Sachbericht ImaB-Edge- EUROKEY (ImaB-SenMo)

1. Ausgangssituation und Zielsetzung des Vorhabens

Das Teilvorhaben ImaB-SenMo war innerhalb des Gesamtprojekts ImaB-Edge auf die Entwicklung eines sensorbasierten mobilen ZfPBau-Systems mit innovativen User-Interfaces auf Basis eines BIM-Modells zur proaktiven Instandhaltung von Bauwerken ausgerichtet. Ausgangspunkt waren die bei EUROKEY bereits vorhandenen Kompetenzen und Systeme in den Bereichen mobiles Prüfmanagement und BIM-basierte Visualisierung, insbesondere die Produktsuite MobiCheck sowie die Plattform Vitruv. Beide Systeme boten bereits wichtige Grundlagen für digitale Prüf- und Verwaltungsprozesse, ermöglichten jedoch vor Projektbeginn noch keine durchgängige Integration verteilter Sensorik, Edge-naher Datenerfassung und mobiler Nutzung im Kontext der Bauwerksüberwachung sowie der handnahen Prüfung.

MobiCheck und Vitruv dienten dabei als technische Ausgangsbasis, mussten jedoch im Rahmen des Vorhabens sowohl fachlich als auch architektonisch wesentlich erweitert werden, um die Integration verteilter Sensorik, Edge-naher Datenverarbeitung, BIM-basierter Kontextualisierung und mobiler Nutzung in einer gemeinsamen Systemarchitektur zu ermöglichen.

Die Motivation des Vorhabens ergab sich aus dem hohen Sanierungs- und Überwachungsbedarf insbesondere bei Brückenbauwerken. Für viele Bauwerke liegen nur begrenzte und oft punktuelle Zustandsinformationen vor, während Sanierungsmaßnahmen erhebliche Auswirkungen auf Verkehr, Betrieb und Kosten haben. Ziel war es daher, durch die Kombination aus Sensorik, mobiler Prüfung, Edge-Computing und BIM-basierter Datenbereitstellung eine deutlich verbesserte Datengrundlage für die Zustandsbewertung und Instandhaltungsplanung von Bauwerken zu schaffen. Auf Basis kontinuierlich oder anlassbezogen erfasster Messdaten sollten Bauwerkszustände besser bewertet, Prüfungen gezielter durchgeführt und künftige Maßnahmen fundierter geplant werden.

Das Teilvorhaben stand zugleich in engem Zusammenhang mit den förderpolitischen Zielen der Maßnahme OCTOPUS. Im Mittelpunkt stand die Nutzung vertrauenswürdiger und energieeffizienter dezentraler Datenverarbeitung im Edge-Computing. Für ImaB-SenMo bedeutete dies insbesondere, Sensordaten nicht ausschließlich zentral oder cloudbasiert zu verarbeiten, sondern durch Edge-Gateway- und Sensor-EDGE-Konzepte bereits nahe an der Datenquelle vorzuverarbeiten, zu reduzieren und nur in strukturierter Form in zentrale Systeme zu überführen. Damit sollten Datenübertragungen reduziert, die Systemrobustheit erhöht und die Abhängigkeit von permanent verfügbaren Cloud-Verbindungen verringert werden. Gleichzeitig sollte die Datenhoheit beim Betreiber verbleiben.

Die wissenschaftlich-technischen Arbeitsziele des Teilvorhabens umfassten insbesondere die Mitarbeit an der Spezifikation der Gesamtarchitektur und der benötigten Schnittstellen, die Integration eines Ultraschall-ZfPBau-Systems in ImaB-Edge, die Konzeption und Implementierung offener Schnittstellen sowie die Entwicklung einer Konfigurationslösung für mobile Prüfgeräte. Damit verbunden war die Entwicklung geeigneter User Interfaces, über die Anwenderinnen und Anwender Geräteparameter einsehen, anpassen und Optimierungsprozesse der Datenaufnahme steuern können.

Ein weiterer zentraler Schwerpunkt lag auf dem Smart Sensor Tracking. Unter Leitung von EUROKEY sollte ein System entstehen, mit dem Sensoren im Bauwerk verlässlich lokalisiert, als eigenständige Objekte in einem BIM-Modell abgebildet und mit Eigenschaften, Analyseergebnissen sowie Prüfdaten verknüpft werden können. Ziel war es, diese Informationen direkt für Anwender zugänglich zu machen und zugleich Schnittstellen bereitzustellen, über die Drittsysteme auf die Daten zugreifen, diese

weiterverarbeiten und an Dritte, wie beispielsweise die Autobahn GmbH oder den Entsorgungsverband, bereitstellen können.

Daneben war die Entwicklung eines BIM-basierten Gebäudemodellsystems zur Visualisierung und Bearbeitung von Bauwerken, insbesondere von Brücken, ein zentraler Bestandteil des Teilvorhabens. Die im System erfassten Sensoren und Messdaten sollten nicht isoliert dargestellt, sondern in den räumlichen und fachlichen Kontext des Bauwerks eingebettet werden. Dies betraf sowohl die Darstellung auf Desktop-Systemen als auch die mobile Nutzung über Tablets und Smartphones. Gleichzeitig mussten Datenmanagement, Synchronisation und Backup-Prozesse zwischen Edge-Gateway, BIM-Visualisierung und den verschiedenen Benutzeroberflächen umgesetzt werden.

Bereits der Antrag machte deutlich, dass für diese Aufgabenstellungen keine Standardlösungen oder fertigen Werkzeuge verfügbar waren. Dies betraf insbesondere die verlässliche Lokalisierung vergleichsweise kleiner Sensoren an großflächigen Bauwerken, die benutzerfreundliche Darstellung von Sensorobjekten in BIM-Modellen, die mobile Bereitstellung und Bearbeitung der zugehörigen Daten sowie die Integration heterogener Geräte und neuartiger Schnittstellen. ImaB-SenMo war daher von Anfang an als Entwicklungsprojekt mit hohem konzeptionellem und technischem Anteil angelegt.

Der Fokus von EUROKEY lag dabei klar auf den softwareseitigen Komponenten des Gesamtsystems. Dazu gehörten insbesondere die Konzeption und Umsetzung der Sensor-Tracking-Lösung, die BIM-basierte Visualisierung und Bearbeitung der Bauwerks- und Sensordaten, die Integration und Weiterentwicklung der mobilen Anwendung sowie die Entwicklung offener Schnittstellen zur Einbindung externer Hardware und Drittsysteme. Damit nahm ImaB-SenMo innerhalb des Gesamtprojekts eine zentrale Rolle bei der Nutzbarmachung der Sensordaten für Anwender, Betreiber und nachgelagerte Systeme ein.

Insgesamt zielte das Teilvorhaben darauf ab, eine integrierte und praxistaugliche Software- und Bedienarchitektur zu schaffen, die Sensordaten, mobile Prüfprozesse und BIM-basierte Bauwerksmodelle in einer gemeinsamen Lösung zusammenführt. Der Innovationsgehalt lag dabei insbesondere in der Verbindung von Sensorik, Edge-Computing, mobiler Anwendung, Smart Sensor Tracking und BIM-basierter Visualisierung in einer modularen und erweiterbaren Systemarchitektur, die zum Projektstart in dieser Form nicht verfügbar war.

2. Projektverlauf und durchgeführte Arbeiten

Zu Beginn des Projekts wurden die fachlichen Anforderungen sowie die relevanten Einsatzszenarien für den Betrieb des Systems, insbesondere Online-, Offline- und hybride Betriebsformen, gemeinsam mit den Projektpartnern systematisch erarbeitet. Diese Arbeiten entsprachen im Wesentlichen den Inhalten der Arbeitspakete AP1 und AP2 und führten zur Erstellung eines abgestimmten Lasten- und Pflichtenhefts sowie eines initialen Gesamtsystemkonzepts. Dabei wurden insbesondere Anforderungen an Datenmanagement, Sensorintegration, Systemrobustheit sowie an die Verarbeitung und Bereitstellung von Messdaten unter eingeschränkten Netzwerkbedingungen definiert.

