

---

# **Kombination von Augmented/Mixed-Reality-Systemen mit weiteren digitalen Technologien**

---

Fachveröffentlichung der  
Bundesanstalt für  
Straßenwesen

---

# Kombination von Augmented/Mixed-Reality-Systemen mit weiteren digitalen Technologien

---

von

Markus König, Firdes Celik, Stephan Embers, Benedikt Faltin, Patrick Herbers,  
Sven Zentgraf

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen, Bochum

Jan-Derrick Braun, David Schammler, Jessica Steinjan

HOCHTIEF ViCon GmbH, Essen

## Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 69.0008

Kombination von Augmented/Mixed-Reality-Systemen mit weiteren digitalen Technologien

Fachbetreuung:

Sonja Nieborowski

Referat:

Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen

Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach

Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/fv-b-69.0008>

Bergisch Gladbach, Juli 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht. Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an [verlag@bast.de](mailto:verlag@bast.de) zur Verfügung gestellt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

## **Kurzfassung**

### **Kombination von Augmented/Mixed-Reality-Systemen mit weiteren digitalen Technologien**

Die Instandhaltung von Gebäuden im Infrastrukturbereich ist aus finanziellen und wirtschaftlichen Gründen von großer Bedeutung. Insbesondere bei Brücken ist es wichtig, die Instandhaltungskosten im Auge zu behalten. Die frühzeitige Erkennung von Schäden und deren frühzeitige Behebung ermöglicht es, den Aufwand für Erhaltungsmaßnahmen zu begrenzen. Die Verfolgung des Schadensverlaufs kann nur durch regelmäßige und häufige Begehungen durch Sachverständige erfolgen, die ihre Befunde in der Regel manuell dokumentieren. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, ein Konzept für ein Brückeninspektionstool vorzustellen, prototypisch umzusetzen und zu evaluieren. Das Brückeninspektionstool wird mehrere Arten von Hardware-Geräten verwenden, um das Brückeninspektionpersonal bei der Beurteilung und Dokumentation von Schäden zu unterstützen, wobei Kombinationen aus Künstlicher Intelligenz und Mixed Reality Technologien eingesetzt werden. Hierfür wurden Interviews mit Bauwerksprüfenden aus verschiedenen Unternehmen und Branchen durchgeführt, um wichtige Anforderungen zu ermitteln. Auf der Grundlage dieser Anforderungen wurde ein Konzept entwickelt, das mit bestehenden Datenbanken für Infrastrukturen kompatibel ist. Weiter wurde das Konzept prototypisch in einen Demonstrator umgesetzt, welcher Informationen über die Künstliche Intelligenz sammelt und mithilfe der Mixed Reality Technologien anzeigt. Hierfür wurde sowohl eine Augmented Reality Anwendung zur Anzeige der gesammelten Informationen, sowie eine Tablet Anwendung zur Datenspeicherung entwickelt. Weiter wurde die entwickelte Künstliche Intelligenz auf einem selbsterstellten Datensatz trainiert, um Schäden erkennen und klassifizieren zu können. Der erstellte Demonstrator wurde unter realen Bedingungen an einem realen Bauwerk von Brückenprüfenden getestet und evaluiert. Die Ergebnisse der Tests zeigen großes Potential für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz und Mixed Reality Technologien, wie im vorgestellten Demonstrator, für Bauwerksprüfungen. Besonders hoch wird das Potenzial der Künstlichen Intelligenz zur Detektion von Schäden gewertet.

## **Abstract**

### **Combination of augmented/mixed reality systems with other digital technologies**

Early detection of damage to bridges is very important for financial and environmental reasons. This can only be achieved by regular and frequent inspections by experts, who usually document their findings by hand. The aim of this research project is to present a concept for a bridge inspection tool, as well as prototype and evaluate the presented concept. The bridge inspection tool will use several types of hardware devices to assist bridge inspection personnel in assessing and documenting damages, using combinations of artificial intelligence and mixed reality technologies. For this purpose, interviews were conducted with structural inspectors from various companies and industries to identify key requirements. Based on these requirements, a concept was developed that is compatible with existing databases for infrastructures. Further, the concept was prototypically implemented in a demonstrator, which collects information with the help of artificial intelligence and displays it using mixed reality technologies. For this purpose, both an augmented reality application for displaying the collected information and a tablet application for data storage were developed. Further, the developed Artificial Intelligence was trained on a self-created dataset to be able to detect and classify damages. The implemented demonstrator was tested and evaluated under real conditions on a real structure by bridge inspectors. The results of the tests show great potential for the use of Artificial Intelligence and Mixed Reality technologies, as presented in the demonstrator, for structural inspections. The potential of Artificial Intelligence for damage detection was rated particularly high.

