

Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 185

bast

Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität

von

Marcos Hill
Sascha Bahlau
Felix Butenhof
Lukas Degener

LIST Digital
Essen

Florian Klein
Alex Kukushkin

HHVISION
Köln

Urs Riedlinger
Leif Oppermann

Fraunhofer FIT
Sankt Augustin

Christian Lambracht
Martin Mertens

Hochschule Bochum
Lehrgebiet für technische Mechanik,
Baustatik, Holz- und Brückenbau

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 185

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

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.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0666

Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität

Fachbetreuung

Sonja Nieborowski

Referat

Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-95606-713-6

Bergisch Gladbach, Dezember 2022

Kurzfassung – Abstract

Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität

Eine moderne und leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur ist das Rückgrat für eine wettbewerbsfähige Volkswirtschaft. Der Neubau und die Instandhaltung von Infrastruktur erzeugen substantielle Kosten. Im Straßenwesen besteht für die Erhaltung der Brückenbauwerke ein großer Finanzierungsbedarf, der im internationalen Standortwettbewerb kontinuierlich zu optimieren ist. Neben bautechnologischen Innovationen stehen die prozessualen und organisatorischen Optimierungen des Instandhaltungsmanagements im Fokus. Im Zuge der Digitalisierung sind die Informationen ein wichtiger Hebel für effizientes Management. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Unterstützung der Bauwerksprüfung durch das Building Information Modeling in Kombination mit den Technologien Virtual und Augmented Reality untersucht. Für die Anwendungsbereiche der Durchführung sowie Vor- und Nachbereitung der Bauwerksprüfung wurde ein Demonstrator auf Basis dieser Technologien entwickelt.

Das Forschungsprojekt zeigt, dass die Technologien, technischen Möglichkeiten und Potenziale zur Entwicklung einer Anwendung zur digitalen Bauwerksprüfung vorhanden sind. Die Ergebnisse der Demonstration haben gezeigt, dass die Schritte zur digitalen und modellbasierte Schadensermittlung gefordert werden. Die Begeisterung und Motivation zur Nutzung digitaler Anwendungen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 wurden dabei erkannt, aufgezeigt und konnten an die Prüfer übertragen werden. Somit sind bereits Erwartungen an die Weiterentwicklung der AR- und VR-Version für den adaptiven und täglichen Gebrauch gesetzt worden.

„Wir arbeiten wie die Urmenschen, das System hat großes Potenzial.“ (Teilnehmeraussage)

Die Ergebnisse der Evaluation haben gezeigt, dass der Demonstrator sich in der praktischen Anwendung durch die Bauwerksprüfer einsetzen und integrieren lässt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass für eine aussagekräftige Handlungsempfehlung die Evaluation durch eine höhere Anzahl an unabhängigen Teilnehmern erfolgen muss.

Die praktische Prüfung des Demonstrators in der Umsetzung der AR-Technologie ist zum jetzigen Zeitpunkt der erste Schritt, um die Technologiereife einer solchen Anwendung zu bestimmen. Jedoch ist zu sagen, dass auf Grundlage der Untersuchungen im Forschungsprojekt und der während der Evaluation gesammelten Ergebnisse, die Anwendung sich bereits in der experimentellen Entwicklung befindet. Hingegen ist der Weg zu Marktreife noch nicht erreicht. Vor allem der Anwendungsbereich eines solchen Demonstrators sollte in den nächsten Schritten definiert werden. Hierbei besteht beispielsweise die Möglichkeit, den Demonstrator an unterschiedlichen Bauwerksarten mit einem erweiterten Kreis an Nutzern kontinuierlich zu testen. Als mögliche weitere Bauwerksarten könnten Tunnelbauwerke, Stützwände sowie Lärmschutzwände dienen.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der zukünftigen Bearbeitung ist die Schnittstelle zwischen dem Demonstrator und SIB Bauwerke. Zum jetzigen Zeitpunkt kann kein direkter Datenaustausch zwischen den beiden Medien stattfinden, sodass eine konsequente Bearbeitung der Bauwerksprüfung erfolgt. Alternativ ist denkbar, die Funktionen des Demonstrators in einer künftigen SIB-Bauwerke Version zu integrieren, um somit die Vorteile beider Programme zu fusionieren und nutzen zu können.

Technisch gesehen ist eine Weiterentwicklung des Systems, mit Blick auf die Flexibilität, empfehlenswert. Dabei sind Entwicklungen wie die Objektpositionierung im AR-Bereich, eine vollumfängliche sinnvolle Integration von Monitoringdaten, einheitliche Grundsätze von 3D-Modelldaten sowie Schnittstellen zu weiteren Programmen wichtige Bestandteile für eine optimierte Umsetzung und Nutzung des Systems. Des Weiteren sollte eine Untersuchung wichtiger Randbereiche der Bauwerksprüfung vorgenommen werden, wie die Frage zum Mehrwert der Einbindung eines Umgebungsmodells oder zur Verplanung einer Prüfung.

Zusammenfassend haben die im Forschungsprojekt entwickelten Anwendungen die Potenziale, den Bauwerksprüfer kontinuierlich bei seiner Arbeit zu unterstützen. Insbesondere die Zeitersparnis durch mühseliges Vor- und Nachbereiten wird nachhaltig

reduziert. Ein großer Mehrwert für den Bauwerksprüfer ist vor allem die lückenlose Protokollierung von Schäden über den Lebenszyklus eines Bauwerks. Durch die direkte Einbindung von Bildaufnahmen und die Verortung der Schäden durch die Bauwerksprüfer ist ein großer Mehrwert für Bauwerksprüfer und Bewirtschafter des Bauwerks entstanden.

Schluss mit der Zettelwirtschaft – ein Statement, mit dem das Projekt als Ziel gestartet ist. Die Basis zum Kern des Statements konnte in diesem Projekt aufgezeigt und dargestellt werden. Allerdings nur durch eine konsequente Weiterentwicklung, sowohl technologisch als auch bei den Rahmenbedingungen, kann die Digitalisierung im Bereich der Bauwerksprüfung und -erhaltung Einzug erhalten.

Supporting bridge inspectors with interactive mixed reality visualisations of BIM process and geometry data

A modern and efficient transport infrastructure is the backbone of a competitive national economy. New construction and maintenance of infrastructure generate substantial costs. In the road sector, there is a great need for financing for the maintenance of bridge structures, which must be continuously optimised in the international competition for locations. In addition to innovations in construction technology, the focus is on process and organisational optimisation of maintenance management. In the course of digitalisation, information is an important lever for efficient management. Within the scope of the research project, the support of structural inspection by Building Information Modeling in combination with the technologies Virtual and Augmented Reality was investigated. A demonstrator based on these technologies was developed for the application areas of execution, as well as pre- and post-processing of the structural inspection.

The research project shows that the technologies, technical possibilities and potentials for the development of an application for digital structural inspection are available. The results of the demonstration have shown that there is a demand for the steps to digital and model-based damage assessment. The enthusiasm and motivation for the use of digital applications of the structural inspection according to DIN 1076 were recognised, demonstrated and could be transferred to the

inspectors. Thus, expectations have already been set for the further development of the AR and VR version for adaptive and daily use.

“We work like primitive people, the system has great potential.” (participant statement)

The results of the evaluation have shown that the demonstrator can be used and integrated in practical applications by the building inspectors. However, it should be noted that for a meaningful recommendation for action, the evaluation needs to be conducted by a higher number of independent participants.

At this stage, the practical testing of the demonstrator in the implementation of AR technology is the first step to determine the technology maturity of such an application. However, it should be said that based on the research in the research project and the results collected during the evaluation, the application is already in experimental development. On the other hand, it is not yet ready for the market. Above all, the application area of such a demonstrator should be defined in the next steps. For example, it is possible to test the demonstrator continuously on different types of structures with an extended group of users. Possible further types of structures could be tunnel structures, retaining walls as well as noise barriers.

Another important part of the future work is the interface between the demonstrator and SIB Bauwerke. At the present time, no direct data exchange can take place between the two media, so that a consistent processing of the structural inspection takes place. Alternatively, it is conceivable to integrate the functions of the demonstrator in a future SIB-Bauwerke version in order to merge and use the advantages of both programs.

From a technical point of view, a further development of the system, with a view to flexibility, is recommended. Developments such as object positioning in the AR area, a fully sensible integration of monitoring data, uniform principles of 3D model data as well as interfaces to other programs are important components for an optimised implementation and use of the system. Furthermore, an investigation of important marginal areas of the structural inspection should be carried out, such as the question of the added value of the integration of an environment model or the scheduling of an inspection.

In summary, the applications developed in the research project have the potential to continuously support the structural inspector in his work. In particular, the time saved by tedious preparation and post-processing is sustainably reduced. A major added value for the building inspector is above all the complete logging of damage over the life cycle of a building. The direct integration of image recordings and the localisation of damage by the building inspectors has created a great added value for building inspectors and building managers.

“Putting an end to paperwork” – a statement with which the project started as a goal. The basis for the core of the statement could be demonstrated and presented in this project. However, only through consistent further development, both technologically and in terms of the framework conditions, can digitalisation be introduced in structural inspection and maintenance.

Summary

Supporting bridge inspectors with interactive mixed reality visualisations of BIM process and geometry data

1 Context of the project

Motivation and project objective

A modern and efficient transport infrastructure is the backbone of a competitive economy. The construction and maintenance of infrastructure generates substantial costs. In the road sector, there is a great need for financing for the maintenance of bridge structures, which must be continuously optimised in the international competition for locations. In addition to innovations in construction technology, the focus is also on process and organisational optimisation of maintenance management. In the course of digitalisation, information management is an important lever for efficient management. The uniform, semantic collection and storage of data enables simulations, forecasts and planning to be carried out more accurately and with less effort.

Based on the contents of the final paper of the reform commission „Construction of Major Projects“ and the principle „First build digitally, then build for real“, digital planning and construction should be made the standard throughout Germany. In addition, digital technologies – model-based, federated, cooperative and collaborative – offer enormous potential for increasing quality, efficiency and cost security. Compared to other German industries as well as in international comparison, there is a clear need to catch up in the process-oriented digitisation of design and construction.

The consortium is researching a system for the Federal Highway Research Institute (BASt), based on available technological solutions, that is intended to support the conventional processes of construction inspection. The suitability of the system is validated and made comprehensible by a demonstrator. For this purpose, information from the inventory as well as from previous conventional inspections will be intelligently linked and made available in a suitable way for the different process participants. For linking and visualisation, the digital method BIM in combination with VR/AR techno-

logies offers the ideal basis conceptually and methodologically. In the project, special components are assembled from these technologies to form the system. Specifically, selected bridge inspection processes will be grouped into three modules, examined and demonstrated. The modules will allow the selected processes of the system to be applied in the office, on-site, and remotely.

State of the art for VR/AR based structural inspection

The state of the art shows that tools and solutions exist in both business and academia that can partially contribute to project implementation. However, the approaches to date are encapsulated applications for specific target groups. Specific solutions for the digital support of the bridge inspection process are completely missing.

Therefore, this research project aims to develop and provide a demonstrator for the use case of structural inspection, based on the knowledge of the project partners. The choice of the development environment to be used, especially regarding the demonstrator, is important as the prototype system will be on multiple visual output media. In the project, the Unity3D Pro game engine will be used for both the VR and AR/MR prototypes, as it offers the following advantages:

- Import or connectivity of various 3D model exchange formats
- Invocation of the models when using the application (load on runtime)
- Adaptive development in the C# programming language
- Integration of plugins for an optimised workflow
- Native support for all input/output media and frameworks required in the project, such as AR/MR/VR glasses and controllers.

In addition, the state of the art of hardware for AR/MR shows that the devices used in or on the bridge, such as current tablets (e.g. iPad Pro/Microsoft HoloLens) have integrated motion tracking technologies. One requirement for the hardware is the 6 DoF motion tracking for the centimeter-precise overlay of content such as bridge damage on the device display. This allows damage to be located with 3D coordinates.

2 Selection of suitable hardware

When considering whether a tablet or the HoloLens is more suitable for outdoor use on the bridge, two disadvantages must first be mentioned that both device types have in common. First, with both devices, carrying or holding them for extended periods of time represents an additional, physical strain. With the HoloLens, there is unaccustomed scalp or neck muscle strain, while with the tablet, Gorilla-Arm-Syndrome¹ makes prolonged holding with outstretched arms impossible. Second, both devices require a version adapted for outdoor use, such as integrating the HoloLens into a construction helmet, or a protective tablet case that absorbs shock and protects devices from dust and splashes. These customisations increase the price of the final solution.

The pros and cons of both devices are taken based on the following categories:

- Technology acceptance
- Interaction techniques
- View restrictions
- Price

The characteristics of a tablet outweigh those of a HoloLens, which is why the developments in this project relate exclusively to the use of a tablet.

With regard to VR hardware in the office, two approaches will be taken in the project: display on a screen and display in an HMD. Since the use of the latter can lead to motion sickness in users, this creates an additional usable, familiar medium. The desktop version is designed in the context of this project in such a way that it can be used on a conventional business system.

For the HMD system, the current version of the HTC Vive Pro Eye Series will be used. The advantages of these VR goggles are:

- Robust interfaces to development environments such as Unity3D
- Good display quality due to high pixel density
- Simple handling and partly familiar operation
- Precise optical outside-in tracking system

A disadvantage of these glasses is that wireless use is only possible with additional hardware. Furthermore, the installation of the optical tracking system is more time-consuming than with HMDs with inside-out tracking. In addition, there is the higher weight, which can have a negative impact on the longer wearing comfort.

3 Digital building model

The requirements for the modular concept in the project were created for the digital building model. For this purpose, the process-organisational specifications were described in the form of processes, and the technical specifications were described in the form of work cards. Based on the work cards created in the specifications, the process of the classic structure inspection was analysed in order to develop the new process of the digital structure inspection with AR/VR systems and an associated software application in order to be able to integrate the new components into the process of the structure inspection. Through the process of digital structural inspection, working maps for digital structural inspection could finally be developed. The technological specifications and thus the validated tools were developed through requirements validation and expert interviews.

Basic and performance requirements emerged from the requirements validation as the goal for the implementation of the modular concept to be developed. Damage localisation is established in the demonstrator using self-reporting and a „SLAM“ method. Here, the performance requirement for the demonstrator is addressed. In order to document possible damages pictorially and to link them to the damage location, the image acquisition is also solved here internally with the performance requirement for the demonstrator. The demonstrator uses the camera integrated in the hardware. Another function to be implemented in the modular concept is a measurement option. For this purpose, a function is to be integrated that allows the users of the demonstrator to measure damage directly from

¹ BACHYNSKYI, M., PALMAS, G., OULASVIRTA, A., STEIMLE, J., WEINKAUF, T., 2015. Performance and Ergonomics of Touch Surfaces: A Comparative Study using Biomechanical Simulation, in: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15. Association for Computing Machinery, Seoul, Republic of Korea, pp. 1817–1826.

the application, for example. The aim is to achieve the highest possible accuracy. A damage description takes place via a preselection. This pre-selection is based on a classification according to the damage catalog for building inspectors. This results in a predefined damage description for the user without individual definition. For further measurement data, it should be possible to enter these manually in order to ensure a complete damage survey. In some cases it is necessary to be able to fall back on working aids, standards or other guidelines. In the demonstrator, it is possible to access a database of files. These documents can be stored in a cloud solution.

On the part of the workflow for integrating the building data in Unity, the separation of the geometry of the 3D model and the metadata (via .ifcxml) is specified. The Unity plugin TriLib is used to import the 3D models during runtime. Model and reality localisation is implemented using hybrid tracking in conjunction with self-reporting to enable the highest possible accuracy with simultaneous drift correction. 3D objects are used for damage localisation and virtual representation of existing damage. These allow for a continuous user experience in both AR and VR and enable a quick rough assessment of the type of damage. The input of information, including additional data such as images, is done via an expectation-conform two-dimensional form. The building models are stored on the BSCW system (in version 7 "social"), which acts as a CDE. A corresponding connection of the prototypes is implemented via the REST interface in Unity. Further synchronisation options exist via BSync®; access to the data can also be made via the web interface.

4 Modular concept

The modular concept describes the current status of the individual digital modules – in the office and on site – and also aspects of how they collaborate with each other. Particularly noteworthy here are the aspects of file synchronisation and the functions for building inspection. Many of the basic functionalities outlined in the specifications could already be integrated into the respective prototypes. Particularly noteworthy is the exchange of code parts, which is often possible without major problems due to the underlying Unity environment used by both modules. Specifically, code was shared

intensively in the parsing of metadata from the IfcXML files and the handling of BCF files. Also, some elements of the user interface, such as the start menu or the interface for damage description, were developed once and then transferred to the other module with appropriate adaptations.

Important and indispensable for the research project is an extensive test of the functionalities, especially on site with the involvement of the user target group, in order to collect further feedback and to be able to consider this for future adaptations and further developments.

5 Demonstration

Preparations for the demonstration

Based on the design of the application and the modular concept, some points have been adapted for the demonstrator and the evaluation at the test bridge in Nuremberg, with the main focus on the AR mode, since this is to be investigated on site. Thus, the measurement tool was fully integrated into the AR mode. Likewise, a transparent representation of the entire model was made possible in order to obtain a differentiation between the structure model and damage information.

One obstacle with the bridge is the synchronisation of the model data. Due to the lack of mesh coverage in the box girder, this is done outside the bridge. To avoid confusion between points of the measuring tool and damage points, the coloring of the damage points has been adjusted from blue to red.

Quality management for demonstration

In order to examine the realised demonstrator for its practical suitability, it will be evaluated by independent participants with the help of a workshop. In this way, the quality of the demonstrator can be examined. The quality management will be carried out in the form of a survey. In this survey, participants will be asked questions about expectations, functionality, handling, and practicality.

By digitally collecting data for a quality management survey, an evaluation on the quality of the system can be made immediately after the demonstration. The demonstrator was shown to the participants alone. This procedure prevented other participants from influencing the evaluation. With the help of the

existing evaluation and export options of the system used, the processing of the collected data can be accelerated.

Demonstration: AR at the bridge

The evaluation of the demonstrator takes place in three steps. First, information about the research project and the developed demonstrator is explained to the participants in a briefing.

In the subsequent workshop, the function of the demonstrator is explained to the participants and initial damage is recorded. Furthermore, the participants had the chance to test the demonstrator independently and to evaluate it afterwards.

In the course of the independent testing, the participants discussed advantages and disadvantages, wishes and improvements in a continuous dialog with the test persons. In a first step, the results were recorded in writing. In the final debriefing, the expectations and goals of the participants were discussed.

Follow-up to the demonstration: VR in the office

Through the development of the collaborative module, the same model data, BIM information and damage data can be called up in the VR module for display in the office for follow-up, or for direct communication already during the structural inspection. The prerequisite for this is that the variable damage data from the building inspection has been made available via the CDE system.

Here, after the on-site inspection, all stored damage data can be called up and displayed. For technical reasons, the visual display differs only marginally from the AR application. Likewise, it is up to the user whether he wants to view the inspection results in desktop VR or in HMD VR mode. Adjustments or changes can also be made to the recorded test.

6 Recommendation for action

“We work like primitive people, the system has great potential.” (Participant statement)

The results of the evaluation have shown that the demonstrator has proven itself in practical use by the building inspectors. However, it must be taken

into account that for a meaningful recommendation for action, the evaluation must be carried out by a higher number of independent participants. For this purpose, it is recommended to collect additional results on the basis of a further workshop, which can serve for the derivation of further meaningful recommendations for action.

The practical testing of the demonstrator is at this stage the first step to determine the technological maturity of such an application. However, based on the research conducted in the research project and the results collected during the evaluation, the application is already in the experimental development stage. On the other hand, it is not yet ready for the market. Above all, the application area of such a demonstrator should be defined in the next steps. For example, it is possible to test the demonstrator continuously on different types of structures with an extended group of users. Possible further types of structures could be tunnel structures, retaining walls as well as noise barriers.

Another important part of the future work is the interface between the demonstrator and SIB Bauwerke. At the present time, no direct data exchange can take place between the two media, so that there are no gaps in the processing of the structure inspection. For this purpose, the data collected during the structural inspection is made available in such a way that it can be transferred directly to SIB Bauwerke via an interface. Alternatively, it is conceivable to integrate the functions of the demonstrator in a future SIB Bauwerke version in order to merge and use the advantages of both programs. A definition of an interface would be omitted, the loss of information during the transfer of data would also be eliminated and the processing both before, during and after the inspection of a structure would be considerably accelerated.

From a technical point of view, further development of the system is recommended, particularly with regard to flexibility, in terms of the markers stored. Currently, markers are permanently stored in the application and can only be replaced with great effort; however, possible solutions are available.

7 Outlook

The research project has shown that the technologies, technical possibilities and potentials

for developing an application for digital structural inspection are available. The surveyed structure inspectors and operators call for the next steps to digital and model-based damage assessment. The enthusiasm and motivation for the use of digital applications of the building inspection according to DIN 1076, were recognised, pointed out and could be transferred by the inspectors. Thus, expectations have already been set for the further development of the AR and VR version for adaptive and daily use.

In general, the role of the users for the development of new applications such as the demonstrator and its further developments should be emphasised. Here, a user-centered development process with iterative design – taking into account knowledge and developments from the fields of CSCW, BIM and AR/VR – should also be applied in the future. On the one hand, technological advances must be observed and accompanied by further developments and research projects, but on the other hand, the user should never be left out of the focus of development. Additional infrastructure, such as networks in the structures or the use of other elements of the structures as reference points, should be integrated. Visualisation through AR and VR should be considered as an integral part of the process, as should interaction with the existing BIM data. Additional digital tools can provide further support on site and thus shorten the post-processing process or at least make it more efficient.

Another aspect is the connection of the application developed here to SIB Bauwerke. At the moment, therefore, there is no transfer of the information from the structural inspection to SIB Bauwerke in order to transfer and log the results. This requires the development of a functioning and robust interface between both systems. Thus, further development of the system and linking it to SIB Bauwerke should be considered. Here, an adaptive system must be developed that is both self-sufficient and maintains a permanent link to the data available online from SIB-Bauwerke. Above all, the integration of BIM and the 3D model should be incorporated into SIB Bauwerke. Through this more advanced approach, digitisation could be consistently pursued – from model creation and building design, with the help of BIM, to building maintenance and inspection.

In order to use an application as a supporting medium for building inspection, it is of enormous advantage to create uniform framework conditions. Above all, the integration of a 3D model and the

associated building information depends on the modeling method and consequently on the level of detail. It is necessary to clearly define the basis on which the model is to be integrated. The level of detail of the digital model could be used as a target. Based on this, it is necessary to determine in which way an as-built model is relevant. Should an as-built model be used, the verification between planning and execution is relevant. For this purpose, a reconciliation must be performed. These questions are of considerable importance in order to be able to give the building inspector the best possible impression of reality already during the preparation of the building inspection. Furthermore, an investigation should be carried out to determine what added value the integration of an environment model can bring. Here, especially the topic of traffic safety planning as well as footprints for necessary working platforms, parking areas and others play a role.

Also the integration of monitoring data by permanently or temporarily attached measuring tools at the structure could be integrated into such an application. However, based on the monitoring data obtained in the research project, it is necessary to investigate to what extent the data should be integrated and which are relevant for a structural inspection.

In summary, the applications developed in the research project have the potential to continuously support the building inspector in his work. In particular, the time saved by tedious preparation and follow-up work is sustainably reduced. A major added value for the building inspector is above all the complete logging of damage over the life cycle of a building. The direct integration of image recordings and the localisation of damage by the building inspectors has created a great added value for building inspectors and building managers.

“Putting an end to paperwork” – a statement with which the project started as a goal. The basis to the core of the statement could be shown and presented in this project. However, digitisation in the field of building inspection and maintenance can only be introduced through consistent further development, both technologically and in terms of the general conditions.

Inhalt

Abkürzungen	14	2.5.5 Bauwerksüberwachung und Bauwerksprüfung nach DIN 1076	62
1 Inhalt des Projektes	17	2.5.6 Prüfmethoden	63
2 Stand der Technik	19	2.5.7 IT-Programme	64
2.1 Bauwerksinformationsmodell	19	2.5.8 Anforderungen an Bauwerksprüfer ...	65
2.1.1 Historische Entwicklung	19	2.5.9 Organisation und Ablauf einer Bauwerksprüfung	65
2.1.2 Building Information Modeling	20	2.6 Zusammenfassung aus dem Stand der Technik	67
2.1.3 Industry Foundation Classes (IFC) ...	24	3 Anforderungsanalyse in Bezug zum Forschungsprojekt	68
2.1.4 BIM im Bestand	29	3.1 Anforderungsidentifikation	68
2.1.5 BIM im Brückenbau	30	3.1.1 Brainstorming (Lean Coffee)	68
2.1.6 Brückeninspektion mit SIB-Bauwerke	31	3.1.2 Brückenworkshop (Think-Aloud)	69
2.2 Neue Methoden der Brücken- inspektion	31	3.2 Anforderungssystematisierung	70
2.2.1 Nutzung von UAVs	32	3.2.1 Anforderungsspezifikation	70
2.2.2 Inspektion mit Augmented Reality (AR)	32	3.2.2 Anforderungvalidierung	70
2.3 Common Data Environment (CDE) ...	32	3.3 Pflichtenheft auf Grundlage von Experteninterviews	80
2.3.1 Anforderungen an eine CDE	32	3.3.1 Ergebnisse	80
2.3.2 Technische Aspekte einer CDE	33	3.3.2 Validierte Werkzeuge: technologisches Pflichtenheft.	84
2.3.3 Softwareangebote für CDEs	34	4 Technologielandkarte	85
2.3.4 Diverse Forschungsarbeiten zu CDEs	36	4.1 Management Summary	85
2.4 VR/AR	36	4.1.1 Bereich Building Information Modeling (BIM)	85
2.4.1 Grundlagen VR/AR	36	4.1.2 Augmented Reality (AR)/ Virtual Reality (VR)	85
2.4.2 Beispielanwendungen der VR/AR ...	37	4.2 Technologie-Reifegrad-Metrik	86
2.4.3 Authoring-Ansätze	42	4.3 Building Information Modeling (BIM) ...	86
2.4.4 Technologien von VR und AR	43	4.3.1 Dateiformate	86
2.5 Bauwerksprüfung	56	4.3.2 Modellierungssoftware	87
2.5.1 Rechtliche Rahmenbedingungen	56	4.3.3 Koordinationssoftware	88
2.5.2 Regelwerke und Richtlinien	57	4.4 Common Data Environment	89
2.5.3 Anzahl der Bauwerke in Deutschland	60	4.5 Augmented/Virtual Reality (AR/VR) ...	90
2.5.4 Bauwerke gemäß DIN 1076	61		

4.5.1	Beispielanwendungen	90	6	Modulares Konzept	119
4.5.2	Hardware	91	6.1	Modul 1 VR-Anwendung im Büro	119
4.5.3	Software	93	6.1.1	Eingabe und Betrachtung	119
4.5.4	Schnittstellen zwischen BIM und AR/VR	93	6.1.2	Nutzung der Anwendung	120
4.6	Zusammenfassung der Technologielandkarte	95	6.1.3	Aufbau der Anwendung	121
5	Digitales Bauwerksmodell	97	6.1.4	Programmierklassen in Unity3D der VR-Anwendung	121
5.1	Prozess der digitalen Bauwerksprüfung	97	6.1.5	Betrachtung des Bauwerks im 3D-Raum	124
5.1.1	Prozessbeschreibung	98	6.1.6	Hilfstools	126
5.1.2	Arbeitskarten der digitalen Bauwerksprüfung	103	6.1.7	Betrachtung der Modelldaten	127
5.2	Fusionierung Modelldaten und Bauwerksdaten	106	6.1.8	Betrachtung externer Messdaten	128
5.2.1	Anforderungen an das Bauwerksmodell	106	6.2	Modul 2 AR-Anwendung vor Ort	129
5.2.2	Anforderungen an die Bauwerksdaten	107	6.2.1	Grundlagen	129
5.2.3	Verknüpfung von Dokumenten mit dem Bauwerksmodell	108	6.2.2	Vorbetrachtungen zum bildbasierten Tracking	129
5.2.4	Schadensmodellierung für Brücken	109	6.2.3	Aufbau der Anwendung	131
5.2.5	Schnittstelle eines Austauschformats für Schadensdaten	110	6.2.4	Ausblick für die Geo-Referenzierung des AR-Modells	140
5.2.6	Workflow zum Import der Bauwerksdaten in Unity	110	6.3	Modul 3 Kollaboration Modul 1 + Modul 2	140
5.2.7	IFC Importer Plugins	111	6.3.1	Synchronisierung	140
5.2.8	Externe IFC Konverter	113	6.3.2	Fernkommunikation	142
5.3	Cloudbasiertes Bauwerksinformationsmodell	114	6.4	Zusammenfassung zum modularen Konzept	146
5.3.1	Verortung von Modell und Realität	114	7	Demonstrator	146
5.3.2	Schadensverortung	115	7.1	Darstellung des Demonstrators	146
5.3.3	Virtuelle Darstellung vorhandener Schäden	116	7.2	Evaluation der AR-Demonstration	148
5.3.4	Digitale Funktionen	116	7.2.1	Evaluationsdesign	148
5.3.5	Common Data Environment	117	7.2.2	Umfrage	150
5.4	Zusammenfassung zum digitalen Bauwerksmodell	118	7.3	Ergebnisse	151
			7.3.1	Quantitative Ergebnisse	151
			7.3.2	Qualitative Ergebnisse	152
			7.4	Diskussion	154
			7.4.1	Usability, UI und Programmschnittstellen	154
			7.4.2	Qualität des Modells	155

7.4.3	Lokalisierung	155
7.4.4	Vorbereitung und Nachbesprechung ...	156
7.4.5	Funktionsweisen und weitere Anregungen	156
7.5	Nachbereitung der Demonstration mittels VR im Büro	157
8	Handlungsempfehlung	158
9	Ausblick	160
	Literatur	162
	Bilder	171
	Tabellen	175

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

Abkürzungen

AEC	Architecture, Engineering & Construction	CDE	Common Data Environment
AIA	Auftraggeberinformationsanforderungen	CSCW	Computer Supported Collaborative Work
AK	Arbeitskarten	CSV	Comma-Separated Values
ANSI	American National Standards Institute	DAE	Digital Asset Exchange
AP	Applikationsprotokolle	DIN	Deutsche Industrienorm, Deutsches Institut für Normung
AR	Augmented Reality	DoF	Degrees of Freedom
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz	EP	Einfache Prüfung
ASB-ING	Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten	FBX	Autodesk Filmbox
ASM	Arbeitssicherungsmaßnahmen	FOV	Field of View
B	Besichtigung	FPS	Frames Per Second/ Bildwiederholrate
BAP	BIM-Abwicklungspläne	FSTrG	Bundesfernstraßengesetz
BauO NRW	Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen	GIS	Geoinformationssystem
BCF	BIM Collaboration Format	GNSS	Global Navigation Satellite System
BG	Berufsgenossenschaften	GPS	Global Positioning System
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch	GUI	Grafical User Interface
BIM	Building Information Modelling Bauwerksinformationsmodell	GUID	Globally Unique Identifier, Globally Unique Identifiers
BMI	Bundesministerium des Innern für Bau und Heimat	H	Hauptprüfung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktor- sicherheit	H1	Erste Hauptprüfung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	H2	Zweite Hauptprüfung
BPMN	Business Process Model and Notation	HAK	Hauptarbeitskarten
BSCW	Basic Support for Cooperative Work	HMD	Head-Mounted-Display
bSI	buildingSMART International	HTTP	Hypertext Transfer Protocol
CAD	Computer Aided Design	HUD	Head Up Display
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment	HWD	Head-Worn Device
		ICAM	Integrated Computer Aided Manufacturing
		IFC	Industry Foundation Classes
		IGES	Initial Grafics Exchange Specification

ISO	International Standard Organisation	SLAM	Simultaneous Localisation and Mapping
JSON	JavaScript Object Notation	SP	Sonderprüfungen
LB	Laufende Beobachtung	SSoT	Single Source of Truth
LiDAR	Light detection and ranging oder Light imaging, detection and ranging	STEP	Standard for the Exchange of Product model data
LoD	Level of Detail	TRL	Technology-Readiness-Level
MIDP	Master Information Delivery Plan	UAK	Unterwerkskarten
MIT	Massachusetts Institute of Technology	UAV	Unmanned Aerial Vehicle
MR	Mixed Reality	URL	Uniform Resource Locator
MVD	Model View Definitions	VBI	Verband Beratender Ingenieure
NBIMS-US	National BIM Standard-United States	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
NFC	Near Field Communication	VIO	Visual-Inertial-Odometry
OBJ	Object-Datenaustauschformat	VoIP	Voice over Internet Protocol
OSA	Objektbezogene Schadensanalyse	VR	Virtual Reality
OST	Optisches See-Through	VST	Video See-Through
OWL	Web Ontology Language	WIMP	Windows, Icons, Menus and Pointers
PDF	Portable Document Format	XML	Extensible Markup Language
PLM	Product-Lifecycle-Management	ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
POI	Point of Interest	ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten
PSA	Persönliche Schutzausrüstung		
RDF	Resource Description Framework		
REST	Representational State Transfer		
RI-EBW-PRÜF	Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Verkehrswegen und der darauf aufbauenden Richtlinie		
RiZ-ING	Richtzeichnungen für Ingenieurbauten		
RSA	Richtlinie zur Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen		
RTK	Real-Time-Kinematik		

1 Inhalt des Projektes

Motivation und Projektziel

Eine moderne und leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur ist das Rückgrat für eine wettbewerbsfähige Volkswirtschaft. Der Neubau und die Instandhaltung von Infrastruktur erzeugen substanzielle Kosten. Im Straßenwesen besteht für die Erhaltung der Brückenbauwerke ein großer Finanzierungsbedarf, der im internationalen Standortwettbewerb kontinuierlich zu optimieren ist. Neben bautechnologischen Innovationen stehen dabei auch die prozessualen und organisatorischen Optimierungen des Instandhaltungsmanagements im Fokus. Im Zuge der Digitalisierung ist das Informationsmanagement ein wichtiger Hebel für effizientes Management. Durch die einheitliche, semantische Erfassung und Vorkhaltung von Daten können Simulationen, Prognosen und Planungen genauer und mit geringerem Aufwand erstellt werden.

Ausgehend von den Inhalten des Schlusspapiers der Reformkommission „Bau von Großprojekten“ und dem Grundsatz „Erst digital, dann real bauen“ soll das digitale Planen und Bauen bundesweit zum Standard gemacht werden, außerdem bieten die digitalen Technologien – modellbasiert, föderativ, kooperativ und kollaborativ – enorme Potenziale zur Steigerung von Qualität, Effizienz und Kostensicherheit.

Im Vergleich zu anderen deutschen Industriezweigen sowie im internationalen Vergleich ergibt sich ein deutlicher Nachholbedarf bei der prozessorientierten Digitalisierung des Planens und Bauen. Mit dem vorliegenden Forschungsangebot soll die folgende Hypothese untersucht werden.

Ein bestehendes Bauwerk einschließlich Bestandsmodell und Daten kann mithilfe eines Systems verfügbarer Technologien digital die Anforderungen der Bauwerksprüfung abbilden, durchführen und dokumentieren.

Die Arbeitsgemeinschaft erforscht für die Bundesanstalt für Straßenwesen (kurz: BASt) ein System, das auf Basis verfügbarer technologischer Lösungen die herkömmlichen Prozesse der Bauwerksprüfung unterstützen soll. Die Tauglichkeit des Systems wird durch einen Demonstrator validiert und verständlich gemacht.

Dazu werden Informationen aus dem Bestand, aus den manuellen Inspektionsprozessen sowie aus dem Monitoring von Bauwerken intelligent verknüpft und für die unterschiedlichen Prozessbeteiligten geeignet bereitgestellt. Zur Verknüpfung und Visualisierung bietet die digitale Methode BIM in Kombination mit den VR-/AR-Technologien konzeptionell und methodisch die ideale Basis. Im Vorhaben werden aus diesen Technologien spezielle Komponenten zusammengestellt, die das System bilden.

Konkret werden ausgewählte Prozesse der Brückenprüfung in drei Module gruppiert, untersucht und demonstriert. Die Module sollen die Anwendung der ausgewählten Prozesse des Systems im Büro, vor Ort sowie in der Fernkommunikation ermöglichen.

Übersicht der Aufgaben und Arbeitspakete

Die nachfolgende Übersicht zeigt den konzeptionellen Aufbau des Projektes, gegliedert in vier Arbeitspakete. Hierauf aufbauend sind die jeweiligen Unterarbeitspakete definiert, welche eine technische Zugehörigkeit der jeweils beistehenden Projektpartner aufweisen.

Der Arbeitsplan des Konsortiums basiert auf dem Projektstrukturplan und gliedert sich in vier Arbeitspakete:

- AP1 Stand der Technik und Anforderungsanalyse
Ergebnis: Technologielandkarte und Lastenheft VR/AR
- AP 2 Digitales Bauwerksmodell
Ergebnis: Pflichtenheft für ausgewählte Prozesse der Brückenprüfung sowie für das Modulkonzept und das cloudbasierte Bauwerksinformationsmodell
- AP 3 Modulares Konzept
Ergebnis: Modul 1 im Büro, Modul 2 vor Ort, Modul 3 Fernkommunikation
- AP 4 Demonstrator
Ergebnis: Demonstration des Systems und Handlungsleitfäden für digitale Bauwerksprüfung

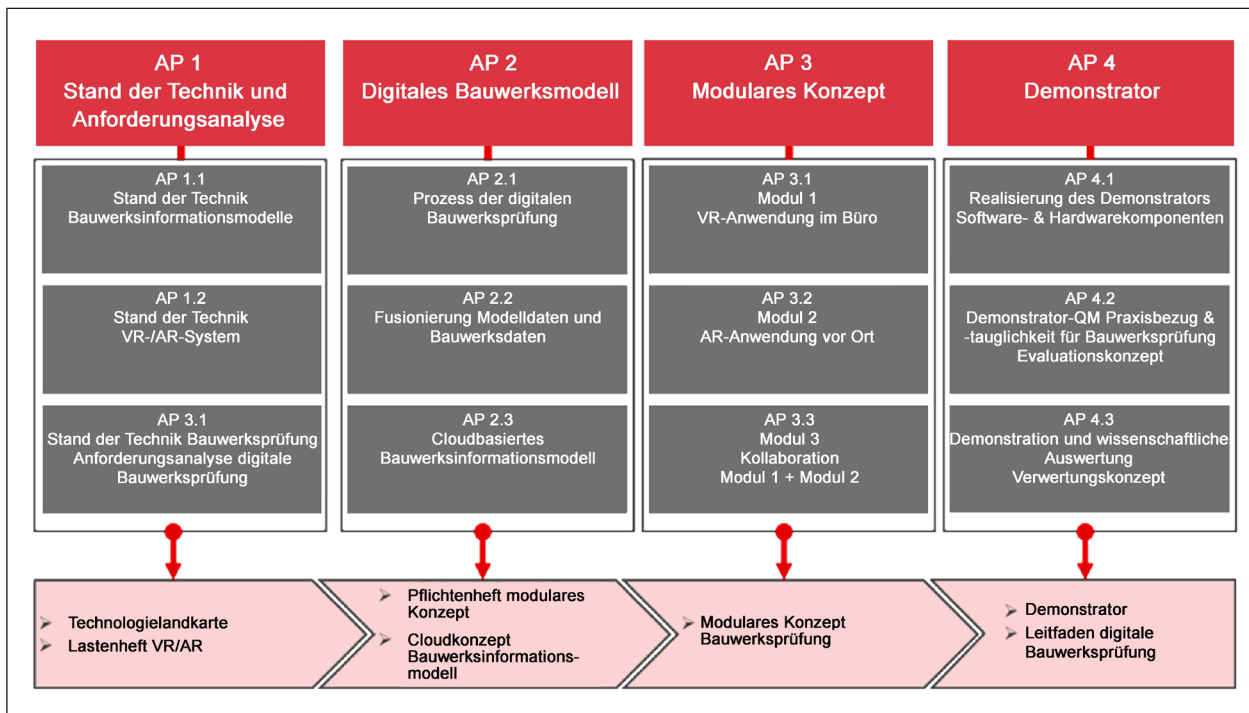


Bild 1: Übersicht der Arbeitspakete im Projekt

Ausgangssituation

Eine immer älter werdende Infrastruktur, die stetige Zunahme des Schwerlastverkehrs als auch weitere Einflüsse wie die Zunahme der Luftverschmutzung und Tausalzangriffe fördern das vermehrte Auftreten von Schäden an den Bauwerken auf Straßenwegen.

Die Straßenbauverwaltungen tragen im Rahmen ihrer Verkehrssicherungspflicht die Verantwortung zur Aufrechterhaltung einer intakten Infrastruktur, unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit, für die Standsicherheit, die Verkehrssicherheit als auch über die Dauerhaftigkeit der Ingenieurbauwerke. Dies erfordert ein Qualitätsmanagementsystem, das die Bauwerke von der Planung über die Erhaltung bis zum Abbruch erfasst und welches ständig aktualisiert wird. Eine ständige Anpassung der Managementsysteme an zukunftsorientierte IT-Techniken sowie die Ergänzung des gewonnenen Fachwissens der vergangenen Jahre ist dabei unerlässlich.

Durch die beschriebenen, stetig wachsenden Anforderungen und Belastungen an die Bauwerke gewinnt die Bauwerksprüfung immer mehr an Bedeutung und ist durch die Feststellung und Bewertung des Ist-Zustandes der unterschiedlichsten Bauwerke ein wesentlicher Baustein eines Qualitätsma-

agementsystems. Aufgrund der Vielzahl an Normen und Richtlinien sowie des wachsenden technologischen Fortschritts im Brücken- und Ingenieurbau ist es eine unerlässliche Herausforderung, dem Stand der Technik ständig zu folgen.

In allen industriellen Bereichen hält die präventive, langzeitliche Überwachung von system- und sicherheitsrelevanten Komponenten Einzug. Selbst im Privatbereich ist diese Entwicklung seit einigen Jahren intensiv zu beobachten (SmartHome, SmartHealth). Auf dieser Basis sollen Systemausfälle und sicherheitsrelevante Ereignisse frühzeitig erkannt werden. Andererseits können Wartungsintervalle an die Ergebnisse des Monitorings verschleiß- bzw. ergebnisabhängig angepasst werden. Durch diese Interaktion können Wartungs- und Instandhaltungskosten gesenkt und die Betriebs- und Ausfallsicherheit gesteigert werden. In den vergangenen Jahren aggregierten sich Mängel der Qualität in der Bauplanung oder Bauausführung zu Einstürzen, Bränden oder anderen Versagensfällen mit Personenschäden, wie z. B.:

- Brückeneinsturz Genua, 14.08.2018, mit 31 Toten, unter anderem durch ein gerissenes Tragseil und strukturelle Schwächen am Bau
- Kölner Stadtarchiv, 03.03.2009, mit 2 Toten, unter anderem durch fehlerhafte Ausführung und

Überwachung einer unterirdischen Stahlbetonschlitzwand

- Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall am 02.01.2006 mit 15 Toten, unter anderem durch mangelnde Einbindung des Prüfindenieurs für Baustatik
- Teileinsturz einer Schule in Goldberg, Kreis Parchim, am 13.08.2004 mit 5 Toten, unter anderem durch Umbau auf Basis mangelnder Baudokumentation
- Brand des Düsseldorfer Flughafengebäudes am 11.04.1996 mit 16 Toten, unter anderem durch mangelnde Bauüberwachung
- Einsturz des Roten Turmes in Jena im August 1995 mit 4 Toten, unter anderem durch Versagen des Außenmauerwerks und der Tragkonstruktion

Heute können Bauwerke u. a. mit intelligenter Sensorik ausgestattet werden, um mögliche Schadensmerkmale rechtzeitig zu erkennen.

Moderne VR- und AR-Systeme können die Bauwerksprüfung unterstützen und diese qualitativ verbessern. Dies sowohl in der Vorbereitung auf eine Bauwerksprüfung, in der Durchführung vor Ort als auch bei der Nachbearbeitung eines Projektes. Sie können als wesentlicher Grundstein einer Bauwerksprüfung folgender Unterhaltungsarbeiten sein. Durch diese Art von Bauwerksüberwachung wird die Bauwerksprüfung unterstützt und sorgt für den Erhalt von Bauwerken.

Um ein gesamtes Projektteam über den aktuellen Stand zu informieren, sind die Methoden des Build-



Bild 2: Zukunftsvision einer handnahen Bauwerksprüfung unterstützt mithilfe von AR-HMD's

ing Information Modeling (kurz: BIM), der Einsatz zukunftsorientierter Digitalisierungsmedien und die Nutzung interaktiver Darstellungs- und Projektionsmöglichkeiten geeignet. Hierzu wird der aktuelle Stand der Technik untersucht, um die Möglichkeiten solcher Methoden und Medien abzuschätzen und einzubeziehen.

2 Stand der Technik

2.1 Bauwerksinformationsmodell

2.1.1 Historische Entwicklung

Die historische Entwicklung der computergestützten Zeichensysteme zieht sich bis in die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts zurück und wird ausführlich von VAJNA et al. beschrieben (VAJNA et al., 2013: 1.1), worauf im Folgenden Bezug genommen wird. Die erste revolutionäre Veränderung in der Planung von Projekten wurde mit der Entwicklung des ersten Computer Aided Design-Systems (CAD) in den USA vollbracht. Es handelte sich hierbei um erste Forschungsarbeiten am Massachusetts Institute of Technology (MIT), bei dem durch den Einsatz von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen geometrisch komplexe Bauteile für die militärische Luftfahrt ökonomischer, qualitativer und schneller hergestellt werden sollten. Abgeleitet aus der Forschung, im Bereich der Maschinenfertigung, entstand der Begriff „CAD-System“. Mit diesem System wurde computerunterstütztes Konstruieren und Entwerfen möglich. Die erste Vorstellung eines CAD-Systems wurde 1963 durch Ivan E. Sutherland vollzogen. Bei der Präsentation handelte es sich um das CAD-System „Sketchpad“. Hierbei konnten durch Einsatz eines Lichtgriffels Geometrien an einem Bildschirm erzeugt werden. Die ersten CAD-Systeme in Deutschland wurden Ende der 60er Jahre entwickelt und zunächst nur an Universitäten zu Forschungszwecken eingesetzt. Mit der Weiterentwicklung und Kommerzialisierung der CAD- und Computertechnik wurden diese Systeme für Unternehmen zunehmend rentabel (VAJNA et al., 2013: 1.1).

Mittlerweile beherrschen CAD-Systeme der heutigen Generation die Möglichkeit, Geometrien mit Daten zu verknüpfen. Des Weiteren ist die parametrische Modellierung effektiver geworden, sodass eine automatische Erstellung und Anpassung von Geometrien durch die Eingabe von Werten (den Parametern) entsteht (ABELN, 1995).

Mittlerweile hat die Digitalisierung den Einzug in die Baubranche geschafft und verhilft ihr zu großen Zugewinnen in der Produktivität. Jedoch wurde die Nutzung der digitalen Möglichkeiten nach der erstellten Planung nicht weiterverfolgt (BORRMANN et al., 2015). In anderen Branchen ist der Grad der Nutzung von digitalen Möglichkeiten bereits einige Schritte weiter. Dort werden bereits digital erfasste Informationen während des gesamten Lebenszyklus weiterverfolgt und vervollständigt. Dies führt ebenfalls dazu, dass der Informationsverlust im Wesentlichen reduziert wird. Vor allem bei komplexen Bauwerken mit vielen Beteiligten unterschiedlicher Fachdisziplinen besteht ein enormes Risiko bei Informationsaustausch Inhalte zu verlieren (BORRMANN et al., 2015). Eine Möglichkeit Informationen über den Lebenszyklus eines Bauwerks hinaus zu nutzen, bietet die Methode Building Information Modelling.

2.1.2 Building Information Modeling

Bereits 1974 wurde das Konzept der Methode BIM in einer Forschungsarbeit beschrieben, bei welcher der Ansatz zur Nutzung gemeinsamer Gebäudeinformationen beschrieben wird (EASTMAN et al., 1974). Der Begriff Building Information Modelling ist im Jahre 1992 zum ersten Mal erwähnt worden (VAN NEDERVEEN and TOLMAN, 1992). Der Softwarehersteller Autodesk machte sich 2003 die Methode zu eigen und veröffentlichte ein White Paper zum Thema Building Information Modelling (Autodesk, 2003).

Während die reguläre Planung von Bauprojekten auf zwei- bzw. dreidimensionalen Entwürfen basiert und weitgehend manuell entwickelt wird, verbirgt sich hinter der Methode BIM eine neue Herangehensweise.

Die Arbeitsmethode ist schon länger vorhanden und stammt aus der Autoindustrie, wo das sogenannte Product-Lifecycle-Management (PLM)-Modell behandelt wird (ALBRECHT, 2014). Ziel hierbei ist die Bild des kompletten Lebenszyklus eines Produkts. Um dies zu erreichen, werden die wichtigsten Produkt- und Objektdaten in einem digitalen Modell verknüpft. Dies führt zu einem modellbasierten Informationsmanagement (Anon., 2020a). Durch die Verknüpfung aller Informationen mit dem 3D-Modell und Bild des kompletten Lebenszyklus eines Bauwerks wird BIM Bestandteil aller Leistungsphasen,

von Entwurf, Ausführung und Betrieb bis hin zum Rückbau.

Bei der Planung mit der Methode BIM werden Bauprozesse kontinuierlich im dreidimensionalen Raum behandelt. Hierbei werden die einzelnen Bauteile nicht als informationslose Geometrie modelliert, sondern werden intelligent, d. h. mit zusätzlichen Informationen, dargestellt. Die Planung wird durch parametrische und objektorientierte Bauteile visuell aufgebaut. Jedes modellierte Objekt beschreibt ein Bauteil, wodurch sich auf diese Weise Abhängigkeiten unter den Objekten ergeben (BALDWIN, 2018).

Die BIM-Methode ist zunehmend weiterentwickelt worden. Durch die stetig wachsende Technik und die Möglichkeit der erhöhten Nutzung spricht man im Zusammenhang mit BIM nicht nur von dritter Dimension, sondern einer Steigerung dessen in die vierte bis hin zur siebten Dimension. Hierbei beschreiben weitgreifende Dimensionen nicht die geometrische Darstellung, sondern die weitere Nutzung.

Der Einsatz von BIM in der Baubranche, mit dem die Projekte kontinuierlich modellgestützt umgesetzt werden sollen, ist nicht unmittelbar zu bewerkstelligen (BORRMANN et al., 2015). Um die BIM Methode zu implementieren, können sich die Unternehmen das BIM-Reifegradmodell von BEW und RICHARDS zu Nutzen machen (siehe Bild 3). Hierbei wird anhand von BIM-Leveln der aktuelle Reifegrad beschrieben. Der Reifegrad spiegelt den aktuellen Stand der BIM-Einführung in einem Unternehmen und deren Projekte wider. Anhand des Reifegradmodells wird das BIM-Level festgelegt (SHERVIN, 2019). Insgesamt wird das BIM-Reifegradmodell nach BEW und RICHARDS in vier Level unterteilt. In Level 0 werden Projektabläufe durch 2D-Zeichnungen durchgeführt und mögliche Datenausgaben über analoge Pläne übergeben. Level 1 hin-

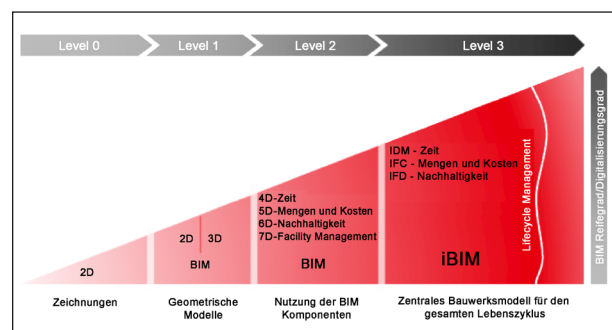


Bild 3: BIM-Reifegradmodell nach BEW & RICHARDS (2008)

gegen beschreibt die Durchführung der Projekte mithilfe von dreidimensionalen Geometrien. Ein Datenaustausch geschieht durch Übermittlung der Datei. Ab dem Level 2 wird die Nutzung von BIM-Software für die Erstellung von Modellen vorausgesetzt. Hierbei entwickelt jeder Fachplaner ein eigenes Fachmodell, welches in kontinuierlichen Abständen zu einem Gesamtmodell zusammengeführt wird. Der Austausch geschieht durch die von den Softwareherstellern zu Verfügung gestellten Dateiformate (BORRMANN et al., 2015). Mit Beginn von Level 3 existiert ein zentrales, fachübergreifendes Bauwerksmodell, welches für den gesamten Lebenszyklus genutzt wird. Der Datenaustausch findet nicht mehr über Dateiformate der Hersteller statt. Die Daten laufen alle auf eine gemeinsame Kollaborationsplattform zusammen, wodurch aktuelle Daten und Informationen durch Projektbeteiligte genutzt werden können.

Digitales Modell

Voraussetzung für die Nutzung der BIM-Methode in einem Projekt ist die Planung anhand eines digitalen Modells (SUNDMACHER, 2015). Das digitale Modell soll das Bauwerk vom Entwurf über Ausführung und Betrieb bis hin zum Rückbau repräsentieren. Das Modell besteht aus verschiedenen Elementen, welche jeweils ein bestimmtes Bauteil repräsentieren. Jedes modellierte Objekt beschreibt ein Bauteil, wodurch sich auf diese Weise Abhängigkeiten unter den Objekten ergeben (BALDWIN, 2018). Hierdurch ist beispielsweise für eine Tür klar definiert, dass sie zu einer bestimmten Wand und diese wiederum zu einem bestimmten Raum gehört. Ein Raum hat ein Bezug zum Geschoss und das Geschoss wiederum zum gesamten Bauwerk. Damit ist ein klarer Strukturbaum definiert (BALDWIN, 2018).

Durch das Modell werden Informationen weitergeleitet. Alle Daten, welche direkt im Modell vorhanden sind, werden als inhärente Informationen bezeichnet. Alle weiteren Daten können über externe Verlinkungen mit dem Modell verknüpft werden (siehe Bild 4). Diese Informationen sind referenzierte Informationen (DEGES, 2019).

Hierdurch entsteht ein objektorientierter Planungsprozess, bei dem das digitale Modell als wesentlicher Bestandteil im Vordergrund steht und als zentrale Basis Einzug in die Projektbearbeitung hält. Durch die verknüpften Daten können diese zum

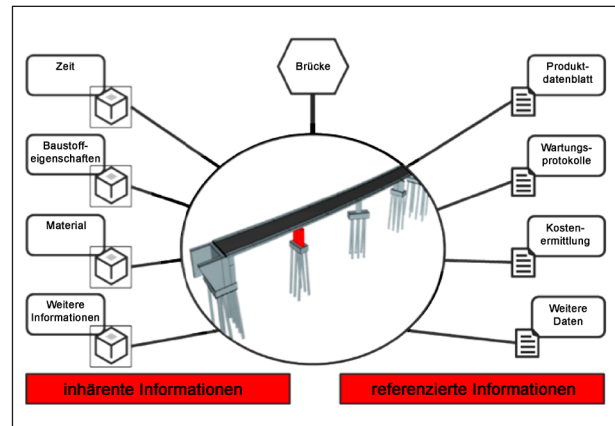


Bild 4: Inhärente (enthaltene) und referenzierte (externe) Informationen eines Building Information Modells

Beispiel im Bereich des Bauwerksbetriebes genutzt werden, um bei möglichen Wartungsarbeiten alle Daten am Bauteil zu finden (ENTZIAN, 2015).

Bei der Erstellung eines digitalen Gebäudemodells ist ein Detaillierungsgrad, auch Level of Detail (LoD), für die geometrischen und semantischen Informationen des Bauteils festzulegen. Die Detaillierungsgrade werden in LoD 100 bis LoD 500 klassifiziert, wobei das LoD 500 den Detaillierungsgrad angibt, der mit den meisten Informationen und Details angereichert ist. Des Weiteren orientiert sich der Detaillierungsgrad an der Leistungsphase (BALDWIN, 2018), so wird zum Beispiel projektspezifisch für frühe Leistungsphasen wie der Vorentwurfsphase ein LoD 100 vereinbart, bei der Ausführungsplanung meist ein LoD 400.

Potenziale von BIM

BAHLAU und KLEMT-ALBERT untersuchen auf Basis von Expertenbefragungen, vor welchen Herausforderungen Bauprojekte stehen und welche digitalen Verbesserungsmöglichkeiten, wie in Tabelle 1 beschrieben, es gibt (BAHLAU and KLEMT-ALBERT, 2018). Aus der Menge der Herausforderungen von Großprojekten werden die vier Hauptbereiche Kommunikation, Technik, Projektmanagement und Kultur ermittelt. Aus den Interviews resultiert, dass die Kommunikation, mit deutlichem Abstand zu den anderen Bereichen, als größte Herausforderung in Bauprojekten bewertet wird. In einer Folgeumfrage werden durch die Interviewteilnehmer und weitere Befragte spezifische Herausforderungen der vier genannten Bereiche und mögliche Verbesserungsvorschläge benannt, siehe Tabelle 1.

Bereich	Herausforderungen	Digitale, potenzielle Verbesserungen
Projektkommunikation	Steigende Vielfältigkeit der Qualifizierungen von Projektbeteiligten und resultierender steigender Informationsverlust bei der Informationsweitergabe	Gemeinsame BIM-Plattform für alle Projektbeteiligten zur Kollaboration und Kommunikation und zweckorientierte Visualisierungen in der Planungsphase
Projektkultur	Geringes Risikomanagement bei gleichzeitiger Schuldzuweisung (schwache Fehlerkultur)	Digital gestütztes transparentes Risikomanagement, transparente Kosten- und Terminvalidierung, bessere vertragliche Partnerschaftlichkeit
Technik	Koordinierung der Fachplanungen, anspruchsvolle Planungen, Bauen im Bestand	Einführung bindender Standards wie Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA) und BIM-Abwicklungsplänen (BAP)
Projektmanagement	Termin- und Kostensteigerung durch Baubegleitende Planung und resultierender Finanzierungsbedarf durch Nachträge	Umsetzung eines modellbasierten AVA-Prozesses (Ableitung von LVs, Mengen und Qualitäten aus dem Modell)

Tab. 1: Herausforderungen im Bereich von Baugroßprojekten und Verbesserungsvorschläge

BIM in Deutschland

Bereits 2013 hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) die Reformkommission Bau von Großprojekten gegründet. Die Aufgabe dieser Kommission war es, eine Handlungsempfehlung zu erstellen, welche Lösungsvorschläge wiedergibt, in welcher Form Kostentransparenz sowie die Effizienz und Termintreue bei Großprojekten verbessert werden können (BMVI, 2015a). Hierzu wurde anschließend der Stufenplan Digitales Planen und Bauen insbesondere zur Einführung von BIM bis 2020 verabschiedet (BRAMANN und MAY, 2015).

Mit der Veröffentlichung des Stufenplans Digitales Planen und Bauen im Dezember 2015, gab das Ministerium den Startschuss für die Einführung der Building Information Modeling Methode in Deutschland. Das Dokument beschreibt die Einführung der Methode BIM für Infrastrukturprojekte sowie den infrastrukturbezogenen Hochbau. Der ehemalige Verkehrsminister Alexander Dobrindt verstärkte das Vorgehen mit der Aussage, dass BIM bis 2020 neuer Standard bei allen neuen Verkehrsinfrastrukturprojekten wird (BMVI, 2015b). Einzug erhielt die Zielvorgabe von Herrn Dobrindt in das BIM-Leistungsniveau 1, welches im Stufenplan Digitales Planen und Bauen niedergeschrieben wurde.

In Deutschland existieren jedoch keine Standards oder Richtlinien. Es existieren Leitfäden oder Positionspapiere von verschiedenen Organisationen wie dem Verband Beratender Ingenieure (VBI), der Bauindustrie oder dem VDI. Hier liegt Deutschland im internationalen Vergleich noch hinten, obwohl die Methode BIM hierzulande bereits praktiziert wird.

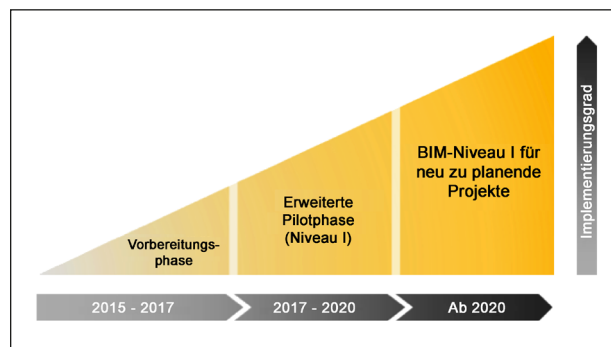


Bild 5: Stufenplan BMVI zur Einführung von BIM nach (BRAMANN und MAY, 2015)

Um das BIM-Niveau 1 für neu zu planende Projekte erreichen zu können, wurde auf der Grundlage von Pilotprojekten die Standardisierungen vorangetrieben. Hierzu wurden wissenschaftliche Begleitforschungen durch das BMVI beauftragt. Die Projekte werden während der gesamten BIM-Pilotphase untersucht und durch eine BIM-Reifegradmetrik bewertet. Hierbei wird das Niveau des Pilotprojektes mit dem des BIM-Niveau 1 ab 2020 verglichen (KÖNIG, BORRMANN und AMANN, 2017).

In der Folge werden einige Pilotprojekte dargestellt (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3).

Um an die Vorbereitungsphase des Stufenplans anzuknüpfen, wurde durch das BMVI der sogenannte Masterplan Bauen 4.0 veröffentlicht (BMVI, 2017). Im Anschluss an die Veröffentlichung des BMVI brachte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) einen Erlass auf den Weg, aus dem hervorgeht, dass alle Neubau-, Umbau- und Erweiterungsbauten des Bundes auf BIM-Tauglichkeit überprüft werden (POSS, 2017).

Pilotprojekt	Stufenplanlevel	Begleitforschung
Brücke über den Petersdorfer See, A19	Vorbereitungsphase auf allen Verkehrsträgern	InfraBIM
Talbrücke Auenbach, B107		
Eisenbahnüberf. Filstal		
Eisenbahntunnel Rastatt		
Streckenplanung B87n, Abschnitt Eilenburg-Mockrehna		

Tab. 2: Pilotprojekte BMVI (BORRMANN et al., 2017)

Pilotprojekt	Stufenplanlevel	Begleitforschung
Straße und Wasser		
Grundinstandsetzung der Straßenbrücke Bergedorfer Straße, B5/A1	Erweiterte Pilotphase	BIM4Infra
Neubau der zweiten Gauchachtalbrücke, B31		
Ausbau vom AK München Nord, A99		
Umbau der Rastanlage Ellund, BAB A7		
Tunnelkette A44 – Tunnel Bubenrad		
Schleuse Wedtlenstedt		
Schiene		
Emmerich-Oberhausen	Erweiterte Pilotphase	BIM4Rail
Rhein-Ruhr-Express		
Karlsruhe-Basel, Tunnel Rastatt und Sta 1		
Karlsruhe-Basel, Sta 7 und Sta 8		
Stendal-Uelzen		
Feste Fehmarnbeltquerung		
Homburger Damm		
Berlin-Dresden		
Wendlingen -Ulm/Filstalbrücke		
Hamburg-Hannover		
Knoten Bamberg		

Tab. 3: Pilotprojekte BMVI in der erweiterten Pilotphase (Quelle: BIM4Infra und BIM4Rail)

Im Rahmen einer Zusammenführung der BIM-Strategien von BMVI und nun auch des Bundesministeriums des Innern, Bau und Heimat (BMI) wurde im Juni 2019 das BIM Kompetenzzentrum des Bundes gegründet. Hierdurch soll die Einführung von BIM in Deutschland beschleunigt werden (planen-bauen 4.0, 2019).

Nicht nur durch Bundesministerien werden mittlerweile BIM Strategien veröffentlicht, sondern auch durch Unternehmen aus der freien Wirtschaft wie zum Beispiel die DEGES GmbH (DEGES, 2019). Des Weiteren veröffentlichte auch die Deutsche Bahn AG ihre eigenen BIM-Strategien.

Pilotprojekt	Begleitforschung
Humboldtforum	planen-bauen 4.0
Laborgebäude Physikalisch-Technische Bundesanstalt	
Deutsche Botschaft Wien, Neubau von Kanzleien und Residenz	
Bundesamt für Strahlenschutz, Neubau Ersatzgebäude K 12	

Tab. 4: Pilotprojekte BMUB (planen-bauen 4.0)

Bauverträge mit BIM in Deutschland

In Deutschland ist durch die teilweise verpflichtende Umsetzung von Bauprojekten mit BIM erforderlich geworden, neue vertraglich-rechtliche Grundlagen zu definieren (BMVI, 2019a). Diese rechtlichen Grundlagen sind bei Zustandekommen der Verträge für ein Projekt zu integrieren, sodass die vertraglichen Lieferleistungen durch BIM-Lieferleistungen erweitert werden (BMVI, 2019a).

In den BIM4INFRA2020 Handreichungen werden in Teil 1 (BMVI, 2019a) zwei Dokumente hervorgehoben, die bei den meisten BIM-Projekten als Ergänzung der erfolgsorientierten Verträge mit den Planern dienen: Die AIA und der BAP, welche Vorgaben für die Anwendung der BIM-Methode liefern.

Dabei können die Einteilung der Informationen in AIA und BAP variieren, in den Handreichungen wird jedoch eine Einteilung empfohlen, bei der die AIA „messbare Leistungsergebnisse“ und höchstens „abstrakt-funktionale Anforderungen“ und der BAP die präzisierenden Angaben wie Detailprozesse beschreiben. Die Grundlage für die AIA liefern dabei die BIM-Anwendungsfälle, d. h. Prozessbeschreibungen, die basierend auf den Projektzielen definiert werden, welche in den Handreichungen Teil 6 (BMVI, 2019b) beschrieben werden.

BIM international

Weltweit ist die Anwendung der BIM-Methode in vielen Ländern bei öffentlichen Vorhaben verpflichtend geworden. Je nach Land kann sich die Verpflichtung nach dem Bauvolumen richten. Singapur, Südkorea oder die USA, aber auch europäische Länder wie Dänemark und die Niederlande haben Standards sowie Richtlinien von staatlicher Seite auf den Weg gebracht, um so öffentliches Bauen mit der BIM-Methode zu standardisieren (BAIER, 2016). Singapur hat bereits 2004 die Verpflichtung eingeführt, dass für alle öffentlichen Bauvorhaben die Bauunterlagen zur Prüfung elektronisch auf einer Plattform eingereicht werden (KHEMLANI, 2005). Durch die Übergabe des Bauwerksmodells im IFC-Format sollen die Daten automatisiert auf die Einhaltung von Normen und Vorgaben untersucht werden. Seit 2013 existieren in Singapur BIM-Richtlinien der zweiten Version, welche von der Building and Construction Authority veröffentlicht wurden (BCA Singapore, 2013). In den Vereinigten Staaten von Amerika werden durch das National BIM Standard-United States (NBIMS-US) Regel-

werke veröffentlicht, um die Umsetzung von BIM voranzutreiben (BERGMEISTER, FINGERLOOS and WÖRNER, 2018). Von privaten Auftraggebern werden zunehmend BIM-gestützte Projektentwicklungen verlangt und diese sind durch die Veröffentlichung der National BIM Standards in den USA weiter vertieft worden. Hierbei handelt es sich um eine Sammlung an definierten Standards, welche beispielweise Datenformate wie IFC aber auch Datenaustauschprozesse beschreiben (National BIM Standard, 2012).

Vorreiter bei der Projektentwicklung mit der BIM-Methode in Europa sind vor allem die skandinavischen Länder. Ebenso konnten Großbritannien und die Niederlande mittlerweile die Methode BIM in der Abwicklung von Projekten etablieren und Standards entwickeln (STANGE, 2020). In Großbritannien ist die Überzeugung von BIM soweit vorangeschritten, dass seit April 2016 alle öffentlichen Projekte eine verbindliche Umsetzung des BIM-Level 2 Reifegrads vorgeschrieben wird (BORRMANN et al., 2015). In Finnland wird seit 2007 bei der staatlichen Immobilienagentur Senat Properties die BIM-Methode angewendet. 2012 folgte dann die nationale BIM-Richtlinie (COBIM), worauf der finnische Betonverband eigene BIM-Richtlinien für Betonstrukturen veröffentlichte (STANGE, 2020). Im deutschsprachigen Raum hat Österreich 2015 mit der ÖNORM A6241-1 und -2 eine Norm erarbeitet und somit als Standard auf den Weg gebracht (BERGMEISTER, FINGERLOOS and WÖRNER, 2018).

2.1.3 Industry Foundation Classes (IFC)

1995 gründete sich die Non-profit-Organisation buildingSMART mit dem Ziel weltweit die Entwicklung von BIM-Normen anzutreiben. Als Kerninitiative ist hier die Weiterentwicklung des IFC-Datenaustauschformates zu nennen (BALDWIN, 2018). Zu den Mitgliedern von buildingSMART international gehören unter anderem die Marktführer für BIM-Software wie Autodesk, Grafisoft und Nemetschek. Ebenfalls ein wichtiges und nicht zu vernachlässigendes Datenformat in Infrastrukturprojekten ist das OKSTRA (Objektkatalog Straße).

2017 gründete sich die BIMe-Initiative, welche man als ein internationales, prozessorientiertes Konzept verstehen soll, das zur Verbesserung der digitalen Performance in der Industrie helfen soll. Die Initiative ist darauf ausgelegt, Fachwissen und vor allem bedeutungsvolle Forschungsarbeiten und Online-

Tools zugänglich zu machen. Hierdurch soll eine gemeinsame und engvernetzte Gemeinschaft agieren (BIME-Initiative, 2018).

Die Geschichte der offenen Austauschformate im Baugewerbe beginnt in den 1970er Jahren mit der Entwicklung von Standards, die das verlustfreie Austauschen von einfachen Geometriedaten zwischen CAD-Systemen ermöglichen (BORRMANN et al., 2018). Diese Austauschformate erhielten durch die Eingliederung in nationale Standards in vielen Teilen der Welt Unterstützung. Das nennenswerteste ist hier das IGES (Initial Graphics Exchange Specification) Dateiformat, welches heutzutage noch Anwendung findet (LAAKSO and KIVINIEMI, 2012).

Eines der gravierenden Probleme in den 1970er Jahren war die Inkompatibilität der von den vielen CAD-Systemen erzeugten Daten.

Ziel des von der United Air Force initiierten Projektes „Integrated Computer Aided Manufacturing“ (ICAM) war es, dieses Problem zu lösen und eine Datenaustauschmethode im Rahmen des integrierten, computergestützten Fertigungsprogramms der US Air Force zu entwickeln (BASU and KUMAR, 1995)

In dem Projekt wurde ein Konsortium bestehend aus der Boeing Company, der General Electric Company und dem damaligen National Bureau of Standards (heute National Institute of Standards and Technology) beauftragt, die gemeinsame Entwicklung und Testung des offenen Austauschformates zu bewerkstelligen.

Als Ergebnis dieser Bemühungen wurde die IGES Version 1.0 im Januar 1980 für das Übertragen von zweidimensionalen und dreidimensionalen mechanischen Zeichnungen entwickelt. In einer Zeit, in der sich die 3D-Modellierung als für Konstruktionszeichnungen rentabel erwies, kämpfte IGES darum, relevant zu bleiben, obwohl es innerhalb von ca. einem Jahr (von der Ausschussbildung bis zur Veröffentlichung des ersten Entwurfsstandards) als Standard vom American National Standards Institut (ANSI) eingeführt wurde. Für den CAD-Einsatz außerhalb begrenzter Kontexte boten funktionsreichere und gut unterstützte herstellereigenspezifische Formate einfach mehr Vorteile (KEMMERER, 1999).

Das Technische Komitee 184, Unterkomitee 4 „Industrial Data“ (ISO TC 184/SC 4) der Internationalen Organisation für Normierung (ISO) erklärte

1984, dass keines der am Markt verfügbaren Austauschformate so erweitert werden könne, um den Anforderungen eines offenen Computermodellierstandards für die Fertigungsindustrien gerecht zu werden (BLOOR and OWEN, 1995).

Infolgedessen konnte durch das TC 184/SC 4 in Verbindung mit einer breiten Allianz von Stakeholdern aus verschiedenen Industriesektoren eine Reihe unterschiedlicher Unternormen in dem ISO 10303 Standard gebündelt werden. Die Familie der 10303-Standards umfasste nicht nur einen vereinbarten Rahmen für die Beschreibung von Produktdatendarstellungsschemata ISO 10303-11, sondern umfasste auch grafische Notationsmethoden, die Definition von Dateiformaten für Instanzen (Serialisierung) in verschiedenen syntaktischen Varianten und einheitliche Informationsverarbeitungsschnittstellen (BORRMANN et al., 2015). Hier wurden auch semantische Aspekte der einzelnen Produktkategorien erläutert.

Als die Entwicklung an ISO 10303 begann, überschritten seine Zielsetzungen das, was Technologien zu der Zeit im Stande waren zu leisten. Somit verliefen die Standardisierungen lange Zeit entweder im Voraus oder parallel zu Funktionen, die in kommerziell erhältlicher Software implementiert wurden (WIX and BLOOMFELD, 1995). Eine Erkenntnis, zu der SC 4 während seiner Arbeit gekommen ist, war, dass robuste Datenmodellierung eine der Kernvoraussetzungen für die Ermöglichung der Komplexität von STEP (Standard for the Exchange of Product model data) ist und dass existierende Modelliersprachen hierfür ungeeignet waren. Dies führte dazu, dass im Einklang mit der Entwicklung von ISO 10303 eine Informationsmodellierungssprache, später bekannt als EXPRESS, entwickelt wurde.

EXPRESS wurde als deklarative Datenmodelliersprache entwickelt, um den Anforderungen von STEP gerecht zu werden und objekt-orientierte Datenmodelle definieren zu können. Die mit EXPRESS geschriebenen Informationsmodelle sind neben der Interpretierbarkeit durch eine CAD-Software auch von einem Nutzer lesbar und können zusätzlich grafisch über die EXPRESS-G Notation gerendert werden. Weitere Grundbausteine der Sprache sind Relationen, Vererbung, Attribute und Beschränkungen, welche für jede deklarierte Entität (Klassen bei anderen Modelliersprachen) definiert werden können. Durch die integrierte Vererbung sowie das Verwenden von Aggregations-Datentypen ist es zudem

möglich, Relationen zwischen multiplen Entitäten gleichzeitig deklarieren zu können.

Zunächst wurde versucht, Informationsmodelle, die aus unterschiedlichen Gewerken kommen, zu integrieren, bis aufgrund der Diskrepanzen, die zwischen den Detaillierungsgrad der Datenmodelle lagen, das Konzept der Applikationsprotokolle (APs) hinzugefügt wurde.

Hier kann für jeden Anwendungsbereich explizit definiert werden, welche Informationen in welchem Umfang benötigt werden, um einen eindeutigen Austausch von Modelldaten gewährleisten zu können. So beschreibt AP 214 zum Beispiel Anforderungen an Modelldaten aus der mechanischen Konstruktion in der Automobilindustrie und AP 218 an Modelle für die Schiffskonstruktion.

Die Anforderungen an STEP als allgemeingültige Ressource, die eine weite Bandbreite von Industrien überspannt und somit industrie-übergreifende Kollaboration ermöglicht, war ein ehrgeiziges Ziel, welches einige Vorteile mit sich bringen würde, allerdings auch zur Folge hatte, dass einzelne Industrien aufgrund von empfundener Schwermütigkeit des Standardisierungsprozesses damit begannen, eigene Standardisierungen zu entwickeln (TOLMAN, 1999). Angetrieben durch die damals florierende Bauindustrie und die hier aufkommenden Marktanforderungen schlossen sich 1995 eine Gruppe von Ingenieurbüros, Baufirmen und Softwarehersteller aus den USA zur „International Alliance of Interoperability (AIA)“ zusammen, um die Möglichkeit zu untersuchen, einen offenen Standard für verstärkte Interoperabilität im Baugewerbe zu entwickeln (BAZJANAC, 1997). Das Konsortium, welches sich 2005 zu „buildingSMART“ umtaufte, ist weltweit in 20 Regionalverbände aufgeteilt und zählt international mehr als 800 Firmen, Institute und Organisationen zu seinen Mitgliedern.

Ziel von buildingSMART ist es, offene, internationale Standards zu entwickeln, die das Entwerfen, das Erbauen, den Betrieb und die Wartung von Gebäuden transformieren (Anon., 2020b). Im Zuge dessen wurde 1997 erstmalig eine Sammlung von Standards als erste Version der IFC herausgebracht.

Die IFC beschreiben ein offenes standardisiertes und herstellerneutrales Dateiformat für den Austausch von digitalen Gebäudeinformationsmodellen und wurden 2013 als erste stabile Version unter

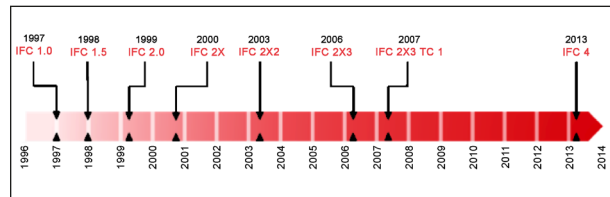


Bild 6: Die Geschichte der IFC nach (BORRMANN et al., 2018)

ISO 16739 standardisiert und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt (Bild 6).

Das Datenformat basiert auf der Modellierungssprache EXPRESS. IFC dient zum Austausch von Gebäudeinformationsmodellen und etabliert sich als leistungsstarker und effizienter Standard für den Austausch objektorientierter Gebäudemodelle. Die Struktur der IFC besteht aus mehr als 700 Klassen, die inhaltlich klar beschrieben und hierarchisch durch Vererbungsbeziehungen und Beziehungen zu anderen Klassen strukturiert sind. Das objektbasierte IFC-Datenmodell ist in vier Ebenen unterteilt. Die Klassen sind in einem zusammengesetzten Muster strukturiert, sodass Elemente der oberen Ebenen auf die Elemente der unteren Ebenen verweisen, aber nicht umgekehrt. Diese unidirektionale Vererbung gewährleistet die Unabhängigkeit der Kernelemente. Die spezifischen Elemente werden im IFC-Datenmodell nach Entitäten, Funktionen, Regeln, Attributen und Beziehungen kategorisiert. Darüber hinaus gibt es Mengensätze und Eigenschaftslisten, mit deren Hilfe weitere Eigenschaftssätze modular und entitätenspezifisch definiert werden können. Diese Eigenschaftssätze sind teilweise in den Basisklassen vorgegeben.

Dadurch können die einzelnen Klassen über grundlegende Eigenschaften und projektspezifische Eigenschaftssätze flexibel definiert und erweitert werden. Dies geschieht durch die Zuweisung eines einfachen Namen-Werte-Tupels, z. B.: „Name: ‚ServiceLife‘; Wert ‚20‘; Datentyp: ‚IfcReal‘. Diese Eigenschaften können in einem PropertySet gesammelt und über eine IfcRelDefinesByProperties-Beziehung zu einem Element angefügt werden.

Ein weiteres Feature der IFC ist die Bereitstellung von Model View Definitions (MVD), um die Teilmengen eines Gesamtmodells zu definieren, die relevant sind, um fachspezifische Austauschforderungen zu erfüllen. So kann der Import und Export von Teilmodellen ermöglicht werden, um die zu übertragende Datenmenge zu reduzieren. Dies ermöglicht auch das gleichzeitige Arbeiten verschie-

dener Gewerke an ihren jeweiligen Teilmodellen. Die von der buildingSMART veröffentlichten MVDs können als eine Art Pflichtenheft für die Implementierung einer IFC-Schnittstelle angesehen werden und dienen in der Regel für BIM-Softwareanwendungen als Vorlage für die Import- und Exportfunktionen (Anon., 2020c).

Weiterentwicklung IFC

Das IFC-Datenformat wird konstant überarbeitet und weiterentwickelt. Um die Herstellerneutralität gewährleisten zu können, werden Erweiterungen, die sich häufig aus nationalen Initiativen ergeben, zunächst auf ihre Anwendbarkeit und ihre Kompatibilität mit bereits eingeführten und validierten Funktionen und Strukturen überprüft. Ein Expertenrat von internationaler Besetzung ist für die Bewertung der Entwicklung zuständig, damit die von der buildingSMART herausgegebenen IFC-Version weiterhin dem ISO-Standard entsprechen. Hierbei ist der Expertenrat dafür verantwortlich, Zwischenergebnisse der Weiterentwicklungen des Formates vorzustellen und Verbesserungsvorschläge umzusetzen. Sobald diese Optimierungen eingearbeitet sind, kann die Erweiterung des IFC-Formates durch das CENT/TC 442 BIM-Komitee zu einem ISO-Standard erklärt und in europäische und nationale Normen integriert werden.

Bis zur Version IFC4 lag der Fokus des Standards vor allem auf dem Anwendungsbereich des Lebenszyklus von Gebäuden. Dieser Bereich deckt nur einen Teil der Baubranche und des BIM-Anwenderkreises ab, zunehmend wird der Bereich der Infrastruktur untersucht und die Integration von Infrastrukturdaten in die IFC international gefordert. Um den Anforderungen gerecht zu werden, wurde 2013 der „Infra Raum“ als eine Unterabteilung zu buildingSMART International (bSI) gegründet (BORRMANN et al., 2019). Durch den Infra Raum wurde eine Roadmap für die Entwicklung von Infrastrukturerweiterungen für die IFC aufgestellt.

IFC-Alignment

Um die Beschreibung von linearen Infrastrukturbauwerken zu ermöglichen, wurde zunächst das Projekt IFC-Alignment erstellt. Hier konnte ein Ausgangspunkt für das Projekt IFC Infra Overall Architecture erarbeitet werden, um allgemeine Grundlagen festlegen zu können, die von allen weiteren Infrastrukturerweiterungen befolgt werden müssen. Aufbau-

end auf dieser gemeinsamen Basis wurden die Projekte IFC-Bridge, IFC-Rail und IFC-Road gestartet um Bauvorhaben aus den Infrastrukturbereichen Brückenbau, Schienenbau und Straßenbau mithilfe des IFC-Datenformates durchführen zu können (MARKIČ, 2017). Für das Projekt IFC-Tunnel sind bereits Grundlagen entstanden, jedoch gibt es bisher kein offizielles nationales bzw. internationales Projekt zur Erweiterung von IFC für Tunnelbauwerke (Anon., 2020d).

IFC-Bridge

Das IFC-Bridge Projekt wurde, nach intensiver Vorarbeit, im Februar 2017 von bSI gestartet und als Reaktion auf die dringende Forderung internationaler Infrastrukturbeteiligter nach einer Erweiterung der IFC für Brücken als Fast-Track-Projekt innerhalb von zwei Jahren beendet (BORRMANN et al., 2019). Die Grundlagen von IFC-Bridge lassen sich jedoch auf Bemühungen des französischen buildingSMART chapters der AIA (FERRIES, 2001) sowie auf die Arbeit japanischer Experten zurückführen, die parallel an einer Erweiterung des IFC-Modells arbeiteten (YABUKI and SHITANI, 2003). Diese parallel erarbeiteten Erweiterungen wurden zwar in einer späteren Arbeit zusammengefügt (LEBE-GUE et al., 2007), der vorgeschlagene Standardentwurf wurde jedoch nie vom bSI übernommen oder von den Softwareanbietern implementiert.

Das 2017 gestartete IFC-Bridge Projekt fokussierte sich aufgrund der Bearbeitungszeit von nur zwei Jahren darauf, den meisten Nutzen für zukünftige Anwender zu erzielen (BORRMANN et al., 2019) und bemühte sich gleichzeitig darum, den allgemeinen Grundsätzen der Erweiterung von IFC, wie zum Beispiel das Neuerstellen von Klassen zu minimieren, gerecht zu werden.

Im Rahmen des Projektes konnten die Voraussetzungen erfüllt werden, um basierend auf einer Bedarfsanalyse die weltweit am meisten verbreiteten Brücken darzustellen. Folgende Brückentypen konnten in dem IFC-Bridge Projekt berücksichtigt werden:

- Plattenbrücke
- Balkenbrücke
- Plattenbalkenbrücken
- Kastenträgerbrücke
- Rahmenbrücke

- Integrale Brücken
- Durchlass (Dole)

Obwohl folgende Brücken nicht explizit betrachtet wurden, kann davon ausgegangen werden, dass auch sie vollständig durch die IFC-Bridge Erweiterung abgebildet werden können:

- Fachwerkbrücke
- Bogenbrücke
- Freitragende Brücke
- Schrägseilbrücke
- Hängebrücke

Anhand von umfangreichen Analysen konnte das Projektteam Anwendungsfälle ermitteln, die von der Erweiterung unterstützt werden sollten. Sowie Anwendungsfälle, die aufgrund von zu hoher Komplexität den Rahmen des Projektes überschritten. Anhand dieser Anwendungsfälle und durch die Beratung eines Expertengremiums konnten alle notwendigen Anforderungen an die IFC Erweiterung ermittelt werden.

Um die Komplexität der Implementierung des Datenmodells zu verringern, wurde beschlossen, die Anwendungsfälle folgenden grundlegenden MVDs zuzuordnen:

- Bridge Reference View (Bridge RV)
- Alignment-based Bridge Reference View (Bridge ARV)
- Bridge Design Transfer View (Bridge DTV)
- Bridge Asset Management Handover View (Bridge AMV)

Nach der erfolgreichen Durchführung eines Bereitstellungsprojekts, bei dem interessierte Softwareanbieter eingeladen wurden, um sich an einer frühzeitigen Umsetzung der Erweiterung zu beteiligen, ist die Erweiterung den offiziellen bSI-Adoptionsprozess durchlaufen und seit der Version IFC4.2 offizieller Teil des IFC-Datenformats (Anon., 2020e).