Auf dieser Grundlage wurde eine iterative und eng mit der Umsetzung verzahnte Spezifikation der Systemarchitektur vorgenommen. Die Architektur wurde dabei konsequent modular und entkoppelt ausgelegt, um unterschiedliche Sensortypen, Herstellerprotokolle und Kommunikationsbedingungen flexibel integrieren zu können. Ein besonderer Fokus lag auf der Definition offener Schnittstellen sowie der Aufteilung der Datenverarbeitung zwischen Sensor-EDGE, EDGE-Gateway und zentralen Systemkomponenten. Diese Arbeiten bildeten die Grundlage für die nachfolgenden Implementierungen in den Bereichen Sensorik, Edge-Computing und Software.

Parallel zur Systemkonzeption wurden in AP3 und AP4 die Grundlagen für die integrierte Bauwerkssensorik sowie die sensornahe Datenverarbeitung geschaffen. Dazu gehörte die Auswahl geeigneter Sensortypen für unterschiedliche Anwendungsfälle sowie die Entwicklung von Konzepten zur robusten Integration in Bauwerke, unter anderem in Zusammenarbeit mit microsensys im Bereich der Sensorik sowie der Sensoridentifikation und Verortung. Ergänzend wurde die Sensor-EDGE-Ebene konzipiert, die eine Vorverarbeitung, Reduktion und teilweise Interpretation der Sensordaten direkt an der Datenquelle ermöglicht. Ziel war es, große Datenmengen frühzeitig zu reduzieren und gleichzeitig eine hohe Datenqualität für die weitere Verarbeitung sicherzustellen.

Im weiteren Projektverlauf wurden die Arbeiten im Bereich des EDGE-Gateways (AP9) sowie der Datenfusion und Analyse (AP10) konkretisiert. Das EDGE-Gateway wurde als zentrale lokale Verarbeitungseinheit konzipiert, die Sensordaten aggregiert, weiterverarbeitet und für nachgelagerte Systeme bereitstellt. Dabei wurden Konzepte zur energieeffizienten Datenverarbeitung, zur lokalen Speicherung sowie zur optionalen Anbindung an Cloud-Systeme umgesetzt. Ergänzend wurden Verfahren zur Fusion unterschiedlicher Datenquellen spezifiziert, um Sensordaten, Prüfdaten und Bauwerksinformationen gemeinsam auswerten zu können.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten von EUROKEY lag in den Arbeitspaketen AP6 bis AP8. Hier wurden zentrale Softwarekomponenten für das Smart Sensor Tracking, die Visualisierung sowie die Bearbeitung der Daten entwickelt. Sensoren wurden als eigenständige Objekte in einem BIM-basierten Bauwerksmodell abgebildet und mit Eigenschaften, Messdaten und Analyseergebnissen verknüpft. Parallel dazu wurden Benutzeroberflächen für Desktop- und mobile Anwendungen entwickelt, die eine intuitive Nutzung der Systeme ermöglichen und den Zugriff auf relevante Informationen direkt im Bauwerkskontext unterstützen.

Die Integration eines mobilen ZfPBau-Systems (AP5) stellte einen weiteren wichtigen Bestandteil der Arbeiten dar. Hierbei wurde insbesondere eine Konfigurationmöglichkeit zwischen mobilen Prüfgeräten und der ImaB-Edge-Infrastruktur umgesetzt sowie Konzepte zur automatisierten Datenanalyse und zur Unterstützung der Messdurchführung entwickelt. Ziel war es, Prüfprozesse effizienter zu gestalten und die Qualität der erhobenen Daten bereits während der Durchführung zu verbessern.

Begleitend zu den Entwicklungsarbeiten wurden in AP11 kontinuierlich Labor- und Feldversuche durchgeführt. Diese dienten der Validierung der Sensorik, der Kommunikationslösungen sowie der Datenverarbeitung unter realitätsnahen Bedingungen. Im weiteren Projektverlauf wurden mehrere Testumgebungen aufgebaut, in denen das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten erprobt und optimiert werden konnte. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen iterativ in die Weiterentwicklung der Systeme ein.

Die schrittweise Integration der einzelnen Komponenten erfolgte im Rahmen der Gesamtsystem-Assemblierung (AP12). Dabei wurden die entwickelten Module zu einem Gesamtsystem zusammengeführt und hinsichtlich ihrer Interoperabilität sowie ihrer funktionalen Anforderungen getestet. Abschließend wurde das System in definierten Anwendungsszenarien in kontrollierten Testumgebungen validiert (AP13).

Die in den Zwischenberichten 2023 und 2024 dokumentierten Projektfortschritte spiegeln diesen Verlauf wider. Während im Jahr 2023 insbesondere die Anforderungsanalyse, Systemkonzeption und erste prototypische Umsetzungen im Vordergrund standen, lag der Schwerpunkt im Jahr 2024 auf der Integration, Erprobung und dem Betrieb des Gesamtsystems in realen Testumgebungen. Dabei konnten wesentliche Meilensteine erreicht und zentrale Komponenten erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Insgesamt wurde das Vorhaben entlang der geplanten Arbeitspakete umgesetzt, wobei die enge Verzahnung von Spezifikation, Implementierung und Validierung maßgeblich zum Fortschritt beigetragen hat. Die durchgeführten Arbeiten bilden die Grundlage für ein modular aufgebautes, praxistaugliches Gesamtsystem zur sensorbasierten Überwachung und Bewertung von Bauwerken unter Nutzung von Edge-Computing-Ansätzen.

3. Technische Umsetzung und Systemarchitektur

Die entwickelte Lösung basiert auf einer modular aufgebauten Gesamtarchitektur, die Cloud-Backend, Edge-Gateways mit integriertem MobiCheck-Connector, mobile Anwendungen sowie eine BIM-basierte Visualisierung umfasst. Zentrale Schnittstelle ist der MobiCheck-Connector zwischen dem Mob-Check-Backend und dem Edge-Server. Der MobiCheck-Connector ermöglicht die kontinuierliche Synchronisation der Sensordaten. Die Daten werden in einer hierarchischen Struktur (Bauwerk - Teilstruktur - Sensor) organisiert. Ziel der Architektur ist die durchgängige Erfassung, Übertragung, Verarbeitung und räumliche Kontextualisierung von Sensordaten aus Infrastruktur-Bauwerken unter realen Einsatzbedingungen. Durch die Fähigkeit zur Anbindung mehrerer Edge-Gateways ist das System skalierbar und kann flexibel in unterschiedlichen Szenarien sowie bei unterschiedlichen Sensordichten eingesetzt werden.

Die Systemarchitektur ist konsequent entkoppelt aufgebaut, um unterschiedliche Sensortypen, Herstellerprotokolle sowie variierende Netzwerkbedingungen ohne Anpassungen im Gesamtsystem zu unterstützen. Dadurch wird eine hohe Robustheit im Feldbetrieb erreicht, insbesondere in Szenarien mit intermittierender Konnektivität oder vollständig offline betriebenen Edge-Knoten. Gleichzeitig ermöglicht die Entkopplung eine klare Trennung zwischen Datenerfassung, Datenverarbeitung und Darstellung, wodurch einzelne Komponenten unabhängig voneinander weiterentwickelt und skaliert werden können.

3.1 Backend-Architektur und Datenverarbeitung

Das Backend ist als modularer Monolith umgesetzt und in klar abgegrenzte fachliche Domänen strukturiert. Zu den zentralen Modulen zählen insbesondere Sensorverwaltung, Messdatenverarbeitung, Alarmierungslogik, BIM-Integration sowie Identitäts- und Mandantenverwaltung. Diese modulare Struktur ermöglicht eine klare Trennung der fachlichen Verantwortlichkeiten bei gleichzeitiger zentraler Steuerung aller Systemprozesse.

