zu Zeitpunkten geringer Verkehrsbelastung erforderlich. Jedoch bedeutet dies auch, dass Risse weniger weit aufgehen und daher eventuell auch nicht oder erst später detektiert werden können.

Insgesamt zeigt sich, dass mit drahtlosen Sensorsystemen sehr kostengünstig, sehr flexibel und auch sehr kurzfristig eine Bauwerksmonitoringmaßnahme aufsetzen kann. Ein Dauerbetrieb über mehrere Jahre (unter Berücksichtigung des Austauschs von Komponenten bzw. Batterien z.B. im Rahmen der wiederkehrenden Bauwerksinspektion) ist durchaus realisierbar. Eine Vielzahl kostengünstiger Sensoren, die in drahtlosen Sensorsystemen verwendet werden können, sind mittlerweile verfügbar, womit sich ein breites Anwendungsgebiet ergibt. Restriktionen wie die beschränkte Datenerfassungsrate limitieren deren Einsatz jedoch vornehmlich für quasistatische Anwendungen mit Messraten bis in den unteren Minutenbereich. Höherfrequente Messungen sind zwar auch realisierbar, können allerdings nur für kurze Messzeiträume in Form von Burstsignalen erfasst und dann übertragen werden. Werden Daten aus drahtlosen Sensorsystemen, wie im Projekt demonstriert, zudem in ein geeignetes Monitoringsoftwareframework in die Cloud transferiert und mittels Analyse- und Visualisierungstools verarbeitet, so können relevante Ergebnisse direkt abgelesen werden oder für Alarmierungen und andere Softwaresysteme verwendet werden.

Bei der verteilten faseroptischen Sensorik hat sich gezeigt, dass neue Möglichkeiten im Bauwerksmonitoring vorhanden sind. Durch die lückenlose Erfassung von Dehnungen mittels DFOS Messverfahren können Risse detektiert und lokalisiert werden. Weiters, können Sensorkabel an der Oberfläche von Objekten und im Inneren von Objekten installiert werden. Da-

bei liegt die Besonderheit vor, dass dasselbe Sensorkabel für unterschiedliche Anwendungen genutzt werden kann. Mittels DTS/DSS Messungen können Temperaturänderungen erfasst werden, hochauflösende DSS Messungen liefern Informationen über Risse und DAS Messungen können hochfrequente Vibrationen erfassen. Jedes dieser Messverfahren hat seine spezifischen Vor- und Nachteile. Zutreffend für alle DFOS Messverfahren sind die hohen Datens Mengen. Im Demonstrationsobjekt Laxenburger Brücke sind auch in kurzen Messzeiten z.B. 30 Minuten mehrere hundert Millionen Messdaten angefallen. Eine automatische Weiterverarbeitung sowie effiziente manuelle Betrachtungsmethoden, z.B. durch Wasserfalldiagramme sind unumgänglich. Schlussendlich sind faseroptische Messverfahren sehr gut für das Langzeitmonitoring geeignet, da am Messort keine mechanisch beweglichen Teile und keine elektrischen Komponenten erforderlich sind.

### **Projektkoordinator**

- Technische Universität Graz

### **Projektpartner**

- TTI – Technologie-Transfer-Initiative GmbH an der Universität Stuttgart (TTI GmbH)