BIM Collaboration Format (BCF)

Bei den Arbeiten von unterschiedlichen Parteien an einem Datenmodell kann es bei der Zusammenführung der Gewerkemodelle zu Kollisionen im Datenmodell oder anderweitigen Problemen, sogenann-

ten Issues kommen, die von einem der Gewerke gelöst werden müssen. Um diese Issues softwareübergreifend aufnehmen, teilen und lösen zu können, wurde 2013 das Dateiformat BIM Collaboration Format (BCF) von SOLIBRI und TEKLA zusammen mit dem Institut für Angewandte Gebäudeinformatik (iabi) an der Fachhochschule München entwickelt und später von buildingSMART als offener Standard adaptiert (Anon., 2020f). Mit ihm ist es möglich, modellbasierte Probleme miteinander durch Nutzung von IFC-Modellen, die zuvor von Projektmitarbeitern gemeinsam genutzt wurden, zu teilen. Dies kann mithilfe eines Dateiaustauschs zwischen Softwareplattformen oder mithilfe eines RESTful-Dienstes, ein Programmierparadigma für verteilte Systeme, insbesondere für Webservices, erfolgen, welcher Softwareplattformen direkt oder mit einem dedizierten BCF-Server eines Drittanbieters verbindet. Durch das Speichern in einem offenen Dateiformat können Ansichtspunkte, ausgewählte Bauteile, Kommentare und Screenshots in jeder Modellierungssoftware verwendet werden und führen den Betrachter direkt an die Position des Issues.

Durch die Benutzung von BCFs kann eine Reihe von Anwendungsfällen, bei denen Informationen aus dem Modell abgeleitet und objektspezifische wieder angehängt werden, von BCF-fähigen Workflows profitieren. Ein Anwendungsfall ist zum Beispiel die Kollisionsprüfung beim Zusammenführen der Teilmodelle der einzelnen Gewerke.

Semantic Web und BIM

Linked Data Technologien bieten die Möglichkeit, Zusammenhänge eines beliebigen Themenbereiches formal zu beschreiben und aus diesen logischen Zusammenhängen andere Zusammenhänge zu implizieren. „Ein Gebäude hat Türen“ und „Ein Krankenhaus ist ein Gebäude“ impliziert die Aussage „Ein Krankenhaus hat Türen“. Solche sogenannten Tripel werden mit dem auf XML basierenden Resource Description Framework (Anon., 2020g) als eine Ontologie (ein gerichteter Graph) definiert. Die Ableitung von logischen Zusammenhängen aus einer Ontologie erfolgt mit der RDF-erweiternden Web Ontology Language (Anon., 2020h).

Diese Werkzeuge können genutzt werden, um eine allgemeintaugliche Logik zur Erstellung von Modellen, so auch Bauwerksinformationsmodellen, bereitzustellen. Genau diese Idee wird mit der Be-

zeichnung ifcOWL umgesetzt, wobei von (BEETZ, VAN LEEUWEN and DE VRIES, 2009) die Grundlagen geschaffen wurden, indem IFC-Schema von EXPRESS nach OWL übersetzt wurde. Heute wird das Projekt durch buildingSmart standardisiert (Anon., 2020i), sodass eine schwellenlose Verknüpfung verschiedenster Daten mit einem Bauwerksinformationsmodell ermöglicht werden soll.

Eine umfassendere Übersicht der Entwicklungen im Bereich des Semantic Web im Bauwesen bis 2017 wurde von (PAUWELS, ZHANG and LEE, 2017) veröffentlicht.

Neben der als Entwurf vorhandenen IFC-Schemawerweiterung für Brücken (IFC Bridge) wurde von (KOZAK und HAMDAN, 2019) eine Ontologie zur Beschreibung eines Brückenmodells entwickelt. Dabei wurde die Ontologie zwecks Geometriezugriff mit dem IFC-Modell einer Brücke in einem Multimodell-Container gespeichert. Außerdem wurden Eigenschaften in Anlehnung an DIN 1076 zur Bauwerksprüfung definiert, sodass das entwickelte Konzept als Grundlage für eine Datenbank einer Brückenprüfung, etwa mit SIB-Bauwerke, genutzt werden könnte. Die Validität des Modells wurde mit SPARQL-Abfragen geprüft.

Eine Ontologie rein für Instandhaltungsinformationen von Brücken wurde von (REN, DING and LI, 2019) entwickelt. Zusätzlich werden Regeln mittels Semantic Web Rule Language definiert, mit denen erste automatische Bewertungen von Schäden ermöglicht werden, die das Potenzial haben, einen Brückenprüfer in seiner Arbeit zu unterstützen.

Außerdem wurde von (WERBROUCK et al., 2019) ein CDE-Prototyp basierend auf einem Social Linked Data Ökosystem entwickelt. Trotz der Diskrepanz zwischen den beiden Themenbereichen erkennen die Autoren diverse Übereinstimmungen der Datenanforderungen, die durch die versprochene hohe Interoperabilität von Linked Data Technologien ausgenutzt werden können. Der dezentralisierte Ansatz des Prototypens folgt dabei der Idee, Daten (also Projektdaten der ohnehin dezentral arbeitenden Projektteilnehmer) von Anwendungen zu trennen und damit die Idee des Big Open BIM voranzutreiben.

2.1.4 BIM im Bestand

Grundsätzlich ist die Nutzung von BIM nicht nur eine geeignete Methode bei der Neuplanung von

Projekten, um deren Lebenszyklus abzubilden und zu verfolgen, sondern auch eine geeignete Methode für das Bauen im Bestand oder die Bewirtschaftung von Bauwerken.

In der Baubranche ist das Bauen im Bestand immer bedeutsamer geworden. Hierbei werden den Planern immer häufiger besondere Anforderungen an die Planung und Bauausführung gestellt. Wesentlicher Bestandteil zum Bauen im Bestand sind Abbruch, bauliche Veränderungen, Instandhaltung und Modernisierung bzw. Sanierung. Im Wesentlichen werden hierbei drei unterschiedliche Zustände betrachtet (ENTZIAN and SCHARMANN, 2015):

- Neubau: Neubau bzw. Erneuerung von Bauteilen
- Bestand: Beibehaltung des Bestandes
- Abbruch: Abbruch von vorhanden Bauteilen

Dies bedeutet, dass bei der Methode BIM alle drei Zustände in einem 3D-Modell unter Berücksichtigung der DIN ISO 7518 dargestellt werden müssen. In der DIN ISO 7518 werden die Darstellung der Zustände in der 2D-Planung geregelt. Um diese drei Zustände in einem Modell zu beschreiben, ist es notwendig, zunächst den Bestand zu modellieren. Im nächsten Schritt müssen alle Abbruchelemente modelliert werden und dementsprechend im Zustand beschrieben werden. Das gleiche gilt für neu zu bauenden Elementen. Wird die DIN ISO 7518 und die Bauvorlageverordnung (GVBI 2010) berücksichtigt, werden die Bauteilelemente dementsprechend in den 2D Planung angezeigt (ENTZIAN and SCHARMANN, 2015). Durch dieses Vorgehen können bei Abbrucharbeiten die Bauteile nachvollziehbar mit der richtigen Qualität und Menge dokumentiert werden. Auf dieser Grundlage kann im weiteren Schritt nachvollziehbar kalkuliert und eben abgerechnet werden (ENTZIAN and SCHARMANN, 2015).

Bei der Bewirtschaftung von Bauwerken mit der BIM-Methode greift man nach der Bauausführung auf das Modell zurück. Dieses erhält der Betreiber nach Errichtung des Bauwerks. Bei der nachträglichen Erstellung eines Modells kann ein digitales Aufmaß mittels 3D-Laserscanning eine Möglichkeit sein. Durch die Vermessung eines Bauwerks mittels Laserscanning wird eine Punktwolke erzeugt, die die Objekte eines Bauwerkes wiedergibt (DONATH, 2009). Durch die Punktwolke ist es unter anderem möglich Rückschlüsse auf Bauteildimensionen,

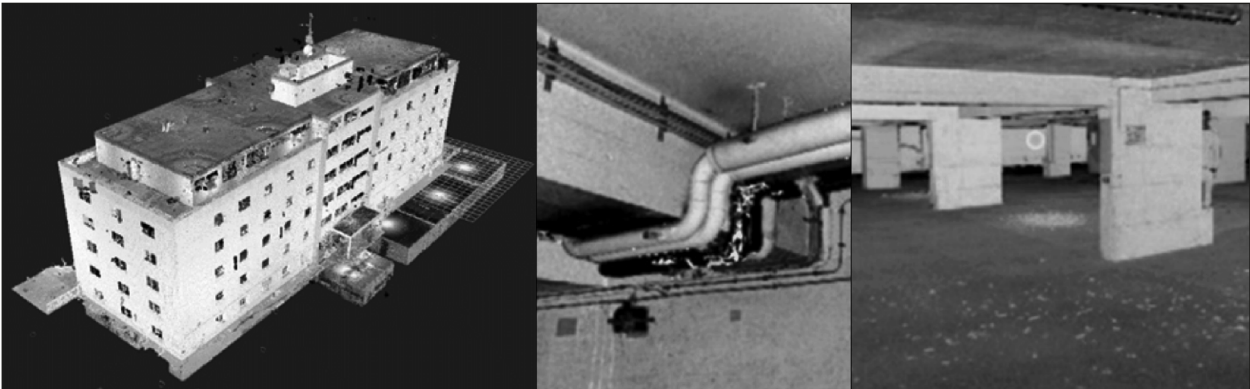


Bild 7: Digitales Aufmaß einer Punktwolke

Raumgrößen oder Öffnungsmaße zu ziehen. Nicht nur bautechnische Themen können durch eine Punktwolke erkannt werden, sondern auch offenliegende Trassenführungen können so jederzeit nachverfolgt werden. Ebenso wie für Umbau- und Sanierungsarbeiten kann das Bestandsmodell auch zu Wartungszwecken weiter genutzt werden (ENTZIAN, 2015). Durch den Einsatz der geeigneten Software können Bestandsmodelle genutzt werden, um Bauwerke ingenieurtechnisch instandzuhalten oder zur Bestandsverwaltung baulicher Anlagen. Außerdem ist es möglich, Bauwerksbücher digital zu verwalten und gegebenenfalls zu bearbeiten (RÜPPEL, 1997).

2.1.5 BIM im Brückenbau

Brückenbauprojekte profitieren durch die Kombination von Geländemodell (auf Basis von GIS-Informationen), Trassierung und parametrischem Entwurf besonders von der BIM-Methode (GÜNTNER und BORRMANN, 2011). Beispiel dafür ist die notwendige Anpassung des oft sehr individuellen, da gekrümmten oder geneigten, Überbaus der Brücke infolge von Änderungen der Trassierung. Der Überbau kann daraufhin der Trassierung mit minimalem Aufwand angeglichen werden (HOCHMUTH, 2017).

Mit der Einführung des Stufenplans für Digitales Planen und Bauen durch das BMVI (BMVI, 2015c) zur Förderung und zum Vorantreiben der Umsetzung von BIM wurde zunächst speziell der Infrastrukturbereich berücksichtigt, in dem ab Ende 2020 alle neu zu planenden Infrastrukturprojekte mit BIM-Leistungsniveau 1 umgesetzt werden.

Im Rahmen des Stufenplans Digitales Planen und Bauen, der primär die Einführung von BIM im Infrastrukturbereich vorantreiben soll, wurden mehrere

Pilotprojekte durchgeführt, die unter anderem neu zu bauende oder Bestandsbrücken enthielten. Neu geplant wurde etwa die Talbrücke Auenbach, bei der die Verwendung von BIM Grundlage für eine verbesserte Koordination, Kommunikation und speziell modellgestützte Mengenermittlung für Kostenschätzungen war. Dies ermöglichte unter anderem eine Kostenoptimierung des Projekts anhand einer Variantenstudie (KÖNIG, BORRMANN und AMANN, 2017). Im Bereich der Bestandsbrücken wurde eine speziellere Umsetzung untersucht. Die Sanierung einer Bogenbrücke an der Inneren Kanalstraße in Köln erfolgte auf Basis von BIM und einer ausführlichen Bestandsaufnahme. Auf Basis dieser Daten wurde eine Schalungsform entwickelt, die für die Betonarbeiten an allen Bögen verwendet werden konnte (HOCHMUTH, 2017).

Außerhalb der Pilotprojekte wurde für den Bereich der Instandhaltung von Bestandsbrücken die Verwendung von BIM betrachtet. SINGER und BORRMANN (2017) untersuchten dabei grundlegend, inwieweit die Verwendung von BIM zu diesem Zweck überhaupt geeignet ist. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte dieser Studie beschrieben.

Ein Aspekt ist die Untersuchung der Möglichkeiten des BIM-Konzepts, erforderliche Informationen im Modell abzubilden. Hieraus ergibt sich, dass zum einen die Geometrie aller Bauteile im Modell ausreichend genau ist, sodass Schäden und andere Informationen der Instandhaltung verortet werden können. Zum anderen ermöglichen die semantischen Informationen des Modells die Klassifizierung von Bauteilen, die Strukturierung von Bauteilgruppen (z. B. als Bauwerksstruktur) und die Erweiterung dieser Informationen, etwa durch erforderliche Informationen des Erhaltungsmanagements gemäß ASB-ING (BASt, 2020), welche als Grundlage des Programms SIB-Bauwerke dient.

Außerdem wurde in der Studie die Bedeutung eines ISO-normierten Dateiformats wie IFC mit den Möglichkeiten zur Modellierung der geometrischen, topologischen und semantischen Informationen hervorgehoben. In Ermangelung einer brückenspezifischen IFC-Erweiterung des sonst hochbau-zentrischen Formats wurden eigene Erweiterungen über IfcProxy-Entitäten (generische IFC-Objekte) und PropertySets (Attributlisten) umgesetzt. Auf Grundlage der PropertySets wurden in dieser Studie auf Basis von Anforderungen durch die BAST Attributkataloge für das Erhaltungsmanagement von Brücken erstellt. Diese Attributkataloge können als Grundlage für Informationsanforderungen des Betreibers verwendet werden.

Als besondere Herausforderung wird die Verarbeitung und Überführung von analog vorliegenden Bauwerksinformationen in das digitale Brückenmodell genannt. Dabei werden zwei Möglichkeiten beschrieben, Informationen im Modell zu ergänzen. Zum einen die Erzeugung einer Punktwolke des realen Bauwerks zur Ableitung der Modellgeometrie und dazu die Ergänzung semantischer Informationen auf manuellem oder halbautomatischem Weg, wobei das Vorhandensein der Informationen in der Software SIB-Bauwerke (siehe nächstes Kapitel) und der Attributkataloge die Ergänzung deutlich beschleunigen könnte. Zum anderen wird im Fall von Standardbrücken die Verwendung von parametrischen Brückenmodellen empfohlen, welche mit geringem Aufwand an die Dimensionierungen des realen Bauwerks angepasst werden können und so eine ausreichend genaue Repräsentation bilden.

Abschließend wird die Einschätzung abgegeben, dass die Verwendung von Bauwerksinformationsmodellen gut für das Erhaltungsmanagement von Brücken geeignet ist, welches die Datenerfassung, Zustandsbewertung und Instandsetzungsplanung umfasst (SINGER and BORRMANN, 2017).

2.1.6 Brückeninspektion mit SIB-Bauwerke

Im Bereich Erfassung und Verwaltung von Bauwerksdaten im Bereich der Verkehrsinfrastruktur (z. B. Brückenbauwerke) in Deutschland wird die Software SIB-Bauwerke verwendet. Sie ist die datentechnische Umsetzung der ASB-ING (Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten) (BAST, 2020). Die Software dient als Hilfsmittel zur Bauwerksverwaltung und -prüfung und wird für Bundesstraßen und Bundeswasser-

straßen vorgeschrieben und für Landesstraßen empfohlen.

SIB-Bauwerke wurde in seiner ersten Fassung von WPM-Ingenieure entwickelt und ist aktuell (Stand 15.05.2020) in der Version 1.93.2 verfügbar (Anon., 2020j).

Mit SIB-Bauwerke erfolgt die Erfassung, Verwaltung und Auswertung der Bauwerksdaten über eine dialogbasierte Abfrage und anschließender Plausibilitätskontrolle der Eingaben. Die Bauwerksdaten werden lokal erzeugt und verarbeitet und nach Abschluss der Bearbeitung an die zentrale relationale Datenbank (Microsoft SQL-Server 2008) übertragen. Außerdem können Bilder und CAD-Zeichnungen (.dxf- und .dwg-Dateien) gespeichert und eingebunden werden. Entsprechend der ASB-ING-konformen Eingabe ist die Ausgabe in Form von ASB-ING-konformen Berichten möglich.

Die Bauwerksprüfung mit SIB-Bauwerke kann gemäß (Anon., 1999) zur Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Verkehrswegen und der darauf aufbauenden Richtlinie (Anon., 2017) zu Bauwerksprüfungsergebnissen durchgeführt werden. Die Prüfung erfolgt durch die Dokumentation der Einzelschäden, die nach Abschluss der Prüfung automatisch zu einer Gesamtzustandsnote des Bauwerks zusammengeführt werden (Anon., 2020j).

In Bezug auf die Kombination von SIB-Bauwerke mit einer BIM-gestützten Bestandsverwaltung stellen SINGER und BORRMANN fest, dass die Systeme nicht im Widerspruch zueinanderstünden, sondern BIM als Erweiterung der bisherigen Möglichkeiten betrachtet werden könne (SINGER and BORRMANN, 2017: 21).

Im März 2017 wurde die Ausschreibung zur Entwicklung von SIB-Bauwerke 2 bekanntgemacht (Anon., 2020k). Die Anwendung soll web-basiert sein, jedoch sind zum aktuellen Zeitpunkt keine Informationen über den Stand der Entwicklung verfügbar.

2.2 Neue Methoden der Brückeninspektion

In diesem Kapitel wird die Untersuchung neuer Methoden für die Inspektion speziell von Brückenbauwerken betrachtet. Dabei werden für die Bauwerksprüfung neue Möglichkeiten zur Automatisierung

mithilfe von UAVs und Unterstützung durch die Verwendung von AR-Systemen betrachtet.

2.2.1 Nutzung von UAVs

Mit der höheren Verfügbarkeit und Verbreitung von kamerabestückten UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) in den letzten Jahren hat auch die Forschung in diesem Bereich einen Boom erlebt (HAM et al., 2016). Forschungen zu UAV-Nutzung im Bauwesen beschäftigen sich oft mit der Bauüberwachung, im Folgenden wird jedoch nur der Bereich der Brückeninspektion betrachtet.

Von (HAM et al., 2016) wurde ein Literaturüberblick zur visuellen Überwachung von Infrastrukturbauwerken mit UAVs verfasst. Dabei wurde auf verschiedene Möglichkeiten der Verwendung von UAVs Bezug genommen, wie etwa die automatische Klassifizierung von aufgenommenen Schäden, Änderungserkennung wie etwa Verformungen über Zeit und weitere Verarbeitungsmöglichkeiten. Ebenso haben (RAKHA and GORODETSKY, 2018) eine Übersicht zu Drohnenanwendungen im Baubereich erstellt. Des Weiteren sind auch aktuelle Forschungsprojekte mit diesem Thema befasst, wie z. B. (MORGENTHAL et al., 2021).

Weitere Arbeiten beschäftigten sich mit der automatischen Routenplanung, z. B. mit einer BIM-GIS-Kombination (ZOU et al., 2019), für eine autonome Datenerfassung bei einer Brückenprüfung, ohne dass ein menschlicher Pilot erforderlich ist. Die verwendete optische Hardware beschränkt sich bei diesen Arbeiten nicht nur auf das sichtbare Lichtspektrum, auch Infrarotkameras (SOHN, 2019) oder Laserscanner (BOLOURIAN et al., 2017) werden zur Datenermittlung genutzt.

2.2.2 Inspektion mit Augmented Reality (AR)

Die Möglichkeiten der Bauwerksinspektion werden durch AR insofern erweitert, dass die digitale Anzeige weiterhin Orientierung und Interaktion mit der realen Umgebung beibehält (durch ein Kamerabild oder eine nicht-vollständige Überlagerung des Sichtfeldes), diese aber mit Informationen und Darstellungen in einem Grafical User Interface (GUI) anreichert. Dem entgegen ist der Nutzer bei Anwendungen der VR vollständig in einer virtuellen Visualisierung vertieft, welche sich daher nicht für die Untersuchung eines realen Objekts eignet (SALAMAK and JANUSZKA, 2015).

In der Praxis wurde diese Idee von (DANG and SHIM, 2020) in Korea umgesetzt und als Pilotprojekt an einer Schrägseilbrücke getestet. Das System besteht aus einer CDE-Lösung, welches an einem Bürostandort steht, und einem Inspektionssystem, welches vor Ort mit einem mobilen Gerät (auch AR-Brille) verwendet wird. Die CDE-Lösung beinhaltet ein für die Daten der Brückenwartung vorbereitetes Building Information Model, in welches die Daten aus dem Inspektionssystem übertragen und dort verarbeitet werden. Die Autoren konkludieren, dass die Ergebnisse der Entwicklung gutes Potenzial für eine Performancesteigerung der Brückeninspektion hätten.

2.3 Common Data Environment (CDE)

Eine Common Data Environment (deutsch: Gemeinsame Datenumgebung, kurz: CDE) ist eine digitale Kollaborationsplattform und ein integraler Teil eines effizienten Informationsaustausches in einem BIM-basierten Bauprojekt. Im Rahmen des Managements eines solchen Projekts soll sie für die Bereitstellung von Modellen, Dokumenten und anderen Informationen als zentrale Datenplattform zwischen den Projektbeteiligten verwendet werden, wobei sie individuelle Zugriffsrechte, eindeutige Statusangaben und Abläufe für Bereitstellungs- und Prüfprozesse integriert (BORRMANN et al., 2018).

2.3.1 Anforderungen an eine CDE

Die komplexen Anforderungen eines BIM-basierten Bauprojektes bezüglich des Datenaustauschs zwischen den Projektbeteiligten erfordern eine spezielle technische Lösung. Das Konzept einer CDE wird in (Anon., 2019) grundlegend beschrieben.

Basis dieser Lösung ist die zentrale Speicherung aller projektrelevanten Informationen in der CDE und die Verwaltung des Zugriffs auf diese Informationen. Die CDE soll die Verwaltung von Teilmodellen der einzelnen beteiligten Fachplaner unterstützen, da die Verwendung eines einzelnen gemeinsamen Modells zu Problemen führen kann, beispielsweise bei der Verantwortlichkeit für die Korrektheit der eingetragenen Informationen. Weiterhin müssen diese Teilmodelle zu einem Gesamtmodell zusammengeführt werden, um etwa fachübergreifende Modellprüfungen zu ermöglichen. So wird es an dieser Stelle ersichtlich, dass Dateien Statusinformationen und Zugriffsbeschränkungen benötigen, um etwa

bei nicht erfolgter Prüfung dies anzuzeigen und die Verwendung durch andere Projektbeteiligte außer Autor und Prüfer zu beschränken.

2.3.2 Technische Aspekte einer CDE

Kern der CDE ist der Datenspeicher, in welchem alle projektzugehörigen Daten, die über den Lebenszyklus des Projekts (bzw. des Bauwerks) anfallen, gespeichert werden sollen. Der Zugriff auf diese Daten generell soll jederzeit für alle Projektbeteiligten möglich sein. Für diese Anwendung bieten sich zurzeit besonders Cloud-Systeme als grundlegende Infrastruktur an.

Um die potenzielle Masse an Daten, die sich mit fortschreitender technologischer Komplexität im Bereich BIM voraussichtlich noch vergrößern wird, besser zu verarbeiten, müssen Datenstrukturen festgelegt werden, die definieren, welche Daten wann wie und wo gespeichert werden sollen. Dies kann bei Bedarf vertraglich festgehalten werden, etwa in den AIA und präzisiert im BAP.

Die Strukturierung dieser Daten kann dabei auf verschiedenen inhaltlichen Ebenen erfolgen:

- 1) Modelle, Dokumente und Gruppierungen derer,
- 2) Modellelemente und -elementgruppen,
- 3) Elementattribute und Eigenschaftssätze (Property Sets).

Außerdem kann die Strukturierung der Daten auf diesen Ebenen auf Basis verschiedener Kriterien erfolgen, wie etwa:

- Gewerke (z. B. Betonarbeiten, Ausbau)
- Leistungsphasen (z. B. Entwurf, Ausführung, Betrieb)
- Bereiche (z. B. Bau- oder Streckenabschnitte, Stockwerke)
- Systeme (Funktionsgruppen, z. B. Strom- oder Trinkwasserversorgung)

Unabhängig von der Einordnung aller Daten erhalten diese einen einzigartigen Identifikator (z. B. Globally Unique Identifier (GUID)). Damit ist es möglich, bei Bedarf auf diese Daten zu verweisen, anstatt sie zu kopieren. Eine Referenz liefern immer die aktuellen Daten, was bei kopierten Daten nicht gegeben ist, und der Zugriff kann bei größeren Datenobjekten schneller erfolgen.

Um möglichst effektiv eine Datenstruktur zu entwickeln, gilt es, ein passendes Vorgehen zu wählen. In (Anon., 2018a) werden folgende Schritte empfohlen:

- 1) BIM-Anwendungsfälle auswählen und definieren
- 2) Informationen ermitteln, die für diese BIM-Anwendungsfälle benötigt werden
- 3) Datenstruktur anpassen auf Basis von Workflows und Konzepten, die aus der Softwarewahl resultieren
- 4) Definierte Datenstruktur vertraglich festhalten, etwa im BAP, in Modellierungsrichtlinien o. ä.
- 5) Regelmäßig überprüfen, ob die Datenstruktur den veränderlichen Anforderungen des Projekts noch genügt

Abschließend ist zu prüfen, ob die Datenstrukturen, die daraus erfolgen, folgende Kriterien erfüllen:

- Die Detailgenauigkeit von Datensätzen und Objekten muss den BIM-Anwendungsfällen entsprechen.
- Gruppierungen von Datensätzen und Objekten, basierend auf den BIM-Anwendungsfällen, müssen aus der gesamten Datenmenge anhand gewählter Charakteristiken ermittelbar sein, nicht nur anhand von IDs.
- Die Charakteristiken müssen im benötigten Datenformat (Text, Ganzzahl, Boolean etc.) vorliegen.

Um die Strukturierung der Daten effektiv nutzen zu können, ist die Suchfunktion einer CDE mit Möglichkeiten auszustatten, die Daten zu filtern. Die Filterung sollte dabei je nach Strukturierung konfigurierbar sein.

Alle Daten werden an einem Ort gespeichert, der für alle Projektbeteiligten verfügbar sein soll, aber nicht alle Projektbeteiligten sollen alle Teilmodelle bearbeiten können oder nur für den Autor und den Prüfer sollen ungeprüfte neue Modelldaten sichtbar sein, um die Verbreitung falscher Informationen zu vermeiden. Daher benötigt die CDE Zugriffsrechte für verschiedene Rollen innerhalb des Projekts.

Innerhalb ihres Aktionsbereiches in der CDE (und nur dort) sollen die Projektbeteiligten die vertraglich vereinbarten Informationen zum entsprechenden Zeitpunkt liefern. Um diese Lieferanforderungen

festzuhalten, wird im Master Information Delivery Plan (MIDP) aufgelistet, wer was mit welchem Detailgrad wann wem zur Verfügung zu stellen hat.

Die gelieferten Informationen beinhalten auch Änderungen und Erweiterungen bereits vorhandener Informationen in der CDE. Um Zustände zu bestimmten Zeitpunkten zu speichern und Änderungen zur vorherigen Version einer Datei hervorheben zu können, ist die Dateiversionierung Teil einer CDE. Da alle Versionen aller Dateien gespeichert werden und später abgerufen werden können, ist damit auch die Funktionalität einer zentralen Archivierung gegeben.

Ergänzend zu den Zugriffsrechten der Projektbeteiligten wird ein Statusmanagement für Dateien und speziell Modelle verwendet. Dabei kann Dateien der Status „In Arbeit“, „Geteilt“, „Veröffentlicht“ und „Archiviert“ zugewiesen werden.

- „In Arbeit“: beschränkt die Sichtbarkeit und Bearbeitbarkeit auf den Ersteller der Datei
- „Geteilt“: wurde zur Koordination in bestimmten Gruppen von Projektbeteiligten freigegeben
- „Veröffentlicht“: ist zur Weiterverwendung in einer nächsten Phase freigegeben
- „Archiviert“: ist nicht zur Weiterverwendung, sondern nur zur Dokumentation freigegeben

Weitere Status sind je nach Bedarf (etwa für Systemkompatibilität oder zur Sicherheit) hinzuzufügen. Am Ende eines Projektes oder im Betriebsdatenmodell sollen sich nur noch Informationen finden, die entweder den Status „Veröffentlicht“ oder „Archiviert“ haben. Der Status der Dateien wird dabei von den entsprechenden Koordinatoren und in letzter Instanz dem BIM-Manager verwaltet.

Da die Projektdaten alle zentral in der CDE verwaltet werden, ist es naheliegend, auch die Kommunikation zu integrieren. Vorteil dieser Kombination ist es, dass Anmerkungen nun an Dokumente oder Modellelemente geknüpft werden können, wie es etwa mit dem BCF möglich ist. BCF-Dateien enthalten Kommentare, IDs von Modellelementen und Anzeigeeinstellungen für die 3D-Ansicht, sodass Anmerkungen präzise in das Modell integriert und durch den Empfänger ausgewertet werden können.

Teil des Freigabeprozesses eines Modells sind die Qualitätsprüfung und –sicherung, durch welche eine durchgehend hohe, vereinbarte Qualität der

Modelle sichergestellt werden soll. Außerdem ist die Modellkoordination, also die Prüfung kombinierter Teilmodelle, ein wesentlicher Teil der Qualitätsprüfung. Die Zentralisierung und Freigabesteuerung der Informationen in der CDE vereinfacht außerdem die Qualitätssicherung der Informationen.

2.3.3 Softwareangebote für CDEs

Die vermehrte Nachfrage nach Projektumsetzungen mit BIM und damit ein erhöhter Bedarf an Projektmanagementsystemen wie etwa CDE-Softwares hat dafür gesorgt, dass es sowohl national als auch international einige Softwares gibt, die eine CDE bereitstellen können. In Tabelle 5 findet sich eine Liste gängiger Softwares dieses Bereichs, die einen ungefähren Überblick bietet.

Als Alternative zu spezifisch als CDE-Software entwickelten Produkten mit teils sehr hohem Funktionsumfang und Einrichtungsaufwand wird auch ein Blick auf eine leichtgewichtige Lösung geworfen: das BSCW Shared-Workspace-System.

Dieses System ist eine webbasierte Groupware für die effiziente Zusammenarbeit von geografisch verteilten Gruppen. BSCW ermöglicht den Mitgliedern einer Arbeitsgruppe, sich in gemeinsamen Arbeitsbereichen auszutauschen. Das von Fraunhofer FIT entwickelte BSCW-System war 1995 das erste cloudbasierte Kollaborations-Tool mit einem besonders feinen Rechte- und Rollen-Management. Es wurde seitdem kontinuierlich weiterentwickelt und über das Spin-Off OrbiTeam vermarktet. Der Austausch von Dokumenten, Terminen, Kontakten, Aufgaben und Notizen etc. findet in virtuellen, gemeinsamen Arbeitsbereichen statt. Mitglieder einer Arbeitsgruppe können ohne zusätzliche Software-Installation weltweit und zu jeder Zeit auf diese Daten zugreifen. BSCW wird inzwischen weltweit von über einer Million registrierter Anwender genutzt, u. a. in vielen unterschiedlichen Forschungsprojekten auf nationaler und europäischer Ebene. BSCW kommt auch in der Bundesverwaltung (unter Bereitstellung des ITZ Bund) zum Einsatz sowie bei der BAST, um den Modelldatenaustausch mit den Auftragnehmern abzuwickeln (BENTLEY et al., 1997, BENRATH, 2019).

Software	Beschreibung
thinkproject	Cloud-basierte CDE-Plattform (ISO 19650-konform) Serverstandort Deutschland Projekt-, Daten- und Qualitätsmanagement, Kollaboration Anpassbare Plattform mit Programm-Schnittstellen und API (thinkproject Common Data Environments (CDE), 2020)
EPLASS	Cloud-basierte CDE-Plattform (ISO 19650-konform) Serverstandort Deutschland Auf Infrastrukturprojekte spezialisiert Projekt-, Daten- und Qualitätsmanagement, Kollaboration, Automatisierung (Integration der Koordinierungssoftware Desite möglich) (thinkproject Common Data Environments (CDE), 2020)
AutoDesk BIM 360	Zentrale, cloud-basierte Koordinationsplattform Serverstandort Irland (EU) Projekt-, Daten- und Qualitätsmanagement, Kollaboration Optimiert für Autodesk Produkte wie Revit, Anpassbare Plattform mit eigener API (Integriert in Autodesk Forge) (Autodesk BIM 360, 2020)
Nemetschek Allplan BIMplus	Cloud-basierte CDE-Plattform Basisversion kostenlos Projekt-, Daten- und Qualitätsmanagement, Kollaboration (Allplan BIMplus Features, 2020)
Trimble Connect	Cloud-basierte CDE-Plattform Basisversion kostenlos Ausgelegt auf Tekla Software Projekt-, Daten- und Qualitätsmanagement, Kollaboration (Anon., 2020l)
Bentley ProjectWise 365	Zentrale, cloud-basierte CDE-Plattform Basiert auf Projectwise, dessen Funktionsumfang angestrebt ist Projekt-, Daten- und Qualitätsmanagement, Kollaboration (Anon., 2020m)
Nemetschek dRofus	Cloud-basierte CDE-Plattform Englischsprachig Projekt-, Daten- und Qualitätsmanagement, Kollaboration (Anon., 2020n)
Trimble Viewpoint for Projects	Cloud-basierte CDE-Plattform Englischsprachig Projekt-, Daten- und Qualitätsmanagement, Kollaboration, Kommunikation (Anon., 2020o)
Asite	Cloud-basierte CDE-Plattform (ISO 19650-konform) Englischsprachig Projekt-, Daten- und Qualitätsmanagement, Kollaboration, Kommunikation (Anon., 2020p)

Tab. 5: Übersicht über einige aktuell am Markt verfügbare Plattformen mit CDE-Funktionalität

2.3.4 Diverse Forschungsarbeiten zu CDEs

Zusätzlich zu den kommerziellen Fortschritten wurden verschiedene Forschungsarbeiten im Bereich der CDE veröffentlicht, welche Tauglichkeit untersuchen, Schwachstellen des Status quo beleuchten und Lösungen vorschlagen.

So wird etwa von (KLEMT-ALBERT and BAHLAU, 2017) die Tauglichkeit von Bauwerksinformationsmodellen als „Single Source of Truth“ (SSoT) untersucht. Der Begriff SSoT beschreibt eine zentrale Informationsquelle, wie sie etwa für ein in einer CDE verwaltetes Bauprojekt genutzt werden kann. Während die Umsetzbarkeit bejaht wird, wird angemerkt, dass eine ausufernde Pflege des Modells über den Lebenszyklus des Projekts hin zu vermeiden ist. Dies soll durch die Verwendung eines angemessenen Detailgrads der Informationen, entsprechend der Genauigkeit des Planungsstandes, und der adressatengerechten Pflege der Informationen erreicht werden. Zur Umsetzung einer BIM-SSoT wird die Verwendung einer Common Data Environment (CDE) empfohlen.

Durch (PREIDEL et al., 2016) wird kritisiert, dass viele CDE-Plattformen auf die Verarbeitung nativer Dateitypen beschränkt sind. Als Lösungskonzept wird der Prototyp des BIM Integration Frameworks vorgestellt, mit dem die Integration von CDE-Funktionalitäten auf Basis von Allplan BIMplus implementiert werden. Das Framework dient der Integration von CDE-Workflows in verschiedene BIM-Autorensoftware, sodass die Arbeitsweise unabhängig vom Anbieter unterstützt werden kann.

Durch den Einzug von BIM und anschließend daran auch Kollaborations- und CDE-Plattformen in die Öffentliche Verwaltung von Städten und Gemeinden wird von (PARN and EDWARDS, 2019) auf die Gefahren durch Cyberangriffe, krimineller oder auch politischer Natur, hingewiesen, denen sensible Informationen auf einer solche Plattform ausgesetzt sein können. Über die gemeinsame Betrachtung der beiden Themen stellen die Autoren einen Lösungsvorschlag vor, bei dem die Datenvalidierung auf Basis der Block Chain erfolgen soll. Digital verwaltete Bauwerks- und Betriebsdaten sollen so vor Manipulation geschützt werden.

Neben den technischen Umsetzungen sind durch die neuen Technologien jedoch auch Arbeitsweisen nicht mehr sachgemäß und müssen überarbeitet oder ersetzt werden. Dafür entwickelten (KLEMT-ALBERT, HAGEDORN and PULLMANN, 2018) ei-

nen standardisierten Workflow für Informationsmanagement und Kollaboration, welcher in eine CDE implementiert wurde.

Relevante Forschungsarbeiten ergeben sich auch, wenn verschiedene Themenbereiche gemeinsam untersucht werden. So ist dies der Fall bei der Betrachtung von Semantic Web Technologien im Bereich BIM und auch der CDEs.

2.4 VR/AR

In diesem Kapitel zum Stand der Technik zur VR/AR werden die Bereiche der Virtual und Augmented Reality hinsichtlich bestehender Anwendungen und Methoden aus der Wirtschaft und Wissenschaft betrachtet. Zudem wird auf die aktuellen VR- und AR-Hardwarekomponenten eingegangen, welche aktuell auf dem Markt verfügbar sind, wie diese arbeiten und welche Funktionen sie besitzen, um eine gezielte Auswahl und Anwendung im Rahmen des Projektes erarbeiten zu können. Im Weiteren wird aufgezeigt, welche aktuellen 3D-Entwicklungssysteme für die Darstellung von VR- und AR-Anwendungsmethoden auf dem Markt verfügbar sind, um eine zielgerichtete Lösung für die Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen zu erhalten. Abschließend wird eine Synthese erstellt, wie in die VR-/AR-Darstellung die Bauwerks- und Prüfinformationen eingebunden werden und diese dem Bauwerksprüfer in einem Prüfprozess einfach zur Verfügung gestellt werden kann.

2.4.1 Grundlagen VR/AR

Was verbirgt sich hinter den Begriffen AR und VR überhaupt? Genau genommen ist hier zwischen drei Begriffen zu unterscheiden: erweiterte Realität (englisch „Augmented Reality“, kurz: AR), virtuelle Realität (englisch „Virtual Reality“, kurz: VR) und „Mixed Reality“ (kurz: MR). Zur Abgrenzung dieser Formen wurde 1995 von MILGRAM et al. das Reality-Virtuality continuum vorgeschlagen (MILGRAM et al., 1995). Dieses unterteilt das Spektrum zwischen Realität und Virtualität in vier Bereiche: Realität, erweiterte Realität (Augmented Reality), erweiterte Virtualität (Augmented Virtuality) und Virtualität (auch Virtual Reality). Die Übergänge zwischen den Bereichen sind dabei jedoch als fließend anzusehen. Als Überbegriff für alle Mischformen wurde Mixed Reality gewählt. Die Mischform Augmented Virtuality wird im Folgenden nicht näher betrachtet.

Eine weitverbreitete Definition des Begriffs Augmented Reality geht auf AZUMA zurück und beschreibt ein AR-System als „System, das folgende Charakteristika vereint:

1. kombiniert real und virtuell
2. ist interaktiv in Echtzeit
3. ist in drei Dimensionen registriert“
(AZUMA, 1997).

Für Virtual Reality gibt es keine vergleichbare Definition. Hier soll unter VR – in Einklang mit dem Reality-Virtuality Kontinuum nach MILGRAM – eine komplett virtuelle Umgebung verstanden werden, die keine Elemente der realen Umgebung beinhaltet.

Obwohl obige Definition aus 1997 stammt, hat die Entwicklung von AR- und VR-Systemen bereits weit früher begonnen. Erwähnenswert ist in diesem Kontext das von Morton Heilig als multimediales Kino-System entwickelte Sensorama, das er 1962 patentieren ließ (HEILIG, 1962). Hier konnte ein Zuschauer einen Film einer Motorradfahrt durch New York in einer Art abgeschotteten Kabine betrachten und erhielt noch zusätzliche Stimuli, wie beispielsweise Gerüche.

Als eines der ersten Beispiele, in dem auch die Visualisierung von dreidimensionalen Gebäudeinformationen mithilfe eines Head-Mounted-Display (HMD) beschrieben wurde, gilt (SUTHERLAND, 1968). In den 1980er Jahren begann Steve Mann dann mit der Entwicklung von tragbaren Computern, die ein HMD besaßen.

Ebenfalls erwähnenswert ist der 1986 vorgestellte Dataglove, der stellvertretend für neuartige Eingabemethoden zu sehen ist (ZIMMERMAN et al., 1986). An dieser Entwicklung war unter anderem Jaron Lanier beteiligt, der als einer derjenigen gilt, der den Begriff Virtual Reality mitgeprägt haben soll. 1987 beschreibt BROOKS ein VR-System, mit dem eine Live-Anbindung von CAD-Daten möglich ist (BROOKS, 1987). Projekte wie Arthur (BROLL et al., 2004) und Co-Spaces (HINRICHS et al., 2008) zeigen eine gemeinsame Planung mithilfe von AR-Projektionen von Gebäuden am runden Tisch für Architekten und Städteplaner, bzw. die Wartung von Gebäuden mithilfe mobiler AR-Systeme. Der Trend, dass die Geräte immer leistungsfähiger werden, wie ihn Moore in seinem berühmten Moore'schen Gesetz vorhersagte (MOORE, 1965) und damit auch verbunden immer kleinere, mobilere Geräte,

setzte sich auch im Blick auf die VR- und AR-Systeme und die Entwicklung neuer HMDs fort. Ein bekanntes und auch durchaus mit Kritik bedachtes Beispiel ist die 2014 vorgestellte Google Glass¹, die mittlerweile in zweiter, überarbeiteter Version verfügbar ist.

Heutzutage erfreuen sich VR-Systeme immer größerer Beliebtheit. Insbesondere im Spiele-Bereich gibt es einige Angebote für VR-HMDs, u. a. auch für den Heimgebrauch. Beispiele hierfür sind Produkte der Firmen Oculus², Vive³ oder Valve⁴. Auch AR-Software kommt mittlerweile durch die Verbreitung neuer Software-Bibliotheken und -Frameworks auf immer mehr mobilen Endgeräten wie Smartphones an. Beispiele für derartige Bibliotheken und Frameworks sind ARKit⁵ und ARCore⁶, aber auch Vuforia⁷ oder Wikitude⁸. Eine bekannte Anwendung, die 2016 veröffentlicht und für kurze Zeit gehypt und in aller Munde war, ist Pokémon Go⁹. Aber auch in alltäglich verwendeten Anwendungen wie Google Maps erhält AR Einzug (Google, 2019). Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag hat den Stand der Technik sowie die Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen von Virtual und Augmented Reality in seinem Arbeitsbericht Nr. 180 vom April 2019 unter Einbeziehung von Wissenschaft, Medien und Verbänden ausführlich beschrieben und ist dabei u. a. auch auf den Bausektor eingegangen (KIND et al., 2019).

2.4.2 Beispielanwendungen der VR/AR

Für den Baubereich gibt es eine Vielzahl von AR- und VR-Anwendungen, die eine Anbindung an BIM unterstützen. Im Folgenden werden Beispielanwendungen aus Wirtschaft und Forschung präsentiert, welche AR und VR im Baubereich mit BIM-Bezug beinhalten.

¹ <https://www.google.com/glass/start/>

² <https://www.oculus.com/>

³ <https://www.vive.com/>

⁴ <https://www.valvesoftware.com/de/index/headset>

⁵ <https://developer.apple.com/augmented-reality/>

⁶ <https://developers.google.com/ar>

⁷ <https://www.ptc.com/de/products/augmented-reality/vuforia>

⁸ <https://www.wikitude.com/>

⁹ <https://pokemongolive.com/>

Beispiele aus der Wirtschaft

- **Xella wallXpert**

Xella¹⁰, ein Baustoffunternehmen mit Sitz in Duisburg und Eisfeld Ingenieure AG¹¹ haben 2019 im Rahmen ihres Projekts „Vario-wohnen Kassel“ eine AR-Anwendung, „wallXpert“ genannt, für die HoloLens vorgestellt, die Planungen für Wand- und Dachelemente auf der Baustelle visualisiert. Dabei soll die Visualisierung als Grundlage für die durchzuführenden Tätigkeiten, Arbeitsschritte und zur Prüfung verwendet werden (Xella, 2019).

- **Trimble**

Trimble¹² bietet mehrere Mixed Reality Solutions für Bauunternehmen an. So bieten sie unter anderem Software für die zweite Version der HoloLens an oder eigene Hand-Held Geräte, die BIM-3D-Modelle in die reale Welt einblenden. Sie werben mit zentimetergenauer Präzision und verschiedenen BIM-Lösungen. Trimble arbeitet schon seit 1997 an Mixed Reality Technologien im BIM-Bereich.

- **GAMMA**

GAMMA¹³ ist eine für iOS und Android Geräte verfügbare BIM-Baustellenmanagement Software. Es können 3D-Modelle als AR auf die Umgebung projiziert werden sowie Notizen und Voice-Notizen erstellt werden. Alles kann in eine Cloud hochgeladen werden. Hier wird aus der BIM-Datenbank die 2D-Karte geladen und der Bereich markiert, in dem man sich befindet. Mit der Handykamera wird dieser Bereich in der realen Welt markiert und das 3D-Modell daraufhin

aufgebaut. GAMMAAR gibt es seit 2017 und sie haben sich auf Augmented Reality und Construction Site Management spezialisiert.

- **The Wild**

The Wild¹⁴ ist ein Add-in für Revit¹⁵ und BIM 360¹⁶ und bietet den Import von SketchUp¹⁷-Dateien an. Es ist für Präsentationen geeignet. Mehrere User können über PC-Desktop, VR oder AR ein Objekt begutachten, sich darin bewegen und miteinander kommunizieren. Es können Notizen angelegt werden, andere Entwürfe geladen und Änderungen in Echtzeit vorgenommen werden. Die Objekte werden in AR manuell positioniert und über das Tablet vergrößert oder verkleinert. In VR setzt man seinen Avatar an einem bestimmten Punkt oder lässt sich von seinen Kollegen an ihre Position teleportieren.

- **VRcollab**

VRcollab ist eine autarke Softwareplattform, welche BIM Informationen und CAD-Daten sammelt und dem Nutzer über Windows-Desktopanwendungen zur Verfügung stellt. Dabei können eine Vielzahl an BIM- und CAD-Formaten bedient werden, wie Revit, Navisworks, ArchiCAD, Rhino, Sketchup oder das Austauschformat OBJ. Bei dem Ausgabemedium können mehrere Geräte angesprochen werden, wie Desktop-PCs, Touch-Displays, immersive VR-Lösungen bis hin zur CAVE-Darstellung. Änderungen und Anmerkungen können in der Anwendung verzeichnet und dokumentiert werden. Die Plattform soll Nutzern eine schnelle kollaborative Visualisierung erstellter Daten liefern. Eine AR-Anbindung ist in dem Tool nicht möglich.

¹⁰ <https://www.xella.com/>

¹¹ <https://www.e3p.de/>

¹² <https://mixedreality.trimble.com/>

¹³ <https://gamma-ar.com/de/gamma-ar-german/>

¹⁴ <https://thewild.com/>

¹⁵ <https://www.autodesk.de/products/revit/overview>

¹⁶ <https://www.autodesk.com/bim-360/>

¹⁷ <https://www.sketchup.com/>

- **AllVR**

AllVR¹⁸ ist eine VR-Kommunikationsplattform für Architekten und Planer. In der webbasierten Anwendung können die CAD-konstruierten (BIM-) Modelle schnell und einfach für eine Darstellung mittels VR-Brille vorbereitet werden. Die Anwendung lässt hierbei hauptsächlich die Austauschstandards, wie *.fbx, *.ifc, *.obj, ..., für den Import zu. Als Medien zur Darstellung werden sowohl High-End VR-Brillen wie die Oculus Rift oder HTC Vive unterstützt sowie die mobilen Lösungen wie Cardboards oder Samsung GearVR. AllVR ist ein Kollaborationstool, welches die Teilnahme und Synchronisation mehrerer Nutzer gleichzeitig zulässt. Kommentare und Anmerkungen können über die BIM-Schnittstelle eingeblendet werden. Als Zielmarkt werden hier aber vorrangig die Endnutzer angesprochen.

- **IRIS VR**

IRIS VR¹⁹ liefert mit dem Programm „Prospect“ eine kollaborative Anwendung für die Nutzung mit VR-Medien. In der Anwendung können die bekannten nativen CAD-Daten, wie Navisworks, Revit, Rhino, SketchUp sowie Austauschformate, wie FBX und OBJ, importiert werden. Laut Entwickler verfügt die Anwendung über ein automatisiertes Optimierungstool für die Geometrien. Die Darstellung des BIM-Modells kann dabei über alle gängigen VR-Brillen als auch über den Desktop-PC erfolgen. Hinzu kommt die standortübergreifende Nutzung. Im Modell können immersiv Anmerkungen, Veränderungen und Studien vorgenommen werden. Ebenso können externe Gastnutzer ohne Lizenz an dem virtuellen Meeting teilnehmen.

Beispiele aus der Forschung

- **Walkthrough**

Mit Walkthrough veröffentlicht BROOKS 1987 ein Visualisierungssystem, das eine direkte Anbindung an CAD-Daten ermöglicht. Dabei stellt er die Bedeutung eines 6 DoF-Interfaces (ein Interface mit sechs Freiheitsgraden) heraus und geht ebenso auf andere Performancefaktoren und -limitationen, wie z. B. Polygonzahl oder frames per second (fps) ein (BROOKS, 1987).

- **Archeoguide**

Archeoguide ist ein System aus dem Jahr 2002, das für drei verschiedene Endgeräte (Laptop mit VR-Brille, Pen-Book und Palmtop) entwickelt wurde. Es wird dazu genutzt, um Ruinen in AR wieder zu rekonstruieren und somit dem Nutzer eine Tour durch historische Stätten zu ermöglichen. Als Tracking verwenden die Entwickler eine Mischung aus Image-Tracking, Differential GPS (DGPS) und Kompass. Um die genaue Positionierung der 3D-Objekte zu gewährleisten, werden viele Daten mit Bildern der Umgebung benötigt. Das System gleicht diese mit den aktuell aufgenommenen Bildern ab und kann so eine genaue Positionierung des Objektes gewährleisten, egal aus welchem Winkel und Perspektive der Nutzer schaut. Alle Endgeräte mussten sich via WLAN mit dem SIS (Site Information Server), GPS und dem DGPS verbinden. Als Fazit des Papers wurde genannt, dass das HMD (Head-Mounted-Display) und der Palmtop bei den Usern am besten ankam (VLAHAKIS et al., 2002)

- **ARTHUR**

Mit ARTHUR wurde 2004 ein System zur architektonischen und städtebaulichen Planung am runden Tisch vorgestellt. Durch HMDs konnten Nutzer ein Modell einer Stadt betrachten und gemeinsam bearbeiten. Dabei wurde Gestenerkennung als Eingabemethode verwendet. Zudem konnten Simulationen wie diese von Fußgängern am Modell ausgeführt werden. Eine Anbindung an das CAD-System wurde dabei ebenso betrachtet wie die User Experience des Gesamtsystems (BROLL et al., 2004).



Bild 8: Arthur (Foto: Fraunhofer FIT)

¹⁸ <https://www.allvr.net/de/>

¹⁹ <https://irisvr.com/>



Bild 9: CoSpaces (Foto: Fraunhofer FIT)

- **CoSpaces**

CoSpaces wurde 2008 als System zum Umgang mit unvorhersehbaren Ereignissen auf Baustellen vorgestellt. Zentral war in diesem Projekt zum einen die AR Visualisierung von Gebäudedaten, wie beispielsweise Lüftungs- und Heizungsrohren, zum anderen aber auch die Kollaboration mit Experten, die nicht vor Ort sind (Remotekollaboration). Über HMD konnten Mitarbeiter vor Ort sich die Gebäudedaten in einer AR-Visualisierung anzeigen lassen und zusätzlich über ein PDA weitere Informationen abrufen. Hierzu musste das PDA lediglich in die Nähe eines NFC-Tags auf einem Bauteil gebracht werden. Damit wurde gleichzeitig eine Lokalisierung durchgeführt (HINRICHS et al., 2008).

- **VIDENTE**

VIDENTE war ein Projekt des Institute of Computer Graphics and Vision (Österreich), das 2010 vorgestellt wurde. Mithilfe des Geographical Information System (GIS), eines selbstgebauten Handheld und Datenservers konnten Wasserleitungen und Kabel unterhalb der Straßendecke durch eine AR-Visualisierung sichtbar gemacht werden. Das Handheld besaß ein integriertes IMU-Tracking mit Sensorfusion sowie integrierter Korrekturfunktionen, und war zudem mit einem Ultra Mobile Personal Computer (UMPC) verbunden. Letzterer wiederum konnte über WLAN eine Verbindung zu einem Datenserver herstellen, um zur aktuellen GPS-Koordinate passende 3D-Objekte zu laden. Das Tool erlaubte neben Ansichts- und Filterfunktionen auch das Aufnehmen von Snapshots zur späteren Bearbeitung und Auswertung im Büro. Ebenso war es möglich, auch andere Daten geplanter Bauwerke – abseits von unterirdischen Wasserlei-

tungen und Kabel – wie z. B. Mauern zu visualisieren und bei Planungen zu berücksichtigen (SCHALL et al., 2010).

- **AR-Anwendungen mit Drohnen**

In der Forschung gibt es nur wenige Ansätze, die Drohnen in Verbindung mit AR benutzen. Meist werden mit der Drohne Bilder der Umgebung aufgenommen, die anschließend mit den 3D-Objekten angereichert werden. Die User können sich dann dieses Video als Stream ansehen, wie z. B. in (WEN MING-CHANG and KANG SHIH-CHUNG, 2014) oder (RAIMBAUD et al., 2019) gezeigt. Generell gibt es im Zusammenhang mit der Verwendung von Drohnen in Verbindung mit AR folgende Herausforderungen, die es zu berücksichtigen gilt:

- Die Verbindung von der Drohne zum Handheld (Tablet) kann zu schwach sein.
- Der Livestream von der Drohnen Kamera zum Tablet wird nur zeitversetzt (mit einem sogenannten Lag) übertragen. Dadurch ist eine Echtzeitaufnahme nicht wirklich möglich.

Das AR-Tracking ist nicht besonders einfach, da sich die Drohne nicht nur horizontal bewegt, sondern auch vertikal.

- **Outdoor Markerless Tracking mit SLAM**

SLAM – kurz für „Simultaneous Localisation and Mapping“ – bezeichnet ein visuelles Lokalisierungsverfahren, das ursprünglich aus der Robotik stammt. Mehr zu SLAM in Abschnitt Mapping.

MIYAKE et al. zeigen den Einsatz von SLAM im Außenbereich, um ein dreidimensionales, virtuelles Haus auf Grundlage von BIM-Daten, ohne den Einsatz von Markern, auf einem Android Tablet zu projizieren. Hierzu verwenden sie die SLAM-Technologie, die es ermöglicht, anhand bestimmter hinterlegter Referenzpunkte die Position und Orientierung der Kamera zu den Referenzpunkten und somit auch Position und Orientierung des Modells in Bezug zur Kamera zu berechnen. Hierbei ist jedoch ein Scan der Umgebung erforderlich, um eine Lokalisierung vor der Anzeige des Modells durchzuführen. Somit war es möglich, das Haus sowohl von außen als auch von innen zu betrachten. Dieser Ansatz unterscheidet sich von anderen Arbeiten – die typischerweise SLAM im Innenbereich verwenden – vor allem durch den Bezug zum Außenbereich (MIYAKE et al., 2017).



Bild 10: Beispiel einer markerbasierten AR-Visualisierung auf einem Gebäudeplan (aus: RIEDLINGER et al., 2016)

- **Indoor Visualisierungen von BIM-Daten**

Mithilfe von entsprechender Hardware kann auch Indoor eine Visualisierung von BIM-Daten erfolgen. Dies ist zum Beispiel markerbasiert auf Bauplänen, mit einem virtuellen Modell auf einem Tablet oder markerlos mit SLAM-Verfahren möglich. Beispielhaft für diese Kategorie seien hier die Visualisierungen auf dem Google Tango Tablet genannt. Das Google Tango Tablet war ein – mittlerweile nicht mehr unterstütztes – Entwicklergerät von Google, das es über zusätzliche Sensoren wie einer Infrarotkamera ermöglichte, Tiefeninformationen der Umgebung zusätzlich zu visuellen Verfahren zum Tracking zu nutzen. Eine Beschreibung des Tablets und der Visualisierungsmöglichkeiten findet sich in (RIEDLINGER et al., 2016).

- **Virtuell immersives Stadtplanungsmodell**

Das Forschungsprojekt VIS – das virtuell immersive Stadtplanungsmodell – hat das Ziel, Planungsvorhaben und deren Einbindung in die Stadt transparent und verständlich zu vermitteln. Das Forschungsprojekt stellte die Möglichkeit in eine virtuelle Umgebung einzutauchen und die Planung so erlebbar zu machen – für alle Beteiligten von den Planern bis zu den Bürgern. Die Bestandserfassung ermöglicht vollständige 3D-Bauvorlagen für den virtuellen Bauantrag zur Verkürzung der Planungsvorgänge. Kernpunkte des Projektes sind die 3D-Bestandserfassung durch innovative Messverfahren wie das 3D-Laserscanning, die Vor- und Aufbereitung der Daten sowie die Visualisierung von Planung und Bestand. Dabei wurde mittels fotogrammetrischen Punktwolken eine Flächentextur erstellt, woraus eine immersive VR-Umgebung abgeleitet werden kann. Die Ergebnisse konnten detailliert auf einer Desktopanwendung sowie ganz-



Bild 11: Visualisiertes Stadtmodell Köln aus Laserscans (Quelle: HHVISION)

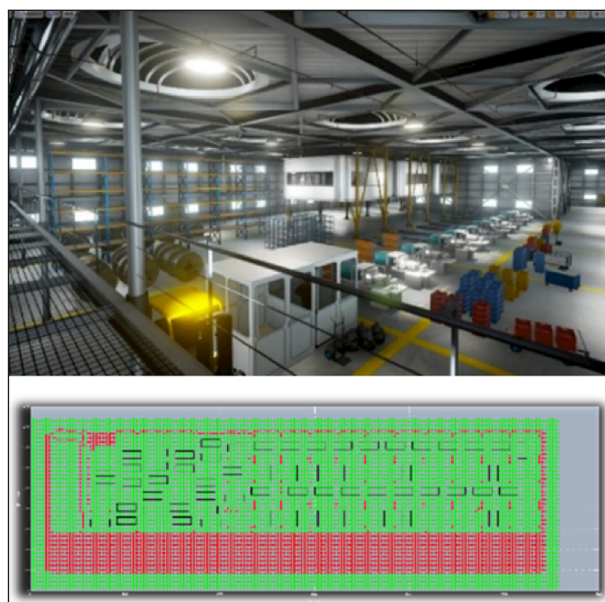


Bild 12: Das Perfect Planning Programm als math. Optimierungstool für ein Layout-Design mit VR-Anbindung (Quelle: HHVISION)

heitlich in einer immersiven Rückflächenprojektion begutachtet werden.

- **Perfect Planning Programm**

Das Ergebnis zur Kopplung von immersiv korrekten Visualisierungen mit Berechnungsalgorithmen in der Layoutplanung ist das Perfect Planning Programm. Mithilfe von mathematischen Verfahren zur Optimierung der Objektposition reduziert sich die aufwendige Visualisierung für die VR-Nutzung ähnlicher Objekte auf ein Minimum und kann nahezu automatisiert erfolgen. Änderungen der Berechnungsparameter werden kollaborativ übermittelt und visuell angepasst. Mit dem Perfect Planning Programm las-

sen sich so schnell und automatisiert Optimierungen in der virtuellen Layoutplanung vornehmen.

- **VR2WEB**

Bei VR2WEB handelt es sich um ein gemeinsames Forschungsprojekt der Unternehmen HHVISION, HOCHTIEF ViCon und der TH Köln aus dem Jahr 2019. Dabei wurde ein Tool zum kollaborativen Arbeiten in der virtuellen Realität erstellt und untersucht. Als Untersuchungsobjekt diente hierbei ein industrielles Gebäude, dessen Modell als BIM-gestütztes CAD-Modell vorlag. Dieses wurde in der Unreal-Engine so dargestellt, dass sich mehrere Nutzer gleichzeitig darin bewegen, mit dem Modell interagieren und miteinander kommunizieren konnten. Die Kommunikation erfolgte über verschiedene Werkzeuge, die über Maus und Tastatur oder im Falle der Nutzung einer VR-Brille über die dazugehörigen Controller bedienbar waren. Zu diesen Tools gehörten unter anderem das Auslesen von BIM-Daten aus dem Modell, das Messen von Abständen im Modell, das Ein- und Ausblenden von Objekten sowie das Speichern von Bildern aus der aktuellen Sicht heraus.

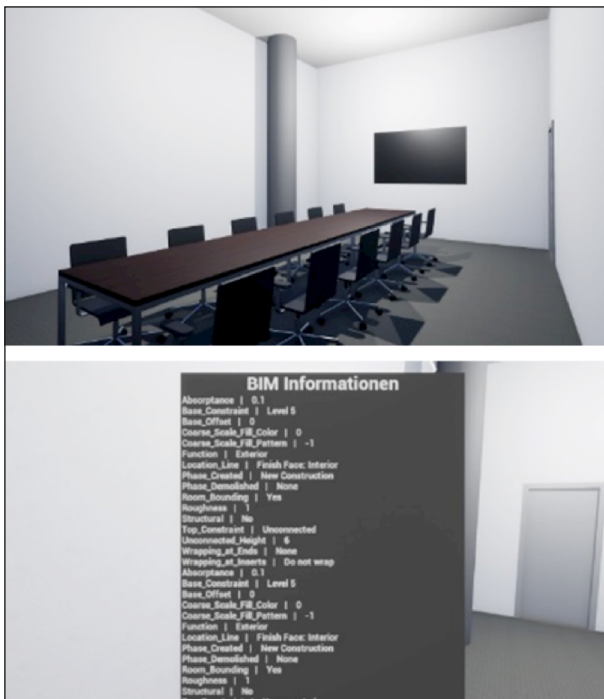


Bild 13: BIM-gestütztes CAD-Modell in der Unreal-Engine mit Darstellung der BIM-Daten eines Teilmodells (Quelle: HHVISION)

- **Virtuelle Realität zur Verbesserung der Ausbildung zum Bauingenieur**

In der Studie der Pennsylvania State University (MESSNER et al., 2003) wurde untersucht, inwieweit die virtuelle Realität mittels 4D-CAD-Modell (3D-Modell plus Zeit) innerhalb der Ausbildung den Prozess verbessert. Hierzu wurden immersive VR-Tools, wie eine CAVE, für die Untersuchungen in der Studie verwendet, um die Verbesserung der Ausbildung sowie den pädagogischen Mehrwert zu analysieren. Ebenfalls wurde dabei die Verbesserung des Verständnisses für das Bauingenieurwesen durch den VR-Einsatz untersucht. Das Ergebnis der Studie zeigt, dass die Studierenden komplexe Systeme, die im Bau verwendeten Methoden und Anwendungen im virtuellen System schnell verstehen konnten. Hier wurden explizit die Verrohrung und Installation von Kühl- und Lüftungsanlagen in der Studie verwendet. Die Studierenden arbeiteten dabei in einer immersiven Umgebung, in der sie ein detailliertes Verständnis für komplexe Design- und Bauentscheidungsprozesse erfuhren.

2.4.3 Authoring-Ansätze

Der Ansatz, Autorenwerkzeuge – also Werkzeuge zur Unterstützung der Erzeugung von Inhalten – zu verwenden, ist keinesfalls neu. Entsprechende Authoring-Ansätze zeigen LOCATIS und AL-NUAIM in ihrem Review aus dem Jahre 1999 bereits aus dem Bereich multimedialer Technologie (LOCATIS and AL-NUAIM, 1999). FISHER beschreibt dann ein Autorenwerkzeug für Mixed Reality Anwendungen (FISHER, 2003). WANG et al. legen in ihrem Ansatz den Fokus auf mobile AR Anwendungen (WANG et al., 2009). Mit dem Projekt TOTEM (Theories and Tools for Distributed Authoring of Mobile Mixed Reality Games)²⁰ wurden bei Fraunhofer FIT ebenfalls Autorenwerkzeuge implementiert, die wiederum ihren Fokus auf ortsbasierte Spiele legten (WETZEL et al., 2012). Allen vorher erwähnten Lösungen ist das Ziel gemein, Werkzeuge zur Erstellung von AR-Anwendungen – sei es mit oder ohne Ortsbezug – zu unterstützen und diese auch Zielgruppen ohne entsprechende Programmierkenntnisse oder technischem Knowhow zur Verfügung zu stellen. Auch

²⁰ <http://totem-games.org/>

für VR-Anwendungen gibt es entsprechende Autorenwerkzeuge, so z. B. im Lernbereich (HORST and DÖRNER, 2019) oder für Museen (WOJCIECHOWSKI et al., 2004). Mit Bezug auf BIM gibt es bisher keine Ansätze zur Verwendung von Autorenwerkzeugen. Dabei könnte durch solche Werkzeuge der Workflow zur Erzeugung und Wiederverwendung von MR-Visualisierungen und entsprechenden Interaktionen mit entsprechenden BIM-Daten unterstützt und vereinfacht werden.

2.4.4 Technologien von VR und AR

Die folgenden Unterkapitel beleuchten VR- und AR-Systeme aus der technologischen Sicht. Dabei werden die unterschiedlichen Funktionsweisen und Arbeitsmethoden sowie die dazugehörigen Softwaresysteme analysiert.

2.4.4.1 Hardware

In AR und VR bestehen eine Vielzahl von Eingabe- und Ausgabemöglichkeiten. Dieses Kapitel beschreibt die verschiedenen Geräteklassen, die dies ermöglichen, aus Sicht der Hardwareebene.

Mixed und Augmented Reality

Die folgende Betrachtung beschränkt sich auf Geräte, die am bzw. auf dem Körper getragen werden. Ausgeklammert wurden stationäre Spatial Augmented Reality Systeme (BIMBER and RASKAR, 2005), wie bspw. Magic Mirror Systeme, bei denen Informationen auf physische Objekte projiziert werden.

Die zwei gängigen Geräteklassen sind Handheld Geräte und Head-Mounted-Displays (HMDs), auf die im Folgenden genauer eingegangen wird.

Zu Handheld Geräten zählen heutige Smartphones und Tablets, die als gängige Produkte am Markt verfügbar sind. Diese Geräte haben ihren Ursprung in Vorgängergeräten wie PDAs und Ultra-Mobile PCs (ABOWD et al., 1997, LINDT et al., 2005, BLUM et al., 2012). Handheld-Geräte sind üblicherweise mit einem berührungsempfindlichen Farbdisplay ausgestattet sowie diversen weiteren Aktoren und Sensoren, die unten erläutert werden. Handheld-basierte AR-Anwendungen arbeiten im Video See-Through Modus, bei dem das Kamerabild auf dem Display dargestellt und in Echtzeit mit Zusatzinhalten überlagert wird. Der Bildschirm fungiert als

Fenster in die erweiterte Realität, beschränkt auf den Bereich, der für die Kamera sichtbar ist.

AR und MR HMDs können entsprechend ihres Formfaktors und der visuellen Ausgabe klassifiziert werden:

Formfaktor:

- **Brille**
Leichtgewichtige Geräte mit Sitz auf Nasenflügel und Ohren, die normalen Brillen (zur Sehstärkenkorrektur) nachempfunden sind. Diese Brillen müssen leicht sein (unter 120 g) um längeren Tragekomfort zu gewährleisten, was Einschränkungen bei der verbauten Sensorik, Rechenleistung und Akkulaufzeit mit sich bringt. Manche Hersteller umgehen das Problem, in dem schwere Komponenten wie Akku und Prozessoren in einem externen Gehäuse untergebracht werden, das per Kabel mit der Brille verbunden ist.
- **Head-Worn Device (HWD)**
Geräte, deren Gewicht auf den ganzen Kopf verteilt wird. Hierzu existieren verschiedene Mechanismen, wie Tragegurte (s. Oculus Rift), Ringklammern (s. Microsoft HoloLens) oder Integration in einen Helm (s. RealWear HMT-1). Diese Geräte sind schwerer als o. g. Brillen, haben dafür aber weniger Einschränkungen.

Visuelle Ausgabe, sortiert hinsichtlich steigender Immersionsfähigkeit:

- **LED**
Anstelle eines 2D-Displays sind Farb-LEDs an der Innenseite des Brillenbügels angebracht. Die Ausgabe hat dementsprechend eine sehr kleine Informationsbandbreite von wenigen Farben und Blinkmustern, ist aber leicht und energieeffizient. Beispielszenarien sind die Anzeige von Benachrichtigungen, z. B. bei Anrufen. S. Snap Spectacles.
- **Seitliches Display**
An der Seite der Brille ist im peripheren Sichtfeld ein Mikrodisplay platziert, mit Maßen von üblicherweise unter 2 x 2 cm. Der Nutzer muss das Display explizit ansehen, welches Informationen in Text- und Bildform anzeigt, die zum aktuellen Kontext passen. S. Google Glass Enterprise Edition.

- **Optisches See-Through (OST) Display**

Durch einen Projektionsmechanismus werden virtuelle Zusatzinhalte auf einen Teilausschnitt des durchsichtigen Brillenglases projiziert. Sofern die virtuellen Inhalte zentimetergenau überlagert werden sollen, erfordert dies eine nutzerabhängige Kalibrierung des Augenabstands und der Augenposition. OST-Systeme fühlen sich aufgrund der Durchsicht meist angenehmer an als u. g. Video See-Through Displays, haben aber technologiebedingt einige Nachteile. Da die virtuellen Inhalte rein additiv sind, können Elemente aus der echten Welt nicht mehr virtuell entfernt werden (es ist keine Diminished Reality möglich). Virtuelle Inhalte sind bei hoher Umgebungshelligkeit in der Brille schwer zu erkennen, aufgrund der begrenzten Helligkeit der Projektion. Die stärkste Einschränkung ist das begrenzte Sichtfeld, auch Field Of View (FOV) genannt. Übliche Werte, wie 52° FOV der Microsoft HoloLens 2, erschweren besonders die Betrachtung virtueller Objekte aus kurzer Distanz.

- **Video See-Through (VST) Display**

Während der Nutzer bei den obigen drei Ausgabeararten die echte Welt direkt und latenzfrei durch das Brillenglas wahrnimmt, schotten VST Geräte den Nutzer optisch von der Außenwelt ab, ähnlich wie VR-Brillen. An der Vorderseite des Headsets sind zwei Kameras angebracht, die als Augen agieren und die echte Welt auf das Display streamen. Die Vorteile von VST sind ein deutlich größeres FOV (verglichen mit optischen See-Through Displays), die Möglichkeit der Diminished Reality sowie der nahtlose Übergang zwischen AR- und VR-Modus. Nachteilig hier: Die Augen werden, wie bei VR auch, stärker beansprucht, wegen des Accommodation-Vergence-Konflikts. Da der Abstand der zwei Außenkameras i. d. R. nicht exakt dem Augenabstand (Interpupillardistanz) des Benutzers entspricht, können Kopfschmerzen entstehen. Ein weiteres Problem ist die Latenz, die zwischen Kopf- und Handbewegungen des Nutzers und deren Anzeige im Display entsteht. Aufwendige AR-Effekte sind nicht möglich, da längere Berechnungszeiten die Latenz erhöhen und Beschwerden wie Übelkeit verursachen würden.

Neben der o. g. visuellen Ausgabe gibt es eine große Anzahl weiterer Aktoren und Sensoren. Je nach Produkt sind diese bereits im Gerät integriert, was die Kompaktheit und Nutzbarkeit des Gesamtsystems

begünstigt. Folgende Sensorik hat sich in bestehenden Systemen bewährt:

- **Kameras** ermöglichen Video See-Through Szenarien und erlauben visuelles Tracking. Neben RGB-Farbkameras werden zunehmend auch Tiefensensoren verbaut, die realistische Verdeckungseffekte möglich machen und die Trackingqualität verbessern. Andere Systeme setzen auf eine größere Zahl an Kameras (bspw. fünf oder mehr), um das Tracking zu verbessern.
- **GNSS-Empfänger** wie GPS, Galileo oder GLO-NASS ermöglichen die Lokalisierung im Outdoor-Bereich, die bis auf wenige Meter genau ist.
- **Kompass, Beschleunigungssensor und Gyroskop** können für das Positionstracking der Geräte genutzt werden.
- **Mikrofon und Lautsprecher** ermöglichen zusätzliche Interaktionsmodi.
- **WLAN, Bluetooth und Mobilfunk (3G/4G/5G)** ermöglichen die Fern- und Nahkommunikation und können auch für die Indoor-Lokalisierung genutzt werden, externe Aktoren vorausgesetzt.
- **Eye-Tracking** verbessert die Rendering Performance durch Techniken wie Foveated Rendering, bei der nur die mit dem Auge fokussierten Bereiche in voller Auflösung berechnet werden und die umliegenden Bereiche in reduzierter Qualität. Zudem erleichtert Eye-Tracking den Kalibrierungsvorgang, da die Interpupillardistanz in wenigen Schritten gemessen werden kann und die Brille bereits kalibrierte Nutzer anhand von Iris-Merkmalen wiedererkennen kann. Eye-Tracking ermöglicht außerdem neue Bedienkonzepte, bei denen Objekte mit dem Auge anvisiert werden.²¹

Neben den o. g. integrierten Sensoren setzen manche Systeme auf zusätzliche, externe Sensorik, die drahtlos oder per Kabel angebunden wird. Beispiele hierfür sind Sensoren aus dem Vermessungswesen wie **Tachymeter** oder **Real-Time-Kinematik (RTK)**-fähige **GNSS-Empfänger**. Letztere ermöglichen eine zentimetergenaue Outdoor-Lokalisierung mit-

²¹ <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/eye-tracking>

Name	Formfaktor	Vis. Ausgabe	Eigenständig	Motion Tracking	Siehe auch
Microsoft HoloLens 2	HWD	OST	Ja	Ja	Magic Leap One, Lenovo ThinkReality A6
Google Glass Enterprise Edition 2	Brille	Seitl. Display	Ja	--	Vuzix M400, Optinvent ORA-2, RealWare HMT-1
Snap Spectacles 3	Brille	LED	Ja	--	
EPSON Moverio BT-350	Brille	OST	Nein (Mobiler ext. Prozessor)	Nein	
Vuzix Blade	Brille	OST	Nein (Smartphone)	Nein	North Focals
Varjo XR-1	HWD	VST	Nein (PC)	Ja	Lynx-R1, VRgineers XTAL
Nreal Light	Brille	OST	Nein (Smartphone)	Ja	

Tab. 6: Übersicht MR-/AR-Brillen

hilfe von Korrekturdaten, die via Internet in Echtzeit empfangen werden sowie einer genaueren Phasenmessung des Satellitensignals. Sie sind dadurch den integrierten GNSS-Empfängern von heutigen Handheld-Geräten deutlich überlegen. Externe Sensorik kann auch bei der Indoor-Positionierung helfen, beispielsweise durch Bluetooth Beacons oder WLAN-basierte Lokalisierung.

Eine Übersicht der MR- und AR-Brillen befindet sich in Tabelle 6. Die Spalte Eigenständig steht dafür, ob das Gerät ohne zusätzliche externe Hardware funktioniert. Die Motion Tracking Spalte deutet an, ob die Brille ihre Position und Drehung in Echtzeit erfassen kann (6DoF-Tracking). Die Siehe auch-Spalte erwähnt ähnliche Brillen.

Virtual Reality

Bei der folgenden Auflistung von Virtual Reality Head-Mounted-Displays (HMD) wird zwischen mobilen HMD-Lösungen (siehe Tabelle 7) und Computer gebundenen HMD-Lösungen (siehe Tabelle 8) unterschieden. Beiden Lösungen ist gemein, dass, im Gegensatz zu den genannten AR-Systemen, die virtuelle Darstellung unabhängig von der realen Umgebung ist. Das bedeutet, dass der Nutzer mittels HMD soweit eingebunden wird, dass der Grad der Immersion sehr hoch ist und dabei die räumliche Außenwahrnehmung nahezu wegfällt. Äußere Einflüsse werden über die auditiven Sinne aufgenommen, wobei diese in den aktuellen Generationen von HMDs ebenfalls angesteuert werden können.

Die mobilen und performanten Lösungen unterscheiden sich im ersten Ansatz nur bei den technischen Daten. Allerdings werden bei den mobilen VR-Systemen alle dargestellten Inhalte direkt auf dem HMD bzw. auf dem eingelegten Gerät berechnet. Diese sind in ihrer Rechenleistung eingeschränkt und somit können nicht alle Inhalte auf diesen mit genügend FPS berechnet und somit nur mit reduzierter Darstellung angezeigt werden. Die performance HMD Lösungen hingegen sind mit einem Computer verbunden, der die Berechnung von Bildinformationen und Eingabebefehlen übernimmt. Diese HMDs funktionieren wie zwei Monitore (eines für jedes Auge), die das berechnete Bild anzeigen. So kann die Rechenleistung des Computers genutzt werden, um grafisch Anspruchsvolle Inhalte zu präsentieren.

Mobile HMD-Lösungen

Name	Auflösung, Framerate	Controller	Motion tracking	Besonderheiten
Oculus Go	1280 x 1440, 60 Hz	Ein Controller ohne Tracking	Rotation, 3DoF	
Oculus Quest	1440 x 1600, 72 Hz	2 Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF	Kann für bessere Performance an einen PC angeschlossen werden
Google Cardboard	Abhängig vom eingelegten Gerät		Rotation, 3DoF	VR-Hülle für z. B. Smartphone
Google Daydream	Abhängig vom eingelegten Gerät	Ein Controller	Rotation, 3DoF	VR-Hülle für z. B. Smartphone
Samsung Gear VR	Abhängig vom eingelegten Gerät		Rotation, 3DoF	VR-Hülle für Samsung Geräte

Tab. 7: Übersicht mobile VR-Brillen

Performance HMD-Lösungen

Name	Auflösung, Framerate	Controller	Motion tracking	Besonderheiten
HTC VIVE	1080 x 1200, 90 Hz	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF Base-Stations	Audio Zusatz möglich
HTC VIVE Pro	1440 x 1600, 90 Hz	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF Base-Stations	Audio Zusatz integriert Optionales EyeTracking, kabellos
VIVE Cosmos	1440 x 1700, 90 Hz	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF Base-Stations	Audio Zusatz integriert
Valve Index	1440 x 1600, 90-144 Hz	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF Base-Stations	Audio Zusatz integriert, zusätzliche Tracker möglich
Pimax Vision 8K Plus	7680 x 2160, 90 Hz	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF Base-Stations	Eye-Tracking optional
Oculus Rift S	1280 x 1440, 80 Hz	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF	Keine Base-Station benötigt
HP Reverb	2160 x 2160	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF	Keine Base-Station benötigt

Tab. 8: Übersicht performance VR-Brillen

Eingabegeräte

Bei den mobilen HMD-Lösungen werden kleine Controller (Oculus Go/Quest²² und Google Daydream²³) verwendet, um eine Interaktion in den VR-Szenarien umsetzen zu können. Diese Integration, bzw. Ansteuerung erfolgt zumeist auf Basis von Bluetooth-Kommunikationen mit den HMDs und integrierten Gyrosensoren. Einfache mobile HMD-Lösungen (Google Cardboard²⁴) verzichten gänzlich auf externe Eingabemethoden. Mögliche Nutzerinteraktionen erfolgen visuell innerhalb der Anwendung.

Bei den Performance HMD-Lösungen hingegen werden Controller genutzt, um die Bedienung der VR-Inhalte, aber auch das Tracking der Hände zu übernehmen. Dabei werden die Position der Hände sowie die Rotation im Raum über externe optische oder ein Inside-Out-Trackingverfahren erfasst. So können über eine Gestensteuerung oder die verschiedenen Bedienelemente auf den Controllern Funktionen im virtuellen Raum genutzt werden. Ebenfalls können die stationären VR-Brillen mit eingebauten Kameras direkt die Hände des Nutzers tracken und so eine echte Gestenerkennung der Finger und Hände gewährleisten. Die Gestensteuerung kann zudem über externe Geräte und Plugins, wie der LeapMotion²⁵, eingebettet werden.

AddOns zu den Performance-Lösungen

Zu den VR-Brillen sind verschiedene Geräte verfügbar, um weitere Funktionalitäten oder Verbesserungen zu nutzen. Dazu zählen Wireless-Verbindungen, um die Beweglichkeit der Nutzer nicht durch Kabel zu beeinträchtigen sowie zusätzliche Tracker. Bei diesen ist zu unterscheiden zwischen weiteren Body-Trackern, die ihre Position und Rotation erfassen, und Trackern, die über verschiedene Sensoren andere Objekte tracken. Dazu gehören z. B. der zuvor erwähnte LeapMotion zum Erkennen von Fingerbewegungen oder verschiedene Eye-Tracking Systeme zur Erkennung der Blickrichtung des Nutzers.

Immersive Flächenprojektionslösungen

„Anfang der 90er Jahre wurden richtungsweisende Forschungen im Bereich der Virtuellen Realität unternommen. Diese ermöglichten erstmalig projektionsbasierte Darstellungen. Dazu gehören als wesentliche Vertreter die „Powerwall“, die aus einer Stereoleinwand bestand, die „CAVE“ (CAVE Automatic Virtual Environment), die über vier Leinwände verfügte (im Jahr 1992 entwickelt an der University of Illinois), die „Responsive Workbench“, die eine Leinwand horizontal analog zu einer Tischoberfläche anordnete (im Jahr 1993 entwickelt von der GMD) sowie „iCONE“, das halbrunde Leinwände verwendete. Mit diesen Geräten konnte jeweils ein Betrachter die Darstellung real (also in korrekter Perspektive) sehen. Heute sind bereits Stereowände in der Forschung, die bis zu sechs Betrachtern die reale Sicht gleichzeitig ermöglichen.“ (DÖRNER, BROLL et al., 2013)

Der enorme Vorteil immersiver Flächenprojektionslösungen ist eine visuelle Darstellung der Objekte in realer Größe; Zoom-Funktionen sowie Skalierungen sind weiterhin möglich. Vorteilig gegenüber HMD-Lösungen ist das gemeinsame Betrachten mehrerer Nutzer eines Projektes. Besitzt das System mehr als eine Projektionswand, erweitert sich das FOV enorm, wodurch sich diese Systeme für Studien anbieten. Dazu kann der aktive Nutzer des Systems von den anderen Teilnehmern beobachtet werden.

Die einzelnen nachfolgenden Systeme unterscheiden lediglich in den Größen, Auflösungen und Anzahl der projizierenden Flächen im System. Alle Systeme nutzen ein optisches Trackingsystem, in dem der Betrachter erfasst und das Bild optimal auf diesen eingestellt wird. Die weiteren Betrachter können sich das Bild gleichzeitig anschauen, allerdings mit Verzerrungen, da die Ausrichtung nicht stimmt. Die Eingabemethoden können hier von einzelnen Stiften, Controllern bis hin zu fingertracked Handschuhen variieren.

²² https://www.oculus.com/?locale=de_DE

²³ <https://arvr.google.com/daydream/>

²⁴ <https://arvr.google.com/cardboard/>

²⁵ <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>

Name	Display Auflösung	Controller	Motion tracking	Besonderheiten
zSpace AIO PRO	1 x 24" – 1920 x 1080	Touch, Stylus	Integriertes IR-Tracking	Immersives System mit integriertem Stereo-Tracking
VRLOGIC-CornerWall Ultra	3 x 2560 x 1600 3.200 mm x 2.000 mm	ART Flystick ART Fingertracking	A.R.T. Trackback/E with 4 Camera	Aktive 3D-Stereo Anzeige via Shutter-Brillen
Visbox VisCube C4-T3X	6000 x 4096 front/floor wall 4096 x 4096 side walls	ARTTRACK Tracked head, tracked wand (controller)	ARTTRACK5 system (4 high resolution cameras)	10 aktive stereo 4K Projektoren Laserlicht Beamer Bewegungsfreiheit aufgrund Auf- und Rückprojektion Bis zu 10 Stereobrillen möglich

Tab. 9: Immersive Flächenprojektionslösungen

2.4.4.2 Softwareentwicklung & Rendering

Während sich im Konsumbereich bereits gängige Desktop- und Mobil-Plattformen wie Windows, macOS, iOS und Android etabliert haben, hat der AR-/VR-Markt noch keine breite Masse erreicht. Es besteht starker Wettbewerb zwischen den Brillen-Anbietern, um hier eine Vorreiterstellung zu erlangen. Seit Jahren herrscht eine hohe Fluktuation an AR-/VR-Brillen und zugehörigen Plattformen. Aus Sicht der Forschung und Industrie wäre es mit sehr hohem Aufwand verbunden, stets neue Plattformen und SDKs erlernen zu müssen und bestehende Anwendungen für mehrere Brillen parallel zu entwickeln.

Um den Entwicklungsaufwand geringzuhalten, haben sich Cross-Plattform Game Engines etabliert, wie Unity (Unity Technologies)²⁶ und Unreal Engine (EPIC Games)²⁷. Diese kommen auch im Nicht-Gaming-Bereich zum Einsatz. Die Engines unterstützen alle o. g. gängigen Desktop- und Mobilbetriebssysteme. Die Entwicklung für VR-/AR-Brillen ist dadurch gewährleistet, weil die Brillen mit eigenständigem Prozessor ebenfalls auf obige Mobilbetriebssysteme setzen. So kommt bspw. bei Google Glass, EPSON Moverio oder der Oculus Quest jeweils Android zum Einsatz, währenddessen die Microsoft HoloLens auf Windows 10 setzt. Die Engines unterstützen zudem brillenspezifische Funktionen über ein Plug-In System. Die Brillenhersteller erstellen in

Kooperation mit dem Engine-Hersteller diese Plugins, welche bspw. den Zugriff auf das Positionstracking, die Handgestenerkennung oder die Kalibrierungsprozedur aus der Engine heraus ermöglichen.