Die Module werden innerhalb eines zentralen Application-Kontexts zur Laufzeit instanziiert und über ein Dependency-Injection-System miteinander verbunden. Jedes Modul definiert seine Abhängigkeiten explizit, wodurch eine deterministische Initialisierung des Gesamtsystems gewährleistet wird. Zyklische Abhängigkeiten werden bereits beim Systemstart erkannt und unterbunden, wodurch Fehlkonfigurationen frühzeitig vermieden werden.

Die Datenhaltung erfolgt mandantenfähig über eine konsequente logische Trennung mittels tenantId, die in allen relevanten Datenzugriffen berücksichtigt wird. Dadurch ist sichergestellt, dass Daten verschiedener Organisationseinheiten strikt voneinander isoliert verarbeitet werden. Alle schreibenden Operationen sind transaktional abgesichert, um Inkonsistenzen bei parallelen Zugriffen zu vermeiden und eine hohe Datenintegrität sicherzustellen.

Eingehende Sensordaten durchlaufen im Backend eine mehrstufige Verarbeitungs- und Validierungspipeline. Zunächst erfolgt eine strukturelle Prüfung gegen definierte Schemas, anschließend eine semantische Normalisierung der Messwerte. Ziel dieser Verarbeitung ist die Überführung heterogener Datenformate in ein einheitliches, systemweit konsistentes Datenmodell, das unabhängig von der zugrunde liegenden Sensorhardware verarbeitet werden kann.

Das Backend übernimmt darüber hinaus die zentrale Rolle innerhalb der Gesamtarchitektur. Es fungiert als aggregierende Instanz, in der Sensordaten aus unterschiedlichen Quellen zusammengeführt, mit Metadaten angereichert und in den Bauwerkskontext integriert werden. Gleichzeitig stellt es die Grundlage für weiterführende Funktionen wie Visualisierung, Alarmierung, Datenexport und Integration in externe Systeme dar. Damit bildet das Backend die zentrale Daten- und Logikschicht des Gesamtsystems.

3.2 Edge-Architektur und MobiCheck-Connector

Die Edge-Ebene wird durch Edge-Gateways realisiert, die als zentrale Vermittlungsinstanz zwischen physischer Sensorik und MobiCheck-Backend fungieren. Ein Edge-Gateway besteht aus einem Edge-Server als Erfassungs- und Verarbeitungskomponente sowie dem integrierten MobiCheck-Connector als hardwarenaher Abstraktionsschicht.

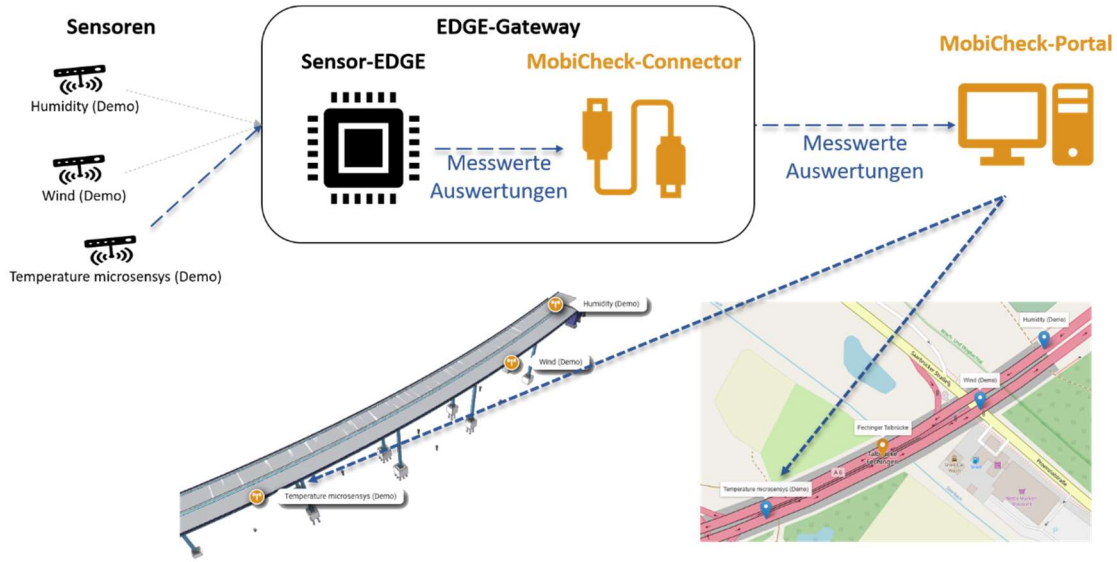

Abbildung 1 Schematischer Aufbau der Edge-Architektur mit BIM- und OSM-Visualisierungen

Der Edge-Server übernimmt die lokale Erfassung und Vorverarbeitung der Sensordaten am Bauwerk. Die Datenerfassung erfolgt kontinuierlich über FPGA-basierte Komponenten, wodurch ein stabiler und fortlaufender Datenstrom erzeugt wird. Die erfassten Rohdaten werden reduziert und vorverarbeitet, um relevante Informationen zu extrahieren und das Datenvolumen für die weitere Verarbeitung zu minimieren. Diese Vorverarbeitung kann je nach Sensortyp auch erste Aggregationen oder Filterungen umfassen.

Die aufbereiteten Daten werden anschließend lokal zwischengespeichert. Diese Zwischenspeicherung erfüllt mehrere Funktionen. Zum einen ermöglicht sie eine entkoppelte Weiterverarbeitung durch nachgelagerte Komponenten. Zum anderen stellt sie sicher, dass bei temporär fehlender Netzwerkverbindung keine Daten verloren gehen. Gleichzeitig wird dem MobiCheck-Connector ein stabiler Zugriff auf konsistente und bereits vorverarbeitete Daten ermöglicht.

Der MobiCheck-Connector ist als integraler Bestandteil des Edge-Gateways implementiert und abstrahiert die Kommunikation mit der physischen Sensorik vollständig. Herstellerspezifische oder proprietäre Protokolle werden gekapselt und in ein standardisiertes, systemweit einheitliches Datenmodell überführt. Dadurch wird eine klare Trennung zwischen hardwarenaher Datenerfassung und zentraler Datenverarbeitung erreicht.

Zusätzlich stellt der Connector eine standardisierte REST-basierte Schnittstelle bereit, über die das Backend strukturiert auf Sensor- und Messdaten zugreifen kann. Die Kommunikation erfolgt

zustandslos und ermöglicht eine flexible Integration in unterschiedliche Backend-Prozesse. Neue Sensortypen oder Hardwarekomponenten können ohne Anpassungen im Backend integriert werden, solange sie über den Connector angebunden werden.

Der Edge-Server und der MobiCheck-Connector bilden gemeinsam eine logisch gekoppelte Einheit innerhalb des Edge-Gateways. Während der Edge-Server für die kontinuierliche Datenerfassung und Vorverarbeitung verantwortlich ist, übernimmt der Connector die Standardisierung und Bereitstellung der Daten für das Backend. Diese funktionale Trennung ermöglicht eine robuste, skalierbare und wartbare Architektur.

3.3 Datenfluss, Synchronisation und Betriebsmodi

Die Synchronisation zwischen Edge-Gateways und MobiCheck-Backend erfolgt über ein pollingbasiertes Verfahren, bei dem das Backend die Daten in definierten Intervallen aktiv von den Edge-Systemen abruft. Die Datenübertragung erfolgt zeitbereichsbasiert unter Verwendung expliziter Start- und Endzeitstempel.

Dieses Verfahren ermöglicht eine robuste Synchronisation auch bei instabilen oder intermittierenden Netzwerkverbindungen. Durch die Verwendung von Zeitstempeln wird sichergestellt, dass Daten eindeutig zugeordnet werden können und keine semantischen Inkonsistenzen entstehen. Die Verarbeitung ist idempotent ausgelegt, wodurch doppelte Übertragungen auf Datenbankebene ausgeschlossen werden.