## **Kurzbericht**

# **Kombination von Augmented/Mixed-Reality-Systemen mit weiteren digitalen Technologien**

## **1 Einleitung**

Durch Alterung der Bauwerke, Änderungen in den Verkehrszusammensetzungen, Einflüsse durch den Klimawandel und steigende Verkehrslasten müssen in erheblichem Umfang Maßnahmen zur Erhaltung der Bauwerke durchgeführt werden. Bei der Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 von Brücken- und Ingenieurbauwerken sowie der Schadensbewertung nach RI-EBW-PRÜF ist es von entscheidender Bedeutung, dass die festgestellten Schäden vollständig, ortsgenau identifiziert sowie reproduzierbar und einheitlich bewertet werden. Dies ist insbesondere auch zur Beurteilung von Schadensentwicklungen und damit zur Beurteilung der Dringlichkeit von durchzuführenden Erhaltungsmaßnahmen unabdingbar. Dafür ist es wichtig, dass das Prüfpersonal Erfahrungen und Fähigkeiten zur Schadenserfassung und Schadensbeurteilung optimal einsetzen und von Aufgaben, die durch Einsatz digitaler Technologien einfacher erledigt werden können, entlastet bzw. von dieser Seite unterstützt wird. Somit hat die Einführung IT-gestützter Prozesse im Betrieb der Infrastruktur eine wichtige Bedeutung, um den erforderlichen Erhaltungsaufwand zu reduzieren.

Die Anwendung einer Kombination aus Augmented bzw. Mixed Reality (AR/MR) und Künstlicher Intelligenz (KI) bzw. Maschinellern Lernen kann diesen Prozess durch z.B. automatische Schadenserkenner bei der Bauwerksprüfung und darauf basierender Informationsbereitstellung unterstützen. Augmented und Mixed Reality bieten u.a. neue Möglichkeiten der Veranschaulichung virtueller Inhalte, der Informationseingabe und Informationsbereitstellung. Visuell können dem Menschen virtuelle Inhalte bereitgestellt werden, der damit die Möglichkeit hat, diese in seine Entscheidungsfindung einzubeziehen und zu bearbeiten. Dafür verwendete Systeme können über Sensoren die reale Umgebung und damit die Ist-Situation aufnehmen und Informationen passend überlagern. Technologien der Künstlichen Intelligenz werden durch das Training von Datenmodellen der Bilderfassung dafür verwendet, Schäden an Bauwerken zu erkennen und zu analysieren. Durch Kombination kann die KI die vom AR/MR-System aufgenommenen Daten zusammen mit anderen zur Verfügung stehenden Daten sowie Erfahrungen mit vergangenen Problemstellungen möglichst in Echtzeit verarbeiten, Muster erkennen und dem Menschen darauf basierende Auswertungsergebnisse und Lösungsvorschläge über das AR/MR-System bereitstellen.

Problemstellung dieses Forschungsprojekts ist es, die zukünftige Entwicklung von AR/MR-Systemen und ihrer Kombination mit weiteren digitalen Technologien, sowie potentielle Anwendungsfälle für die Verkehrsinfrastruktur zu identifizieren. Im Konkreten zielt dieses Projekt auf die Untersuchung der Kombination eines AR/MR-Systems mit KI zur Unterstützung der Schadenserkenner und -bewertung in der Bauwerksprüfung ab. Bei der Begehung des Bauwerks (z.B. einer Brücke) und Durchführung der Prüfung soll der Bauwerksprüfer/die Bauwerksprüferin durch das zu

entwickelnde System unterstützt werden. Dies erfolgt indem basierend auf Auswertungen einer im AR/MR-System integrierten KI möglichst verzögerungsarm nahezu in Echtzeit etwaige Schadensregionen vorgeschlagen, Schäden erkannt sowie in der AR/MR anschaulich markiert werden. Nach Auswahl bzw. Bestätigung des Schadens oder der Schadensregion, soll der Bauwerksprüfer/die Bauwerksprüferin bei der Schadensbewertung durch das AR/MR-System und die integrierte KI unterstützt werden. Des Weiteren werden Informationen und Entscheidungshilfen über das AR/MR-System als virtuelle Überlagerung im realen Umfeld an entsprechender Stelle des Bauwerks visualisiert. Sollten Korrekturen an den Auswertergebnissen durch den Bauwerksprüfer/die Bauwerksprüferin durchgeführt werden müssen, soll diese/r die Möglichkeit haben, Änderungen durch Eingabe im AR/MR-System vorzunehmen. Diese Korrekturen sollen als weitere Daten in das KI-Training einbezogen werden, sodass mit der Zeit eine Verbesserung der Auswertungsergebnisse erzielt werden kann. Zur Darstellung der Potenziale wird ein Konzept für den beschriebenen Anwendungsfall erstellt und anhand eines Demonstrators realisiert. Der Demonstrator soll es u.a. den zukünftigen Anwendern (z.B. Bauwerksprüfer/Bauwerksprüferinnen, Statiker/Statikerinnen) ermöglichen, das zu entwickelnde System mit allen dazugehörigen Komponenten zu testen und als Grundlage für zukünftige Systemrealisierungen dienen. Die Interaktion und Zusammenarbeit zwischen Prüfer/Prüferin, AR/MR-System und KI kann einen Beitrag zur optimierten Bauwerksprüfung leisten, in der Daten möglichst automatisiert und in Echtzeit gesammelt sowie verarbeitet und die Auswerteergebnisse über das AR/MR-System als Entscheidungshilfe für den Bauwerksprüfer/die Bauwerksprüferin bereitgestellt werden. Schäden können damit schneller, einheitlicher und unter Einbeziehung größerer Datenmengen als zuvor bewertet werden.