Der Einsatz dieser Engines erhöht die Effizienz erheblich, da der Umgang mit der Engine einmalig erlernt werden muss. Anschließend ist der Aufwand für die Anpassung sowie das Deployment für verschiedene Geräte minimal.

Ein bei der Entwicklung maßgeblicher Punkt ist die Betrachtung der Rendering-Performance. So kommen bei AR-Systemen meist eigenständige Geräte (mit eigener CPU und GPU) zum Einsatz, wie Handheld-Tablets oder HMDs wie die HoloLens. Deren Output-Leistung, gemessen in Bildern pro Sekunde, ist geringer als bei Desktopsystemen, da die CPU und GPU-Hardware des AR-Systems deutlich kleiner und energieeffizienter sein müssen. Aufwendige Grafikeffekte oder 3D-Modelle mit hoher Polygonzahl müssen für mobile Geräte reduziert werden. Zu diesem Zweck werden bestimmte Grafikeffekte abgeschaltet, und 3D-Modelle in ihrer hierarchischen Struktur sowie Polygonzahl optimiert (MESSAOUDI et al., 2017). Dies trifft insbesondere auch auf Architekturdaten aus dem BIM-Bereich zu. Aktuelle Gebäudedaten bestehen üblicherweise aus Millionen von Polygonen und müssen für die interaktive Echtzeitverwendung auf mobilen Geräten meist konvertiert und reduziert werden (OPPERMANN, SHEKOW and BICER, 2016). Auch frühere Forschungsergebnisse haben ergeben, dass ein visueller Realismus für die Darstellung von AR-Inhalten nur bedingt erforderlich ist. Zwar müssen die wesentlichen Formen des virtuellen Inhalts er-

²⁶ <https://unity.com>

²⁷ <https://www.unrealengine.com/en-US/>

kennbar und perspektivisch hinreichend korrekt gerendert sein, aber ein darüber hinausgehender Fotorealismus ist kontraproduktiv und lenkt die zu leistenden Aufwände noch dazu in die falsche Richtung (BLUM et al., 2012). In Abgrenzung zu der zitierten Arbeit haben wir bei der Darstellung von Brückendaten sogar den Vorteil, dass sie eine feste Infrastruktur repräsentieren und keine lebendigen, menschenähnliche Avatare. Wir erwarten also keine Probleme mit dem sog. Uncanny Valley-Effekt, den der japanische Robotik-Forscher MORI in den 1970ern beobachtete, der eine Ablehnung der Darstellung bei zunehmenden Detailgrad beschrieb (MORI, 1970) und der alle virtuellen Charakterdarstellungen bis heute betrifft (vgl. die bewusst Cartoon-artigen Darstellungen in Animationsfilmen von Pixar, Dreamworks, oder Spielen von Nintendo). Daher können wir mit leblosen Infrastrukturdaten ohne zu erwartende, kognitive Nebeneffekte umgehen und die Rendering-Performance den Gegebenheiten anpassen.

2.4.4.3 Tracking & Mapping

Zwei zentrale Funktionen von AR-Systemen sind Tracking und Mapping. Tracking ist die Erfassung der Position und Orientierung von Objekten im dreidimensionalen Raum. Dieses Objekt ist einerseits

das AR-/VR-Gerät selbst, welches wissen muss, wo es sich befindet. Andererseits kann es auch ein externer Gegenstand sein, wie bspw. ein Handcontroller oder der Karton einer Produktverpackung, die augmentiert werden soll. Der technisch präziserte Begriff für Tracking ist 6 Degrees of Freedom (6DoF) Motion Tracking, wobei sich die Zahl 6 durch die 3 Achsen (X, Y, Z) der Position plus die 3 Rotationsachsen (Roll, Pitch, Yaw) ergibt.

Unter Mapping versteht man die Erstellung einer dreidimensionalen Umgebungskarte. Diese stellt ein Koordinatensystem zur Verfügung, in dem sich die AR-Geräte gegenseitig orientieren können. Manche Mappingverfahren erstellen zusätzlich ein geometrisches Modell (z. B. der Wände, Tische etc.), welches den Realismus eines AR-Systems erhöht, da virtuelle Objekte beim Rendervorgang nur noch an den Stellen gezeichnet werden, wo sie nicht durch Objekte der realen Welt (z. B. Wände) verdeckt werden würden. Zudem sind Physikeffekte möglich, da virtuelle Objekte auf glaubhafte Weise am geometrischen Modell abprallen können.

Tracking

Tabelle 10 zeigt eine Auflistung üblicher Trackingverfahren von AR- und VR-Systemen. Den Spalten

Verfahren	Präzision	Latenz	Bezugssystem	Einschränkungen
Magnetisch	Millimeter	Wenige Millisekunden	Absolut	Benötigt Basisstation, Geringe Abdeckung (wenige m ²), störanfällig gegen EM-Felder aus Umgebung.
WLAN Signal	0,3 m – 3 m	Wenige hundert Millisekunden	Absolut	Benötigt mehrere WLAN-Router, störanfällig gegen EM-Felder, Rotation wird nicht getrackt
Bluetooth Beacons	1 – 2 Meter	1 – 2 Sekunden	Absolut	Benötigt mehrere Beacons, störanfällig gegen EM-Felder, Rotation wird nicht getrackt
GNSS	1 – 3 Meter	Wenige hundert Millisekunden	Absolut	Benötigt Sichtkontakt zu mehreren Satelliten, störanfällig gegen Umwelteinflüsse wie Wetter, Rotation wird nicht getrackt.
Optisch Outside-In	Millimeter	Wenige Millisekunden	Absolut	Benötigt externe Kameras, am Empfänger angebrachte Marker u. freie Sicht zwischen mind. 1 Kamera und Empfänger
Visual Odometry	--	~ 15 – 50 Millisekunden	Relativ	Fehlerrate (Drift), erfordert statische, ausgeleuchtete Umgebung mit Feature Points
Inertial Odometry	--	Wenige Millisekunden	Relativ	Fehlerrate (Drift)
Visual Inertial Odometry	--	Wenige Millisekunden	Relativ	s. Visual Odometry
Markerbasiert	--	Wenige Millisekunden	Relativ	Marker muss bekannt sein, in Realität platziert und in Kamerabild sichtbar sein, bei ausgeleuchteter Umgebung
Markerless	--	Wenige Millisekunden	Relativ	Getracktes Objekt muss bekannt sein, in Realität platziert und in Kamerabild sichtbar sein, bei ausgeleuchteter Umgebung

Tab. 10: Übersicht der Trackingverfahren von AR-/VR-Systemen

entsprechend wurden die Ansätze nach verschiedenen Charakteristiken bewertet:

- Präzision: Die Wiederholungsgenauigkeit bei der Ermittlung der 3D-Koordinate, die im besten Fall erreicht werden kann. Trifft nur auf Systeme mit absolutem Bezugssystem zu (s. unten).
- Latenz: Die zeitliche Verzögerung zwischen einer Bewegung (in der echten Welt) und deren Registrierung durch das Trackingverfahren.
- Bezugssystem: Unterschieden werden absolut und relativ. Absolute Systeme liefern eine absolute Koordinate innerhalb eines beliebig definierten Bezugssystems. Relative Systeme erstellen bei jedem Systemstart ein neues Koordinatensystem, d. h. das Trackingverfahren liefert nach dem Start immer die Nullpunktcoordinate.
- Einschränkungen: Eine Auflistung der wesentlichen Umgebungsbedingungen, die gewährleistet sein müssen, damit das System funktioniert.

Im Folgenden wird jedes Verfahren kurz vorgestellt, zusammen mit einem oder mehreren Beispielsystemen:

- Magnetisch
 - Eine Basisstation baut Magnetfelder auf, die vom Empfänger gemessen werden. Die Messergebnisse werden vom Empfänger in eine 3D-Koordinate umgerechnet, die relativ zur stationären Basisstation ist. Die Basisstation stellt ein absolutes Bezugssystem dar. Die Vorteile des magnetischen Verfahrens sind die geringe, nicht-spürbare Latenz und die hohe Präzision im Millimeterbereich. Letztere ist nur unter störungsfreien Bedingungen möglich. Außerdem ist keine Sichtverbindung zwischen Basisstation und Empfänger erforderlich. Der Hauptnachteil ist die geringe Abdeckung. Da das Magnetfeld schwach gehalten werden muss (um bspw. keine Datenträger in der Umgebung zu beeinflussen), ist dessen Größe auf einen Bereich von wenigen Quadratmeter vor der Basisstation beschränkt.
 - Ein Beispiel ist der Handcontroller Razer Hydra (Razer USA Ltd, 2011).
- WLAN-Signal
 - WLAN-Tracking wird vorwiegend im Indoor-Bereich eingesetzt, wo eine größere Zahl

WLAN-Router installiert wird. Der Vorteil von WLAN-Tracking ist, dass kein Sichtkontakt zwischen Router und Empfänger nötig ist. Eine bestehende Router-Infrastruktur kann verwendet werden und WLAN ist bereits in vielen Empfängergeräten (wie Smartphones) verfügbar. Der Hauptnachteil ist die vglw. geringe Genauigkeit aufgrund der Störanfälligkeit durch andere EM-Felder oder durch Gegenstände, die die Signale im WLAN-Band abschwächen.

- Bei Systemen mit geringen Genauigkeitsanforderungen (2 – 4 m) ermittelt der Empfänger seine Position entweder durch Messung der Signalstärke der verschiedenen Router (LANZISERA, ZATS and PISTER, 2011) oder durch Messung der Latenz gesendeter Datenpakete (BAHL and PADMANABHAN, 2000).
- Systeme mit höheren Genauigkeitsanforderungen (bis 0,4 m) erweitern die eben genannten Triangulationskonzepte, z. B. durch einen Abgleich der Signalstärke mit einer zuvor ermittelten Groundtruth-Datenbank, die zu gewählten 3D-Koordinaten die Signalstärken beinhaltet (YOUSSEF and AGRAWALA, 2008). Des Weiteren lässt sich durch Auswertung des Empfangswinkels der Datenpakete an den Empfänger-Antennen die Genauigkeit erhöhen (KOTARU et al., 2015).
- Bluetooth Beacons
 - Bluetooth Beacon Tracking ist sehr ähnlich zum WLAN-basierten Ansatz. Anstelle von WLAN-Routern werden Bluetooth Beacons in der Umgebung platziert. Diese folgen der Bluetooth Low Energy Spezifikation (Bluetooth Special Interest Group, 2010) und senden regelmäßig ein Signal im 2,4 GHz Band aus, welches auch von WLAN verwendet wird. Wie bei WLAN-Tracking auch ermittelt der Empfänger seine Position durch Messung der Signalstärke der empfangenen Signale, bei ähnlicher Präzision von 1 – 2 Metern (DICKINSON et al., 2016, MOHEBBI, STROULIA and NIKOLAIDIS, 2017). Die Vorteile von Bluetooth Tracking gegenüber WLAN-Tracking ist der geringere Preis und Installationsaufwand der Beacons, da diese üblicherweise kleine, leichte, günstige, batteriebetriebene Geräte sind, die auch im Out-

door-Bereich eingesetzt werden können. Die Nachteile sind, dass zur Erreichung einer sub-zwei-Meter-Präzision ein dichtes Netz an Beacons nötig ist (alle 2 – 4 Meter). Den Algorithmen muss die Lage der Beacons bekannt gemacht und die Berechnung der Distanz aus der Signalstärke entsprechend für jedes Empfangsgerät kalibriert werden. Eine zukünftige Verbesserung der Präzision hin zum Sub-Meter Bereich wird mit dem Einsatz der neuen Bluetooth 5.1 Spezifikation möglich, die Techniken wie Angle-Of-Arrival und Angle-Of-Departure in den Standard integriert (MONFARED et al., 2018, SURYAVANSHI, VISWAVARDHAN REDDY and CHANDRIKA, 2019).

- HERE Indoor Positioning²⁸ ist ein Beispielprodukt für Bluetooth-basiertes Indoor Positioning.

- GNSS

- Bei GNSS (Global Navigation Satellite System) Tracking bestimmt der Empfänger seine Position durch den Empfang mehrerer Satellitensignale von verschiedenen GNSS-Positionierungsdiensten, wie GPS, GLONASS, Galileo oder BeiDou. Der Hauptvorteil ist die generelle Verfügbarkeit, da die für den Empfang notwendigen Antennen und Empfängerchips seit der Jahrtausendwende den Massenmarkt erreicht haben und u. a. in Smartphones und Tablets zur Standardausrüstung gehören. Entsprechende Chips erreichen unter guten Bedingungen, bei denen eine große Zahl an Signalen ohne Störreflektion empfangen wird, eine Präzision von bis zu 3 Metern. Neueste Empfänger, die seit 2018 auf dem Markt sind und mehrere Frequenzen pro Dienst empfangen können, erhöhen die Genauigkeit im Bestfall auf einen Meter (ROBUSTELLI, BAIOCCHI and PUGLIANO, 2019). Der Nachteil von GNSS Tracking ist die Beschränkung auf den Outdoor-Bereich, da die Satellitensignale schwach sind und Gebäudemauern nicht durchdringen können. Zudem ist die Präzision abhängig von weite-

ren Umwelteinflüssen, wie bspw. dem Wetter oder Reflektionen. So sinkt die Präzision bei dem Großteil der Empfänger auf unter zehn Meter, sobald Signale durch die Umgebung reflektiert werden, wie bspw. in Häuserschluchten.

- Optisch Outside-In

- Bei optischen Outside-In Verfahren ermittelt ein externes System (Outside) die Koordinate eines beweglichen Objekts (dem In, z. B. eine VR-Brille) mithilfe von trigonometrischen Algorithmen. Das externe System besteht aus einer oder mehreren fest installierten Kameras und entsprechender Software. Bei mehreren Kameras ist eine Kalibrierung des externen Systems erforderlich. Während der Kalibrierung muss das Objekt von allen Kameras sichtbar sein, um die absolute Position der statischen Kameras zu bestimmen. Während des Betriebs reicht eine eingeschränkte Sichtbarkeit zu einer kleineren Anzahl Kameras aus. An die getrackten Objekte werden Hilfsmarker von zuvor festgelegter Größe und Abstand angebracht, was die Erkennung des Objekts für die Kameras erleichtert.
- Ein Beispielsystem sind die Trackingsysteme von ART²⁹. Die Hilfsmarker bestehen aus mehreren 1 – 2 cm großen Kugeln, die in einem Gerüst angeordnet sind. Die Kugeln reflektieren Infrarotlicht, das von den Kameras ausgestrahlt wird, wodurch sie besser im Kamerabild zu erkennen sind. Das System kann auf bis zu 50 Kameras erweitert werden und dadurch große Gebiete abdecken; vorausgesetzt, dass sich die Sichtbereiche der installierten Kameras ausreichend überlappen.

- Visual Odometry

- Visual Odometry (VO), s. (NISTER, NARODITSKY and BERGEN, 2004), ist ein optisches, kamerabasiertes Verfahren. Eine oder mehrere Kameras liefern bspw. 30 Einzelbilder pro Sekunde. In den Bildern werden Feature Points erkannt, d. h. markante Pixelbereiche, wie Ecken oder Kanten von Objekten,

²⁸ <https://indoor.here.com>

²⁹ <https://ar-tracking.com/products/tracking-systems/>

die für Algorithmen leicht wiederzuerkennen sind – unabhängig von der Beleuchtung (Helligkeit) oder der Distanz des Objekts zur Kamera. Die Feature Points des aktuellen Kamerabilds werden mit den entsprechenden Features der vorherigen Bilder gematcht. Aus den gefundenen Feature-Paaren lässt sich schließlich die Positions- und Rotationsveränderung in 3D errechnen (SCARAMUZZA and FRAUNDORFER, 2011). Da bei diesem Verfahren die Positionsbestimmung ausschließlich im Empfänger stattfindet, wird es auch als Inside-Out Verfahren bezeichnet. Die Vorteile von VO sind die Indoor- und Outdoor-Fähigkeit, der geringe Hardwarepreis und die sofortige Einsatzfähigkeit, da in der Umgebung keine externe Sensorik installiert werden muss. Dem gegenüber stehen zahlreiche Nachteile: Die ermittelten Koordinaten sind relativ, also ohne absoluten Bezugspunkt, und sind mit einem Fehler behaftet, der sich bei wachsender Distanz akkumuliert. Die relative Fehlerrate liegt zwischen 0,1 – 2 %. Bei einer angenommenen Fehlerrate von 1 % wäre die ermittelte Position nach 10 m Laufweg bereits ca. 10 cm ungenau. Weitere Probleme sind die Latenz, die abhängig von der Bildfrequenz ist (bspw. 33 ms für eine 30 Hz Wiederholrate, plus wenige weitere Millisekunden für die Laufzeit des Algorithmus) sowie einige notwendige Bedingungen an die Umgebung. Diese muss vorwiegend statisch sein, da der Algorithmus nicht unterscheiden kann zwischen „bewegliches Objekt bei statischer Kamera“ und „Kamera bewegt sich um ein statisches Objekt“. Die Umgebung muss zudem gut ausgeleuchtet sein und ausreichend Feature Points liefern. So funktioniert VO bspw. nicht bei Dunkelheit oder in einem leeren Raum mit glatten, einfarbigen Wänden.

Ein Beispiel sind Software SDKs von Dragonfly³⁰ oder Kudan³¹.

- Inertial Odometry
 - Inertial Odometry (SAVAGE, 1998) berechnet die Position und Orientierung eines Ge-

räts mithilfe von Trägheitssensoren, insb. dem Gyroskop (Winkelsensor) und Accelerometer (Beschleunigungssensor), deren Messwerte mit hoher Frequenz (bspw. 1.000 Hz) erfasst werden. Das Grundprinzip ist die mathematische Integration. So lässt sich aus den gemessenen Beschleunigungskräften mittels Integration die Geschwindigkeitsänderung berechnen und aus dieser wiederum die Position (Doppelintegration). Die Orientierung wird durch die einfache Integration der Orientierungswerte des Gyroskops bestimmt. Die Vorteile dieser Systeme sind die geringe Latenz sowie die Resilienz gegen äußere Umwelteinflüsse, bspw. der Umgebungshelligkeit. Der Nachteil ist die hohe Fehlerrate (Drift), besonders bei der Berechnung der Position. Kleinste Messfehler verursachen hier eine exponentielle Verstärkung des Fehlers, aufgrund der doppelten Integration. Bei der Nutzung der günstigen (aber ungenauen) MEMS-Sensoren sind die durch naive Verfahren ermittelten Koordinaten binnen Sekunden unbrauchbar. Umfangreiche Algorithmen können dem zwar entgegensteuern, aber nur unter bestimmten Bedingungen, wie z. B. einer umfangreichen Kalibrierung oder Annahmen der Umgebung (CHEN et al., 2018). Daher werden Inertial Odometry Ansätze meistens mit zusätzlichen Sensoren und Ansätzen kombiniert, die gar nicht (oder weniger stark) von Drift betroffen sind, wie der Visual Inertial Odometry.

- Visual Inertial Odometry
 - Visual Inertial Odometry (VIO) kombiniert Visual Odometry mit Inertial Odometry. Dadurch können gewisse Nachteile der einzelnen Ansätze durch den jeweils anderen Ansatz abgeschwächt werden. So kann ein VIO-System die Koordinate deutlich häufiger und mit geringerer Latenz berechnen als ein reines VO-System, da die Beschleunigungsdaten häufiger erfasst werden als die Features aus dem Kamerabild. Auch ein kurzzeitiger Ausfall der VO lässt sich durch die Beschleunigungsdaten ausgleichen, z. B. bei Verdeckung der Linse oder Verwacklungen. Ein VIO-System ist zudem tolerant gegenüber kurzzeitig dynamischen Szenen, da die mittels Features berechneten Koordinaten mithilfe der Inertialdaten auf Plausibilität hin

³⁰ <https://www.dragonflycv.com/>

³¹ <https://www.kudan.io/>

überprüft und ggf. korrigiert werden können. Dennoch teilen VIO-Systeme den Großteil der Nachteile von VO-Systemen. Eine statische, gut beleuchtete Umgebung mit ausreichenden Feature Points ist auch hier eine Grundvoraussetzung. Auch die Fehlerrate ist bei VIO-Systemen nicht wesentlich besser als bei VO-Systemen (DELMERICO and SCARAMUZZA, 2018).

- Beispielsysteme sind ARKit (Apple, iOS) und ARCore (Google, Android).
- **Markerbasiert**
 - Markerbasiertes Tracking ist ein optisches Verfahren, bei dem ein Algorithmus die Koordinate der Kamera relativ zu einem oder mehreren Markern berechnet, die im Kamerabild zu sehen sind. Die Marker sind zweidimensionale, flache Oberflächen, z. B. ein bedrucktes Blatt Papier oder eine Plakatwand, die in der Realität in bestimmten Maßen vorliegen. Dem Algorithmus müssen die Textur und die Maße des Markers im Voraus bekannt sein. Erkennt der Algorithmus den Marker im Kamerabild wieder, so können mithilfe der Feature Points oder durch Bestimmung der geometrischen Verzerrung der Abstand und Winkel der Kamera relativ zum Marker errechnet werden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die hohe Präzision (ohne Drift). Nachteilig ist, dass das Tracking nur funktioniert, solange der Marker von der Kamera erfasst ist (bei ausreichender Umgebungsbeleuchtung), und dass Marker dem Algorithmus im Voraus bekannt sein müssen (BILLINGHURST, CLARK and LEE, 2015).
 - Ein Beispiel ist ARToolkit³². Auch VIO-Ansätze wie ARKit oder ARCore haben markerbasiertes Tracking integriert.
- **Markerless**
 - Das Ziel von Markerless (Object) Tracking ist die Bestimmung der Kamerakoordinate rela-

tiv zu einem Objekt, das im Kamerabild sichtbar sein muss und das dem Algorithmus bereits im Voraus bekannt sein muss. Es ähnelt dem oben vorgestellten markerbasierten Ansatz, unterscheidet sich aber dadurch, dass am Objekt keine besonderen Marker angebracht werden müssen und es nicht auf zweidimensionale, flache Objekte limitiert ist.

- Ein Beispiel ist CAD-Model-Tracking³³. Der Algorithmus erkennt 3D-Objekte, für die ein 3D (CAD)-Modell existiert, aus beliebigen Blickwinkeln, durch verschiedene Ansätze wie Kantendetektion.
- Ein weiteres Beispiel ist Handgestenerkennung³⁴. Der Algorithmus ermittelt die Position der Hände und einzelner Fingerspitzen sowie dynamische Gesten mithilfe eines zuvor parametrisierten Modells der menschlichen Hand.

Mapping

Wie zuvor erwähnt, wird beim Mapping eine Umgebungslandkarte (Map) der realen Welt erzeugt. Das Verfahren, das dabei üblicherweise zum Einsatz kommt, ist SLAM. An SLAM sowie verwandten Bereichen wie Structure From Motion wird seit über 15 Jahren aktiv geforscht (SAPUTRA, MARKHAM and TRIGONI, 2018) und es existieren dutzende verschiedene Ansätze. Die Grundidee von SLAM ist, dass zusätzlich zur Live-Bestimmung der Kameraposition mittels Visual (Inertial) Odometry (s.o.) auch eine grobe Map entsteht. Die Karte ist technisch betrachtet eine Sparse Point Cloud, also eine Menge von 3D Punkten, die die Feature Points darstellen, die während der Visual Odometry anfallen.

Die Map wird im Gerät (RAM) vorgehalten und wird laufend aktualisiert. Sie ist aus den folgenden Gründen nützlich:

- Die Map erlaubt die Relokalisierung des AR-Geräts, wenn die Positionsbestimmung kurzzeitig ausgefallen ist, z. B., weil die Kamera unbeabsichtigt verdeckt wurde oder zu stark gewackelt hat. Die Relokalisierung erfolgt durch den Ver-

³² <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>

³³ Eine Beispielimplementierung ist <https://visionlib.com/>.

³⁴ Siehe: <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>

gleich der gerade sichtbaren Feature Points und der bereits bekannten Features in der Map.

- Die Map bietet ein absolutes Referenzsystem für die Geräte-Koordinaten. Systeme deren Bezugssystem in Tabelle 10 als relativ gekennzeichnet wurden, werden absolut, wenn sie zusätzlich SLAM verwenden. Es ergeben sich verschiedene Ausprägungen:
 - Im einfachsten Fall wird die Map auf dem Gerät gespeichert, wo sie auch erzeugt wurde, z. B. als Datei. Bei einem Neustart des Systems wird die Map aus der Datei geladen und nach erfolgter Relokalisierung stehen absolute Koordinaten zur Verfügung.
 - Die Map wird zwischen verschiedenen AR-Geräten ausgetauscht, bspw. via Internet oder lokales WLAN. Alle Teilnehmer des AR-Systems arbeiten nach der Relokalisierung im gleichen Koordinatensystem.
 - Die Maps von vielen verschiedenen Orten der Welt werden in einer öffentlichen Cloud gespeichert und zusammengeführt. Die Cloud stellt dadurch einen Visual Positioning Service bereit, der die rein visuelle Positionsbestimmung der Geräte an beliebigen Orten ermöglicht.
- Die Map verringert die negativen Auswirkungen des Drifts von Visual (Inertial) Odometry Ansätzen mittels Loop Closure. So ist es möglich, dass der Relokalisierungsalgorithmus nach einem längeren Aufenthalt in zuvor ungemappten Bereichen wieder einen in der Map bekannten Bereich erkennt. Die aktuellen Koordinaten weichen aber aufgrund des Drifts von den in der Map hinterlegten Koordinaten ab. Der Algorithmus korrigiert dann die Abweichung, indem er die Schleife schließt. Die zuletzt besuchten Koordinaten werden in der Map rückwirkend nachkorrigiert.

Im Folgenden werden exemplarisch SLAM-basierte Systeme und deren Eigenschaften aufgeführt:

- **ARCore**³⁵ ist ein von Google Anfang 2018 veröffentlichtes VIO-System mit integriertem SLAM, das nur auf neueren, ausgewählten Android Geräten funktioniert³⁶. ARCore bietet neben 6 DoF Motion Tracking auch die Erkennung horizontaler und vertikaler Ebenen, wie dem Boden, Tischplatten oder Wänden sowie das Marker Tracking (selbstdefinierte Bilder). Das Speichern oder Verteilen der SLAM Map an andere Geräte ist nicht möglich. Die einzige Möglichkeit, ein absolutes, persistentes Koordinatensystem zu bekommen, ist Google's Cloud Anchors API (Anon., 2020). Hier wird lediglich ein kleiner Ausschnitt (wenige m²) der Map auf der Google Cloud für bis zu 24 Stunden gespeichert, der von anderen Geräten heruntergeladen und für die Relokalisierung genutzt werden kann.
- **ARKit**³⁷ ist das iOS-Äquivalent zu ARCore, das von Apple seit Mitte 2017 entwickelt wird und ab iPhone 6 S (Plus) zur Verfügung steht. Zusätzlich zu den Features von ARCore erlaubt ARKit das Markerless Tracking von zuvor eingescannten 3D-Objekten. Anders als ARCore erlaubt ARKit das Speichern und Teilen der gesamten SLAM Map als Datei (World Map). Eine weitere Schnittstelle (Collaborative Sessions) ermöglicht die Adhoc-Erstellung und Aktualisierung eines gemeinsamen Koordinatensystems zwischen mehreren Teilnehmern. Hier werden mehrmals pro Sekunde Teilstücke der Map via peer-to-peer Datentransfer zwischen den Geräten ausgetauscht und auf den Geräten zu einer großen Map zusammengefügt. Seit März 2020 unterstützt ARKit Version 3.5 die Echtzeiterzeugung eines geometrischen Drahtgittermodells (Mesh) der realen Umgebung. Voraussetzung ist ein ARKit-fähiges Gerät mit Tiefenkamera, wie das iPad Pro (Generation Jahr 2020).
- **Vuforia**³⁸ von PTC geht ARKit und ARCore zeitlich voran. Vuforia verwendet intern ARKit bzw. ARCore auf den jeweils unterstützten Geräten, liefert aber auch eine eigene VIO-Engine mit, die 6 DoF Tracking auf diversen Non-ARCore And-

³⁵ <https://developers.google.com/ar/discover>

³⁶ <https://developers.google.com/ar/discover/supported-devices>

³⁷ <https://developer.apple.com/documentation/arkit>

³⁸ <https://library.vuforia.com/getting-started/overview.html>

roid-Geräten unterstützt sowie auf ausgewählten Windows 10 Tablets. Zudem unterstützt Vuforia verschiedene Markerless Object Tracking Ansätze, wie CAD-Tracking sowie featurebasiertes Tracking zuvor eingescannter Objekte (vgl. ARKit). Da das Vuforia SDK die auf ARKit bzw. ARCore Geräten intern genutzten APIs abstrahiert, ist der Zugriff auf ein absolutes Koordinatensystem (z. B. ARKit World Map oder ARCore Cloud Anchors) nicht möglich. Vuforia bietet eine eigene Implementierung namens Area Targets, bei der die reale Umgebung mit einem kommerziellen 3D-Scanner von Matterport³⁹ als Map eingescannt wird. Die Lokalisierung vergleicht dann die aktuell erkannten Feature Points mit den Daten in dieser per Scan ermittelten Map.

- **6D.ai** war ein SDK⁴⁰, welches auf neueren, rechenstarken iOS Geräten ein geometrisches Modell der Umgebung in Echtzeit erstellt und dieses in eine Cloud hochlädt. Die Cloud fügt mehrere Modelle automatisch zusammen, sofern entsprechende Überlappungen festgestellt wurden, wodurch aus mehreren Einzelmodellen ein großes Modell entstehen kann. Die von der Cloud heruntergeladenen Modelldaten erlauben sowohl eine Relokalisierung des iOS-Geräts als auch realistische Verdeckungs- und Physikeffekte.
- **Immersal und Visualix**⁴¹ sind Drittanbieter, die den Funktionsumfang von ARKit und ARCore erweitern. Sie ermöglichen ein konsistentes, absolutes Koordinatensystem (inkl. Relokalisierung) für große Indoor- und Outdoor-Bereiche. Für solche Szenarien sind ARKit bzw. ARCore nicht ausgelegt, da die auf dem Gerät gespeicherte Map in ihrer Größe limitiert ist, bedingt durch die begrenzten Ressourcen der Mobilgeräte. Das Problem wird mithilfe der Cloud gelöst. Zunächst scannt der Benutzer die Umgebung mit dem Mobilgerät ein, wobei regelmäßig Fotos in die Cloud geschickt werden, wo Structure-From-Motion Algorithmen aus den Bildern eine Sparse Point

Cloud (Map) erstellen oder bestehende Maps erweitern. Dank der großen Rechenkapazität können so Maps ganzer Städte erstellt werden. Virtuelle Objekte können, unter Verwendung der absoluten Map-Koordinaten, in der Map platziert werden, bspw. in einem Webinterface oder vor Ort. Die Relokalisierung findet mithilfe der Cloud statt. Das Gerät sendet in regelmäßigen Abständen (bspw. alle zwei Sekunden) die erkannten Feature Points an die Cloud, welche diese in der Map findet und mit einer absoluten Koordinate antwortet. Die Zwischenpositionen werden auf dem Gerät durch ARCore bzw. ARKit bestimmt.

- **NavVis**⁴² bietet eine kombinierte Hardware-/Softwarelösung, bestehend aus einem mobilen Punktwolkenscanner und entsprechender Software. Der Scanner verfügt neben Farbkameras auch über Laserscanner, was die Qualität, Präzision und Dichte der erstellten Map deutlich erhöht. Der Nutzer läuft den einzuscannenden Bereich mit dem Scanner ab und die Software berechnet im Nachgang ein geometrisches 3D-Modell. Dieses kann für Indoor-Navigation sowie für die Vermessung verwendet werden.

Mit Ausnahme von NavVis bieten alle vorgestellten Systeme eine Integration in die Game Engine Unity3D und zum Teil weitere Engines wie Unreal Engine.

2.4.4.4 Bedienkonzepte

Die Bedienkonzepte von AR- und VR-Geräten und -Anwendungen unterscheiden sich zum Teil erheblich von der klassischen Computerumgebung. Dies liegt zum einen an einer anderen Mensch-Maschine-Schnittstelle durch die Geräte, zum anderen auch an den sich durch den dreidimensionalen Raum ergebenden veränderten Interaktionsmöglichkeiten. Auf dem Computer hat sich das sogenannte WIMP, kurz für Windows, Icons, Menus and Pointers, durchgesetzt. Dieses wurde an der Stanford University entwickelt und in einer berühmten

³⁹ <https://library.vuforia.com/content/vuforia-library/en/features/environments/area-targets.html>

⁴⁰ 6D.ai wurde im März 2020 von Niantic übernommen, Dienst wurde kurz danach eingestellt.

⁴¹ Siehe <https://immersal.com/> und <https://www.visualix.com/>.

⁴² <https://www.navvis.com/>

Demo⁴³ 1968 durch Douglas C. Engelbart öffentlich präsentiert. Bis zum damaligen Zeitpunkt war eine Steuerung des Computers lediglich durch Kommandozeilenbefehle oder andere Schnittstellen möglich. Im Gegensatz dazu stehen die sogenannten „Post-WIMP user interfaces“, die nicht mehr auf klassische Interaktionselemente aus dem WIMP-Bereich, wie z. B. Menus und Icons, aufbauen (VAN DAM, 1997). Während WIMP-Interfaces typischerweise an stationären oder an mobilen Handheld-Geräten Verwendung finden, ermöglichen AR- und VR-Anwendungen typischerweise auch Hands-free-Ansätze, z. B. die Eingabe per Sprache oder Gesten. Hierbei sind jedoch die jeweiligen Anwendungsfälle genauer zu betrachten, u. a. im Hinblick auf eine die Usability berücksichtigende Gestaltung der Schnittstelle. Generell lassen sich drei verschiedene Typen der Interaktion unterscheiden: 2D in 2D, 2D in 3D und 3D in 3D. Bei 2D in 2D handelt es sich um das klassische WIMP-Interface mit zweidimensionalen Elementen in einer zweidimensionalen Umgebung. 2D in 3D transportiert diese Elemente in den dreidimensionalen Raum, spricht man bedient sich zweidimensionalen Fenstern, Icons und Menus und platziert diese in den dreidimensionalen Raum. Bei 3D in 3D handelt es sich um dreidimensionale Schnittstellen im dreidimensionalen Raum, also beispielsweise um eine Steuerapparatur in einem VR-Spiel. An dieser Stelle sei auf die Literatur verwiesen, die genauer auf Interaktionstechniken für VR und AR eingeht (OHLENBURG, BROLL and LINDT, 2007, DÖRNER, GEIGER et al., 2013, LAVIOLA et al., 2017).

2.5 Bauwerksprüfung

2.5.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

„Pons pars viae“, die Brücke gehört zum Weg. Dieser Grundsatz beschreibt, abseits seines sprichwörtlichen Charakters, seit alters her die Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten für Bauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Die Vorschriften des Straßenrechts sind mithin auch für Brücken und „andere Ingenieurbauwerke“ verbindlich.

Genauere Regelungen finden sich im Grundgesetz, im Bundesfernstraßengesetz, den Straßengesetzen der Länder und im Bürgerlichen Gesetzbuch.

Das Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland legt in Artikel 90 die Eigentumsverhältnisse und Zuständigkeiten für Bundesautobahnen und sonstigen Bundesstraßen des Fernverkehrs fest. Demnach kann sich der Bund zur Erfüllung seiner Aufgaben einer Gesellschaft privaten Rechts bedienen. In Artikel 90 (3) heißt es: „Die Länder oder die nach Landesrecht zuständigen Selbstverwaltungskörperschaften verwalten die sonstigen Bundesstraßen des Fernverkehrs im Auftrage des Bundes.“ Demnach verwalten die jeweiligen Länder als Baulastträger die Bundesstraßen und Bundesautobahnen. Dabei ist zusätzlich das Bundesfernstraßengesetz (FStrG) zu berücksichtigen. Hier ist in § 5 (Träger der Straßenbaulast) geregelt, dass Gemeinden ab einer Einwohnerzahl von mehr als 80.000 Einwohnern die Träger der Straßenbaulast für die Ortsdurchfahrten im Zuge von Bundesstraßen sind. Dies bedeutet, sie sind für den Bau und die Unterhaltung der Ortsdurchfahrten von Bundesfernstraßen zuständig. Eine Gemeinde mit mehr als 50.000, aber weniger als 80.000 Einwohnern kann auf eigenes Verlangen nur mit Zustimmung der obersten Kommunalaufsichtsbehörde Baulastträger sein.

In § 4 FStrG, (Sicherheitsvorschriften) sind die Träger der Straßenbaulast dafür verantwortlich, dass ihre baulichen Anlagen allen Anforderungen der Sicherheit und Ordnung genügen. Behördliche Genehmigungen, Erlaubnisse sowie Abnahmen durch andere als die Straßenbehörden bedarf es nicht. In § 3 FStrG (Straßenbaulast) sind alle die mit dem Bau und der Unterhaltung der Bundesfernstraßen zusammenhängenden Aufgaben als Bestandteil der Straßenbaulast festgelegt.

Die recht ähnlichen Straßengesetze der Länder definieren die Straßenbaulast, wie beispielhaft im Straßen- und Wegegesetz des Landes Nordrhein-Westfalen formuliert: „Die Straßenbaulast umfasst alle mit dem Bau und der Unterhaltung zusammenhängenden Aufgaben. Die Träger der Straßenbaulast haben nach ihrer Leistungsfähigkeit die Straßen in einem, dem regelmäßigen Verkehrsbedürfnis genügenden, Zustand zu bauen, um- und auszubauen, zu erweitern oder sonst zu verbessern sowie zu unterhalten.“

In § 9 (2) heißt es weiter: „Beim Bau und bei der Unterhaltung der Straßen sind die allgemein aner-

⁴³ Diese Demo ist auch bekannt als die „Mother of all Demos“, mehr Informationen: <https://web.stanford.edu/dept/SUL/library/extra4/sloan/mousesite/1968Demo.html>

kannten Regeln der Technik, die Belange des Umweltschutzes, des Städtebaus, des öffentlichen Personennahverkehrs, der im Straßenverkehr besonders gefährdeten Personengruppen sowie des Rad- und Fußgängerverkehrs angemessen zu berücksichtigen. Weitere Regelungen zur Bau- und Unterhaltungslast können z. B. in Planfeststellungen, Planungsvereinbarungen, Eisenbahnkreuzungsgesetz- Vereinbarungen oder auch in Verträgen mit Privaten getroffen werden.“

Im nicht öffentlichen Bereich sind die Verpflichtungen eines Baulasträgers im Bürgerlichen Gesetzbuch, §§ 836 ff geregelt. So wird z. B. im § 836 BGB (Haftung des Grundstückbesitzers) die Pflicht zum Schadensersatz, bei Nichteinhaltung der Sorgfaltspflicht, dem Grundstückseigentümer zugeordnet. Hier heißt es: „Wird durch den Einsturz eines Gebäudes oder eines anderen mit einem Grundstück verbundenen Werkes oder durch die Ablösung von Teilen des Gebäudes oder des Werkes ein Mensch getötet, der Körper oder die Gesundheit eines Menschen verletzt oder eine Sache beschädigt, so ist der Besitzer des Grundstücks, sofern der Einsturz oder die Ablösung die Folge fehlerhafter Errichtung oder mangelhafter Unterhaltung ist, verpflichtet, dem Verletzten den daraus entstehenden Schaden zu ersetzen. Die Ersatzpflicht tritt nicht ein, wenn der Besitzer zum Zwecke der Abwendung der Gefahr die im Verkehr erforderliche Sorgfalt beobachtet hat.“ Der Grundstückseigentümer hat somit die Verkehrssicherungspflicht und damit verbunden die Pflicht zur Unterhaltung seines Bauwerks. Die nachfolgenden Paragraphen des BGB regeln in ähnlichem Wortlaut die Pflichten des Besitzers einer baulichen Anlage und die Pflichten von mit der Unterhaltung einer baulichen Anlage beauftragten Personen.

Die Landesbauordnungen haben – streng genommen – keine für Relevanz für Anlagen des öffentlichen Verkehrs einschließlich Zubehör, Nebenanlagen und Nebenbetrieben – jedoch mit Ausnahme von Gebäuden. In der Rechtsprechung finden sich jedoch gelegentlich vergleichende Betrachtungen mit den Regelungen der Landesbauordnungen als Maß für die Beurteilung der Ausübung der Pflicht zur Aufrechterhaltung von Sicherheit und Ordnung im Zusammenhang mit Verkehrsbauwerken.

So heißt es z. B. in der Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (Landesbauordnung 2018 – BauO NRW 2018) in § 3 (1): „Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu hal-

ten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden, dabei sind die Grundanforderungen an Bauwerke gemäß Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zu berücksichtigen. Anlagen müssen bei ordnungsgemäßer Instandhaltung die allgemeinen Anforderungen des Satzes 1 ihrem Zweck entsprechend dauerhaft erfüllen und ohne Mängel benutzbar sein.“

Allen Regelwerken gemein ist mithin der Grundsatz, dass der Eigentümer einer baulichen Anlage im Rahmen seiner Verkehrssicherungspflicht die Verantwortung und die Haftungsrisiken für deren ordnungsgemäßen Zustand hinsichtlich der Verkehrs- und Standsicherheit hat. Aus der hieraus folgenden Verpflichtung zur Instandhaltung ergibt sich als Teilaufgabenbereich die Überwachung von baulichen Anlagen mithilfe von (regelmäßigen) Bauzustandsprüfungen. Konkrete Anweisungen, wie dieser Verpflichtung nachzukommen ist, enthalten die Gesetze und Verordnungen nicht. Hierzu verweist die Rechtsprechung auf die allgemein anerkannten Regeln der Technik. Da z. B. die Norm DIN 1076, „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung“, unbestritten als „allgemein anerkannte Regel der Technik“ gilt, erhält sie somit über den (Um-)Weg von den gesetzlichen Vorschriften zur Rechtsprechung einen verpflichtenden Charakter.

Ein Nichteinhalten der beschriebenen Pflichten kann zur Strafverfolgung und bei Vorsatz oder grober Fahrlässigkeit bis zur persönlichen Haftung des mit dem Bau- und der Instandhaltung der Brücken- und Ingenieurbauwerke Beauftragten führen.

2.5.2 Regelwerke und Richtlinien

Zu unterscheiden sind der „Stand der Technik“ und die „Anerkannten Regeln der Technik“.

Der Stand der Technik beschreibt hierbei die Zusammenfassung aller technischen Möglichkeiten, die zum aktuellen Zeitpunkt vorhanden sind und auf wissenschaftlichen und technischen Erkenntnissen basieren. Hiermit soll sichergestellt werden, dass zum Zeitpunkt des Bau- oder Prüfvorhabens die derzeit beste und verfügbare Technik zum Einsatz kommt. Die anerkannten Regeln der Technik sind Regeln, die zur Planung, Ausführung und Unterhaltung von technischen Anlagen notwendig sind. Da-

mit diese Regeln als anerkannt gelten, müssen sie in der Wissenschaft als theoretisch richtig angesehen werden, sie müssen sich in der Praxis bewährt haben, von der Mehrheit der Fachleute anerkannt sein und angewendet werden. Hierbei können DIN-Normen als Ganzes oder auch nur in Teilen den genannten Anforderungen entsprechen. Inwieweit eine Richtlinie oder eine Norm dies erfüllt, ist für jedes Regelwerk im Einzelnen zu betrachten und zu beurteilen.

Als technische Grundlage zur Überwachung und Prüfung von Brücken- und Ingenieurbauwerken dient die DIN 1076 „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung“. In dieser Norm werden die Prüfung und Überwachung der Ingenieurbauwerke hinsichtlich der Standsicherheit, der Verkehrssicherheit und der Dauerhaftigkeit geregelt. Durch den in der DIN 1076 festgelegten Prüfturnus sollen auftretenden Mängel und Schäden erkannt und bewertet werden. Durch die Übermittlung an die entsprechenden, verantwortlichen Stellen sollen diese schnellstmöglich in die Lage versetzt werden, Maßnahmen einleiten zu können, um die Standsicherheit, die Verkehrssicherheit als auch die Dauerhaftigkeit der Bauwerke gewährleisten zu können. Sie gibt eine kurze Übersicht zum Bauwerksbuch als auch zur Bauwerksakte, in ihr sind die Prüf- und Überwachungszyklen einschließlich einer groben Handlungsanweisung zu den verschiedenen Materialien und Bauwerksteilen geregelt. Unter dem Punkt Begriffe gibt die DIN 1076 Auskunft über die verschiedenen Bauwerksarten, die in ihr geregelt sind und damit auch zu entsprechenden Vorgaben wie zu prüfen ist. Darüber hinaus werden in dieser Norm die Anforderungen an das Prüfpersonal festgelegt.

Entsprechend der DIN 1076 sind mindestens zu prüfen:

- Die Tragfähigkeit der Ingenieurbauwerke,
- Beschilderungen sind hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit, der Durchfahrts- und Breite sowie sonstigen Anforderungen,
- Gründungen,
- Massive Bauteile wie z. B. Mauerwerk, Stahlbeton- und Spannbetonbauteile,
- Stahl sowie andere Konstruktionen aus Metall,
- Holzkonstruktionen,
- Lager, Übergangskonstruktionen und Gelenke hinsichtlich ihrer Funktion sowie deren Zustand,

- Abdichtungen, Fahrbahnen und Entwässerungen,
- Wand- und Deckenverkleidungen,
- Schutzvorrichtungen,
- Korrosionsschutz von Stahlbauten und Stahlbauteilen auch in ihren Kontaktflächen zu anderen Materialien,
- Versorgungleitungen einschließlich ihrer Aufhängung.

Ebenfalls sind vermessungstechnische Kontrollen durchzuführen, hierbei sind die Lichtraumprofile und ggf. vorhandene geometrische Veränderungen zu messen und zu protokollieren.

Hinweise oder Vorgaben zur Auswertung des aufgenommenen Ist-Zustandes der Ingenieurbauwerke sind der DIN 1076 nicht zu entnehmen. Hierfür hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur die „Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken“ (RI-ERH-ING) erlassen. In dieser enthalten ist die „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076“ (RI-EBW-PRÜF). Die RI-EBW-PRÜF in Verbindung mit der ASB-ING, „Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten, Teilsystem Bauwerksdaten“, einschließlich eines dazugehörigen Beispielskatalogs für Schäden an Bauwerken, findet in den Verwaltungen der Bundesfernstraßen sowie in den Straßenbauverwaltungen der Länder Anwendung. Damit verfolgt die RI-EBW-PRÜF das Ziel, eine einheitliche Erfassung der Schäden zu gewährleisten und die Vergleichbarkeit der Prüfberichte in einer guten Qualität zu erlangen.

In der RI-EBW-PRÜF sind unter anderem die Teile Begriffsbestimmung zur Schaffung einer einheitlichen Kommunikation, Angaben zur Prüfung gemäß DIN 1076 sowie zur Prüfung von Holzbrücken und zur Bewertung von Schäden und Mängeln zu finden. Die Schadensbewertung wird durch eine Notengebung von 0 bis 4 geregelt, die mit einer entsprechenden Erklärung hinsichtlich der Aspekte der Standsicherheit, der Verkehrssicherheit sowie der Dauerhaftigkeit beschrieben werden. Unter Berücksichtigung der einzelnen Benotungen der jeweiligen Schäden wird unter Berücksichtigung der Schadensauswirkung der o. g. Aspekte eine Zustandsnote für das Bauwerk berechnet. Hierbei ergeben sich 6 Notenbereiche, die ebenfalls in den RI-EBW-PRÜF erläutert und definiert sind. Zur Erfassung

des Zustandes ohne den Einfluss der Bewertung der Verkehrssicherheit wird für jede Bauteilgruppe sowie das Teilbauwerk eine Substanzkennzahl ermittelt und ausgegeben.

Bei Anwendung der RI-EBW-PRÜF ergeben sich unter anderem Erleichterungen bei der Anwendung eines einheitlichen IT-Systems, der Vorgabe von Schadensbeispielen und der einheitlichen Auswertung der Ergebnisse einer durchgeführten Bauwerksprüfung. Hier werden ggf. Anpassungen bei der Verwendung von AR- und VR-Systemen notwendig, um auch bei deren Verwendung eine einheitliche Struktur zu erhalten.

In der ASB-ING, der „Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten“, sind Anweisungen zur einheitlichen Erfassung von Bauwerksdaten als auch deren Zustand festgelegt. Die ASB-ING unterteilt sich in die unterschiedlichen Daten zur Konstruktion, zur Prüfung und dem Zustand, Verwaltungsdaten und den Daten zum Sachverhalt sowie der Ablage von digitalen Daten. Bei der Verwendung oder Einführung einer Bauwerksprüfung mittels VR- und AR-Systemen sind hier entsprechende Änderungen und Ergänzungen hinsichtlich einer echten digitalen Eingabe (zum Beispiel Schadensangaben im Koordinatensystem) vorzunehmen.

Die ZTV-ING, „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“ gilt für den Bau und die Erhaltung von Ingenieurbauwerken gemäß der DIN 1076. Die in der ZTV-ING aufgelisteten Abschnitte enthalten Angaben zur vertraglichen Regelung für die Lieferung, die Prüfung, die Bauausführung sowie auch zur Abnahme und Abrechnung von Bau- und Erhaltungsmaßnahmen. Weiter enthält sie Richtlinien zur Planung und Ausschreibung, zur Bauvorbereitung und zur Durchführung von Baumaßnahmen. In ihren 10 Abschnitten sind Angaben zu den unterschiedlichsten Gewerken und Ausführungen zu finden, wie z. B. dem Grundbau, dem Massivbau, dem Stahlbau und Stahlverbundbau, aber auch Angaben zu Bauverfahren und Bauwerksausstattungen wie Fahrbahnübergänge, Lagern und Gelenken, Rückhaltesystemen und Entwässerung von Bauwerken.

Die „Richtzeichnungen für Ingenieurbauten“ (RiZ-ING) bilden die Grundlage zur Planung und Ausführung von Bauwerken. Die RiZ-ING dient damit unter anderem auch zur Kalkulation von Bauvorhaben und bietet für wiederkehrende, technische Aufga-

ben bewährte Lösungen. Die Richtzeichnungen wurden im Jahr 1972 eingeführt und seither fortlaufend überarbeitet und ergänzt. Die RiZ-ING ist alphabetisch sortiert und enthält technische Details z. B. zu Abdichtungen, der Ausbildung von Fugen, zu Lagern, Geländern etc. Die gesammelten Erfahrungen der vergangenen Jahre spiegeln sich auch in der Ausbildung der Bauwerke zur leichten Prüfbarkeit wider.

Zur verkehrsrechtlichen Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen gibt die RSA, „Richtlinie zur Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen“ einen Überblick, wenn Verkehrsflächen zum Zwecke von Arbeiten gesperrt oder Fahrbahnen eingeengt werden müssen. In ihr finden sich unter anderem verkehrsrechtliche Grundsätze, Hinweise zum Aufstellen von Verkehrszeichen, zur Beleuchtung von Verkehrsschildern, dem Vorgehen bei Arbeitsstellen von kürzerer Dauer sowie Regelpläne zum Absichern der Arbeitsstellen.

Das Gesetz zur Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit ist die Umsetzung der EG-Richtlinie 89/391/EWG des Rates vom 12. Juni 1989. Das Gesetz ist in sechs Abschnitte unterteilt und regelt die Pflichten des Arbeitgebers, aber auch die Pflichten und Rechte der Arbeitnehmer. Des Weiteren ist in diesem Gesetz eine gemeinsame deutsche Arbeitsschutzstrategie geregelt.

Der erste Abschnitt des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) – Allgemeine Vorschriften – besteht aus zwei Paragraphen, im Ersten werden die Ziele sowie der Anwendungsbereich definiert, im Zweiten werden Begrifflichkeiten festgelegt, wie z. B. in Abschnitt 1: „Maßnahmen des Arbeitsschutzes im Sinne dieses Gesetzes sind Maßnahmen zur Verhütung von Unfällen bei der Arbeit und arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren einschließlich Maßnahmen der menschengerechten Gestaltung der Arbeit.“ Ausgenommen von diesem Gesetz sind Hausangestellte in privaten Haushalten und Beschäftigte auf Seeschiffen und in den Betrieben, die dem Bundesberggesetz unterliegen. In Abschnitt (3) wird der Begriff Arbeitgeber definiert, dieser ist, im Sinne dieses Gesetzes, natürliche und juristische Personen sowie rechtfähige Personengesellschaften die Personen nach dem Absatz (2) des Arbeitsschutzgesetzes beschäftigen. Der zweite Abschnitt des Arbeitsschutzgesetzes regelt in 12 Paragraphen die Aufgaben der Arbeitgeber und gehört damit zu des-

sen Pflichten, erforderliche Maßnahmen zum Schutze des Beschäftigten bei der Arbeit zu treffen. Dabei hat er für eine geeignete Organisation Sorge zu tragen und die erforderlichen Mittel, die der Sicherheit und der Gesundheit des Beschäftigten dienen, bereitzustellen. Das Gesetz gibt in § 4 Grundsätze zur Organisation des Schutzes vor, hierbei steht die Gefährdungsminimierung an der Quelle im Vordergrund. Der Stand der Technik, der Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse sind hierbei zu berücksichtigen. In § 5 – Beurteilung der Arbeitsbedingungen – hat der Arbeitgeber eine Beurteilung der Gefährdungen für den jeweiligen Beschäftigten, die in Zusammenhang mit seiner Arbeit stehen, aufzustellen. D. h. der Arbeitgeber hat alle Belastungen und Beanspruchungen die im Zusammenhang mit der jeweiligen Tätigkeit zu ermitteln und gemäß § 6 des ArbSchG zu dokumentieren. In den §§ 7 bis 9 des ArbSchG regelt der Gesetzgeber unter anderem die Übertragung von Aufgaben auf den Beschäftigten, die Zusammenarbeit mehrerer Arbeitgeber und regelt den Umgang mit besonderen Gefahren. Die §§ 10 bis 12 legen die Organisation von Maßnahmen zur Ersten Hilfe, zur Brandbekämpfung und Evakuierung der Beschäftigten fest. Der Arbeitgeber muss den Beschäftigten nach § 11 die Möglichkeit zur regelmäßigen arbeitsmedizinischen Untersuchung geben. Nach § 12 hat eine ausreichende und angemessene Unterweisung durch den Arbeitgeber zu erfolgen. Die folgenden Abschnitte des Gesetzes gehen auf die Rechte und Pflichten der Beschäftigten ein, ermächtigen die Bundesregierung durch Rechtsverordnungen mit Zustimmung des Bundesrates vorzuschreiben, welche Maßnahmen die Arbeitgeber zu treffen haben und legen im fünften Abschnitt eine gemeinsame deutsche Arbeitsschutzstrategie fest.

Ein weiteres grundlegendes Gesetz zum Arbeitsschutz ist das Arbeitssicherheitsgesetz (ASiG), das sich anders als das Arbeitsschutzgesetz ausschließlich an die Arbeitgeber, Betriebsärzte und die Fachkräfte für Arbeitssicherheit wendet. Das Gesetz regelt die Organisation in Betrieben, Betriebsärzte und Fachkräfte für Arbeitssicherheit sind zu bestellen, die im Wesentlichen beraten, kontrollieren, Untersuchungen gemäß den berufsgenossenschaftlichen Vorschriften ausführen und bei der Organisation von Maßnahmen zur Ersten Hilfe mitwirken sollen.

Nach dem Handbuch „Bauwerksprüfung“ von Prof. Dr.-Ing. Martin MERTENS (MERTENS, 2015), be-

ruht das System des Arbeitsschutzes in Deutschland auf einem dualen System. Dabei gibt es nicht nur die staatlichen Vorschriften, sondern auch Vorschriften von nicht staatlichen Institutionen, wie z. B. die Träger der gesetzlichen Unfallversicherungen bzw. die Berufsgenossenschaften (BG). Die Aufgaben der gesetzlichen Unfallversicherung sind im Siebten Buch Sozialgesetzbuch – Gesetzliche Unfallversicherung – geregelt. Um dem in § 14 festgelegten Präventionsauftrag nachzukommen, haben Unfallversicherungsträger verbindliche, eigenständige Rechtsnormen, die Unfallverhütungsvorschriften (UVV), erlassen. Darunter zu finden sind unter anderem die Vorschriften und Regeln „Bauarbeiten“, „Winden-, Hub- und Zuggeräte“ eine Handlungsanweisung zum Umgang mit Leitern und Tritten sowie die Sicherheitsregeln „Brücken- Instandhaltung.“

Diese und weitere Regeln sollten künftig bei einer Bearbeitung in dreidimensionalen Systemen, aber auch in VR- und AR-System berücksichtigt werden und entsprechend angepasst werden. So können z. B. Verkehrszeichenpläne dreidimensional hinterlegt werden und sparen somit Zeit und Kosten. Einmal für jedes Bauwerk mit den entsprechenden Verkehrssituationen geplant und im System gespeichert, können digital und automatisiert Preise eingeholt und die ordnungsgemäße Positionierung der verkehrsregelnden Maßnahme durch den Bauwerksprüfer schnell kontrolliert werden. Aufstellungspunkte für Arbeitsbühnen, Rettungswege etc. können digital abgebildet und hinterlegt werden und können somit die Arbeitssicherheit erhöhen.

2.5.3 Anzahl der Bauwerke in Deutschland

Die Anzahl der Brückenbauwerke im Bundesfernstraßennetz beträgt zurzeit etwa 39.500 Brücken, diese sind je nach Bauart und Querschnitt in Teilbauwerke untergliedert. Demnach befinden sich im Bundesfernstraßennetz ca. 51.360 Brücken-Teilbauwerke mit einer Gesamtfläche von 30 Mio. m² und einer Gesamtlänge von 2.100 km, dies entspricht der Strecke von Flensburg bis Neapel.

Gemäß dem Bericht des Deutschen Institut für Urbanistik, „Ersatzneubau Kommunale Straßenbrücken“ aus dem Jahr 2013, befinden sich 66.714 Brücken mit einer Gesamtfläche von 27 Mio. m² und einer Gesamtlänge von 2.223 km in kommunaler Baulast. Um die Zahl der Straßenbrücken belastbar ermitteln zu können, wurden Daten aus einem geo-

grafischen Informationssystem ausgewertet. Damit kommt auf 1.200 Einwohner eine kommunale Straßenbrücke bzw. je 5,4 km² Gemeindefläche ein Brückenbauwerk.

Bei einer Umfrage des Arbeitskreises „Kommunaler Ingenieurbau Nordrhein-Westfalen“ (K-ING NRW) wurden im Jahr 2017 23 Städte und Gemeinden zur Anzahl der in ihrer befindlichen Baulast befragt. Demnach befinden sich allein in den 23 Städten und Gemeinden 3.827 Brücken mit einer Gesamtfläche von 1,1 Mio. m², 25 Tunnel, 7.300 Stützwände, 176 Verkehrszeichenbrücken, 142 Lärmschutzwände und 530 weitere Bauwerke.

Für eine Hochrechnung auf gesamt Nordrhein-Westfalen wurden die Mittelwerte entsprechend einer zugeordneten Kommunengröße der teilgenommenen Städte und Kommunen gebildet. Durch Addition der einzelnen Mittelwerte ergeben sich 32.785 Brückenbauwerke mit einer Gesamtfläche von 5,1 Mio. m².

In der Literatur wird die Gesamtzahl der in Deutschland befindlichen Brücken auf ca. 80.000 Brücken (MELHORN, 2007) bis hin zu 120.000 Brücken (NAUMANN, 2011) geschätzt. Entsprechend der Hochrechnung des Arbeitskreises K-ING NRW hätte NRW bezogen auf 120.000 Brücken einen Anteil von ca. 27 %.

Rechnet man den finanziellen Bedarf für das Jahr 2017 für den Ersatzneubau, die Sanierung, die Bauwerksprüfung und weitere Kosten aus der Umfrage des K-ING hoch, ergibt sich ein Bedarf für Gesamt-NRW von rund 1 Mrd. Euro.

Allein für die Bauwerksprüfung wurden demnach im Jahr 2017 innerhalb der 23 Städte und Gemeinden ein Budget von 700.000 Euro benötigt.

2.5.4 Bauwerke gemäß DIN 1076

Die DIN 1076 regelt unter dem Kapitel 3 „Begriffe“, welche Ingenieurbauwerke Bauwerke im Sinne dieser Norm sind und welche „Andere Bauwerke“ als Bauwerke, die nicht unter diese Norm fallen. Als Ingenieurbauwerke im Sinne dieser Norm gelten Brücken, Verkehrszeichenbrücken, Tunnel, Trogbauwerke, Stützbauwerke, Lärmschutzwände und sonstige Bauwerke. Sonstige Ingenieurbauwerke sind Bauwerke, für die ein Einzelstandsicherheitsnachweis erforderlich ist, wie z. B. Rohr- und Bandstraßenbrücken, Regenrückhaltebecken und Schachtbauwerke.

So trifft die Norm innerhalb der aufgezählten Bauwerke weitere Abgrenzungen und Definitionen. So sind Brücken die Überführung eines Verkehrsweges über einen anderen Verkehrsweg, wie z. B. die Gleisanlagen der Deutschen Bahn, eine Autobahn oder andere Straßen und Wege oder auch die Überführung eines Verkehrsweges über ein Tal oder Gewässer, wenn die lichte Weite rechtwinklig zwischen den Widerlagern gemessen 2,00 m oder mehr beträgt.

Verkehrszeichenbrücken sind Konstruktionen, an denen Schilder oder Zeichengeber ganz- oder teilweise über einem Verkehrsweg befestigt werden, einschließlich tragenden Konstruktionen mit einer ein- oder zweiseitiger Auskrägung.

Tunnel sind Bauwerke in geschlossener Bauweise, die unterhalb der Erd- oder Wasseroberfläche liegen und dem Straßenverkehr dienen. Zu den Tunnelbauwerken gehören Bauwerke in offener Bauweise ab einer Länge von 80 m. Des Weiteren gehören zu den Tunnelbauwerken teilabgedeckte unter- oder oberirdische Bauwerke, oberirdische Einhausungen von Straßen, Kreuzungsbauwerke mit anderen Verkehrswegen sowie Galeriebauwerke.

Trogbauwerke sind Stützbauwerke und/oder Grundwasserwannen, die aus Stützwänden mit einer geschlossenen Sohle verbunden sind. Trogbauwerke können auch Rampenbauwerke zur Ein- und Ausfahrt in einen Tunnel sein.

Stützbauwerke sind Konstruktionen, die gegenüber dem Erdreich (z. B. zum Abfangen eines Geländes), dem Straßenkörper oder dem Gewässer eine stützende Funktion aufweisen. Diese müssen im Sinne der DIN 1076 mindestens eine sichtbare Höhe von 1,50 m aufweisen.

Lärmschutzwände haben bei starken Geräuschentwicklungen durch den Verkehr eine lärmindernde Wirkung in der Nähe von Wohnsiedlungen etc. Diese müssen mindestens eine Höhe von 2,00 m besitzen.

Sonstige Bauwerke sind, wie oben beschrieben, Bauwerke, für die Einzelstandsicherheitsnachweise erforderlich sind.

Andere Bauwerke, die keine Bauwerke im Sinne der DIN 1076 sind, sind z. B. Durchlässe mit einer Öffnung oder einer lichten Weite, die kleiner als 2,00 m ist. Dazu gehören auch einfache Rohr- und Peitschenmasten, an denen Lichtsignalanla-

gen oder Verkehrszeichen angebracht sind. Aber auch Entwässerungsanlagen, Stützbauwerke, deren sichtbare Höhe kleiner als 1,50 m sind, Lärmschutzwände unter 2,00 m, Steilwälle, Erdbauwerke und Drahtgitterkörbe mit Steinfüllung gehören zu den „Anderen Bauwerken“ und unterliegen damit nicht der DIN 1076.

Ergänzend zur DIN 1076 zählen in der RI-EBW-PRÜF Gabionen mit einer Stützfunktion und einer Höhe ab 1,50 m sowie Gabionen mit sonstiger Funktion ab einer Höhe von 2,00 m zu den sonstigen Ingenieurbauwerken. Gemäß RI-EBW-PRÜF gehören Stützwände und/oder Stützzäune, wie Überflughilfen, zu den sonstigen Ingenieurbauwerken gemäß der DIN 1076, wenn sie auf einem Ingenieurbauwerk befestigt sind oder im Versagensfall in den Verkehrsraum fallen können.

Es ist im Einzelfall zu entscheiden, wie mit weiteren Bauwerken, die nicht zu den oben aufgezählten Bauwerken und Konstruktionen gehören, umgegangen werden sollte. Im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht sollten alle zur Straße gehörigen Bauwerke und Anlagen in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden.

2.5.5 Bauwerksüberwachung und Bauwerksprüfung nach DIN 1076

In der DIN 1076, Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung –, wird ein klar strukturierter Zyklus zur Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken vorgegeben. Hierbei wird wie folgt unterschieden:

Bei der laufenden Beobachtung (LB) sind gemäß DIN 1076 alle Brücken- und Ingenieurbauwerke im Rahmen der allgemeinen Überwachung des Verkehrswegenetzes laufend auf deren Verkehrssicherheit zu beobachten. Hierbei sollen zweimal pro Jahr die Bauteile von der Verkehrsebene und dem Geländeniveau aus auf das Vorhandensein erheblicher, offensichtlicher Mängel und Schäden beobachtet und protokolliert werden.

Die Besichtigung (B) ist eine regelmäßige und einmal jährlich stattfindende optische Begutachtung der Brücken- und Ingenieurbauwerke. Diese sollen von der Verkehrsebene und vom Geländeniveau aus, ohne die Zuhilfenahme größerer Hilfsmittel, wie z. B. Besichtigungsfahrzeuge, jedoch mit am Bauwerk ggf. vorhandenen Besichtigungseinrichtungen, auf offensichtliche Mängel und Schäden

kontrolliert werden. Dabei sollen außergewöhnliche Veränderungen am Bauwerk, das Fehlen oder Beschädigungen an Verkehrszeichen und Schutzeinrichtungen, Mängel und Verunreinigungen an Entwässerungseinrichtungen und Fahrbahnübergangskonstruktionen, Mängel und Schäden an Belägen, Anprallschäden, Betonabplatzungen oder auffällige Risse, Verformungen oder Verschiebungen der Bauwerke, schadhafte Veränderungen in Böschungen, Aus- und Unterspülungen am Bauwerk sowie Anlandungen protokolliert werden. Die Besichtigung ist in den Jahren durchzuführen, in denen keine Haupt- bzw. eine einfache Bauwerksprüfung erfolgt. Darüber hinaus sollen Besichtigungen nach besonderen Ereignissen, wie z. B. Hochwasserereignissen, Fahrzeuganprall, Erdbeben etc. auf Schäden, die die Stand- und Verkehrssicherheit beeinträchtigen können, kontrolliert werden.

Einfache Prüfung (EP) sind alle drei Jahre nach einer Hauptprüfung durchzuführen. Damit sind die Brücken- und Ingenieurbauwerke alle 6 Jahre einer Einfachen Prüfung zu unterziehen. Dabei wird eine Sichtprüfung, das heißt soweit vertretbar ohne Verwendung von Besichtigungsgeräten oder mit am Bauwerk ggf. vorhandenen Besichtigungseinrichtungen, eine erweiterte intensive Besichtigung durchgeführt. Auch sollen im Rahmen der Einfachen Prüfung Funktionsteile wie Lager, Gelenke, und Übergangskonstruktionen, aber auch die Befestigung von Bauteilen, wie z. B. von Leitungen, Lärmschutzwänden, Absturzeinrichtungen etc. mit einbezogen werden. Die Ergebnisse einer vorangegangenen Hauptprüfung sind bei einer Einfachen Prüfung zu berücksichtigen. Sind im Prüfbericht einer vorher durchgeführten Hauptprüfung Schäden mit „EP“ gekennzeichnet, so sind diese zu prüfen. Werden bei der Einfachen Prüfungen erhebliche Veränderungen gegenüber einer früheren Prüfung festgestellt oder werden bedenkliche Mängel und Schäden am Bauwerk vorgefunden, so ist die Prüfung ganz oder in Teilbereichen auf den Umfang einer Hauptprüfung auszuweiten.

Gemäß DIN 1076 hat die erste Hauptprüfung (H1) vor der Abnahme eines Bauwerkes stattzufinden. Die zweite Hauptprüfung (H2) ist dann vor Ablauf der Verjährungsfrist der Gewährleistung durchzuführen. Danach werden turnusmäßig alle 3 Jahre nach einer Einfachen Prüfung die Hauptprüfungen (H) ausgeführt. Auch hier wird wie bei einer einfachen Prüfung jedes Brücken- und Ingenieurbauwerk gemäß DIN1076 alle 6 Jahre einer Hauptprü-

fung unterzogen. Die Hauptprüfung ist eine sogenannte handnahe Prüfung aller Bauwerksteile, dabei sind auch schwer zugängliche Bereiche unter Zuhilfenahme technischer Hilfsmittel wie Arbeitsbühnen, Unterflurgeräte etc. zu überprüfen. Dabei sind Abdeckungen wie z. B. Schutzhauben von Seilverankerungen, Lagermanschetten, Schacht-abdeckungen, Verkleidungen etc. zu öffnen und ggf. vor der Prüfung sorgfältig zu reinigen, um verdeckte Mängel und Schäden besser auffinden zu können. Es ist zu überprüfen, ob der Bauwerkszustand mit den Vorgaben der Ausführungsplanung bzw. den Bestandsplänen sowie entsprechenden Normen und Regelwerken entsprechen. Bestehen Bedenken hinsichtlich der Tragfähigkeit, so ist eine Nachrechnung dieser zu veranlassen. Gründungen sind auf Setzungen, Kippungen, Aus- und Unterspülungen zu überprüfen. Bei Verdachtsfällen sind Messungen und Peilungen des Flussbettes sowie des Kolksschutzes durchzuführen. Bestehen bei massiven Bauteilen Bedenken hinsichtlich des Zustandes, sind ggf. zusätzliche zerstörungsarme Untersuchungen durchzuführen, hierbei ist z. B. die Druckfestigkeit, die Feststellung der Karbonatisierungstiefe, Chloridgehalte, die Betondeckung oder Rostgehalte der Bewehrung zu kontrollieren und zu protokollieren. Die Oberflächen von massiven Bauteilen sind auf Hohlstellen, freiliegende Bewehrung, Abplatzungen und Risse zu überprüfen, zu kartieren, ggf. zu fotografieren, um im Prüfbericht aufzunehmen.

Stahl- und Metallkonstruktionen sind auf Risse und Verformungen zu kontrollieren, Anschlüsse sind auf festen Sitz, der Korrosionsschutz der Stahlbauten sowie aller Anbau-, Zubehör und Ausrüstungsteile ist zu überprüfen. Schweißnähte sind zu sichten, bei Verdacht auf Mängel und Schäden sind diese zu prüfen. Alle losen oder beschädigten Niete und Schraubverbindungen, Risse in Schweißnähten sowie alle Mängel und Schäden sind eindeutig zu markieren und zu dokumentieren.

Ingenieurbauwerke sind auf feuchte Stellen zu untersuchen. Abdichtungen und Fugen sind auf Risse, Blasenbildungen, Hohlstellen, Ausbrüche, nicht planmäßige Absätze und Undichtigkeiten zu prüfen.

Zugrunde gelegte Lichtraumprofile sind nachzumessen, werden geometrische Veränderungen an den Bauwerken vermutet, sind diese durch vermessungstechnische Kontrollen zu prüfen. Ggf. sind messtechnische Kontrollprogramme über einen längeren Zeitraum aufzustellen.

Holzkonstruktionen sind gemäß RI-EBW-PÜF jährlich einer Hauptprüfung zu unterziehen. Dabei sind insbesondere tragende Teile auf Verformungen, Verbindungen auf festen Sitz, Druck beanspruchte, gestoßene Flächen auf korrektes Aufeinandersitzen zu überprüfen. Weitergehend sind Bauteilstöße und Risse auf das Eindringen von Feuchtigkeit, Klebefugen, zu kontrollieren. Verkehrsflächen sind auf eine mögliche Rutschgefahr zu kontrollieren. Alle Teile sind darüber hinaus auf Fäulnis, Befall durch Holzschädlinge, Verschleißerscheinungen sowie einen ggf. vorhandenen Oberflächenschutz zu überprüfen.

Prüfung aus besonderem Anlass oder auch Sonderprüfungen (SP) sind außerplanmäßige Prüfungen. Diese können nach Unwettern, Hochwasser, Erdbeben, Verkehrsunfällen oder auch anderen den Bauwerkszustand beeinflussenden Ereignissen durchgeführt werden. Ein Ersatz für eine Haupt- oder Einfache Prüfung stellt die Sonderprüfung nicht dar, da hierbei ggf. nur betroffene Bauteile überprüft werden.

Prüfung nach besonderen Vorschriften sind bei elektrischen Anlagen oder maschinellen Einrichtungen erforderlich. Diese unterliegen anderen Normen und Vorschriften und sind entsprechend den darin gemachten Vorgaben zu überprüfen. Hierbei ist durch den Bauwerksprüfer zu kontrollieren, ob die durch Dritte durchgeführten Prüfungen an elektrischen Anlagen oder maschinellen Einrichtungen durchgeführt worden sind. Für den Betrieb als auch die Überwachung dieser Anlagen sind besondere Akten zu führen.

Objektbezogenen Schadensanalysen (OSA) sind eine weitergehende Möglichkeit zur Erfassung, Auswertung und Bewertung von Mängeln und Schäden, eine zusätzliche und über den Umfang einer wie oben beschriebenen Bauwerksprüfung hinausgehende Untersuchung von Ingenieurbauwerken. Der Leitfaden OSA ist ein Teil der vom Bundesministerium herausgegebenen und eingeführten „Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken“.

2.5.6 Prüfmethoden

Die klassischen, konventionellen Methoden zur Durchführung einer handnahen Prüfung sind das Abklopfen von Oberflächen mit einem Hammer zur Feststellung von Hohlstellen, Inhomogenität in verschiedenen Materialien sowie zum Ablösen von losen

Materialteilen. Das Messen von Rissen, Verschiebungen und Verformungen und Spaltöffnungen. Die Analyse von Rissverläufen, Rissbreiten und Risstiefen sowie deren Entwicklung in Bezug auf die entsprechenden Einwirkungen auf das Bauteil bzw. das Bauwerk, der Temperatur, der Bauteilfeuchte sowie das Umgebungsklima gehören zu den wesentlichen Untersuchungen Aufgaben des mit der Prüfung beauftragten Ingenieurs. Zur Messung werden Rissbreitenkarten, Risslupen sowie geeignete Fühlerlehren angewendet. Das Messen von Verformungen und Verschiebungen, wie z. B. bei der Messung von Öffnungsspalten von Fahrbahnübergängen, oder das Messen von Gleit- und Kippspalten in Lagern sind mit Plausibilitätskontrollen verbunden. Hier wird unter anderem ein Vergleich mit vorangegangenen Messungen vorgenommen.

Auch sind die minimalen und maximalen Durchfahrthöhen und -breiten aufzunehmen, hierbei bedient man sich handelsüblichen Laser-Entfernungsmessgeräten, deren Genauigkeit im Millimeterbereich liegen sollten. Die Kontrolle der Verbindungsmittel wie Niete, Bolzen oder Schrauben kann durch das Anschlagen mit einem Hammer überprüft werden. Gemäß dem Handbuch Bauwerksprüfung kann ein unerwünschtes Spiel einer Verbindung einfach festgestellt werden, indem man beim Anschlagen mit dem Hammer einen Finger neben das Verbindungsmittel legt, um so Verbindungsspiele, die nicht mit dem Auge wahrgenommen werden können, festzustellen. Schweißnähte werden visuell auf Schädigungen untersucht, sehr feine Risse lassen sich durch das Farbeindringverfahren sichtbar machen. Hierbei handelt es sich um ein Mittel, das auf den Riss gesprüht wird, um diese sichtbar machen.

Chemische Verfahren zur Ermittlung der Karbonatisierungstiefe oder auch zur Bestimmung der Chloridkonzentrationen werden nur bei Bedenken bei Mängeln und Schäden an massiven Bauteilen eingesetzt oder aber bei der Durchführung einer objektbezogenen Schadensanalyse.

Treten bei einer Hauptprüfung Schäden auf, deren Ursache nicht bestimmt werden kann, bedient man sich den zerstörungsfreien Prüfverfahren. Hierbei kann z. B. die Betonqualität unter zur Hilfenahme eines Rückprallhammers eingeschätzt werden. Zerstörungsfreie Verfahren sind z. B. das Ultraschallechoverfahren, das Impact-Echo-Verfahren, Radar oder auch die Infrarotthermografie.

Aber auch die Entnahme von Bohrkernen im Beton, die Messung der Holzfeuchte oder auch das Bohrwiderstandsverfahren sind Methoden zur Erfassung des Ist-Zustandes von Bauwerken.

2.5.7 IT-Programme

Zur Erfassung von Bauwerksdaten und/oder Schäden an Bauwerken gibt es derzeit die unterschiedlichsten IT-Programme. Neben dem Programm SIB-Bauwerke gibt es Programme wie LOGO-Bauwerke, das Bauwerksmanagementsystem Baudat32 oder auch die Monitoring-App. Allen gemein ist die Erfassung von Informationen und Daten aus der Bauwerksprüfung und es sollen die Ingenieure bei ihrer Arbeit unterstützt werden. Darüber hinaus sollen die Straßenbauverwaltungen die Ergebnisse einer Bauwerksprüfung zur Haushalts- und Erhaltungsplanung nutzen können.

So ist beispielsweise das Programm SIB-Bauwerke Eigentum der Straßenbauverwaltung von Bund und Ländern. Das Einführen der RI-EBW-PRÜF als auch der ASB durch den Verkehrsminister führte dazu, dass die digitale Erfassung nach DIN 1076 mit dem Programm SIB-Bauwerke zu einem bundesweit verbreiteten Standard geworden ist und nicht nur in Straßenbauverwaltungen zum Einsatz kommt. Die Struktur als auch der Umfang der Bauwerksdaten wird durch die ASB-ING, „Anweisung zur Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten“ festgelegt und stellt somit die Grundlage einer IT-unterstützten Verwaltung der Daten dar. Bei künftigen dreidimensional basierten Programmen sowie der Einführung von VR- und AR-Systemen sind hier ggf. Anpassungen und Ergänzungen notwendig.

Global betrachtet sollten die Programme untereinander kommunizieren können, um ein modernes Verkehrslenkungssystem, in Bezug auf die erfassten Schäden sowie deren Auswirkung auf die Stand- und Verkehrssicherheit der Bauwerke, zu erhalten. Auch sind bei der Herstellung solcher Programme die Möglichkeiten der Kommunen zu berücksichtigen. Ein einfacher, kostengünstiger Zugang ermöglicht ein deutschlandweites Gesamtbild, um den ganzheitlichen Bestand und Zustand der Brücken- und Ingenieurbauwerke zu erhalten. Z. B. kann ein globales IT-System, das anzeigt, wann und wo Bauwerksprüfungen durchgeführt werden müssen, Kapazitäten bündeln und Kosten einsparen. So können beispielsweise mehrere Bauwerke, die einen

Verkehrsweg über einen Streckenabschnitt der Deutschen Bahn führen, ggf. innerhalb einer Sperrpause geprüft werden. Auch bei der Planung von Ersatzneubauten könnten IT-Systeme hilfreich sein, so könnten auf einer Seite Baustellen angemeldet und organisiert werden. Dass dann in der gleichen Zeit Baumaßnahmen durch z. B. Land, Kommune und Bahn stattfinden, könnte vermieden werden und damit die Staubildung aufgrund von Baustellen umgangen werden. Diese Möglichkeiten seien hier nur am Rand erwähnt und sollten bei der Planung neuer IT-Programme künftig berücksichtigt werden.

2.5.8 Anforderungen an Bauwerksprüfer

Gemäß der Broschüre „Bauwerksprüfung nach DIN 1076 – Bedeutung, Organisation, Kosten“ (Anon., 2013) hilft ein verwaltungsexterner Ingenieur mit seinem Sachverstand, die hoheitliche Aufgabe der Bauwerksprüfung technisch zu erfüllen. So besteht ein privatrechtliches Werkvertragsverhältnis, mit der Folge, dass der externe Prüfer gegenüber der Straßenbauverwaltung für Schäden aufgrund seiner fehlerhaften Leistung haftet. Die Straßenbauverwaltung hat dem Bürger gegenüber für die Verkehrssicherheit einzustehen.

Da in jedem Fall ein Restrisiko bei der Straßenbauverwaltung verbleibt, muss diese neben den haushalts- und vergaberechtlichen Prüfpflichten auch die Qualifikation und Aufgabenerledigung bei der Vergabe der Bauwerksprüfung an externe Büros entsprechend prüfen und kontrollieren.

Dementsprechend hat die Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 durch einen erfahrenen, sachkundigen Ingenieur zu erfolgen, der auch die statischen und konstruktiven Verhältnisse, gerade in Bezug auf vorhandene Schäden am Bauwerk, beurteilen kann. Die Bauwerksprüfung stellt damit ein grundlegendes Element eines guten Qualitätsmanagements der Bauwerkserhaltung dar und ist somit ein wesentlicher Baustein in der Sicherheitsphilosophie der Bauwerke.

Die Sachkunde eines mit der Bauwerksprüfung beauftragten Ingenieurs kann wie folgt beschrieben präzisiert werden: Die Person sollte ein abgeschlossenes Hochschulstudium im Bauingenieurwesen mit der Vertiefungsrichtung des konstruktiven Ingenieurbaus besitzen. Sie sollte eine mindestens 5-jährige Berufserfahrung im Brückenbau bzw. im konstruktiven Ingenieurbau besitzen. Die mit der

Prüfung beauftragte Person muss die einschlägigen Gesetze und Vorschriften kennen. Darüber hinaus gehören eine gute körperliche und gesundheitliche Verfassung gerade im Hinblick auf eine gute Hör- und Sehfähigkeit sowie Schwindelfreiheit zu den Grundvoraussetzungen. Die Person darf weiterhin keine Probleme bei der Arbeit in engen und dunklen Räumen besitzen.

Damit ist das Aufgabenspektrum eines mit der Bauwerksprüfung zu beauftragenden Ingenieurs sehr vielfältig, er muss sich nicht nur mit den unterschiedlichsten Konstruktionen und Materialien sowie deren Eigenschaften auskennen, er muss die unterschiedlichsten, einschlägigen Gesetzmäßigkeiten, Normen und Vorschriften kennen, er muss die unterschiedlichsten Messtechniken sowie deren Handhabung beherrschen und er muss in einer guten körperlichen und gesundheitlichen Verfassung sein. Des Weiteren muss er bei Beteiligung Dritter, wie z. B. die Deutsche Bahn, Wasser- und Schifffahrtsbehörden, deren Vorgänge und Abläufe kennen, um eine Bauwerksprüfung im Vorfeld zu planen und sich entsprechend sicher und ordnungsgemäß im Sinne der Vorschriften Dritter bei der Ausführung der Prüfung verhalten zu können.

2.5.9 Organisation und Ablauf einer Bauwerksprüfung

Die Organisation der Straßenbauverwaltungen ist in Deutschland unterschiedlich gestaltet und geregelt. So sind die Straßenbauverwaltungen der Länder als Baulastträger verantwortlich für eine große Anzahl von Brücken- und Ingenieurbauwerken. So liegen die Bauwerke im Zuge von Landesstraßen in der Baulast der Länder, hingegen die Bauwerke im Zuge von Bundesfernstraßen in der Baulast des Bundes. Allerdings beauftragt der Bund die Länder mit der Verwaltung seiner Bauwerke, da er keine eigenen Behörden zur Verwaltung der Brücken- und Ingenieurbauwerke besitzt. Auch kommt es vor, dass Länder die Prüfung von Brücken- und Ingenieurbauwerken anderer Verwaltungen, im Rahmen einer Verwaltungsvereinbarung, übernehmen. Die Organisation der Prüfung von Brücken- und Ingenieurbauwerken ist in den Straßenbauverwaltungen ganz unterschiedlich strukturiert. So wird die Durchführung der Haupt- und einfachen Prüfung in den verschiedenen Bundesländern zentral oder dezentral organisiert, auch ist eine Kombination aus zentraler und dezentraler Organisation möglich. D. h. es werden z. B. die Hauptprüfungen durch eigenes

Personal und die einfachen Prüfungen durch externe Ingenieurbüros durchgeführt. Auch in den Kommunen sind unterschiedliche Organisationsstrukturen vorzufinden, dies ist unter anderem von der Größe der jeweiligen Kommune, aber auch von der Anzahl der Bauwerke innerhalb einer Kommune abhängig.

Die Qualität und der Verlauf einer Bauwerksprüfung hängen im Wesentlichen von einer guten Vorbereitung sowie der Qualität der vorliegenden Bauwerksdaten ab. Dabei ist es egal, ob die Prüfung durch eigenes Personal oder Büros durchgeführt wird. Bewirbt sich ein Büro im Rahmen einer Ausschreibung, so muss die jeweilige Straßenbauverwaltung alle erforderlichen Informationen vorab zur Verfügung stellen. Dabei sind nicht nur die Informationen zum Bauwerk, sondern auch die Lage sowie die gegebenen Sachverhalte von grundlegender Wichtigkeit. Wie sind die Untersichten, Pfeiler, Stützen und Wiederlager erreichbar oder wie sind die Zugänglichkeiten von Innenräumen von Hohlkastenbrücken oder Pylonen? Hierbei muss der Kalkulator erkennen können, ob und welche Arbeitsbühnen eingesetzt werden müssen oder ob ggf. der Einsatz von Booten notwendig wird. Sind Dritte wie z. B. Verkehrssicherer oder die Deutsche Bahn in die Planung und somit die Kalkulation einzubeziehen und deren Vorgaben zu berücksichtigen? Sinnvoll kann auch eine Ortsbesichtigung im Vorfeld zur Abgabe eines Angebotes und zur weiteren Planung einer Bauwerksprüfung sein, dies ist aber aufgrund verschiedenster Faktoren nicht immer möglich.