Ein wesentliches Architekturprinzip ist das Store-and-Forward-Konzept. Dabei werden Messdaten zunächst lokal auf dem Edge-Gateway gespeichert und erst bei verfügbarer Netzwerkverbindung an das Backend übertragen. Die Pufferung erfolgt abhängig von der verfügbaren Speicherressource und ermöglicht die Speicherung von Messdaten über längere Zeiträume.

Bei längeren Verbindungsabbrüchen entstehen keine Datenverluste. Stattdessen werden die Daten nach Wiederherstellung der Verbindung sukzessive nachübertragen. Das Backend erkennt fehlende Zeitbereiche anhand der Zeitstempelstruktur und integriert die Daten konsistent in die bestehende Datenbasis.

Das System unterstützt drei Betriebsmodi. Im Online-Betrieb erfolgt eine kontinuierliche Synchronisation zwischen Edge und Backend, so dass Messwerte nahezu in Echtzeit verarbeitet und für Visualisierung und Alarmierung verfügbar sind. Im Hybrid-Betrieb ist die Netzwerkverbindung intermittierend verfügbar, wodurch Daten zunächst lokal gepuffert und anschließend in aggregierten Zeitfenstern synchronisiert werden. Im Offline-Betrieb erfolgt die Datenerfassung vollständig lokal, beispielsweise im Rahmen mobiler Inspektionen, mit späterer Synchronisation.

3.4 BIM-Integration, OSM-Visualisierung, Skalierung und Systemverhalten

Ein zentraler Bestandteil der Architektur ist die Integration von BIM-Modellen zur räumlichen Visualisierung von Sensordaten im Kontext eines digitalen Zwillings. Grundlage bilden IFC-basierte Gebäudemodelle, die in ein performantes, weboptimiertes Format überführt und im System visualisiert werden.

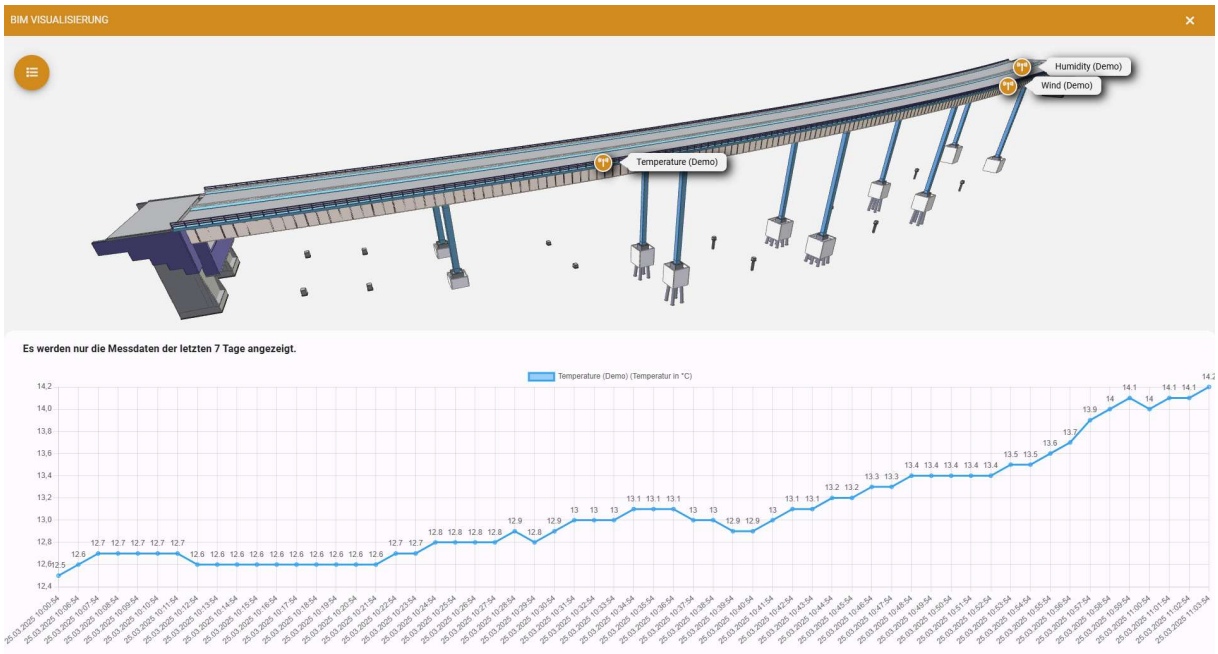

Abbildung 2 Visualisierung der Temperaturdaten mithilfe der Verortung des Sensors im BIM-Modell

Die Verknüpfung von Sensoren mit dem BIM-Modell erfolgt über geometrische Koordinaten oder Bauteilreferenzen. Dadurch können Messdaten direkt im räumlichen Kontext des Bauwerks dargestellt und analysiert werden. Dies ermöglicht eine intuitive Bewertung von Bauwerkszuständen und unterstützt die Ableitung von Maßnahmen im Rahmen der Instandhaltung.

Ergänzend zur BIM-basierten Visualisierung wurde ein Geoinformationssystem (GIS) auf Basis von OpenStreetMap (OSM) integriert. Ein GIS dient der räumlichen Darstellung und Analyse von georeferenzierten Daten und ermöglicht die Verortung von Bauwerken, Sensoren und Messdaten im geographischen Kontext. Die Nutzung von OSM erlaubt dabei eine flexible und webbasierte Darstellung ohne Abhängigkeit von proprietären Kartendiensten.

Sensordaten können innerhalb der OSM-basierten Visualisierung über sogenannte Points of Interest (POIs) abgerufen werden. Dabei werden Sensoren oder Sensorgruppen als geographische Marker dargestellt, über die aktuelle Messwerte sowie historische Daten direkt zugänglich sind. Bei räumlich eng beieinanderliegenden Sensoren oder identischen GPS-Koordinaten im Sensorknoten erfolgt eine automatische Clusterbildung, um Überlagerungen zu vermeiden und die Darstellung übersichtlich zu halten. Die einzelnen Sensoren können innerhalb eines Clusters gezielt ausgewählt und detailliert betrachtet werden. Diese Form der Visualisierung ermöglicht insbesondere bei verteilten Infrastrukturen eine schnelle Übersicht über den Zustand mehrerer Bauwerke und ergänzt die detaillierte BIM-basierte Darstellung um eine geographische Perspektive.

Ein wesentlicher Bestandteil des Systems ist die Erweiterung der MobiCheck-App, die eine direkte Nutzung im Feld ermöglicht. Sie unterstützt insbesondere die Durchführung handnaher Prüfungen am Bauwerk. Prüfungen können vor Ort durchgeführt, dokumentiert und unmittelbar mit Sensordaten verknüpft werden.

Ein zentraler Mechanismus ist dabei die serverseitige Bereitstellung von Konfigurationen. Prüfpläne, Geräteeinstellungen und Parameter werden im Backend verwaltet und auf die mobilen Endgeräte übertragen. Dadurch wird sichergestellt, dass Prüfungen standardisiert, reproduzierbar und konsistent durchgeführt werden. Änderungen an Prüfkonfigurationen können zentral vorgenommen und ohne manuelle Verteilung unmittelbar im Feld genutzt werden.

Die Kombination aus kontinuierlicher Sensordatenerfassung über Edge-Systeme und handnaher Prüfung über mobile Geräte stellt einen wesentlichen Mehrwert der Architektur dar. Automatisch erfasste Sensordaten und manuell erhobene Prüfdaten werden im Backend zusammengeführt und gemeinsam ausgewertet. Dadurch entsteht ein ganzheitliches Bild des Bauwerkszustands.

Zusätzlich wurden Schnittstellen zur Weitergabe der Daten an externe Systeme implementiert, insbesondere zur Integration in Systeme wie WPM oder des jeweiligen Betreibers. Dies ermöglicht eine Weiterverarbeitung der Daten in bestehenden Systemlandschaften. Gleichzeitig bleibt die Datenhoheit beim Betreiber, da alle Daten innerhalb der Systemarchitektur kontrolliert verarbeitet und bereitgestellt werden.