## **2 Methodik**

Die Gewährleistung der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit von Ingenieurbauwerken ist ein umfassender Prozess bei der Daseinsvorsorge im öffentlichen Raum. Sicherstellen kann man dies nur mit regelmäßigen Qualitätsprüfungen an den Bauwerken vor Ort und einer Nachverfolgung in einem zentralen Qualitätsmanagementsystem, welches Daten zu den Bauwerken von Planung über Bau, während der Erhaltung bis hin zum Abbruch oder Ersatzneubau vorhält.

Die Bauwerksprüfung nach DIN 1076 ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Qualitätssicherung. Die Daten der Prüfungen werden in den existierenden Bauwerksinformationssystemen (z.B. SIB Bauwerke) zusammengetragen. Hieraus lassen sich notwendige Maßnahmen zur Gewährleistung eines jeden Ingenieurbauwerks ableiten. Besonderen Fokus haben hierbei konstruktive Schwachstellen, die vornehmlich bei älteren Bauwerken zu Tage treten und einer genaueren Betrachtung und besonderer Überwachung bedürfen. Solche Schwachstellen können in erheblichem Maße die Nutzbarkeit des Bauwerks einschränken und zur temporären Sperrung bis hin zum Ersatzneubau führen. Im Rahmen der Prüfung nach DIN 1076 werden die Bauwerke nicht

nur aus baulicher Sicht bewertet, sondern ebenfalls nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten analysiert. Selbst wenn die Standsicherheit sichergestellt wäre, die Wirtschaftlichkeitsberechnungen für z.B. eine Sanierung aber nicht positiv bewertet werden könnte, so hätte dies Auswirkungen auf die vorzunehmenden Maßnahmen.

Der Prüfprozess nach DIN 1076 ist komplex und erfordert ein hohes Maß an Erfahrung des Personals vor Ort. Im Zuge einer Hauptprüfung muss das komplette Bauwerk handnah geprüft werden, um Schäden ertasten und mit bloßem Auge erkennen zu können. Die Dokumentation der erfassten Schäden ist aufwändig. Daten zu vorhandenen Schäden, sowie das zugehörige Bauwerksbuch und Bauwerkspläne stehen vor Ort oft nur als Papiausdruck zur Verfügung. All diese Herausforderungen sollen im Rahmen einer Anforderungsanalyse genauer betrachtet werden. Es sollen die relevanten Anforderungen identifiziert werden, die im Rahmen der Konzeptionierung einer mobilen AR-Anwendung Berücksichtigung finden, um den Prüfprozess zu vereinfachen und den Prüfsachverständigen/die Sachverständigenin zu unterstützen.

Im Zuge der Anforderungsanalyse wurden Interviews mit Bauwerksprüfenden verschiedener Unternehmen und aus unterschiedlichen Bereichen geführt. Die Bereitstellung der AR Anwendung stieß hierbei auf großes Interesse. Die Ergebnisse dieser Interviews sind bei der Formulierung der notwendigen Anforderungen mit eingeflossen. Das Vorgehen während der Anforderungsanalyse folgt den Prinzipien des Requirement Engineerings und berücksichtigt hierbei Anforderungen, die sich zum einen aus dem üblichen Ablauf des Bauwerksprüfprozesses ergeben und zum anderen abhängig vom aktuellen Stand der Technik definiert werden. Um den neuen und leicht angepassten Ablauf des Prüfprozesses mit der in diesem Forschungsprojekt neu zu entwickelnden AR-Anwendung zu konkretisieren, fließen diese Anforderungen in die spätere Konzeptionierung ein. Permanentes Feedback von Anwendenden als Validierung der Konzeptionierung und darauf aufbauenden Prototypisierung wird Einfluss auf die erarbeiteten Definitionen haben und bei Erfordernis entsprechende Anpassungen mit sich bringen.

### **3 Konzept**

Für die Nutzung des Bridge Inspection Support System (BISS) muss der Brückenbegehungsablauf aufgrund der neuen Komponenten angepasst werden. Der Beginn des neuen Ablaufs startet in der Datenschicht. In dieser befinden sich sowohl die SIB Datenbank, mit Informationen zu dem aktuellen Stand der zur untersuchenden Brücke, sowie Informationen zu vergangenen Inspektionen und darin erfassten Schäden. Die Mesh Datenbank umfasst 3D Daten zu erfassten Schäden von vergangenen Brückenbegehungen und deren Umgebungsdaten. Ähnlich wie in der SIB Datenbank sind auch in der Mesh Datenbank die Daten zu ihrem zugehörigen Bauwerk sortiert. Aus beiden Datenbanken werden zu Beginn des Brückeninspektionsprozesses die Brückendaten aus der Datenschicht auf einen Büro PC importiert. Die vom PC aus den Datenbanken importierten Daten enthalten alle Daten zu dem zu inspizierenden Bauwerk, wie Baupläne, Schäden aus vorherigen