Die von den Verwaltungen i. d. R. vorliegenden Bauwerksbücher geben alle nötigen Auskünfte zum Bauwerk, sofern dieses ordnungsgemäß angelegt und gepflegt werden. Darin enthalten sind unter anderem Angaben zu Lage des Bauwerks ggf. mit Übersichtskarte und Foto, die Bauwerksart mit Aussagen zu den Hauptabmessungen, dem Querschnitt, Angaben zu Stützweiten sowie dem statischen System. Weiter sind in den Bauwerksbüchern Angaben zur Ausstattung wie Lager, Fahrbahnübergangskonstruktionen, Kappen, Schutzrichtungen sowie zu Abdichtungen und Belägen zu finden. Auch sollten Angaben zur Entwässerung, evtl. vorhandenen Leitungen, maschinellen Einrichtungen oder zur Beleuchtung und Beschilderung in den Büchern abgelegt sein. Wichtig sind auch Angaben zu Vorspannung, Bewehrungsverläufen, Seilen und Verankerung, aber auch zum aufgebrachtten Korrosionsschutzsystem und sollten zu finden sein. Ggf. vorhandene Bestandspläne geben weite-

re Auskünfte zu den jeweiligen Bauwerken. Wird ein Bauwerksbuch regelmäßig aktualisiert und gepflegt, finden sich darin auch Angaben zu durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen und vorangegangenen Bauwerksprüfungen.

So setzt sich die Organisation im Wesentlichen aus den folgenden Aufgaben zusammen, so muss ein Jahresprogramm zu Prüfung von Brücken- und Ingenieurbauwerken zusammengestellt, ausgeschrieben und beauftragt werden. Weiteren Leistungen wie z. B. das Anmieten von Geräten, das Freischneiden von Bewuchs, Maßnahmen zum Arbeitsschutz müssen ggf. abgestimmt und beauftragt werden. Auch die Fort- und Weiterbildung der mit der Bauwerksprüfung beauftragten Personen darf dabei nicht unberücksichtigt bleiben und muss bei der Jahresplanung Berücksichtigung finden.

Bei der Durchführung der Bauwerksprüfung müssen die entsprechenden Unterlagen, wie z. B. Bestandspläne, Prüfberichte vorangegangener Prüfungen, geordnet und vollständig vorliegen. In einem weiteren Schritt ist zu kontrollieren, ob z. B. die ggf. erforderliche Verkehrssicherung aufgebaut oder bei Arbeiten im Gleisbereich alle notwendigen Maßnahmen gemäß den Vorgaben der Deutschen Bahn durchgeführt wurden. Die Sicherheit im Rahmen einer durchzuführenden Bauwerksprüfung steht dabei an erster Stelle. Dementsprechend müssen die mit der Prüfung beauftragten Personen ihre persönliche Schutzausrüstung auf deren Funktion kontrolliert und angelegt haben. Die eigentliche Durchführung der Überwachung und Prüfung der Brücken- und Ingenieurbauwerke erfolgt im Wesentlichen durch die Inaugenscheinnahme des Bauwerks, dem Abklopfen von Oberflächen, dem Öffnen von Hohlstellen, Durchführung verschiedenster Messungen am Bauwerk sowie der ggf. notwendigen Entnahme von Materialproben. Stahl- und Metallkonstruktionen sind hinsichtlich des Korrosionsschutzes, den erforderlichen Schichtdicken, auf mechanische Beschädigungen oder Abplatzungen zu kontrollieren und ggf. eine Einstufung der verschiedenen Rostgradstufen vorzunehmen. Verbindungen müssen auf deren festen Sitz, Schweißnähte auf Beschädigungen und Risse überprüft werden. Alle Schäden müssen entsprechend aufgenommen, fotografisch festgehalten und kartiert werden. Dabei müssen die Schäden in der Örtlichkeit eingemessen, die Längen, Breiten und Tiefen z. B. von Abplatzungen oder Rissen aufgemessen und beschrieben werden.

So werden von den Bauwerksprüfern z. B. bei der Prüfung von Oberflächen folgende Merkmale beachtet und bei der Prüfung berücksichtigt, es wird auf Verschmutzung und Beschmierungen der Oberflächen geachtet, sind Fremdstoffe oder Rückstände vorhanden, hat eine Abwitterung bzw. Zerstörung der Oberflächen stattgefunden, wie stark ist der Grad der Abwitterung oder Zerstörung, sind Kiesnester oder Durchfeuchtungen vorzufinden, gibt es Ausblühungen, Wasseraustritte oder Stalaktitenbildungen, sind Rödeldrahtreste bei der Herstellung in der Schalung und damit im Beton verblieben, gibt es Rostflecken, freiliegende Bewehrungen, wie ist der Zustand der freiliegenden Bewehrung, sind Risse vorhanden sind mechanische Beschädigungen oder Brandschäden erkennbar. All dies sind z. B. Merkmale, auf die ein Bauwerksprüfer zu achten, bei einer Schädigung aufzunehmen und zu bewerten hat. So kann ein Bauwerkprüfer beim Abklopfen von Oberflächen allein durch unterschiedliche Klangbilder Hohlstellen oder Inhomogenitäten feststellen.

Im Rahmen der Nachbereitung werden alle aufgenommenen Schäden gesichtet und den entsprechenden aufgenommenen Fotos werden Schäden zugeordnet. Danach werden, soweit nicht bereits vor Ort geschehen, die Schäden in ein DV-Programm wie z. B. SIB-Bauwerke eingegeben und die entsprechenden Fotos eingefügt. Bei der Eingabe der Schäden muss der Prüfer eine Bewertung der Schäden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Standsicherheit, die Verkehrssicherheit als auch auf die Dauerhaftigkeit durchführen. Durch die in der RI-EBW-PRÜF getroffenen Regelungen ist eine bundeseinheitliche und vor allem EDV-taugliche Erfassung und Bewertung von Mängeln und Schäden, die bei einer Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 festgestellt wurden, möglich. Im Anhang der RI-EBW-PRÜF steht zur Bewertung der aufgenommenen Schäden ein umfangreicher Schadensbeispielkatalog zur Verfügung. Die Ermittlung der Zustandsnote erfolgt nach einem festgelegten Algorithmus. Der Bauwerksprüfer kann anschließend Maßnahmen zur Beseitigung der Mängel- und Schäden empfehlen und diese mit einer Kostenschätzung zur Beseitigung der Mängel- und Schäden sowie Skizzen der aufgenommenen Schäden hinterlegen. Liegt ein Schaden vor, der die Standsicherheit und/oder die Verkehrssicherheit gravierend beeinflusst, müssen Sofortmaßnahmen gemeinsam mit der in der jeweils zuständigen Behörde verantwortlichen Person eingeleitet werden. Dies kann z. B. das

Sperren von einzelnen Fahrspuren oder das Sperren einer ganzen Brücke bedeuten. Kleinere Reparaturmaßnahmen können direkt im Nachgang einer Bauwerksprüfung beauftragt werden, größere Instandsetzungen müssen wiederum genau geplant und ausgeschrieben werden. Der Bauwerksprüfer steht somit im ständigen Dialog mit seinem Auftraggeber und tauscht sich von der Organisation über die Ausführung und Dokumentation bis hin zu deren im Anschluss folgenden Maßnahmen ständig aus.

2.6 Zusammenfassung aus dem Stand der Technik

Im Stand der Technik wurde aufgezeigt, dass sowohl in der Wirtschaft als auch Wissenschaft Tools und Lösungen vorhanden sind, die teilweise zur Projektumsetzung beitragen können. Allerdings handelt es sich bei den aufgezeigten Ansätzen aus der Wirtschaft um gekapselte Anwendungen für bestimmte Zielgruppen. Spezielle Anwendung oder Lösung für die digitale Unterstützung des Brückenprüfungsprozesses fehlen gänzlich.

Daher soll in diesem Forschungsprojekt eine maßgeschneiderte Anwendung entwickelt und bereitgestellt werden, basierend auf dem Wissen der Projektpartner.

Die Wahl der Entwicklungsumgebung, insbesondere hinsichtlich des Demonstrators ist wichtig, da die Entwicklung der Anwendung für mehrere visuelle Ausgabemedien erfolgen soll. Im Projekt wird die Unity3D Pro Game Engine sowohl für die VR- als auch AR-/MR-Prototypen verwendet, da diese (gegenüber vergleichbaren Umgebungen) die folgenden Vorteile bietet:

- Import bzw. Anbindung verschiedener 3D-Modell-Austauschformate
- Aufrufen der Modelle bei der Nutzung der Anwendung (load on runtime)
- Adaptive Entwicklung in der C#-Programmiersprache
- Integration von Plugins für optimierten Workflow
- Native Unterstützung aller im Projekt benötigten Ein-/Ausgabemedien und -Frameworks, wie AR-/MR-/VR-Brillen und Controller

Da die Entwickler der Game Engines den Bedarf an Lösungen für Architektur, Ingenieurwesen, Kons-

truktions- und Maschinenbau ebenfalls erkannt haben, gibt es bereits heute eine Vielzahl an Plugins für Unity3D, die genutzt werden können.

Zudem wird die Auswahl der Hardware für den AR-/MR-Bereich diskutiert, die in bzw. an der Brücke eingesetzt werden soll. Verglichen werden die erläuterten Geräte mit aktuellen Tablets wie dem iPad Pro, die Motion-Tracking Technologien integriert haben. Eine Anforderung an die Hardware ist das 6 DoF-Motiontracking für die zentimetergenaue Überlagerung von Inhalten wie bspw. Brückenschäden auf dem Gerätedisplay. Dadurch können Schäden mit 3D-Koordinaten verortet werden.

Bei der AR-/MR-Hardware sind bzgl. Formfaktor die Head-Worn-Device den Brillen vorzuziehen. Als HWD empfiehlt sich derzeit exemplarisch die Microsoft HoloLens 1 oder 2, da diese zum aktuellen Zeitpunkt die modernste, am Markt verfügbare Technologie darstellt. Andere Geräte vom Typ OST liefern nicht die gleiche Trackingqualität oder sind eingeschränkt verfügbar. Geräte mit Brillen-Formfaktor sind weniger geeignet, da diese entweder eingeschränkt verfügbar sind, keine OST-Technologie bieten oder 6 DoF-Motion-Tracking fehlt.

3 Anforderungsanalyse in Bezug zum Forschungsprojekt

Ziel der Anforderungsanalyse ist es, systematisch zu erbringenden Leistungen und Eigenschaften des Unterstützungssystems für die Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität zu ermitteln, zu strukturieren und zu prüfen. Das Ergebnis der Anforderungsanalyse wird in einem Lastenheft dokumentiert. Alternativ resultiert bei der agilen Entwicklung aus den Ergebnissen ein Product Backlog.

Die Durchführung einer Anforderungsanalyse wird beispielsweise von der IEEE⁴⁴, IIBA⁴⁵, IREB⁴⁶ oder beim CMMI⁴⁷ des Software Engineering Institute der Carnegie Mellon Universität beschrieben.

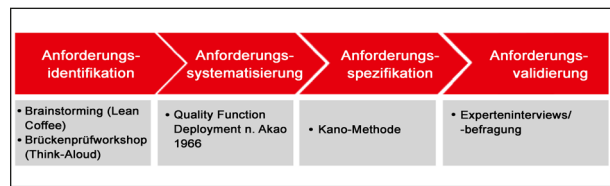


Bild 14: Anforderungsanalyse für das Unterstützungssystem

In genannten Vorgehensmodellen existieren die folgenden Prozesse zum Lastenheft und agilen Methode. Dabei werden Anforderungen gesammelt und durch die Analyse ein gemeinsames Verständnis hergestellt. Die Anforderungen werden textlich oder in Modellen dokumentiert und spezifiziert. Im Anschluss der Anforderungsanalyse wird eine Validierung der Ergebnisse vorgenommen.

Die unmittelbar beteiligten Interessengruppen des vorliegenden Forschungsvorhabens sind Brückenverantwortliche, erfahrene Bauwerksprüfer (erfahrene Ingenieure, welche die handnahe Inspektion durchführen), BIM-Planer (Ersteller des digitalen Bauwerksmodells der Brücke) und Monitoringspezialisten (Planung, Installation, Messung und Auswertung) sowie Bauinformatiker und Spezialisten aus dem Bereiche erweiterter und virtueller Realität.

Zur Ermittlung der Anforderungen an das Unterstützungssystem für die Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität wurden die folgenden Schritte gemäß Bild 14 durchgeführt.

3.1 Anforderungsidentifikation

Im Rahmen der Identifikation der Anforderungen an das Unterstützungssystem für die Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität wird ein modifiziertes Brainstorming mit dem Konsortium durchgeführt. In einem zweiten Schritt erfolgt eine demonstrative Bauwerksprüfung als Feldversuch, welcher für eine Prozessbegleitung Anwendung findet.

3.1.1 Brainstorming (Lean Coffee)

Die Brainstorming-Session dient dabei vorwiegend dazu, die Forschungsinhalte und Anforderungskomponenten aus der Brille der Bauinformatik und virtuellen/erweiterten Realität zu beleuchten. Die Prozessbegleitung der Bauwerksprüfung im Feld-

⁴⁴ Institute of Electrical and Electronics Engineers

⁴⁵ International Institute of Business Analysis

⁴⁶ International Requirements Engineering Board

⁴⁷ Capability Maturity Model Integration

versuch ermöglicht es, die reale Praxis, das eigentliche Handwerk und insbesondere auch die Umgebungsbedingungen sowie detaillierten Abläufe einer Bauwerksprüfung zu berücksichtigen.

Die Methode Brainstorming wurde von Alex F. Osborn 1939 erstmalig beschrieben. Charles Hutchison Clark modifizierte diese Methode zur Ideenfindung, sodass im Ergebnis ein Verfahren zur Erzeugung von neuen, ungewöhnlichen Ideen in einer Gruppe von Menschen zur Verfügung stand. Im Zuge dieser Anforderungsidentifikation wurden Elemente des Brainstormings mit der Lean-Coffee-Methode kombiniert. Das erste öffentliche bekannte Lean Coffee wurde von Jeremy Lightsmith und Jim Bensen, zwei amerikanischen Agile Coaches, 2009 in Seattle, USA durchgeführt. Der Name geht auf die Prinzipien des Lean Thinking – mit individuellem Lernen, Eigenverantwortung und Wissensaustausch – bei einer wünschenswerten Coffee Shop Atmosphäre zurück. Zur Umsetzung dieses Vorgehens erfolgte ein persönliches Treffen zum Anforderungsworkshop. Dieser unterteilte sich in zwei Phasen. Zunächst wurden verschiedene Forschungsergebnisse mit korrespondierenden Inhalten zum Unterstützungssystem für die Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität vorgestellt. Ziel dabei war es, ein Gefühl und ein allgemeineres Verständnis für die Technologien zu gewinnen.

In einem zweiten Schritt konnte dann auf Grundlage dieser gemeinsamen Wissensbasis die Kreativphase umgesetzt werden. Hierzu sind die jeweiligen Zielvorstellungen der Module des Unterstützungssystems für die Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität vorgestellt worden, woraus sich ein technisches Brainstorming zu den Anforderungen ableitete.

3.1.2 Brückenworkshop (Think-Aloud)

Der Brückenworkshop beschreibt methodisch die Durchführung einer demonstrativen Bauwerksprüfung als Feldversuch. Bauwerksprüfer ermöglichten den Projektbeteiligten, an unterschiedlichen Stationen einer Brücke die Bauwerksprüfung exemplarisch zu verfolgen und im Rahmen des jeweiligen Kontexts Fragen zu stellen.

Der Feldversuch wurde auf Basis von drei verschiedenen Stationen strukturiert, sodass die Beobachter in kleinen Gruppen die Tätigkeit der Bauwerksprüfer begleiten konnten. Die Brücke, welche zum

Feldversuch ausgewählt wurde, stammte aus dem Jahr 1989 und hat eine Gesamtlänge von ca. 160 Metern.

Während der exemplarischen Prüfung in der Stahlbetonhohlkastenbrücke schilderten uns die Bauwerksprüfer ihren Vorgang und den Unterschied der jeweiligen Prüfungsarten. Ein wesentlicher Bestandteil der simulierten Bauwerksprüfung war die Untersuchung der Betonoberfläche auf Rissbildungen, Abplatzungen und Hohlstellen. Hierfür nutzen die Prüfer je nach Material der Brücke unterschiedliche Hammer. Für die Vermessung von Rissen werden sogenannte Rissbreitenmesser verwendet.

Bei der Prüfung der Brückenoberfläche kommt es nicht nur auf die Untersuchung der Bauteile an, sondern auch auf die Verkehrssicherheit bzw. -tauglichkeit von Bauteilen. Hierbei ist beispielsweise die Brüstung ein wesentlicher Teil, welcher bei der Verkehrssicherheit betrachtet wird. Je nach Nutzung der Brücke kommt es zu unterschiedlichen Bedingungen.

Beim Feldversuch wurden verschiedene Untersuchungs- und Dokumentationsmethoden angewendet. Es wurde das Verfahren Think-Aloud genutzt, ein standardisierter Dokumentationsbogen für alle

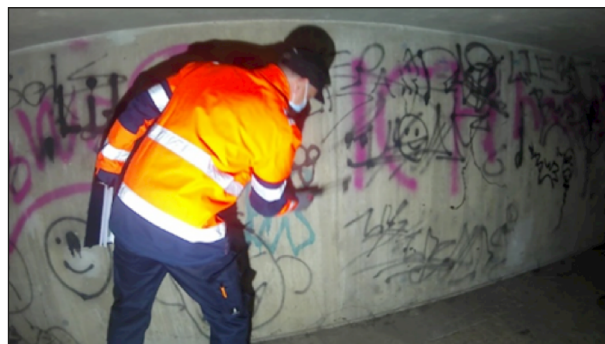


Bild 15: Exemplarische Prüfung der Betonfläche durch Abklopfen



Bild 16: Exemplarische Prüfung des Brückenoberbaus

Feldversuchsbestandteile eingesetzt und Foto-, Video- und Tonaufzeichnungen getätigt.

Die Think-Aloud-Methode ist eine Vorgehensweise, um Daten zu einer menschlichen Aktivität zu sammeln. Die Think-Aloud-Methode beinhaltet, dass Versuchsteilnehmer laut denken, während sie vor einer Gruppe bestimmte Aufgaben ausführen. Die Probanden werden ersucht, all das auszusprechen, was sie gerade denken, worauf sie gerade schauen, was sie tun und fühlen, noch während sie parallel dazu die Aufgabe bearbeiten. Die Beobachter erhalten dadurch die Möglichkeit, Daten über den menschlichen Bearbeitungsprozess zu einer Aufgabe aus erster Hand zu gewinnen. Die Betrachter sind gehalten, alles von der Testdurchführung ohne eine weitergehende Interpretation aufzuzeichnen.

3.2 Anforderungssystematisierung

Basierend auf den Grundlagen einer Bauwerksprüfung und dem Stand der Technik erfolgt die Bearbeitung und Umsetzung von Handlungsanweisungen u. a. in der Form von Arbeitskarten für die digitale Prüfung von Brückenbauwerken. Die Arbeitskarten sind als Checklisten zu verstehen, die im Weiteren noch näher erläutert werden. Sie sollen den Bauwerksprüfer in den verschiedensten Phasen einer Bauwerksprüfung unterstützen und somit die Qualität einer Bauwerksprüfung steigern. In diesem Projekt wurde der Schwerpunkt auf Hohlkastenbrücken gelegt, da die zum Projekt bereitgestellte Testbrücke ein solcher Brückentyp ist. Parallel zu der Entwicklung der Arbeitskarten werden diese in einer Prozessstruktur umgesetzt. Dieser Prozess, welcher die ablauforganisatorische Anforderung darstellt sowie die Arbeitskarten, welche die fachliche Anforderung wiedergeben, bilden die Anforderungssystematisierung. Die Anforderungssystematisierung bildet die Grundlage für die Umsetzung des modularen Konzeptes im 3. Arbeitspaket.

3.2.1 Anforderungsspezifikation

Auf Basis der Ergebnisse vom Stand der Technik und dem Lastenheft erfolgte die Anforderungsspezifikation in Form des digitalen Prozesses und der Arbeitskarten zur Bauwerksprüfung. Auf Basis dieser systematisierten Anforderung erfolgt eine prototypische Untersuchung der Fusionierung von Modelldaten und Bauwerksdaten. Hierbei wurde ebenfalls ein möglicher Austausch mit SIB-Bauwerke 2.0



Bild 17: Hard Coding der Pilotbrücke

betrachtet und berücksichtigt. Des Weiteren erfolgte eine prototypische Untersuchung der VR-/AR-Funktion durch ein hard-coding der Pilotbrücke in einem exemplarischen Anwendungsformat.

Aufbauend auf dieser Grundlage wurden die unterschiedlichen Anforderungen an den Demonstrator durch eine Kategorisierung nach dem Kano-Modell ausgearbeitet.

Das Kano-Modell ist ein Modell zum systematischen Erringen der Kundenzufriedenheit für ein komplexes Produkt. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Erreichen bestimmter Eigenschaften des Produktes und der erwarteten Zufriedenheit von Kunden. Das Kano-Modell unterscheidet fünf Ebenen der Qualität. Basis-Merkmale, die so grundlegend und selbstverständlich sind, dass sie den Kunden erst bei Nichterfüllung bewusst werden (implizite Erwartungen). Leistungs-Merkmale sind dem Kunden bewusst, sie beseitigen Unzufriedenheit oder schaffen Zufriedenheit abhängig vom Ausmaß der Erfüllung. Begeisterungs-Merkmale sind dagegen Nutzen stiftende Merkmale, mit denen der Kunde nicht unbedingt rechnet. Unerhebliche Merkmale sind sowohl bei Vorhandensein wie auch bei Fehlen ohne Belang für den Kunden. Sie können daher keine Zufriedenheit stiften, führen aber auch zu keiner Unzufriedenheit. Rückweisungs-Merkmale: Führen bei Vorhandensein zu Unzufriedenheit, bei Fehlen jedoch zu Zufriedenheit des Kunden (KANO, 2011).

3.2.2 Anforderungsvalidierung

Durch die Kategorisierung von Anforderungen in der Spezifikation wird die Validierung, in Form von Experteninterviews, eine Entscheidung über die tat-

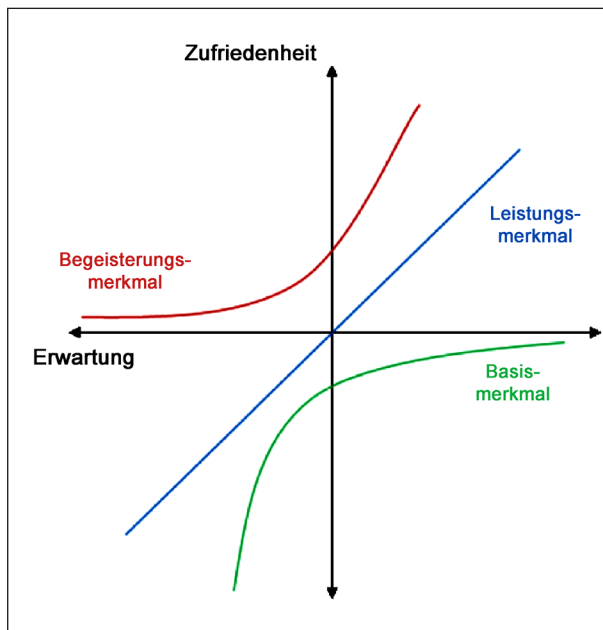


Bild 18: Darstellung des Kano-Modells

sächlichen Anforderungen an den Demonstrator getroffen. Den Experten werden die unterschiedlichen Technologien nach ihren Merkmalen vorgestellt. Anschließend werden die Merkmale durch die Experten bewertet, um somit eine Festlegung an die Anforderung des Demonstrators zu schaffen.

Bei den Merkmalen wird zwischen Basis-, Leistungs- und Begeisterungsmerkmal (siehe Bild 18) unterschieden. Bei einem Basismerkmal handelt es sich um eine zwingend notwendige Technologie, welche von dem Nutzer erwartet wird. Durch ein Leistungsmerkmal werden dem Nutzer womöglich einige Tätigkeiten erleichtert, was zu einer Entscheidung zur neueren Technologie führt. Bei dem Begeisterungsmerkmal wird dem Nutzer eine weitere Technologie vorgestellt, welche der Nutzer so nicht erwartet hätte und somit einen zusätzlichen Vorteil erkennt.

3.2.2.1 Notwendige Inhalte

Gemäß Lastenheft bedarf es für die Bauwerksprüfung einiger Informationsinhalte zum Bauwerk sowie zum Baulastträger oder äußerlichen Einflüssen auf das Bauwerk. Die Eingabe dieser Daten erfolgt manuell über ein Eingabefeld. Hierbei wird zwischen einer alphanumerischen und einer numerischen Eingabe unterschieden. Gemäß den Arbeitskarten werden die Eingaben in sechs Kapitel unterschieden.

Arbeitskarten zur Bauwerksprüfung	
0. - Deckblatt	
	Notruftaste
1. Verwaltung	
1.1 Name der Verwaltung	
1.2 Amt	
1.3 Meisterei	
1.4 Ansprechpartner	
1.4.1 Name	
1.4.2 Rufnummer	
2. Bauwerk	
2.1 Ild. Nr.	1
2.2 Bauwerksnummer	xxx/xxx
2.3 Bauwerksname	Nürnberg
2.4 GPS-Koordinaten	
2.5 Sachverhalt	
2.5.1 Oben liegend	
2.5.2 Unten liegend	
2.6 Baujahr	
3. Bauwerksdaten	
3.1 Bauwerksart	
3.2 Konstruktion	
3.3 QS Überbau	
3.4 QS Haupttragwerk	
3.5 Gesamtlänge	
3.6 Breite	
3.7 Brückenfläche	
3.8 Gesamtbreite	
3.9 Anzahl der Felder	
4. Weitere Angaben	
4.1 Belastungsklasse	60/60
4.2 Einschränkungen	
4.3 Befahrbar	LKW 40 Tonnen
5. Letzte Bauwerksprüfung	
5.1 Datum	
5.2 Prüfer	
5.3 Benotung	
5.4 Prüfer	
6. Liveview	
6.1 Wetter	
6.2 Wasserstände	
6.3 Aktuelle Verkehrssituation	
6.4 Wer ist vor Ort	

Bild 19: Beispielhafte Darstellung einer Arbeitskarte

Verwaltung

Für Angaben der verwaltungstechnischen Informationen erfolgt eine manuelle Eingabe über das Eingabefeld. Hierbei werden Angaben zum zuständigen Amt, Ansprechpartner, Meisterei sowie zu einer Rufnummer für eine Kontaktaufnahme gemacht.

Bauwerk

Bedeutend für die Bauwerksprüfung sind Informationen zum Bauwerk. Durch eine manuelle Eingabe werden beispielweise Informationen wie Bauwerksnummer, Bauwerksname und Baujahr eingetragen. Weitere Eingaben wie der Standort in Form von GPS-Koordinaten oder andere Sachverhalte können ebenfalls manuell eingetragen werden.

Bauwerksdaten

Nach projektspezifischen Informationen sind für einen Bauwerksprüfer ebenfalls Bauwerksspezifische Daten von Relevanz. Hierbei sind vor allem Bauwerksart, Konstruktion und Dimension von Wichtigkeit. Die Bauwerksdaten können automatisch aus dem 3D-Modell des Bauwerks ausgelesen und in der Übersicht für den Bauwerksprüfer wiedergegeben werden.

Weitere Eingaben

Wie bei den Bauwerksdaten können weitere Eingaben wie beispielweise die Belastungsklasse vom 3D-Modell ausgelesen werden. Dieser Vorgang kann ebenfalls automatisiert geschehen und steht dem Bauwerksprüfer in der Übersicht zur Verfügung.

Letzte Bauwerksprüfung

Sollten für das Bauwerk vorhandene Informationen zu vergangenen Bauwerksprüfungen hinterlegt sein, können die wesentlichen Daten dargestellt werden. Hierbei ist die Art der Prüfung, Zeitpunkt und Benotung am wichtigsten. Dies kann durch eine automatisierte Auslesung von Daten geschehen.

Liveview

Informationen zu äußerlichen Einwirkungen wie Wetterverhältnissen, eventuelle Wasserstände, zur Uhrzeit und zur aktuellen Verkehrssituation können durch Verlinkungen zu den einschlägigen Informationsseiten eingefügt werden. Dadurch kann der Nutzer schnell über mögliche Veränderungen informiert werden und reagieren. Eine weitere Möglichkeit könnte die Einbindung von Monitoringdaten darstellen. Hierbei werden vorhandene Informationen direkt von der Brücke übermittelt und dem Nutzer wiedergegeben. Im weiteren Projektverlauf wird mittels manueller Eingabe von Monitoringdaten sowie möglichen ZfP-Daten gearbeitet. Ein paralleles Forschungsprojekt verfolgt die Verarbeitung und Übertragung solcher Daten. Nach Abschluss der Projekte kann über eine mögliche Schnittstelle zwischen Echtzeitdaten und Demonstrator entschieden werden.

3.2.2.2 Anbindung Game Engines an Building Information Modeling

BIM-Software und Game Engines haben unterschiedliche Schwerpunkte und Anforderungen. So ist bei Game Engines die Performance und Optik von hoher Wichtigkeit, während BIM Software Wert auf andere Aspekte legt, wie Genauigkeit und vollständige Metadaten. Daraus ergeben sich im Kern unterschiedliche Dateiformate, was einige Herausforderungen bei der Anbindung bzw. Integration von BIM-Modellen in Game Engines mit sich bringt.

Die Anforderung dieses Projekts ist, dass das von der BIM Software exportierte Modell in Dateiform in einem Austauschformat (wie etwa IFC) via Internet an die MR- oder VR-App übertragen und dann in die Engine geladen wird. Das Modell muss in der Engine mit flüssiger Bildwiederholrate angezeigt werden (vgl. OPPERMAN, SHEKOW and BICER, 2016).

Folgende technische Herausforderungen müssen dabei gelöst werden:

1. Das Modell soll von der Game Engine zur Laufzeit, auf Knopfdruck, geladen werden. Es wäre nicht zweckgemäß, das Modell nur zum Zeitpunkt der MR-/VR-App statisch einzubinden, da sich das Modell häufig ändern kann, die MR-/VR-App aber nicht ständig neu gebaut werden sollte.
2. Game Engines unterstützen nur eine eingeschränkte Auswahl an 3D-Formaten.
3. Das BIM-Modell ist evtl. zu komplex, um auf mobilen Geräten, auf denen die MR-App läuft, bei flüssiger Wiederholrate angezeigt zu werden. In diesem Fall muss es zuerst optimiert werden.

Zur Lösung des ersten Problems haben sich verschiedene Möglichkeiten etabliert. So gibt es für die Unity3D Engine verschiedene Plugins⁴⁸, die den Import von 3D-Modelldateien zur Laufzeit ermöglichen. Alternativ ist in Unity3D der Import von sogenannten Asset Bundle Dateien möglich⁴⁹, deren Erstellung aber eine Unity Editor Instanz erfordert, die auf einem Server im Dauerbetrieb laufen muss und zusätzliche Lizenzkosten verursacht. Im Gegensatz zu Unity3D ist bei der Unreal Engine ein Import zur Laufzeit nicht möglich, da diese Funktionalität weder nativ noch per externen Plugin nachgerüstet werden kann.

Zur Lösung des o. g. zweiten und dritten Problems gibt es zwei Herangehensweisen:

⁴⁸ Siehe <https://github.com/KhronosGroup/UnityGLTF>, <https://assetstore.unity.com/packages/tools/modeling/trilib-model-loader-package-91777>, oder <https://assetstore.unity.com/packages/tools/modeling/runtime-obj-importer-49547>

⁴⁹ <https://docs.unity3d.com/Manual/LoadingResourcesatRuntime.html>

- **Direktimport:** Wenn es ein kompatibles Modell-Austauschformat gibt, welches von der BIM-Anwendung exportiert und von der MR/VR-Engine zur Laufzeit importiert werden kann, dann ist keine weitere Verarbeitung der Modelldatei nötig. Sollte die Bildwiederholrate in der MR/VR-App unter Verwendung der Standard-Exporteinstellungen zu gering sein, so müssen bereits beim Export entsprechende Optimierungen eingesetzt werden. So können bspw. für den Export gröbere Seitentoleranzen gewählt werden oder von außen unsichtbare Strukturen (deren Visualisierung in MR/VR nicht gewünscht ist) vor dem Export entfernt werden. Der generelle Ablauf ist in Bild 20 zu sehen.
- **Indirekter Import:** Ist der Direktimport nicht möglich, bspw. weil es kein geeignetes Austauschformat gibt oder dessen Qualität unzureichend ist oder dessen Export keine notwendigen Optimierungen zulässt, dann ist der alternative Ansatz der Indirekte Import. Wie in Bild 21 gezeigt, importiert ein Konvertierungsprogramm auf Eingangsseite ein geeignetes, von der BIM-Software exportiertes Format. Das Modell wird dann ggf. automatisch optimiert, durch entsprechende Routinen des Konvertierungsprogramms. Anschließend wird das Modell in ein weiteres Austauschformat exportiert, welches von der MR/VR-Engine importiert werden kann. Das gewähl-

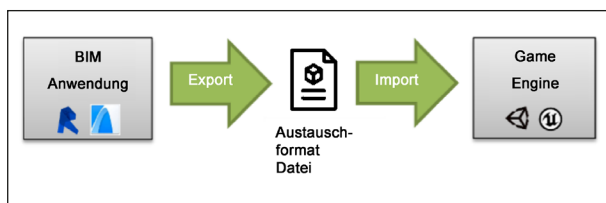


Bild 20: Anbindung BIM-Software an Game Engine via Direktimport

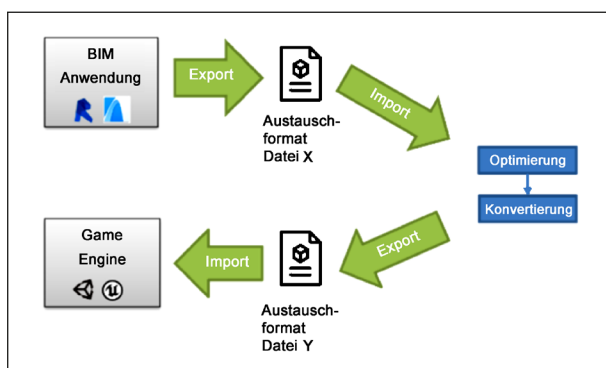


Bild 21: Anbindung BIM-Software an Game Engine via indirekten Import

te Konvertierungsprogramm muss diese Aufgaben automatisch, ohne Nutzerinteraktion, ausführen, üblicherweise über eine technische Schnittstelle oder die Kommandozeile. Die Verarbeitung muss auf dem Gerät, oder auf einem lokalen Server erfolgen, nicht in einer externen Cloud, da ansonsten der Datenschutz nicht gewährleistet ist.

Die auf dem Markt erhältlichen Programme, die eine BIM-Modell Integration in eine Game Engine (wie Unity3D oder Unreal Engine) ermöglichen, lassen sich in zwei Kategorien aufteilen:

- **Converter:** Software, die unabhängig von einer Game Engine beliebige Dateien in Austauschformat X importiert und als natives Format oder Austauschformat Y exportiert. Die Datei in Format Y muss von der Engine importierbar sein. Kommerzielle Programme sind bspw. 3DS Max (automatisierbar durch MAXscript), CrossManager⁵⁰ (automatisierbar in der Advanced Edition) oder CAD Exchanger⁵¹ (automatisierbar in der CLI Version). Auch BIM-Software wie Autodesk Revit erlaubt den Import von bestimmten Austauschformaten (wie IFC 2x3) und den anschließenden Export in einem anderen Format. Von IfcOpen Shell gibt es kostenfreie Tools, wie IfcCConvert⁵², mit dem IFC Dateien in das OBJ oder DAE Collada Format konvertiert werden können. Mit IfcBlender⁵³ lassen sich IFC Dateien in Blender importieren, wo sie, durch Skriptautomatisierung, optimiert und in einer Vielzahl an Formaten exportiert werden können.
- **Game Engine Plugins:** Dies sind Produkte, die für bestimmte Game Engines und Branchen (hier: AEC) optimiert sind und Modelle nur in die jeweilige Engine importieren. Beispiele für Unity3D sind Unity Reflect⁵⁴, Tridify⁵⁵, PiXYZ⁵⁶ oder

⁵⁰ https://www.datakit.com/en/cross_manager.php

⁵¹ <https://cadexchanger.com/products/cli>

⁵² <http://www.ifcopenshell.org/ifcconvert>

⁵³ <http://ifcopenshell.org/ifcblender>

⁵⁴ <https://unity.com/de/products/reflect>

⁵⁵ <https://www.tridify.com/>

⁵⁶ <https://www.pixyz-software.com/>

IFC Importer⁵⁷, für Unreal gibt es DataSmith⁵⁸. Neben den meist drei- bis vierstelligen jährlichen Lizenzkosten haben all diese Produkte jedoch spezifische Nachteile, die im Folgenden exemplarisch aufgelistet werden:

- Unity Reflect sowie DataSmith (Unreal Engine) sind für den Einsatz auf einer Workstation gedacht, unter Verwendung des Editors der Game Engine. Modelle können damit nicht auf mobilen Geräten zur Laufzeit geladen werden. Reflect beschränkt sich zudem auf Autodesk-Produkte wie Revit.
- Tridify erfordert den Upload von BIM-Modellen in eine Cloud, wo die Modelle verarbeitet und optimiert werden. Dies vereinfacht zwar die Nutzung, man überlässt aber die eigenen BIM-Rohdaten einem externen Anbieter.
- PiXYZ bietet mit Batch⁵⁹ ein automatisierbares Kommandozeilen-Werkzeug, das jedoch viel Expertise erfordert und hohe Lizenzkosten hat.
- IFC Importer funktioniert nur im Unity Editor auf Desktop-Workstations und ist auf IFC beschränkt.

3.2.2.3 Vorbereitung der Bauwerksprüfung

Als Grundlage für das Pflichtenheft soll im Lastenheft beschrieben werden, dass die Informationen aus Bauwerks- und Modelldaten vor der Durchführung der Bauwerksprüfung zusammengetragen werden. Nicht nur das Zusammentragen von Bauwerks- und Modelldaten, sondern auch Informationen zu Genehmigungen sowie Verkehrs- und Arbeitssicherheit sind hier von großer Bedeutung.

Zu den Bestandsdaten gehören vor allem Übersichtskarten, Anfahrts- und Parkmöglichkeiten, Zugangsorte zum Bauwerk und Sachverhalte. In der Vorbereitung werden Bauwerksdaten und Bauwerksmodell zusammengetragen. Als Grundlage der Verfügbarkeit dieser Informationen werden die Bauwerksdaten in dem 3D-Modell bei der Erstellung und Fusionierung durch Verknüpfungen hinter-

legt. Diese Daten können vom Bauwerksprüfer nun direkt aus dem Modell abgerufen werden. Bei den Daten handelt es sich um Dateien, etwa PDF-Dokumente wie das Bauwerksbuch oder vergangene Prüfberichte, aber auch die Bauwerksakte oder ein Prüfhandbuch können hinterlegt sein. Die Fusionierung von Bauwerks- und Modelldaten erfolgt, indem die zu verlinkenden Dateien im Ordner des Modells oder einem Unterordner liegen und der relative Pfad einer Datei im Attribut „Verknüpfte Dokumente“ eines Modellelements gespeichert wird. So können Dateien für einzelne Bauteile oder das gesamte Bauwerk mehrfach verlinkt werden.

Bei der Prüfung des Bauwerks ist es notwendig, bestimmte Arbeitssicherheitsvorschriften, zum Beispiel ArbSchG oder PSA-BV, einzuhalten. Um den Nutzer darauf hinzuweisen, wird bei der Vorbereitung der Bauwerksprüfung vor Ort eine Abfrage durchgeführt, wodurch der Nutzer bestätigen muss, die Arbeitssicherheitsvorschriften einzuhalten. Hierdurch wird sichergestellt, dass der Nutzer seine Ausrüstung wie vorgeschrieben bei sich führt. Dieser Vorgang wird durch eine Art Checkliste erfolgen, in welcher der Nutzer die einzelnen Punkte bestätigen soll. Des Weiteren kann der Nutzer durch Anwendung des 3D-Modells bereits auf Gefahren hingewiesen werden. Bei der Vorbereitung der Bauwerksprüfung im Büro kann der Nutzer über eine Desktop- oder VR-Anwendung auf den Demonstrator zugreifen. Vor Ort am Bauwerk greift der Nutzer über die AR-Anwendung des Tablets auf den Demonstrator zu. Gefahrenstellen werden hierbei im Modell hervorgehoben und kenntlich gemacht.

Mit der Verknüpfung von Dateien im Modell kann der Nutzer sich bei der Verwendung des Bauwerksinformationsmodells verschiedene Dokumente anzeigen lassen, wie etwa den Verkehrssicherungsplan, wenn dieser bereits vorhanden ist. Je nach Situation gilt es, solch einen Plan in der Durchführung der Prüfung zurate zu ziehen. Der Verkehrssicherungsplan zeigt dem Nutzer die in Auftrag gegebene und selbst durchzuführende Umsetzung von Verkehrssicherungsmaßnahmen, welche während der Durchführung vollständig vorhanden sein müssen. Hierbei wird unterschieden zwischen der Situation auf dem Bauwerk und unter dem Bauwerk.

Wie bei der Betrachtung von Informationsinhalten eines Bauwerks werden Genehmigungen, zum Beispiel zur Prüfung eines Bauwerks, an den Demonstrator angebunden. Diese werden lokal auf dem System, über das CDE, abgespeichert und sind in-

⁵⁷ <https://assetstore.unity.com/packages/tools/utilities/ifc-importer-162502>

⁵⁸ <https://www.unrealengine.com/datasmith>

⁵⁹ <https://www.pixyz-software.com/batch/>

nerhalb der Anwendung über einen Datei-Link abrufbar.

Handlungsanweisungen, welche durch den Baulastträger berücksichtigt werden sollen, können unterschiedlich dargestellt werden. Zum Beispiel kann der Baulastträger einen Verkehrszeichenplan übermitteln, welcher im 3D-Modell eingefügt wird. Der Nutzer kann diesen abrufen und betrachten. Des Weiteren können Dokumente verlinkt werden.

3.2.2.4 Durchführung der Bauwerksprüfung

Bei der Bauwerksprüfung gibt es unterschiedliche Arten. Sie unterscheiden sich vor allem in ihrem Umfang und dem Intervall, in dem sie durchgeführt werden. In der Anwendung des Demonstrators kann der Nutzer zwischen den unterschiedlichen Prüfverfahren, der Einfachen Prüfung oder der Hauptprüfung wählen. Je nach Prüfungsart werden dem Nutzer die für die Prüfung zu verfolgenden Arbeiten angezeigt. Nach Auswahl der Prüfungsart wird der Nutzer nach der Art des Bauwerks gefragt.

Bei dem im Pilotprojekt betrachteten Bauwerk handelt es sich im Demonstrator um ein vorgespanntes Bauwerk. Der Nutzer soll dementsprechend alle Arbeitshinweise, welche ein vorgespanntes Bauwerk betreffen, sichten können. Dem Nutzer werden dazu alle Bestandteile des Bauwerks in Form von Bauteilgruppen aufgelistet. Hinter den einzelnen Bauteilgruppen werden die zu prüfenden Bauteile aufgelistet, welche der Nutzer auswählt, sobald beispielsweise ein neuer Schaden erkannt oder ein vorhandener Schaden überprüft wird.

Hilfsmittel und Prüfgeräte im Einsatz

Betrachtet man die Bauteilgruppe der Stahlbetonbauteile, werden vor allem Prüfungen der Betonoberfläche und Betondeckung angezeigt. Hierbei sind die Bauteile auf verschiedene Beschädigungen zu untersuchen. Mögliche Schäden, auf welche das Bauteil untersucht wird, können zum Beispiel Risse, Abplatzungen, freiliegende Bewehrung, Kiesnester, Durchfeuchtungen und weitere sein.

Bei der Findung von Schäden greift der Prüfer auf seine Erfahrung und seine fachlichen Kenntnisse zurück. Für das Aufsuchen und die Untersuchung von Schäden werden verschiedene Hilfsmittel (manuelle Werkzeuge) und Prüfgeräte ((teil-)elektronische Werkzeuge/Messgeräte mit besonderem Messstandard) genutzt. Einige dieser Hilfsmittel

Hilfsmittel	Prüfgeräte
Hammer	Betondeckungsmessgerät
Gliedermaßstab	Rückprallhammer
Fühlerlehre	Schichtdickenmesser (für Korrosionsschutzbeschichtung)
Ölkreide (gelb)	Entfernungsmessgerät
Kamera	
Wasserwaage	
Risskarte	
Beleuchtung	

Tab. 11: Ausgewählte Hilfsmittel und Prüfgeräten bei einer Bauwerksprüfung

und Prüfgeräte sind in Tabelle 11 aufgelistet. Durch den Einsatz von digitalen Technologien können einige dieser Hilfsmittel ersetzt oder ergänzt werden. Es hängt stark von der Nutzerfreundlichkeit, dem möglichen Mehrwert für den Bauwerksprüfer und dem Schaden ab, welches Hilfsmittel ersetzt oder ergänzt wird. Ein wesentliches Kriterium hierbei ist vor allem die Genauigkeit der zum Einsatz kommenden Technologie.

Schadensverortung

Mit Beginn der Prüfung werden die Bauteile des Bauwerks auf Schäden untersucht. Nach Auffinden eines Schadens gilt es, diesen zu verorten und seine Position zu dokumentieren. Für die Dokumentation wird standardmäßig die Prüfrichtung innerhalb des Bauwerks angegeben sowie die Lage des Schadens (bspw. 20 Meter, links in einem Meter Höhe). Diese Positionierung kann im Modell eingetragen werden. Nach Einschätzung mittels Kano-Modell stellt dieses Vorgehen eine Basisanforderung dar.

Eine Leistungsanforderung könnte die Schadensverortung durch eine Kombination aus „Self Reporting“ und „SLAM“, mithilfe externer Marker darstellen. Hierdurch wird eine virtuelle Markierung durch Antippen eines Schadens im Modell verortet. Durch dieses Verortungssystem können vorhandene Schäden dokumentiert werden und bei einer weiteren Prüfung erneut aufgesucht werden.

Eine Lösung, welche im Bezug zum Kano-Modell zu Begeisterung führen soll, könnte der Einsatz von GPS sein. Bei dem Einsatz durch GPS und einer Korrekturquelle, wie SLAM oder Self-Reporting, wird der Standort automatisch gefunden. Bei der nächsten Prüfung kann der Nutzer ähnlich wie bei einem Navigationssystem zum Schaden geführt werden. Hierzu bedarf es jedoch einer lückenlosen

Satellitenverbindung und Fehlerkorrektur. Die Korrekturquelle für das GPS dient zur genaueren Standortbestimmung, da aufgrund von äußeren Einwirkungen das GPS gestört werden kann.

Bildaufnahme

Nach der Verortung von vorhandenen Schäden, sollten diese als Bildaufnahmen dokumentiert werden, um diese anschließend im Bericht als Dokumentationsmedium mit aufzuführen. Eine Basisanforderung an den Demonstrator ist die Aufnahmen von Bildern mithilfe einer eigenen Kamera. Diese Bilder werden anschließend manuell in den Demonstrator importiert. Dies bedeutet einen größeren Aufwand, da die Fotos anschließend durch Notieren der Fotonummer oder ähnlichem der Verortung zugewiesen werden müssen.

Um hierzu keine separate Hardware bei sich zu tragen, besteht die Möglichkeit der Einbindung einer Fotoanwendung im Demonstrator. Hierdurch wird auf die Kamera der genutzten Hardware zurückge-

griffen. Diese Vorgehensweise wird als Leistungsanforderung gesehen. Durch die direkte Zuweisung der Bildaufnahme zum Schaden und deren Positionierung entsteht ein lückenloser Übergang zwischen Schadensauffindung und -verortung sowie zur Bildaufnahme. Eine Verwechslung von Bildaufnahme und Schadensort kann somit nahezu ausgeschlossen werden.

Eine Anwendung, welche bei den Nutzern zur Begeisterungsanforderung führen kann, ist der Einsatz einer Technologie, welche eine freihändige Bedienung mit sich führt. Als Beispiel steht die HoloLens Brille hier als Teil eines Ganzen. Die Bildaufnahme erfolgt hierbei durch Gesten. Eine Zuordnung der Bildaufnahme könnte ähnlich wie bei der Leistungsanforderung zu einer kürzeren Nachbearbeitung führen.

Maßband

Neben der Verortung und Bildaufnahme eines Schadens sind die Abmessung von Schäden bei

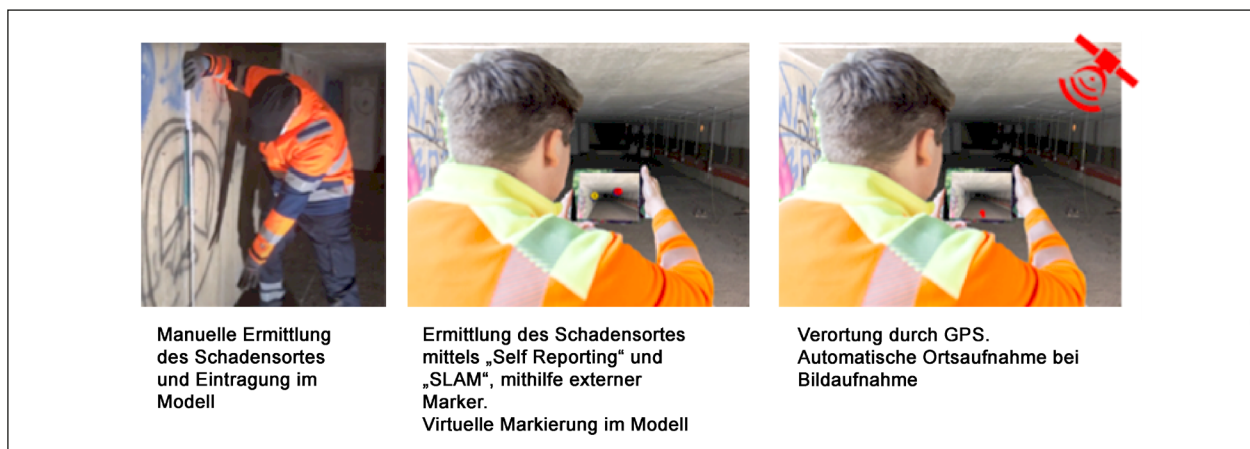


Bild 22: Darstellung zur Verortung von Schäden (Bild: André Sobott, LIST Gruppe)



Bild 23: Darstellung der Möglichkeit zur Bildaufnahme (Bild: André Sobott, LIST Gruppe)

der Bauwerksprüfung von Relevanz. Als Basis hierfür wird die manuelle Aufnahme von Messgrößen mittels Messgeräten und ebenfalls die manuelle Eingabe in den Demonstrator vorgesehen. Der Prüfer liest nach Abmessung, beispielsweise mit einem Gliedermaßstab oder Lasermessgerät, den Wert ab und trägt diesen anschließend in die Beurteilung des Schadens im Demonstrator manuell ein.

Eine weitere Möglichkeit, welche als Leistungsanforderung angesehen wird, kann eine eingebundene Messfunktion im Demonstrator mittels AR-System sein. Der Nutzer legt manuell zwei Messpunkte in der Anwendung fest. Dies geschieht durch den Einsatz der Kamera an der Hardware. Zwischen diesen Messpunkten wird der Abstand bestimmt und durch eine Maßkette visuell in der Anwendung dargestellt. Die Werte können übernommen und anschließend ausgegeben werden. Die Funktion könnte nicht nur Distanzen, beispielsweise Risslängen, sondern auch Flächen bemessen.

Eine Begeisterung der Nutzer könnte eine automatische Erkennung von Bauteilen sein. Durch mögliche Mustererkennung und eine Kantendetektion können mithilfe von Algorithmen Dimensionen von

Bauteilen berechnet und wiedergegeben werden. Die Abmessungen können ebenfalls übernommen und anschließend protokolliert werden.

Schadensbeschreibung mittels Kommentierung

Nach Überprüfung und Untersuchung von Schäden gilt es, diese zu beschreiben. Als Basis kann über ein Eingabefeld der Schaden manuell beschrieben werden. Der eingegebene Kommentar wird anschließend dem Schadensfoto zugeordnet. Der Nutzer kann in diesem Fall individuell eine Beschreibung hinterlegen. Die individuelle Beschreibung kann jedoch zu einer unterschiedlichen Bewertung von Schäden führen.

Eine weitere Möglichkeit, wodurch Schäden der gleichen Beschreibung unterliegen, ist eine Schadensbeschreibung auf Basis einer Vorauswahl. Durch die Klassifizierung der Schäden, welche aus der RI-EBW-PRÜF stammen könnten, ist eine einheitliche Schadensbeschreibung gewährleistet und somit eine Schadenbewertung auf Basis der gleichen Schadensart erreicht. Diese Möglichkeit wird durch Betrachtung des Kano-Modells als Leistungsanforderung eingestuft.



Bild 24: Möglichkeiten zur Aufnahme von Abmessung (Bild: André Sobott, LIST Gruppe)

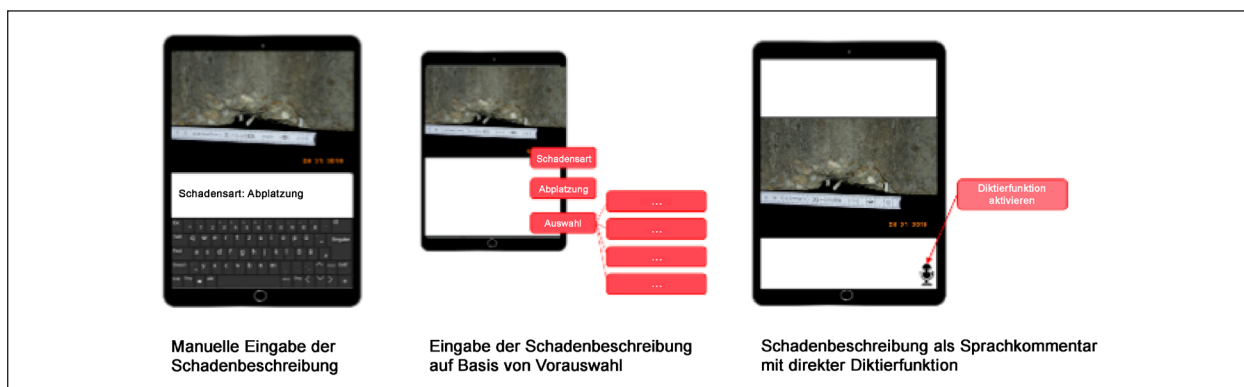


Bild 25: Kommentierungsmöglichkeiten bei der Beschreibung von Schadensbilder (Marcos Hill)

Für Begeisterung bei dem Nutzer könnte die Einbindung einer Diktierfunktion sorgen. Der Nutzer würde, ähnlich wie auf dem Mobilfunkgerät, über die Sprachsteuerung dem Demonstrator die Texteingabe diktieren, welche anschließend in Textform umgewandelt wird und dem Schadensbild als Beschreibung angeheftet wird. Jedoch ist die Variante durch mögliche äußere Einwirkungen wie Schall oder Verkehrslärm ein schwieriges Unterfangen und würde womöglich nicht zu einem größeren Mehrwert führen.

Markierungen

Bei der Überprüfung von Schäden werden oftmals mithilfe von Markierungen, in Form von Ölkreide oder ähnlichem, Schadstellen markiert und anschließend abfotografiert und sind somit im Demonstrator am Schaden verortet. Diese Möglichkeit wird als Basisanforderung an den Demonstrator betrachtet.

Eine weitere Möglichkeit könnte die Einbindung einer virtuellen Markierung-Funktion sein. Hierbei handelt es sich um die Möglichkeit, den Schaden als Bildaufnahme zu dokumentieren und anschließend im Demonstrator auf dem Bild bestimmte Stellen zu markieren oder Notizen anzubringen. Durch die spätere Überlagerung von 3D-Modell und Bildmaterial entsteht somit eine reale Darstellung des Schadens mit Markierung. Durch dieses Vorgehen ist es dem Nutzer möglich, nachträglich zusätzliche Markierungen vorzunehmen. Hier ist eine Leistungsanforderung an den Demonstrator gegeben.

Eine Begeisterungsanforderung kann eine kombinierte Variante aus Markierung und Digitale Markierung sein. Hierbei würde der Prüfer direkt am Bauwerk eine Markierung setzen. Bei der Bildaufnahme wird anschließend die vorab erstellte Markierung erkannt und automatisiert in eine Digitale Markierung durch Schrifterkennung umgewandelt. Weiterhin kann der Prüfer nachträglich seine Markierungen ergänzen.

Eingabe von weiteren Messdaten

Bei der Bestimmung bestimmter Messdaten, z. B. Spaltmaßen bei Gleitlagern, kommen unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz. Hier wird als Basisanforderung die Messung als manuelles Vorgehen

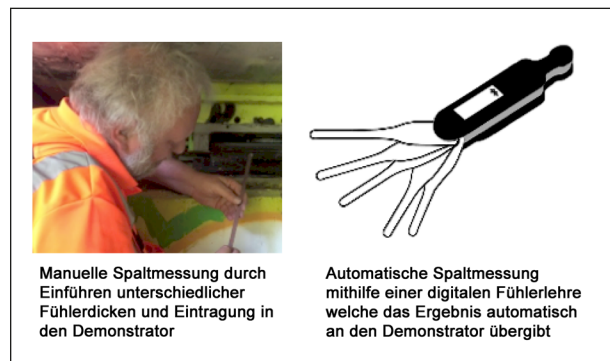


Bild 26: Einsatz digitaler Messmethoden (Bild links: André Sobott, LIST Gruppe/Bild rechts: Eigene Darstellung HHVISION)

angesehen und der Wert ebenso manuell in den Demonstrator eingetragen. Am Beispiel einer Fühlerlehre nutzt der Prüfer seine herkömmliche Fühlerlehre, um das Spaltmaß an einem Gleitlager zu messen. Anschließend wird die Dicke der eingesetzten Fühlerlehre in den Demonstrator manuell eingetragen.

Eine Möglichkeit beim Nutzer eine Begeisterungsanforderung an den Demonstrator aufzurufen, ist die Einbindung von automatischen Messgeräten, welche die Messdaten anschließend direkt an den Demonstrator übergeben können. Am Beispiel der Spaltmessung nutzt der Prüfer eine digitale Fühlerlehre. Diese misst das Spaltmaß ab, welches anschließend auf dem Display abgelesen und automatisch an den Demonstrator übermittelt werden kann. Der übermittelte Wert wird automatisch protokolliert.

Arbeitshilfen, Normen und Richtlinien

In einigen Fällen muss der Prüfer möglicherweise auf Dokumente wie beispielsweise Normen, Arbeitshilfen oder Richtlinien zurückgreifen. Um dem Nutzer ein analoges Mitführen der genannten Dokumente zu ersparen, können diese im Demonstrator abgerufen werden. Dieses wird als Leistungsanforderung an den Demonstrator gesehen. Der Nutzer kann somit direkt bei der Prüfung kritische Entscheidungen betrachten und erhält die Möglichkeit, hierzu Angaben in entsprechenden Dokumenten nachzuschauen.

Eine Begeisterungsanforderung kann ein direkter digitaler Abgleich zwischen Normenwerten, Werten der Planung und festgestellten Werten bei der Bau-



Bild 27: Möglichkeit zum Abruf von Arbeitshilfen, Normen und Richtlinien (Marcos Hill)

werksprüfung darstellen. Der Nutzer trägt somit seine Messdaten in den Demonstrator ein und erhält direkt einen Vergleich zu den einschlägigen Normen und der Werte beispielsweise aus der Planung. Hierfür ist jedoch ein hohes Maß an Dokumentenkategorisierung und eine dauerhafte Pflege von Dokumenten notwendig.

3.2.2.5 Nachbearbeitung der Bauwerksprüfung

Nach Abschließung der Prüfung des Bauwerks vor Ort erfolgt eine Nachbearbeitung der Bauwerksprüfung im Büro. Der Prüfer hat, ebenso wie bei der Vorbereitung zur Bauwerksprüfung, die Möglichkeit über eine Desktop- sowie VR-Anwendung auf den Demonstrator zuzugreifen. Der Nutzer erhält die Möglichkeit, die durchgeführte Bauwerksprüfung erneut zu erfassen und sich mithilfe einer VR-Brille virtuell in oder an das geprüfte Bauwerk zu begeben. Hierbei werden ihm die Schäden visuell dargestellt. Durch die durchgeführte Verortung sind die Bildaufnahmen an den jeweils richtigen Stellen im 3D-Modell vorhanden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit einer Auflistung und Kategorisierung aller Schäden beispielsweise nach Schadenstyp und Position im Modell. Durch die Auswahl eines Schadens gelangt der Nutzer ebenfalls an die verortete Position im 3D-Modell.

Mit Blick auf die Schadensbeseitigung kann der Nutzer eine Empfehlung zu den Schäden abgeben. Hierzu werden alle Schäden in einer Liste aufgeführt. Der Nutzer kann nun den Schaden kommentieren und über eine Auswahl eine Beseitigungsmaßnahme auswählen. Durch die Auswahl der Beseitigungsmaßnahme kann im Anschluss auf ein

mögliches, automatisch generiertes Leistungsverzeichnis zurückgegriffen werden, welches anschließend zur Kostenschätzung und zur Ausschreibung genutzt werden kann.

Nach abschließender Fertigstellung der Ergebnisse synchronisiert der Nutzer seine Daten mit den Bestandsdaten in der CDE-Lösung. Dadurch werden dem Bauwerksträger die Ergebnisse zugespielt und seine Daten aktualisiert.

Eingesetzte Technologien

Die möglichen Technologien, welche für die unterschiedlichen Hilfsmittel eingesetzt werden können, wurden nach den Merkmalen des Kano-Modells unterschieden. Eine Übersicht der durchgeführten Differenzierungen ist in Tabelle 12 aufgeführt.

Hilfsmittel	Basismerkmale	Leistungsmerkmal	Begeisterungsmerkmal
Schadensverortung	Manuelle Ermittlung der Ortsaufnahme und Eintragung im Modell	Ermittlung des Schadenorts mittels „Self Reporting“ und „SLAM“, mithilfe externer Marker. Virtuelle Markierung im Modell	Verortung durch GPS. Automatische Ortsaufnahmen bei Bildaufnahme
Bildaufnahme	Aufnahme mithilfe der eigenen Kamera und späterer manueller Import der Fotos in den Demonstrator	Einbindung der Fotoanwendung im Demonstrator	Einsatz einer HoloLens-Brille mit automatischer Fotoaufnahme
Messen	Mittels manuellen Messgeräts und Eingabe in den Demonstrator	Einbindung der Messfunktion in den Demonstrator durch manuelle Festlegung von Messpunkten	Automatische Erkennung von Objekten und Darstellung eines Maßes
Kommentieren	Manuelle Eingabe der Schadenbeschreibung	Eingabe der Schadenbeschreibung auf Basis von Vorauswahl	Schadenbeschreibung als Sprachkommentar mit direkter Diktierfunktion
Markierungen z. B.: Ölkreide	Markierung mittels Ölkreide und anschließender Bildaufnahme	Bildaufnahme und anschließendes „Digitale Markierung“ auf dem Bild direkt im Demonstrator	Markierung mittels Ölkreide und anschließendes automatisiertes „Digitale Markierung“ durch Schrifterkennung
Eingabe von weiteren Messdaten z. B.: Fühlerlehre	Manuelle Spaltnessung durch einführen unterschiedlicher Fühlerdicken		Automatische Spaltnessung mithilfe einer digitalen Fühlerlehre welche das Ergebnis automatisch an den Demonstrator übergibt
Arbeitshilfen, Normen und Richtlinien		Digitaler Zugriff auf relevante Arbeitshilfen, Normen und Richtlinien	Digitaler Abgleich zwischen Normenwerten, Werten der Planung und festgestellten Werten der Bauwerksprüfung
Fernkommunikation	Kommunikation mittels Mobilfunkgerät	Kommunikation mittels Video- und Sprachanruf	Kommunikation mittels LiveView aus Sicht der örtlichen Person

Tab. 12: Übersicht aller Technologien und Kategorisierung nach dem Kano-Modell

3.3 Pflichtenheft auf Grundlage von Experteninterviews

Zur Einschätzung, welche Technologien aus der Anforderungsspezifikation für die Bauwerksprüfung geeignet sind, wurden Experteninterviews durchgeführt. Diese Experteninterviews führen zu einer Einschätzung, welche Anforderungen schlussendlich durch die späteren Nutzer an den Demonstrator gestellt werden. An den Interviews haben Experten aus den Bereichen Bauwerksprüfung und -erhaltung teilgenommen.

Zur Vorbereitung auf die Experteninterviews wurden den Beteiligten vorab Unterlagen zur Verfügung gestellt, welche die Inhalte aus der Anforderungsspezifikation wiedergeben. Diese Unterlagen dienen als Grundlage für die Interviews und wurden durch visuelle Darstellungen unterstützt. Um die Balance zwischen Zufriedenheit und Anforderung zu schaffen, wurde wie bereits in der Anforderungsspezifikation, mithilfe des Kano-Modells gearbeitet. Den Teilnehmern wurden für die jeweilige Technologie verschiedene Anforderungen vorgestellt. Hier

bei galt es, herauszufinden, welche Variante bei den Experten eine Basis-, Leistungs- oder Begeisterungsanforderung für den Demonstrator ausübt. Zudem sollte herausgefunden werden, welche Variante womöglich ein Rückweisungsmerkmal darstellt.

3.3.1 Ergebnisse

Während der Experteninterviews wurden die Aussagen und Empfehlungen der Teilnehmer dokumentiert. Diese Dokumentation wurde als Ergebnis in die Anforderungvalidierung aufgenommen. Mögliche Vorschläge zu weiteren Vorgängen und Technologien, welche sich aus den Diskussionen ergaben, haben ebenfalls Einzug in die Ergebnisse erhalten.

Schadensverortung

Bei der Verortung von Schäden wurden den Teilnehmern die in der Anforderungsspezifikation beschriebenen Möglichkeiten vorgestellt. Anhand ei-



Bild 28: Darstellung der Verortung eines Schadens im 3D-Modell



Bild 29: Verknüpfung einer Bildaufnahme am 3D-Modell und Schadensposition

ner Kollaborationssoftware wurde den Teilnehmer vereinfacht gezeigt, wie Schäden verortet werden und anschließend im 3D-Modell hinterlegt werden können. Durch die Verortung im 3D-Modell ist ein nachträgliches Auffinden der Schäden prüfrichtungsunabhängig schnell umzusetzen.

Nach Ansicht der Teilnehmer muss die eingesetzte Anforderung eine schnelle Handhabung aufweisen und es muss eine erhebliche Unterstützung für den Bauwerksprüfer vorhanden sein. Die Technologie muss vor allem ausgereift sein und darf nicht durch mögliche Systemfehler beeinflusst werden. Ein weiterer wichtiger Punkt bei dem Einsatz der Technologie ist die richtungsunabhängige Auffindung von Schäden. Alle Teilnehmer haben sich unabhängig voneinander für das Vorgehen mittels der Leistungsanforderung an den Demonstrator entschieden und somit für eine Verortung mittels Self Reporting und SLAM, mithilfe von externen Markern.

Bildaufnahme

Bei der Dokumentation der Schäden in Form von Bildaufnahmen spielt vor allem der Vorgang der Verknüpfung von Schäden eine große Rolle. Um den Teilnehmern die spätere Verknüpfung mit dem 3D-Modell zu präsentieren, wurde diese exemplarisch anhand einer Desktopanwendung gezeigt. Hierbei wird das Foto an dem vorher festgelegten Schadensort (siehe Bild 28) verknüpft und ist somit direkt am 3D-Modell koordinatenorientiert verortet. Durch die Verknüpfung sind die Schadensbilder anschließend jederzeit im Demonstrator ortsunabhängig abrufbar und können somit zur Vorbereitung, Durchführung und Nachbearbeitung von Bauwerksprüfungen genutzt werden.

Als Basisanforderung wird hier mithilfe einer externen Kamera und späterem manuellen Import der Fotos in den Demonstrator erworben. Die Teilneh-

mer sehen diese Möglichkeit jedoch nicht mehr als zeitgemäß an. Vor allem ist der Nutzer hier gezwungen, sowohl ein Tablet zur Nutzung des Demonstrators als auch eine externe Kamera bei sich zu tragen, was in teils beengten Bereichen ein Nachteil ist.

Einen gesamtheitlichen Zuspruch fand die direkte Einbindung der Fotoanwendung im Demonstrator durch die Nutzung der im Tablet verbauten Kamera. Hierdurch wird die vorher verortete Schadenskoordinate genutzt und das Bild direkt angehängt (siehe Bild 29). Teilweise wurde diese Variante bereits als Stand der Technik bezeichnet und könnte möglicherweise schon als Basisanforderung an den Demonstrator gewertet werden. Für die Experten ist es jedoch wichtig, dass ein nachträglicher Import von Bildaufnahmen ebenfalls gegeben ist. Die nachträglichen Bildimporte werden anschließend manuell den Schadenspositionen zugeordnet.

Als Begeisterung, allerdings als nicht zielführend, wird der Einsatz einer freihändigen Aufnahme, zum Beispiel durch eine AR-HMD gewertet. Ein Teilnehmer sieht hierbei sogar ein Rückweisungsmerkmal für den aktuellen Zeitpunkt; jedoch ist dies zukünftig eine Variante, welche durch neue und sichere Technologien in Betracht gezogen werden sollte. Hier könnte eine Fotoaufnahme durch Gestensteuerung geschehen. Ein Teilnehmer sieht hier jedoch auch eher die technikaffinen Personen als Nutzer. Vor allem die Arbeitssicherheit während der Nutzung wird hier noch als nicht ausgereift gesehen.

Eine weitere Möglichkeit, welche durch die Teilnehmer in Betracht gezogen wurde, ist der Einsatz einer Schutzbrille mit integriertem Sensor, welcher die Blickrichtung des Nutzers aufnimmt, erkennt und an eine separate Kamera, beispielsweise eine Bodycam weitergibt. Die Kamera macht dann eine Bildaufnahme im Blickwinkel der Person.

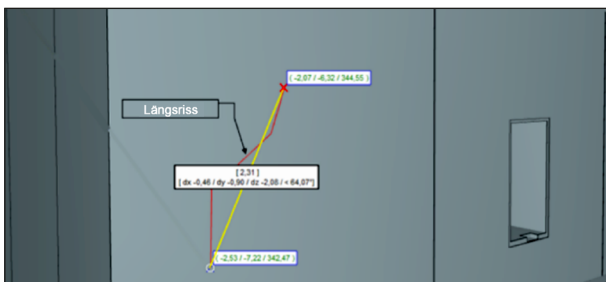


Bild 30: Exemplarische Darstellung einer Abmessung mithilfe des Demonstrators

Maßband

Bei der Betrachtung von Schäden spielt die Dimensionierung eine erhebliche Rolle. Hierzu wurden den Nutzern verschiedene Varianten aus der Anforderungsspezifikation vorgestellt und ebenfalls mittels einer Desktopanwendung exemplarisch demonstriert (siehe Bild 30).

Eine Variante ist die Aufnahme eines Maßes mittels manuellem Messgerät und Eingabe in den Demonstrator. In den meisten Fällen erscheint dieses Vorgehen als sinnig. Gerade im Bereich von Rissbreiten, wo ein direkter Vergleich stattfindet, sehen die Teilnehmer weiterhin das herkömmliche Vorgehen als richtig an.

Die Einbindung einer Messfunktion in den Demonstrator und somit eine direkte Messwertübernahme ist jedoch bei allen Teilnehmern als richtungsweisend angesehen worden. Hierbei ist jedoch die Genauigkeit als ein größeres Problem durch die Teilnehmer erkannt worden.

Als eine mögliche Erweiterung wird hier eine Risskarte, beispielsweise mit QR-Code, gesehen, wodurch die Messfunktion den Wert von der Risskarte erkennt und in den Demonstrator übernimmt. Diese Möglichkeit sollte allerdings als Ausblick beziehungsweise optional angesehen werden.

Die als Begeisterungsanforderung an den Demonstrator gesehene mögliche automatisierte Erkennung von Bauteilen oder Schäden und die automatische Vermessung durch Algorithmen wird eher als komplex und bei weitem als zukunftsorientiert gesehen. Allerdings wurde es von einem Teilnehmer sogar als Rückweisungsmerkmal ausgelegt, da keine Aussage über die Vertrauenswürdigkeit erfolgen kann.

Einen Vorschlag mit möglichem Mehrwert liegt beispielsweise bei der Aufnahme einer Abplattung vor.

Durch Aufnahme des Schadens aus mehreren Perspektiven könnte eine dreidimensionale Darstellung erfolgen und diese im 3D-Modell fixiert werden. Durch die Maßfunktion könnte anschließend eine Flächen- oder Volumenabmessung erfolgen.

Kommentieren

Neben der Schadensverortung, der bildlichen Dokumentation und der Dimensionierung gilt es die Schäden richtig zu beschreiben. An den Demonstrator wurden somit drei Anforderungen gestellt.

Als Basisanforderung wurde die Eingabe eines Freitextes mithilfe eines Eingabefeldes vorgesehen. Der Nutzer würde hierdurch die Beschreibung und Klassifizierung des Schadens manuell und nach seinem Verständnis beschreiben. Die Teilnehmer sehen dieses als sinnvoll an, jedoch als keinen höheren Mehrwert zum herkömmlichen Vorgehen. Eine Klassifizierung würde anschließend in SIB-Bauwerke ohnehin vorgenommen werden. Aus diesem Grund soll die Eingabe eines Freitextes nur als nachträglicher Kommentierung möglich sein.

Anders als bei der freien Texteingabe wird in der Leistungsanforderung auf eine Eingabe der Schadensbeschreibung auf Basis einer Vorauswahl zurückgegriffen. Hierbei werden dem Nutzer die Klassifizierungen nach Schadenstyp, zum Beispiel bei einem Riss, vorgegeben. Alle Teilnehmer der Experteninterviews sehen hier einen Mehrwert. Vor allem ist eine Einzelbewertung gegeben und keine individuell beschriebene Bewertung, wodurch ein besseres Bewertungssystem möglich ist. Ein Beispielkatalog existiert bereits und kann integriert werden.

Als Leistungsanforderung an den Demonstrator wurde eine Schadenbeschreibung mittels Sprachkommentar mit direkter Diktierfunktion vorgestellt. Hier ist durch Teilnehmer ein Rückweisungsmerkmal aufgezeigt worden, da das Risiko von falschen Eingaben hoch ist. Des Weiteren ist eine Unterdrückung äußerlicher Gegebenheiten möglicherweise schwierig bei der Umsetzung der Spracherkennung sowie die unterschiedlichen Dialekte in der deutschen Sprache.

Als eine doppelte Begeisterungsanforderung wurde eine durch künstliche Intelligenz automatisierte Schadenserkenkung durch einen Teilnehmer vorgeschlagen, welche im Anschluss den Schaden klassifiziert und dokumentiert. Diese Möglichkeit

wird allerdings als gänzlich schwierig in der Umsetzung angesehen und als Ausblick gewertet.

Markierungen

Einige Schadstellen werden, zur Wiederauffindung oder besseren Schadensaufnahme, mithilfe von Ölkreide markiert. Eine Möglichkeit, diese Markierung im Demonstrator abzubilden, ist eine anschließende Bildaufnahme nach der Markierung am Bauteil. Dieses Vorgehen wird von allen Teilnehmern als Basisanforderung an den Demonstrator gesehen.

Eine weitere Möglichkeit, welche einige Teilnehmer der Experteninterviews für einen Mehrwert halten, ist die Leistungsanforderung an den Demonstrator. Hierbei wird nach der Bildaufnahme des Schadens eine sogenannte Digitale Markierung vorgenommen. Bei dieser Variante wird durch den Nutzer die Markierung direkt auf der Bildaufnahme vorgenommen und somit abgespeichert. Die Teilnehmer sehen hier den Vorteil in der langfristigen Sichtbarkeit und des nachträglichen Hinzufügens von Markierungen bei der Nachbearbeitung.

Als eine Begeisterungsanforderung konnte eine automatische Erkennung der Markierung auf der Bildaufnahme mit automatischer Übernahme in die Digitale Markierung ausfindig gemacht werden. Dazu wird nach der Markierung auf dem Bauteil ein Foto aufgenommen und durch den Demonstrator in eine digitale Markierung umgewandelt. Diese Anforderung wird von den Teilnehmern als große Herausforderung angesehen und wird, da eine Markierung auf der Bildaufnahme bereits vorhanden ist, als nicht erheblicher Mehrwert gesehen.

Als eine doppelte Begeisterungsanforderung wurde durch einen Teilnehmer die digitale Markierungsfunktion mittels Gestensteuerung angesehen. Allerdings wird dies eher als eine mögliche zukünftige Variante angesehen. Es bedarf einem erheblichen Mehraufwand in der Programmierung des Demonstrators. Des Weiteren ist eine derartige Anwendung nicht fehlerfrei umsetzbar und bedarf einer ausreichenden Wartung.

Eingabe weiterer Messdaten

Bei der Bauwerksprüfung werden einige Überprüfungen mithilfe von Messgeräten durchgeführt. Eine mögliche Basisanforderung stellt hier die manuelle Messung dar und eine anschließende manuelle Eintragung des Wertes in den Demonstrator. In ei-

ner alternativen Vorgehensweise sehen vier von sieben Teilnehmer keinen Mehrwert und stufen dies somit als Anforderung an den Demonstrator ein.

Als Begeisterungsanforderung wurde den Teilnehmern beispielhaft eine digitale Fühlerlehre vorgestellt. Hierbei kann der Wert anschließend abgelesen werden und automatisch an den Demonstrator kabellos übergeben werden. Die digitale Fühlerlehre steht hier jedoch nur sinnbildlich für eine Vielzahl von möglichen digitalen Varianten von Messgeräten. Die Bewertung dieser Anforderung war nicht valide. Einige Teilnehmer sehen hier eine hohe Anforderung und einen höheren Mehrwert; hingegen andere Teilnehmer sehen die manuelle Eingabe an dieser Stelle für ausreichend.

Arbeitshilfen

Während der Bauwerksprüfung kann es vorkommen, dass der Nutzer auf Arbeitshilfen, Normen und Produktblätter zurückgreifen muss. Hieraus ergeben sich eine Leistungsanforderung an den Demonstrator, wodurch der Nutzer digital auf die Dokumente zurückgreifen kann. Für alle Teilnehmer ist dies ein erheblicher Mehrwert für die Prüfung. Es sollte allerdings ebenfalls die Möglichkeit vorhanden sein, auf historische Normen zurückgreifen zu können.

Als Begeisterungsanforderung wird eine Vergleichsmöglichkeit zwischen Planung, aktueller Situation und Norm vorgesehen. Dadurch kann direkt der Vergleich vor Ort und eine Beurteilung des möglichen Schadens vorgenommen werden. Die Teilnehmer sehen hier eine große Herausforderung, allerdings auch einen erheblichen Mehrwert, welcher als zukunftsorientiert angesehen werden kann.

Fernkommunikation

Als Basismerkmal der Fernkommunikation wird der Einsatz mittels Mobilfunkgerät genannt. Hierbei bedient sich der Nutzer der normalen Anruffunktion, um Kontakt zu einer Person aufzunehmen. Diese Anforderung ist als zuverlässigste anzusehen, da hierfür keine Internetverbindung benötigt wird. Von den Experten wird diese Funktion auch als Basismerkmal angesehen und verstanden.

Als Leistungsanforderung wird den Nutzern eine Kommunikation mittels Video- und Sprachfunktion genannt. Hierbei kommunizieren die Nutzer über

Anwendungen dritter Anbieter, welche eine entsprechende VoIP & Video-Chat Funktion bereitstellen. Dieses Merkmal ist jedoch nur mit einer Internetverbindung möglich und ist dementsprechend in Teilen nicht nutzbar.

Eine weitere mögliche Anforderung besteht bei der Nutzung einer Anwendung, welche dem Nutzer in der Ferne die Sicht vom vor Ort arbeitenden Nutzer zeigt. Dazu wird der Einsatz einer Kamera notwendig sein sowie eine lückenlose Internetverbindung in höchster Geschwindigkeit. Diese Anwendung wird als Begeisterungsanforderung angesehen und ist aktuell schwer umzusetzen. Die Experten finden diese Funktion interessant, sind sich jedoch der Anforderung bewusst, dass dies nicht abhängig von den Entwicklern ist.

3.3.2 Validierte Werkzeuge: technologisches Pflichtenheft

Nach Auswertung der Ergebnisse aus den Experteninterviews entstand eine Übersicht der Anforderung an den Demonstrator. Die Teilnehmer der Experteninterviews haben mehrheitlich den vorgestellten Leistungsanforderungen an den Demonstrator zugestimmt. Einige Anforderungen an den Demonstrator basieren auf den Basis- sowie Leistungsanforderungen des technologischen Lastenheftes, welche dort vorher identifiziert wurden. Die in Tabelle 13 aufgelisteten, validierten Werkzeuge sind Teil des Pflichtenheftes und bilden den technologischen Aspekt ab.

Hilfsmittel	Basisanforderung	Leistungsanforderung	Begeisterungsanforderung
Schadensverortung	Manuelle Ermittlung des Schadenorts und Eintragung im Modell	Ermittlung des Schadenorts mittels „Self Reporting“ und „SLAM“, mithilfe externer Marker. Virtuelle Markierung im Modell	Verortung durch GPS. Automatische Ortsaufnahmen bei Bildaufnahme
Bildaufnahme	Aufnahme mithilfe der eigenen Kamera und späterer manueller Import der Fotos in den Demonstrator	Einbindung der Fotoanwendung im Demonstrator	Einsatz einer HoloLens-Brille mit automatischer Fotoaufnahme
Messen	Mittels manuellem Messgerät und Eingabe in den Demonstrator	Einbindung der Messfunktion in den Demonstrator durch manuelle Festlegung von Messpunkten	Automatische Erkennung von Objekten und Darstellung eines Maßes
Kommentieren	Manuelle Eingabe der Schadenbeschreibung	Eingabe der Schadenbeschreibung auf Basis von Vorauswahl	Schadenbeschreibung als Sprachkommentar mit direkter Diktierfunktion
Markierungen z. B.: Ölkreide	Markierung mittels Ölkreide und anschließender Bildaufnahme	Bildaufnahme und anschließendes „virtuelles Markieren“ auf dem Bild direkt im Demonstrator	Markierung mittels Ölkreide und anschließendes automatisiertes „Virtuelles Markieren“ durch Schrifterkennung
Eingabe von weiteren Messdaten z. B.: Fühlerlehre	Manuelle Spaltnessung durch einführen unterschiedlicher Fühlerdicken		Automatische Spaltnessung mithilfe einer digitalen Fühlerlehre welche das Ergebnis automatisch an den Demonstrator übergibt
Arbeitshilfen, Normen und Richtlinien		Digitaler Zugriff auf relevante Arbeitshilfen, Normen und Richtlinien	Digitaler Abgleich zwischen Normenwerten, Werte der Planung und festgestellten Werten der Bauwerksprüfung
Fernkommunikation	Kommunikation mittels Mobilfunkgerät	Kommunikation mittels Video- und Sprachanruf	Kommunikation mittels LiveView aus Sicht der örtlichen Person

Grün markiert: Zielanforderung

Tab. 13: Übersicht der festgelegten Technologien auf Grundlage der Experteninterviews

4 Technologielandkarte

4.1 Management Summary

In dieser Technologielandkarte werden Produkte der Soft- und Hardware-Komponenten in den Bereichen BIM und AR/VR beleuchtet. Es wird anschließend dargelegt, warum bestimmte Produkte oder Produktgruppen nicht oder besonders gut für die angestrebte Verwendung bei der Brückenprüfung mit BIM-gestützter AR/VR geeignet sein könnten.

Bei der Betrachtung der einzelnen Produkte wird deren Entwicklungsstand mit dem Technology-Readiness-Level (TRL) eingestuft, welcher mit einem Level von 1 bis 9 angegeben wird, wo sich das Produkt zwischen Beschreibung des Funktionsprinzips (1) und marktreifem, mehrfach erprobtem System (9) befindet. Außerdem werden die Produkte auf bestimmte Funktionen und herausstechende, projektrelevante Merkmale untersucht und Empfehlungen zur weiteren Verwendung in den jeweiligen Produktgruppen ausgesprochen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Gruppen zusammengefasst.

4.1.1 Bereich Building Information Modeling (BIM)

Industry Foundation Classes (IFC): Für das BIM-Austauschformat besteht die Auswahl zwischen den etablierten IFC 2x3 und den aktuellen IFC 4.1. Letztere sind auf die Implementierung der kommenden Infrastruktur-Erweiterungen (IFC 4.2 für Brücken und darauffolgende Versionen) angepasst und bieten somit eine sinnvolle Entwicklungsgrundlage.

BIM Collaboration Format (BCF): Für Anmerkungen im Modell wie etwa die Verortung von Schäden inkl. Bildern soll die aktuelle Version BCF 2.1 verwendet werden.

Modellierungssoftware: Zur Modellierung einer Brücke wird die marktführende Software Autodesk Revit empfohlen, die umfangreiche BIM-Funktionen bietet und zur Lösung unkonventioneller Probleme online umfangreiche Lern- und Informationsmöglichkeiten bietet.

Koordinationssoftware: Zur nachträglichen Untersuchung und Bearbeitung des Modells (wie etwa das Anhängen von Informationen und Erzeugen von BCFs) soll die Datenmanagement-Software Desite MD von thinkproject verwendet werden, die

dies umfangreich ermöglicht und außerdem durch die offene API sehr individualisierbar ist.