Die Architektur ist skalierbar ausgelegt und ermöglicht den parallelen Betrieb mehrerer Edge-Gateways sowie die Integration großer Sensornetzwerke. Ein aktueller technischer Engpass liegt in der sequentiellen Verarbeitung von Polling-Anfragen im Backend. Für zukünftige Ausbaustufen ist daher eine Parallelisierung der Verarbeitung sowie der Einsatz von Queue-basierten Mechanismen vorgesehen.

Die Alarmierungslogik basiert auf regelbasierten Schwellenwerten, die pro Sensor definiert werden. Bei Überschreitung dieser Grenzwerte erfolgt eine automatische Ereignisgenerierung. Die End-to-End-Latenz ergibt sich aus Messintervall, Synchronisationszyklus und Verarbeitungszeit und liegt im Online-Betrieb typischerweise im Bereich unter einer Minute.

Aufbauend auf der beschriebenen Architektur wurden zusätzlich Integrationsmechanismen für externe Systeme sowie die Erweiterung der MobiCheck-App zur Unterstützung handnaher Prüfprozesse umgesetzt.

3.5 Integration mit WPM und ZIS Ing-Bau

Ein weiterer zentraler Bestandteil der Systemarchitektur ist die Integration in bestehende Fachsysteme, insbesondere im Kontext des Bauwerksmanagements. Hierzu wurde eine Schnittstelle zur Anbindung an das System „ZIS Ing-Bau“ des Projektpartners WPM konzipiert und umgesetzt. Ziel dieser Integration ist es, die im ImaB-Edge-System erfassten und verarbeiteten Sensordaten sowie Prüfergebnisse strukturiert in bestehende Daten- und Prozesslandschaften zur Bauwerksprüfung zu überführen.

Die Schnittstellen wurden so gestaltet, dass sowohl kontinuierlich erfasste Sensordaten als auch Ergebnisse aus handnahen Prüfungen mittels der im Projekt dazu weiter entwickelten MobiCheck-App in standardisierter Form exportiert werden können. Dabei erfolgt eine Transformation der internen Datenstruktur in die für die Zielsysteme erforderlichen Formate und Datenmodelle. Dies umfasst insbesondere die Zuordnung von Sensoren und Messwerten zu Bauwerksobjekten sowie die Übergabe von Zustandsinformationen und Ereignissen.

Durch die Integration in ZIS Ing-Bau wird eine direkte Anschlussfähigkeit an etablierte Systeme im Bereich der Bauwerksprüfung und -verwaltung erreicht. Dies ermöglicht es, die im Projekt entwickelten Technologien nicht isoliert zu betreiben, sondern in bestehende Prozesse der Infrastrukturbetreiber einzubinden. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass bereits vorhandene Datenbestände und Systeme weiterhin genutzt werden können.

Ein wesentliches Prinzip der Integration ist die Wahrung der Datenhoheit beim Betreiber. Die Daten werden kontrolliert aus dem ImaB-Edge-System heraus bereitgestellt, ohne dass eine Abhängigkeit von externen Systemen entsteht. Dadurch bleibt die Architektur offen und flexibel erweiterbar.

3.6 Mobile Applikation und handnahe Prüfung

Die mobile Applikation stellt eine zentrale Komponente der Gesamtlösung dar und ermöglicht die Nutzung des Systems direkt im Feld. Sie wurde speziell für den Einsatz in praxisnahen Szenarien entwickelt, in denen Prüfungen unter realen Bedingungen am Bauwerk durchgeführt werden.

Ein wesentlicher Anwendungsfall ist die handnahe Prüfung unter dem Einsatz eines mobilen ZfPBau-Systems. Dabei werden Prüfungen direkt am Bauwerk durchgeführt, Messgeräte eingebunden und die Ergebnisse unmittelbar digital erfasst. Die im Projekt erweiterte MobiCheck-App ermöglicht es, diese Prüfungen strukturiert durchzuführen, zu dokumentieren und in das Gesamtsystem zu integrieren.

Ein zentraler Bestandteil ist die serverseitige Bereitstellung von Prüfkonfigurationen. Prüfpläne, Parameter und Geräteeinstellungen werden im Backend definiert und auf die mobilen Endgeräte übertragen. Dadurch wird sichergestellt, dass Prüfungen standardisiert und konsistent durchgeführt werden können. Gleichzeitig können Anpassungen zentral vorgenommen und ohne manuellen Aufwand im Feld verfügbar gemacht werden.

Die MobiCheck-App ist für unterschiedliche Betriebsmodi ausgelegt und unterstützt sowohl Online- als auch Offline-Szenarien. Im Offline-Betrieb können Prüfungen vollständig lokal durchgeführt und gespeichert werden. Nach Wiederherstellung der Netzwerkverbindung erfolgt eine Synchronisation mit dem Backend, wodurch die Daten in die zentrale Datenbasis integriert werden.

Neben der Durchführung von Prüfungen ermöglicht die MobiCheck-App auch die Identifikation und Zuordnung von Sensoren vor Ort, beispielsweise über QR- oder NFC-basierte Verfahren. Dadurch können Sensordaten und Prüfergebnisse eindeutig einem Bauwerkskontext zugeordnet werden.

Die Kombination aus mobiler Datenerfassung, handnaher Prüfung und zentraler Datenverarbeitung stellt einen wesentlichen Mehrwert der Lösung dar. Automatisch erfasste Sensordaten und manuell erhobene Prüfdaten werden zusammengeführt und ermöglichen eine ganzheitliche Bewertung des Bauwerkszustands.

4. Sensorintegration, Datenverarbeitung und Visualisierung

Im Rahmen des Projekts wurden unterschiedliche Sensortypen über standardisierte und erweiterbare Schnittstellen in das ImaB-Edge-System integriert. Die Anbindung erfolgte mittels MobiCheck-Connector über den durch das IZFP entwickelten Edge-Server, der herstellerspezifische Protokolle abstrahiert und in ein einheitliches Datenmodell überführt. Dadurch konnten heterogene Datenquellen konsistent verarbeitet und in das Gesamtsystem eingebunden werden.

Die erfassten Sensordaten werden nach der Vorverarbeitung auf Edge-Ebene an das Backend übertragen, dort validiert und persistent gespeichert. Im Backend erfolgt die Zusammenführung der Daten aus unterschiedlichen Quellen, einschließlich kontinuierlicher Sensordaten sowie Daten aus handnahen Prüfungen. Durch die Vereinheitlichung der Datenstruktur wird eine systemübergreifende Auswertung ermöglicht.

Die Visualisierung erfolgt in mehreren Darstellungsformen. Neben tabellarischen und grafischen Ansichten stehen insbesondere BIM-basierte Visualisierungen zur Verfügung, in denen Sensoren und Messwerte direkt im räumlichen Kontext des Bauwerks dargestellt werden. Ergänzend wurden kartenbasierte Darstellungen auf Basis von OpenStreetMap integriert.

Ein typisches Anwendungsszenario ist die Bauwerksüberwachung von Brücken. Sensoren erfassen kontinuierlich Messwerte, die im System verarbeitet und visualisiert werden. In der BIM-Ansicht können Sensoren direkt am Bauteil dargestellt werden, einschließlich aktueller Werte und historischer Verläufe. Kritische Zustände können visuell hervorgehoben werden.

Zusätzlich können im Rahmen handnaher Prüfungen Messdaten vor Ort über die MobiCheck-App erfasst und mit den Sensordaten verknüpft werden. Dadurch entsteht eine kombinierte Sicht aus kontinuierlichem Monitoring und punktuellen Prüfungen.

Zur Zustandsüberwachung wurden Alarmierungsmechanismen implementiert. Für Sensoren definierte Schwellenwerte führen bei Überschreitung zu automatischen Ereignissen, die im System dargestellt beziehungsweise an zuständige Personen per E-Mail weitergeleitet werden. Alarmierungen können ausgelöst werden, wenn beispielsweise ein Sensor-Messwert eine kritische Schwelle erreicht oder ein Sensor für längere Zeit keine Daten liefert.