Begehungen, Spatial Meshes zu Schäden sofern vorhanden, Beschreibungen und Bewertungen der Schäden sowie weitere Daten, die für die Begehung benötigt werden. Auf dem Büro PC werden die Daten vom Dateninspekteur sortiert und vorbereitet. Nach der Vorbereitung der Daten werden diese an das für die Brückenbegehung verwendete Tablet mit der BISS Anwendung übermittelt. Ist dies geschehen, kann die Brückenbegehung beginnen. Während der Brückenbegehung verwendet der Dateninspekteur die BISS Anwendung auf dem Tablet und der Visual Inspekteur das HMD. Hierbei sendet der Dateninspekteur die relevanten Bauwerksinformationen über das Tablet an das HMD des Visual Inspektors. Mithilfe der von dem Tablet erhaltenen Daten kann der Visual Inspekteur das Bauwerk nach Schäden überprüfen. Hierbei stehen der Person mehrere Funktionen des BISS auf dem HMD zur Verfügung, die beim Bewerten erkannter Schäden helfen. Hierzu gehören unter anderem das automatische Erkennen von Altschäden, also Schäden die in einer vorherigen Begehung aufgenommen wurden, über das HMD. Über diese Funktion kann der Visual Inspekteur die Informationen und Bilder des erkannten Schadens und dessen Entwicklung mit der Zeit einsehen. Weiter kann der Visual Inspekteur über die Nutzung der integrierten KI den erkannten Schaden ausmessen und kategorisieren lassen. Zuletzt ermöglicht das HMD dem Visual Inspekteur die Aufnahme und Bewertung von Neu- und Altschäden am Bauwerk. Jeder aufgenommene Schaden wird anschließend an das Tablet des Dateninspektors gesendet, wo der Schaden weiter dokumentiert werden kann. Der Dateninspekteur ist dafür zuständig die vom Visual Inspekteur erhaltenen Daten zu überprüfen und zu vervollständigen. Nach der Aufnahme aller gefundenen Schäden während der Brückenbegehung kann die Vollständigkeit und Korrektheit der aufgenommenen Schäden über das Tablet von beiden Inspektoren überprüft werden. Nach Abschluss der Brückenbegehung werden die gesammelten Daten von dem Tablet zurück auf den Büro PC übertragen und von dort aus vom Dateninspekteur auf die Datenschicht übertragen. Hierbei werden die Daten so formatiert, dass sie den Vorgaben der jeweiligen Datenbank (SIB oder Mesh) entsprechen. Nach diesem Schritt kann der Ablauf bei Bedarf erneut ausgeführt werden. Für den Ablauf wurden die Rollen des Dateninspektors und des Visual Inspektors getrennt, jedoch können beide Rollen auch während der Begehung gewechselt werden, zum Beispiel, wenn es zu Problemen mit dem Gewicht des HMDs kommt. Weiter kann der Dateninspekteur im Büro auch eine andere Person als die Person bei der Brückenbegehung sein (vgl. Abb. 1).