Common Data Environment (CDE): Für die Verfügbarkeit der aktuellen Daten vor Ort und im Büro sollen die Daten in einer CDE gespeichert werden und online verfügbar sein. Für die Zwecke dieses Projekts wurde die Groupware BSCW des Fraunhofer FIT gewählt, welche als leichtgewichtige Software-Basis für das Cloud-System die erforderlichen Funktionen einer CDE-Lösung mit sich bringt. Die Plattform wird auf eigenen Servern der Projektbeteiligten verwendet und kann durch den Synchronisierungsclient BSync unterstützt werden, welche Offline-Änderungen von Dateien adäquat berücksichtigt. Außerdem können Anpassungen der Software für die Bedürfnisse des Projekts vorgenommen werden.

4.1.2 Augmented Reality (AR)/ Virtual Reality (VR)

Vorhandene AR-/VR-Anwendungen: Die Untersuchung der vorhandenen Produkte zeigte, dass diese durch die Ausrichtung auf eine bestimmte Zielgruppe nicht für die angestrebte digitale Unterstützung des Brückenprüfprozesses geeignet sind und daher eine entsprechende Prototyp-Anwendung entwickelt und bereitgestellt werden muss. Im Folgenden werden mögliche Produkte als Bestandteile dieses Prototyps beschrieben.

AR-Hardware: Bei der näheren Auswahl für ein Gerät zur AR-Darstellung zwischen einem Head-Mounted Displays wie der HoloLens und Tablets wie dem iPad Pro fiel die Entscheidung auf das Tablet. Argumente für das Tablet sind hierbei der deutlich geringere Preis, die bereits bekannte Interaktion über Touchscreen und physische Knöpfe als Teil einer generell fortgeschritteneren Technologieakzeptanz, die Anzeige für mehr als eine Person und die fehlende Sichteinschränkung einer HoloLens.

VR-Hardware: Bei der Auswahl eines VR-Produktes wurde unter den VR-Brillen die HTC Vive Pro ausgewählt, da sie einen guten Funktionsumfang wie etwa eine Schnittstelle zur Grafik-Engine Unity3D, hochauflösende Bildschirme, intuitive Bedienung, Eye-Tracking nach innen und optisches Positionstracking nach außen bietet. Außerdem soll eine Desktop-Anwendung für die Anzeige auf einem regulären Bildschirm die VR-Anwendung unterstützen, sodass weitere Personen oder solche, die die

Verwendung von VR-Brillen nicht vertragen, den Prototypen verwenden können.

Grafik-Engine: Als Engine wurde Unity3D gegenüber anderen Systemen, wie der Unreal Engine, bevorzugt und soll sowohl für die VR- als auch die AR-Anwendung verwendet werden. Die Engine wurde gewählt, da sie mit die anderen in diesem Projekt gewählten Komponenten kompatibel ist, bereits erfolgreich Erfahrungen mit ihr gesammelt wurden, eine Einbindung von Modellen als 3D-Austauschdateien während der Laufzeit möglich ist und Plugins zur Verbesserung der Workflows unterstützt werden.

Schnittstelle zwischen BIM und 3D-Visualisierung
Um die datentechnische Lücke zwischen dem BIM Modell und der 3D-Darstellung in VR und AR zu überbrücken, gibt es die Möglichkeiten einer direkten Bereitstellung von der BIM- an die Grafik-Anwendung und einer indirekten Bereitstellung mittels eines Konverters. Hierbei ist der direkte Import die erste Wahl und soll mittels des Unity3D-Plugins IFC-Importer erfolgen. Ist das nicht möglich, erlauben Programme wie Autodesk 3DS Max oder Blender mit der Erweiterung IFCBlender eine geskripte Konvertierung des BIM-Modells.

4.2 Technologie-Reifegrad-Metrik

Die Methode zur Verwendung eines Technologie-Reifegrades (Technology-Readiness- Level, TRL) wurde 1989 formell von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) definiert und findet seither breite Anwendung zur Einschätzung der Reife von Technologien während der Akquisitionsphase eines Projektes.

Für die Technologielandkarte werden die gebräuchlichen Technologien der respektiven Themenfeldern ihres TRL entsprechend evaluiert und in eine von 9 Stufen eingeordnet (siehe Bild 31).

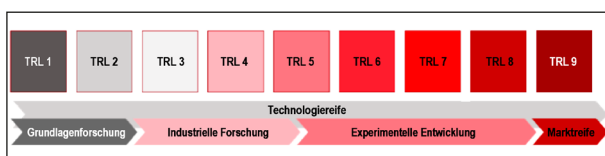


Bild 31: Bedeutungseinordnung der einzelnen Stufen (Levels) der Technology-Readiness-Levels (Bild: LIST Gruppe gemäß NASA-Definition des TRL)

Die Stufen beschreiben dabei:

- TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips
- TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie
- TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie
- TRL 4: Versuchsaufbau im Labor
- TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
- TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung
- TRL 7: Prototyp im Einsatz
- TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
- TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

4.3 Building Information Modeling (BIM)

4.3.1 Dateiformate

4.3.1.1 Industry Foundation Classes (IFC)

Um einen offenen und herstellerunabhängigen Datenaustausch zwischen den Projektbeteiligten während der Bearbeitung eines Projektes ermöglichen zu können, kann auf das Datenaustauschformat der ICF zurückgegriffen werden.

IFC 2x3

Version 2x3 der IFC wurde der International Standardisation Organisation (ISO) vorgelegt und dort 2008 als ISO/PAS 16739:2005 veröffentlicht. Die IFC 2x3-Version und das IFC 2x3-TC1-Update sind in Bezug auf die IFC-Austauschdatei gleich und beide werden für die IFC 2x3-Implementierung und Zertifizierung verwendet. Heute wird IFC 2x3TC1 als IFC 2x3 bezeichnet und es ist die empfohlene IFC-Version. Der Austausch mit IFC findet in der gegenwärtigen Praxis überwiegend in 2x3 statt.

IFC 4

IFC 4 (ehemals IFC 2x4) wurde 2013 als neue IFC-Plattform veröffentlicht. Es umfasst mehrere Erweiterungen von IFC in den Bereichen Gebäude, Gebäudetechnik und Struktur, Verbesserungen der Geometrie und anderer Ressourcenkomponenten sowie zahlreiche Qualitätsverbesserungen, die vollständig integriert sind, einfache ifcXML-Spezifikation und ein neues Dokumentationsformat.

TLR 9

IFC 4 ADD 2

Das zweite IFC 4-Addendum enthält die erforderlichen Verbesserungen, die vor dem Start des IFC4-Zertifizierungsprozesses für die IFC 4-Referenzansicht und die IFC 4-Entwurfsübertragungsansicht angefordert wurden, insbesondere für verbesserte Geometriedefinitionen. Die endgültige Version IFC4 ADD 2 wurde im Juli 2016 als buildingSMART Final Standard veröffentlicht und ist die Basis für die Modellansichten IFC Reference View V1.1 und IFC 4 Design Transfer View V1.1. IFC 4 ist die vierte Erweiterung der IFC Version 2, daher ist IFC 2x3 eine Teilmenge von IFC 4. Grundsätzlich besitzt IFC 4 das gleiche Schema wie IFC 2x3, jedoch mit zusätzlichen Funktionen. In der Praxis ist dies nuancierter und es gibt Ausnahmen, die die Kompatibilität einschränken.

TRL 9

IFC 4.2

Der Hauptzweck von IFC 4.2 besteht darin, das IFC-Schema um die Beschreibung von Brückenkonstruktionen zu erweitern. Zu den Erweiterungen des IFC 4.1-Schemas gehören Klassen und Strukturen, die die Modellierung und Beschreibung von Brücken ermöglichen. Sie sind aus dem Forschungsprojekt IFC-Bridge des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hervorgegangen. Die Version 4.2 ist zurzeit Kandidat für eine offizielle Zulassung, eine IFC4x2 DRAFT STANDARD-Version ist bereits veröffentlicht.

TRL 7

IFC 5

IFC 5 befindet sich derzeit in der frühen Planungsphase. Es wird erwartet, dass es die volle Unterstüt-

zung für verschiedene Infrastrukturdomänen und verbesserte parametrische Funktionen umfasst. Das erste aktive Projekt unter buildingSMART International zur Erweiterung der IFC-Definition für die Infrastrukturdomäne ist das IFC-Alignment-Projekt zur Integration von Trassierungsbrauerwerken.

TRL 2

Zusammenfassung zu den BIM-Formaten

Obwohl buildingSMART mit der Weiterentwicklung von IFC konstant voranschreitet, teilt sich die Verwendung der IFC-Versionen zwischen IFC 2x3 und IFC 4 auf, wobei die Mehrheit der Benutzer weiterhin das IFC 2x3 Format verwenden.

Da die Version 2x3 belastbar erprobt ist und es daher kaum zu Fehlern im Prozessablauf kommen sollte, die auf das Dateiformat zurückzuführen sind, ist eine Verwendung dieser Version eine sichere Option. Im Rahmen der Untersuchung von neuen Methoden und Technologien in einem Forschungsprojekt sollte in Betracht gezogen werden, die aktuellere Version IFC 4 zu verwenden, um von der Erweiterung IFC-Bridge Gebrauch machen zu können.

4.3.1.2 BIM Collaboration Format (BCF)

Um Probleme, die bei der Modellierung und Zusammenführung von Modellen auftreten, aufnehmen und austauschen zu können, hat sich das BCF als Standard durchgesetzt. Es ist seit seiner Einführung 2013 in Gebrauch und findet weltweit Verwendung, aktuell in der Version 2.1. Für die Brückenprüfung haben sich die Qualitätsmerkmale Verkehrssicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Stand-sicherheit als ausschlaggebend für die Evaluierung von Brückenschäden erwiesen. Diese Merkmale sollten in das BCF-Format integriert werden.

4.3.2 Modellierungssoftware

CAD-Softwares zur BIM-tauglichen Modellierung ermöglichen eine Modellierung der Bauteilgeometrien und der dazugehörigen semantischen Informationen eines Bauteils. Diese Softwares sind bereits vielfältig am Markt vertreten und im Falle der hier aufgeführten Marktführer vielfach praxiserprobt. In Tabelle 14 werden die untersuchten Softwares inkl. ihres TRL aufgeführt.

Software	Beschreibung	TRL
Autodesk Revit	Marktführer im Bereich der BIM-basierten CAD-Softwares. Modellierung erfolgt parametrisch auf Basis von vordefinierten Bauteilobjekten, die durch die Objekthierarchie des Programms definiert sind (Kategorien, Familien, Typen, Instanzen).	9
Grafisoft ArchiCAD	Etablierte BIM-Software gerichtet an Architekten und Designer. Modellierung erfolgt parametrisch.	9
Nemetschek Allplan	BIM-Software für Architekten und Ingenieure. Modellierung erfolgt parametrisch. Bietet mit dem neuen Allplan Bridge eine Software speziell zur Brückenmodellierung und -berechnung.	9
Bentley OpenBuildings Designer	BIM-Software für Architekten und Ingenieure. Basiert auf der CAD-Software Bentley Microstation. Modellierung erfolgt parametrisch.	9
Tekla Structures	BIM-Software für die Tragwerksmodellierung. Modellierung erfolgt parametrisch.	9
Siemens NX AEC Suite	CAD/CAM/CAE-Software mit Möglichkeit zum IFC-Export (nicht zertifiziert). Ausgerichtet auf die parametrische Modellierung, speziell von Trassen und Brücken.	9
card_1	BIM-Software für Tiefbau- und Infrastrukturprojekte wie Straßenbau, Gleisbau & Kanalbau mit einer engen Anbindung an die Koordinationssoftware Desite MD.	9

Tab. 14: Betrachtete BIM-basierte Modellierungssoftwares und ihr Technology-Readiness-Level (TRL)

Als Grundlage für die Auswahlentscheidung einer Modellierungssoftware wurde berücksichtigt, dass die Software nicht nur für die Modellierung eines Architekturmodells, sondern auch für Ingenieurbauwerke geeignet sein soll, da sie die technischen Aspekte eines Brückenbauwerks abbilden muss. Außerdem soll die Software eine BIM-taugliche Datenmodellierung umsetzen, d. h. Bauteilobjekte mit beliebigen semantischen Informationen anreichern.

Daraus folgernd wird als geeignete Lösung die Software Autodesk Revit für die Verwendung im Projekt betrachtet, da sie einen ausgiebigen Funktionsumfang zur Modellierung verschiedener Bauwerkselemente, u. a. für Brücken, besitzt. Die Position als marktführende, weit verbreitete Software hat dazu geführt, dass eine umfangreiche Menge an Informationen online verfügbar ist, auf deren Basis individuelle Lösungen erarbeitet werden können.

4.3.3 Koordinationssoftware

Während eines BIM-Projektes ist die Zusammenführung von Teilmodellen zu einem Gesamtmodell und die Prüfung der Teil- und Gesamtmodelle meistens erforderlich. Diese Funktionalitäten können von Koordinationssoftwares bereitgestellt werden. Tiefergreifende Funktionalitäten mancher Softwares ermöglichen die Anpassung und Anreicherung der vorhandenen Modelldaten.

BIMCollab Zoom

Model Viewer und Koordinationswerkzeug, welches den Import und die Koordination von IFC-Modellen mit Kollisionsprüfung und Anzeige von Eigenschaften ermöglicht. Issues (Anmerkungen und Probleme) können als BCF importiert und exportiert werden. Eine Bearbeitung und Ergänzung von Modelldaten ist jedoch nicht möglich.

TRL 9

BIMvision

Kostenloser IFC-Viewer, welcher sich durch kostenpflichtige Plugins erweitern lässt, etwa zur Kollisionserkennung, BCF-Erzeugung oder zum Auswerten von Eigenschaften. Mit Plugins zur IFC-Zusammenführung oder –Aufteilung ist auch ein Export von IFC-Dateien möglich, jedoch keine inhaltliche Bearbeitung der Modelldateien.

TRL 9

Autodesk Navisworks

Koordinationssoftware zur Erstellung, Prüfung und Visualisierung von Koordinationsmodellen aus einer großen Anzahl (etwa 60) verschiedener Dateiformate. Ein Export von ICF-Dateien ist nicht mög-

lich und ein Export von BCF-Dateien nur über Add-ins wie etwa von BIMCollab.

TRL 9

Solibri Model Checker

Koordinationssoftware mit Fokus auf die regelbasierte Prüfung von Teil- und Koordinationsmodellen. Vorgefertigte Regeln können angepasst, verknüpft und Prüfmengen zugewiesen werden. Die Ergebnisse können als BCF-Datei übermittelt werden. Ein Export von ICF-Dateien ist nicht möglich.

TRL 9

thinkproject Desite MD

Koordinationssoftware mit einer Vielzahl an importierbaren Formaten und Bearbeitung der Informationen bis hin zu grundlegenden Datenstrukturen wie Punkten eines Objektes oder Datentypen eines Attributs. Neben den Funktionen der grafischen Oberfläche können diese auch durch die Desite-API (JavaScript) verwendet werden und ggf. in eine eigene Oberfläche (HTML) innerhalb von Desite eingebunden werden. Die Software bietet außerdem IFC- und BCF-Import und -Export.

TRL 9

Zusammenfassung zur Koordinationssoftware

Auf Basis der Annahme, dass Forschungsprojekte individuelle Lösungen erfordern, ist es sinnvoll, eine Koordinationssoftware zu verwenden, die individuelle und experimentelle Funktionen ermöglicht. Im Laufe dieses Projekts wäre es am vorteilhaftesten, Desite zu verwenden, da es im Gegensatz zu den anderen Softwares die Anpassung und Erweiterung von Modellen, etwa durch semantische Informationsanreicherung oder durch Anhängen von Bildern oder anderen Dokumenten, und den IFC-Export dieser Modelle ermöglicht.

4.4 Common Data Environment

Die Zentralisierung der Informationen in einem ganzheitlichen Building Information Model erfordert zur effektiven Verwendung auch eine zentrale Verwaltung der Projektdaten. Zu diesem Zweck werden Softwares als Plattform für ein Common Data Environment (CDE) angeboten. Eine Auswahl dieser Softwares wird in Tabelle 15 betrachtet, wobei hier nur die deutschsprachigen CDE-Lösungen betrachtet werden.

Für die Auswahl einer geeigneten CDE sollte diese für die Verarbeitung von Daten öffentlicher Bauwerke in Deutschland ausgelegt oder angepasst sein.

Software	Beschreibung	TRL
thinkproject CDE	Cloud-basierte CDE-Plattform (ISO 19650-konform) mit Serverstandort in Deutschland. Mit Dateiversionierung. Anpassung unter anderem durch Programm-Schnittstellen und über die Rest API möglich.	9
EPLASS	Auf Infrastrukturprojekte spezialisierte cloud-basierte CDE-Plattform (ISO 19650-konform) mit Serverstandort in Deutschland. Mit Dateiversionierung. Bietet ebenfalls die Schnittstelle der Rest API Wird bereits vielfach in deutschen Infrastrukturprojekten verwendet, u. a. von DEGES. Unterstützt die integrierte Ausführung von Desite.	9
Autodesk BIM 360	Zentrale, cloud-basierte Koordinationsplattform mit Serverstandort Irland. Mit Dateiversionierung. Optimiert für die Verwendung mit anderen Autodesk-Produkten wie Revit. Eigene API als Teil von Autodesk Forge verfügbar.	9
Nemetschek Allplan BIMplus	Zentrale, cloud-basierte Koordinationsplattform mit kostenloser Basisversion, direkter Anbindung an Allplan, einer API zur Anbindung von Software und VR-Addons	9
Trimble Connect	Zentrale, cloud-basierte Koordinationsplattform mit kostenloser Basisversion und HoloLens-Unterstützung. Optimiert für Tekla-BIM-Software.	9
BSCW Shared Workspace	Webbasierte Groupware (Cloud-Kollaboration und -Kommunikation) als Software für eigenen Server. Beinhaltet Rechte- und Rollenmanagement und gruppenbasierten Austausch von Dokumenten, Terminen, Aufgaben, Notizen etc. Entwickelt von Fraunhofer FIT.	9

Tab. 15: Betrachtete Softwares für Common Data Environments (CDE) und ihr Technology-Readiness-Level (TRL)

Auf einzelne Kriterien reduziert bedeutet das, dass die Benutzeroberfläche auf Deutsch verfasst sein sollte und die ggf. sensiblen Prüfinformationen aus Gründen des Datenschutzes in Deutschland gespeichert werden sollten. Die Datenumgebung sollte die Versionierung der Daten ermöglichen, etwa um sich verändernde Informationen zu bewahren oder Schadensverläufe nachzuvollziehen. Des Weiteren sind für das zu entwickelnde System, wie auch bei den oben genannten Software-Kategorien, offene Schnittstellen sinnvoll, um unkonventionelle Anbindungen, wie die der AR-App, zu ermöglichen.

In die engere Auswahl fiel unter anderem EPLASS. Als Alleinstellungsmerkmal ermöglicht die Plattform die Verwendung von Desite aus der CDE heraus, wobei der Viewer Desite Share standardmäßig in die CDE integriert ist. Bei vorhandener Lizenz kann Desite MD in der Plattform integriert genutzt werden und ermöglicht es somit, aktiv Informationen in Modellen zu verändern oder zu ergänzen, wie etwa Dokumente und Bilder anzuhängen und zu verknüpfen oder Attribute zu bearbeiten. Nachteil hierbei ist, dass die Verwendung nur bei bestehender, guter Internetverbindung möglich ist.

Alternativ wurde auch Autodesk BIM 360 als mögliche CDE-Lösung betrachtet, da es eine direkte Verbindung zur gewählten Modellierungssoftware Autodesk Revit besitzt und mit einer eigenen umfangreichen API (enthalten in Autodesk Forge) ausgestattet ist. Der Serverstandort ist in Irland, jedoch wären Server in Deutschland für Daten deutscher Verwaltungskörper vorzuziehen. Außerdem sind sowohl EPLASS als auch BIM 360 funktionsreiche Plattformen, bei denen die überwiegenden Funktionen nicht benötigt werden, sich aber sehr wohl im Budget bemerkbar machen würden.

Als leichtgewichtige und passendere Lösung für dieses Projekt wird das BSCW-System des Fraunhofer FIT betrachtet. Das System bietet als Cloud-Lösung mit Rechte- und Rollenmanagement die erforderlichen Funktionalitäten einer CDE-Umgebung. Da es sich bei diesem System nur um die Software handelt, kann eine bereits bei den Projektpartnern vorhandene Server-Hardware verwendet werden, sodass die Daten in Deutschland liegen. Dieser Umstand wird bereits von der Bundesverwaltung genutzt und von der BAST zur Bereitstellung der Modelldateien für dieses Projekt. Die Plattform ist webbasiert verwendbar, es besteht jedoch die Option zur lokalen Synchronisation auf einem Endbenutzergerät mit dem Synchronisationsclient

BSync, welcher Konfliktbeseitigungen auch unter Berücksichtigung von Offline-Arbeit, wie sie bei der Brückenprüfung vorkommen kann, integriert. Trotz der leichtgewichtigen Lösung ist diese Option ausreichend, um die erforderliche Cloud-Lösung umzusetzen.

4.5 Augmented/Virtual Reality (AR/VR)

Aktuell sind eine Vielzahl von Möglichkeiten und Technologien auf dem Markt verfügbar sowie Methoden aus der Forschung und Entwicklung anwendbar, um Darstellungen für AR- und VR-Anwendungen realisieren zu können. Dabei ist die Herausforderung, jede Technologie, Anwendung und Hardware so zu analysieren und filtern, um das optimale und zielführende Paket für die geforderten Zwecke zu erhalten.

In den nachfolgenden Punkten werden die für das Projekt wichtigsten und interessantesten Inhalte von Softwaresystemen, Entwicklungsumgebungen sowie die relevantesten VR- und AR-Hardwaresystemen erläutert und hinsichtlich ihres TRL klassifiziert. Die gewählte Klassifizierung kann dabei oftmals nicht eindeutig vorgenommen werden; aus diesem Grund werden bei einigen Beispielen unten auch nur Bereiche angegeben.

4.5.1 Beispielanwendungen

Folgende Beispielanwendungen aus Wirtschaft und Forschung wurden bereits in Kapitel 2.4.2 vorgestellt. Die folgende Auflistung enthält daher nur die Einordnung in das Technology Readiness Level und verzichtet auf eine ausführliche Beschreibung:

- Beispiele aus der Wirtschaft

Beispiel:	TRL:
Trimble	9
The Wild	9
VRcollab	9
IRIS VR	9

- Beispiele aus der Forschung

Beispiel:	TRL:
ARTHUR	3-5
Outdoor Markerless Tracking mit SLAM	4-6
Indoor Visualisierungen von BIM-Daten	4-5

Virtuell immersives Stadtplanungsmodell	5-6
VR2WEB	4-5

Zusammenfassend lässt sich hervorheben, dass die o. g. Beispiele aus der Wirtschaft und Wissenschaft teilweise zur Projektumsetzung beitragen könnten. Allerdings handelt es sich bei den Lösungen aus der Wirtschaft um gekapselte Anwendungen für eine bestimmte Zielgruppe. Eine spezielle Anwendung oder Lösung für die digitale Unterstützung des Brückenprüfungsprozesses fehlt gänzlich. Daher wird eine maßgeschneiderte Prototyp-Anwendung entwickelt und bereitgestellt, mit einem anvisierten TRL von 5-6, in die die Erkenntnisse der Projekte aus der Wissenschaft einfließen. Wichtig ist hierbei insbesondere die praxisnahe Erprobung in der Einsatzumgebung, sprich, auf, an und in der Brücke.

4.5.2 Hardware

In AR und VR bestehen eine Vielzahl von Eingabe- und Ausgabemöglichkeiten. Dieses Kapitel beschreibt die verschiedenen Geräteklassen, die dies ermöglichen, aus Sicht der Hardwareebene.

4.5.2.1 Mixed- und Augmented Reality

Die folgende Betrachtung beschränkt sich auf Geräte, die am bzw. auf dem Körper getragen werden und die Realität um Zusatzinhalte erweitern.

Die zwei gängigen Geräteklassen sind Handheld Geräte und Head-Mounted-Displays (HMDs), auf die im Folgenden genauer eingegangen wird.

Zu Handheld Geräten zählen heutige Smartphones und Tablets, die als gängige Produkte am Markt verfügbar sind (TRL 9). Sie sind üblicherweise mit einem berührungsempfindlichen Farbdisplay ausgestattet sowie diversen weiteren Aktoren und Sensoren. Handheld-basierte AR-Anwendungen arbeiten im Video See-Through Modus, bei dem das Kamerabild auf dem Display angezeigt und in Echtzeit mit Zusatzinhalten überlagert wird. Der Bildschirm fungiert als Fenster in die erweiterte Realität, beschränkt auf den Bereich, der für die Kamera sichtbar ist.

AR und MR HMDs (s. Tabelle 16) werden auf dem Kopf getragen und existieren in verschiedenen Formfaktoren, wie Brille und HWD. Brillen sind leichtgewichtige Geräte, vergleichbar mit normalen Brillen zur Sehstärkenkorrektur. HWDs hingegen

sind schwerer, haben aber dafür mehr Leistung und verbaute Sensorik. Ihr Gewicht wird auf dem ganzen Kopf verteilt. Die hier vorgestellten Geräte sind Optical See Through Geräte, wo virtuelle Inhalte auf ein transparentes Brillenglas projiziert werden.

Alle in Tabelle 16 präsentierten Geräte besitzen ein TRL von 8-9.

Eine wesentliche Eigenschaft von AR-/MR-Geräten ist die Fähigkeit des Motion Trackings, d. h. die Erfassung der Position und Orientierung des Geräts im 3D-Raum. Es existiert eine Vielzahl an Trackingverfahren, bspw. Kamera-, WLAN- oder GPS-basiert, die sich in ihrer Präzision und Installationsaufwand stark unterscheiden und unterschiedliche Anforderungen an die Umgebung haben. Ein guter Kompromiss ist die kamerabasierte Visual-Inertial-Odometry (VIO) Technik, die keinen zusätzlichen Installationsaufwand erfordert, jedoch ausreichende Helligkeit voraussetzt. Sowohl Handheld-Geräte, wie moderne Tablets, als auch HWDs, wie die HoloLens 2, verfügen über VIO-Tracking, z. B. die Implementierungen ARKit (iOS) bzw. ARCore (Android).

Abschließend bleibt die Entscheidung, ob die Prototyp-Anwendung (im Außeneinsatz an der Brücke) entweder für ein Handheld-Tablet oder für ein HWD (HoloLens 2 o. ä.) entwickelt werden soll.

Aufgrund folgender Faktoren fällt hier die Entscheidung zu Gunsten des Tablets:

- Ein Tablet hat eine höhere Technologieakzeptanz, insb. bei älteren Benutzern, die Tablets bereits kennen (CZAJA et al., 2006, CLAßEN, 2013) und diese teilweise bereits in der Bauwerksprüfung einsetzen, z. B. für SIB-Bauwerke.

Name	Formfaktor	Eigenständig	Motion Tracking	Siehe auch
Microsoft HoloLens 2	HWD	Ja	Ja	Magic Leap One, Lenovo ThinkReality A6
EPSON Moverio BT-350	Brille	Nein (Mobiler ext. Prozessor)	Nein	
Vuzix Blade	Brille	Nein (Smartphone)	Nein	North Focals

Tab. 16: Übersicht konkreter MR-/AR-Brillen zum Projekt

- Tablets lassen sich durch bereits bekannte Interaktionstechniken bedienen, z. B. Touchscreen, seitliche Tasten oder Spracheingabe. HWDs wie die HoloLens hingegen verwenden eine ungewohnte Handgestensteuerung, kombiniert mit einer Steuerung durch die Blickrichtung sowie Spracheingabe. Tablets erlauben auch eine verbesserte Kooperationsfähigkeit, da mehrere Nutzer zeitgleich den Bildschirm betrachten und somit besser kollaborieren als mit einer HoloLens, wo nur der Träger das Display einsehen kann (RIEDLINGER, OPPERMANN and PRINZ, 2019).
- HWDs wie die HoloLens schränken die Sicht stark ein. Virtuelle Inhalte werden aufgrund eines kleinen Sichtfelds abgeschnitten. Bei HWDs kann es zu Farbverfälschungen der virtuellen Inhalte kommen⁶⁰. Bei sehr hoher Umgebungshelligkeit (Sonnenlicht) sind virtuelle Objekte nur schwer erkennbar, da die Projektionshelligkeit nicht ausreicht. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, sind die Frontscheiben von HWDs oft leicht getönt. Diese Tönung sowie der Gehäuserahmen des HWDs schränken die Sicht ein. Ein Tablet hingegen hat keinen dieser Nachteile.
- Die HoloLens 2 ist aktuell mit einem Preis von über 3.000 € ca. 3 x teurer als eines der teuersten Tablets, das iPad Pro (ca. 1.000 €). Dadurch ist ein Tablet für den Bauwerksprüfer preislich attraktiver. Zudem wird dadurch die Bewegungsfreiheit des Prüfers weniger eingeschränkt, da sich dieser weniger bedächtig bewegen muss, aus Sorge darum, das Gerät bei einem Fehltritt zu beschädigen.

Da VIO-basiertes Tracking nur relative Koordinaten liefert (die aber, im Gegensatz zu absoluten Koordinaten wie GPS-Koordinaten, zentimetergenau sind), muss der Nutzer seine Position (relativ zur Brücke) selbst angeben. Dies kann rein virtuell in der Anwendung erfolgen, z. B. in dem der Nutzer mit der Kamera mehrere definierte Koordinaten anvisiert und auf dem Display markiert. Alternativ kann

markerbasiertes Tracking eingesetzt werden, bei dem der Prüfer an definierten Orten Marker platziert, z. B. in Form von bedruckten Platten mit Größe von DIN A3/A4.

4.5.2.2 Virtual Reality

VR-Systeme unterteilen sich in immersive Projektionsflächenlösungen (wie CAVEs oder Powerwalls) und VR-Brillen. Aufgrund der hohen Kosten und des Installationsaufwands werden Projektionsflächenlösungen jedoch nicht tiefer betrachtet.

Bei VR-Brillen unterscheidet man zwischen a) mobilen Lösungen, wo Display und Recheneinheit in einem Gerät untergebracht sind, und b) stationären Lösungen, wo die Brille lediglich das Display darstellt, welches per Kabel (oder drahtlos) mit einem PC verbunden ist, der die Grafikberechnung durchführt. Mobile Brillen haben eine geringe Rechenleistung als stationäre Systeme, da die mobile CPU und GPU-Hardware deutlich kleiner und energieeffizienter sein muss. Tabelle 17 zeigt einen Auszug der stationären Brillen.

Für die Umsetzung des Projekts werden mobile Brillen zunächst nicht weiter betrachtet, da zum aktuellen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden kann, ob die Rechenleistung ausreichend ist. Eine spätere Betrachtung ist aber nicht ausgeschlossen.

Für das Projekt soll die stationäre Brille HTC Vive Pro Eye Series verwendet werden, da diese die höchste visuelle Qualität (dank hoher Pixeldichte) ermöglicht, das präziseste Tracking bietet und Eye-tracking integriert hat.

Neben der Darstellung auf der VR-Brille wird die Prototyp-Anwendung auch die Ausgabe auf einem herkömmlichen Bildschirm unterstützen. Der Vorteil dieses Hybridansatzes liegt in der individuellen Möglichkeit zur Anzeige der Ergebnisse. Steht einem Teilnehmer bspw. kein HMD zur Verfügung oder erfüllt der PC die HMD-Hardwareanforderungen nicht, so kann die gleiche Anwendung den herkömmlichen Bildschirm zur Ausgabe nutzen. Da die immersiven HMD-Systeme bei Nutzern zu Motion Sickness führen können, wird hiermit ein zusätzlich nutzbares Medium geschaffen. Die Desktopversion wird im Rahmen dieses Projektes so konzipiert, dass diese auf einem herkömmlichen Business-

⁶⁰ Siehe <https://forums.hololens.com/discussion/1112/rainbow-tint-in-fov-is-this-normal> (HoloLens 1) bzw. <https://venturebeat.com/2020/01/16/microsoft-confirms-hololens-2-display-issues-as-headsets-remain-scarce/> (HoloLens 2).

Name	Auflösung, Framerate	Controller	Motion tracking	Besonderheiten
HTC VIVE Pro	1440 x 1600, 90 Hz	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF Base-Stations	Audio Zusatz integriert Optionales EyeTracking, kabellos
Valve Index	1440 x 1600, 90-144 Hz	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF Base-Stations	Audio Zusatz integriert, zusätzliche Tracker möglich
Oculus Rift S	1280 x 1440, 80 Hz	Touch Controller mit Motion Tracking	Rotation, Position 6DoF	Keine Base-Station benötigt

Tab. 17: Übersicht möglicher stationärer VR-Brillen für das Projekt

System genutzt werden kann. Das System sollte lediglich nicht mehr als drei Jahre alt sein.⁶¹

Beim HMD-System wird auf die aktuelle Version der HTC Vive Pro (Eye Series) zurückgegriffen, welche in Tabelle 17 vorgestellt wird. Die Vorteile dieser VR-Brille sind:

- Robuste Schnittstellen zu Entwicklungs-umgebungen wie Unity3D
- Gute Darstellungsqualität durch hohe Pixeldichte
- Einfache Handhabung und teils bekannte Bedienung
- Integriertes Eyetracking, welches in der Projektentwicklung genutzt werden könnte
- Präzises optisches Outside-In Trackingsystem

4.5.3 Software

Um den Entwicklungsaufwand für die Prototyp-Anwendungen geringzuhalten, wird auf Cross-Plattform Game Engines zurückgegriffen. Die zwei größten Vertreter sind Unity3D (Unity Technologies)⁶² und Unreal Engine (EPIC Games)⁶³ (beide TRL 9), welche alle gängigen Desktop- und Mobilbetriebssysteme (Tablet) unterstützen.

Für dieses Projekt fällt die Wahl auf die Unity3D Game Engine, die sowohl für die VR- als auch AR-/MR-Prototypen verwendet werden soll, da diese

(gegenüber der Unreal Engine) die folgenden Vorteile bietet:

- Vorerfahrungen bei den Projektpartnern
- Import bzw. Anbindung verschiedener 3D-Modell-Austauschformate zur Laufzeit
- Adaptive Entwicklung in der C#-Programmiersprache
- Integration von Plugins für optimierten Workflow
- Native Unterstützung aller im Projekt benötigten Ein-/Ausgabemedien und -Frameworks, wie AR-/MR-/VR-Brillen und Controller

4.5.4 Schnittstellen zwischen BIM und AR/VR

Da die Schwerpunkte von BIM-Programmen und Game Engines verschieden sind, ergeben sich im Kern unterschiedliche Dateiformate. Dies erschwert die Anbindung bzw. Integration von BIM-Modellen in Game Engines. Die Anforderung dieses Projekts ist, dass das von der BIM-Software exportierte Modell in Dateiform in einem Austauschformat (wie etwa IFC) via Internet an die MR- oder VR-App übertragen und dann in die Engine geladen wird. Das Modell muss in der Engine mit flüssiger Bildwiederholrate angezeigt werden (vgl. OPPERMANN, SHEKOW and BICER, 2016).

Folgende technische Herausforderungen müssen dabei gelöst werden:

1. Das Modell soll von der Game Engine zur Laufzeit, auf Knopfdruck, geladen werden. Es wäre nicht zweckgemäß, das Modell nur zum Erstellungszeitpunkt der MR/VR-App statisch einzubinden, da sich das Modell häufig ändern kann, die MR/VR-App aber nicht ständig neu gebaut werden sollte.

⁶¹ <https://docs.unity3d.com/Manual/system-requirements.html>

⁶² <https://unity.com>

⁶³ <https://www.unrealengine.com/en-US/>

2. Game Engines unterstützen nur eine eingeschränkte Auswahl an 3D-Formaten.
3. Das BIM-Modell ist evtl. zu komplex, um auf mobilen Geräten, auf der die MR-App läuft, bei flüssiger Wiederholrate angezeigt zu werden. In diesem Fall muss es zuerst optimiert werden.

Zur Lösung der ersten Herausforderung haben sich verschiedene Möglichkeiten etabliert, z. B. verschiedene Plugins⁶⁴ für die Unity3D Engine, die den Import von 3D-Modelldateien zur Laufzeit ermöglichen. Alternativ ist in Unity3D der Import von sogenannten Asset Bundle Dateien möglich⁶⁵, deren Erstellung aber eine Unity Editor Instanz erfordert, die auf einem Server im Dauerbetrieb laufen muss und somit zusätzliche Lizenzkosten verursacht. Im Gegensatz zu Unity3D ist bei der Unreal Engine ein Import zur Laufzeit nicht möglich, da diese Funktionalität weder nativ noch per externen Plugin nachgerüstet werden kann.

Zur Lösung der o. g. zweiten und dritten Herausforderung gibt es zwei Herangehensweisen: den Direktimport und den indirekten Import (vgl. auch Bild 32). Der Direktimport ist möglich, wenn ein kompatibles Modell-Austauschformat existiert, sodass zwischen Export aus der BIM-Anwendung und Import in die MR/VR-Engine zur Laufzeit keine Verarbeit-

ung notwendig ist. Der indirekte Import hingegen verwendet ein Konvertierungsprogramm, in das das Modell aus der BIM-Anwendung geladen wird. Anschließend erfolgen ggf. eine Optimierung und der Export in ein Game Engine-kompatibles Format. Dieser Ablauf sollte jedoch automatisiert und – aus Datenschutzgründen – ohne die Nutzung einer Cloud erfolgen.

Die auf dem Markt erhältlichen Programme, die eine BIM-Modell Integration in eine Game Engine ermöglichen, lassen sich in zwei Kategorien aufteilen:

- **Converter:** Software, die diverse Dateien in Austauschformat X importiert und als natives Format oder Austauschformat Y exportiert. Die Datei in Format Y muss von der Engine importierbar sein. Kommerzielle Programme sind bspw. 3DS Max (automatisierbar durch MAX-script), CrossManager⁶⁶ (automatisierbar in der Advanced Edition) oder CAD Exchanger⁶⁷ (automatisierbar in der CLI Version). Auch BIM-Software wie Autodesk Revit erlaubt den Import von bestimmten Austauschformaten (wie IFC 2x3) und den anschließenden Export in einem Austauschformat wie FBX. Von IfcOpenShell gibt es kostenfreie Tools, wie IfcConvert⁶⁸, mit dem

⁶⁴ S. <https://github.com/KhronosGroup/UnityGLTF>, <https://assetstore.unity.com/packages/tools/modeling/trilib-model-loader-package-91777>, oder <https://assetstore.unity.com/packages/tools/modeling/runtime-obj-importer-49547>

⁶⁵ <https://docs.unity3d.com/Manual/LoadingResourcesatRuntime.html>

⁶⁶ https://www.datakit.com/en/cross_manager.php

⁶⁷ <https://cadexchanger.com/products/cli>

⁶⁸ <http://www.ifcopenshell.org/ifcconvert>

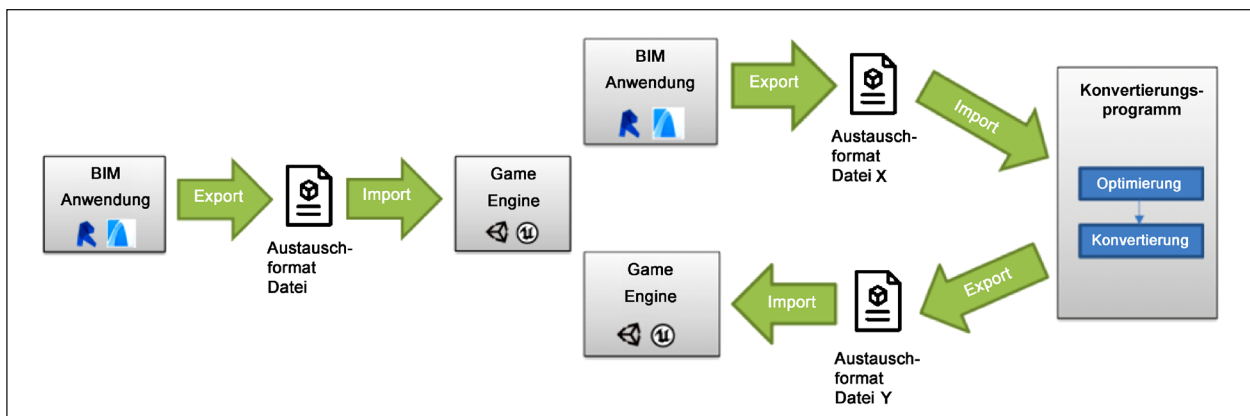


Bild 32: Anbindung BIM-Software an Game Engine via Direktimport (links) und indirektem Import (rechts)

IFC Dateien in das OBJ oder DAE Collada Format konvertiert werden können. Mit IFCBlender⁶⁹ lassen sich IFC Dateien in Blender importieren, wo sie, durch Skriptautomatisierung, optimiert und in einer Vielzahl an Formaten exportiert werden können.

- **Game Engine Plugins:** Dies sind Produkte, die für bestimmte Game Engines und Branchen (hier: AEC) optimiert sind und Modelle nur in die jeweilige Engine importieren. Beispiele für Unity3D sind Unity Reflect⁷⁰, Tridify⁷¹, PiXYZ⁷² oder IFC Importer⁷³, für Unreal gibt es DataSmith⁷⁴. Neben den meist drei- bis vierstelligen jährlichen Lizenzkosten haben all diese Produkte jedoch spezifische Nachteile, sei es die Beschränkung des Einsatzes auf einer Workstation, die fehlende Möglichkeit, Modelle zur Laufzeit zu laden, oder die Beschränkung der Unterstützung auf bestimmte Softwarefamilien oder Formate. Ebenso kann die Nutzung einer Cloud vorgeschrieben oder die Einarbeitungszeit und Lizenzkosten hoch sein.

Für das Projekt wird im ersten Anlauf der direkte Import des Brückenmodells als IFC-Datei angestrebt, mit dem IFC-Importer Plugin für Unity3D. Sollte der Import nicht praxistauglich sein, wird auf Converter-Software (indirekter Import) zurückgegriffen.

4.6 Zusammenfassung der Technologielandkarte

Für die Abwägung, ob eher ein Tablet oder die HoloLens für den Außeneinsatz an der Brücke geeigneter ist, müssen zunächst zwei Nachteile genannt werden, die beide Gerätetypen gemeinsam haben. Erstens stellt bei beiden Geräten das längere Tragen bzw. Halten eine zusätzliche, körperliche Belastung dar. Bei der HoloLens kommt es zu ungewohnter Kopfhaut- bzw. Nackenmuskulatur-Belas-

tung, während beim Tablet das Gorilla-Arm-Syndrom (BACHYNSKYI et al., 2015) längeres Halten bei ausgestreckten Armen unmöglich macht. Zweitens erfordern beide Geräte eine für den Außeneinsatz angepasste Version, z. B. die Integration der HoloLens in einen Bauhelm oder eine Tablet-Schutzhülle, die Stöße abfängt und Geräte vor Staub und Spritzwasser schützt. Diese Anpassungen erhöhen den Preis der Endlösung.

Die Vor- und Nachteile der beiden Geräte werden anhand der folgenden Kategorien getroffen:

- **Technologieakzeptanz:** Aufgrund der langen Ausbildungszeit eines Brückenbauwerksprüfers sind Berufsanfänger i. d. R. mindestens 35 Jahre alt. Da die Technologieakzeptanz in zunehmendem Alter abnimmt (CZAJA et al., 2006, CLASSEN, 2013) hat das Tablet hier den Vorteil. Tablets sind seit vielen Jahren auf dem Markt und haben eine hohe Akzeptanz erreicht. Auch werden Windows-Tablets bereits heute in der Bauwerksprüfung vor Ort eingesetzt, um direkt in SIB-Bauwerke arbeiten zu können.
- **Interaktionstechniken:** Je nach Gerät sind nur bestimmte Interaktionstechniken möglich, mit verschiedenen Vor- und Nachteilen. Da bei der HoloLens keine Peripheriegeräte oder touch-fähige Displays genutzt werden können, kommt eine Handgestensteuerung zum Einsatz, kombiniert mit einer Steuerung durch die Blickrichtung sowie Spracheingabe. Dies ermöglicht eine hands-free Bedienung, bei der beide Hände für weitere Arbeitsschritte zur Verfügung stehen. Der Nachteil ist, dass sich der Prüfer an zunächst ungewohnten Bedienkonzepte gewöhnen muss. Beim Tablet ist das primäre Bedienkonzept die Interaktion mit dem Touchscreen, per Finger oder (digitalem) Stift. Interaktion ist auch über die physischen Knöpfe (z. B. lauter/leiser) oder per Spracheingabe möglich. Die Prüfer sind mit diesen Interaktionsformen oft bereits durch den privaten Einsatz von Tablets vertraut. Weitere, eher unübliche Interaktionsformen am Tablet sind bspw. Gestensteuerung (z. B. Schütteln des Geräts) oder eine Steuerung über die Lagesensoren. Da diese selten verwendet werden und somit als wenig erwartungskonform im Sinne der Usability zu bewerten sind, werden sie hier nicht näher in Betracht gezogen. Welche Interaktionsform sinnvoll ist, hängt vom konkreten Use Case ab und ist – auch mit Blick auf weniger verwendete Interakti-

⁶⁹ <http://ifcopenshell.org/ifcblender>

⁷⁰ <https://unity.com/de/products/reflect>

⁷¹ <https://www.tridify.com/>

⁷² <https://www.pixyz-software.com/>

⁷³ <https://assetstore.unity.com/packages/tools/utilities/ifc-importer-162502>

⁷⁴ <https://www.unrealengine.com/datasmith>

onsmöglichkeiten – jeweils unter Berücksichtigung der Usability individuell zu prüfen. So ist Sprachsteuerung in lauter Umgebung (wie einer befahrenen Straße) nicht sinnvoll und der Usability hinderlich, während die Toucheingabe bei gleichzeitiger Ausführung von zweihändigen Arbeiten nicht möglich bzw. unterstützend ist. Ein wichtiger Aspekt ist jedoch die Kooperationsfähigkeit. Beim Tablet können mehrere Nutzer zeitgleich den Bildschirm betrachten und somit besser kollaborieren als mit der HoloLens, wo nur der Träger das Display einsehen kann (RIEDLINGER, OPPERMANN and PRINZ, 2019).

- **Sicht-Einschränkungen:** Das eingesetzte Gerät sollte möglichst das Sichtfeld der Realität nicht beeinflussen und gleichzeitig virtuelle Inhalte mit möglichst großem Sichtfeld (FOV) darstellen. Die HoloLens ist hier im Nachteil. Ihr FOV ist annähernd nur halb so groß wie das der Rear-Camera eines iPad Pro, wodurch in der HoloLens nahe gelegene Objekte abgeschnitten werden. Je nach Nutzer und Gerätecharge kann es zu Farbverfälschungen kommen, bei denen Flächen nicht einfarbig, sondern regenbogenartig erscheinen⁷⁵. Bei sehr hoher Umgebungshelligkeit (Sonnenlicht) sind virtuelle Objekte nur schwer erkennbar, da die Projektionshelligkeit der HoloLens nicht ausreicht. Um diesen Effekt entgegenzuwirken, sind die Frontscheiben der HoloLens leicht getönt. Diese Tönung sowie der Gehäuserahmen der HoloLens beeinflussen die Sicht auf die reale Umgebung auf negative Weise. Ein Blick nach oben aus dem Augenwinkel ist während des Tragens der HoloLens nicht möglich. Ein Tablet hingegen hat keinen dieser Nachteile.
- **Preis:** Die HoloLens 2 ist aktuell mit einem Preis von über 3.000 € ca. 3 x teurer als ein iPad Pro (ca. 1.000 €). Dadurch ist ein Tablet für den Bauwerksprüfer preislich attraktiver. Zudem wird dadurch die Bewegungsfreiheit des Prüfers weniger eingeschränkt, da sich dieser weniger bedächtig bewegen muss, aus Sorge darum, das Gerät bei einem Fehltritt zu beschädigen.

Da die Vorteile des Tablets gegenüber der HoloLens überwiegen, bezieht sich die nachfolgende Betrachtung ausschließlich auf Tablets.

Für das AR-/MR-Tracking empfiehlt sich die Verwendung des im Tablet integrierten VIO-Trackings wie ARKit oder ARCore, da dieses kostenlos und ohne zusätzliche Hardware genutzt werden kann. Da die von VIO erzeugten relativen Koordinaten nicht ausreichen, wird ein zusätzlicher Mechanismus benötigt, um das Tablet absolut (bzw. relativ zur Brücke) zu positionieren. Die Nutzung von GNSS eignet sich nur bedingt, aufgrund der geringen Präzision (3 m oder schlechter). Daher empfiehlt sich der Einsatz des Self-Reporting-Ansatzes, bei dem der Prüfer seine Position dem System manuell mitteilt. Dies kann rein virtuell in der Anwendung erfolgen, z. B. in dem der Nutzer mit der Kamera mehrere definierte Koordinaten anvisiert und auf dem Display markiert. Alternativ kann markerbasiertes Tracking eingesetzt werden, bei dem der Prüfer an definierten Orten Marker platziert (z. B. in Form von bedruckten Platten mit Größe von DIN A3/A4). Ansätze wie Markerless Tracking sind nicht zu empfehlen, da diese für große Objekte wie eine Brücke nicht geeignet sind.

Ein weiteres Problem des VIO-Ansatzes ist Drift. Die Verwendung von Drittanbieter-Technologien wie Immersal oder Visualix ist hier jedoch nicht empfehlenswert. Diese erfordern zunächst das Einscannen der Brücke, was für den Prüfer zusätzlichen Arbeitsaufwand bedeutet. Zudem werden Daten in einer Drittcloud verarbeitet, was Datenschutzbedenken nach sich zieht. Als alternative Lösung für das Driftproblem ist eine regelmäßige Korrektur nach dem Self-Reporting-Ansatz denkbar, bei der der Prüfer ca. alle 20 – 50 m seine Position neu bestimmt.

Bei der VR-Hardware im Büro sollen im Projekt zwei Ansätze verfolgt werden: die Darstellung auf einem herkömmlichen Bildschirm sowie die Darstellung in einem HMD. Der Vorteil dieses Hybridansatzes liegt in der individuellen Möglichkeit zur Anzeige der Ergebnisse. Steht einem Teilnehmer bspw. kein HMD zur Verfügung, oder erfüllt der PC die HMD-Hardwareanforderungen nicht, so kann die gleiche Anwendung den herkömmlichen Bildschirm zur Ausgabe nutzen. Da die immersiven HMD-Systeme bei Nutzern zu Motion Sickness führen können, wird hiermit ein zusätzlich nutzbares Medium geschaffen. Die Desktopversion wird im Rahmen dieses Projektes so konzipiert, dass diese auf einem her-

⁷⁵ Siehe <https://forums.hololens.com/discussion/1112/rainbow-tint-in-fov-is-this-normal> (HoloLens 1) bzw. <https://venturebeat.com/2020/01/16/microsoft-confirms-hololens-2-display-issues-as-headsets-remain-scarce/> (HoloLens 2).

kömmlichen Business-System genutzt werden kann. Das System sollte lediglich nicht älter als drei Jahre alt sein.⁷⁶

Beim HMD-System wird auf die aktuelle Version der HTC Vive Pro Eye Series zurückgegriffen, welche im o. g. Kapitel vorgestellt wurde. Die Vorteile dieser VR-Brille sind:

- Robuste Schnittstellen zu Entwicklungs-umgebungen wie Unity3D
- Gute Darstellungsqualität durch hohe Pixeldichte
- Einfache Handhabung und teils bekannte Bedienung
- Integriertes Eyetracking, welches in der Projektentwicklung genutzt werden könnte
- Präzises optisches Outside-In Trackingsystem

Nachteilig bei dieser Brille ist, dass nur durch zusätzliche Hardware eine kabellose Nutzung möglich ist. Zudem ist die Installation des optischen Tracking-Systems zeitintensiver als bei HMDs mit Inside-Out Tracking. Hinzu kommt das höhere Gewicht, welches negative Auswirkungen auf den längeren Tragekomfort haben kann.

Dennoch überwiegen bei der HTC Vive Pro Eye die Vorteile gegenüber den anderen, aktuell auf dem Markt erhältlichen HMDs, weshalb die Vive Pro Eye in der Entwicklung im Projekt zum Einsatz kommen wird. Da Game Engines wie Unity3D die VR-Hardware abstrahieren, ist der Aufwand minimal, die VR-Anwendung mit anderen HMDs kompatibel zu machen. Die genannten mobilen HMDs werden zunächst nicht weiter betrachtet, da zum aktuellen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden kann, ob die integrierte Rechenleistung der integrierten Grafikchips für die gesetzten Entwicklungsziele ausreichend sind.

5 Digitales Bauwerksmodell

5.1 Prozess der digitalen Bauwerksprüfung

Die digitale Bauwerksprüfung mithilfe von 3D-Bauwerksmodellen und AR/VR ist eine neuartige Methodik, um die Bauwerksprüfung zu unterstützen. Bei dieser Methodik sind die bisherigen Abläufe der Bauwerksprüfung und ihrer Dokumentation auf Papier, in digitalen Dokumenten oder mit SIB-Bauwerke 1.9 nicht mehr vollständig kompatibel. Während die praktischen Aspekte einer Bauwerksprüfung wie die Untersuchung eines Bauteils (Vermessen eines Risses, Abklopfen nach Hohlräumen) unangetastet bleiben, wird deren Integration in ein spezifisches software-assistiertes Arbeiten in diesem Kapitel entworfen. Die Planung der Anwendung für eine digitale Bauwerksprüfung erfordert daher die Entwicklung eines konzeptionellen Arbeitsablaufs, anhand dessen die Integration der neuen Technologien geplant und umgesetzt werden soll. Die Abläufe der klassischen Bauwerksprüfung müssen daher untersucht und angepasst werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, naheliegende Funktionen für einen effektiveren Workflow zu integrieren, wie etwa verschiedene Betrachtungsweisen des Bauwerksmodells oder an den passenden Stellen im Modell referenzierte Dokumente, beispielsweise bei speziellen Brückenlagern.

Als Grundlage für die weitere Planung der digitalen Bauwerksprüfung wurde daher der Prozess der klassischen Bauwerksprüfung analysiert, um einen neuen Prozess der digitalen Bauwerksprüfung mit AR-/VR-Geräten und einer zugehörigen Software-Anwendung zu entwickeln und die neuen Komponenten in den Ablauf der Bauwerksprüfung zu integrieren.

Aufbauend auf dem Prozess der digitalen Bauwerksprüfung wurden die Arbeitskarten zur digitalen Bauwerksprüfung entwickelt, welche primär inhaltliche und sekundär ergänzende funktionale Anforderungen an die zu entwickelnde Anwendung stellen. Sie werden im Anschluss an die folgende Erläuterung der Prozessdiagramme beschrieben. Die Arbeitskarten dienen innerhalb des Demonstrators als Arbeitshilfe und können hier abgerufen werden.

Die Bilder der Prozessdiagramme und die Arbeitskarten sind zusammen im interaktiven Anhang aufgeführt. Dort sind sowohl die Prozesse als auch

⁷⁶ <https://docs.unity3d.com/Manual/system-requirements.html>

Arbeitskarten miteinander verlinkt, sodass weiterführende Teilprozesse und Unterarbeitskarten nicht gesucht werden müssen. Links zwischen Prozessen sind jeweils in beide Richtungen vorhanden.

5.1.1 Prozessbeschreibung

Aufbau des Prozesses

Der entwickelte Prozess der digitalen Bauwerksprüfung wird in Form des Notationsschemas Business Process Model and Notation (BPMN) 2.0 grafisch dargestellt. BPMN-Prozesse werden in Form von Knoten (Tätigkeiten, Ereignisse, Verzweigungen) und Kanten (Verbindungen/Relationen zwischen den Knoten) dargestellt. Dabei wird die Abfolge von Knoten und Kanten in einem Prozess in verschiedene parallel verlaufende Gruppen, sogenannte Swimlanes (Schwimmbahnen), eingeordnet. Anhand dieser Gruppierungen können bestimmte Aspekte des Prozesses hervorgehoben werden. So werden in dieser Prozessmodellierung der Bauwerksprüfung die praktischen Tätigkeiten des Prüfers gegenüber den Softwareinternen Funktionen sowie die Interaktion zwischen Prüfer und Software hervorgehoben. Um das zu erreichen, wurde entschieden, folgende Kategorien für die Swimlanes zu verwenden:

- Tätigkeiten des Prüfers
- Eingabe
- Ausgabe
- Softwareinterne Funktionen

Die Darstellung der Knoten und Kanten führt teilweise im Verlauf der Swimlanes zu parallel auftretenden oder zueinander versetzten Knoten. Dies bedeutet nicht, dass diese Knoten gleichzeitig ablaufen oder sich zeitlich überlappen müssen. Für eine zeitliche Einordnung sorgt lediglich die durch die Kanten definierte Sequenz. Zeitliche Restriktionen werden durch Ereignisse, Verzweigungen und Zusammenführungen modelliert.

Die Prozesse lassen sich beliebig in Teilprozesse untergliedern, sodass der Ablauf der umfangreichen Prozesse übersichtlich untergliedert und dargestellt werden kann und wiederauftretende Teilprozesse einmal modelliert und anschließend referenziert werden können. Als grobe Untergliederung

des Gesamtprozesses der Prüfung wurde, sich am klassischen Prozess der Bauwerksprüfung orientierend, der Prozess in die drei Phasen Vorbereitung der Prüfung, Durchführung der Prüfung und Nachbereitung der Prüfung untergliedert.

Außerdem wurde bei der Vor- und Nachbereitung berücksichtigt, dass diese sowohl im Büro als auch vor Ort und sowohl am Windows-PC, bei Bedarf mittels VR-HMD, als auch auf dem Tablet stattfinden kann, wobei die Verwendung des PC/HMD nur im Büro angenommen wird. Dadurch ergibt sich aus dem Gesamtprozess folgende Gliederung in zwei Ebenen:

- Vorbereitung der Prüfung
 - Vorbereitung im Büro am PC/HMD
 - Vorbereitung im Büro auf dem Tablet
 - Vorbereitung vor Ort auf dem Tablet
- Durchführung der Prüfung
- Nachbereitung der Prüfung
 - Nachbereitung im Büro auf dem Tablet
 - Nachbereitung im Büro am PC/HMD

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Teilprozesse in ihrem Kontext beschrieben. Die Bilden der Prozessdiagramme befinden sich im Anhang dieses Dokuments. Als Orientierungshilfe zwischen den Beschreibungen der Prozesse und der Anhänge wird eine Übersicht bereitgestellt. Dort sind die Nummern und Bezeichnungen der Prozesse aufgeführt und in welchem Anhang sich die Diagramme befinden. Zum besseren Verständnis befindet sich eine Legende am Anfang des Anhangs, welche die verwendeten Knoten der BPM-Notation erläutert (siehe Tabelle 18).

Nummer	Bezeichnung	Anhang
-	Legende	
0.0	Gesamtprozess der digitalen Bauwerksprüfung	
0.0.0	Aufruf der Anwendung	
0.0.1	Synchronisieren eines Modells	
0.0.2	Öffnen eines Modells	
0.0.3	Aufruf von Modellübersicht	
0.0.4	Aufruf von AR-Modellansicht	
0.0.5	Aufruf von Datei	
0.0.6	Aufruf von PDF-Datei	
0.0.7	Aufrufen von Bildern	
0.0.8	Aufruf von Kontakt (Mail/Tel.)	
0.0.9	Aufruf von beliebiger Datei	
0.0.10	Hinzufügen von Dokumenten	
0.0.11	Aufnehmen von Fotos	
0.0.12	Aufruf von Formular	
0.0.13	Ausfüllen von Checklisten-Formular	
0.0.14	Schließen von Formular	
0.0.15	Erstellen von neuem Schadenseintrag	
0.0.16	Erstellen von neuer Schadensversion	
0.0.17	Aufruf von Schadenseintrag	
0.0.18	Bearbeiten von Schadenseintrag	
1.0	Vorbereitung im Büro an Gerät mit Anwendung	
1.0.0	Überprüfung und Dokumentierung der Datenvollständigkeit	
1.1	Planung der Prüfung	
1.1.0	Planung des Prüfungsablaufs mit dem Modell	
1.1.1	Planung der Verkehrssicherung	
1.1.2	Planung von Arbeitsschutz und Ausrüstung	
1.2	Vorbereitung vor Ort	
1.2.0	Dokumentierung der Sicherheitsmaßnahmen	
2.0	Durchführung der Prüfung	
2.0.0	Aufnahme von neuem Schaden	
2.0.1	Aktualisierung von vorhandenem Schaden	
2.0.2	Aufnahme der Sanierung eines Schadens	
3.0	Nachbereitung im Büro an Gerät mit Anwendung	

Tab. 18: Übersicht der Diagramme der Teilprozesse inkl. ihrer referenzierten Nummer und in welchem Anhang sie zu finden sind

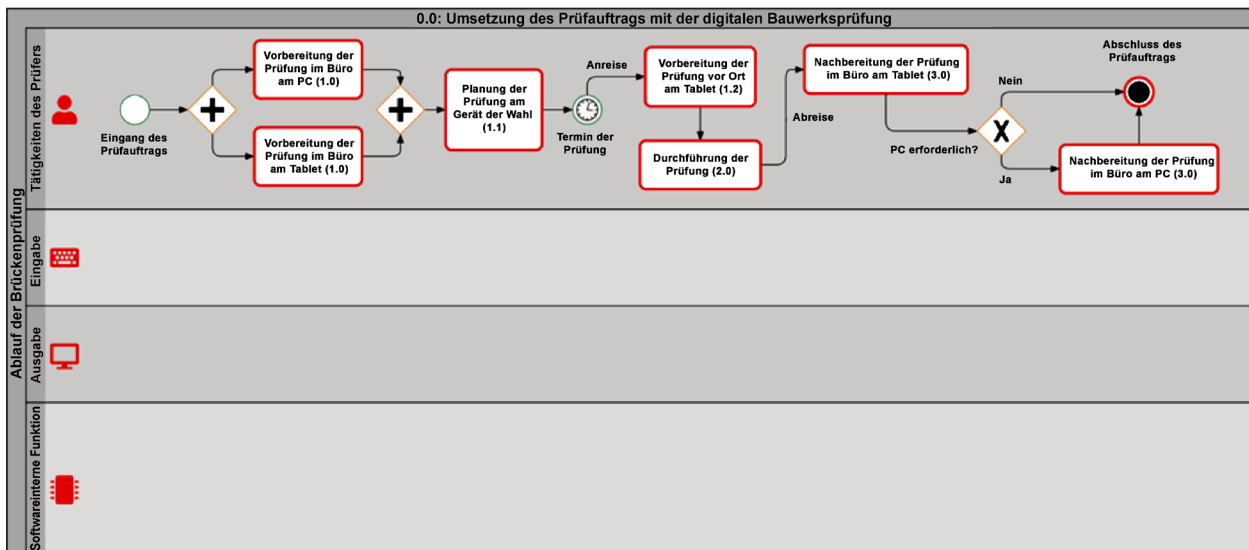


Bild 33: Darstellung des Gesamtprozesses der digitalen Bauwerksprüfung

Gesamtprozess der digitalen Bauwerksprüfung (0)

Um einen Überblick über das Zusammenspiel der einzelnen Teilprozesse zu bekommen, sind diese im Diagramm des Gesamtprozesses der digitalen Bauwerksprüfung (0.0) abgebildet (siehe Bild 33, für das ganzseitige Bild siehe Anhang zu Zwischenbericht 2 FE 15.0666_ZB_20201023_gesamt_Interaktiver Anhang.pdf). Dieser Prozess deckt dabei den Zeitraum von der Beauftragung zur Bauwerksprüfung bis zur Erfüllung dieses Auftrags ab. Nach dem Eingang des Auftrags können die Vorbereitung und die Planung der Prüfung im Büro sowohl am Windows-PC als auch auf dem Tablet erfolgen. Dabei werden als Vorbereitung die erforderlichen Daten mindestens auf dem Tablet heruntergeladen. Es wird angenommen, dass zur Vorbereitung beide Geräte verwendet werden, da zum einen die Arbeit im Büro an einem PC meist die bevorzugte, da gewohnte Arbeitsweise ist, zum anderen die Daten auch offline-tauglich auf dem Tablet benötigt werden, da dieses später vor Ort zur Durchführung der Prüfung verwendet wird und ein Netzempfang nicht in allen zu prüfenden Bereichen (z. B. im Hohlkasten einer Brücke) garantiert ist. Nachdem die erforderlichen Daten vorhanden sind, kann die Planung der Prüfung erfolgen, bei der Prüfungsablauf, Ausrüstung sowie Verkehrs- und Arbeitssicherheit geplant werden. Nach der Ankunft am Prüfobjekt am Tag der Prüfung werden die vereinbarten Sicherheitsmaßnahmen geprüft und dokumentiert. Ist diese Vorbereitung vor Ort erfolgreich, so kann die Durchführung beginnen, bei der die Schäden am

Bauwerk untersucht und dokumentiert werden. Anschließend werden in der Nachbereitung am Tablet die dokumentierten Daten wieder mit der CDE synchronisiert und sind somit für die Nachbereitung am Windows-PC und damit auch anderen Softwareprodukten verfügbar.

Vorbereitung der Prüfung (1)

Der Beginn der Prüfung erfolgt mit der Vorbereitung im Büro (1.0). Zu Beginn der Prüfungsvorbereitungen ist es an jedem zu nutzendem Gerät erforderlich, die Daten des Bauwerksinformationsmodells aus der CDE herunterzuladen. In diesem Modell sind sowohl die Modelldaten, das eigentliche BIM-Modell als auch die Bauwerksdaten bestehend aus Dokumenten, Prüfdaten etc. vorhanden. Dazu wird zunächst die Anwendung aufgerufen (0.0.0). Anschließend werden auf Basis von Informationen des Prüfauftraggebers bezüglich des Zugangs zur CDE und des benötigten Modells eine Verbindung zur CDE hergestellt und die benötigten Dateien auf das Gerät heruntergeladen (0.0.1). Anschließend werden das Modell (0.0.2) und die Modellübersicht (0.0.3) geöffnet. Danach wird die Vollständigkeit der Daten geprüft (1.0.1), indem Modellinhalt und vorhandene Dateien oberflächlich validiert werden. Hierbei kann der Anwender verknüpfte Dateien öffnen (0.0.5) und sich auch einen Überblick über die Dateiinhalte machen, wobei PDF und Bild-Dateien innerhalb der Anwendung geöffnet werden und andere Dokumente außerhalb mit ihrer jeweiligen Standardanwendung.

Anschließend kann mit dem Gerät der Wahl (PC oder Tablet) die Planung der Prüfung (1.1) durchgeführt werden. Dazu bietet es sich an, sich zuerst einen Überblick über das zu prüfende Bauwerk zu machen, indem das Bauwerksinformationsmodell und dessen angehängte Informationen und Dateien untersucht werden (1.1.1). So kann der Anwender intuitiv einen Blick auf die Gegebenheiten des Bauwerks werfen und einen Eindruck von den Dimensionen bekommen, wie etwa Arbeitshöhen, Abstände oder die Enge von Kriechräumen usw., was besonders gut in einer VR-Umgebung vermittelt werden kann. Danach werden die zur Prüfung notwendigen Verkehrssicherungsmaßnahmen (VSM) geplant und organisiert (1.1.1), welche hier beispielhaft für die Verkehrssicherung im Bereich von Straßen verwendet werden, und die benötigte Ausrüstung für Arbeitsschutz und Prüfung (1.1.2) geplant. Falls für die Prüfung Streckenbereiche gesperrt werden müssen, kann es sein, dass ein Verkehrszeichenplan von vorherigen Prüfungen bereits im Modell hinterlegt ist. Je nach Dateityp wird die Datei des Plans in der Anwendung oder in einer externen Anwendung geöffnet (0.0.5). Wenn der Plan vorhanden und korrekt ist, kann er der zuständigen Verkehrsbehörde für die verkehrsrechtliche Anordnung zur Genehmigung vorgelegt werden. Dazu können vorliegende Kontaktdaten (Telefon, E-Mail) aus dem Modell heraus mit der jeweiligen Standard-Anwendung geöffnet werden (0.0.8). Wird der vorgelegte Plan nicht genehmigt oder ist noch nicht vorhanden, besteht die Möglichkeit, den erstellten oder angepassten Plan dem Modell hinzuzufügen (0.0.10). Ist der Plan genehmigt, kann auf dessen Basis das Leistungsverzeichnis der Verkehrssicherung erstellt und als Angebot für Verkehrssicherer eingereicht werden. Bei der Planung der Arbeitssicherungsmaßnahmen (ASM) (1.1.2) kann auf Basis der Informationen aus der Modellübersicht (0.0.3) und der im Modell verlinkten Dateien (0.0.5) ermittelt werden, welche persönliche Schutzausrüstung (PSA) und welche Prüfwerkzeuge erforderlich sind. Sind diese Schritte erfolgt, ist die Vorbereitung und Planung der Prüfung im Büro vollständig.

Am Tag der Prüfung nach der Ankunft am Prüfobjekt beginnt die Vorbereitung vor Ort (1.2). Bevor die eigentliche Prüfung beginnen kann, ist zu prüfen, ob alle im Voraus zu treffenden erforderlichen Maßnahmen umgesetzt wurden. Dazu werden nach Öffnen der Anwendung (0.0.0) und des Modells (0.0.2) die in Auftrag gegebenen VSM dokumentiert (1.2.0). Die Dokumentation von Sicherheitsmaßnahmen

geschieht in einem Formular-Bildschirm in der Anwendung (0.0.12). In diesem Checklisten-Formular werden die erforderlichen VSM dokumentiert (0.0.13). Der Anwender vergleicht mit dieser Checkliste Soll- und Ist-Zustand der Maßnahmen und dokumentiert sie. Dabei zeigt die Anwendung einen Gesamtstatus der Checkliste als Übersicht, ob alle dokumentierten Maßnahmen ausreichend umgesetzt wurden. Wurde eine Maßnahme nicht ausreichend erfüllt, so soll sie nach Möglichkeit kompensiert und dies dokumentiert werden. Sollte dies nicht möglich sein, ist die Prüfung zu unterbrechen. Nach der Dokumentation aller Maßnahmen kann das Formular geschlossen werden (0.0.14), womit die Daten zur VSM in einer Datei gespeichert werden. Anschließend werden die ASM dokumentiert (1.2.1). Damit bestätigt der Anwender, dass die erforderlichen Maßnahmen um das Bauwerk und an ihm selbst umgesetzt wurden. Die Dokumentation kann dabei sowohl der Kontrolle als auch der Erinnerung dienen. Die ausgefüllten Daten werden gespeichert und können von den Beteiligten des Auftrags herangezogen werden, um eine Bestätigung zu haben, dass alle erforderlichen Maßnahmen umgesetzt wurden. Dabei stammen die Angaben jedoch nicht von einem Beobachter, sondern vom involvierten Prüfer selbst, sodass deren Korrektheit später angenommen werden muss. Ist die Dokumentation aller Sicherheitsmaßnahmen abgeschlossen, kann die eigentliche Prüfung beginnen.

Durchführung der Prüfung (2)

Zum Beginn der Durchführung ruft der Anwender den AR-Modus der Anwendung auf dem Tablet auf (0.0.4), um dort Informationen zu den umliegenden Bauteilen und den durch eine vergangene Prüfung festgestellten und verorteten Schäden in der nächsten Umgebung zu erhalten und auf diese Daten zuzugreifen. Im AR-Modus wird nun die Kamera des Tablets aktiviert und es werden die Positions- und Ausrichtungsdaten des Geräts erfasst, sodass nun Modelldaten korrekt verortet und über das aktuelle Kamerabild gelegt werden können. Auf diese Weise sieht der Anwender auf dem Tablet die reale Umgebung sowie das mit dem digitalen Modell überlagerte Bauwerk. Mit dieser Anzeige bewegt der Anwender sich am und durch das Bauwerk und untersucht dieses auf Schäden und das Modell auf verzeichnete Schäden. Dabei können drei Fälle auftreten:

- Am Bauwerk wird ein Schaden gefunden, der nicht im Modell verzeichnet ist.

- Am Bauwerk und im Modell werden Schäden gefunden, die übereinstimmen.
- Im Modell wird ein verzeichneter Schaden gefunden, aber nicht am Bauwerk.

Wird ein Schaden nur am Bauwerk gefunden, so muss er neu dokumentiert werden (2.0.0). Zum Start der Dokumentation des Schadens wird ein neuer Schadenseintrag im Modell erzeugt (0.0.15). Dazu wird zunächst das betroffene Bauteil aus dem Modell ausgewählt, was durch eine Auswahl eines Bauteilmarkers innerhalb der AR-Modellansicht oder über eine Eingabe mit Bauteilvorschlägen geschehen kann. Daraufhin erfolgt die genaue Lokalisierung des Schadens über die Position des Geräts im Modell oder über die Auswahl der Position auf dem Bildschirm, wobei die Auswahl auf die Oberfläche des Bauteils projiziert wird. Nun wird basierend auf dem Bauteil und der jetzt auszuwählenden Schadensart das Formular mit den schadensspezifischen Abfragen gemäß der Arbeitskarte aufgerufen (0.0.12) und die zu ermittelnden Eigenschaften des Schadens werden praktisch untersucht und dokumentiert (0.0.18). Neben den dabei gemachten Eingaben kann der Anwender den Fotomodus aufrufen und den Schaden bildlich dokumentieren (0.0.11). Die Informationen des Schadens werden inkl. des Fotos in der Schadensdatei des Schadens oder der Schäden hinterlegt. Dazu zählen das ausgewählte Bauteil, die Koordinaten der Lokalisation, das Foto sowie die Formulareingaben zum Schaden. Die Schadensbewertung findet in der Nachbearbeitung der Brückenprüfung im Anschluss statt. Diese Daten werden beim Abschluss des Schadens durch das Schließen des Formulars (0.0.14) gespeichert und es kann der nächste Schaden untersucht werden.

Ist ein am Bauteil vorhandener Schaden bereits im Modell verzeichnet, so wird dieser auf Veränderung untersucht (2.0.1). Der Schadenseintrag wird anhand seiner 3D-Marker in der AR-Ansicht ausgewählt, woraufhin die Schadensdaten aus der Schadensdatei geladen werden (0.0.17) und die hinterlegten Informationen und Fotos angezeigt werden. Falls sich der Schaden am Bauwerk im Vergleich zum letzten dokumentierten Stand verändert hat, ist dies zu dokumentieren, andernfalls kann der Schaden als „untersucht“ abgehakt werden und wird am Schadensmarker markiert, sodass ein abgearbeiteter Schaden auf einen Blick erkennbar ist. Zum Start der Aktualisierung des Schadens wird eine neue Schadensversion erstellt (0.0.16), welche die

anzupassenden Informationen der vorherigen Version enthält (Identifikator, Bauteil, Koordinaten). Die neue Version wird zur Bearbeitung geöffnet und die Schadensdaten können entsprechend der Veränderung des Schadens angepasst werden (0.0.18). Diese Daten werden wie oben beschrieben in einer Datei gespeichert, wenn die Dokumentation des Schadens abgeschlossen wird.

Für den Fall, dass ein Schadenseintrag im Modell gefunden wird, aber kein Schaden am Bauwerk (bzw. es ersichtlich ist, dass ein vorheriger Schaden beseitigt wurde), wird hier davon ausgegangen, dass es sich um einen sanierten Schaden handelt, dessen Sanierung vermerkt werden soll (2.0.3). Es könnte sich dabei auch um einen Fehler, wie etwa eine falsche Positionierung eines Markers, handeln. Dieser Fall wird im Prozess nicht weiter berücksichtigt, da er von Grund auf zu vermeiden ist und kein Teil des Workflows ist. Der Schadenseintrag wird auch hier in der AR-Ansicht ausgewählt und eine neue Version zur Aktualisierung erzeugt. Im Unterschied zur allgemeinen Aktualisierung eines Schadens wird bei einem sanierten Schaden die Angabe gewählt, dass der Schaden gemäß den Anforderungen saniert wurde, wenn dies zutrifft. Die Angaben zur Sanierung werden bei Abschluss der Dokumentation des Schadens in der Schadensdatei gespeichert, sodass der Marker dieses Schadens bei der nächsten Prüfung im AR-Modus ausgeblendet oder als „abgeschlossen“ angezeigt werden kann.

Wenn alle Schäden des Modells untersucht wurden und keine weiteren neuen Schäden mehr am Modell gefunden wurden, ist die eigentliche Prüfung des Bauwerks abgeschlossen.

Nachbereitung der Prüfung (3)

Wenn der Anwender sich mit dem Tablet wieder im Büro befindet oder generell an einem Ort mit Internetzugang, kann die Nachbereitung auf dem Tablet durchgeführt werden (3.0), bei der die bei der Prüfung erzeugten Daten mit der CDE synchronisiert, also in erster Linie hochgeladen werden. Zur weiteren Verarbeitung sind zwei Optionen verfügbar. Zum einen eine Liste aller Schadensdaten als Dokumentdatei (Text, Tabellen, HTML oder andere Formate zur strukturierten Darstellung) und zum anderen eine Datei in Form eines Austauschformats (zusätzlich zum IFC-Format), die mit anderer Software verwendet werden kann. Die Austauschdatei kann je nach Software oder Services zur Nachbe-

bereitung der Schadensinformationen (z. B. Festlegung von Maßnahmen), die auf dem Tablet verfügbar sind, dort verwendet werden. Andernfalls ist die Bearbeitung auf dem Tablet mit der Synchronisierung abgeschlossen und die nun in der Cloud liegenden Daten können anschließend auf dem PC synchronisiert werden, um dort zur Nachbereitung mit anderer Software weiterverwendet zu werden. Sind die Informationen der Prüfung wie erforderlich aufbereitet, ist die Prüfung damit abgeschlossen.

5.1.2 Arbeitskarten der digitalen Bauwerksprüfung

Die Arbeitskarten (AK) wurden auf Basis des Prozesses der digitalen Bauwerksprüfung entwickelt und dienen unter anderem der Ausarbeitung des Pflichtenheftes. Außerdem geben sie einen Überblick über die Punkte, die in der Anwendung zur Unterstützung der Bauwerksprüfung inhaltlich vorhanden sein sollten. Dort sind diese auch als Arbeitshilfen, in Form der zusätzlich abrufbaren Dokumente, für den Bauwerksprüfer innerhalb der Software gedacht.

Die Arbeitskarten wurden auf Basis der Fachkenntnisse der Bauwerksprüfer, die sich unter den Projektbeteiligten befinden sowie der Fachliteratur zur Brückenprüfung von MERTENS (2015), VOLLRATH und TATHOFF (2002) und KRACKE und LODDE (2011) entwickelt.

Die AK wurden in mehrere Teile untergliedert. Zum einen gibt es die übergeordneten Hauptarbeitskarten (HAK), die auch als Menüpunkte des Programms dienen können, zum anderen die Unterarbeitskarten (UAK), die den Prüfer bei der Bearbeitung unterstützen sollen, und außerdem die Beispielformulare, die im Programm z. B. als PDF-Datei hinterlegt oder als Formular in der Anwendung eingebunden und mit den Daten des Bauwerksinformationsmodells verknüpft werden können.

5.1.2.1 Hauptarbeitskarten

Die HAK dienen nicht nur als reine AK, in denen Aufgaben definiert werden, sondern sie sollen Informationen über das Bauwerk übersichtlich wiedergeben. Die Informationen sollen gebündelt und schnell abrufbar sein. In den HAK sind neben der Aufführung des jeweiligen Punktes Empfehlungen aufgelistet, in welcher Form die Informationen durch die Anwendungen bzw. den Anwender hinterlegt werden sollten.

An erster Stelle wird die AK „0. - Deckblatt“ (Bild 34) gezeigt, welche zum Start eine Übersicht der Bauwerksinformationen darstellt. Diese AK beinhaltet mehrere Punkte, deren Inhalt bereits im Kapitel 3.2.2.1 beschrieben wurde.

An zweiter Stelle wird die AK „0.1 - Inhaltsverzeichnis“ aufgeführt, welche den Ablauf einer Bauwerksprüfung zusammenfassend darstellt. Dabei wird der Ablauf in die Punkte Vorbereitung, Durchführung, Nachbearbeitung und Bestandsübersicht gegliedert. Diese Punkte dienen als Navigation zu den Unterarbeitskarten. In dieser Arbeitskarte werden die folgenden Punkte aufgeführt:

1.) Vorbereitung

In diesem Abschnitt werden die Angaben zum Bauwerk sowie die zur Vorbereitung auf eine Bauwerksprüfung notwendigen Angaben, wie etwa Sicherungsplanungen und Genehmigungen, zusammengefasst.

2.) Durchführung

Der Abschnitt zur eigentlichen Prüfung wird in die AK „2.1 - Allgemeines“ sowie AK für die verschiedenen Prüfungsarten gemäß DIN 1076 gegliedert. Bei den Prüfungsarten wird in die-

Arbeitskarten zur Bauwerksprüfung		
0. - Deckblatt		Notruflaste
1. Verwaltung		
1.1 Name der Verwaltung	Haimendorfer Fort (Gemeindefreies Gebiet)	[alphanumerische Eingabe]
1.2 Amt		[alphanumerische Eingabe]
1.3 Meisterei		[alphanumerische Eingabe]
1.4 Ansprechpartner		[alphanumerische Eingabe]
1.4.1 Name		[alphanumerische Eingabe]
1.4.1 Rufnummer		[numerische Eingabe]
2. Bauwerk		
2.1 Ild. Nr.		[numerische Eingabe]
2.2 Bauwerksnummer	6533630 0	[numerische Eingabe]
2.3 Bauwerksname	Brücke A3 AK Nürnberg Ast A-O	[alphanumerische Eingabe]
2.4 GPS-Koordinaten		[numerische Eingabe]
2.5 Sachverhalt		[alphanumerische Eingabe]
2.5.1 Oben liegend		[alphanumerische Eingabe]
2.5.2 Unten liegend		[alphanumerische Eingabe]
2.6 Baujahr		[numerische Eingabe]
3. Bauwerksdaten		
3.1 Bauwerksart	Hohlkastenbrücke	[automatisch generiert]
3.2 Konstruktion	4F-SpB-HK	[automatisch generiert]
3.3 QS Überbau		[automatisch generiert]
3.4 QS Haupttragwerk		[automatisch generiert]
3.5 Gesamtlänge	155,75 m	[automatisch generiert]
3.6 Breite	15,70 m	[automatisch generiert]
3.7 Brückenfläche	2445 m ²	[automatisch generiert]
3.8 Gesamtbreite		[automatisch generiert]
3.9 Anzahl der Felder	4	[automatisch generiert]
4. Weitere Angaben		
4.1 Belastungsklasse	60/60	[numerische Eingabe]
4.2 Einschränkungen		
4.3 Befahrhöhe	40 t	[numerische Eingabe]
5. Letzte Bauwerksprüfung		
5.1 Datum	42649	[automatisch generiert]
5.2 Prüferart	Hauptprüfung	[automatisch generiert]
5.3 Benotung	2,7	[automatisch generiert]
5.4 Prüfer		[automatisch generiert]

Bild 34: Darstellung der Gliederung der Arbeitskarte „Deckblatt“

sem Projekt exemplarisch nur die AK „2.5 – Hauptprüfung“ weiter betrachtet, da diese als umfangreichste Prüfung das Konzept auch für andere Prüfungsarten validiert. Dies schließt etwa die EP mit ein, aber nicht unbedingt die SP. Unter dieser AK sind die unterschiedlichen Bauwerksarten aufgelistet. Hier werden die entsprechenden Unterarbeitskarten des Bauwerkstyps verlinkt, welche den Prüfer bei der Prüfung unterstützen sollen. Der Prüfer soll für alle möglichen Bauwerkstypen durch die Prüfung geführt werden. Hierbei soll er nicht nur Informationen zum Bauwerk erhalten, sondern eine Übersicht bekommen, welche Bauteile und Bauteilgruppen bereits geprüft sind und welche noch ausstehen.

3.) Nachbearbeitung

Zur Nachbearbeitung soll eine Funktion zum Export der fertig dokumentierten Schadensdaten vorhanden sein, welche es erlaubt, diese Daten über ein Austauschformat einem anderen Programm zur Verfügung zu stellen. In der weiterführenden Software können dann Maßnahmen festgelegt, Leistungsverzeichnisse erzeugt und Kostenschätzungen ausgegeben werden.

4.) Bestandsübersicht

Für die Bestandsübersicht soll eine Art Lebenslauf des Bauwerks zusammengestellt werden. Dort werden alle dokumentierten Schäden von Baubeginn bis zum aktuellen oder letzten Stand vor Abriss des Bauwerks aufgelistet. Die Funktion könnte über eine filterbare Liste der Schäden, deren Informationen dort angezeigt und bearbeitet werden können, unterstützt werden.

Vorbereitung:

Innerhalb der AK „1. - Vorbereitung“ sind die AK „1.1 - Bestandsdaten“, „1.2 - Arbeitssicherheit“, „1.3 - Verkehrssicherung“ und „1.4 - Genehmigung“ eingeordnet. Diese sollten so aufgebaut werden, dass die in ihnen hinterlegten Informationen für die Kontrolle erforderlicher Sicherheitsvorkehrungen und die Durchführung der Bauwerksprüfung genutzt werden können. In diesen Arbeitskarten können Dokumente, Fotos, Ortsangaben oder auch Ausschnitte aus dem 3D-Modell mit den entsprechenden Informationen oder Links zu weiterführenden Unterarbeitskarten hinterlegt sein. An dieser Stelle ist es sinnvoll, das System ausbaufähig zu gestalten, in dem Sinne, dass neue UAK hinzugefügt und verlinkt werden können. Soweit es Leistung und Speicherplatz erlauben, ist das Hinterlegen von Videos empfehlenswert, etwa für Anweisungen zur Ersthilfe.

In der AK „1.4 - Genehmigungen“ werden die erforderlichen Genehmigungen hinterlegt, welche in dieser Übersicht durch die Informationen „liegt vor“ oder „genehmigt“ ergänzt werden könnten. Außerdem wäre die Integration von Checklisten für die Arbeits- und Verkehrssicherheit unter „1.4.2 - Handlungsanweisungen“ eine Möglichkeit, die Umsetzungen der Sicherheitsanforderungen zu dokumentieren und zu kontrollieren.