Für die eindeutige Identifikation und Verortung von Sensoren wurden QR- und NFC-basierte Verfahren integriert, wodurch eine direkte Zuordnung im Bauwerkskontext möglich ist.

Der Mehrwert gegenüber dem Stand der Technik liegt in der durchgängigen Integration von Sensordaten, Prüfprozessen und BIM- sowie OSM-basierter Visualisierung. ImaB-Edge verbindet Edge-basierte Vorverarbeitung, zentrale Datenintegration und mobile Nutzung zu einer konsistenten und praxistauglichen Gesamtlösung.

5. MobiCheck-App und Nutzung im Feld

Die weiterentwickelte MobiCheck-App ermöglicht den direkten Zugriff auf das ImaB-Edge-System im Feld und unterstützt Prüfprozesse unmittelbar am Bauwerk. Sie wurde speziell für den Einsatz unter realen Bedingungen konzipiert und berücksichtigt sowohl eingeschränkte Konnektivität als auch die Anforderungen an eine effiziente und intuitive Bedienung vor Ort.

Ein zentraler Anwendungsfall ist die Durchführung handnaher Prüfungen im Sinne der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. Insbesondere kommen hierbei Ultraschallverfahren zum Einsatz, mit denen Materialien wie Beton, Mauerwerk oder Holz untersucht werden können, ohne das Bauteil zu beschädigen. Diese Verfahren dienen der Qualitätssicherung, der Schadensanalyse sowie der Bewertung der Standsicherheit und sind insbesondere bei eingeschränkter Zugänglichkeit von Bauteilen von hoher Relevanz.

Die mobile Anwendung bildet diese handnahen Prüfprozesse digital ab und unterstützt so den Einsatz eines mobilen ZfPBau-Systems. Prüfungen können direkt am Bauwerk durchgeführt, Messgeräte eingebunden und die Ergebnisse strukturiert erfasst werden. Die Anwendung unterstützt dabei sowohl die Durchführung als auch die Dokumentation der Prüfungen und integriert diese nahtlos in die Gesamtarchitektur.

Ein wesentlicher Bestandteil ist die serverseitige Bereitstellung von Prüfkonfigurationen. Prüfpläne, Parameter und Geräteeinstellungen werden im Backend verwaltet und auf die mobilen Endgeräte übertragen. Dadurch wird sichergestellt, dass Prüfungen standardisiert, reproduzierbar und konsistent durchgeführt werden können. Anpassungen können zentral vorgenommen und ohne zusätzlichen Aufwand im Feld genutzt werden.

Neben geplanten Prüfungen ermöglicht die MobiCheck-App auch die Durchführung außerplanmäßiger, spontaner Prüfungen direkt vor Ort. Dadurch können Auffälligkeiten unmittelbar untersucht und dokumentiert werden, ohne dass zuvor eine zentrale Planung erforderlich ist. Die dabei erfassten Daten werden analog zu den regulären Prüfungen in das System integriert und stehen für die weitere Auswertung zur Verfügung.

Zusätzlich ermöglicht die mobile Anwendung die Identifikation und Zuordnung von Sensoren direkt vor Ort, beispielsweise über QR- oder NFC-basierte Verfahren. Dadurch können Sensordaten,

Prüfergebnisse und Bauwerksobjekte eindeutig miteinander verknüpft werden, was die Nachvollziehbarkeit und Auswertung der Daten deutlich verbessert.

Die Anwendung ist für unterschiedliche Betriebsmodi ausgelegt und unterstützt sowohl Online- als auch Offline-Szenarien. Im Offline-Betrieb können Prüfungen vollständig lokal durchgeführt und gespeichert werden, was zum Beispiel an Brückenbauwerken mit schlechter Netzanbindung von entscheidender Bedeutung ist. Nach Wiederherstellung der Netzwerkverbindung erfolgt automatisch eine Synchronisation mit dem Backend, wodurch die Daten in die zentrale Datenbasis integriert werden.

Durch die enge Integration mit den Backend- und Edge-Komponenten können kontinuierlich erfasste Sensordaten und manuell erhobene Prüfdaten gemeinsam genutzt und ausgewertet werden. Dadurch entsteht eine konsistente und ganzheitliche Sicht auf den Bauwerkszustand.

Insgesamt ergibt sich ein erheblicher Mehrwert für Prüfer und Betreiber, da Prüfprozesse flexibel und situationsabhängig durchgeführt werden können. Durch die zentrale Bereitstellung von Konfigurationen wird zudem eine hohe Standardisierung und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse erreicht. Gleichzeitig ermöglicht die Kombination aus automatisierter Sensordatenerfassung und manueller Prüfung eine deutlich verbesserte Datenbasis für die Zustandsbewertung. Darüber hinaus wird die Nachvollziehbarkeit und Dokumentation von Prüfungen verbessert, da alle Daten strukturiert und revisionssicher im System gespeichert werden.

6. Zusammenarbeit mit Projektpartnern

Die Umsetzung des Vorhabens erfolgte in enger und kontinuierlicher Abstimmung mit den Projektpartnern. Die Zusammenarbeit war geprägt durch eine arbeitsteilige Entwicklung entlang der definierten Arbeitspakete sowie durch regelmäßige Abstimmungen zur Spezifikation, Umsetzung und Validierung der Systemkomponenten.

Eine zentrale Rolle spielte die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IZFP, insbesondere im Bereich des Edge-Gateways sowie der sensornahen Datenverarbeitung und Integration. Hier wurden gemeinsam Konzepte zur Edge-Architektur, zur Datenübertragung sowie zur Vorverarbeitung und Fusion von Sensordaten entwickelt und abgestimmt. Die enge Verzahnung zwischen Edge-Systemen und MobiCheck-Backend stellte dabei einen wesentlichen Erfolgsfaktor für die Gesamtarchitektur dar.

Im Bereich der Sensorik entwickelte sich eine enge Zusammenarbeit mit dem Projektpartner microsensys. Der Fokus lag hier insbesondere auf der Integration geeigneter Sensortypen sowie auf Technologien zur Identifikation und Verortung von Sensoren im Bauwerkskontext. Die bereitgestellten Komponenten und Konzepte wurden in die Gesamtarchitektur integriert und gemeinsam weiterentwickelt.

Mit dem Projektpartner WPM erfolgte die Abstimmung insbesondere im Hinblick auf die Integration der Projektergebnisse in bestehende Systeme des Bauwerksmanagements. Dabei wurden Schnittstellen zur Weitergabe und Nutzung der im Projekt erzeugten Daten, insbesondere im Kontext von ZIS Ing-Bau, konzipiert und umgesetzt. Ziel war es, eine nahtlose Einbindung in bestehende Prozesse und Systemlandschaften zu ermöglichen.

Weitere Projektpartner, insbesondere aus dem anwendungsorientierten Bereich, brachten ihre fachlichen Anforderungen und praktischen Erfahrungen in die Spezifikation und Bewertung der Systemkomponenten ein. Diese enge Einbindung stellte sicher, dass die entwickelten Lösungen an realen Einsatzszenarien ausgerichtet sind und den Anforderungen von Betreibern und Prüfern entsprechen.

Die Anforderungen an das System wurden gemeinsam erarbeitet, iterativ verfeinert und im Projektverlauf kontinuierlich validiert. Dabei wurden sowohl technische als auch fachliche Aspekte berücksichtigt. Die Zusammenarbeit erfolgte über regelmäßige Projekttreffen, Workshops sowie abgestimmte Entwicklungs- und Testphasen.

Insgesamt zeichnete sich die Zusammenarbeit durch eine hohe fachliche Qualität, kurze Abstimmungswege und eine konstruktive Arbeitsweise aus. Dies trug maßgeblich dazu bei, die komplexen Anforderungen des Projekts erfolgreich umzusetzen und die einzelnen Komponenten zu einem funktionierenden Gesamtsystem zusammenzuführen.