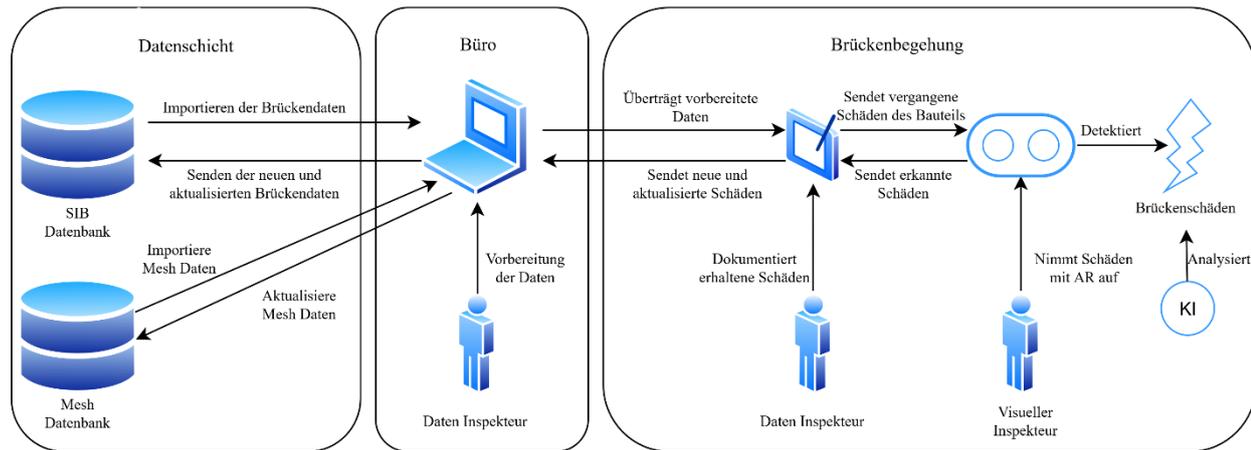


Abbildung 1: Konzept des Brückenbegehungsablaufs mit BISS

## 4 Umsetzung

Die entwickelte AR-Anwendung auf der HoloLens sah konzeptionell umfangreichere Funktionalitäten vor als schlussendlich im Demonstrator implementiert wurden. Die Entscheidung, welche und wie viele Funktionalitäten umgesetzt wurden, wurde zum einen durch Einschränkung im Gestaltungsfreiraum der HoloLens-Umgebung begrenzt, zum anderen führten die Feedbackgespräche zu Erkenntnissen, die neue bzw. anderen Ansätze präferierten. Die in diesem Forschungsvorhaben beteiligten Projektpartner können auf einen umfangreichen Erfahrungsschatz hinsichtlich Umsetzung von XR-Anwendungen zurückblicken und hatten viele Ideen, die innerhalb der HoloLens-Anwendung realisiert werden könnten. Der bei der Entwicklung neuer Technologien mit hoher Priorität zu berücksichtigende Faktor Mensch hat allerdings einige Faktoren hervorgehoben, die insbesondere aus praxisnaher Betrachtung neue Ansichten lieferten. So wurden einige Funktionalitäten als zu umständlich oder gar unnützlich identifiziert, während bei der Entwicklung anderer Funktionalitäten schlicht und einfach die Wirtschaftlichkeit in Frage gestellt werden musste. Aus diesen Gründen wurde der Umfang der Funktionalitäten bei der prototypischen HoloLens-Anwendung auf das Wesentliche reduziert, was den Vorteil einer für den Bauwerksprüfprozess wirtschaftlichen Durchführung mit sich bringt.

Für die Speicherung der durch den Demonstrator erfassten Prüfungsdaten wurde eine geeignete Datenhaltung implementiert. Diese besteht im Wesentlichen aus einer Datenbank, in der die gesammelten Daten persistiert werden können und einer REST-Schnittstelle, mit dessen Hilfe die Daten auf einen Server übertragen werden können, damit sie später zum Beispiel an einem Desktop-PC weiterverarbeitet werden können. Dieser Server persistiert die übertragenen Daten ebenfalls in einer Instanz der entwickelten Datenbank.

Das Tablet ist das leistungsstärkere Gerät hinsichtlich Prozessorleistung, Akkulaufzeit und Eingabemöglichkeiten in der Anwenderoberfläche. Aus diesem Grund findet die hauptsächliche Dateneingabe zur Dokumentation der Schäden auf dem Tablet statt. Ebenso dient das Tablet als

Speichermedium für die bereitgestellten Dokumente und Informationen vorangegangener Prüfungen und der neu aufgenommenen Daten der aktuell laufenden Prüfung.

Die Anwendung ist folgendermaßen umgesetzt. Nach Log-In mit den Nutzerdaten landet der Anwendende auf dem Startbildschirm. Hier wird das zu prüfende Bauwerk ausgewählt und eine Übersicht über alle zur Verfügung stehenden Bauwerkspläne ausgegeben. Der Übersichtslageplan bietet die beste Möglichkeit zur allgemeinen Übersicht über das Bauwerk. Je nach Qualität dieses Plans sind hier die grundsätzliche Lage des Bauwerks, generelle Abmessungen und notwendige Stationierungsangaben ersichtlich. Die Tablet-Anwendung bietet zusätzlich die Möglichkeit, bereits bestehende Schäden der vorangegangenen Prüfung in dem Übersichtslageplan einzublenden. Durch Anklicken eines Schadens sind die relevanten Informationen dieses Schadens direkt verfügbar. Im weiteren Verlauf einer möglichen zukünftigen Digitalisierung des Bauwerksprüfprozesses werden auch Schäden mehrerer vorangegangener Prüfungen zur Verfügung stehen. Die Tablet-Anwendung bietet sinnvolle Filtermöglichkeit aller verzeichneten Schäden.

Zur Erkennung von Schäden werden in diesem Projekt KI-basierte Segmentierungsverfahren eingesetzt. Die Ergebnisse des trainierten KI-Modells werden auf das AR-Gerät hochgeladen, damit diese auf dem Bildschirm des AR-Geräts angezeigt werden. Abhängig vom segmentierten Schaden können weitere Analysen durch das System vorgenommen werden. Dazu gehören beispielsweise die Berechnung einer Risslänge und Rissbreite.

Der Datensatz zum Trainieren der Segmentierungsmodelle besteht aus 5.575 qualitativ hochwertigen Bildern. Die Bildbreite schwankt zwischen 733 und 6641 Pixeln und die Bildhöhe zwischen 453 und 4137 Pixeln. Über 81 % der Bilder haben eine Auflösung von mehr als 2048 × 2048 Pixeln. Die Bilder wurden mit Smartphone-Kameras von studentischen Hilfskräften aufgenommen. Sie wurden angewiesen Fotos von Abplatzungen, Rissen, Korrosion und Kiesnestern an einer Vielzahl von Betonstrukturen aufzunehmen. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Brücken wurden die Bilder nicht nur von Brücken, sondern auch von Parkhäusern, Wänden, Gebäuden und von Betonböden aufgenommen. Um die Variabilität und Komplexität des Datensatzes zu erhöhen, wurde die Datenerfassung von Deutschland auf mehrere anderen Länder erweitert. So wurden Schadenbilder in Albanien, in Bosnien und Herzegowina, in den Niederlanden, in Serbien, in der Türkei und in den Vereinigten Staaten von Amerika (Florida) aufgenommen.