Das Konzept der Checkliste oder ähnlicher Anzeigesysteme ist auch auf andere Punkte im Rahmen der Bauwerksprüfung übertragbar, sodass dort sichtbar wird, welche Punkte bearbeitet wurden bzw. noch zu bearbeiten sind.

Durchführung:

Die HAK „1. Durchführung“ und deren UAK beziehen sich auf die eigentliche Durchführung der Bauwerksprüfung. So sollen in der AK „2.1 - Allgemeines“ allgemeine Punkte aufgelistet werden, die im

Arbeitskarten zur Bauwerksprüfung		Lfd. Nr.	1
0.1 - Inhaltsverzeichnis		Bauwerksnummer	6533630 0
		Bauwerksname	Brücke A3 AK Nürnberg Ast A-O
<input type="button" value="Notruftaste"/>			
1. Vorbereitung			
1.1 Bestandsdaten	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
1.2 Arbeitssicherheit	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
1.3 Verkehrssicherheit	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
1.4 Genehmigungen	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
1.5 Benötigte Geräte / Materialien	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2. Durchführung			
2.1 Allgemeines	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.2 Laufende Beobachtung	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.3 Besichtigung	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.4 Einfache Prüfung	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5 Hauptprüfung	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5.1 Vorgespanntes Bauwerk	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5.2 Stahlbetonbauwerk	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5.3 Stahlbauwerk	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5.4 Stahlverbundbauwerk	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5.5 Mauerwerk	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5.6 Holz	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5.7 Aluminium	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5.8 GFK	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.5.9 Ausstattung	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.6 Prüfung aus besonderem Anlass/Sonderprüfung	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
2.7 Prüfung nach besonderen Vorschriften	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
3. Nachbearbeitung			
3.1 Auflistung der Schäden	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
3.2 Empfehlungen	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
3.3 Leistungsverzeichnis	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
3.4 Kostenschätzungen	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
4. Bestandsübersicht			
4.1 Durchgeführte Maßnahmen	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
4.2 Bauwerkszustand	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
4.1 Kritische Schäden / Stellen	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
4.1 Kostenübersichten	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	
4.1 Daten / Schnittstellen	<input type="checkbox"/>	[Angabe bei fehlenden Informationen]	

Bild 35: Darstellung der Gliederung Arbeitskarte „Inhaltsverzeichnis“

Rahmen jeder Art von Bauwerksprüfung auszuführen sind. Hier können gemessenen Durchfahrthöhen und -breiten eingegeben werden, die in vordefinierte Protokolle eingefügt und ausgedruckt werden könnten. Auch die Verfügbarkeit dieser Informationen, inklusive der Werte aus vorherigen Prüfungen, innerhalb des 3D-Modells wäre hilfreich. Ein entsprechendes Beispielprotokoll, das automatisiert erzeugt werden könnte, liegt den Arbeitskarten bei.

Der Punkt „Messeinrichtungen, -punkte und -Bolzen“ muss bei einer Bauwerksprüfung berücksichtigt werden. Hier sollte eine Texteingabe möglich sein bzw. ein Auswahlmenü mit verschiedenen Merkmalen (z. B. zu intakter oder nicht zugänglicher Einrichtung) hinterlegt sein.

In dieser AK ist es ebenfalls sinnvoll, eine Möglichkeit zur Ergänzung weiterer Punkte durch Personen zu gewährleisten, die nicht für die Entwicklung der Anwendung zuständig sind.

Da in diesem Projekt die vorgegebene Brücke in Nürnberg berücksichtigt werden soll, wurden die Auswahlmenge der AK bzw. der darin aufgeführten Bauteil-/Bauteilgruppen auf die AK für ein vorgespanntes Bauwerk reduziert. Daraus resultierend wurden die AK „2.5.1 - Vorgespanntes Bauwerk“, „2.5.9 - Ausstattung“ und deren jeweilige UAK entwickelt. Hierbei wäre es sinnvoll, direkt einen Schaden aufnehmen zu können, wobei die entsprechenden Punkte in den UAK mit [Visuell] gekennzeichnet sind. Diese Kennzeichnung bedeutet, dass der Schaden durch in Augenscheinnahme geprüft und in der Checkliste entsprechend seines Status vermerkt werden kann. Hierbei könnte ein Menüpunkt mit Schäden oder Merkmalen hinterlegt werden.

5.1.2.2 Unterarbeitskarten

Die Unterarbeitskarten sind als reine Arbeitshilfe und somit unterstützend zur Bauwerksprüfung entwickelt worden. Sie gliedern sich im Wesentlichen in die Punkte „Grunddaten“, „Mangel/Schaden“, „Dokumentation“ und „Werkzeuge“, die zur Prüfung des jeweiligen Bauteils bzw. der jeweiligen Bauteilgruppe benötigt werden.

In den Grunddaten sollen unter anderem, wenn vorhanden, Angaben zu Vorschriften und Normen gemacht werden, die für die entsprechenden Bauteile bzw. Bauteilgruppen verfügbar sind. Diese sollen soweit wie möglich im Programm hinterlegt werden und abrufbar sein. Dies kann im Vorfeld der Bau-

werksprüfung bei der Vorbereitung helfen, aber etwa auch während der Prüfung zum Abgleich von gemessenen Werten und den Sollwerten in einer Norm oder Richtlinie dienen. Weiterhin können Angaben zu Bauteilen bzw. ein Hinweis zur Prüfung der jeweiligen Bauteile gemacht oder Herstellerangaben zu Lagern, Fahrbahnübergangskonstruktion und anderen Bauteilen hinterlegt werden.

Unter „Mangel/Schaden“ sind die entsprechend möglichen Mängel und Schäden aufgelistet, auf die man bei der Prüfung des jeweiligen Bauteils oder der Bauteilgruppe achten sollte. Des Weiteren ist in den eckigen Klammern ein Hinweis zur Art der Prüfung beschrieben, also das Auffinden des Schadens durch Inaugenscheinnahme, Abklopfen der Bauteile, weiterführende Untersuchungen oder der Verweis auf eine weitere UAK für spezifischere Angaben.

Bei weiterführenden Untersuchungen wie zum Beispiel der Feststellung der Chloridbelastung, der Karbonatisierung oder der Festigkeiten können die entsprechenden Stellen im 3D-Modell markiert und die jeweiligen Messwerte an den Entnahmepunkten hinterlegt werden. Kritische Bereiche sind entsprechend hervorzuheben.

Das Feld Dokumentation gliedert sich in die Bereiche „Prüfbericht“, „Aufnahme“ und „Genauigkeit“. Unter dem Punkt „Prüfbericht“ ist unter anderem aufgelistet, wie der Prüfbericht vorangegangenen Prüfungen hinterlegt werden sollte oder die Bewertung von vorgefundenen Schäden durch den Einsatz digitaler Hilfen unterstützt werden kann. Bei der Eingabe der Schäden sollten zur vereinfachten Eingabe die jeweiligen Bauteile bzw. Bauteilgruppen hervorgehoben werden. Unter dem Punkt „Aufnahme“ ist verzeichnet, welche Angaben (Länge, Breite oder Tiefe) zu dem Schaden aufgenommen werden sollten und dass die Schäden zu verorten sind und zugehörige Fotos mit Nummerierung, einem Maßstab sowie dem eingblendeten Aufnahmedatum abgelegt werden sollen.

Der verortete Schaden sollte durch einen Marker im 3D-Modell kenntlich gemacht werden, über den die Informationen zur aktuellen und zu vorangegangenen Prüfungen aufgerufen werden können. Die dabei erforderlichen Genauigkeiten unterscheiden sich nach der Position des Schadens und den Abmessungen zur Beschreibung des Schadens selbst.

Das Feld „Werkzeuge“ ist eine Auflistung der Werkzeuge, die bei der Prüfung des Schadens benötigt

werden. Dies ist ein reiner Hinweis für den Bauwerksprüfer und kann als Informationstext in der Anwendung hinterlegt werden.

5.1.2.3 Protokolle

Zusätzlich zu den Arbeitskarten wurden Protokolle und Anträge exemplarisch als Beispiel erstellt, die entweder automatisch aus den jeweiligen Prüfungen und Messdaten generiert oder als Datenbanktabelle geöffnet werden können, um dort die Eingaben der Bauwerksprüfung hinterlegen zu können. Denkbar ist beispielsweise, dass bei Anklicken eines Lagers im 3D-Modell dieses hervorgehoben und dabei ein Formular geöffnet wird, in der die Prüfdaten eingegeben werden können. Bei Abweichen der Werte zu vorangegangenen Prüfungen bzw. von den Herstellerangaben gemachten Angaben, sind diese entsprechend zu markieren und kenntlich hervorzuheben. Die Angaben können dann automatisiert in die Beispielprotokolle eingetragen werden und zum Ausdruck beispielsweise als PDF-Datei hinterlegt werden.

5.2 Fusionierung Modelldaten und Bauwerksdaten

Im vorangehend beschriebenen Prozess der Prüfung wurde der Ablauf der Planung modelliert und die daraus resultierenden Softwarefunktionen dargestellt. Daraus entstehen einige Implikationen für das Datenmodell wie etwa die Verknüpfung verschiedener Modellelemente mit Dokumenten oder die Berücksichtigung der ASB-ING und eines Austauschstandards zur Bereitstellung einer Schnittstelle für die Prüfdaten. Diese und weitere Punkte werden nun bei der Fusionierung der Daten zu einem Bauwerksinformationsmodell behandelt, so dass dieses gemäß dem Prinzip der SSoT als Quelle aller erforderlichen Modellinformationen zur Prüfung dienen kann.

Das Bauwerksinformationsmodell zur Prüfung besteht im Kern aus dem Bauwerksmodell, welches im IFC-Format vorliegt und als Ausgangspunkt der Informationsverwaltung und Informationsabfrage dient. Das Bauwerksmodell selbst beinhaltet die geometrischen Repräsentationen der Bauteile, die semantischen Informationen von Bauwerk und Bauteilen, die in den jeweiligen Attributen gespeichert werden sowie die referenzierten Informationen. Bei letzterem, auch als Bauwerksdaten bezeichnet,

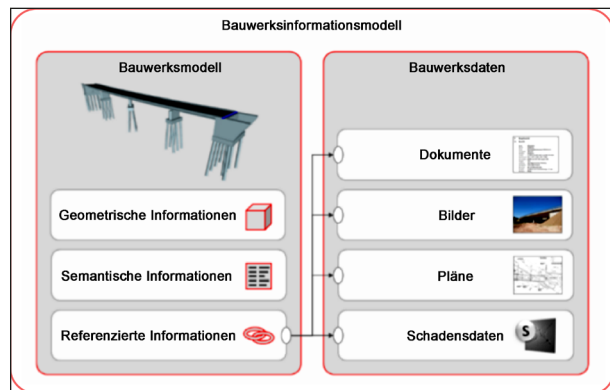


Bild 36: Schemata der Modelldaten und deren Verknüpfung

handelt es sich um externe Dateien, die weiterführende Informationen zu Bauteilen, dem Bauwerk oder allgemein zur Brückenprüfung enthalten. Bei den Dateien kann es sich um PDF-Dateien oder anderweitige Dokumente, Bilder, Plandateien, Dateien zur Speicherung der Schadensdaten und andere handeln. Zusammen bilden das Bauwerksmodell und die Bauwerksdaten das Bauwerksinformationsmodell, welches bei der Prüfung verwendet wird (Bild 36).

5.2.1 Anforderungen an das Bauwerksmodell

Im Bauwerksmodell sollen die für die Prüfung erforderlichen Informationen direkt abgebildet werden oder mindestens als strukturelle Grundlage, etwa für eine korrekte Verknüpfung von Informationen an ein Bauteil, modelliert werden.

Modellelemente

Das bedeutet für die zu modellierenden Bauteilelemente, dass diese eine eindeutige Zuordnung von ASB-ING-konformen Bauteilinformationen ermöglichen müssen, etwa von Attributen oder zu referenzierenden Schadensinformationen. Die im Arbeitspaket 2.1 vorgestellten Arbeitskarten zeigen unter anderem, welche Informationen für eine korrekte Prüfung des Bauwerks vorhanden sein müssen, z. B. welche Bauteile geprüft und dementsprechend modelliert werden müssen. Dementsprechend werden – wie in den Arbeitskarten – die Anforderungen an die Modellelemente auf jene für vorgespannte Bauwerke begrenzt, was ausreicht, um die Funktionalität des Demonstrators anhand der Beispielbrücke im Autobahnkreuz Nürnberg zu entwickeln und zu zeigen.

Praktisch sollen die in den Arbeitskarten aufgeführten Bauteile modelliert werden und anschließend in

einem IFC-Modell gespeichert werden. Ausnahme stellen hierbei Fugen, etwa am Asphalt und Beton, dar. Diese werden nicht explizit modelliert und die Zuweisung eines Schadens an einer solchen Fuge zu einem Bauteil könnte wie folgt umgesetzt werden:

- 1) Orientierung an im Modell vorhandenen Schäden der gleichen Art, wenn vorhanden.
- 2) Sonst Zuweisung zu Bauteil des entsprechenden Typs, welches an die Fuge angrenzt (Asphaltfugen zu Asphalttschicht), wenn nur eines vorhanden.
- 3) Sonst Zuweisung zu angrenzendem Bauteil nach Ermessen des Anwenders.

Für Bauteile, die bisher nicht explizit im IFC4-Schema enthalten sind, kann die IFC-Entität `IfcProxy` verwendet werden und anschließend zur genauen Einordnung mit einem Klassifikationsschlüssel der ASB-ING verknüpft werden. Dieses Vorgehen wird bereits von SINGER und BORRMANN (2017) in einer diesem Projekt vorangehenden Studie für Bestandsbrücken beschrieben.

Modellattribute

Aufbauend auf der Untergliederung der Modellelemente ist es auch erforderlich, das Bauwerkselement oder einzelne Bauteilelemente mit semantischen Informationen anzureichern, die die Eigenschaften des Bauwerks oder der eingebauten Bauteile beschreiben. Anders betrachtet sind dies die Informationen, die auch in einem As-Built-Modell vorhanden sein sollen und im Fall des zu prüfenden Brückenbauwerks im Bauwerksbuch vorhanden sind. Das Bauwerksbuch enthält die Bestandsinformationen des Bauwerks und wird im Gegensatz zu den meisten anderen Dokumenten des Bauwerks in das Modell integriert, da auf diese Art ein Bestandsmodell simuliert werden kann, welches aus der Planung und Ausführung des Bauwerks mit der BIM-Methode entstanden ist.

Für die Modellierung der Informationen durch die Attribute wird von SINGER und BORRMANN (2017) die Verwendung der IFC-PropertySets empfohlen, in denen nicht vordefinierte Attribute definiert und an Modellelemente gebunden werden können. Dies wird jedoch nicht für die Modellierung der Schadensinformationen empfohlen. Für eine konsistente Integration in die IFC sei demnach eine neue IFC-Entität (`IfcDamage`) zu empfehlen, die die geometri-

schon Informationen des Schadens enthält. Eine inoffizielle Erweiterung des IFC-Schemas soll in diesem Projekt jedoch nicht erfolgen. Daher wird die Modellierung der Schadensinformationen ausgelagert und unter „Schadensmodellierung für Brücken“ (Kapitel 5.2.4) beschrieben.

Für die Verwendung des Modells vor Ort sollte das Modell eine Georeferenz erhalten, welche für eine initiale Verortung des Modells auf Basis der GPS-Daten dienen kann, auf deren Basis die später beschriebenen Methoden der präziseren lokalen Verortungsmethoden aufbauen können. Die Umsetzung der Georeferenzierung direkt in Revit über die Standort-Einstellung oder alternativ für die IFC-Datei über das Tool `IfcLocator` wird von DIAKITÉ (2018) beschrieben.

5.2.2 Anforderungen an die Bauwerksdaten

Bei den Bauwerksdaten handelt es sich um Informationen, die nicht direkt in das Bauwerksmodell integriert werden, sondern in ihrer Dokumentform verbleiben sollen, etwa durch ihren modellunabhängigen Charakter (Normen, Richtlinien etc.), eine Inkompatibilität mit den verwendeten Attributen der Modellelemente oder durch den Konvertierungsaufwand. Letzteres ist weniger für das gesamte Konzept, sondern eher für die eingeschränkte Prototyp-Anwendung relevant.

Ergänzend zu dieser Integration werden die Informationen des Bauwerksbuchs im Modell berücksichtigt. Die im Bauwerksbuch beschriebenen Eigenschaften der Bauteile sollen – durch ihre grundlegende Natur im Sinne von BIM-Daten (Bauteilinformationen als Gegenstück zur Bauteilgeometrie) – neben der Verlinkung des Dokuments in die Bauwerksdaten auch in den Attributen des Bauwerksmodells gespeichert werden sollen.

Bauwerksinformationen

Alle Informationen, die den As-Built-Zustand des Bauwerks beschreiben und für die Bauwerksprüfung relevant sind, sollen prinzipiell in einem Bauwerksbuch vorhanden sein. Dazu zählt auch der Prüfbericht der ersten Hauptprüfung.

Das vorliegende Bauwerksbuch enthält diese Informationen.

Das vorliegende Bauwerksbuch enthält jedoch nicht alle erforderlichen Informationen des As-Built-Zu-

standes und kann daher durch folgende Dokumente ergänzt werden.

- Prüfbericht/Zustandsbericht
- Prüfhandbuch
- Prüfanweisung
- Planunterlagen
 - Übersichtsplan
 - Lageplan
 - Längs- & Querschnitte
 - Detailpläne
 - Schalpläne
 - Bewehrungspläne
 - Lagerpläne
 - Korrosionsschutzpläne
 - Entwässerungspläne
- Schadensskizzen
- Anfahrtsplan
- Informationen zu Zugänglichkeiten
- Hinweise zu Zugangstechnik
- Berichte zu Zusatzuntersuchungen (Bsp. OSA)
- Fotos zum Bauwerk
- Protokolle
 - Fahrbahnübergangsprotokolle
 - Lagerprotokolle
 - Durchfahrthöhen und -breiten

Außerdem sind für den aktuellen Bauwerkszustand die bisherigen Prüfberichte als PDF-Datei zu integrieren, sofern sie nicht im Bauwerksbuch enthalten sind oder über eine unterstützte Schnittstelle der Anwendung in das Bauwerksinformationsmodell integriert werden können. Sowohl dokumentbasierte Prüfberichte als auch Prüfberichte aus SIB-Bauwerke 1.9 sollen als PDF-Datei hinterlegt werden.

Bauwerksunabhängige Informationen

Neben den eigentlichen Informationen zum Bauwerk bietet es sich als Arbeitsunterstützung außerdem an, Normen und Richtlinien zur Durchführung und Dokumentation der Prüfung in den Bauwerksdaten zu hinterlegen und diese in der Anwendung

allgemein oder für entsprechende Bauteile anzubieten.

Normen, wie die DIN 1076 zur Überwachung und Prüfung oder die DIN EN 1337-10 für Lager, sind kostenpflichtig und dürfen nicht beliebig vervielfältigt werden. Dementsprechend ist eine pauschale Integration in das Bauwerksinformationsmodell nicht möglich, da verschiedene Parteien für die Verwaltung und Prüfung des Bauwerks zuständig sind. Hier würde es sich anbieten, stattdessen eine Anforderung in die Anwendung einzubauen, die eigenen digital vorhandenen Normen nur für die eigene Verwendung in das Bauwerksinformationsmodell zu integrieren, sodass ein Zugriff durch Dritte ausgeschlossen ist. Eine solche Integration sollte durch die Erkennung einer fehlenden Datei bei anderen Nutzern und einen entsprechenden Hinweis unterstützt werden.

Die Richtlinien der BAST sind wiederum auf der Webseite der BAST frei verfügbar und können zu den Dokumenten der Bauwerksdaten hinzugefügt werden. Diese Dokumente enthalten bisweilen Vorgaben und damit Informationen zur Bauweise, wie etwa die ZTV-ING (Angaben zum Korrosionsschutz der Lager, wie im Bauwerksbuch S. 6.17 referenziert) oder die RIZ-ING (Richtzeichnungen).

Prinzipiell erfolgt die Integration der Dokumente – über die Fusionierung von Bauwerksmodell und –daten als Setup des Demonstrators oder über eine spätere Ergänzung in das vorhandene Modell durch die Anwendung – jeweils als Teil eines Machbarkeitsnachweises und kann als dessen Darstellung im Demonstrator auch exemplarisch erfolgen.

5.2.3 Verknüpfung von Dokumenten mit dem Bauwerksmodell

Während die meisten Informationen zum Bauwerk im Bauwerksmodell direkt hinterlegt werden können, so gibt es auch externe Informationsquellen, hier als Bauwerksdaten bezeichnet, die wesentliche oder zumindest hilfreiche Informationen enthalten, wie etwa Dokumente, Bilder und Pläne. Jedoch ist es nicht ohne erheblichen Aufwand möglich, alle Informationen aus solchen Dokumenten in das Modell zu integrieren. Die Informationen liegen oft nicht in maschinenlesbarer Form vor, etwa in Normen und anderen Textdokumenten. Für eine direkte Integration in das Modell müssten sie manuell übernommen werden. Um die Informationen trotzdem an der richtigen Stelle verfügbar zu machen, wer-

den sie lediglich verknüpft und zusammen mit dem Bauwerksmodell gespeichert. Dementsprechend wird das Modell mit den Informationen angereichert, welche Dokumente zu welchen Modellelementen gehören und wo sie zu finden sind.

Die IFC bieten in der Vielzahl der Entitäten auch die Entität `IfcDocument` an, in deren Instanzen die Verknüpfung eines Dokuments mit Modellelementen und weitere Informationen zu diesem Dokument gespeichert werden können. Jedoch findet diese Entität bisher kaum Anwendung, da Dateien meist auf dem einfachen Weg über ihren Pfad in Projekte eingebunden werden und diese Entität von gängiger BIM-Software, wie etwa `Desite`, bisher nicht unterstützt wird.

Verknüpfung mittels Hyperlink

Zum einen lassen sich die Dokumente über Hyperlinks mit dem Modell verknüpfen. Dabei wird der Link zum Dokument (relativ oder absolut) als String im Modell hinterlegt. Nachteil dabei ist allerdings, dass die Dokumente im Vorfeld heruntergeladen werden müssen, oder aber eine stabile Netzwerkverbindung vorhanden sein muss. Ebenso muss ein Zugriff auf absolute Angaben gewährleistet sein. Die relative Verknüpfung kommt der unten beschriebenen Möglichkeit der Verknüpfung durch Dokumentenablage nahe, da dort relative Pfadangaben z. B. auf das Filesystem hinterlegt würden. Diese relativen Pfade müssen dann allerdings bekannt und die Dateien entsprechend vorhanden sein.

Verknüpfung durch die Dokumentenablage in der Anwendung

Bei dieser Option werden Dokumente an entsprechender Stelle im Dateisystem hinterlegt. Für den Demonstrator sollte dabei der Aufbau des Dateisystems vordefiniert werden, damit die Suche und Auswahl von zusätzlichen Dokumenten entfällt und die Anwendung die Dateien direkt an den richtigen Speicherort laden kann. Im vorliegenden Demonstrator wird das über die im Abschnitt „Synchronisierung“ näher beschriebene Dateistruktur umgesetzt. Vorteil ist hierbei insbesondere, dass die Struktur einfach zu erzeugen ist, Anpassungen in der Anwendung schnell durchgeführt werden können und durch eine einheitliche Struktur der Aufbau einfach zu übertragen ist. Nachteil ist dabei dennoch eine gewisse Flexibilität, auch gegenüber anderen Ablagestrukturen (diese müssten adaptiert und entsprechend in der Anwendung hinterlegt werden).

5.2.4 Schadensmodellierung für Brücken

Da es sich bei der geplanten Anwendung um ein integriertes System handelt, welches auf Import und Exporte diverser Systeme angewiesen ist, wird bei der Schadensmodellierung auf etablierte Systeme zurückgegriffen. Es wird bei dem weiteren Verlauf allerdings darauf geachtet, dass das Konzept der Schadensmodellierung so erarbeitet wird, dass seine Struktur aufrüstbar oder ersetzbar bleibt. So kann eine Zukunftssicherheit gewährleistet werden.

Die Schadensmodellierung in der Anwendung stützt sich auf die Struktur eines der einfachsten und nützlichsten Standards im `buildSMART` Toolkit. Das auf dem XML-Schema basierende BCF hat sich seit seiner Einführung in dem Jahr 2009 in der BIM-Welt etabliert, es ist ein offener Datenstandard und bietet aufgrund seiner Individualisierbarkeit gute Voraussetzungen für die Grundlage der Schadensmodellierung.

Eine BCF-Datei ist eine Zip-Datei, die einen Ordner für jedes Thema mit der Dateierweiterung „`bcfzip`“ für BCFv1.0 und BCFv2.0 enthält. Die Dateierweiterung „`bcf`“ wurde mit der BCFv2.1 eingeführt. Das Stammverzeichnis der BCF-Zip enthält die folgenden Dateien (Anon., 2020q):

- `project.bcfp` (optional)
Eine XML-Datei, die die `extension.xsd` auf ein Projekt verweist. Das Schema für diese Datei lautet `project.xsd`.
- `bcf.version`
Eine XML-Datei, die dem Schema `version.xsd` nachkommt und Informationen zum verwendeten BCF-Schema enthält. Der Dateiinhalt sollte mit dem Inhalt von `bcf.version` identisch sein.

Jede BCF-Datei ist einem Issue (Problem) oder Topic zugehörig, als Ordnername wird eine GUID gewählt, die auf das jeweilige Topic verweist. Der Ordner selbst beinhaltet:

- `markup.bcf`
Eine XML-Datei, die dem `markup.xsd` Schema folgt und projektspezifische und schadensspezifische Textinformationen beinhaltet.
- `viewpoint.bcfv`
Eine XML-Datei, die dem `visinfo.xsd` Schema folgt und Visualisierungsinformation beinhaltet. Seit BCF 2.0 sind mehrere Ansichtspunkte möglich. Die Namen dieser Dateien sind nicht vorde-

finiert. Hinweis: Ein Ansichtspunkt muss auch bei mehreren Ansichtspunkten als viewpoint.bcfv bezeichnet werden.

- snapshot.png
Ein Schnappschuss zum Topic (aus Kompatibilitätsgründen mit BCF 1.0). Seit BCF 2.0 sind mehrere Schnappschüsse möglich. Die Namen dieser Dateien sind nicht vordefiniert. Hinweis: Ein Snapshot muss auch bei mehreren Gesichtspunkten den Namen snapshot.png haben.

Für den Aufbau der Schadensmodellierung ergeben sich aufgrund der Struktur der BCF mehrere Möglichkeiten, die im Laufe des Projektes untersucht werden. Die Schäden, welche in der Anwendung modelliert werden müssen, brauchen einerseits Schadensdaten, aber auch eine Verortung sowie eine Versionierung, aufgrund von Schäden, die sich weiterentwickeln, sowie die Möglichkeit, die Schäden visuell festzuhalten. Diese Anforderungen sind in der BCF gegeben, allerdings gibt es für die Anordnung und Strukturierung mehrere Möglichkeiten.

Eine Möglichkeit ist es, für jeden Schaden ein eigenes BCFZIP-Verzeichnis zu erstellen. Innerhalb dieses Verzeichnisses werden die einzelnen Versionen des Schadens angeordnet sowie allgemeine Informationen zu der Schadensart, der Schwere des Schadens, die Schadensverordnung sowie eine bildliche Darstellung des Schadens.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Anordnung aller Schäden innerhalb eines BCFZIP-Verzeichnisses dar. Bei dieser Version würden die historischen Versionen der einzelnen Schäden als bildliche Darstellung sowie in einzelnen Abschnitten innerhalb der schadensspezifischen Textinformationen angelegt werden.

5.2.5 Schnittstelle eines Austauschformats für Schadensdaten

Mit den IFC ist ein universelles Austauschformat für Bauwerksinformationen verfügbar, welches bisher jedoch keine festgelegten Strukturen für die Modellierung von Schäden bietet. Software, die der Bewertung und Verwaltung von Schäden dienen, wie etwa SIB-Bauwerke, verwenden – wenn überhaupt – andere Austauschformate. So ist in der bereitgestellten Entwicklungsversion der Online-Anwendung SIB-Bauwerke 2.0 die OKSTRA-WFS-Schnitt-

stelle integriert, über welche eine OKSTRA-Austauschdatei ausgegeben werden kann. Eine Importfunktion in die Anwendung fehlt bisher, soll aber noch folgen und ist in der OKSTRA-WFS-Dokumentation beschrieben (Anon., 2016). Für die Entwicklung einer Schnittstelle auf Seite der Projektanwendung wird ein möglicher Austausch zwischen der Anwendung und SIB-Bauwerke angenommen. Entsprechend soll die Informationsübergabe durch ein OKSTRA-konformes Austauschformat zwischen den beiden Anwendungen ermöglicht werden. Die Entwicklung der Schnittstelle zum OKSTRA-Austauschformat wurde, aufgrund fehlender Parameter und Nutzungsmöglichkeiten, in diesem Projekt nicht weiterverfolgt.

5.2.6 Workflow zum Import der Bauwerksdaten in Unity

Basierend auf der Entscheidung zur Realisierung des Prototyps unter Verwendung der Unity Game Engine soll im Folgenden die Frage beleuchtet werden, wie die Bauwerksdaten in Unity importiert werden. Dazu werden verschiedene Plugins und Softwarelösungen vorgestellt, die verschiedene Workflows zum Import ermöglichen oder unterstützen.

Die Bauwerks- und Modelldaten werden als eine IFC-Datei angelegt, welche vor allem für das Arbeiten in Architektur-Programmen vorgesehen ist. Als Echtzeit-Engine basiert Unity allerdings auf polygonalem Rendering und unterstützt 3D-Modellformate wie FBX, OBJ und DAE. IFC-Dateien dagegen werden nicht nativ unterstützt, weswegen ein zusätzlicher Importer für IFC-Dateien für Unity benötigt wird. An dieses Importer-Plugin sind folgende Anforderungen zu stellen:

- **Import während der Laufzeit**

Die im Prototyp anzuzeigenden Modelle sollen erst nach fertiggestellter Implementierung der Software, während ihrer Ausführung, geladen werden und nicht etwa fest in die Anwendung codiert werden. In diesem Falle spricht man von einem „Laden während der Laufzeit“. Es besteht also die Anforderung, die Modelle dynamisch während der Anwendungsausführung laden zu können.

- **Nicht cloudbasiert**

Um die Funktionalität der Software auch ohne Internetverbindung (z. B. in der Brücke) zu gewährleisten, darf der Importer nicht cloudbasiert

sein. Zudem ist hier der Aspekt der Datensicherheit zu berücksichtigen. Cloudbasierte Anbieter nutzen oft Serverinfrastrukturen, die außerhalb der EU lokalisiert ist, wodurch nicht sichergestellt werden kann, dass auch europäische Datenschutzstandards garantiert werden können.

- **Vollständiger Import aller Daten**

Um den Datengehalt der IFC-Modelle nicht einzuschränken, muss der Importer alle Daten des IFC-Modells lesen und importieren. Idealerweise erlaubt er ebenfalls die Bearbeitung und Rückspielung der Daten. Dies betrifft insbesondere auch die Metadaten, also jene Informationen, die zusätzlich mit dem BIM-Modell verknüpft sind, wie beispielsweise Daten zu verbauten Materialien oder zusätzliche Annotationen.

- **Unterstützung offener Dateiformate**

Da das Forschungsprojekt und aufbauende Projekte zukunftsfähig und unabhängig bleiben, muss das genutzte Plugin möglichst auf offenen Dateiformaten aufbauen und ohne proprietäre Software auskommen.

- **Unterstützung mobiler Betriebssysteme**

Um einen Import auch auf dem Tablet vor Ort zu ermöglichen, muss das Import Plugin mobile Betriebssysteme unterstützen.

- **Keine hohen Lizenz- und Betriebskosten**

Auch die Betrachtung von Lizenz- und Betriebskosten soll bei der Auswahl des Importer-Plugins Berücksichtigung finden. Hier gilt es zunächst, hohe Lizenz- oder Betriebskosten zu vermeiden, wenn diese nicht durch eine massive Aufwandsreduktion gerechtfertigt sind.

- **OpenSource**

Zusätzlich zu obigen Kriterien ist eine OpenSource Lösung vorzuziehen, um z. B. Abläufe während des Imports nachvollziehen zu können. Dies ist jedoch eine optionale, wünschenswerte,

aber keinesfalls zwingende Voraussetzung für die Verwendung eines Plugins.

Im Folgenden werden vier verschiedene IFC-Importer für Unity betrachtet, die teilweise bereits im Stand der Technik erwähnt wurden: Tridify⁷⁷, PiXYZ⁷⁸, TriLib⁷⁹ und den Arcventure IFC Importer⁸⁰.

5.2.7 IFC Importer Plugins

Tridify ist eine cloudbasierte Lösung zur Ablage und Verwendung der IFC-Dateien. Dabei werden die IFC-Dateien von Tridify verarbeitet und für Realtime-Anwendungen nutzbar gemacht. Das zusätzliche Plugin von Tridify ermöglicht es, die Modelle aus der Cloud in Unity zu laden. Da das Plugin jedoch cloudbasiert ist, ist es für dieses Projekt nicht nutzbar.

PiXYZ ist die ausgereifteste Lösung für den Import von IFC-Dateien in Unity. Unter anderem konvertiert PiXYZ IFC-Dateien in das FBX-Format, optimiert die Geometrie und erstellt UV-Maps. Die BIM-Daten werden übernommen und automatisch angezeigt. Dieses Plugin ist jedoch durch die hohen Kosten (1.000 €/Jahr) sowie die dadurch entstehende Abhängigkeit von einer proprietären Software ungeeignet. Ebenfalls zu erwähnen ist die fehlende Möglichkeit, Modelle zur Laufzeit zu importieren.

Arcventure IFC Importer ist ein Plugin zum Import von IFC-Dateien in Unity und der Anzeige von BIM-Daten. Jedoch funktioniert der Import nur im Editor und alle Modelle müssten somit vor der finalen Implementierung der Software geladen werden. Eine Änderung des Modells zur Laufzeit ist nicht möglich. Deshalb ist auch dieses Plugin ungeeignet.

TriLib ist ein beliebtes und günstiges Importer-Plugin für Unity. Dieses Plugin basiert auf der OpenSource Bibliothek Assimp⁸¹ und unterstützt neben IFC-Dateien auch viele andere Dateitypen. Bei umfangreichen Tests stellte sich jedoch heraus, dass es drei Probleme bei diesem Workflow gibt. Da

⁷⁷ www.tridify.com

⁷⁸ <https://www.pixyz-software.com/>

⁷⁹ <https://assetstore.unity.com/packages/tools/modeling/trilib-model-loader-package-91777>

⁸⁰ <https://assetstore.unity.com/packages/tools/utilities/ifc-importer-162502>

⁸¹ <https://www.assimp.org/>

durch die Zusammenfassung der Modell- und BIM-Daten die Datenmenge steigt (die Datei der Testbrücke war ca. 2.9 GB groß), kommt es zu längeren Ladezeiten (ca. 10 – 15 Minuten).

Der TriLib-Importer übernimmt die booleschen Körper der IFC-Dateien nicht, wodurch zum Beispiel der Hohlkasten der Brücke nicht angezeigt wird (vgl. Bild 37). Außerdem werden die BIM-Daten von diesem Plugin nicht vollständig eingelesen.

Tabelle 19 zeigt eine vollständige Bewertung der Importer-Plugins anhand der oben vorgestellten Kriterien.

Somit erweisen sich die oben vorgestellten Plugins zum direkten und vollständigen Import von IFC-Dateien inklusive Metadaten als ungeeignet. Ein eigenes Plugin für das Einlesen der IFC-Dateien zu entwickeln, ist im Rahmen dieses Forschungsprojektes aufgrund des enormen Zeitaufwandes nicht durchführbar.

Deshalb ist es sinnvoll, die IFC-Daten vor dem Importieren in Unity in Modell und BIM-Daten aufzuteilen und einen dateibasierten Workflow, wie in Bild 38 visualisiert, zu wählen. Als Dateiformate eignen sich für die Metadaten, also jene zusätzlichen Attribute und Informationen, die mit dem BIM-Modell

verknüpft sind, das plattformunabhängige XML-Format, das mithilfe von C# in Unity eingelesen werden kann, und für die Geometriedaten das von Unity nativ unterstützte FBX-Format. Mit IFCXML gibt es bereits eine IFC-seitige Beschreibung der Metadaten im XML-Format. Für den Import der Geometrieinformationen im FBX-Format wird jedoch weiterhin das TriLib Plugin genutzt, da dieses mehr Funktionen als der native Unity-Importer bietet, wie z. B. der Import während der Laufzeit.

Die Trennung der Geometrie- und BIM-Daten ermöglicht außerdem ein Update von BIM-Daten, ohne die 3D-Geometrie neu zu laden. Dies erleichtert auch die Handhabung, Darstellung und später den Export der BIM-Daten, da XML plattformunabhängig ist. Hierbei ist von Nachteil, dass man die IFC-Datei nicht direkt nutzen kann und dadurch im Vorfeld ein zusätzlicher Arbeitsschritt entsteht. Durch die sowohl in der XML- als auch FBX-Datei vorhandenen Daten des Attributs IFCtag können nach dem Einlesen der beiden Dateien die BIM-Daten aus der IFCXML Objekten der Geometrie zugewiesen und auf Abruf dem User angezeigt werden.

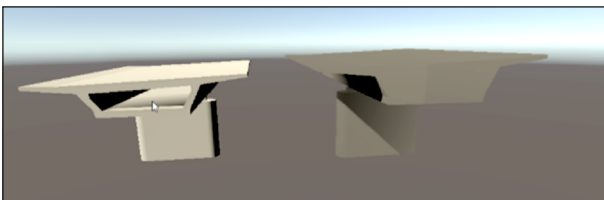


Bild 37: FBX (links) und IFC (rechts)

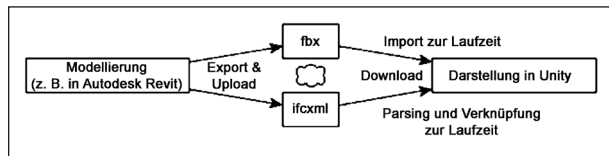


Bild 38: Workflow zur dateibasierten Datenverarbeitung mit Aufteilung von 3D-Modell und Metadaten

Plugin	Laufzeit-Import	Nicht cloudbasiert	Unterstützung mobile Betriebssysteme	Vollständiger Datenimport	Unterstützung offener Dateiformate	Open-Source	Keine hohen Lizenz- und Betriebskosten
Tridify	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓ (\$ 20 pro Monat)
PiXYZ	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗ (1.000 € pro Jahr)
Arcventure IFC Importer	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓ (einmalig ca. 90 €)
TriLib	✓	✓	✓	✗	✓	✗ (Zugriff auf Source-Code nach Kauf des Plugins möglich)	✓ (einmalig ca. \$ 25)

Tab. 19: Vergleich der Kriterien der verschiedenen IFC-Import-Plugins

5.2.8 Externe IFC Konverter

Neben dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Workflow zum direkten Import der Geometrie und Metadaten aus der Modellierungssoftware, kann dies auch über ein externes Konvertierungswerkzeug erfolgen. Bild 39 zeigt diesen alternativen Workflow mit externer Konvertierungssoftware. Bei diesem Vorgehen wird eine IFC-Datei aus der Modellierungsumgebung exportiert. Anschließend wandelt die Konvertierungssoftware das IFC-File um und ermöglicht die Aufteilung in Geometrie und Metadaten, die anschließend, wie bereits in Bild 38 dargestellt, zur Laufzeit in Unity importiert bzw. geparkt und verknüpft werden kann. Möglich wäre es, die Konvertierungssoftware entweder lokal auf einem Desktop-System zu betreiben oder die Konvertierung auch auf einem Server zu betreiben und anschließend einen Upload in das CDE durchzuführen.

xBIM Toolkit

Das xBIM Toolkit⁸² umfasst mehrere Softwarepakete, die verschiedene Bereiche und Aufgaben rund um das IFC Datenmodell unterstützen und für die Softwareentwicklung verfügbar machen. Es umfasst auch unter anderem Funktionen zur Konvertierung von Metadaten aus IFC-Dateien in das IFCXML-Format (vgl. <https://docs.xbim.net/examples/step-to-xml-and-back-again.html>). Die Bibliothek XbimEssentials (<https://github.com/xBimTeam/XbimEssentials>) ist in der Sprache C# verfasst und als OpenSource-Lösung über Github (<https://github.com/xBimTeam>) verfügbar. Durch die Implementierung in C# wäre grundsätzlich eine Nutzung der Konvertierungsfunktionalität auch für den Unity-

Prototypen möglich. In diesem Falle würde also ein Download der IFC-Datei auf das Endgerät (Tablet oder Desktop-PC) erfolgen und aus der Unity Laufzeit heraus eine Konvertierung der Metadaten durchgeführt. Die Konvertierung der Geometrieinformationen wäre hierbei aber gesondert zu betrachten.

IfcOpenShell

Mithilfe der Software-Bibliothek IfcOpenShell⁸³, die auch als Kommandozeilentool verwendet werden kann, kann eine Konvertierung der Geometrie der IFC-Datei in ein Format erfolgen, das von der Unity Game Engine eingelesen werden kann, wie beispielsweise das OBJ-, oder das FBX-Format. Dabei kann das Tool mit verschiedenen Parametern aufgerufen werden, die Einfluss auf die Schnelligkeit der Konvertierung haben. Wichtig ist hierbei jedoch zu erwähnen, dass IfcOpenShell derzeit IFCXML nicht unterstützt (Zitat von der Projektwebsite <http://ifcopenshell.org/>: „Support for IFC-XML and IFC-ZIP will be added in the future.“) und dass ein Betrieb auf dem Tablet nicht möglich ist. Dadurch würde sich hier ein zusätzlicher Aufwand der manuellen Konvertierung oder des Betriebs einer zusätzlichen Konvertierungsinstanz, z. B. auf einem Webserver ergeben.

Ein Test mit dem vorhandenen Modell der Brücke aus Siemens NX mit 0,5 mm Seitentoleranz (IFC-Dateigröße: 352,6 MB) lieferte Konvertierungszeiten von ca. 45 – 60 Minuten, wobei es zu einer fehlerbehafteten Konvertierung des Hohlkastens kam, sodass dieser nicht angezeigt wird (vgl. Bild 40). Die resultierende Dateigröße beträgt ca. 540 MB für das .obj-File und ca. 20 KB für die .mtl-Datei, wel-

⁸² <https://docs.xbim.net/index.html>

⁸³ <http://ifcopenshell.org/>

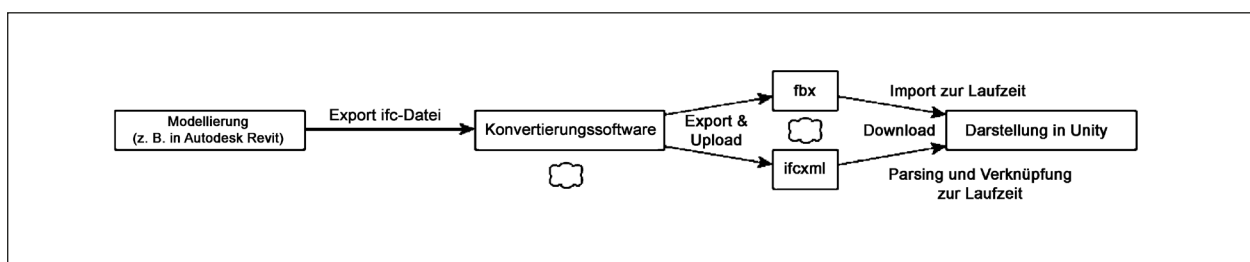


Bild 39: Alternativer Workflow mit externer IFC-Konvertierungssoftware

che Informationen zu den Materialien für die Darstellung in der Game Engine enthält. Ein Test mit einem Ausschnitt des Brückenmodells, nachmodelliert in Autodesk Revit, ergab bei einer IFC-Dateigröße von 44 KB eine Konvertierungszeit unter einer Sekunde (0,06 sec), wobei die Geometrie vollständig übertragen wurde. Die resultierende Dateigröße beträgt dabei ca. 54 KB für das .obj-File und ca. 234 Byte für die .mtl-Datei.

Bei beiden vorgestellten IFC-Konvertern ist der Funktionsumfang nicht vollständig (entweder nur ein Export der IFCXML-Daten oder der Geometrie möglich). Dem könnte jedoch auch durch eine Kombination dieser Ansätze begegnet werden. Jedoch zeigt insbesondere die sehr lange Konvertierungszeit des gesamten Brückenmodells bei IfcOpenShell, dass nicht jede IFC-Datei effizient konvertiert

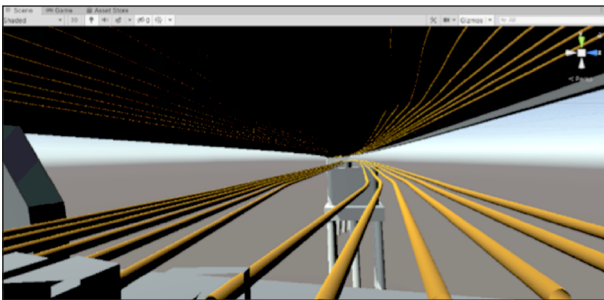


Bild 40: Detailansicht des durch IfcOpenShell fehlerhaft importierten Hohlkastens

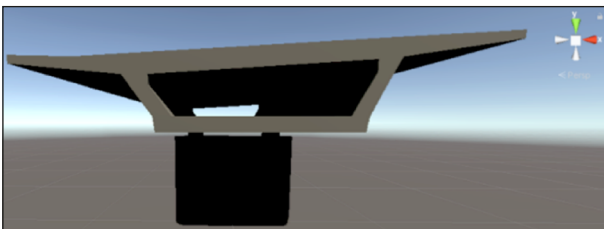


Bild 41: Aus Revit exportierter Ausschnitt des Brückenmodells in der Unity Entwicklungsumgebung



werden kann. Somit wird der direkte Exportweg, wie in Bild 38 dargestellt unter Auftrennung der Geometrie und der Metadaten favorisiert.

5.3 Cloudbasiertes Bauwerksinformationsmodell

5.3.1 Verortung von Modell und Realität

Zur Verortung von 3D-Modell und Realität sind – basierend auf dem Stand der Technik – verschiedene Herangehensweisen denkbar. Im Folgenden beschränken wir uns auf das Self Reporting, die Verortung mittels AR-Markern in Kombination mit SLAM, auch „hybrides Tracking“ genannt, und NFC-Tags. Weitere Möglichkeiten wie z. B. die Lokalisierung mittels Bluetooth-Beacons oder WLAN werden ausgeschlossen, da hierfür der Aufwand für die Installation, Betrieb und Wartung von zusätzlicher Infrastruktur im Rahmen des Projektvorhabens zu hoch und der Nutzen zu gering erscheint.

Das Self Reporting bietet dem Anwender die Möglichkeit, selbstständig seinen Standort einzugeben. Dies erfolgt entweder über eine zweidimensionale Karte, die mit dem 3D-Modell verknüpft ist (Bild 42 links), über die Eingabe mittels Buttons (Bild 42 rechts) oder über die direkte Pinch & Zoom (entspricht einem Zurechtrücken des Modells im virtuellen Raum) Interaktion mit dem 3D-Modell.

Mithilfe von AR-Markern in und auf dem Brückenbauwerk in Kombination mit der Nutzung von SLAM kann diese Form der Verortung unterstützt werden. Die Technologie hinter AR-Markern und SLAM wurde bereits in Kapitel 2 behandelt. Vorteil der Kombination beider Verfahren zu einem hybriden Tracking-Ansatz ist zum einen die Robustheit von AR-Markern und zum anderen die zusätzliche Präzision

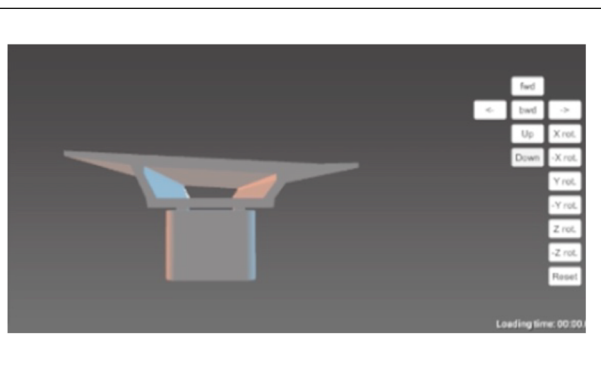


Bild 42: Self Reporting mittels oder Positionsangabe auf zweidimensionaler Karte (links, Foto: Fraunhofer FIT) und Button-Navigation (Early Prototype, rechts)

durch SLAM-Verfahren über kleinere Wegstrecken. Die AR-Marker bieten also die Möglichkeit, den bei SLAM auftretenden Drift zu korrigieren und so eine ausreichende Genauigkeit im Dezimeterbereich zur Verfügung zu stellen. Hierzu ist allerdings eine Anbringung von AR-Markern in und am Bauwerk notwendig. Dies könnte jedoch zukünftig bereits im Bauprozess Berücksichtigung finden. Weiterhin ist die Problematik von möglichen Vandalismusschäden z. B. durch Graffiti, sonstige Beschädigung oder Entfernen der Marker zu berücksichtigen, die durch entsprechende Verdeckung oder ein Nicht-Vorhandensein das Tracking erschweren oder gar unmöglich machen. Für den im Rahmen dieses Projekts entwickelten Prototypen sollen AR-Marker in Form von Bildern in regelmäßigen Abständen im Hohlkasten der Brücke angebracht werden. Außerhalb des Hohlkastens könnten entweder Markierungspunkte an der Brücke zur Initialisierung vom Tracking verwendet werden, die dann entsprechend in der Anwendung hinterlegt werden. Hierbei ist – analog zu den Markern – die potenzielle Beeinflussung durch z. B. Vandalismus oder Natureinflüsse ebenso wie die Eignungsfähigkeit als Marker zu berücksichtigen. Alternativ können andere, nicht-visuelle Trackingverfahren, wie z. B. GPS in Verbindung mit Korrekturmechanismen durch z. B. Self-Reporting, verwendet werden.

Darüber hinaus gäbe es noch die Möglichkeit der Verortung mittels NFC-Tags. NFC-Tags sind kleine Aufkleber, die eine passive Antenne und einen kleinen Speicher beinhalten. Bringt man ein Endgerät, wie beispielsweise das für den AR-Prototypen verwendete Tablet, in die Nähe des Aufklebers, können Daten mittels Induktion ausgelesen werden. Hierbei muss der Abstand jedoch sehr gering sein (max. 5 – 10 cm). Anders als bei den beiden zuvor vorgestellten Verortungsmöglichkeiten ist die Unterstützung seitens Unity nicht „out of the box“ gegeben, sprich nicht standardmäßig in Unity oder den ohnehin verwendeten Frameworks integriert. Zudem ist eine Verwendung mit der verwendeten Hardware nicht möglich, da das iPad Pro die NFC-Schnittstelle nicht vollständig unterstützt. Basierend auf dem zu erwartenden entwicklungs-technischen Mehraufwand, der nicht immer praktikablen erforderlichen räumlichen Nähe zwischen Endgerät und Aufkleber (bzw. passiver Antenne) und nicht zuletzt der fehlenden technischen Realisierbarkeit auf dem ausgewählten Endgerät wird von dieser Möglichkeit zur Verortung im Rahmen dieses Projektvorhabens abgesehen.

5.3.2 Schadensverortung

Bisher erfolgt die Schadensverortung mithilfe von relativen Angaben in Bezug auf Referenzpunkte (z. B. Startpunkte der Brückensegmente) unter Angabe von textlichen Angaben und/oder ein- oder zweidimensionalen Koordinaten in Prüfrichtung. Zusätzlich werden Skizzen, Fotos und handschriftliche Notizen zur Dokumentation verwendet. Dieses System wird auch im System der SIB-Bauwerke für die Verortung von Schäden verwendet. Im Folgenden werden Möglichkeiten zur digitalen Schadensverortung und -erfassung beleuchtet. Die digitale Schadensverortung kann in 2D oder in 3D erfolgen. Wurde also ein Schaden gefunden, kann die Eingabe auf dem Tablet an dem Ort erfolgen, der durch die Verortung von Modell und Realität festgelegt oder erkannt wurde.

Bei der Schadensverortung mittels 3D-Objekt wird ein dreidimensionales virtuelles Objekt möglichst nah am Schaden platziert, sodass dieser wieder aufgefunden werden kann (vgl. Bild 43 als Darstellung in virtueller Umgebung). Das 3D-Objekt kann hierbei ein Würfel, eine Kugel oder ein dreidimensionaler Pfeil (vgl. Bild 28) sein. Weitere Informationen (wie beispielsweise Schadensart, Abmessungen oder auch Fotos des Schadens) würden in einem zweiten Schritt über ein (zweidimensionales)

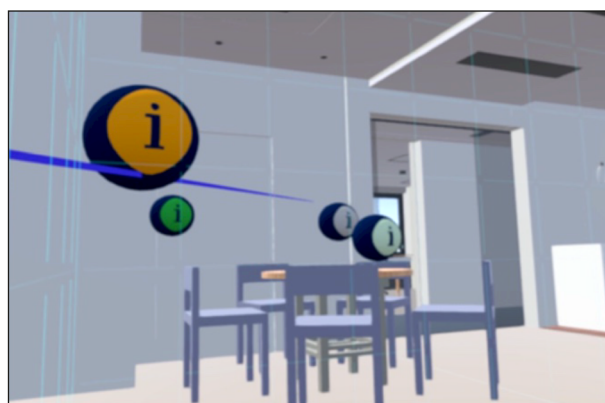


Bild 43: Mögliche Schadensverortung mithilfe von 3D-Objekten (Foto: Fraunhofer FIT)

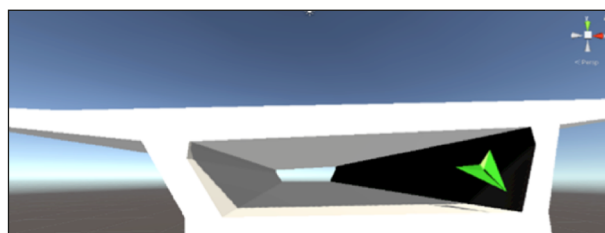


Bild 44: Mögliche Schadensverortung unter Verwendung eines dreidimensionalen Pfeils (Montage)

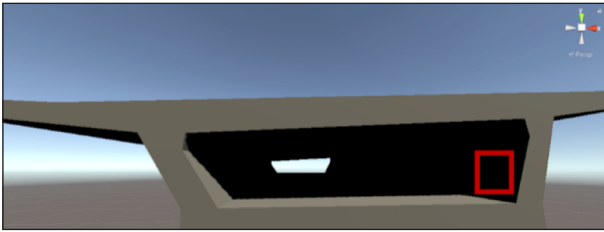


Bild 45: Mögliche Schadensverortung mittels 2D-Objekt (Montage)

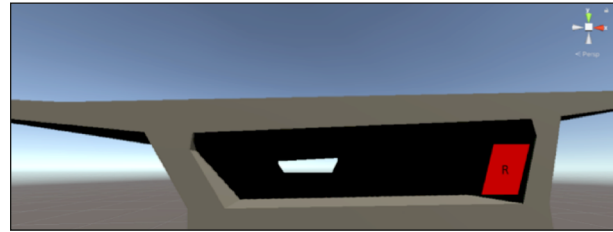


Bild 46: Mögliche zweidimensionale Darstellung vorhandener Schäden (Montage)

Eingabeformular erfasst. Das 3D-Objekt fungiert in diesem Falle also ähnlich zu einem Point of Interest (POI).

Alternativ wäre auch eine Erfassung mithilfe von 2D-Objekten, bzw. zweidimensionalen Strukturen, wie beispielsweise Rechtecken möglich (vgl. Bild 45). So wäre es zum Beispiel denkbar, ein Rechteck um den Schaden zu ziehen, um diesen später zu lokalisieren. Jedoch ergibt sich hier die Schwierigkeit bei der Interaktion mit dem 2D-Objekt. Da die Darstellung und Interaktion – sowohl in AR als auch in VR – in drei Dimensionen erfolgt, ist es schwierig, die Tiefenposition des zweidimensionalen Objektes festzulegen und korrekt zu bestimmen. Aus diesem Grunde wird die dreidimensionale Lösung der zweidimensionalen vorgezogen. Denkbar wäre die Auswahl einer Fläche an einem Bauteil zur Eingrenzung des Schadens, wodurch eine zweidimensionale Interaktion im 3D-Raum beschrieben werden würde. Die Erfassung weiterer Informationen zum Schaden und zusätzlicher Daten, wie Fotos, würde auch bei dieser Lösung in einem separaten Schritt mittels zweidimensionalem Formular erfolgen. Die erfassten Schäden sowie alle weiteren aufgenommenen Informationen zu den Schäden werden immer in der zugehörigen BCF-Schadensdatei abgelegt und für weitere Schritte aus dieser aufgerufen. Die vorhandenen 3D-Modelldaten des zu prüfenden Objektes werden nicht verändert.

5.3.3 Virtuelle Darstellung vorhandener Schäden

Die virtuelle Darstellung bereits vorhandener Schäden kann auf drei Arten erfolgen: durch 3D-Objekte, 2D-Objekte oder eine fotorealistische 3D-Modellierung.

Ähnlich wie auch bei der Schadensverortung (vgl. Bild 43) ermöglicht ein 3D-Objekt, wie z. B. Würfel, Kugel oder 3D-Pfeil, das Wiederauffinden von Schäden. Über eine Farbkodierung in Kombination mit Buchstaben wäre es dabei auch möglich, be-

reits auf den ersten Blick z. B. die Schadensart sichtbar zu machen. Über einen Klick auf das entsprechende Objekt oder die Auswahl von letzterem können dann wiederum in 2D die hinterlegten Schadensinformationen sowie verlinkte Dokumente und Fotos des Schadens eingesehen werden.

Auch mit 2D-Objekten wäre es möglich, die Schadensart mithilfe von z. B. Rechtecken mit Kürzeln und Farbcodierungen darzustellen und so schnell erfassbar zu machen (vgl. Bild 46). Dennoch ergibt sich auch hier die Schwierigkeit, mit einem zweidimensionalen Objekt in 3D zu interagieren.

Eine letzte Möglichkeit würde die fotorealistische Nachbildung der Schäden als 3D-Objekt darstellen. Dies würde perspektivisch zwar ermöglichen, das Schadensbild in das 3D-Modell zurückzuführen (und somit z. B. Entwicklungen hin zum Digital Twin des 3D-Modells unterstützen), ist jedoch mit sehr hohem Aufwand verbunden, sind die nachzubildenden Schäden doch teilweise sehr fein. Die Erfassung kann mittels mobiler Scansysteme erfolgen, wie sie z. B. in (Anon., 2018b) im Kontext kultureller Erbstätten beschrieben werden. Ein weiteres Beispiel für ein handgeführtes Laserscansystem von GeoSLAM⁸⁴ liefert <https://www.laserscanning-europe.com/en/node/3410>. Aus praktischer Sicht empfiehlt sich der zusätzliche Aufwand zumindest mit den derzeit verfügbaren Workflows zur Erfassung und Nachmodellierung nicht, weswegen im Rahmen dieses Projekts von dieser Lösung der Schadensdarstellung Abstand genommen wird.

5.3.4 Digitale Funktionen

Die digitalen Funktionen sind eine Erweiterung in der virtuellen Welt, welche die Nutzer-Experience deutlich steigern sollen. Die nachfolgend genann-

⁸⁴ <https://geoslam.com/>

ten Funktionen unterstützen den Nutzer sowohl in VR als AR gleichermaßen, wobei die Inhalte und die Ergebnisse der Funktionen zur Abschätzung und Vergleichbarkeit und nicht zur qualitativen Auswertung der Mess- und Prüfergebnisse beitragen werden.

Virtuelle Taschenlampe

Die virtuelle Taschenlampe wird den Nutzer in der virtuellen Szene unterstützen, dunkle Teilbereiche des zu prüfenden Objektes auszuleuchten. Da die digitalen Objekte in der virtuellen Umgebung mit realitätsnahen Lichtverhältnissen, wie Sonneneinstrahlung, Licht-Schatten-Reflexion usw., aufgebaut werden, sind die Elemente wie der Brückenhohlkasten dunkel. Mithilfe der virtuellen Taschenlampe kann der Nutzer in der VR damit bereits in der Vorbereitung zum Prüfprozess erkennen, ab wann und in welchen Teilbereichen eine hohe Ausleuchtung erforderlich ist.

Virtuelles Maßband

Das virtuelle Maßband kann sowohl in der VR als auch in der AR integriert und eingesetzt werden. In der VR kann das Maßband dabei in der Anzeigevariante mittels Desktopanwendung oder HMD verwendet werden. Im Brückenprüfprozess kann das virtuelle Maßband in der AR-Anwendung integriert werden. Dieses ermöglicht dem Nutzer eine schnelle Abschätzung von Längen und Abständen bei der Prüfung. Wichtig hier: Die Anwendung einer solchen Funktion ist von vielen Randbedingungen abhängig, wie der Genauigkeit des Trackings, der Startpunkte des Nutzers sowie der Erkennung von Objekten, Kanten und Flächen des zu messenden Objektes. Aufgrund dessen sollte die Funktion des virtuellen Maßbandes nur zur Abschätzung gemessener Elemente dienen.

Eine eigenständige Entwicklung eines virtuellen Maßbandes ist im Rahmen des Projektes zu aufwendig. Aus diesem Grund wird auf die Programmierung anderer Entwickler zurückgegriffen, welche für die Entwicklung kostenpflichtig sein wird, für die Nutzung des Demonstrators kostenlos zur Verfügung steht.

Digitale Markierung

Bei der digitalen Markierung wird eine virtuelle Eingrenzung erstellt. Diese kann bspw. bei aufgenom-

menen Bildern im Prüfprozess oder in der Vor- oder Nachbereitung der Prüfung am VR-System erfolgen. Durch diese Funktion kann der Nutzer Hinweise und Abstimmungspunkte setzen, um diese in der Nachbereitung einfacher zu kommunizieren.

Eine eigenständige Entwicklung der digitalen Markierung muss, im Rahmen des Projektes, aufgenommen werden, da der aktuellen Recherche nach für das Projekt keine geeignete Vorentwicklung verfügbar ist.

5.3.5 Common Data Environment

Als Common Data Environment soll das BSCW-System verwendet werden. Hierbei handelt es sich um ein ursprünglich am Fraunhofer FIT entwickeltes Groupware System, das mittlerweile durch das FIT-Spin-Off Orbiteam vertrieben und weiterentwickelt wird. Durch die am Fraunhofer FIT entwickelte BSync®-Synchronisationslösung kann eine Anbindung von Windows Computern an einen Workspace vorgenommen werden, sodass der Dateiaustausch auch vom Dateisystem aus möglich wird. Daneben kann selbstverständlich auch das Webinterface verwendet werden, um Dateien hoch- bzw. herunterzuladen. Über eine REST-Schnittstelle ist es überdies für authentifizierte Nutzer oder Clients auch möglich, Dateien hoch- und herunterzuladen.

Letzterer Anwendungsfall ist im Rahmen des Projekts vor allem für die entwickelten AR- und VR-Prototypen auf dem Tablet und im Büro von Relevanz. Die REST-Schnittstelle erlaubt durch die Realisierung mittels HTTP-Requests die Anbindung verschiedener Plattformen. Die entsprechende Schnittstelle kann über C#-Code für Unity abgebildet werden und ermöglicht damit integriert in den Prototypen den Transfer von Dateien (Up-/Download via PUT-/GET-Requests) sowie das Listing von Dateien auf dem BSCW-Server, um auf dem Endgerät (Client) zu entscheiden, ob eine Datei transferiert werden soll oder nicht. Somit kann sowohl das Apple iPad Pro als auch der Windows VR-PC mittels dieser Schnittstelle angebunden werden. Die jeweiligen Anbindungen sind in Bild 47 visualisiert.

Voraussetzung für die Realisierung dieser Anbindung ist die Verwendung der BSCW Version „social“ (Versionsnummer 7). Erst diese Version beinhaltet die notwendigen REST-Schnittstellen für den BSync®-Client und die Unity-Prototypen. Tabelle 20 fasst die Anforderungen an die benötigte Software zusammen.

Die Dateien werden dabei auf dem Tablet im lokalen, persistenten Datenspeicher, der nur für die Unity Anwendung zugänglich ist, abgelegt. Für die VR-Anwendung kann eine entsprechende Ablage der Daten im Dateisystem erfolgen. Mit Blick auf die serverseitige Zugriffssicherheit sei erwähnt, dass der BSCW ein sehr umfangreiches Rollenkonzept zur Verfügung stellt, welches detaillierte Zugriffsrechteinstellungen erlaubt. Clientseitig wird der jeweilige BSCW-Workspace als eine Art Serverendpunkt hinterlegt. Zusätzlich werden ein Benutzername und Passwort angegeben. Sollte der Nutzer keine Zugriffsberechtigung für bestimmte Daten in einem Workspace haben, werden ihm diese in einer Auflistung nicht angezeigt – sei es im Webinterface oder bei Anfrage über die REST-Schnittstelle. Hat der Nutzer keine Zugriffsberechtigung auf den Workspace, in dem die Daten liegen, zeigt der Server einen entsprechenden Statuscode mit zusätzlicher Information an. Diese Information ist in diesem Falle wiederum dem Nutzer z. B. am Tablet anzuzeigen.

5.4 Zusammenfassung zum digitalen Bauwerksmodell

In Kapitel 5 zum digitalen Bauwerksmodell wurden die Pflichten an das modulare Konzept im nachfolgenden Kapitel geschaffen. Hierzu wurde das ablauforganisatorische Pflichtenheft in Form von Prozessen sowie das fachliche Pflichtenheft durch die Arbeitskarten beschrieben. Aufbauend auf die im Lastenheft erstellten Arbeitskarten wurde der Prozess der klassischen Bauwerksprüfung analysiert, um einen neuen Prozess der digitalen Bauwerksprüfung mit AR-/VR-Geräten und einer zugehörigen Software-Anwendung zu entwickeln und die neuen Komponenten in den Ablauf der Bauwerksprüfung zu integrieren. Durch den Prozess der digitalen Bauwerksprüfung konnten schließlich die Arbeitskarten zur digitalen Bauwerksprüfung entwickelt werden. Die Bilder der Prozessdiagramme und die Arbeitskarten sind zusammen im interaktiven Anhang aufgeführt. Das technologische Pflichtenheft und somit die validierten Werkzeuge sind durch Anforderungsvalidierung und den Experteninterviews entstanden.

Als Ziel für die Umsetzung des nachfolgend zu entwickelnden, modularen Konzeptes ergaben sich Basis- und Leistungsanforderungen aus der Anforderungsvalidierung. Die Verortung von Schäden wird im Demonstrator mithilfe von Self-Reporting und einer SLAM-Methode hergestellt. Hierbei wird die Leistungsanforderung an den Demonstrator aufgegriffen. Um mögliche Schäden bildlich zu dokumentieren und mit dem Schadensort zu verknüpfen, wird die Bildaufnahme auch hier intern mit der Leistungsanforderung an den Demonstrator gelöst. Der Demonstrator wird hierbei auf die in der Hardware integrierte Kamera zurückgreifen können. Eine weitere Funktion, welche im modularen Konzept umgesetzt werden soll, ist eine Möglichkeit zur Vermessung. Hierzu soll eine Funktion eingebaut werden, wodurch die Nutzer des Demonstrators direkt aus der Anwendung heraus beispielsweise Schäden vermessen können. Hierbei soll auf eine möglichst hohe Genauigkeit gesetzt werden können.

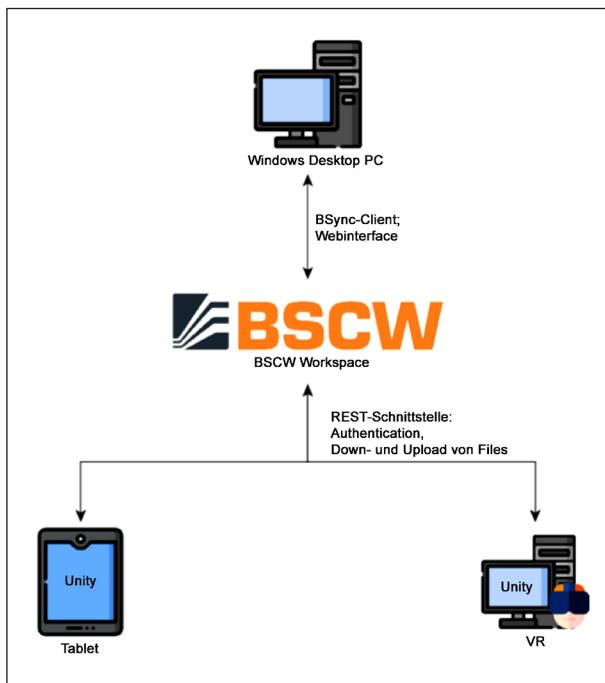


Bild 47: Workflow zur Synchronisierung mit dem CDE

Benötigte Softwarekomponenten	Funktion	Erläuterung
BSCW	CDE mit REST-Schnittstelle zum Datenaustausch	Version „social“ (Versionsnummer 7)
ggf. BSync®	Optionale, mit BSCW kompatible Synchronisationslösung z. B. für Modelldaten (außerhalb der Unity-Prototypen)	Separates Programm, Lizenz erforderlich

Tab. 20: Anforderungen an die verwendete Software

nen. Eine Schadensbeschreibung erfolgt über eine Vorauswahl. Diese Vorauswahl greift auf eine Klassifizierung nach dem Schadenskatalog für Bauwerksprüfer zurück. Hierdurch ergibt sich für den Nutzer eine vordefinierte Schadensbeschreibung ohne individuelle Festlegung. Mögliche Markierungen an Schadensstellen können im Demonstrator durch eine digitale Markierungsfunktion durchgeführt werden. Der Nutzer soll dann innerhalb des Demonstrators auf die Bildaufnahme zugreifen und hier mittels digitaler Markierungsfunktion Markierungen vornehmen. Für mögliche weitere Messdaten soll die Möglichkeit bestehen, diese manuell eingeben zu können, um somit eine lückenlose Schadensaufnahme zu gewährleisten. In einigen Fällen ist es notwendig, auf Arbeitshilfen, Normen oder anderweitige Richtlinien zurückgreifen zu können. Im Demonstrator soll hierzu die Möglichkeit bestehen, auf eine Datenbank von Dateien zurückgreifen zu können. Diese Dokumente sollen in einer Cloudlösung mit abgelegt werden.

Seitens des Workflows zur Integration der Bauwerksdaten in Unity wird die Trennung der Geometrie des 3D-Modells und der Metadaten (via .ifcxml) festgelegt. Zum Import der 3D-Modelle auch zur Laufzeit wird das Unity-Plugin TriLib verwendet. Die Verortung von Modell und Realität wird mittels hybriden Tracking in Verbindung mit Self Reporting umgesetzt, um eine möglichst hohe Genauigkeit bei gleichzeitiger Driftkorrektur zu ermöglichen. Zur Schadensverortung und virtuellen Darstellung vorhandener Schäden werden 3D-Objekte verwendet. Diese erlauben eine durchgängige Nutzererfahrung sowohl in AR als auch in VR und ermöglichen eine schnelle Groberfassung der Schadensart. Die Eingabe der Informationen, inkl. zusätzlicher Daten wie beispielsweise Bilder, erfolgt über ein erwartungskonform zu bedienendes, zweidimensionales Formular. Die Bauwerksmodelle werden auf dem BSCW-System (in Version 7 social) hinterlegt, das als CDE fungiert. Eine entsprechende Anbindung der Prototypen wird über die REST-Schnittstelle in Unity umgesetzt. Weitere Synchronisationsmöglichkeiten bestehen über BSync®; ein Zugriff auf die Daten kann außerdem über das Webinterface erfolgen.

6 Modulares Konzept

6.1 Modul 1 VR-Anwendung im Büro

Inhalt des 1. Moduls ist die Betrachtung der virtuellen Inhalte zur Bauwerksprüfung in der Vor- und Nachbereitung einer Bauwerksprüfung. Aufgrund der technischen Gegebenheiten kann die direkte, digital-gestützte Bauwerksprüfung nur mittels AR-Methoden umgesetzt werden (siehe Kapitel 2.4). In den folgenden Kapiteln soll somit die desktop-basierte Anwendung, zur Begleitung der Bauwerksprüfung mittels VR, beschrieben werden. Eine mobile VR-Anwendung findet, auf Basis der Grundlagen aus Kapitel 2.4, in diesem Forschungsprojekt keine Betrachtung.

Die hier entwickelte Anwendung wird für die Vorbereitung zur Prüfung sowie für die Auswertung und Nachbereitung der Bauwerksprüfung entwickelt. Die Anwendung ist für die windowsbasierte Desktop-Nutzung optimiert. Alternative Betriebssysteme werden, wegen fehlender Nutzeranwendung, nicht weiter betrachtet. Aufgrund der gemeinsamen Source-Code-Basis in Unity ist die Übertragbarkeit von Teilen aus Modul 1 (VR) in Modul 2 (AR) bilateral gegeben. Der Aufbau der Desktop-Anwendung wird im Kapitel „Aufbau der Anwendung“ beschrieben. Um die Architektur der Software jedoch besser zu verstehen, sind im nachfolgenden Kapitel die Betrachtungs- und Eingabesysteme untersucht und definiert worden.

6.1.1 Eingabe und Betrachtung

Grundsätzlich kann man die Impressionen einer VR Anwendung auf den Nutzer mithilfe der von Burda und Coiffet beschriebenen 3I Pyramide erfassen (BURDEA, COIFFET, 2003). Die 3I Pyramide demonstriert den Grad der Interaktion, Immersion sowie Imagination einer VR Anwendung. Idealerweise sollten alle drei Werte gleich hoch sein, praktisch ist es jedoch kaum möglich, gleichzeitig einen hohen Immersions- und einen hohen Interaktions-Grad zu erreichen.

Es werden daher zwei verschiedene Methoden zur Eingabe und Betrachtung für die Desktop-Anwendung in Erwägung gezogen: die HMD-VR und der Desktop-VR Modus. Die nachfolgenden Kapitel werden die Begriffe HMD-VR und Desktop-VR definieren, deren Funktionsweise beschreiben sowie Vor- und Nachteile auflisten. Ein grundsätzlicher Überblick über die Anwendungsfelder von

HMDs findet sich in der Studie „Head Mounted Displays in deutschen Unternehmen“ von Deloitte, Fraunhofer FIT und bitkom⁸⁵.

HMD-VR Modus

Der HMD-VR Modus bietet einen hohen Immersionsgrad und einen realistischen räumlichen Eindruck virtueller Modelle. Jedoch limitieren die Eingabegeräte die Möglichkeiten der Interaktion und bieten somit einen geringen Interaktionsgrad. Insbesondere bei unerfahrenen Nutzern ruft HMD-VR durch ungewohnte passive Bewegungen eine sog. Motion Sickness aus, besser bekannt als Kinetose oder Reisekrankheit. Die Auslöser der Effekte wurden durch die Hard- und Softwareentwicklungen der letzten Jahre reduziert, wodurch HMD-VR Anwendungen einen immer beliebteren, alternativen Betrachtungsmodus anbieten können.

Der HMD-VR Modus ermöglicht es, das Modell in einem Head Mounted Display zu betrachten und mithilfe von Controllern zu steuern. Wie in Kapitel 2 erläutert, fiel die Wahl der zu nutzenden VR-HMD Technologie auf die Produkte der HTC Vive-Reihe. Als Voraussetzungen für die Nutzung dessen sind die HTC Vive oder HTC Vive Pro HMD, zwei HTC Vive Wand Controller mit allen dazugehörigen Nutzungsequipment. Des Weiteren wird ein Gerätetreiber benötigt, der den Zugriff auf die Tracking -, Input- und Output Daten ermöglicht. Valve, ein Mitentwickler der HTC Vive, bietet die OpenVR API an, mit welcher man einen Treiber entwickeln kann. Valve bietet aber auch SteamVR an. Dabei handelt es sich um eine Anwendung, welche die OpenVR Implementierung übernimmt.

Desktop-VR Modus

Alternativ zum HMD-VR Modus ist der klassische Desktop-VR Modus vorhanden. Die Betrachtung des Modells der Brücke erfolgt dabei über den Standardbildschirm (empfohlen wird mindestens eine Full-HD Auflösung). Die Steuerung erfolgt dabei via Maus und Tastatur.

Dieser Modus bietet einen geringeren Immersionsgrad, da der räumliche Eindruck, den eine HMD ermöglicht, nicht erreicht werden kann. Jedoch besitzt

zen Maus und Tastatur einen deutlich höheren Grad der Interaktion als HMD Motion Controller. Auch ist diese Art der Steuerung für viele Nutzer vertrauter. Durch die Ego-Perspektive ist Motion Sickness zwar auch in diesem Modus möglich, allerdings aufgrund der Erhaltung der räumlichen Umgebung für den Nutzer unwahrscheinlicher.

Folglich liefern beide Methoden unterschiedliche Möglichkeiten für die digitale Unterstützung zur Vor- und Nachbereitung im Bauwerksprüfprozesses. Durch die grundsätzlich unterschiedliche Softwarearchitektur der HMD-VR und der Desktop-VR Anwendungen ist es nicht möglich, diese zusammen zu nutzen. Allerdings ist es möglich, durch eine Abfrage vor der Initialisierung der Hauptszene unterschiedliche Betrachtungs- und Eingabemodule zu initialisieren. Dies ermöglicht die maximale Abdeckung der 3I Pyramide und garantiert so die maximale Nutzbarkeit des VR-Systems.

6.1.2 Nutzung der Anwendung

Das Bild 48 zeigt die Funktions- und Entwicklungsweise der Anwendung. Nach der Öffnung der Anwendung kann der User das Bauwerksmodell auswählen. Anschließend folgt die Auswahl des Anzeigemodus (HMD-VR oder Desktop-VR; siehe Bild 49). Infolgedessen liest die Anwendung die ausge-

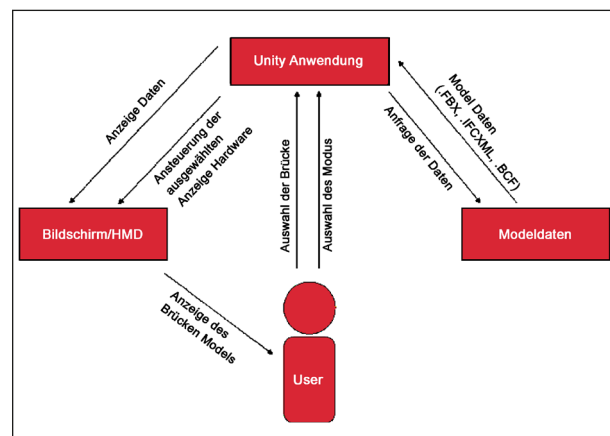


Bild 48: Übersicht der Nutzung der Anwendung aus der Sicht des Users

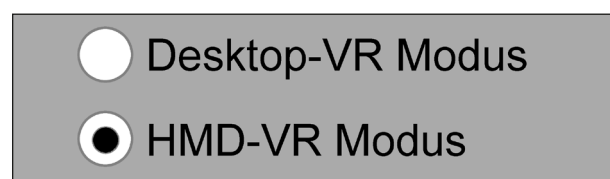


Bild 49: Auswahl des Anzeigemodus beim Start der VR-Anwendung

⁸⁵ <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/head-mounted-displays-in-deutschen-unternehmen.html>

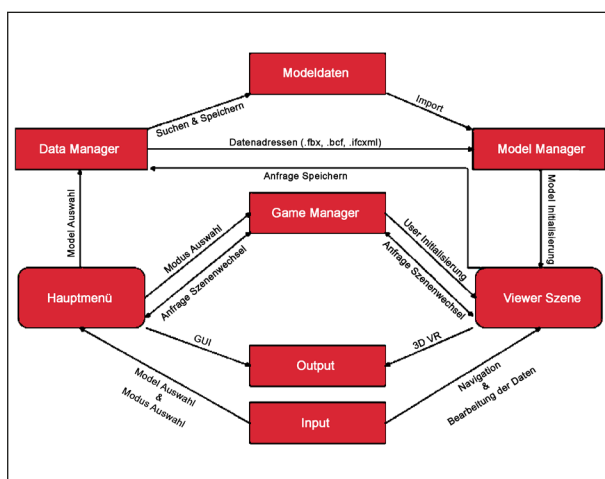


Bild 50: Übersicht des Aufbaus der Anwendung sowie der Kommunikation der Hauptklassen in der Anwendung

wählten Daten ein und zeigt das Bauwerksmodell mit den dazugehörigen Daten auf dem gewünschten Ausgabemedium an.

6.1.3 Aufbau der Anwendung

Das folgende Kapitel wird sich mit dem technischen Aufbau und der Interaktionsmöglichkeiten der Desktop-Anwendung auseinandersetzen. Die Anwendung besteht aus zwei Szenen, dem Hauptmenü und der Viewer Szene. Wie bereits im Kapitel „Eingabe und Betrachtung“ beschrieben, beinhaltet die Anwendung zwei verschiedene Modi. Das Hauptmenü dient der Auswahl des Brückenmodells und des Modus. Die Viewer Szene dient der Betrachtung und der Bearbeitung der Brückendaten.

6.1.4 Programmierklassen in Unity3D der VR-Anwendung

Manager Klassen

Die Übersicht der Programmierklassen in Unity3D der VR-Anwendung ist untenstehend beschrieben.

Bei der Initialisierung der Desktop-Anwendung werden die drei Hauptklassen initialisiert: Game Manager, Data Manager, Model Manager. Es handelt sich um Singleton-Klassen, die szenenübergreifend existieren. Diese Klassen beinhalten die wichtigsten Variablen und Funktionen und führen diese aus. Die Anwendung besitzt weitere Manager-Klassen, die jedoch eine weniger zentrale Rolle einnehmen.

Game Manager

Der Game Manager ist die zentrale Klasse der Desktop-Anwendung. Diese Klasse führt das Initialisieren des Nutzers durch, in Abhängigkeit von dem ausgewählten Modus zur Eingabe – und Betrachtung. Folglich setzen diese Klasse alle nötigen Einstellungen, um den jeweiligen Eingabe Modus in der Viewer Szenen initialisieren zu können. Diese Klasse führt auch den Szenenwechsel und das Verlassen der Anwendung aus. Diese Klasse beinhaltet Referenzen zu dem aktuellen Nutzer sowie Referenzen zum aktuellen Modus der Eingabe- und Betrachtung und zu der aktuellen Szene.

Data Manager

Die Klasse des Data Managers sucht und speichert die Adressen aller Dateien, die zu dem Modell gehören, welche der Nutzer im Hauptmenü auswählt. Ebenso übergibt die Klasse diese Daten an den Model Manager. Diese Klasse kommuniziert dem Nutzer über die Hauptmenü GUI und überprüft, ob alle Daten vorhanden sind und geladen werden können.

Model Manager

Diese Klasse übernimmt das Einlesen der Metadaten, der Schadensdaten und gibt anschließend den Befehl, das Bauwerksmodell zu laden. Die Initialisierung wird an die entsprechenden Controller übergeben, nachdem der Game Manager die Viewer Szene geladen und der Data Manager die Dateien gefunden hat.

Hauptmenü

Zur Initialisierung der Desktop Anwendung öffnet sich die erste Szene. Diese reine GUI Szene dient als Hauptmenü der Anwendung und besitzt folgende Interaktionsmöglichkeiten:

- Auswahl des Bauwerksmodells
- Auswahl des Eingabe- und Betrachtungsmodus
- Initialisierung der Hauptszene
- Möglichkeit zum Verlassen der Anwendung

Auswahl des 3D-Modells

Beim Modelauswahl-Button wird ein Datei-Explorer geöffnet, in dem nur fbx-Dateien angezeigt werden

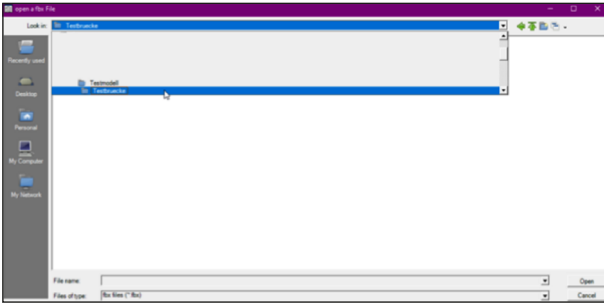


Bild 51: Screenshot der Ordnerhierarchie in BSync Client

(siehe Bild 51). Das Programm ist so gestaltet, dass nur dieses Dateiformat, anerkannt als allgemeingültiges Austauschformat im Bereich der virtuellen 3D-Modelle, zum Öffnen zulässig ist. Alle Daten sind über eine Schnittstelle mit dem BSCW-System verbunden, worin zentral für die VR- als auch für die AR-Anwendung alle Modellinformationen, BIM- und Schadensdaten hinterlegt sind. Der Austausch erfolgt über den separat vorhandenen BSync-Client. Dieser erstellt einen synchronisierten Ordner im Betriebssystem, der über den Datei-Explorer der Anwendung angesteuert werden kann.

Die Adresse der ausgewählten Datei wird an den Data Manager weitergegeben, welcher diese bearbeitet und entsprechend an den Model Manager weitergibt, um diese anschließend beim Start der Viewer Szene zu initialisieren (siehe Abschnitt Data Manager und Model Manager). Nach der Bearbeitung der Daten wird ein Feedback über das Ergebnis angezeigt.

Auswahl des Modus

Zur Auswahl des Anzeigemodus Desktop-VR Modus oder HMD-VR Modus werden die entsprechenden Eingaben an den Game Manager übergeben. Der Game Manager nutzt diese Auswahl, um den Eingabe- und Betrachtungsmodus einzustellen (siehe Abschnitt Game Manager).

Start der Viewer Szene

Nach dem Auslösen des Start-Buttons erfolgt eine Abfrage, ob eine Datei des 3D-Modells ausgewählt wurde. Falls dies der Fall ist, wird eine Anfrage an den Game Manager gesendet, der die Viewer Szene mit den richtigen Einstellungen und Parametern initialisiert.