7. Vergleich mit ursprünglicher Planung (Zeit, Arbeit, Inhalte)

Im Vergleich zur ursprünglichen Planung ergaben sich im Projektverlauf insbesondere zeitliche Verschiebungen in der Anfangsphase. Die Anforderungsanalyse und Spezifikation nahmen mehr Zeit in Anspruch als initial vorgesehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Komplexität der zu integrierenden Systeme sowie die Abstimmung zwischen den Projektpartnern höher war als ursprünglich angenommen. Insbesondere die Definition der Schnittstellen, Datenmodelle und Einsatzszenarien erforderte eine intensivere Abstimmung.

Diese verlängerte Spezifikationsphase führte dazu, dass die Umsetzungsarbeiten später begannen als geplant. Gleichzeitig konnte dadurch jedoch eine belastbare und tragfähige Architekturgrundlage geschaffen werden, die im weiteren Projektverlauf zu einer effizienteren Umsetzung beitrug. Die Verzögerungen aus der Anfangsphase wurden im Laufe des Projekts durch eine verstärkte Umsetzungstätigkeit kompensiert.

Inhaltlich wurden die im Antrag vorgesehenen Arbeitspakete entsprechend der Zielsetzung umgesetzt. Die Arbeitspakete zur Anforderungsanalyse und Systemkonzeption wurden vollständig abgeschlossen und bildeten die Grundlage für die folgenden Entwicklungsarbeiten. In den Bereichen Sensorintegration, Edge-Computing, Datenverarbeitung und mobile Anwendung konnten die vorgesehenen Funktionen vollumfänglich realisiert werden.

Im Vergleich zur ursprünglichen Planung zeigte sich, dass die Zeitspanne für Anforderungsanalyse, Spezifikation und Schnittstellendefinition höher war als initial angenommen. Dies führte zu einem verzögerten Beginn der Umsetzungsarbeiten. Im weiteren Projektverlauf konnten diese Verzögerungen jedoch durch eine verstärkte Umsetzungstätigkeit kompensiert werden. Insgesamt ergab sich eine Zeitverschiebung innerhalb der Arbeitspakete, ohne die Gesamtzielsetzung zu gefährden.

Die in den Zwischenberichten 2023 und 2024 dokumentierten Entwicklungen bestätigen diesen Verlauf. Während im Jahr 2023 der Fokus auf Anforderungsanalyse, Systemkonzeption und erste prototypische Umsetzungen lag, verlagerte sich der Schwerpunkt im Jahr 2024 auf Integration, Test und Betrieb der Gesamtlösung.

Insgesamt wurden die wesentlichen Projektziele im vorgesehenen Zeitraum erreicht und zum Teil sogar überschritten, wie zum Beispiel bei der Implementierung des Reallabors am Standort des IZFP. Die vorgenommenen Anpassungen in der Priorisierung sowie die iterative Vorgehensweise haben sich als zielführend erwiesen und maßgeblich dazu beigetragen, ein funktionsfähiges und praxistaugliches Gesamtsystem zu realisieren.

8. Verwendung der Zuwendung

Die eingesetzten Mittel wurden überwiegend für Personalaufwände in der Softwareentwicklung verwendet. Den größten Anteil nahmen dabei Tätigkeiten in der Backend-Entwicklung und der

Datenverarbeitung ein, gefolgt von der Frontend- und BIM-bezogenen Entwicklung sowie der Weiterentwicklung der MobiCheck-App.

Weitere wesentliche Aufwände entfielen auf die Implementierung von Schnittstellen, insbesondere des MobiCheck-Connectors sowie der Anbindung externer Systeme wie ZIS Ing-Bau, auf die Systemintegration sowie auf Test- und Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Sachmittel wurden für die Serverinfrastruktur eingesetzt, insbesondere für Serverbetrieb, Testumgebungen und Entwicklungsinfrastruktur, soweit diese projektbezogen erforderlich waren. Sowohl bei den Sach- als auch den Reisekosten wurden im Laufe des Projektes weniger Mittel benötigt als beantragt. Gleichzeitig haben wir deutlich mehr Arbeitsstunden geleistet, als im Projekt kalkuliert waren. Um zumindest einen Teil dieser auf eigene Kosten geleisteten Arbeiten zu kompensieren, wurde eine Mittelumwidmung beantragt.

Die Mittelverwendung entspricht den im zahlenmäßigen Nachweis dargestellten Hauptkostenpositionen. Insgesamt ist die Verwendung der Zuwendung als sachgerecht, wirtschaftlich und zielgerichtet zu bewerten, da sie unmittelbar zur Umsetzung der technischen Kernkomponenten und zur Erreichung der Projektziele beigetragen hat.

9. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren erforderlich, um die angestrebte Integration von BIM, OSM, Sensorik, Edge-Computing sowie mobilen Anwendungen in einem Gesamtsystem zu realisieren. Die Kombination dieser Technologien sowie die Berücksichtigung unterschiedlicher Einsatzszenarien führten zu einer erhöhten fachlichen und technischen Komplexität, die eine strukturierte und schrittweise Vorgehensweise notwendig machte.

Zu Beginn des Projekts nahm die Anforderungsanalyse und Spezifikation mehr Zeit in Anspruch als ursprünglich geplant. Dies ist insbesondere auf die Abstimmungsbedarfe zwischen den Projektpartnern, die Definition einheitlicher Schnittstellen und Datenmodelle sowie die Berücksichtigung unterschiedlicher Einsatzbedingungen zurückzuführen. Die verlängerte Spezifikationsphase war jedoch erforderlich, um eine tragfähige Grundlage für die anschließenden Entwicklungsarbeiten zu schaffen.

Im weiteren Projektverlauf zeigte sich, dass die vertiefte Spezifikation zu einer Reduktion von Anpassungsbedarfen in späteren Phasen beigetragen hat. Insbesondere konnten Schnittstellen klar definiert und Integrationsrisiken frühzeitig minimiert werden. Dadurch wurde eine zielgerichtete Umsetzung der technischen Komponenten unterstützt.

Die Durchführung der Arbeiten erfolgte auf Basis eines strukturierten und iterativen Vorgehensmodells. Spezifikation, Implementierung und Validierung wurden eng miteinander verzahnt. Test- und Qualitätssicherungsmaßnahmen wurden kontinuierlich durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit der einzelnen Komponenten sowie des Gesamtsystems sicherzustellen.

Die Einbindung der Projektpartner in die Spezifikation und Bewertung der Ergebnisse stellte sicher, dass die entwickelten Lösungen den praktischen Anforderungen entsprechen. Durch diesen abgestimmten Ansatz konnten Fehlentwicklungen vermieden und die Praxistauglichkeit der Ergebnisse gewährleistet werden. Die Praxistauglichkeit der im Projekt entwickelten Lösungen konnte in zwei Reallaboren unter Beweis gestellt, zuletzt in der Abschlussveranstaltung, in der wir in einem live durchgeführten Testlauf die gesamte Kommunikationstrecke von der Fahrzeug-Erkennung durch die in der Erde verbauten Sensoren bis zur Anzeige der Daten im MobiCheck und der anschließenden Weitergabe an ZIS Ing-Bau vorführten.

Insgesamt sind die durchgeführten Arbeiten als notwendig und angemessen im Sinne der Zielsetzung des Vorhabens zu bewerten. Die gewählte Vorgehensweise hat sich im Projektverlauf als geeignet erwiesen, die technischen Herausforderungen zu bewältigen und die angestrebten Ergebnisse zu erreichen.

10. Ergebnisse und Zielerreichung

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein integriertes Gesamtsystem entwickelt, das die Lücke zwischen Datenerfassung und nutzbarer Auswertung von Bauwerksdaten schließt. Ziel war es, Sensordaten, Prüfprozesse und Bauwerksmodelle in einer durchgängigen Systemarchitektur zu vereinen und für unterschiedliche Anwendungsszenarien verfügbar zu machen. Dieses Ziel wurde im Projektverlauf erreicht.