## **5 Evaluierung**

Für die Evaluierung des entwickelten Demonstrators wurden zwei Live Begehungen vor Ort vorgesehen. Diese wurden mit den Projektbeteiligten der RUB und seitens HOCHTIEF, Beteiligten der BAST und bereitwilligen Bauwerksprüfern des Ingenieurbüros ZETCON, die bereits während der gesamten Projektlaufzeit beratend unterstützt haben, durchgeführt. Der erste Termin fand am 28.09.2022 statt. Feedback der Bauwerksprüfer aus dieser Begehung ist in die Weiterentwicklung

des Demonstrators bis zur zweiten Begehung eingeflossen. Ein zweiter Termin folgte am 04.11.2022 bei dem weitere Beteiligte der BAST hinzukamen. Die grundlegenden Funktionen des in diesem Forschungsvorhaben prototypisch entwickelten Demonstrators konnten durch die Live Begehungen verifiziert werden. Auch der Mehrwert neuer Technologien wie AR konnte grundsätzlich bestätigt werden. Das holografische Einblenden relevanter Informationen bietet eine gute Hilfestellung für die Anwendung vor Ort. Zusammengefasst lassen sich mit der prototypischen Entwicklung dieses Demonstrators notwendige Anforderungen zur Digitalisierung der Dokumentation von allgemeinen Zustandsfeststellungen bei Ingenieurbauwerken ableiten.

## Summary

# Combination of augmented/mixed reality systems with other digital technologies

## 1 Introduction

Due to the ageing of structures, changes in traffic compositions, influences from climate change and increasing traffic loads, measures for the maintenance of structures must be carried out to a considerable extent. When inspecting bridges and civil engineering structures in accordance with DIN 1076 and assessing damage in accordance with RI-EBW-PRÜF, it is essential that the damage detected is identified completely and accurately and that it is assessed in a reproducible and uniform manner. This is also indispensable in particular for assessing damage developments and thus for evaluating the urgency of maintenance measures to be carried out. For this purpose, it is important that the inspection personnel make optimal use of their experience and skills for damage detection and damage assessment and are relieved of tasks that can be carried out more easily through the use of digital technologies or are supported by this side. Thus, the introduction of IT-supported processes in the operation of the infrastructure has an important significance in order to reduce the required maintenance effort.

The application of a combination of Augmented or Mixed Reality (AR/MR) and Artificial Intelligence (AI) or Machine Learning can support this process, e.g. through automatic damage detection during building inspections and the provision of information based on this. Augmented and mixed reality offer new possibilities for the visualisation of virtual content, the input of information and the provision of information. Virtual content can be made available visually to people, who can then incorporate it into their decision-making and process it. Systems used for this purpose can record the real environment and thus the actual situation via sensors and overlay information appropriately. Artificial intelligence technologies are used to detect and analyse damage to buildings by training data models of image capture. Through the combination, the AI can process the data recorded by the AR/MR system together with other available data as well as experience with past problems as far as possible in real-time, recognise patterns and provide the human being with evaluation results and solutions proposals based on this via the AR/MR system.

The focus of this research project is to identify the future development of AR/MR systems and their combination with other digital technologies, as well as potential use cases for transport infrastructure. Specifically, this project aims to investigate the combination of an AR/MR system with AI to support damage detection and assessment in structural inspection. When inspecting the structure (e.g. a bridge) and carrying out the inspection, the system to be developed is to support the structure inspector. This is done by suggesting possible damage regions based on evaluations of an AI integrated into the AR/MR system with as little delay as possible, almost in real-time,

recognising damage and marking it in the AR/MR. After selecting or confirming the damage or the damage region, the AR/MR system and the integrated AI are to support the building inspector in assessing the damage. Furthermore, information and decision-making aids are visualised via the AR/MR system as a virtual overlay in the real environment at the corresponding location of the structure. If corrections have to be made to the evaluation results by the building inspector, he/she should be able to make changes by entering them in the AR/MR system. These corrections should be included as further data in the AI training so that an improvement of the evaluation results can be achieved over time. To illustrate the potential, a concept for the described use case will be created and realised using a demonstrator. Among other things, the demonstrator should enable future users (e.g. building inspectors, and structural engineers) to test the system to be developed with all the associated components and serve as a basis for future system implementations. The interaction and cooperation between the inspector, AR/MR system and AI can contribute to optimised building inspection, in which data is collected and processed as automatically as possible and in real-time and the evaluation results are made available via the AR/MR system as a decision-making aid for the building inspector. Damage can thus be assessed more quickly, more uniformly and with the inclusion of larger amounts of data than before.