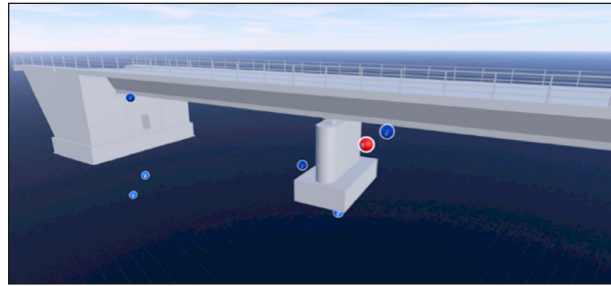


Bild 52: Viewer Szene

Viewer Szene

Die Viewer Szene beinhaltet zunächst nur das Directional Light⁸⁶, sowie das Bauwerksmodell als Platzhalterobjekt. Alle weiteren Objekte werden, in Abhängigkeit von der Nutzerauswahl im Hauptmenü, aus den im Vorfeld angelegten Objekten instanziiert. Die daraus resultierenden Objekte, die sogenannten Prefabs, werden anschließend in die Szene gesetzt. Folgende Prefabs werden in der Szene durch die Hauptmanager-Klassen platziert:

- User Prefabs
- Viewer Szene UI
- Model und Marker

User Prefabs

Bedingt durch die zwei zuvor beschriebenen Methoden zur Betrachtung und Interaktion in VR, welche zwei vollkommen verschiedene Eingabeinterpretation erfordern, existieren ebenso zwei vordefinierte User Prefabs: der HMD-VR User und der Desktop-VR User. Wie im Abschnitt Game Manager beschrieben übernimmt dieser die Differenzierung bei der Instanziierung. Der Game Manager setzt zwar alle globalen Einstellungen, um die Anwendung auf der verschiedenen Ein- und Ausgabemodi vorzubereiten, jedoch ist es an der Stelle sinnvoll, dass diese Prefabs im Vorfeld mit bestimmten Klassen, die entweder durch User Eingabe oder durch Anfragen anderer Objekte bestimmte Befehle aus-

⁸⁶ Mit „Directional Light“ wird in Unity eine mögliche Form der Beleuchtung bezeichnet, die ebenfalls als sogenanntes „Game Object“, also als virtuelles Objekt in der Szene vorhanden ist.

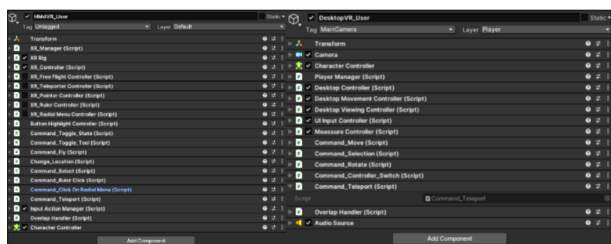


Bild 53: Vergleich des Aufbaus der User Prefabs

führen, den sog. Controller Modulen angelegt werden. Dieses Vorgehen verringert den programmier-technischen Aufwand, weil die Controller Module an das jeweilige Eingabegerät angepasst und für diese optimiert sind. Jedes Controller Modul ist spezifisch und kontrolliert nur ein bestimmtes Verhalten. Dieser Aufbau bietet Vorteile für die Entwicklung der Anwendung, da zum einen auf diese Art einfache zusätzliche Funktionsweisen und Verhalten einzubetten sind, aber auch die Möglichkeit besteht, bestimmte Module zwischen den beiden Prefabs zu teilen.

Zudem ist es möglich, einzelne Module während der Laufzeit programmatisch ein- und auszuschalten. Die einzelnen Module werden in den Kapiteln Betrachtung des Bauwerks in 3D-Raum und Hilfetools genauer beschrieben.

Viewer Szene UI

Der folgende Abschnitt wird sich nur mit dem Aufbau des User Interface (nachfolgend kurz: UI) beschäftigen. Die Interaktionen und Funktionalität werden in den Kapiteln Teleportation mithilfe eines Menüs und Hilfstool beschrieben. Das UI stellt durch verschiedene Möglichkeiten zur Ein- und Ausgabe unterschiedliche Anforderungen an das technische und visuelle Design. Grundsätzlich sollen bspw. die UI-Elemente in HMD-VR nicht an die virtuelle Kamera gebunden werden, sondern in der Umgebung als ein statischer Canvas⁸⁷ platziert oder an ein interaktives Objekt gebunden sein. Bei Desktop-VR können die UI-Elemente als klassisches HUD⁸⁸-Overlay genutzt werden.

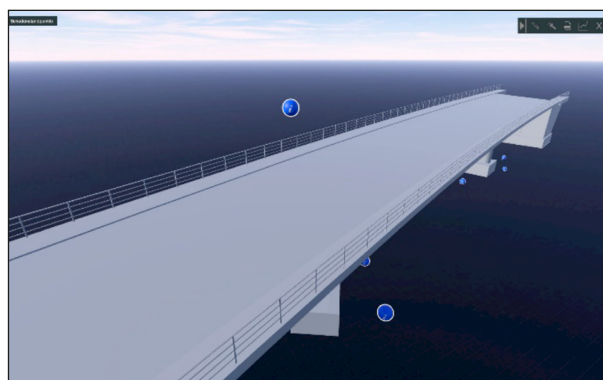


Bild 54: Desktop-VR Ansicht mit HUD-Overlay

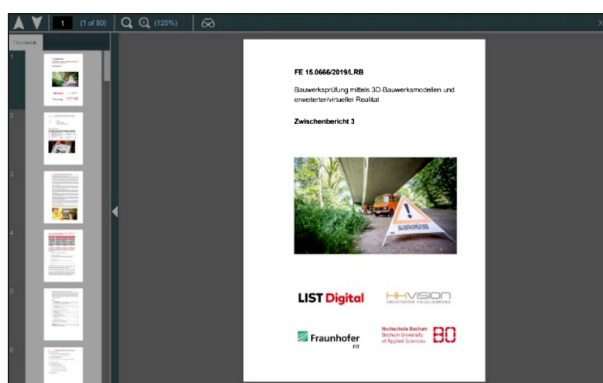


Bild 55: PDF-Viewer im Desktop-VR Modus

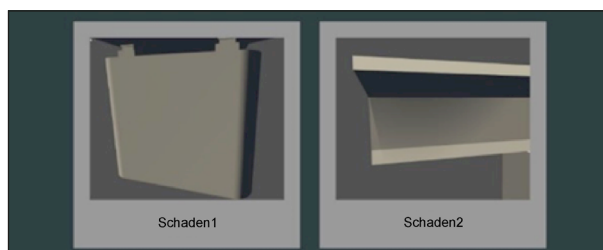


Bild 56: Listendarstellung der verzeichneten Schäden

Durch die Nutzung des Buttons PDF im oberen Bildschirmrand (Bild 54) wird das allgemeine Desktop-Browsermenü aufgerufen, woraus alle hinterlegten PDF-Dokumente aufgerufen werden können. Der Bezug der hinterlegten Dokumente führt auf einen zentralen Ordner im BSCW-Verzeichnis zum Bauwerksmodell. Die Anzeige erfolgt dabei mittels PDF-Viewer, welcher sowohl in der HMD-VR als auch in der Desktop-VR zur Verfügung steht (Bild 55).

In Bild 54 ist zudem in der unteren rechten Ecke ein Button hinterlegt, welcher die verzeichneten Schäden eines Bauwerks mittels Listendarstellung übersichtlich wiedergibt (Bild 56).

⁸⁷ „Canvas“ definiert einen rechteckigen Bereich, in dem grafische Darstellungen angezeigt werden können.

⁸⁸ „HUD“ – Head Up Display: eine virtuell gerenderte Anzeige/ Eingabeelement innerhalb des virtuellen Displays.

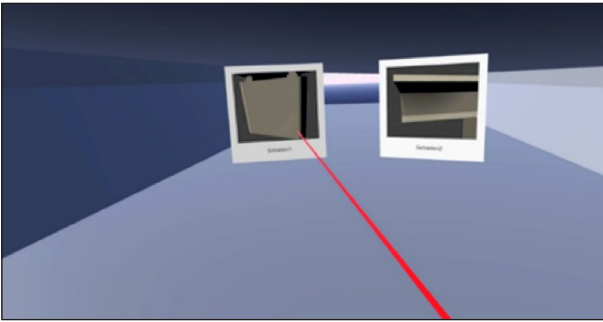


Bild 57: Schadenskarten im HMD-VR Modus



Bild 58: PDF-Viewer im HMD-VR Modus

Beide zuvor beschriebenen visuellen Anzeigen basieren in der Darstellung auf der Desktop-VR Methode. Die Funktionalität lässt sich ebenfalls auf den Modus der HMD-VR übertragen. Allerdings muss die Anzeigemethode an dieser Stelle für den HMD-VR kompatibel gestaltet werden.

Wie in Bild 57 zu sehen ist, werden die Schäden mittels Bildauszügen angezeigt und können mit dem Motion Controller für die weiteren Interaktionen ausgewählt werden.

Die einzelnen Schadenskarten hängen statisch vor dem Nutzer. Der Nutzer kann sich im Raum frei zu den Elementen bewegen.

Der PDF-Viewer wurde nach dem gleichen Prinzip, als hängendes Element, in das HMD-VR eingebettet.

Wie bereits beschrieben ist im HMD-VR die Eingabe durch die Motion Controller limitiert. Frei belegbare Interaktionsfelder sind dabei nur 4 Buttons, 2 Trigger und 2 Touchpads. Hierzu ist es notwendig, bei komplexeren Anwendungen die Eingabemöglichkeiten vollkommen und sinnvoll auszuschöpfen. Ein praktikabler Weg ist die Nutzung der Touchpads auf den Motion Controllern, welche durch den Daumen des Betrachters zu erreichen sind. Hier wurde ein radiales Menü entwickelt, welches am rechten Motion Controller verankert ist und die Hilfstools in HMD-VR Modus beinhaltet.

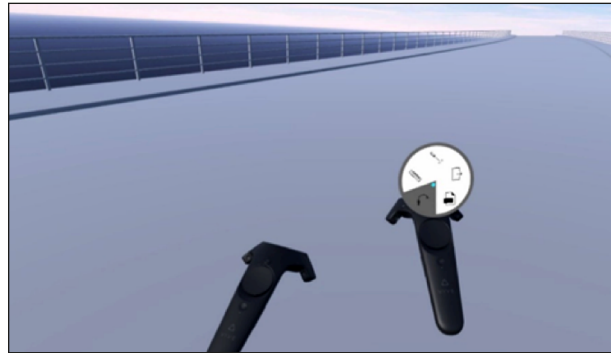


Bild 59: Radiales Menü innerhalb der HMD-VR auf dem Motion Controller

Das radiale Menü (siehe Bild 59) ist für diese HMD-VR Nutzung entwickelt und wird mithilfe des rechten Touchpads navigiert. Das Menü ermöglicht dem Nutzer ein Hilfstool auszuwählen oder zum Hauptmenü zurückzukehren.

Bauwerksmodell Prefab

Ein weiteres Prefab, welches bei Initialisierung instanziiert wird, ist das Bauwerksmodell-Prefab. Der Model Controller dieses Prefabs bekommt die Modelldaten von dem Model Manager, liest die Geometrie und Metadaten des Bauwerks ein und übergibt den Befehl zur Instanziierung der Info- und Schadensmarker. Um die Geometrie während der Laufzeit einzulesen, wurde das TriLib Plugin genutzt.

Anschließend erfolgt die automatisierte Einbindung der Info- und Schadensmarker im virtuellen Raum. Die Infomarker werden entsprechend neben den dazugehörigen Bauwerkselementen platziert. Die Schadensmarker werden entsprechend den Schadenskoordinaten platziert. Jeder Marker beinhaltet ein grafisches Element, welches die Bearbeitung und Betrachtung der Daten ermöglicht. Bei den Schadensmarkern wird außerdem eine Bildaufnahme des Schadens, falls vorhanden, eingelesen und bereitgestellt. Die Aufnahme sowie die Platzierung der Schäden erfolgt im Kapitel 3.1.2. Die angehefteten Informationen werden aus den BIM-Informationen aus dem Arbeitspaket 2 übergeben und ins Modell automatisiert eingebunden.

6.1.5 Betrachtung des Bauwerks im 3D-Raum

Die 3D-Geometrie und die Marker werden auf gleiche Weise für den Desktop-VR und HMD-VR Modus in die Viewer Szene eingeladen. Da die Eingabe

begeräte sich jedoch völlig unterscheiden, ist die Navigation in 3D-Raum an sich unterschiedlich.

Desktop-VR

Bei Betrachtung der Brücke in Desktop-VR navigiert der User über die folgende Eingabe durch die Szene:

- Umschauen:
 - rechte Maustaste und Bewegung der Maus
- Bewegung:
 - rechte Maustaste & Pfeiltasten
 - rechte Maustaste & folgende Tastatureingabe:
 - W – Vorwärtsbewegung
 - A – Bewegung nach links
 - S – Rückwärtsbewegung
 - D – Bewegung nach rechts
- Auf- und Abwärtsbewegung:
 - rechte Maustaste & folgende Tastatureingabe:
 - Bild Hoch/Q – Bewegung nach oben
 - Bild Unten/E – Bewegung nach unten

Sobald die rechte Maustaste nicht gedrückt wird, erscheint der Mauszeiger im Bild. So wird die Interaktion mit den Markern und dem UI ermöglicht.

Diese klassische Konfiguration der Steuerung ist weit verbreitet, um sich innerhalb eines 3D-Raums mithilfe von Maus und Tastatur zu bewegen.

HMD-VR

Bei Betrachtung des Bauwerks mittels HMD-VR gibt es mehrere Möglichkeiten für den Nutzer, sich im 3D-Raum zu navigieren. Die erste Möglichkeit wird über die eigentliche Körper- und Kopfbewegung des Nutzers umgesetzt. Die Erfassung der Position erfolgt dabei durch die in Bild 60 gezeigte räumliche Triangulation zwischen den Base Stationen im realen Raum und der Position des Nutzers. Dies ist eine natürliche und stark immersive Art und Weise, sich im 3D-Raum zu bewegen. Die Navigation ist allerdings durch das Tracking der Base Station und das reale Umfeld des Users eingeschränkt (max. 5 m x 5 m Nutzungsraum).

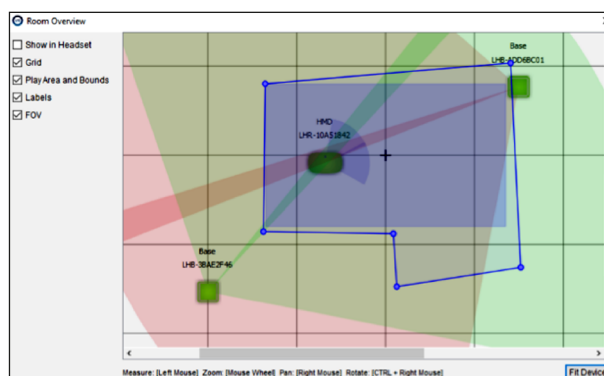


Bild 60: Grafik einer typischen Raum-Triangulation (Foto: Screenshot aus einem VR-Programm)

Die zweite Navigationsweise in HMD-VR wird durch das Teleportieren ermöglicht. Dabei wird mithilfe eines Motion Controllers ein gewünschter Zielstandort ausgewählt und der Nutzer teleportiert dorthin. Dies stellt eine nutzerfreundliche Lösung dar, um weite Distanzen auf begrenzten Raum auszuführen. Jedoch können auf diese Art und Weise nur sichtbare Standorte angesteuert werden. In der vorliegenden Anwendung kann der Nutzer den Teleportationsmodus durch Betätigen des rechten Touchpad Buttons aktivieren. Hier erscheint dadurch ein Auswahlbogen mit entsprechendem Zielpunkt, wodurch beim Lösen des Buttons der Nutzer zum Zielpunkt teleportiert wird.

Die letzte Navigationsweise in HMD-VR ist der Freiflug-Modus. Beim Aktivieren dieses Modus kann der Nutzer sich frei im 3D-Raum bewegen. Diese Navigationsweise ist komplett uneingeschränkt, jedoch steigt dabei die Wahrscheinlichkeit der Motion Sickness enorm.

Diese Art der Navigation basiert auf der gleichen funktionsweise wie Desktop-VR. Daher ist der Code, der es dem User ermöglicht sich frei zu bewegen, der gleiche. Lediglich die Controller Klasse ändert sich.

Teleportation mithilfe eines Menüs

Zusätzlich zu den obengenannten Navigationsmöglichkeiten besteht noch die Möglichkeit eines weiteren räumlichen Teleportationsmodus. Unabhängig von dem Eingabemodus können die angelegten Schäden als Teleportziele genutzt werden. Dafür können die Nutzer die Kartenübersicht, welche im Kapitel Viewer Szene UI beschrieben wurden, nutzen. Hierbei werden alle Schäden, die in der BCF Datei angelegt wurden (siehe Kapitel 3.1.2), in einer

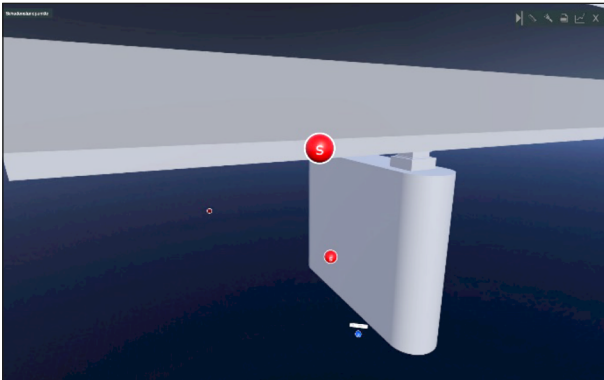


Bild 61: Screenshot nach der Interaktion mit der Schadenskarte in Bild 16

Übersicht mit jeweils einer Bildaufnahme und dem Namen des Schadens dargestellt. Um mit dem Menü zu interagieren, wird bei HMD-VR ein Laser Pointer als 3D-Maus und bei Desktop-VR der Mauszeiger genutzt.

Beim Anklicken des Schadens wird der User zu dem gewünschten Schadenspunkt, wie in Bild 61 exemplarisch aufgezeigt, hin teleportiert.

6.1.6 Hilfstools

Wie im Kapitel 4 beschrieben sind nach dem Kano-Modell eine Vielzahl an Hilfstools in der Anwendung einer Bauwerksprüfung hilfreich. Hierzu sind für die Nutzung, sowohl für den VR- als auch für den AR-Bereich, Methoden entwickelt worden, welche die Funktionalität sicherstellen sollen. In den nachfolgenden Punkten sind die Hilfstools in Ihrem Aufbau und Funktionalität genauer beschrieben.

Laser Pointer

Der Laser Pointer ist das Äquivalent zum klassischen Mauszeiger innerhalb der HMD-VR, da der 2D-Mauszeiger im 3D-Raum in bekannter Weise nicht dargestellt werden kann. Mithilfe von diesem Tool erfolgt die Interaktion und Auswahl im virtuellen 3D-Raum mittels HMD. Dabei wird ein Laserstrahl aus dem rechten Controller simuliert, welcher im Endpunkt des Lasers die Funktionen eines Mauszeigers besitzt; im klassischen Fall „auswählen und anklicken“. So wurde im HMD-VR der Mausklick durch den Trigger auf dem rechten Controller ersetzt.

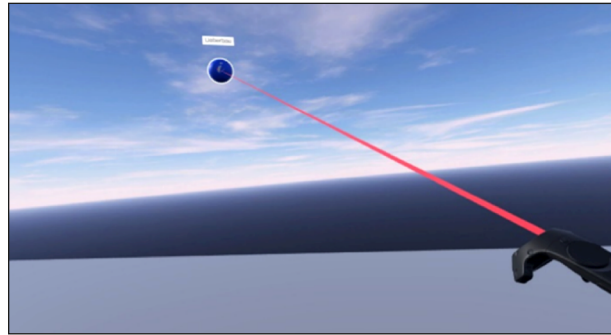


Bild 62: Laser Pointer Tools in der HMD-VR



Bild 63: Messtools in Desktop-VR

Messtool

VR vermittelt zwar eine realitätsnahe Tiefenwahrnehmung, jedoch ist es oft sinnvoll, eine Größenreferenz zu haben. Daher wurde ein Messtool entwickelt, um diese Referenz zu ermöglichen. Vor allem bei Desktop-VR kann dies die Interpretation des 3D-Modells erleichtern. Dieses Tool ist sowohl im Desktop-VR als auch im HMD-VR verfügbar, wird aber auf unterschiedliche Art und Weise angewendet.

Beim Betätigen des Lineal-Buttons in Desktop-VR besteht die Möglichkeit, das Bauwerksmodell durch das Anklicken zweier Punkte zu vermessen, wodurch jeder Klick durch eine blaue Kugel symbolisiert wird. Beim zweiten Klick wird ein Lineal-Objekt zwischen den Punkten generiert und der Abstand der beiden Punkte angezeigt. Das Lineal-Objekt verschwindet entweder beim dritten Klick oder beim erneuten Betätigen des Lineal-Buttons.

Bei HMD-VR wird die gleiche Funktionalität angeboten, jedoch wird das Tool erst aktiviert, wenn der Nutzer im radialen Menü (siehe Abschnitt Viewer Szene UI) dieses auswählt. Mithilfe eines weiteren Laser Pointers werden die Messpunkte festgelegt. Nach der zweiten Punktauswahl wird ebenfalls ein Lineal-Objekt generiert und der Abstand angezeigt.



Bild 64: Messtools in HMD-VR

Das Lineal-Objekt verschwindet, ähnlich wie im Desktop-VR Modus, beim dritten Klick und bei der Auswahl eines anderen Tools im radialen Menü.

PDF-Viewer

Um die Vorbereitung und Nachbereitung der Bauwerksprüfung zu unterstützen, wurde ein PDF-Viewer implementiert. Unity unterstützt nativ keine PDF-Dateien, deshalb wurde das Einlesen dieser mithilfe des Plugins PDFRenderer ermöglicht.

Dieses Hilfstool wurde sowohl im Desktop-VR als auch im HMD-VR integriert. In Desktop-VR wird der Viewer per UI Button und in HMD-VR durch das radiale Menü geöffnet (siehe Abschnitt Viewer Szene UI). Bevor der Viewer die PDF-Datei anzeigt, öffnet sich, ähnlich wie im Abschnitt Auswahl des Models, ein Datei Explorer, um die gewünschte PDF-Datei zu finden.

Der PDF-Viewer bietet dem User folgende Funktionalitäten:

- Seitenwechsel
- Seitenauswahl
- Zoom
- Suchen
- Verlassen des Menüs

6.1.7 Betrachtung der Modelldaten

BIM- und Schadensdaten werden mithilfe von vereinfachten Markern in der Szene dargestellt und mit ihren jeweiligen, spezifischen Informationen gefüllt. Dabei handelt es sich um blaue Kugeln mit einer weißen Umrandung und mit jeweils einem „i“ für BIM-Daten und rote Kugeln mit einem „S“ für Schadensdaten (siehe Bild 65). Aufgrund mehrschichtiger und großdimensionierter Bauteile konnte durch die Darstellung der Kugeln neben den betreffenden Elementen gegenüber einer direkten Verortung am

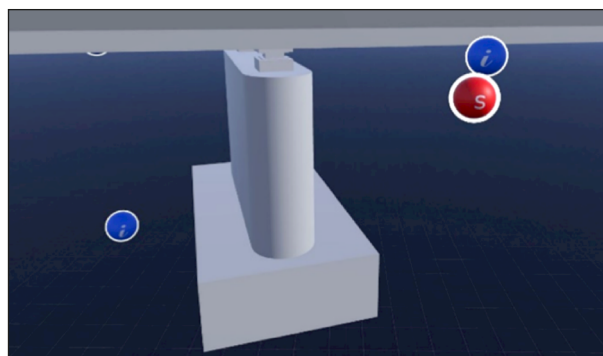


Bild 65: Vergleich der beiden Marker

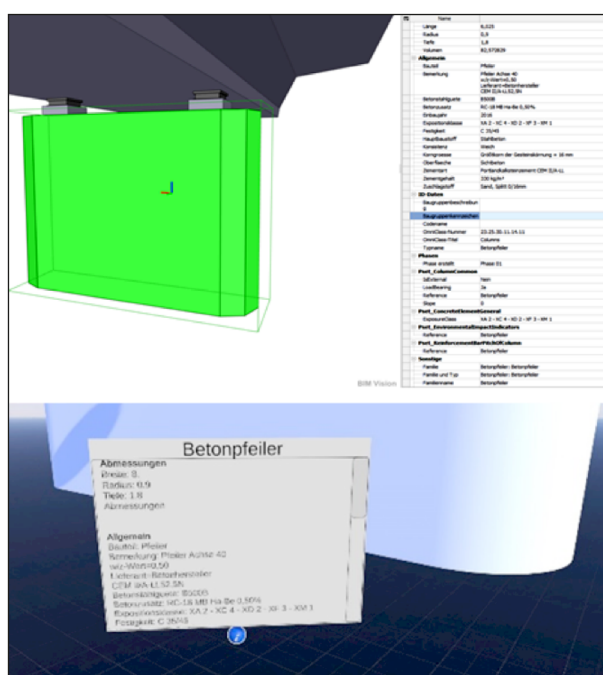


Bild 66: BIM-Daten aus dem nativen CAD-Programm (links) und die dazugehörige Information der BIM-Daten innerhalb der Desktop-VR/HMD-VR Anwendung (rechts)

Bauwerkselement sichergestellt werden, dass immer alle Informationen und Schäden sichtbar sind.

Jeder Marker hat ein eigenes UI-Objekt, welches für den Nutzer zunächst ausgeblendet ist. Bei Interaktion mit dem Marker durch den Laser Pointer im HMD-VR oder Mausklick bei Desktop-VR wird dieses UI-Objekt eingeblendet.

BIM-Marker

Jeder BIM-Marker wird neben dem dazugehörigen Bauteil platziert. Bei der Auswahl des BIM-Markers wird das zugehörige Bauteil im 3D-Fenster farblich hervorgehoben. Das UI-Objekt bekommt von dem

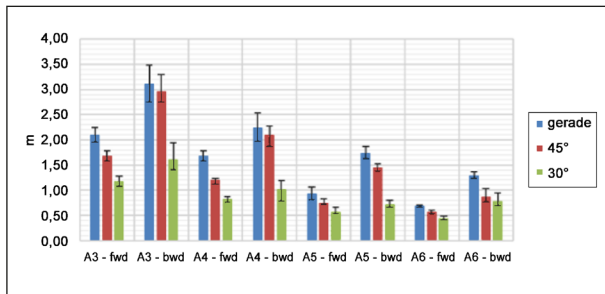


Bild 71: Ergebnis der Markermessung für ARKit (Apple iPad Pro 2019) mit Raumbelichtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).

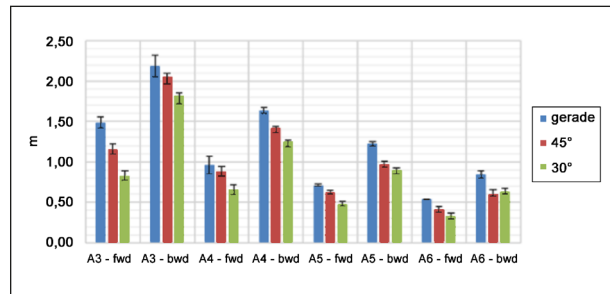


Bild 73: Ergebnis der Markermessung für ARCore (Samsung Galaxy Tab S3) mit Raumbelichtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).

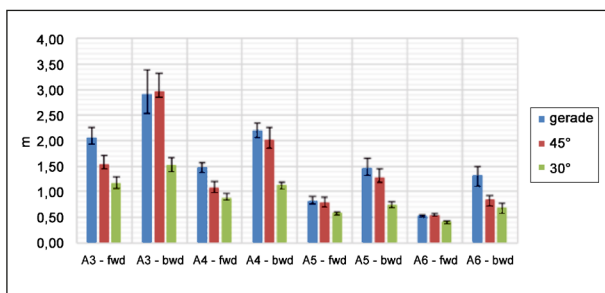


Bild 72: Ergebnis der Markermessung für ARKit (Apple iPad Pro 2019) ohne Raumbelichtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).

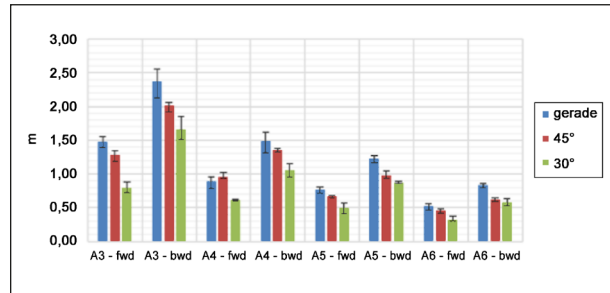


Bild 74: Ergebnis der Markermessung für ARCore (Samsung Galaxy Tab S3) ohne Raumbelichtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).

rer Tendenz übertragbar sind. Jede Messung wurde jeweils fünfmal durchgeführt. Variiert wurden die Lichtbedingungen: zum einen normale Büroraumbelichtung, zum anderen ausgeschalteter Raumbelichtung. Die Jalousien des Büros waren dabei während der gesamten Messung geschlossen, um Einflüsse durch Sonneneinstrahlung und Tageslicht zu minimieren. Gleichwohl hält die heruntergelassene Jalousie das Tageslicht nicht vollständig ab, weshalb bei ausgeschalteter Beleuchtung von einer dämmerigen Umgebung gesprochen werden kann. Eine genaue Lichtmessung wurde jedoch nicht vorgenommen.

Neben der Beleuchtung wurde die Markergröße variiert, wobei folgende Größen verwendet wurden: DIN-A3, -A4, -A5 und -A6.

Die durchschnittlichen Ergebnisse sind in den Diagrammen in Bild 71 bis Bild 74 dargestellt.

Aus den oben gezeigten Ergebnissen lässt sich erwartungskonform bereits klar ablesen, dass größere Marker tendenziell auf größere Entfernungen getrackt werden können als kleine. Diese Aussage ist erwartet worden, da größere Bilder algorithmisch schneller im Kamerabild identifiziert werden können als kleine. Im Vergleich zwischen ARKit und ARCo-

re zeigt sich, dass das Tracking mit ARKit präziser ist, weil es grundsätzlich größere Distanzen ermöglicht (vgl. Differenzen der Durchschnittswerte in Bild 75 und Bild 76). Lediglich bei der Rückwärtsbewegung kommt es unter einem 30°-Winkel bei eingeschalteter Raumbelichtung mit DIN-A3-, -A4- und -A5-Marker und bei ausgeschalteter Raumbelichtung bei DIN-A3- und -A5-Markern zu einer geringfügigen negativen Abweichung von durchschnittlich rund 0,2 m.

Aus obigen Resultaten lassen sich zwei wichtige Schlüsse für unseren Demonstrator ziehen:

1. Eine Markergröße von DIN-A4 bzw. -A5 sollte für den Demonstrator ausreichend sein. Zur Validierung sollte aber natürlich ein entsprechender kurzer Test vor Ort erfolgen.
2. Bei einem Betrieb der Anwendung mit Scheinwerfern oder vorhandener Beleuchtung innerhalb des Hohlkastens sollte das Tracking der Marker kein Problem darstellen, leicht dämmerige Beleuchtungssituation stellen das Tracking nicht vor besondere Herausforderungen. Auch für diese Hypothese ist eine Validierung im Rahmen eines Kurztests vor Ort angebracht.

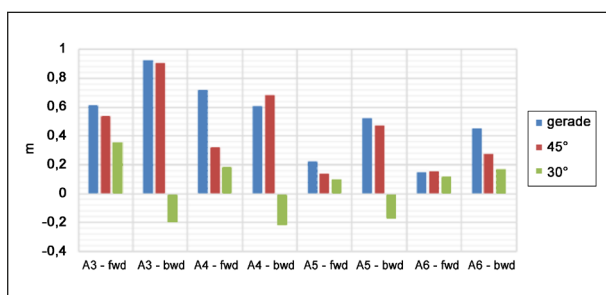


Bild 75: Durchschnittliche Tracking-Differenz zwischen ARKit und ARCore (ARKit „minus“ ARCore) bei eingeschalteter Raumbelichtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).

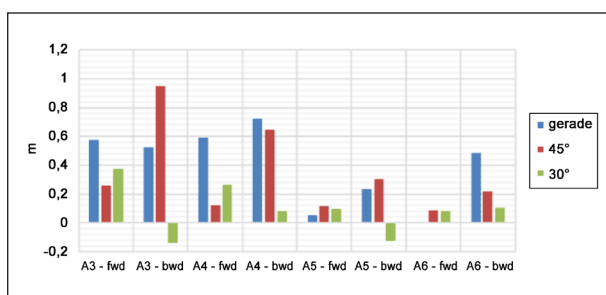


Bild 76: Durchschnittliche Tracking-Differenz zwischen ARKit und ARCore (ARKit „minus“ ARCore) bei ausgeschalteter Raumbelichtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).

Von diesen Vorbetrachtungen zum bildbasierten Tracking, wie es u. a. im Demonstrator verwendet werden soll (vgl. Abschnitt Verortung von Modell und Realität), kommen wir nun zum Aufbau der Anwendung.

6.2.3 Aufbau der Anwendung

Innerhalb der Anwendung vor Ort gibt es drei Modi: Den AR-Modus, den Model View Modus und den Demo Modus, wie in Bild 77 schematisch dargestellt.

Unabhängig von dieser Aufteilung in unterschiedliche Modi wurde die Anwendung technisch in entsprechende Unity-Szenen gegliedert. Pro Modus gibt es eine eigene Szene und das Start-Menü wird ebenfalls in einer eigenen Szene umgesetzt. Dies ist ein Unterschied zur Desktop-Anwendung im Büro, wo es nur zwei Szenen – Start-Menü und Viewer Szene – gibt (vgl. Kapitel 6.1).

Jede Szene erfüllt dabei jeweils einen Zweck: Der AR-Modus ist der Modus zur Prüfung vor Ort und beinhaltet das Marker-Tracking in Kombination mit

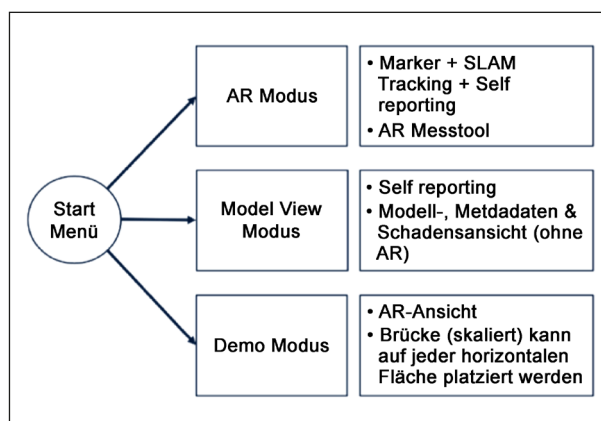


Bild 77: Modi der mobilen Anwendung vor Ort



Bild 78: Ablauf der einzelnen Schritte für das Start-Menü

SLAM; Der Model-View-Modus ist dazu gedacht, eine Ansicht des 3D-Modells ohne AR Ansicht zu liefern. Die Navigation erfolgt dabei über Buttons (eine Art Fliegen durch das Modell) und Self-Reporting; Im Demo-Modus wird das Modell skaliert auf einer horizontalen Fläche platziert und in einer AR-Ansicht angezeigt.

Das Start-Menü soll grundsätzlich die in Bild 78 dargestellten Schritte abdecken. Dabei obliegt dieser Szene neben dem Speichern der BSCW-URL und der korrespondierenden Nutzerdaten auch die Abfrage der auf dem Server liegenden Modelle und die Synchronisierung zwischen lokal heruntergeladenen und ggf. auf dem Server veränderten Daten. Abschließend wird dann eine entsprechende Szene aufgerufen, der dann der Name des ausgewählten Modells übergeben wird. Genauer zur Datenstruktur und zum Mechanismus der Synchronisierung wird im Kapitel Synchronisierung beleuchtet.

Dem iterativen Vorgehen bei der Entwicklung der Anwendung folgend wurde für das Start-Menü zunächst ein Mockup (also eine Art klickbarer Prototyp in einer externen Anwendung) erstellt, bevor die Umsetzung in Unity erfolgte. Dazu wurde das Tool „Moqups“⁸⁹ verwendet. Für den initialen Login-

⁸⁹ <https://moqups.com/>

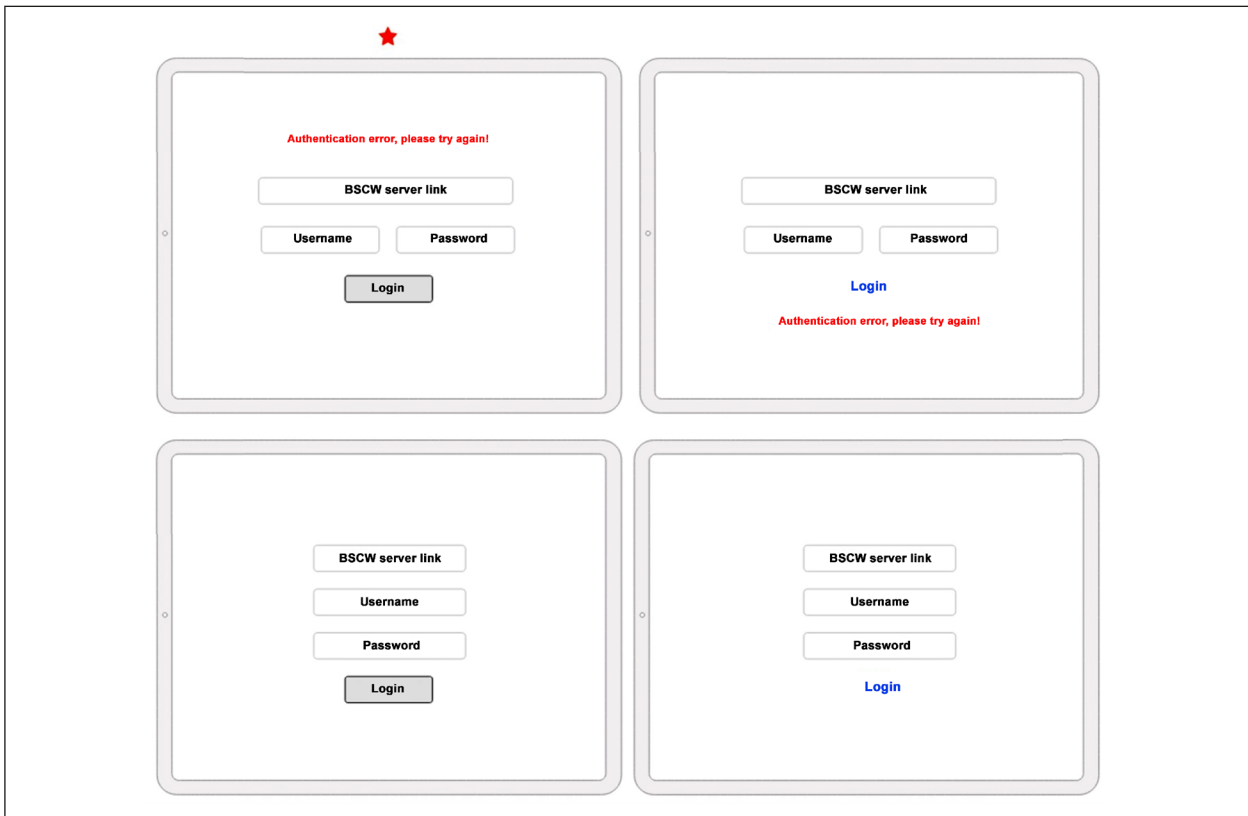


Bild 79: Mockup des initialen Bildschirms zur Eingabe von BSCW-URL, Nutzernamen und Passwort. Die favorisierte und dieser Form ähnliche Ansicht ist mit einem roten Stern markiert.

Screen wurden dabei die in Bild 79 sichtbaren Layouts erstellt, wobei die Ansicht oben links (mit einem roten Stern markiert) nach einer kurzen Diskussion unter den Projektbeteiligten umgesetzt wurde. Jedoch wurde auch ein Element des Bildschirms oben links übernommen: Ist ein Login mit den angegebenen Nutzerdaten nicht möglich, so soll der Nutzer am Interface hierüber eine kurze Information („Authentication error, please try again!“) angezeigt bekommen.

Im Falle einer fehlenden Internetverbindung soll der Nutzer darauf hingewiesen werden, da dann keine Daten-Synchronisierung mit dem Server erfolgen kann. Dennoch soll es dem Nutzer möglich sein, weiter in das Start-Menü zu gelangen und dann mit den lokalen – z. B. bereits zu einem früheren Zeitpunkt heruntergeladenen – Daten zu arbeiten. Dieser Hinweis ist in verschiedenen Varianten in Bild 80 zu sehen. Die dabei favorisierte Variante, an der sich bei der Umsetzung orientiert wurde (Bild 80 oben links) ist wiederum mit einem roten Stern gekennzeichnet.

Nun zum eigentlichen Bildschirm des Start-Menüs: Hauptkomponenten sind hierbei eine scrollbare Lis-

te, die die Modelle sowohl lokal als auch auf dem Server beinhaltet. Wie in Bild 81 und Bild 82 zu sehen, ist es dabei möglich, die Liste je nach aktuellem Status (nur auf dem Server oder auch lokal gespeichert) zu separieren, oder eine gemeinsame Liste zu führen. In letzterem Fall wäre dann eine Markierung der Modelle angebracht, um dem Nutzer eine Einschätzung durch ein visuelles Unterscheidungsmerkmal zu ermöglichen. Jedoch ist die erste Variante mit einer separierten Liste leichter für einen Nutzer zu erlernen und ermöglicht dem Nutzer eine schnellere – weil sortierte – Übersicht. Zudem können dem Nutzer weitere Informationen wie zugehörige BSCW-URL und Zeitstempel der letzten Synchronisierung leichter angezeigt werden. Aus diesen Gründen wurde diese Variante präferiert. Die Synchronisierung der Daten erfolgt automatisch im Hintergrund beim Laden des Start-Menüs. Jedoch soll es auch – insbesondere im frühen Entwicklungsstadium der Anwendung – möglich sein, eine Synchronisierung manuell zu starten. Dies kann auch dann hilfreich sein, wenn beispielsweise die Internetverbindung unterbrochen war und wiederhergestellt wurde. Darüber hinaus sollte der Anwender die Möglichkeit haben, seine hinterlegten

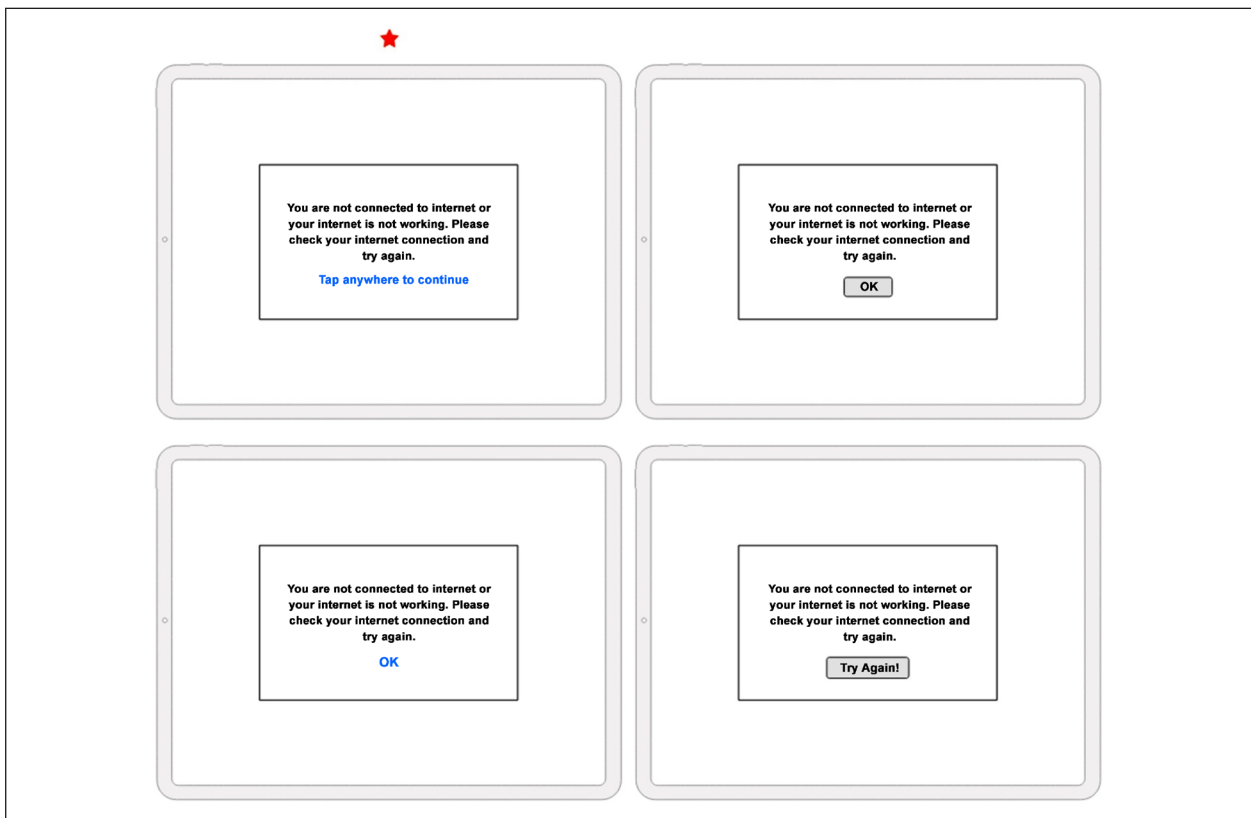


Bild 80: Mockup des Bildschirms im Falle einer fehlenden Internetverbindung. Die favorisierte und dieser Form ähnliche Ansicht ist mit einem roten Stern markiert.



Bild 81: Mockup der favorisierten Variante des Start-Menüs inkl. Modell-Auswahl

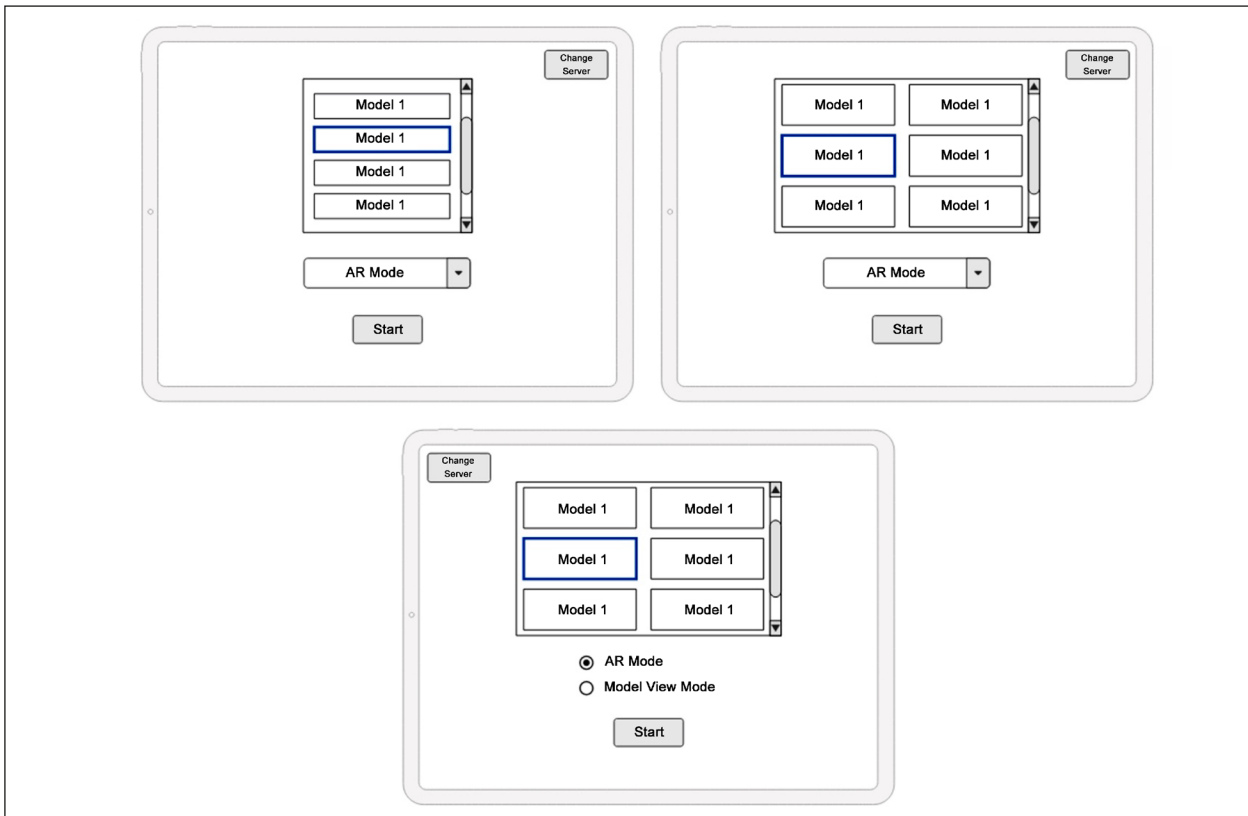


Bild 82: Weitere Mockup-Alternativen zum Start-Menü

Nutzerdaten oder die BSCW-URL anzupassen. Insbesondere in möglichen Szenarien, in denen ein Nutzer mit verschiedenen BSCW-Installationen arbeitet, ist diese Funktionalität hilfreich. Dabei muss aus Datenperspektive nachgehalten werden, welches Modell mit welchem Server synchronisiert werden soll. Dazu wird für den Prototypen eine JSON-Datei im persistenten Speicher⁹⁰ der Anwendung hinterlegt.

Unterhalb der scrollbaren Liste zur Modellauswahl befindet sich eine Modusauswahl und ein Start-Button. Die Auswahl des Modus kann mittels Radio-Buttons oder mit einem Dropdown-Menü erfolgen, wie in Bild 81 und Bild 82 zu sehen. Während zur

Zeit der Mockup-Erstellung noch von zwei Modi (AR-Modus und Model-View-Modus) ausgegangen wurde, ergab sich jedoch in der nächsten Iteration, dass drei Modi (zusätzlich noch der Demo-Modus) berücksichtigt und auswählbar sein sollen. Daher wurde die zunächst favorisierte Radio-Button-Lösung zugunsten des Dropdowns ersetzt, denn ein Dropdown erlaubt mehr Einträge bei geringerem Platzverbrauch im User Interface (UI), wodurch die Darstellung übersichtlicher wird. Bild 83 und Bild 84 zeigen die umgesetzten Login- bzw. Start-Menü-Ansichten.

Zunächst wird das „custom_config_file“ eingelesen, sofern die JSON-Datei existiert. Andernfalls wird mithilfe der Methode „writeCustomConfigFile()“ eine neue Datei angelegt. Das Passwort wird in der Datei nicht im Klartext gespeichert. Zwar wird hier für den Prototyp nicht auf ein komplexes kryptografisches Verfahren zurückgegriffen, jedoch wird der Wert als base64 komprimiert. Zusammen mit den oben erwähnten beschränkten Zugriffsrechten auf den Speicherort der Daten im persistenten Speicher wird die Sicherheit als ausreichend für den vorliegenden Prototyp erachtet. Sind alle Daten eingeladen, so wird zuletzt das Login-Menü initialisiert,

⁹⁰ Unity unterscheidet zwischen verschiedenen Speicherarten, auf die die Anwendung zugreifen kann. Eine davon ist der sogenannte „persistente Speicher“, der jederzeit auch nach Beenden und Neustart der Anwendung zugreifbar ist und dabei den letzten Status beibehält (siehe auch <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Application-persistentDataPath.html>). Der Nutzer kann unter iOS durch Mechanismen des Betriebssystems nicht ohne weiteres darauf zugreifen. Ebenso ist es anderen Anwendungen nicht möglich, den Speicher auszulesen oder zu verändern.



Bild 83: Screenshot des umgesetzten Login-Screens auf dem iPad

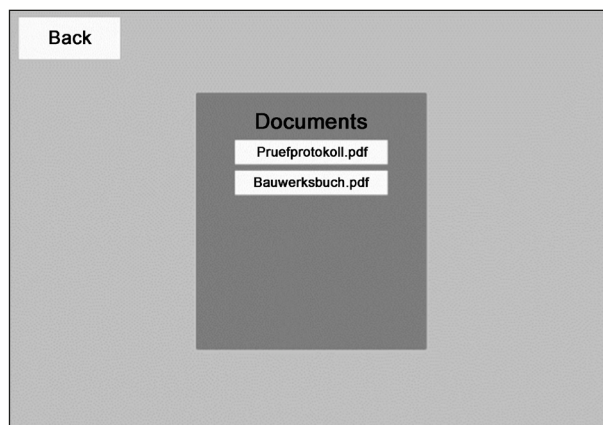


Bild 85: Screenshot des Menüs zur Dateiauswahl

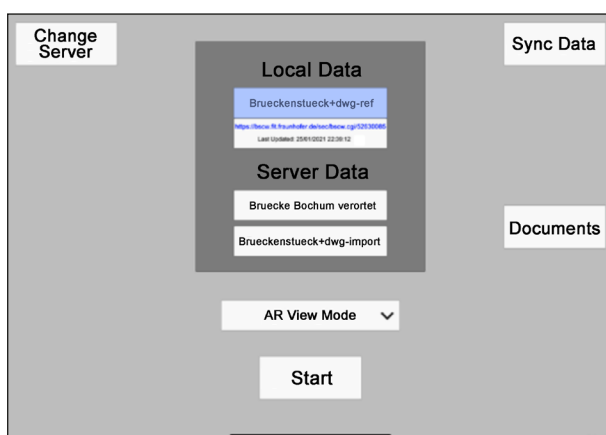


Bild 84: Screenshot des umgesetzten Start-Menüs auf dem iPad. Das ausgewählte Modell ist hellblau hinterlegt.

wodurch den UI-Komponenten die jeweils vorhandenen Werte übergeben werden und deren Darstellung am Interface ausgelöst wird.

Anschließend kann im Start-Menü die Synchronisierung mit dem BSCW erfolgen. Zunächst können die Informationen über die auf dem BSCW liegenden Dateien abgerufen werden.

Zur Erzeugung des Requests wird Basic Authorization verwendet, wobei abermals die base64 Kodierung zur verschlüsselten Übertragung der Nutzerdaten eingesetzt wird. Das Feld „authorization“ beinhaltet einen entsprechenden String, der die Login-Informationen in verschlüsselter Form beinhaltet. Zur Bild der Serverantwort wurden folgende Unity-Klassen geschrieben, die eine direkte Umwandlung der bereinigten JSON-Antwort erlauben.

Zum Download von Dateien sowie weitere Funktionen zum Abgleich, ob serverseitige Aktualisierungen vorhanden sind, müssen nur die entsprechenden http-Request-Typen ausgeführt und die ent-

sprechende URL ggf. angepasst werden. In obigem Beispiel wird zunächst lokal geprüft, ob das zu synchronisierende Modell an entsprechender Stelle vorhanden ist. Ist dies der Fall, wird ein entsprechender PUT-Request ausgeführt, der – mit entsprechenden Autorisierungsinformationen versehen und unter der Voraussetzung einer bestehenden Internetverbindung – den Upload einer Datei auf den entsprechenden BSCW-Server durchführt.

Ebenfalls vom BSCW können PDF-Dokumente geladen werden, wie beispielsweise Prüfberichte. Hierzu wurde das oben bereits erwähnte PDFRenderer-Plugin verwendet, welches ebenso unter iOS lauffähig ist. Klickt ein Nutzer auf den „Documents“ Button im Hauptmenü (vgl. Bild 84), so öffnet sich das in Bild 85 abgebildete Menü zur Dateiauswahl, welche den Ordner „documents“ auf dem BSCW widerspiegelt (mehr zur Struktur des BSCW-Ordners im Kapitel 6.3 unter Synchronisierung). Hier kann der Nutzer eine Datei auswählen, die anschließend heruntergeladen und geöffnet wird. Ist die Internetverbindung unterbrochen, die Datei aber lokal vorhanden, wird die entsprechende lokale Kopie der Datei geöffnet.

Die entsprechende PDF-Reader-Ansicht, wie sie in Bild 86 zu sehen ist, ist analog zu der im VR-Teil dargestellten gestaltet, mit den gleichen Bedienelementen.

Ist die Synchronisierung bzw. der Download der Dateien abgeschlossen und der Nutzer klickt auf den Start-Button, wird damit in Unity eine neue Szene aufgerufen. Innerhalb dieser Szene gibt es wiederum verschiedene Skripte, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Eine grobe Übersicht der wichtigsten Skripte liefert Bild 87.



Bild 86: Screenshot des PDF-Reader-Plugins auf dem iPad mit einem geöffneten PDF-Dokument, das eine Beispiel-Titelseite eines Prüfberichts zeigt.

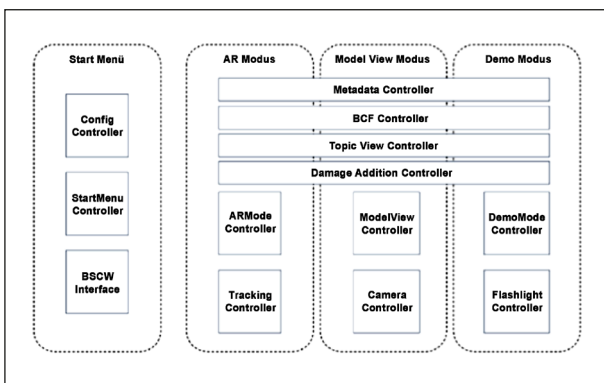


Bild 87: Übersicht über die zentralen, bereits implementierten Skripte der verschiedenen Unity Szenen. Geteilte Skripte wurden über mehrere Spalten dargestellt.

Das Gesamtsystem gliedert sich in vier Szenen: das Start Menü, der AR Modus, der Model View Modus und der Demo Modus. Dabei werden unterschiedliche Skripte verwendet. Jedes Skript erfüllt grundsätzlich eine oder mehrere Aufgaben. In Bild 87 werden die zentralen, bereits implementierten Skripte der Anwendung gegliedert nach den jeweiligen Szenen dargestellt. Im Startmenü gibt es beispielsweise das „Config Controller“ Skript, das die Konfiguration der Nutzerdaten in einer JSON-Datei hinterlegt bzw. ausliest. Der „Start Menu Controller“ sorgt für das korrekte Laden des Menüs und die Koordination der UI-Elemente, während das „BSCW Interface“ verschiedene Operationen wie Up- oder Download der Dateien und Laden der auf dem Server hinterlegten Dateien abdeckt. In den drei anderen Szenen, dem AR Modus, dem Model View Modus und dem Demo Modus, werden Skripte teilweise geteilt: So werden die Metadaten über den „Metadata Controller“ aus der IfcXML-Datei gelesen, der „BCF Controller“ beinhaltet das Parsen, Verän-

dern der BCF Datei. Um die Schäden am Interface darzustellen, wird der „Topic View Controller“ genutzt, der „Damage Addition Controller“ beinhaltet Funktionen zum Anlegen neuer Schäden, wie z. B. das Erstellen eines Screenshots mit Augmentierung, aber bei ausgeblendetem UI. Jede Szene besitzt individuell einen eigenen Controller (in Bild 87 mit ARMode-, ModelView- bzw. DemoMode-Controller bezeichnet), der das Laden des FBX-Modells übernimmt. Hierbei unterscheiden sich die Funktionen teilweise deutlich, da beispielsweise beim Model View Modus die Kamera so positioniert werden muss, dass man das Modell vor sich sehen kann (hierbei unterstützt teilweise auch der „Camera Controller“), während beim Demo Modus auf Touch Eingaben reagiert werden muss, um das Modell zu platzieren. Die Korrektur der Platzierung erfolgt im AR Modus mit dem „Tracking Controller“, der als Schnittstelle zum bildbasierten Tracking fungiert. Zudem gibt es im Demo Modus noch einen „Flashlight Controller“. Dieser ist ein Beispiel für ein kleineres Skript, das sich um die Funktionalität der virtuellen Taschenlampe – mit der mittels eines virtuellen Lichts dunkle Bereiche wie z. B. der Hohlkasten beleuchtet werden können – in diesem Modus kümmert.

Je nach Modus gibt es wie oben erwähnt ein Skript, das das Laden des Modells übernimmt. Hierbei wird das Plugin TriLib verwendet. Hierdurch ist es mit wenigen Zeilen Code möglich, das Modell zu importieren. Dazu wird zunächst mithilfe der AssetLoader Klasse, der verschiedene definierte Optionen übergeben werden können, das Modell über die Methode „LoadFromFile(...)“ geladen. Anschließend wird dem BCF-Controller, der für das Handling der BCF Informationen zuständig ist, eine Referenz auf das Game Object übergeben, sodass dieser die entsprechenden BCF-Informationen auslesen und an die Position am BCF Modell darstellen kann. Abschließend wird eine Kamera-Position aus den Dimensionen des geladenen Brückenmodells errechnet, und diese Position dann der Hauptkamera zugewiesen, sodass der Nutzer bereits einen ersten Eindruck aus 30 Metern Entfernung erhält. Dieser Zahlenwert ist dabei ein rein willkürlich, nach dem Trial-and-Error-Prinzip festgelegter Wert.

An dieser Stelle folgt nun eine Betrachtung des Einlesens der Informationen aus der BCF-Datei. Bevor die dazu notwendigen Schritte beschrieben werden, hier eine kleine Erinnerung zum Aufbau der BCF-Datei. Bei einer BCF-Datei handelt es sich um

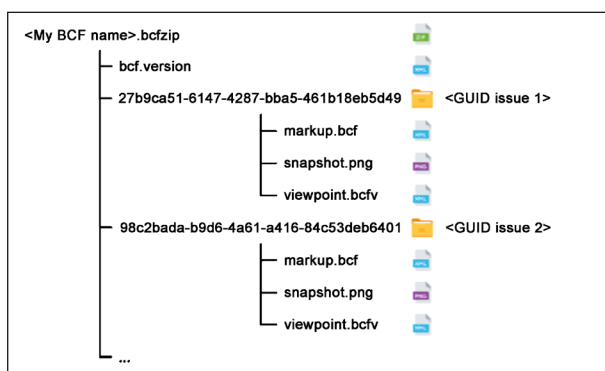


Bild 88: Schematische Darstellung des Aufbaus einer BCF-Datei

einen ZIP-komprimierten Ordner, dessen Aufbau einer bestimmten – in Bild 88 schematisch dargestellten – Struktur folgt. Unter dem Oberordner befinden sich zum einen eine XML-Datei „bcf.version“ mit Informationen zur verwendeten BCF-Version. Anschließend folgt eine Liste von Ordnern, die sogenannte Globally Unique Identifiers (GUID) als Namen tragen. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus Zahlen und Zeichen, die eine eindeutige Identifizierung erlauben. Ein Ordner wird dabei in der BCF-Logik als „Topic“ bezeichnet. Dieser Ordner beinhaltet wiederum mindestens drei Dateien: Ein markup.bcf-XML-Dokument, in dem Informationen zum Topic (oder in unserem Falle zum Schaden) hinterlegt sind, einen oder mehrere Bilder (snapshot.png bezeichnet das jeweils aktuelle Bild, alle weiteren Bilddaten werden aber ebenfalls akzeptiert) und die viewpoint.bcfv-XML-Datei, die Informationen zum Koordinatenpunkt des Schadens und zur Ausrichtung der Kamera beinhaltet.

Aus programmtechnischer Sicht besteht somit der erste Schritt daraus, das gegebene BCF-Dokument zu entpacken und den Inhalt temporär in dekomprimierter Form zwischenspeichern. Hierzu wurde eine Methode implementiert, die sich auf das in C# verfügbare ICSharpCode.SharpZipLib.Zip Modul stützt.

Ist das Entpacken erledigt, so kann das BCF vom temporären Pfad (in obiger Methode als `_targetPath` bezeichnet) geladen werden. Hierbei wird die `Xbim.BCF`⁹¹ Bibliothek verwendet.

Es wird ein neues BCF erzeugt, sollte der Pfad zur entpackten Datei nicht vorhanden sein. Der Aufruf

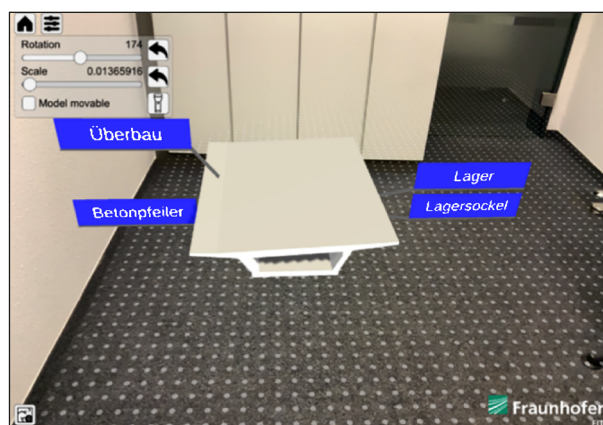


Bild 89: Screenshot des Demo-Modus. Das Modell ist beweglich über ein einfaches Klicken auf der horizontalen Fläche (gepunktet). Sobald das Modell skaliert wird, wird es fest verankert („Model movable“ deaktiviert). Zudem ist eine Rotation in y-Richtung möglich.

„`BCF.LoadBCFFile(bcfPath)`“ führt die `Xbim.BCF` Bibliothek mit dem bereits entpackten BCF aus. Daran anschließend werden über den `TopicPointsController` an den entsprechenden Punkten Objekte angelegt, die dem Nutzer angezeigt werden.

Beim Parsing der Metadaten wird die Struktur eines `lfcXML`-Dokuments berücksichtigt und Knoten für Knoten im XML-Baum ausgelesen. Dabei werden ausschließlich bereits in Unity und C# verfügbare Module verwendet – so z. B. `System.Xml` für die Verarbeitung der XML-Struktur.

In den nun folgenden Screenshots soll beispielhaft der aktuelle Stand der einzelnen Modi gezeigt werden. Wir starten im Demo-Modus in Bild 89: Hier wurde beispielhaft ein Ausschnitt der Brücke auf einer horizontalen Bodenfläche platziert. Die Rotation, die Skalierung, das Umschalten der Beweglichkeit des Modells sowie die virtuelle Taschenlampe kann über ein oben links platziertes Menü vorgenommen werden, was über einen eigenen Button geöffnet bzw. geschlossen werden kann. Die in Bild 89 blau dargestellten Informationsfähnchen zu den einzelnen Komponenten wurden für eine erste Version händisch gestaltet und manuell am 3D-Objekt platziert.

Klickt der Nutzer auf ein solches Fähnchen, so öffnet sich ein Informationsfenster mit zusätzlichen Metadaten, wie es in Bild 90 exemplarisch für den Überbau dargestellt ist. Sind keine Informationen zum jeweiligen Bauteil verfügbar bzw. aus der `lfcXML`-Datei auslesbar, wie es in unserem Beispiel beim Betonpfeiler der Fall ist, so wird das Fenster schlichtweg nicht geöffnet.

⁹¹ <https://github.com/xBimTeam/XbimBCF>

Wählt man einen Schadenspunkt aus (in Bild 91 als blaue Kugeln mit Bezeichnung „S“ zu sehen), so öffnet sich das in Bild 91 gezeigte Interface, in dem weitere Änderungen und Anpassungen vorgenom-

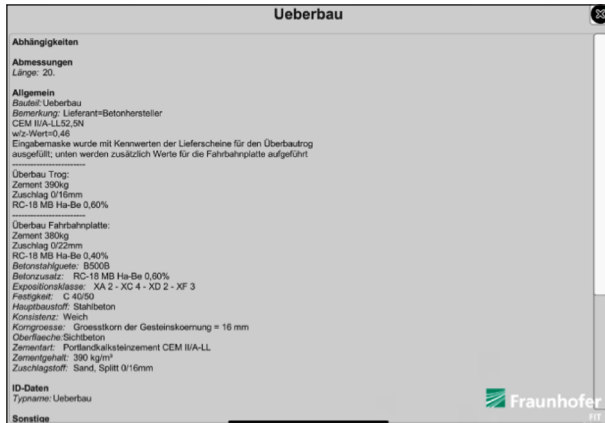


Bild 90: Screenshot der Metadaten-Ansicht des Überbaus. Exemplarisch werden hier die aus der IfcXML-Datei ausgelesenen Informationen in einem übersichtlichen Layout präsentiert.

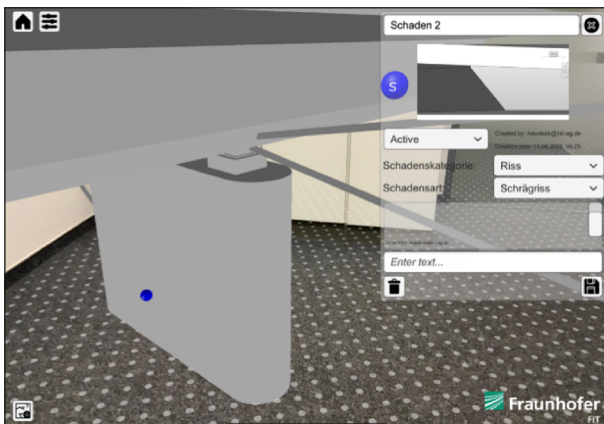


Bild 91: Screenshot des UI zu einem Schadenspunkt

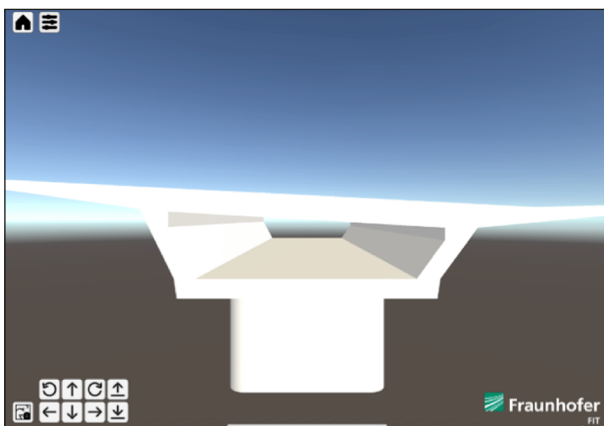


Bild 92: Screenshot des Model View Modus mit initialer, aus den Modelldaten errechneter, Kameraposition und -orientierung. Unten links die Buttonsteuerung zum Bewegen durch das Modell.

men werden können. Eine Kategorisierung der Schäden mittels eines Dropdown Menüs – in Bild 91 „Riss“ - „Schrägriß“ – ist bereits als sehr früher, eher horizontal⁹² zu verstehender Prototyp implementiert.

Bild 92 zeigt den Model View Mode in seiner initialen Ansicht mit dem geladenen Modell. Über eine Buttonsteuerung (in Bild 92 unten links) kann der Nutzer durch das Modell fliegen. Dabei kann er sich sowohl vor, zurück, nach links oder rechts, oben und unten bewegen, als auch um die eigene Achse rotieren (jeweils positive oder negative Rotation, also sprich im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn).

Zum Abschluss ist in Bild 93 ein Screenshot des AR-Modus unter Laborbedingungen zu sehen. Dabei wurde für den Marker eine willkürlich festgelegte Position an der Seitenwand des Brückenausschnitts angenommen.

Zusätzlich lässt sich im AR-Modus über einen Schieberegler im Menü außerdem die Transparenz

⁹² Es wird unterschieden zwischen horizontalen Prototypen und vertikalen Prototypen: Ein horizontaler Prototyp zeigt bereits eine Reihe von Funktionalitäten, ohne diese jedoch im Detail implementiert zu haben. Ein vertikaler Prototyp hingegen besitzt wenige Funktionen, hat diese aber bereits in der Tiefe implementiert (HARTSON and PYLA, 2012, S. 393 ff.). In obigem Kontext bedeutet dies: Die Dropdown-Menüs zu Schadenskategorie und -art, wie auch in Bild 91 zu sehen, sind bereits vorhanden, der Inhalt jedoch noch nicht vollständig. So kann gegenwärtig nur eine Schadensart für die Kategorie „Riss“ ausgewählt werden. Die Kategorien sind dabei auch noch nicht vollständig abgebildet. Hierbei soll zukünftig auf einen begrenzten Datensatz aus SIB-Bauwerke 2.0 zurückgegriffen werden.



Bild 93: Screenshot des AR-Modus unter Laborbedingungen

des Modells festlegen (vgl. Bild 94). Dies bietet den Vorteil, Modell und Umgebung genauer aufeinander abstimmen zu können. Daher ist in Bild 94 auch der in der Umgebung angebrachte, zum Tracking verwendete Marker zu sehen.

Beide Screenshots des AR-Modus (Bild 93 und Bild 94) sind dabei unter Laborbedingungen entstanden, wodurch die Positionierung des Modells noch nicht vollständig genau ist und sich somit die Wirkung nur bedingt entfaltet, dadurch dass Modell und Umgebung nicht wirklich zueinander passen. Dennoch wurde in etwa die gleiche Perspektive zur Aufnahme gewählt.

Das Bild 95 zeigt ein Bild aus der Erprobung der AR-Anwendung vor Ort. Hierbei ist vor allem die korrekte Lokalisierung und die Orientierung des Modells als besonders herausfordernd, insbesondere innerhalb des Hohlkastens, hervorzuheben. Dazu ist eine einheitliche Lage des Nullpunkts des Modells und der Marker in der realen Welt hervorzuheben. Diese ist essenziell, denn die Marker sind in-

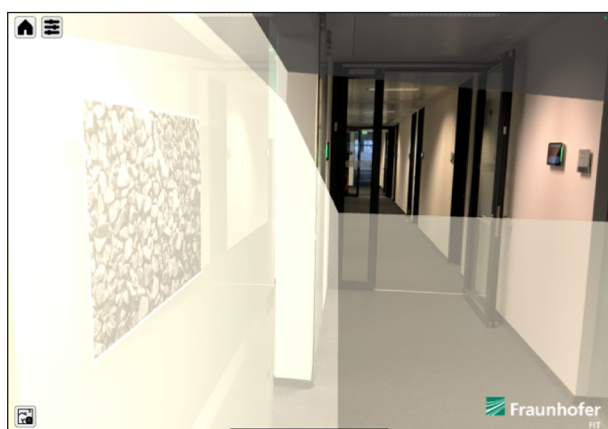


Bild 94: Screenshot des AR-Modus mit transparentem 3D-Modell unter Laborbedingungen



Bild 95: Erprobung der AR-Anwendung vor Ort

nerhalb des Hohlkastens die einzige Lokalisierungsmöglichkeit. Erste Tests in der Brücke belegen neben der zu erwartenden starken Abschirmung der GPS-Signale durch Beton und Stahl auch noch einmal die Wichtigkeit von eigens dafür eingebrachtem Licht im Hohlkasten, ohne das auch das Markertracking nicht zuverlässig funktionieren würde. Die Abschirmung des GPS-Signals wurde dabei auch mit einer separaten App aus dem App-Store überprüft und bestätigt: Während außerhalb der Brücke eine Lokalisierung ohne Probleme möglich war, wurde in der Brücke nur die letzte bekannte Position angezeigt und der Standort nicht aktualisiert. Aus diesem Grunde wurde die Einbindung einer GPS-Lokalisierung für die Evaluation insbesondere im Hohlkasten nicht priorisiert und zunächst nicht umgesetzt.

Die Datensynchronisierung konnte hingegen ohne Probleme durchgeführt werden. Wurde ein Schaden aufgenommen und gespeichert und durch einen Wechsel ins Hauptmenü die Synchronisierung angestoßen, so wurde die BCF-Datei direkt an den Server gesendet. Auch von Standpunkten innerhalb der Brücke ergaben sich dabei keine Probleme. Mithilfe der App von Speedtest.net wurde ein Speedtest im Telekom-Netz (mit einem iPhone) und im Vodafone-Netz (mit dem verwendeten iPad) an vier exemplarischen Punkten im Hohlkasten mit unterschiedlichen Wanddicken durchgeführt (vgl. Bild 96 und Bild 97).

Die aufgenommenen Werte sind dabei nur exemplarisch zu verstehen und geben lediglich eine Tendenz der Netzabdeckung zur Testzeit (Freitagmittag, 19.03.2021) wieder. Zu berücksichtigen ist ebenso die Lage der Brücke im urbanen Umfeld, nahe einer Autobahn. Diese Faktoren beeinflussen sicherlich auch die Netzabdeckung vor Ort.

LTE	19.03.21 14:00	7,43	0,58	>
LTE	19.03.21 13:59	8,04	0,73	>
LTE	19.03.21 13:58	5,20	0,56	>
LTE	19.03.21 13:57	3,61	0,52	>

Bild 96: Ergebnisse des Speedtests aus dem Hohlkasten im Telekom-Netz. Die Zahlenwerte in den beiden rechten Spalten bezeichnen den Down- bzw. Upload (v. l. n. r.) in MBit/s.

LTE	19.03.21 13:55	4,75	0,15	>
LTE	19.03.21 13:54	2,61	0,11	>
LTE	19.03.21 13:51	5,18	0,68	>
LTE	19.03.21 13:49	5,67	0,49	>

Bild 97: Ergebnisse des Speedtests aus dem Hohlkasten im Vodafone-Netz. Die Zahlenwerte in den beiden rechten Spalten bezeichnen den Down- bzw. Upload (v. l. n. r.) in MBit/s.

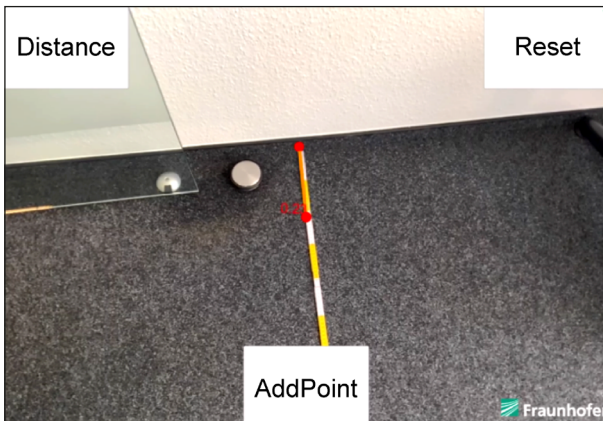


Bild 98: Screenshot des AR-Messtools in Laborumgebung

Die angelegten Schadenspunkte konnten zu einem späteren Zeitpunkt im Büro in der VR-Anwendung angezeigt werden. Somit kann ein Proof of Concept als erbracht angesehen werden.

Als nächste Schritte sind weitere Iteration und Tests zu nennen. Durch die damit verbundenen Erkenntnisse können sich Änderungen und Anpassungen ergeben. Auch die bereits erwähnte weitere Integration von digitalen Werkzeugen zur Unterstützung des Prüfprozesses sollte einfließen. Zum einen ist hier das Messtool in AR zu nennen, zum anderen die Funktion, Bilder zu annotieren. Weitere Daten wie beispielsweise zur Schadenskategorisierung sind ebenfalls zu integrieren. Darüber hinaus ist ebenso das Einblenden eines Menüs mit Schadensbild und -titel und das darauffolgende Navigieren zu den jeweiligen Schadenspunkten – insbesondere auch für den Model View Modus – analog zu den bereits in Kapitel 6.1 vorgestellten Ansätzen angedacht.

6.2.4 Ausblick für die Geo-Referenzierung des AR-Modells

Hinsichtlich weiterer Aktivitäten wäre ein Vorantreiben einer möglichen Standardisierung der Lokalisierungsmöglichkeiten denkbar. Gerade auch die Wahl des Nullpunktes und die damit verbundene Positionierung der Marker am Bauwerk sind hier anzumerken. Aber auch bezüglich der GPS-Nutzung wäre ein einheitlicher Rahmen auch für zukünftige Anwendungen oder Weiterentwicklungen denkbar und in Betracht zu ziehen.

6.3 Modul 3 Kollaboration Modul 1 + Modul 2

In diesem Kapitel werden im Wesentlichen zwei Punkte betrachtet: Zum einen die Synchronisierung der vor Ort erfassten Daten mit dem BSCW als Common Data Environment (CDE), welche bereits in Kapitel 2.3 im Kern beschrieben wurde. Durch die Implementierung haben sich jedoch kleinere Anpassungen ergeben, auf die hier eingegangen werden soll. Der zweite Punkt zur Kollaboration bildet die Fernkommunikation, der ein eigenes Kapitel gewidmet ist. Neben der klassischen und bereits heute verwendeten Form der Kommunikation mittels Mobil- und Festnetze soll VoIP als zweite Möglichkeit der Audio-Fernkommunikation beleuchtet werden. Daneben erfolgt auch eine kurze Betrachtung von audiovisueller Fernkommunikation mit einer kurzen Vorstellung diverser Drittanbieter-Lösungen. Besonderes Augenmerk soll bei der Fernkommunikation auf ein Konzept zur In-App-Integration gelegt werden, weshalb auch Plugins für die Unity Engine inklusive jeweiliger Vor- und Nachteile präsentiert werden sollen. Abschließend wird ein Ausblick auf das weitere Vorgehen gegeben.

6.3.1 Synchronisierung

In Bezug auf die Synchronisierung der Dateien ergibt sich eine Verfeinerung des im Kapitel 5 beschriebenen Konzepts. Der BSCW als Common Data Environment bleibt dabei bestehen. Jedoch ändert sich der Zugriff der Desktop-Anwendung im Büro auf die Daten: Anstatt wie ursprünglich angedacht eine REST-Schnittstelle zu verwenden, greift die Anwendung auf den bereits bestehenden BSync-Client zurück. Dies bietet den Vorteil, dass insbesondere die Konfliktbehandlung deutlich umfangreicher und detaillierter erfolgen kann als mit

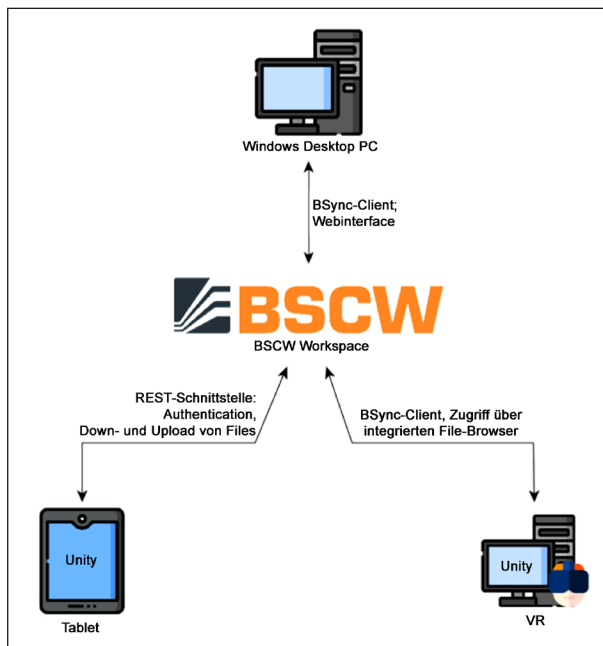


Bild 99: Angepasster Workflow zur Synchronisierung mit der CDE

Nutzung der REST-Schnittstelle. Der Nutzer legt sich somit einen Share genannten Ordner auf seiner Festplatte an. Über den integrierten File Browser kann die Unity Desktop-Anwendung auf diesen automatisch im Hintergrund synchronisierten zugreifen und die entsprechenden erforderlichen Daten laden. Somit lässt sich das Bild des Workflows zur Synchronisierung mit der CDE leicht anpassen auf die in Bild 99 abgebildete Version.

Die Daten werden hierbei in einer nun näher spezifizierten Systematik abgelegt, wie sie grundsätzlich in Bild 100 dargestellt ist. Zunächst ist ein BSCW-Workspace anzulegen, dem ein beliebiger Name zugeordnet werden kann. Die URL zu diesem Workspace ist in der Anwendung bei der oben beschriebenen Login-Maske neben Nutzernamen und Passwort einzutragen. In diesem Workspace (der wie eine Art Ordner zu verstehen ist) muss nun ein Ordner mit der Bezeichnung „documents“ vorhanden sein. In der gegenwärtigen Implementierung wird gezielt nach einem Ordner mit diesem Namen gesucht, um die darin enthaltenen PDF-Dateien anzuzeigen. Hier können beispielsweise Normen oder Beispiel PDF-Dokumente gesammelt abgelegt werden, die über den Documents-Button im Start Menü angezeigt werden sollen. Die sich dann darunter anschließenden Ordner können mit beliebigen Namen bezeichnet werden. Wichtig ist jedoch, dass die BCF-, die FBX- und die IfcXML-Dateien innerhalb dieser Ordner immer den gleichen Namen tragen müssen. Hierbei ist es jedoch wichtig zu beto-

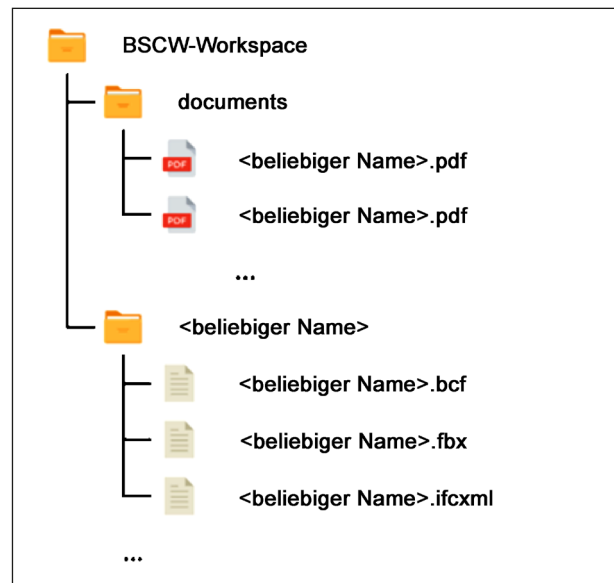


Bild 100: Grundstruktur des BSCW-Workspace. Workspace Name sowie Dateibezeichnungen können frei gewählt werden. Jedoch gilt die Einschränkung, dass die Dateien innerhalb eines Modell-Ordnern (nicht des „documents“ Ordners) den gleichen Namen tragen müssen.