Zu den zentralen Ergebnissen gehört der entwickelte MobiCheck-Connector, der eine standardisierte Integration von Edge-Systemen und heterogener Sensorik ermöglicht. Ergänzend wurde eine Erweiterung der MobiCheck-App realisiert, die die Nutzung des Systems direkt im Feld unterstützt und insbesondere die Durchführung handnaher Prüfungen unterstützt. Die BIM-basierte Visualisierung stellt Sensordaten im räumlichen Kontext des Bauwerks dar und ermöglicht eine intuitive Analyse und Bewertung.

Weitere wesentliche Funktionalitäten umfassen die kontinuierliche Erfassung und Vorverarbeitung von Sensordaten über Edge-Gateways, die zentrale Datenverarbeitung und -haltung im Backend, die Synchronisation zwischen Edge- und Cloud-Komponenten sowie die Integration von GIS-basierten Visualisierungen. Zusätzlich wurden Mechanismen zur Alarmierung, zur Identifikation und Verortung von Sensoren sowie zur Integration in externe Systeme umgesetzt.

Die entwickelte Architektur ist modular aufgebaut und skalierbar, so dass unterschiedliche Einsatzszenarien und Sensornetzwerke unterstützt werden können. Die Integration von Edge-Computing wurde erfolgreich umgesetzt und ermöglicht eine robuste Datenverarbeitung auch unter eingeschränkten Netzwerkbedingungen.

Die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems wurde im Rahmen von Testumgebungen und realitätsnahen Einsatzszenarien nachgewiesen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die einzelnen Komponenten zuverlässig zusammenarbeiten und die vorgesehenen Funktionen erfüllt werden.

Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses befindet sich das System in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstand und ist weitgehend funktionsfähig, jedoch noch nicht vollständig in einen produktiven Betrieb überführt. Insbesondere bestehen noch Potenziale zur weiteren Optimierung hinsichtlich Skalierung, Performance und Systemhärtung.

Um den Projekterfolg sicherzustellen, wurden über das offizielle Laufzeitende hinaus weitere Arbeiten zur Stabilisierung, Integration und Finalisierung einzelner Komponenten durchgeführt. Diese Maßnahmen dienten dazu, die entwickelten Ergebnisse konsistent zusammenzuführen und eine belastbare Grundlage für die anschließende Verwertung zu schaffen.

Insgesamt wurden die angestrebten Projektziele erreicht. Die entwickelten Komponenten bilden ein funktionsfähiges, modular erweiterbares Gesamtsystem, das die Grundlage für eine Überführung in produktive Anwendungen sowie für weiterführende Entwicklungen darstellt.

11. Verwertbarkeit und Zukunftsperspektiven

Die im Projekt erzielten Ergebnisse bilden die Grundlage für eine Weiterführung und Verwertung der entwickelten Systemkomponenten. Ziel ist es, die im Projekt entstandenen Software- und Systemmodule schrittweise in marktfähige Produkte zu überführen.

Ein zentraler Schwerpunkt liegt auf der Weiterentwicklung der entwickelten Softwarekomponenten hin zur Produktreife. Hierzu zählen insbesondere die Ausarbeitung geeigneter Lizenz- und Preismodelle, beispielsweise auf Basis von Nutzungsparametern wie Anzahl der Sensoren, Nutzer oder Anwendungen, sowie die Implementierung zusätzlicher Funktionalitäten wie Backup- und Recovery-Mechanismen. Ergänzend sind Analysen zur Marktpositionierung sowie die Entwicklung von Vertriebs- und Marketingkonzepten vorgesehen, um eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse zu ermöglichen.

Durch die enge Zusammenarbeit der Projektpartner bestehen zudem konkrete Möglichkeiten zur gemeinsamen Umsetzung von Kundenprojekten. Insbesondere durch die Integration der entwickelten Lösungen in die Produkt- und Systemlandschaften von microsensys und WPM können bestehende Marktzugänge genutzt und neue Anwendungsprojekte akquiriert werden.

Darüber hinaus bieten die im Projekt entwickelten Module Potenzial für den Einsatz in weiteren Anwendungsbereichen. Neben der Überwachung von Infrastrukturbauwerken können die zugrunde liegenden Technologien auch auf andere Szenarien übertragen werden, beispielsweise im Bereich öffentlicher Immobilien oder privater Gebäude, bei denen sensorbasierte Zustandsüberwachung relevant ist.

Ein weiterer Verwertungsansatz besteht in der Nutzung der entwickelten Architektur und Technologien in zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsprojekten. Die im Projekt geschaffene Infrastruktur bietet eine geeignete Grundlage, um weiterführende Fragestellungen im Bereich Edge-Computing, Sensorintegration und datenbasierter Zustandsbewertung zu adressieren.

Insgesamt bilden die Projektergebnisse eine tragfähige Basis für sowohl wirtschaftliche als auch wissenschaftlich-technische Anschlussaktivitäten.

12. Fortschritt auf dem Gebiet bei Dritten

Im Projektverlauf wurden keine direkt vergleichbaren konkurrierenden Entwicklungen identifiziert, die eine durchgängige Integration von Sensorik, Edge-Computing, mobiler Datenerfassung sowie BIM- und GIS-basierter Visualisierung in einem einheitlichen Systemansatz realisieren.

Der Markt im Bereich Bauwerksmonitoring und Sensorik wurde kontinuierlich beobachtet. Dabei zeigte sich, dass bestehende Lösungen überwiegend einzelne Teilaspekte adressieren, beispielsweise Sensordatenerfassung, Inspektionsunterstützung oder Visualisierung, jedoch keine konsistente Verknüpfung dieser Komponenten über alle Ebenen hinweg bieten.

Das im Projekt entwickelte System hebt sich insbesondere durch die Kombination aus Edge-basierter Datenverarbeitung, handnaher mobiler Prüfung sowie der Integration in digitale Bauwerksmodelle und GIS-Strukturen ab. Diese integrative Herangehensweise ermöglicht eine durchgängige Digitalisierung von der Datenerfassung bis zur Nutzung und stellt damit einen klaren Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik dar.

13. Veröffentlichungen

Im Projektzeitraum wurden durch EUROKEY keine eigenständigen wissenschaftlichen Publikationen im engeren Sinne erstellt. Die Ergebnisse wurden jedoch im Rahmen verschiedener Demonstrationen, Veranstaltungen und medialer Beiträge aktiv präsentiert und verbreitet.

EUROKEY war insbesondere an der Darstellung der Projektergebnisse im Rahmen eines Fernsehbeitrags des Saarländischen Rundfunks beteiligt, in dem das System und dessen Anwendung im Kontext realer Bauwerksüberwachung vorgestellt wurden. Darüber hinaus wurden Projektergebnisse auf Fachveranstaltungen wie dem Zukunft Bau Kongress in Bonn sowie der IT.CON in Saarbrücken präsentiert und mit einem fachkundigen Publikum aus Wirtschaft, Verwaltung und Forschung diskutiert.

Ein weiterer zentraler Bestandteil der Ergebnisverbreitung war die Abschlussveranstaltung des Projekts, bei der das Gesamtsystem anhand von Live-Demonstrationen vorgestellt wurde. Diese Veranstaltung richtete sich gezielt an Vertreter aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft und diente der gezielten Vorbereitung der Verwertung.

Ergänzend wurden Inhalte und Projektergebnisse über projektbezogene Online-Beiträge veröffentlicht, insbesondere über die Projektwebseite (www.imab-edge.de), wodurch eine kontinuierliche öffentliche Sichtbarkeit sichergestellt wurde. Darüber hinaus fanden interne und projektnahe Präsentationen bei Partnern und potenziellen Anwendern statt, die insbesondere der Anbahnung von Folgeprojekten und der weiteren Verwertung dienten.

Eine weitergehende wissenschaftliche und fachliche Verwertung der Ergebnisse ist vorgesehen und wird im Zuge der Kommerzialisierung und Weiterentwicklung des Systems fortgeführt.