## **2 Methodology**

Ensuring the stability, traffic safety and durability of engineering structures is a comprehensive process in the provision of public services. This can only be ensured with regular quality inspections of the structures on site and tracking in a central quality management system, which keeps data on the structures from planning through construction, during maintenance up to demolition or replacement.

The structural inspection according to DIN 1076 is an essential part of this quality assurance. The data from the inspections are compiled in the existing structure information systems (e.g. SIB Bauwerke). From this, necessary measures for the guarantee of each engineering structure can be derived. Special focus is placed on structural weaknesses, which are mainly found in older structures and require closer examination and special monitoring. Such weak points can considerably restrict the usability of the structure and lead to temporary closure or even replacement. Within the scope of the inspection according to DIN 1076, the structures are not only evaluated from a structural point of view but also analysed from an economic point of view. Even if the structural safety were ensured, the economic efficiency calculations for e.g. a renovation could not be positively evaluated, this would have an impact on the measures to be taken.

The inspection process according to DIN 1076 is complex and requires a high level of experience of the personnel on site. In the course of a main inspection, the entire structure must be inspected close to the hand in order to be able to feel and detect damage with the naked eye. The documentation of the recorded damage is time-consuming. Data on existing damage, as well as the

corresponding building book and building plans, are often only available on-site as paper printouts. All these challenges are to be examined more closely within the framework of a requirements analysis. The relevant requirements are to be identified that will be taken into account in the conceptual design of a mobile AR application in order to simplify the inspection process and support the inspection engineer.

In the course of the requirements analysis, interviews were conducted with structural inspectors from various companies and different areas. The provision of the AR application met with great interest. The results of these interviews were used to formulate the necessary requirements. The procedure during the requirements analysis follows the principles of requirement engineering and takes into account requirements that result from the usual procedure of the structural inspection process on the one hand and are defined depending on the current state of the art on the other hand. In order to concretise the new and slightly adapted sequence of the inspection process with the AR application to be newly developed in this research project, these requirements flow into the later conceptual design. Permanent feedback from users as validation of the conceptual design and the prototyping based on it will have an influence on the definitions developed and, if necessary, bring about corresponding adjustments.

### **3 Concept**

For the use of the Bridge Inspection Support System (BISS), the bridge inspection sequence must be adapted due to the new components. The new procedure starts in the data layer. This contains the SIB database with information on the current status of the bridge to be inspected, as well as information on past inspections and the damage recorded in them. The mesh database contains 3D data on recorded damage from past bridge inspections and their environmental data. Similar to the SIB database, the data in the mesh database are sorted by their corresponding structure. From both databases, bridge data is imported from the data layer to an office PC at the beginning of the bridge inspection process. The data imported from the databases by the PC contains all data on the structure to be inspected, such as construction plans, damage from previous inspections, spatial meshes on damage if available, descriptions and assessments of the damage, and other data required for the inspection. On the office PC, the data is sorted and prepared by the data inspector. After the data has been prepared, it is transferred to the tablet used for the bridge inspection with the BISS application. Once this is done, the bridge inspection can begin. During the bridge inspection, the data inspector uses the BISS application on the tablet and the visual inspector uses the HMD. The data inspector sends the relevant structure information via the tablet to the visual inspector's HMD. Using the data received from the tablet, the visual inspector can check the structure for damage. Several functions of the BISS are available to the person on the HMD, which help to assess detected damage. These include the automatic detection of old damage, i.e. damage that was recorded in a previous inspection, via the HMD. Using this function, the visual inspector

can view the information and images of the detected damage and its development over time. Furthermore, the visual inspector can use the integrated AI to measure and categorise the detected damage. Finally, the HMD enables the visual inspector to record and evaluate new and old damage to the building. Each recorded damage is then sent to the data inspector's tablet, where the damage can be further documented. The data inspector is responsible for checking and completing the data received from the visual inspector. After recording all the damage found during the bridge inspection, the completeness and correctness of the recorded damage can be checked by both inspectors via the tablet. After completion of the bridge inspection, the collected data is transferred from the tablet back to the office PC and from there transferred to the data layer by the data inspector. Here, the data is formatted to match the specifications of the respective database (SIB or Mesh). After this step, the process can be run again if necessary. For the flow, the roles of data inspector and visual inspector have been separated, but both roles can also be changed during the walk-through, for example, if there are problems with the weight of the HMD. Furthermore, the data inspector in the office can also be a different person than the data inspector during the bridge inspection (cf. Fig. 1).

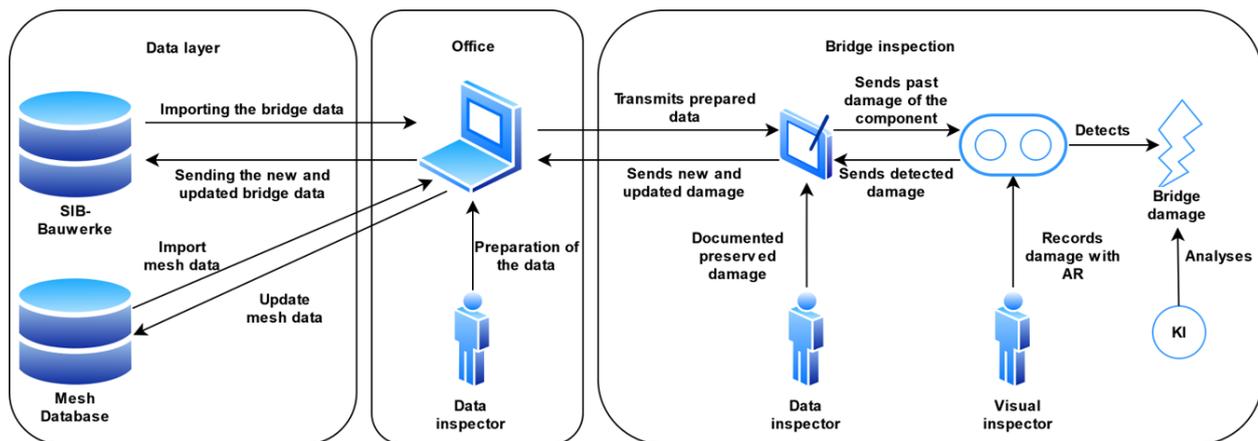


Figure 1: Concept for the bridge inspection workflow with BISS

## 4 Implementation

The AR application developed on the HoloLens envisaged conceptually more extensive functionalities than were ultimately implemented in the demonstrator. The decision as to which and how many functionalities were implemented was limited on the one hand by restrictions in the design freedom of the HoloLens environment, and on the other hand the feedback discussions led to insights that favoured new or different approaches. The project partners involved in this research project can look back on a wealth of experience in the implementation of XR applications and have many ideas that could be realised within the HoloLens application. However, the human factor, which has to be given high priority in the development of new technologies, highlighted some factors that provided new views, especially from a practical perspective. For example, some functionalities were identified as too cumbersome or even useless, while the development of other

functionalities simply had to question the economic viability. For these reasons, the scope of the functionalities in the prototype HoloLens application was reduced to the essentials, which has the advantage of being economical for the structural inspection process.

A suitable data storage system was implemented to store the examination data collected by the demonstrator. This essentially consists of a database in which the collected data can be persisted and a REST interface with the help of which the data can be transferred to a server so that they can be processed further later on a desktop PC, for example. This server also persists the transferred data in an instance of the developed database.

The tablet is the more powerful device in terms of processor performance, battery life and input options in the user interface. For this reason, the main data input for documenting the damage takes place on the tablet. The tablet also serves as a storage medium for the documents and information provided from previous inspections and the newly recorded data from the current inspection.

The application is implemented as follows. After logging in with the user data, the user lands on the start screen. Here, the structure to be inspected is selected and an overview of all available structure plans is displayed. The overview site plan offers the best possibility for a general overview of the structure. Depending on the quality of this plan, the basic location of the structure, general dimensions and necessary stationing information can be seen here. The tablet application also offers the option of displaying existing damage from the previous inspection in the overview site plan. By clicking on damage, the relevant information about this damage is directly available. In the further course of a possible future digitalisation of the structural inspection process, damage from several previous inspections will also be available. The tablet application offers useful filtering options for all recorded damage.

AI-based segmentation techniques are used in this project to detect damage. The results of the trained AI model are uploaded to the AR device to be displayed on the AR device screen. Depending on the segmented damage, further analyses can be performed by the system. These include, for example, the calculation of a crack length and crack width.

The data set for training the segmentation models consists of 5,575 high-quality images. The image width varies between 733 and 6641 pixels and the image height is between 453 and 4137 pixels. Over 81% of the images have a resolution of more than 2048 × 2048 pixels. The images were taken with smartphone cameras by student assistants. They were instructed to take photos of spalling, cracks, corrosion and gravel nests on a variety of concrete structures. Due to the low availability of bridges, images were taken not only of bridges but also of car parks, walls, buildings and concrete floors. In order to increase the variability and complexity of the data set, the data collection was extended from Germany to several other countries. Thus, damage images were taken in Albania, in Bosnia and Herzegovina, in the Netherlands, in Serbia, in Turkey and in the United States of America (Florida).

## 5 Conclusion

Two live on-site inspections were planned for the evaluation of the developed demonstrator. These were carried out with the project participants from the RUB and HOCHTIEF, participants from the BAST and willing structure testers from the engineering firm ZETCON, who had already provided advisory support throughout the project. The first meeting took place on 28.09.2022. Feedback from the structural inspectors from this inspection has been incorporated into the further development of the demonstrator up to the second inspection. A second visit took place on 04.11.2022, at which further participants from the BAST joined in. The basic functions of the demonstrator developed as a prototype in this research project were verified during the live inspections. The added value of new technologies such as AR was also confirmed in principle. The holographic display of relevant information provides good support for the application on-site. In summary, the prototypical development of this demonstrator allows us to derive the necessary requirements for digitising the documentation of general condition assessments for engineering structures.