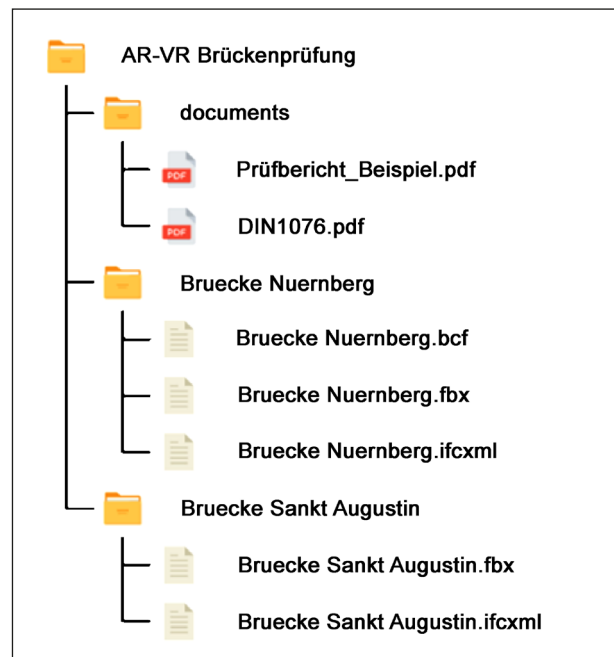


Bild 101: Beispiel einer Ordnerstruktur, wie sie zur Nutzung der Anwendung erforderlich ist

nen, dass lediglich die FBX-Datei zwingend vorhanden sein muss, BCF und IfcXML sind optional. In allen anderen Fällen kann die Anwendung die Daten nicht korrekt verarbeiten.

In Bild 101 ist ein Beispiel einer möglichen Ordnerstruktur zu sehen, wie sie von der Anwendung interpretiert werden kann.

Durch diese nun umgesetzte Struktur ergeben sich für die Implementierung der Tablet-Anwendung folgende Vorteile:

1. Durch einen zentralen Ordner für allgemeine Dokumente wird der Zugriff darauf implementierungstechnisch vereinfacht, denn die Anwendung kann alle in diesem Ordner vorhandenen PDF-Dokumente gesammelt in einer Liste darstellen und bei Bedarf und vorhandener Internetverbindung herunterladen.
2. Durch die Sammlung in den Ordnern kann die Anwendung zunächst über alle Ordner iterieren (sprich vom Server zunächst die Ordner-Liste abfragen und deren Namen in einer Liste anzeigen). Dadurch, dass die Dateinamen innerhalb der Modell-Ordner identisch sein müssen, können mit einem Namen die drei Dokumente heruntergeladen werden – so sie vorhanden sind.

Für zukünftige Weiterentwicklungen könnte es wünschenswert sein, die Struktur weiter zu flexibilisieren. Die vorliegende Struktur ist als Kompromiss zwischen einfacher Handhabung für den Nutzer und leichter Verarbeitung durch die Anwendung zu verstehen.

Neben der Daten-Synchronisierung ist die Fernkommunikation, um die es im folgenden Kapitel gehen soll, eine wichtige Komponente für die Kollaboration der weiter oben vorgestellten Module.

6.3.2 Fernkommunikation

6.3.2.1 Grundlagen

Der aktuelle Stand der Technik beinhaltet zwei Methoden im Bereich der Fernkommunikation: 1. klassische Telefonkommunikation, 2. internetbasierte Kommunikation (Voice over Internet Protocol; kurz: VoIP). Als Weiterentwicklung von VoIP existiert Video over Internet Protocol, worin eine zusätzliche Übertragung mittels Videobild möglich ist.

Die folgenden Kapitel bieten eine Übersicht über die Vor- und Nachteile sowie über die Nutzbarkeit in Rahmen der digitalen Bauwerksprüfung. Dabei stehen Aspekte wie Verfügbarkeit, Stabilität, Integrationsaufwand sowie Nutzerfreundlichkeit im Vordergrund.

Telefonkommunikation

Bei dieser Art der Fernkommunikation erfolgt der Austausch der Audiodaten über die Mobil- und Fest-

netze. Die beiden Netze unterscheiden sich technisch im Aufbau grundlegend, für die digitale Bauwerksprüfung können diese aber als eine Einheit gesehen werden. Die Netze sind umfangreich in Deutschland ausgebaut und bieten eine sehr stabile Übertragung.

Bezogen auf das Forschungsprojekt ist die Möglichkeit der Integration zur Kommunikation aus der entwickelten Anwendung heraus nicht möglich. Überdies wird im Projekt innerhalb der Bauwerksprüfung mittels AR die Nutzung eines Handheld Tablets empfohlen. Diese Systeme besitzen allerdings in Ihrer Systemarchitektur keine klassische Telefonfunktion. Zudem besteht keine nutzerfreundliche Möglichkeit, eine Cross-Plattform-Verbindung zwischen Mobilgeräten und Desktop über die Telefonkommunikation aufzubauen.

Voice over IP

Die zweite Möglichkeit der Fernkommunikation wird über den Austausch von Audiodaten über das Internet ermöglicht. Hierbei werden die Audiodaten an den internetbasierten Anschluss des Empfängergerätes gesendet. Diese Methode ist, wie bereits zuvor beschrieben, besser bekannt als VoIP.

Dabei ist es möglich, die Audiodaten von einem mobilen Gerät zu einem Desktop und umgekehrt zu senden. Außerdem lässt sich diese Art der Kommunikation innerhalb des Projektes in die VR- und AR-Anwendungen integrieren.

Diese Art der Kommunikation ist allerdings von der mobilen Netzabdeckung sowie der technologischen Ausbaustufe dessen abhängig. Durch eine nicht vorhandene bzw. nicht ausreichende Netzabdeckung kann die Übertragung der Daten weniger stabil sein.

Video over IP

Diese Methode baut auf Voice over IP auf. Dabei werden zusätzlich zu den Audiodaten Videodaten übertragen.

Abgesehen von den Vorteilen, welche die VoIP-Lösungen bieten, ermöglicht diese Methode dem Empfänger einen besseren und vor allem visuellen Einblick über die aktuelle Situation.

Da mit dieser Methode jedoch noch mehr Daten verschickt werden, ist die Abhängigkeit von der mobilen Netzabdeckung und insbesondere von der Netzgeschwindigkeit größer.

6.3.2.2 Drittanbieter-Lösungen von VoIP

Basierend auf der VoIP-Lösung existieren viele Anwendungen, die Fernkommunikation ermöglichen. Die bekanntesten sind die „out of the box“ Systeme wie Skype, Microsoft Teams, Zoom, WebEx, u. v. m. Diese Anwendungen sind erprobt und optimiert. Sie bieten fertiggestellte Applikationen für die mobilen Geräte an und ermöglichen Cross-Plattform Kommunikation mit dem Desktop.

Da es sich aber um Standalone-Anwendungen handelt, lassen sich diese Lösungen nicht in zu entwickelnde VR- und AR-Anwendungen integrieren. Zudem fallen bei einem Großteil der Drittanbieter zusätzliche Kosten an.

6.3.2.3 In-App Integration

Allerdings sind VoIP-Kommunikationsanwendungen auf dem Markt verfügbar, welche zu entwickelnde VR- und AR-Anwendung implementiert werden können. Dies bietet eine höhere Nutzerfreundlichkeit und in den meisten Fällen eine konfigurierbare Lösung, welche den Einsatz in eine Cross-Plattform Kommunikation ermöglichen. Die Entwicklung einer eigener VoIP-Lösung hingegen ist komplex und erfordert eine lange Testphase, um die bestmögliche Optimierung zu erreichen.

6.3.2.4 Plugins für Unity

Für die Implementierung einer VoIP-Lösung in Unity wurden verschieden Plugins von dritten Anbietern bereits entwickelt. Dissonance Voice Chat, Photon

Voice Classic bzw. Photon Voice 2, Agora Voice und Vivox sind die vier bekanntesten und erprobtesten Plugins.

Tabelle 21 zeigt die jeweiligen Plugins mit einer Bewertung der Eigenschaften, welche für die Nutzung in der VR- und AR-Anwendung von Bedeutung und Wichtigkeit sind.

Dissonance Voice Chat

Dieses Plugin bietet ein Drag und Drop VoIP Set-Up in Unity. Dabei handelt es sich um eine C++ Library, die mit jedem Netzwerk funktioniert. Der Preis dieses Plugins beträgt 67 €. Der C++ Source Code ist nur per Nachfrage verfügbar.

Dissonance Voice Chat ist plattformunabhängig und bietet eine umfangreiche API mit klarer Dokumentation. Dieses Plugin wurde 2017 veröffentlicht, erhält regelmäßige Updates sowie Bug-Fixes.

Da dieses Plugin die Verarbeitung von VoIP Audio-daten nicht übernimmt, sondern nur den Versand dieser, braucht dieses Plugin ein eigenes Netzwerk. Dies erfordert zusätzliche Entwicklungszeit, bietet dafür eine hohe Datensicherheit.

Photon Voice Classic/Photon Voice 2

Seit dem Abschalten des UNet (Unity's Built-In Netzwerk Lösung) wurde PUN, kurz für Photon Unity Network, als Netzwerklösung für Unity aufgebaut. Bei Photon Voice handelt es sich um eine Erweiterung für PUN, die eine VoIP Kommunikation ermöglicht. Das Plugin ist kostenlos, das zugehörige Netz-

Kriterium	Dissonance Voice	Photon Voice	Agora Voice	Vivox
Kosten	einm. 67 €	div. Preismodelle	0,99 \$/1.000 min ab 10.000 min	kostenlos bis 5.000 gleichz. Nutzer
Plattformunabhängigkeit	✓	✓	✓	✓
Dokumentation & Aktivität	+	+	-	+
Support	+	+	+	+
Integrationsfähigkeit	+	+	o	+
Netzwerkunabhängigkeit	✓	✗	✗	✗
Zugriff Source Code	auf Anfrage	✗	✗	✗
Datensicherheit	+	?	?	?

Legende:
 ✓ = Eigenschaft gegeben; ✗ = Eigenschaft nicht gegeben; ? = Eigenschaft fraglich;
 + = umsetzbar; o = bedingt umsetzbar; - = nicht umsetzbar

Tab. 21: Vergleich verschiedener Unity-Plugins zur Fernkommunikation

werk besitzt hingegen mehrere Preismodelle in Abhängigkeit von der Anzahl der Nutzer.

Diese Lösung ist ebenfalls plattformunabhängig. Die Integration dieser Lösung ist schnell und das Plugin ist für Unity optimiert. Jedoch ist dieses Plugin komplett von PUN abhängig, wodurch es unmöglich ist, ein eigenes Netzwerk zu nutzen. Dadurch müssen die Audiodaten über einen externen Server verschickt werden. Der Source Code ist nicht verfügbar.

Agora Voice

Agora.io ist eine sogenannte Real Time Engagement Plattform, welche von sozialen Netzwerken genutzt wird. Agora Voice bietet eine Verbindungsmöglichkeit für Unity Anwendung, wobei die Anwendungen als Clients von Agora.io agieren. Dadurch wird eine Plattformunabhängigkeit sichergestellt. Die Anwendungen können sowohl Audio- als auch Videodaten austauschen. Dabei bekommt jede Anwendung eine ID zugeteilt, wodurch sich nur Anwendungen mit gleicher ID Daten austauschen können. Mithilfe der ID wird auch die Nutzungszeit ermittelt. Dabei erhält jede Anwendung kostenlose 10.000 Minuten der Datenübertragung per Monat; jede weiteren 1.000 Minuten kosten 0,99 \$.

Die Integration in Unity ist theoretisch unkompliziert, da Agora jedoch nicht primär für Unity-Anwendungen entwickelt worden ist, ist die bestehende Dokumentation unvollständig und die Integration somit erschwert.

Auch bei diesem Plugin werden die Daten an einen externen Server geschickt. Anders als bei Photon handelt es sich aber um kein europäisches, sondern um ein chinesisches Unternehmen. Die Datenschutzbestimmungen lassen sich hier nicht eindeutig klären.

Vivox

Eine weitere Real Time Engagement Plattform ist Vivox. Anders als Agora kommt diese Plattform aus dem Bereich der Multiplayer-Videospiele. Vivox ist eine verbreitete VoIP Lösung in der Videospieleindustrie und wird in den großen und führenden Spielen eingesetzt. Seit Anfang 2019 wurde Vivox durch Unity Technologies aufgekauft und ist seit dem Teil des Unternehmens.

Ähnlich wie Agora bekommt jede Anwendung eine eigene ID und damit eine eindeutige Nutzungszu-

weisung. Jedoch basiert das Preismodell auf der Anzahl der Nutzer und nicht auf der Nutzungsdauer. So sind die Dienste von Vivox bis zu 5.000 Nutzer zeitgleich kostenlos. Bei Überschreitung dieser wird ein eigenes Preismodell entwickelt. Auch bei dieser Lösung läuft die Datenübertragung über einen externen Server. Vivox nutzt dafür die aws-Dienste. Vivox bietet eine stabile, skalierbare und plattformunabhängige Datenübertragung. Da Vivox zu Unity gehört, ist die Dokumentation verständlich und die Integration simpel.

6.3.2.5 Zwischenfazit zur Fernkommunikation

Um ein Fazit zu ermöglichen, sollte der aktuelle Stand der Fernkommunikation bei der Bauwerksprüfung betrachtet werden. Die Nutzung der Telefonkommunikation ist ohne jegliche Entwicklung möglich. Diese Lösung ist für die vollumfängliche digital gestützte Bauwerksprüfung nicht nutzerfreundlich, da sich die Lösungen nicht in prototypische Entwicklungen integrieren lassen.

Anhand dieser Ergebnisse kann dann eine Entscheidung getroffen werden, ob die Entwicklung einer integrierten Lösung sinnvoll ist. Da wegen den Bedenken über die Datensicherheit von Agora Voice abgeraten wird und das Preismodell von Photon Voice sehr undurchsichtig ist, wurden aus den vier vorgestellten Plugins Dissonance Voice Chat und Vivox ausgewählt und für eine weitere Untersuchung vorgeschlagen.

6.3.2.6 Modellversuche zur Fernkommunikation

Durch die Möglichkeit zur Teilnahme eines Brückenbesuches konnten im Laufe des Arbeitspaketes 3 Testläufe und -versuche zur Fernkommunikation durchgeführt werden.

Dabei galt es zu untersuchen, welche Kommunikationsmethode genutzt werden kann und welche Qualität diese bietet. Als Basis wurde zunächst untersucht, welche Up- und Downloadgeschwindigkeiten in einem Hohlkasten einer Brücke erreicht werden können. Die Tests in der Bild 102 und Bild 103 zeigen die Speedtests beider großen deutschen Mobilfunkanbieter im D-Netz. Die Brücke, an welcher die Tests durchgeführt wurden, ist eine klassische Spannbeton-Hohlkastenbrücke im innerstädtischen Raum einer Großstadt. Die Bilder zeigen, dass Datenmengen übertragen werden können, welche allerdings qualitativ nicht hoch-

wertig ausfallen werden. Die Drittanbieter-Software Zoom empfiehlt eine konstante Geschwindigkeit von 1,5 Mbit/s im Up-/Download für eine konstante Nutzung der Video over IP-Funktion⁹³.

Dazu wurden weiterführend Test-Anrufe mittels VoIP und Video over IP aus dem Hohlkasten der Testbrücke durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden mehrere Drittanbieter überprüft. Die Tabelle 22 zeigt

⁹³ <https://support.zoom.us/hc/de/articles/201362023-Systemanforderungen-f%C3%BCr-PC-Mac-und-Linux>

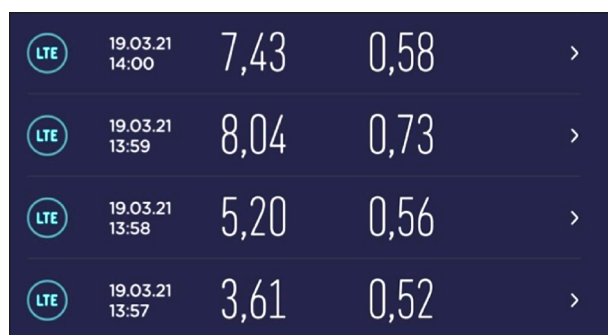


Bild 102: Ergebnisse des Speedtests aus dem Hohlkasten im Telekom-Netz. Die Zahlenwerte in den beiden rechten Spalten bezeichnen den Down- bzw. Upload (v. l. n. r.) in MBit/s.

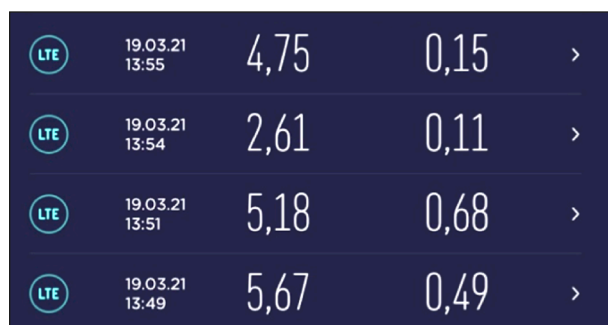


Bild 103: Ergebnisse des Speedtests aus dem Hohlkasten im Vodafone-Netz. Die Zahlenwerte in den beiden rechten Spalten bezeichnen den Down- bzw. Upload (v. l. n. r.) in MBit/s.

Anbieter	VoIP möglich	Video oIP möglich	Videoqualität
Microsoft Teams	✓	✓	schlecht
Cisco Webex	✓	✗	-
Zoom	✓	✓	schlecht
Discord	✓	✗	-

Tab. 22: Verbindungen und jeweilige Stabilität während der Test-Anrufe

die Verbindungen und deren Stabilität während des Tests.

6.3.2.7 Empfehlung zur Nutzung der Fernkommunikation

Das Ergebnis zeigt, dass ein Audio-Anruf umgesetzt werden kann; ab einer Nutzung der Videofunktionen ist keine stabile Nutzbarkeit der Systeme zu gewährleisten. Als Randbedingung sei zudem erwähnt, dass die Testbrücke im Hohlkasten leise war und es zu keinen Nebengeräuschen durch die überfahrenden Fahrzeuge kam. Ebenso ist die Brücke, wie bereits erwähnt, inmitten einer Großstadt, wodurch die mobile Netzabdeckung gut und stabil ist. In ländlichen Bereichen werden die Funktionen dadurch weiter gestört.

Ein Test der Internetverbindung in und an der Brücke in Nürnberg ergab, dass im Hohlkasten sowie in den vorgelagerten Bereichen des Aufstiegs keine (Hohlkasten) bzw. nur schwache Mobilfunkabdeckung gegeben ist. Somit wäre eine Fernkommunikation im Hohlkasten nicht möglich und in den Aufstiegsbereichen nur höchst eingeschränkt. Am Eingang der Brücke in Nürnberg ergaben sich die in Bild 104 ersichtlichen Geschwindigkeiten (gemessen mit einem iPhone 12 Pro im Telekom Netz).

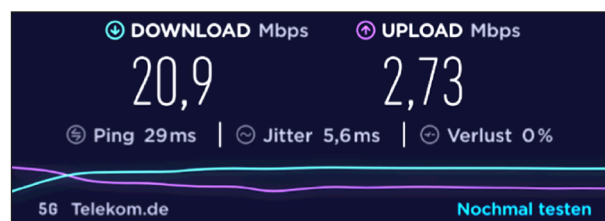


Bild 104: Ergebnis des Speedtests am Eingang der Brücke im Autobahnkreuz Nürnberg, getestet mit einem iPhone 12 Pro im Telekom Netz

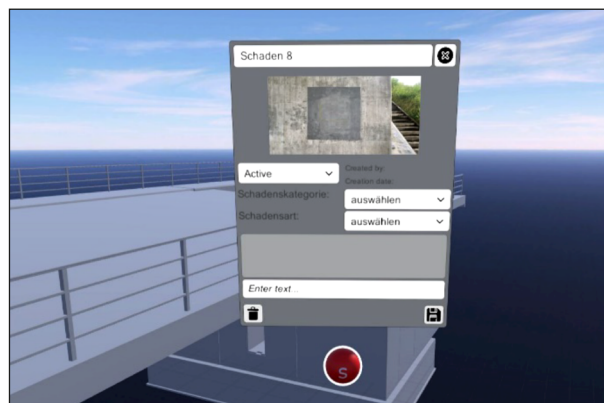


Bild 105: Button der Notfall-Mail im UI zur direkten Mailkommunikation zu einem expliziten Schadenspunkt

Aus diesen Erkenntnissen wurde eine Alternative zum Thema der Fernkommunikation erarbeitet. Dazu werden, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, die BCF-Daten bei stabiler Internetverbindung auf den CDE hochgeladen und stehen damit allen Betrachtern, in VR und AR, gleichermaßen zur Verfügung. Die Kommunikation zur Abstimmung der Inhalte der BCF-Datei soll weiterhin durch die Nutzung des Mobiltelefons oder durch die Nutzung von VoIP über Drittanbieter sichergestellt werden.

Bei Betätigung des Buttons an einem Schadenspunkt öffnet sich das vom Nutzer standardisiert eingestellte Mailprogramm und versendet die entsprechende Aufforderung zur Unterstützung an die Zielperson. Vorteilhaft an der Methode ist, dass die helfende Zielperson direkt über das VR-Tool und dem synchronisierten BCF-Datensatz alle Informationen zum Schaden vorliegen hat. Dabei ist der Vorgang deutlich reduzierter in der zu übertragenden Datenmenge, nachhaltiger und stabiler. Anhand dieser Ergebnisse kann dann eine Entscheidung getroffen werden, ob die Entwicklung einer integrierten Lösung sinnvoll ist. Da wegen den Bedenken über die Datensicherheit von Agora Voice abgeraten wird und das Preismodell von Photon Voice sehr undurchsichtig ist, wurden aus den vier vorgestellten Plugins Dissonance Voice Chat und Vivox ausgewählt und für eine weitere Untersuchung vorgeschlagen.

6.4 Zusammenfassung zum modularen Konzept

Die Inhalte im Kapitel 6 beschreiben den aktuellen Stand der einzelnen Module – im Büro und vor Ort – und auch Aspekte, wie diese miteinander kollaborieren. Hervorzuheben sind hierbei insbesondere die Aspekte der Datei-Synchronisierung und der Funktionen zur Bauwerksprüfung. Viele der skizzierten Grundfunktionalitäten konnten dabei schon in die jeweiligen Prototypen integriert werden. Hervorzuheben ist hier insbesondere auch der Austausch von Code-Teilen, der aufgrund der gemeinsam von beiden Modulen verwendeten zugrundeliegenden Unity Umgebung vielfach ohne große Probleme möglich ist. Konkret wurden hier beim Parsing der Metadaten aus den IfcXML-Dateien und dem Handling der BCF-Dateien intensiv Code geteilt. Auch manche Elemente des User Interface, wie z. B. das Start-Menü oder das Interface zur Schadensbeschreibung, wurden einmal entwickelt

und dann mit entsprechenden Anpassungen in das andere Modul übertragen.

Wichtig und für das Forschungsvorhaben unentbehrlich ist ein ausgiebiger Test der Funktionalitäten, insbesondere vor Ort unter Einbeziehung der Nutzerzielgruppe, um weiteres Feedback zu sammeln und dieses für zukünftige Anpassungen und Weiterentwicklungen berücksichtigen zu können, worauf im Kapitel 7 näher eingegangen wird.

7 Demonstrator

7.1 Darstellung des Demonstrators

Basierend auf dem in Kapitel 6.2 dargelegten Aufbau der Anwendung und des modularen Konzepts sind für den Demonstrator und die Evaluation in an der Testbrücke zum Demonstrator in Nürnberg einige Punkte angepasst worden, mit Hauptfokus auf dem AR-Modus, da es diese vor Ort zu untersuchen gilt (vgl. Bild 106). So wurde das Messwerkzeug in den AR-Modus integriert. Daneben wurden die Größe und Positionierung der Buttons zur Bedienung angepasst. Ebenso wurde ein Ein- und Ausblenden des gesamten Modells ermöglicht (siehe dritter Button von oben rechts in Bild 106).

Ebenso ist die Funktion eines Notrufs exemplarisch eingepflegt (siehe Bild 107). Hierbei wird jedoch kein wirklicher Notruf ausgelöst, sondern vielmehr ein Informationstext angezeigt, der erklärt wie ein globaler bzw. lokaler Notruf am Bauwerk umgesetzt werden kann und welche zusätzliche Infrastruktur dazu ggf. benötigt werden würde.



Bild 106: Halbtransparente Modellüberlagerung vor Ort. Sichtbar ebenfalls das zur Evaluation angepasste User Interface.

Für die Positionierung des Modells sind im Hohlkasten und an der Brücke Marker angebracht worden (Bild 108). Etwaige Anpassungen (Rotation oder Positionsverschiebungen) können über die entsprechend dafür vorgesehenen Buttons getätigt werden.

Die Synchronisierung der Modelldaten erfolgt aufgrund fehlender Netzabdeckung im Hohlkasten außerhalb der Brücke. Um eine Verwechslung zwischen Punkten des Messwerkzeugs und Schadenspunkten auszuschließen, ist die Farbgebung der Schadenspunkte von Blau auf Rot angepasst worden (Bild 109). Das Menü zur Eingabe der Schadensinformationen wurde ebenfalls angepasst, um die vorliegenden Informationen, angenähert an SIB-Bauwerke, abzubilden (vgl. Bild 109 auf der



Bild 107: Screenshot der umgesetzten Beschreibung der Notfalltaste

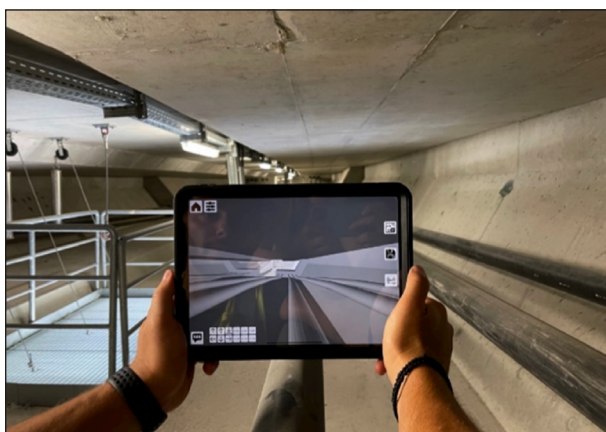


Bild 108: Überprüfung der Lokalisierung des Demonstrators im Hohlkasten mit intransparentem Modell

rechten Seite). Somit kann der Nutzer bei Eingabe eines Schadenspunkt zwischen verschiedenen Schadensbildern auswählen und Informationen zur Menge des Schadens einfügen.

Wird ein neuer Schadenspunkt erzeugt, so kann dieser zunächst mit dem UI aus Bild 110 beschrieben werden. Hierbei wurde vor allem die Auswahl

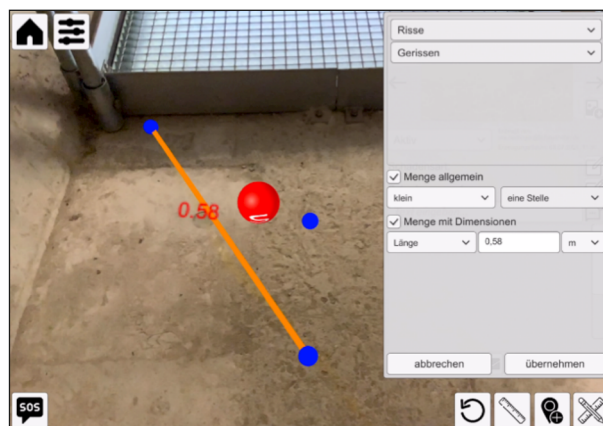


Bild 109: Anpassungen des UIs zur Schadenseingabe und Farbgebung der Schadenspunkte



Bild 110: UI zur Eingabe eines neuen Schadenspunktes

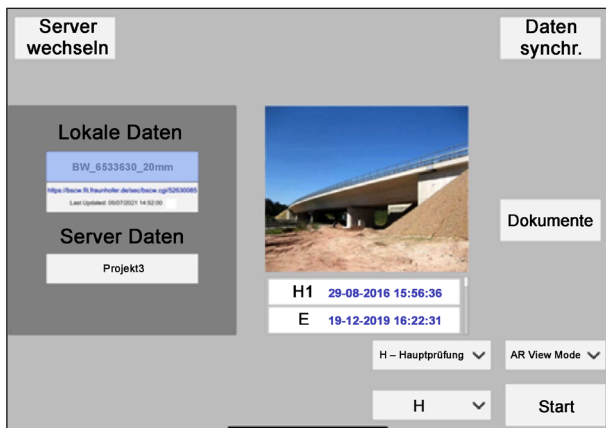


Bild 111: Überarbeitetes Hauptmenü des Demonstrators

der Schadensart und -ursache überarbeitet, die wiederum im UI, welches in Bild 109 rechts zu sehen ist, erfolgt. Klickt der Nutzer dort auf „übernehmen“, so wird der Text in das mittige Textfeld des in Bild 110 dargestellten UIs übernommen. Anschließend können hier noch Anpassungen und Ergänzungen vorgenommen werden. Bestätigt der Nutzer die Eingabe durch Druck auf den Button rechts neben dem Textfeld (vgl. Bild 110 in der Mitte auf der rechten Seite), so wird die Eingabe fest in das BCF übernommen. Ebenso ist es nun möglich, zu einem Schaden mehrere Bilder aufzunehmen und diese anzuzeigen (Bild 110 neben dem Schadensbild). Durch diese Anpassungen – Textfeld mit Übernahme und mehrere Schadensbilder zu einem Schaden – wird es möglich, eine Historie des Schadens, auch über mehrere Prüfungen hinweg, aufzuzeigen.

Im Hauptmenü ergaben sich einzelne Anpassungen in der Position der Bedienelemente sowie die neue Möglichkeit, die Art der Prüfung auszuwählen und ein Bild des Bauwerks zu hinterlegen (vgl. Bild 111). Die gewählte Art der Prüfung wird im Hintergrund auch gespeichert und mit dem Server synchronisiert, sodass dort ebenfalls die Prüfungshistorie nachvollzogen werden kann.

7.2 Evaluation der AR-Demonstration

Die Evaluation fand statt vom 05. – 08. Juli 2021 an der Intelligenten Brücke⁹⁴ am Autobahn-Kreuz A3/A9 in der Nähe von Nürnberg. Dies ist eine von der

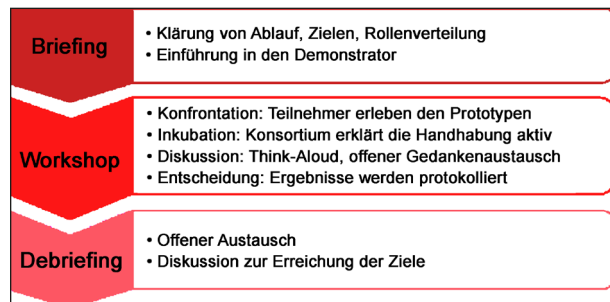


Bild 112: Ablaufschema der Evaluation

BASt für verschiedene Innovations-Projekte konzeptionierte Test-Brücke, die von der Autobahn GmbH des Bundes betrieben wird.

Wir testeten mit 17 Domänen-Experten aus verschiedenen Teilen Deutschlands (Bayern, Hamburg, NRW). Sie waren alle männlich und Bauingenieure – 7 von ihnen gaben explizit an, Brückeninspektor zu sein. Alle Teilnehmer waren über 30 Jahre alt, davon waren 6 in ihren Dreißigern, 1 in den Vierzigern, 7 in den Fünfzigern und 3 in den Sechzigern.

7.2.1 Evaluationsdesign

Die Evaluation des Demonstrators erfolgt in drei Schritten. Zunächst werden den Teilnehmern im Briefing Informationen zum Forschungsprojekt und über den entwickelten Demonstrator verdeutlicht.

Im anschließenden Workshop wird den Teilnehmer die Funktion des Demonstrators erklärt sowie erste Schäden aufgenommen. Im Weiteren hatten die Teilnehmer die Chance, den Demonstrator eigenständig zu testen und anschließend zu bewerten.

Im Rahmen der eigenständigen Testung des Demonstrators durch die Teilnehmer wurde im ständigen Dialog mit den Testpersonen über Vor- und Nachteile, über Wünsche und Verbesserungen diskutiert. Die Ergebnisse wurden in einen ersten Schritt schriftlich festgehalten.

Im abschließenden Debriefing wurde mit den Teilnehmern deren Erwartungen und Ziele diskutiert.

Briefing

Im ersten Briefing soll den Teilnehmern die Bedeutung und die Ziele der Evaluation nähergebracht werden. Im Anschluss erfolgt eine Einführung in die Funktionsweise des Demonstrators in Form einer praktischen Vorführung. Hierbei konnten die Teil-

⁹⁴ <https://www.intelligentenbruecke.de/>

nehmer bereits erkennen, wie eine Schadensverortung erfolgt und wie die Schadensbeschreibung dementsprechend abläuft. Durch die im Vorfeld erfolgte Vorführung im Briefing konnten die Teilnehmer bereits die Anwendbarkeit sehen und somit mit einem Hintergrundwissen in die eigenständige Nutzung im Workshop gehen.

Workshop

Während des Workshops haben die Teilnehmer die Anwendung eigenständig bedient, um so die Funktionen der Schadensverortung und -beschreibung ausführlich außen am Bauwerk, aber auch im Inneren der Hohlkastenbrücke testen zu können. Den Teilnehmern stand jederzeit ein Mitglied des Konsortiums für Fragen und Hilfestellungen z. B. zur Bedienung bei Seite. Durch die Think-Aloud-Methode wurde ein gemeinsamer Gedankenaustausch angeregt. Somit wurden Ideen und Wünsche oder Verbesserungsvorschläge direkt diskutiert und notiert, welche für die Auswertung von hoher Wichtigkeit sind.

Zum Funktionsumfang gehörten unter anderem:

- die Verortung von Schadenspositionen
- Erstellung mehrerer Schadensbilder zu einem Schaden
- Aufnahme unterschiedlicher Schäden
- Eingabe der Schadensbeschreibung
- Schadensuntersuchung (Messen)
- Schadensmarkierung

Nach Abschluss der praktischen Anwendung erfolgte die anschließende Umfrage zum Demonstrator (s. Kapitel 7.2.2). Die Umfrage gliederte sich in vier Gruppen:

- Allgemein
- Demonstrator
- Ideen
- Demografie & Sonstiges



Bild 113: Vorstellung Demonstrator

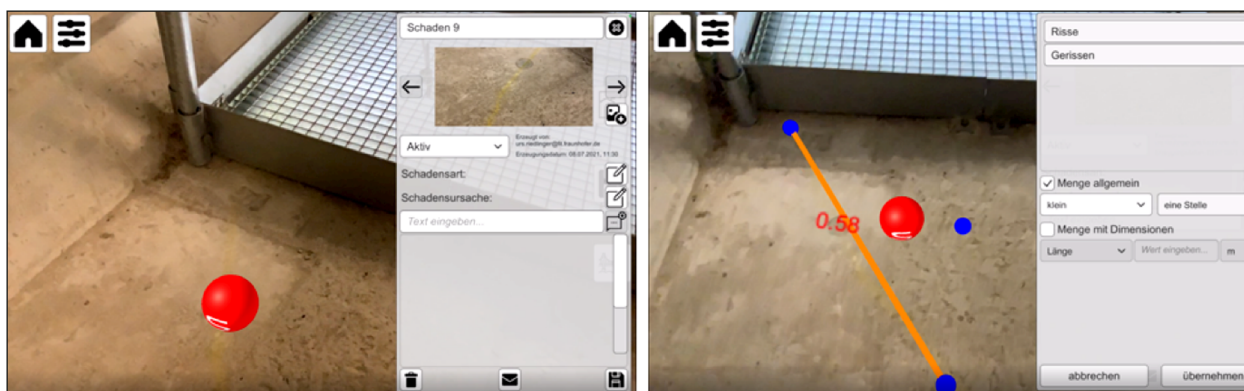


Bild 114: Darstellung der Schadenspositionierung und der Schadensuntersuchung (Messen)

Den Teilnehmern wurden Fragen zur allgemeinen Vorführung gestellt, um herauszufinden, ob die Demonstration des Demonstrators ausreichend war. Bei den Fragen zum Demonstrator wurde die Funktionsweise, Performance und Ausstattung abgefragt. Im Bereich der Ideen sollten die Teilnehmer beschreiben, welche Vorschläge sie zur Erweiterung des Demonstrators hatten. Im Themenfeld Demografie und Sonstiges wurden den Teilnehmern vor allem Fragen zur Person gestellt. Die Umfrage erfolgte anonym.

Debriefing

Nach Abschluss der Umfrage sollte ein offener Austausch zum Thema Bauwerksprüfung und mögliche Methoden zur Digitalisierung geführt werden. Bei diesen Gesprächen wurde dem Konsortium die Erleichterung durch die Anwendung bestätigt. Jedoch zeigte sich auch, dass die Teilnehmer auch einige Verbesserungsvorschläge hatten, welche in der Umfrage bereits beschrieben wurden.

7.2.2 Umfrage

In der Umfrage wurden den Teilnehmern Fragen zur Erwartungshaltung, Funktionsweise, Handhabung und Praxistauglichkeit gestellt. Als Antwortmöglichkeit sind Bewertungen durch Benotung (Schulnotenprinzip), Bewertung durch eine Skala (z. B. von 1 bis 5) oder durch eine Freitexteingabe zugelassen.

Zur Erstellung und Durchführung der Umfrage wurde das Umfragetool LimeSurvey verwendet. LimeSurvey wird durch die LimeSurvey GmbH entwickelt und vertrieben und steht unter der gängigen GPL-Lizenz und ist damit freie Software. Mithilfe dieser webbasierten Umgebung, die auch selbst gehostet werden kann, ist es möglich, umfangreiche Umfragen auch ohne Programmierkenntnisse zu erstellen. Dabei wird ein Großteil von möglichen Fragekategorien abgedeckt. Die Bearbeitung der Fragen erfolgt ebenfalls online. Durch diese digitale Erfassung wird das Übertragen von Antworten überflüssig gemacht. Mithilfe der vorhandenen Auswertungs- und Exportmöglichkeiten kann die Verarbeitung der gesammelten Daten beschleunigt werden.



Bild 115: Offener Austausch mit den einzelnen Teilnehmern

Folgende Fragen waren in der Umfrage enthalten:

1. Wie war die Demonstration vorbereitet?
2. Welche Funktionen fehlten Ihnen in dieser Anwendung?
3. Wie würden Sie den Demonstrator bewerten (Schulnotensystem)?
4. Auf Basis der Vor-Ort Demonstration: Für wie sinnvoll erachten Sie eine virtuelle Nachbereitung der aufgenommenen Informationen?
5. Welche Funktionen des Demonstrators konnten Sie testen?
6. Bitte bewerten Sie den Funktionsumfang.
7. Wo sehen Sie die Vorteile bei der Anwendung eines solchen Programms?
8. Wo sehen Sie Nachteile bei der Anwendung eines solchen Programms?
9. Sollte es künftig SIB-Bauwerke und ein weiteres Programm wie den Demonstrator geben? Oder sollte es künftig nur ein Programm zur Bauwerksprüfung geben?
10. Wie wahrscheinlich ist es, dass Sie künftig die Bauwerksprüfung mit dem Demonstrator und nicht mehr in Papierform bearbeiten würden?
11. Was gefällt Ihnen am Demonstrator?
12. Was gefällt Ihnen am Demonstrator nicht?
13. Welche Funktionen sollte das Programm aus Ihrer Sicht noch über die vorgestellten Funktionen hinaus beinhalten?
14. Sollten Richtlinien und Normen im Demonstrator hinterlegt werden?
15. Inwieweit sehen Sie Bedarf zur Änderung der Regelwerke zur Bauwerksprüfung? Bitte begründen Sie.
16. Könnten Sie sich andere Geräteklassen zur Unterstützung der Bauwerksprüfung vorstellen? Würden Sie diese bevorzugen und warum? (Unter den Geräteklassen sind Anzeigemedien definiert, welche die digitalen Medien darstellen.)
17. Ist eine Digitalisierung der Verkehrssicherung aus Ihrer Sicht hilfreich? (Verkehrszeichenpläne mit automatischem Abgleich der aufgestellten Materialien vor Ort)
18. Wie sinnvoll erachten Sie eine solche Tablet-Nutzung? Bitte begründen Sie!
19. Wie schätzen Sie Ihre Kenntnisse selbst ein? (1 = sehr wenig, 5 = sehr viel)
 - a. Technik allgemein
 - b. Bauwerksprüfung
 - c. AR/MR
 - d. VR
20. Bitte geben Sie Ihr Alter an.
21. Wie lautet Ihre Berufsbezeichnung?
22. Welche Funktionen des Demonstrators konnten Sie nicht testen?
23. Wie bewerten Sie die Genauigkeit des virtuellen Brückenmodells im Demonstrator zur Realität?

Den Teilnehmern wurde der Demonstrator jeweils allein vorgeführt. Durch diese Vorgehensweise konnte eine Beeinflussung der Beurteilung durch andere Teilnehmer verhindert werden.

7.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Evaluation in aggregierter Form präsentiert. Die detaillierten Ergebnisse pro Frage finden sich im Anhang 2 wieder.

7.3.1 Quantitative Ergebnisse

Zu Beginn wurden die Teilnehmer aufgefordert, den zuvor gesehenen Demonstrator anhand der in Deutschland üblichen Schulnoten zwischen 1 (sehr gut) und 5 (mangelhaft) zu bewerten. Der Demonstrator wurde dabei im Durchschnitt mit 2,18 (SD = 1,13) bewertet, ergo als „gut“.

Darüber hinaus stellten wir den Teilnehmern eine Reihe von Fragen mit einer Bewertungsskala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut). Die Befragten stufte sich auf dieser Skala für ihr allgemeines technisches Verständnis im Durchschnitt mit 3,58 (SD = 1,07) ein, für ihr Wissen über Brückeninspektion mit 3,88 (SD = 0,93), für ihr Wissen über AR/

MR mit 2,36 (SD = 0,92) und für ihr Wissen über VR mit 2,09 (SD = 1,38). Hinsichtlich AR/MR/VR ließen 6 Teilnehmer die Frage offen und konnten sie vermutlich auch nicht beantworten.

Alle Befragten testeten die Kernfunktionen zur Schadenserfassung und Lokalisierung. Aus zeitlichen Gründen konnte das zusätzliche Messinstrument nur von 13 und das zusätzliche virtuelle Annotations-Tool von 11 Teilnehmern getestet werden. Der Funktionsumfang des Demonstrators wurde von den Teilnehmern mit 3,94 (SD = 0,85) bewertet.

Für die Genauigkeit der Überlagerung des virtuellen Brückenmodells mit der realen Brücke vergaben sie die Note 3,06 (SD = 1,06). Die Bereitschaft, ein Digitalwerkzeug wie den Demonstrator für Brückeninspektionen anstelle von Papier zu verwenden, wurde mit 4 (SD = 1,22) recht hoch bewertet.

7.3.2 Qualitative Ergebnisse

Die Fachexperten erhielten zudem eine Reihe offener Fragen, die wir im Folgenden zusammenfassen. Auf die Frage nach den allgemeinen Vorteilen des Ansatzes erwähnten die Teilnehmer eine erhöhte Präzision bei der Lokalisierung von Schäden und ein immenses Zeiteinsparungspotenzial, da ein Digitalwerkzeug zur Schadensaufnahme den erforderlichen Zeitaufwand für die Nachbearbeitung der Erhebung reduzieren würde. Bisher erfolgte die Nachbearbeitung oftmals durch die Übertragung der Ergebnisse von analogen Papierzetteln in die gängige Software der SIB-Bauwerke im Büro. Dagegen wurde eine vollständig digitale Schadenserfassung als konsistenter, weniger fehleranfällig und als „lückenlose Dokumentation“ angesehen. Darüber hinaus entfiel bei einem Tablet-basierten Tool die Notwendigkeit, eine separate Kamera mitzuführen und die Verwendung von Papier entfällt.

Nachteilige Aspekte des Ansatzes wurden meist außerhalb des Anwendungsbereichs des verwendeten Demonstrators gesehen. So empfand ein Teilnehmer die Arbeit mit dem Demonstrator als zu zeitaufwendig, ein anderer gab an, dass er noch nicht genügend Orientierung biete. Das Risiko einer Informationsüberflutung wurde erwähnt, die eine zu intensive Beschäftigung mit dem Bildschirm erfordern könnte, sodass die Brückeninspektion gezwungen wäre, sich auf die erfassten Schäden zu konzentrieren, was sie von der Suche nach neuen Schäden ablenken würde. Ebenfalls als potenzielle Problempunkte wurden die derzeit fehlende Kom-

patibilität zu bestehender Software, die fehlende Robustheit der Hardware (gegen Stürze, Schmutz und Feuchtigkeit) und die damit einhergehende Gefahr des Datenverlustes und der Handlungsunfähigkeit im Falle von Hardwareschäden genannt. Auch sei die Bedienung des Tablets mit bestimmten Handschuhen nicht möglich.

Die Option eines virtuellen Debriefings und einer virtuellen Nachbearbeitung der Umfrage (in dieser Studie nicht getestet) würden 14 von 17 Teilnehmern als nützlich erachten. Folgende Vorteile wurden dabei genannt: Die Möglichkeit, spezifische, nicht eindeutige Schäden zu rekapitulieren, die Positionierung und Beschreibung von Schäden zu verbessern, den Dialog mit Kollegen zu suchen und eine zweite Meinung einzuholen sowie die Möglichkeit, bedeutende Schäden zu visualisieren und nachzubearbeiten.

Auf die Frage, was den Teilnehmern an dem Demonstrator besonders gefiel, betonten sie die direkte Positionierung und Kategorisierung von Schäden vor Ort sowie die strukturierte Dokumentation der Schäden durch Fotos, sodass diese automatisch an den richtigen Datensatz angehängt werden können – ohne dass im Nachhinein unübersichtliche Fotoordner durchforstet und händische Uploads vorgenommen werden müssen. Eine weitere Entlastung stellte die Möglichkeit dar, beim Überqueren der Brücke Schäden am virtuellen Modell in der mit der Realität überlagerten Ansicht zu sehen und hinzuzufügen. Auf diese Weise entfällt die Notwendigkeit, Schäden auf Papier zu skizzieren, was die Nachbearbeitung beschleunigt. Es wurde als großer Vorteil angesehen, dass alles an einem Ort gespeichert ist, da dies die oft erforderliche Suche in unübersichtlichen Ordnern und archivierten Notizen überflüssig macht. Auch die Handhabung und die Größe des Tablets, die Vermessung am Einsatzort, das Wegfallen von Papierplänen, sauberere Notizen durch den Verzicht auf Handschrift und das Potenzial, einen Nachbearbeitungsschritt überflüssig zu machen, wurden positiv bewertet. Insgesamt wurde der Demonstrator als äußerst praxisnah und den tatsächlichen Anforderungen der Brückeninspektoren nahekommend eingestuft, wodurch Potenziale und Schwachstellen eines solchen Ansatzes gut aufgezeigt werden konnten.

Zu den Vorbehalten gegen den Demonstrator gehörte die mangelnde Präzision bei der Positionierung, obgleich auch eingeräumt wurde, dass er bereits einen hohen technischen Stand vertrete. Noch-

mals kam eine Anbindung an die bereits existierende Software in der Brückenprüfung zur Sprache oder möglicherweise die Verschmelzung der bestehenden Schnittstellen der SIB-Bauwerke und des Demonstrators zu einem neuen System. Einige bemängelten die Handhabung von Fotos, wie z. B. das Erfordernis, für die Aufnahme eines Schadens ein Foto zu machen oder die fehlende Möglichkeit, Fotos zu löschen. Zudem sei die Benutzeroberfläche verbesserungsbedürftig, da z. B. einige Optionen etwas umständlich zu bedienen seien, wie z. B. das zusätzliche Messwerkzeug. Auch eine Option zum Gruppieren ähnlicher Schäden wurde vermisst.

Bezüglich ihrer Erwartungen berichteten einige Teilnehmer wie folgt: Vereinfachung der Schadensfassung (mit Skizzen), Arbeitserleichterung durch den Wegfall von Papierplänen und automatische, optische Risserkennung wie beispielsweise bei Tunnel-Scans. Ein Teilnehmer schrieb: „Erwartet habe ich eine Software, die den Bauwerksprüfer als digitales Hilfsmittel dient, das auf Basis von Bildern Schäden erfassen, beschreiben und abspeichern kann.“

71 % der Teilnehmer erachteten es als sinnvoll, die relevanten Normen und Richtlinien sowie Checklisten, Kataloge und Handbücher zum Nachschlagen in das Programm zu integrieren. Hinsichtlich der Normen sahen 41 % der Teilnehmer einen Anpassungsbedarf beim Einsatz digitaler Werkzeuge im Rahmen von Brückenprüfungen. Der Normenausschuss (DIN NA 005-57-04 AA) sollte sich insbesondere mit den neuesten digitalen Entwicklungen befassen. Die erforderliche Soft- und Hardware muss für öffentliche Ausschreibungen spezifiziert werden. Dies kann auch durch die Einbindung in entsprechende Richtlinien und Normen geschehen. Arbeitsabläufe, Dateiformate und Schnittstellen müssen festgelegt und in Richtlinien integriert werden. Auch die Vergütung der Brückenprüfer und der Softwareentwickler muss darin enthalten sein. Ein Teilnehmer betonte, dass der Einsatz von Tablets sehr nützlich und notwendig sei und dass solche Technologien in den Standards Eingang finden sollten. Brückenprüfungen könnten durch den Einsatz solcher neuen Technologien und Kenntnisse zeitsparender, wirtschaftlicher und verständlicher gestaltet werden. Langfristig bringe diese Art der Datenerfassung, -verwaltung und -verarbeitung auch Vorteile für das Bauwerk selbst, da notwendige Instandhaltungsmaßnahmen viel schneller und effizienter veranlasst werden könnten. Ein weiterer Teilnehmer

schrub: „Sehr sinnvoll. Die Arbeit mit Unmengen von Papier, Handskizzen, Handnotizen, nicht verknüpften Fotos usw. und die nachfolgende langwierige Nachbearbeitung, Eingabe und Erstellung von digitalen Skizzen usw. im Büro ist nicht mehr zeitgemäß.“

Auf die Frage nach weiteren Geräten zur Unterstützung der Arbeitsabläufe bei der Brückenprüfung konnten sich zehn Teilnehmer einen konkreten Bedarf vorstellen. Darunter waren Laserscanner, Diktiergeräte und Drohnen sowie eine Verbindung zu CAD-Software.

Weitere Anregungen für Verbesserungen und zusätzliche Funktionen umfassten die folgenden Aspekte.

Zu den Themen Usability, UI, und Programmschnittstellen äußerten die Teilnehmer folgende Wünsche:

- Kombination des Demonstrators mit bestehender Standardsoftware oder Ermöglichung eines reibungslosen Datenaustauschs;
- Harmonisierung von Klassifikationen und Texten mit bestehenden Standards;
- Bereitstellung von weiteren Metadaten über die Brücke (Gebäudenummer, Prüfrichtung usw.);
- Spezifische Verbesserungen der Benutzeroberfläche (UI) zur Effizienzsteigerung und Fehlerreduzierung, z. B. Auswahlmöglichkeiten auf der Grundlage des aktuellen Bauelements oder bessere Benutzerführung durch den Riss-Erfassungsprozess durch Neuordnung der Schritte und bessere Standardwerte, Priorisierung von Dropdowns anstelle von Schaltflächen, Einheiten anstelle von Werten, Standort anstelle von Bildern, Eingabe einer Reihe von Werten für bestimmte Schäden, Option zur Hervorhebung wichtiger Schäden;
- Bereitstellung dynamisch gefilterter Ansichten, z. B., um nur die für eine aktuelle Aufgabe benötigten Daten anzuzeigen oder die Brücke in verschiedene Teile zu unterteilen (bessere Übersicht);
- Anzeige von Details auf Anfrage, z. B. Elementmaterial (Beton, Verstärkungen, Drähte usw.), Vertragspartner oder Garantien;
- Stiftbasierte Eingabe und Erkennung von Handschrift;

- Bereitstellung von Zoom-Optionen für Fotos zur genaueren Betrachtung der erfassten Schäden;
- Anzeige der Historie für behobene Schäden.

Für die Lokalisierung werden folgende Wünsche geäußert:

- Höhere Präzision bei der Lokalisierung von Schäden;
- Mehr Marker auf der Brücke zur Verbesserung der Lokalisierung (könnte mit anderen Technologien wie RFID kombiniert werden);
- Unterstützung beim Aufstellen von Verkehrsschildern;
- Unterstützung bei der Modifizierung von Daten zur Bereinigung, z. B. Verbesserung der Standorte durch Verschieben der Kugeln.

Zur Vereinfachung der Vorbereitung und Nachbesprechung von Strukturinspektionen wird Folgendes überlegt:

- Verknüpfung mit nachfolgenden Arbeitsschritten der Instandhaltung, z. B. Unterstützung bei der Erstellung von Leistungsverzeichnissen und Plänen;
- Navigation zur Brücke

Außerdem hatten sie folgende Ideen für weitere Entwicklungen und Funktionalitäten:

- Teilautomatische Risserkennung durch das Tool nachdem diese in der Realität markiert wurden;
- Schadenserfassung für mehr Strukturen und Teile;
- Sammeln und Clustern/Schichten ähnlicher Schäden für die gesamte Brücke;
- Awareness-Funktionalität, einschließlich Netzwerkverfügbarkeit, Position und Lokalisation auf der Brücke und im Notfall;
- Unterstützung bei der Flächenvermessung;
- Anbindung an möglicherweise überwachte Sensordaten (Kräfte, Temperatur etc.) und andere Messwerkzeuge;
- Unterstützung beim Kopieren bestehender Schäden als Muster für neue Schäden;

- Keine Einschränkungen für hochgeladene Daten, z. B. Fotogröße, wie in SIB-Bauwerke;
- Unterstützung der Schadensbeurteilung direkt im Tool;

- Größe und Farbe der Kugeln für eine aussagekräftigere Darstellung der Schadensarten, des Ortes und des Status, d. h. zur Vermeidung von Doppelprüfungen und zum Nachweis, wer es wann geprüft hat;
- Untersuchung der Kopplung mit künstlicher Intelligenz zur automatischen Schadenserkennung;
- Priorisierung von Datensicherheit, z. B. automatische Erstellung von lokalen Kopien im Offline-Modus

7.4 Diskussion

Im Folgenden werden die Resultate in den Themenbereichen Usability, UI, und Programmschnittstellen, Lokalisierung, Qualität des Modells, Vorbereitung und Nachbesprechung sowie zusätzliche Funktionsweisen und Anregungen diskutiert. Besonders zu erwähnen ist, dass die Bewertung des Demonstrators aus Sicht der Teilnehmer verwirrend war, da wir die Bewertungsskalen für diese Frage umkehrten. Dies haben wir als Lektion gelernt: Bei künftigen Evaluationen werden wir das Bewertungssystem für jede Frage gleich halten.

7.4.1 Usability, UI und Programmschnittstellen

Insgesamt zeigten sich die Teilnehmer mit unserer Geräteauswahl einverstanden. Für die Anwendung in der Praxis sind die Akkulaufzeit und der Hardwareschutz entscheidend. Bei einigen Teilnehmern gab es Probleme mit den Handschuhen. Diese Interaktionen müssen selbstverständlich berücksichtigt werden, was bei unserer Nutzerstudie nicht gegeben war. Ein denkbarer Lösungsansatz wäre, die Brückenprüfer mit speziellen Handschuhen für die Bildschirmeingabe auszustatten oder andere Interaktionstechniken zu finden. Bezüglich der Nutzung unter schlechten Witterungsbedingungen können wir keinen Unterschied zum derzeitigen Status quo erkennen, da auch Stift und Papier unter diesen Bedingungen nur schwer zu verwenden sind. Insofern bietet aus unserer Sicht jede eingesetzte Methode Vor- und Nachteile.

Das Benutzeroberflächendesign unseres Prototyps ist einfach gehalten, sodass es Raum für Verbesserungen gibt. Die Buttons könnten von zusätzlichem Text oder Tooltips profitieren. Zudem wäre eine geführte Tour oder ein Tutorial von Vorteil, um neue Benutzer mit dem Programm vertraut zu machen. Auch das Design der Komponenten kann überarbeitet werden. Derzeit haben wir das Standarddesign von Unity und die Standardfarben verwendet. In Zukunft sollten nicht nur das Aussehen der Anwendung, sondern auch die Interaktionen überarbeitet werden. Sollte die Anwendung direkt ein Bild aufnehmen, wenn der Button zur Schadensaufnahme gedrückt wird? Auch wenn der Benutzer von einer schnellen Ein-Klick-Lösung profitiert, hat das Feedback gezeigt, dass er sich erst daran gewöhnen muss. Ein weiterer Diskussionspunkt ist die Art der Eingabe des Schadens: Manche Nutzer ziehen es vor, den Schaden per Sprachbefehl einzugeben (vorausgesetzt die Umgebung ist nicht zu laut). Wieder anderen gefällt die Texteingabemethode wegen ihrer Übersichtlichkeit. Was die Technik betrifft, so ist die Integration autarker Lösungen aufgrund der fehlenden Netzabdeckung im Inneren des Hohlkastens möglich.

Über die Zusammenführung von bereits bestehender Software mit dem Prototyp haben wir im Rahmen unserer Nutzerstudie mehrfach mit den Teilnehmern diskutiert. Diese sehen Potenzial in effizienteren Prozessen – insbesondere für die notwendigen Nachbesprechungs- und Nachbearbeitungsschritte. Denkbar ist, dass die Nachbearbeitung in Zukunft sogar überflüssig wird, da die Erfassung vor Ort und ohne Medienbrüche erfolgt. Potenziale bezüglich einer einheitlichen, einmaligen Datenerfassungslösung könnten erschlossen werden. Programmschnittstellen und APIs sind auch bei Erweiterungen von bestehender Schadenserfassungsoftware (SIB-Bauwerke) zu berücksichtigen. Derartige Schnittstellen bieten die Möglichkeit, Daten zwischen Anwendungen auszutauschen oder neue Anwendungen mit Daten zu versorgen. Für die Weiterentwicklung sehen wir drei Optionen: Schnittstellen, eine weitere Integration oder eine Harmonisierung, um mehrere Datenquellen in einem Datenmodell zu vereinen. In diesem Zusammenhang ist der von EHN beschriebene Widerspruch zwischen Tradition und Transzendenz und deren Ausgleich zu beachten. Neue Anwendungen und Workflows sollten bestehende Traditionen respektieren, werden aber selbst die Traditionen verändern, was auch als „dialektische Grundlage des Designs“ bezeichnet wird (EHN, 1993).

7.4.2 Qualität des Modells

Um die Darstellung des Modells in unserem Prototyp zu ermöglichen, mussten wir mehrere Vorbereitungsschritte durchführen, einschließlich der Ermittlung der geeigneten Export- und Reduktionsoptionen. Das Optimierungspotenzial für weitere Automatisierungen ist enorm. Um dies zu erreichen, müssen Austauschformate und Arbeitsabläufe weiter standardisiert werden und Visualisierungsumgebungen wie Unity sollten sie unterstützen. Dies ist auch im Hinblick auf openBIM wichtig, wo Dateiformate spezifiziert werden, die idealerweise von jedem verfügbaren Werkzeug genutzt werden können.

Hinsichtlich der Qualität des Modells war auffällig, dass einige Komponenten im BIM-Modell fehlten. Zudem war zu erkennen, dass das BIM-Modell den Status eines Planungsmodells hatte und nicht als As-Built-Modell verfügbar war. Insbesondere fiel auf, dass auf beiden Seiten fünf Spannglieder geplant waren, aber nur drei pro Seite installiert wurden. Die Teilnehmer bemerkten diese Punkte schon früh und hatten einige Fragen dazu.

Der erste Eindruck wird durch die Aussagen der Teilnehmer bestätigt. Um das Bauwerk mit einem solchen Demonstrator zu testen, ist ein As-Built-Modell des Bauwerks erforderlich. Insbesondere Details wie Bodenöffnungen und Anzahl der Spannglieder sind wichtig. Das heißt, dass nach der Fertigstellung das Bauwerk mit dem Planungsmodell verglichen wird, um den Bauwerksprüfern einen tatsächlichen Zwilling des realen Bauwerks übergeben zu können. Allerdings betrifft dies nicht nur die geometrischen Informationen, sondern auch Informationen über die Bauteile, wie z. B. das Material und die sonstigen Eigenschaften des Materials. Je detaillierter das As-Built-Modell entwickelt wird, desto genauer kann der Bauwerksinspektor einen Schaden beurteilen. Wie nachfolgend erläutert wird, gibt es noch nicht für jede Brücke ein Modell. Daher bedarf es auch für diese Fälle einer Option.

7.4.3 Lokalisierung

Hauptdiskussionspunkt bei der Lokalisierung war die Genauigkeit des Trackings und der Schadenserfassung. Während das Marker-Tracking eine hochpräzise Platzierung von virtuellen Objekten ermöglicht, ist die Genauigkeit von SLAM aufgrund der Häufung von Fehlern begrenzt. Eine weitere Option wäre die Verwendung von Labels oder be-

reits vorhandenen Teilen für das Tracking (z. B. Positionsanzeiger für die verschiedenen Sektoren der Brücke, falls vorhanden). Jedoch ist aufgrund des eingesetzten iPad Pro mit einer eingeschränkten Tracking-Genauigkeit zu rechnen. Experten sind sich hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit uneinig bzw. argumentieren, dass diese von Art und Ausmaß des Schadens abhängt. Beispielsweise lässt sich ein großflächiger Riss auch dann schnell identifizieren, wenn die Position der Schadensmarkierung einen halben Meter vom eigentlichen Schaden entfernt ist. Liegen jedoch mehrere Defekte in dichter Verteilung vor, so verlangen die Experten eine höhere Präzision. Im letzten Beispiel stellt auch die Größe der Schadenspunkte ein Problem dar. Der präsentierte Prototyp wird unpräzise, wenn mehrere Schadenspunkte zu nahe beieinander liegen, da sie sich in diesem Fall überschneiden würden. Ein Clustering dieser Schadenspunkte oder eine dynamische Anpassung des Kugeldurchmessers würde also helfen, die Schäden zu separieren. Hierfür könnten Taxonomien wie das von SHNEIDERMAN entwickelte Mantra zur Informationsvisualisierung hilfreich sein (SHNEIDERMAN, 1996).

Das Feedback enthielt auch den Wunsch, den Schadenspunkt näher an den Schaden zu rücken. In der derzeitigen Implementierung erfolgt die Lokalisierung des Schadens an der Stelle, an der der Benutzer das Bild aufnimmt. Unser Prototyp könnte von einer flexibleren Handhabung oder einer Trennung der Schadenslokalisierung von den übrigen Prozessen profitieren. Letzteres wiederum hieße, dass mehr Interaktion seitens des Benutzers erforderlich wäre – was ihm mehr Vielseitigkeit bieten würde.

7.4.4 Vorbereitung und Nachbesprechung

Für die Vorbereitung und Nachbesprechung einer Bauwerksprüfung kann der Demonstrator auf unterschiedliche Weise eingesetzt werden. Einerseits kann mithilfe der iPad-Anwendung gearbeitet werden, andererseits mit der Desktop-Anwendung auf Basis von AR oder VR. Die Teilnehmer der Evaluation sehen hier einen großen Mehrwert, insbesondere um sich im Vorfeld ein visuelles Bild des Schadens in der Umgebung zu machen, diesen aber auch im Nachhinein noch einmal visuell zu überprüfen und eine genaue Einschätzung vorzunehmen. Trotzdem sehen die Teilnehmer noch Optimierungsbedarf bei der Darstellung der Benutzeroberfläche und der Eingabe von Texten. Weiterhin ist es nicht

möglich, in der Vorbereitungsphase Notizen mit Schäden zu verknüpfen, die aber nicht in die Schadenserfassung einfließen sollen. Bei der Nachbearbeitung besteht nach Einschätzung eines Teilnehmers die Möglichkeit, die Schadensbewertung direkt in der Anwendung vorzunehmen, um Doppelpflege zwischen Anwendung und SIB-Bauwerken zu vermeiden, wobei der Mehrwert der Anwendung mehrfach betont wird. Allerdings merkten die Teilnehmer auch an, dass die Bewertung von Schäden mithilfe unseres Demonstrators mehr Zeit erfordert, was zu einem Widerspruch führt: Einerseits sehen die Teilnehmer das Potenzial, den Nachbearbeitungsaufwand zu verringern, andererseits scheint der Demonstrator manchmal auch vor Ort zu zeitaufwendig zu sein (zumindest für einige von ihnen). Dies unterstreicht das Potenzial für andere Eingabemethoden und eine optimierte Benutzeroberfläche und Benutzerfreundlichkeit für künftige Weiterentwicklungen.

Bezüglich der eingesetzten Hardware äußerten die Teilnehmer den Wunsch, mit einem einzigen Gerät alle Informationen an einem Ort zu haben. Trotzdem werden auch in Zukunft zusätzliche Werkzeuge wie Hämmer oder Rissmessgeräte von Nöten sein. Wir können uns aber vorstellen, dass es in Zukunft eine engere Verbindung zwischen digitalen Werkzeugen wie unserem Demonstrator und möglicherweise digitalisierten Werkzeugen gibt, um Daten direkt über Protokolle wie Bluetooth zu erfassen.

Ebenfalls von Bedeutung ist die mögliche Vorbereitung weiterer Nachfolgearbeiten, wie die Erstellung von Leistungsverzeichnissen und Plänen. Hier sehen wir viel Potenzial für die weitere Integration in organisatorische Abläufe. Im Sinne von BIM wäre es von Vorteil, wenn auch andere an derartigen Prozessen Beteiligte mit vergleichbaren Anwendungen auf die Daten zugreifen könnten, um so ein zentrales BIM-Modell und einen zentralen und aktuellen Informationsstand zu erhalten.

7.4.5 Funktionsweisen und weitere Anregungen

In unserer Nutzerstudie entstanden mehrere Funktionalitäten und Ideen. Zunächst wird verlangt, dass das System den aktuellen Schadensstatus kennt. Wir könnten Farben verwenden, z. B. rot, gelb und grün, um den Zustand für unbehandelt, erforderlich und behoben farblich zu kennzeichnen. Eine weite-

re Möglichkeit besteht in der Hervorhebung von Schäden. Die Datenstruktur unseres Prototyps erlaubt die Verarbeitung solcher Informationen, sodass eine Erweiterung mit geringem Aufwand möglich wäre. Die Teilnehmer hielten diese Schadenskugeln für bedenklich: Man könnte davon geblendet werden, nur nach den Kugeln anstatt nach den vorhandenen Schäden zu suchen. Das steht im Konflikt mit unserem Grundgedanken, die Brückenprüfer bei ihrer Arbeit zu unterstützen. Nach unserem Verständnis sollte die digitale Unterstützung nicht zu einer schlechten Qualität der Ergebnisse führen oder den Nutzer beeinträchtigen.

Mit Programmschnittstellen oder weiterer Einbindung in andere Programme lässt sich zudem eine Harmonisierung von Texten erreichen. Weitergehende Funktionalitäten wie das Messen auf Fotos oder das Zoomen und Filtern des Kamerabildes erfordern zusätzliche Datenerfassung oder erhöhen den Rechenaufwand für die MR-Umgebung.

Es existiert nicht für jedes Bauwerk und jede Brücke ein digitales Modell. In unserem Prototyp wird ein solches Modell derzeit benötigt und zur Lokalisierung von Schadstellen und zur Ausrichtung des virtuellen Modells an der realen Welt herangezogen. Jedoch wäre es möglich, auch Brücken ohne ein solches Modell zu unterstützen. Zur groben Orientierung könnte man also ein verallgemeinertes, einfaches Modell verwenden. Der Benutzer trägt in diesem Fall dazu bei, indem er grundlegende Parameter wie die Abmessungen der Brücke und gegebenenfalls eine grobe geometrische Schätzung eingibt. Die Marker sollten in diesem Fall ebenfalls flexibel sein, um dem Benutzer eine individuelle Einstellung zu gewährleisten. Zusätzlich schlugen die Teilnehmer vor, das Modell in kleinere Teile aufzuteilen, die auf mehrere Brückenprüfer aufgeteilt werden können, insbesondere bei großen Brücken. Dies steht in engem Zusammenhang mit der Frage, ob eine digitale Unterstützung für jede Bauwerksgröße sinnvoll ist. Während für größere Brücken ein solches System von Vorteil sein kann, ist die Einrichtung einer Anwendung wie unserem Demonstrator für kleinere Brücken möglicherweise nicht lohnenswert. Für größere Bauwerke wiederum könnte eine noch detailliertere Aufteilung vorteilhaft sein.

Wir haben festgestellt, dass wir unseren Prototyp auch auf andere Anwendungsfälle übertragen können. Ein Teilnehmer hatte den Gedanken, ein solches System möglicherweise für die Schadensbewertung an Lärmschutzwänden einzusetzen. Dort

sind die Schadensarten weniger vielfältig als z. B. bei Brücken. Das würde uns helfen, einen eher vertikalen Prototyp zu bauen statt eines eher horizontalen. Auch Tunnel und Gebäude im Allgemeinen kämen als Einsatzgebiete in Frage.

Ferner sprachen die Teilnehmer die Frage der Datensicherheit an. Das System kann Daten synchronisieren, wann immer eine Verbindung verfügbar ist. In unserer Nutzerstudie haben wir die Daten nur bei der Rückkehr ins Hauptmenü synchronisiert. Insofern besteht in der Tat Optimierungspotenzial hinsichtlich möglicher Datenverluste. Die Teilnehmer berichteten jedoch von Beispielen, bei denen Brückeninspektoren ihre Aufzeichnungen aufgrund von Wetterbedingungen oder Papierverlust verloren haben. Wir denken, dass es keine perfekte, 100 % datenverlustfreie Lösung gibt, die alle Fälle abdeckt. Eine lokale SD-Karte könnte hilfreich sein, um die Daten lokal zu sichern.

7.5 Nachbereitung der Demonstration mittels VR im Büro

Durch die Entwicklung des kollaborativen Moduls im Kapitel 6.3 sind zur Nachbereitung, bzw. zur direkten Kommunikation bereits während der Bauwerksprüfung, die gleichen Modelldaten, BIM-Informationen und Schadensdaten im VR-Modul zur Darstellung im Büro abrufbar. Voraussetzung ist dabei, dass die veränderlichen Schadensdaten aus der Bauwerksprüfung über das CDE-System bereitgestellt wurden.

Mittels der im Kapitel 6.1 beschriebenen Systeme und Entwicklungen können nach der vor-Ort Prüfung alle gespeicherten Schadensdaten aufgerufen und dargestellt werden. Die visuelle Darstellung unterscheidet sich dabei, technisch bedingt, nur mar-



Bild 116: Betrachtung der aufgenommenen Schadensinformationen mittels VR-Anwendung nach der Bauwerksprüfung

ginal von der AR-Anwendung. Ebenso bleibt es dem Anwender überlassen, ob er die Prüfungsergebnisse im Desktop-VR oder im HMD-VR Modus betrachten möchte. Anpassungen oder Veränderungen lassen sich ebenfalls zur aufgenommenen Prüfung vornehmen.

8 Handlungsempfehlung

Aussage eines Teilnehmers:

„Wir arbeiten wie die Urmenschen, das System hat großes Potenzial.“

Die Auswertung des MR-Prototyps mit realen Bauwerksprüfern hat gezeigt, dass eine Kombination der MR-Technologie mit der Methodik des Building Information Modelling eine Unterstützung bei der Prüfung von Brückenbauwerken bieten kann. Es wurde deutlich, dass der gesamte Prüfprozess von der Vorbereitung über die Durchführung bis zur Nachbereitung optimiert werden kann, indem relevante Informationen gebündelt zur Verfügung gestellt und verständlich dargestellt sowie ständig aktualisiert werden. Wie sich herausgestellt hat, sind derartige digitale Hilfsmittel für die Prüfer besonders vorteilhaft, da sie sich so umfassender auf ihre beruflichen Erfahrungen und Kenntnisse konzentrieren können.

In diesem Projekt haben von Anfang bis Ende der Entwicklung zur Herstellung eines Demonstrators Brückeninspektoren mit ihrem Fachwissen sowie der Kenntnis über die Anforderungen an ein Unterstützungsinstrument mitgearbeitet. So wurde sichergestellt, dass ihre relevanten Punkte sowie deren Bedürfnisse an ein Programm zur Unterstützung der Bauwerksprüfung berücksichtigt wurden. Zugleich wurde die Akzeptanz eines solchen Systems gefördert. Dies ist insbesondere bei der Brückenprüfung mit ihrer langen Tradition unabdingbar, damit die Entwicklungen aus der Forschung auch in Zukunft in die Praxis einfließen können. Entscheidend für die weitere Forschung wird auch sein, Konzepte und neue Verfahren, wie in diesem Fall, zunächst in einem Pilotversuch zu demonstrieren, um Tests und Rückmeldungen von potenziellen Anwendern zu ermöglichen. Auf diese Weise können in der realen Umgebung Rückschlüsse darauf gezogen werden, ob eine Entwicklung für die Brückenprüfung eine tatsächliche Unterstützung bedeutet.

Angesichts der aktuellen und zukünftigen Forschung in diesem Bereich wird es besonders relevant sein, die rasante Entwicklung der digitalen Technologien zu verfolgen. Dabei sollen Potenziale für ein optimiertes Lebenszyklusmanagement von Brückenbauwerken frühzeitig erkannt und mit Best Practices in Einklang gebracht werden. Weitergehende Unterstützungsmöglichkeiten werden beispielsweise in der künstlichen Intelligenz zur Analyse der bei Brückeninspektionen erfassten Daten gesehen. Mit dieser Technologie könnten Schäden vorselektiert und Informationen auf intelligente Weise bereitgestellt werden. Ein weiteres Potenzial liegt in der Kartierung und Ableitung des Bauwerkszustands und der Prognose auf der Basis großer Datenmengen. Dabei nimmt der Bauwerksprüfer mit seiner fachlichen Erfahrung und seinem Wissen jedoch immer eine zentrale Rolle ein. Die Kombination von CSCW und AR/MR (wie bereits von (ENS et al., 2019) beschrieben) für BIM erscheint uns vielversprechend, da die Arbeit des Brückenprüfers zu großen Teilen in der Brücke stattfindet und daher von einer mobilen Computerunterstützung in der Tradition der in drei Jahrzehnten CSCW-Forschung gesammelten Erfahrungen in der mensch-zentrierten Gestaltungen kooperativer Systeme profitieren kann. Weitergehende Ausführungen dazu finden sich im Beitrag zum Plenarvortrag „Kooperationsmöglichkeiten mit Mixed Reality“ auf dem 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur (OPPERMANN, 2021).

Die praktische Prüfung des Demonstrators ist zum jetzigen Zeitpunkt der erste Schritt, um die Technologiereife einer solchen Anwendung zu bestimmen. Jedoch ist zu sagen, dass auf Grundlage der Untersuchungen im Forschungsprojekt und der während der Evaluation gesammelten Ergebnisse die Anwendung sich bereits in der experimentellen Entwicklung befindet. Hingegen ist der Weg zu Marktreife noch nicht erreicht. Vor allem der Anwendungsbereich eines solchen Demonstrators sollte in den nächsten Schritten definiert werden. Hierbei besteht beispielsweise die Möglichkeit, den Demonstrator an unterschiedlichen Bauwerksarten mit einem erweiterten Kreis an Nutzern kontinuierlich zu testen. Als mögliche weitere Bauwerksarten könnten Tunnelbauwerke, Stützwände sowie Lärmschutzwände dienen.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der zukünftigen Bearbeitung ist die Schnittstelle zwischen dem Demonstrator und SIB-Bauwerke. Zum jetzigen Zeitpunkt kann kein direkter Datenaustausch zwischen

den beiden Medien stattfinden, sodass dementsprechend keine lückenlose Bearbeitung der Bauwerksprüfung erfolgt. Hierzu werden die während der Bauwerksprüfung gesammelten Daten so bereitgestellt, sodass diese direkt durch eine entsprechende Schnittstelle in SIB-Bauwerke überführt werden können.

Alternativ ist denkbar, die Funktionen des Demonstrators in einer künftigen SIB-Bauwerke Version zu integrieren, um so die Vorteile beider Programme zu fusionieren und nutzen zu können. Eine Definition einer Schnittstelle würde entfallen, das Verlorengehen von Informationen bei der Übertragung von Daten wäre ebenso ausgeschaltet und die Bearbeitung sowohl vor, während und nach der Prüfung eines Bauwerks würde erheblich beschleunigt.

Technisch gesehen ist eine Weiterentwicklung des Systems, insbesondere mit Blick auf die Flexibilität, in Bezug auf die hinterlegten Marker, empfehlenswert. Hier wäre eine engere Verknüpfung mit dem Modell denkbar, sodass die Marker direkt dort hinterlegt werden könnten und für den Demonstrator von dort mit der entsprechenden Position ausgelesen werden können. Derzeit sind die Marker fest in der Anwendung hinterlegt und können nicht ohne einen neuen Build ersetzt werden. Mit der vorgeschlagenen Anpassung könnten die Marker ebenso synchronisiert werden, wie die anderen Daten (z. B. Bauwerksinformationen, Schadensdaten oder zusätzliche Dokumente). Weiterhin wäre es perspektivisch denkbar, das System weiter zu flexibilisieren, indem man Anpassungen an der Markerposition oder am Markerbild vor Ort erlaubt, die dann wieder in das Modell zurückgeführt werden.

Für die Immersion der Brückeninspektionsanwendung spielt die Qualität des 3D-Modells eine wichtige Rolle. Bei der Evaluierung wurde ein As-Planned-Modell einer Brücke verwendet. Dies sorgt bei den Brückeninspektoren für Verwirrung, da zwischen dem virtuellen Modell und der realen Brücke kein einheitlicher Zustand besteht. Eine Erweiterung der Modellinformationen in Richtung des As-Built-Modell wird für die Zukunft empfohlen.

Ein weiterer Punkt, der interessant für eine Integration sein könnte, in diesem Projekt aber noch nicht umgesetzt wurde, ist das GPS. Derzeit stützt sich das System rein auf die visuellen Informationen der Kamera sowie – im Rahmen des SLAM – auf die anderen verbauten Sensoren (z. B. Beschleunigungssensor, Gyroskop). GPS könnte für den Au-

ßenbereich die Lokalisierung unterstützen. Im Innenbereich (im Hohlkasten) und unter der Brücke sind aufgrund der Abschirmung der Satellitensignale andere Lokalisierungsverfahren wie SLAM in Kombination mit markerbasiertem Tracking vorzuziehen. Ebenso ist die weitere Entwicklung neuer technischer Geräte, wie Tablets oder Smartglasses, und Frameworks zu beobachten und bei der Weiterentwicklung des Demonstrators oder neuer Anwendungen zu berücksichtigen.

Selbstverständlich ist auch eine weitere Anpassung des User Interface angeraten. Die derzeitige Umsetzung mag zwar funktional sein und die wesentlichen Eingabemöglichkeiten abdecken. Jedoch ist eine Überarbeitung und kontinuierliche Anpassung unter Berücksichtigung von vorgegebenen Designrichtlinien, aber auch unter gleichzeitiger Achtung der Bedürfnisse der Endnutzer durchzuführen. Hinzu kommen die Entwicklungen der Hard- und Softwarehersteller der genutzten Systeme, welche einen kontinuierlichen Erweiterungsprozess in das System einbringen können. So wurde die Speech-to-Text-Eingabe, welche ebenfalls als Begeisterungsmerkmal angesehen wurde, in den vergangenen Jahren von den hiesigen Softwarekonzernen stetig verbessert und implementiert. Eine entsprechende Nutzung im System zur sprachgestützten Schadensaufnahme, welche direkt in eine SIB-Bauwerke Kategorisierung eingestuft wird, könnte künftig entwickelt werden. Heutige Systeme verlieren, insbesondere in der Offline-Anwendung, an Robustheit der Nutzungsmöglichkeit.

Die Anpassung von Normen, Richtlinien oder Arbeitsanweisungen sollten im Umgang mit digitalen Medien definiert werden. So sollten ggf. vorhandenen Schnittstellen, Dateiformate, aber auch Arbeitsprozesse zur Erstellung von z. B. Bauwerkbüchern und Prüfberichten also dem Anlernen von Programmen klar definiert werden. Aktuell handelt es sich bei der digital unterstützten Brückenprüfung durch den Einsatz von AR und VR um eine eigenständige Lösung. Die Inhalte und Aufgaben aus der DIN 1076 werden dabei berücksichtigt und sollen hier in Zukunft stärker integriert werden. Ein Ansatz dafür könnte die automatisierte Übernahme von erfassten Schäden in amtliche Prüfprogramme sein. Darüber hinaus ist eine Integration von AR-Methoden direkt in die amtlichen Prüfprogramme anzustreben, um eine geschlossene Prüfroutine zu erzielen. Zusätzlich ist eine Verbindung mit anderen Datenbanken in Betracht zu ziehen. Dadurch könnten wichtige Informationen für die Prüfung in die AR-

Prüfung integriert werden, wie z. B. Überwachungsdaten.

Auch der Austausch der Informationen mit weiteren Programmen z. B. zur Berechnung der Standsicherheit bestehender Bauwerke unter Berücksichtigung des Schadensbildes oder die Anbindung an die Auswirkung der Schädigungen an Verkehrssysteme sollte berücksichtigt werden. Der Austausch mit Dritten (Deutsche Bahn, Verkehrssicherer, Ordnungsämter etc.) sollte über ein Programm wie den Demonstrator erfolgen. Im Rahmen von Empfehlungen zur Ausstattung von Bauwerken könnten künftig EDV-Systeme zur Integration von z. B. WLAN-Netzen aufgenommen werden.

Des Weiteren muss der hohe Sicherheitsstandard der Brückenprüfung nach den bestehenden Vorschriften aufrechterhalten werden. Unter diesem Gesichtspunkt müssen die digitalen Unterstützungswerkzeuge aus der Forschung letztlich auch in die Regelwerke einfließen, um ihren Weg in die Praxis zu finden. In Deutschland ist hier insbesondere die weitere Übernahme der DIN 1076 zu nennen. Gleichmaßen müssen die Beschaffungsprozesse für Soft- und Hardware im öffentlichen Bereich den Einsatz von MR und VR berücksichtigen. Die Unterstützung durch digitale Technologien sollte zukünftig nutzerzentriert betrachtet werden, unabhängig von der verwendeten spezifischen Technologie.

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Motivation, digitale Hilfsmittel zu nutzen, bei den Brückeninspektoren hoch ist. Die Bauwerksprüfer in der Demonstration erläuterten, dass sie auf bessere und geeignetere Werkzeuge warten. Ein Teilnehmer erklärte: „Wir arbeiten wie die Urmenschen, das System hat großes Potenzial.“ Andere fragten: „Wo kann man das kaufen?“ Deshalb wurde der Eindruck gewonnen, dass mit der Grundidee des Demonstrators einen Nerv getroffen wird. Wir vertreten daher die Auffassung, dass es in diesem Bereich ein großes Potenzial für weitere Entwicklungen gibt. Es ist erforderlich, den rechtlichen Rahmen entsprechend anzupassen und dabei die lange Tradition im Bereich der Bauwerksprüfung zu respektieren.

9 Ausblick

Das Forschungsprojekt hat aufgezeigt, dass die Technologien, technische Möglichkeiten und Potenziale zur Entwicklung einer Anwendung zur digita-

len Bauwerksprüfung vorhanden sind. Auch die befragten Bauwerksprüfer und -betreiber, welche auf Grundlage der Evaluation die Möglichkeit hatten, den Demonstrator zu testen, fordern die nächsten Schritte zur digitalen und modellbasierten Schadensermittlung. Die Begeisterung und Motivation zur Nutzung digitaler Anwendungen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 wurden erkannt, aufgezeigt und konnten durch die Prüfer übertragen werden. Somit sind bereits Erwartungen an die Weiterentwicklung der AR- und VR-Version für den adaptiven und täglichen Gebrauch gesetzt worden.

Generell ist die Rolle der Nutzer hervorzuheben für die Entwicklung neuer Anwendungen wie des Demonstrators und dessen Weiterentwicklungen. Hierbei sollte auch zukünftig ein nutzerzentrierter Entwicklungsprozess mit iterativem Design – unter Berücksichtigung von Wissen und Entwicklungen aus den Bereichen CSCW, BIM und AR/VR – angewendet werden. Auf der einen Seite sind zwar die technologischen Fortschritte zu beobachten und mit Weiterentwicklungen und Forschungsvorhaben zu begleiten, zum anderen sollte dabei aber nie der Anwender aus dem Fokus der Entwicklung geraten. Zusätzliche Infrastruktur, wie Netzwerke in den Bauwerken oder die Nutzung weiterer Elemente der Bauwerke als Referenzpunkte, sind dabei zu integrieren. Dabei sollte die Visualisierung durch AR und VR ebenso ganzheitlich im Prozess mitgedacht werden wie auch die Interaktion mit den vorhandenen BIM-Daten. Durch weitere digitale Hilfsmittel kann eine weitere Unterstützung vor Ort erfolgen und so der Nachbearbeitungsprozess verkürzt oder zumindest effizienter gestaltet werden.

Ein weiterer Aspekt ist die Anbindung der hier entwickelten Anwendung an SIB-Bauwerke. Dieser Punkt wurde zwar im Kapitel 2.5 aufgezeigt, aufgrund nicht ausreichender Schnittstellen nicht weiterverfolgt. Momentan existiert daher keine Übergabe der Informationen aus der Bauwerksprüfung an SIB-Bauwerke, um die Ergebnisse zu übergeben und zu protokollieren. Hierfür bedarf es der Entwicklung einer funktionierenden und robusten Schnittstelle zwischen beiden Systemen. Somit sollte die Weiterentwicklung des Systems und die Verknüpfung mit SIB-Bauwerke in Erwägung gezogen werden. Hier muss ein adaptives System entwickelt werden, welches sowohl autark als auch eine permanente Verknüpfung zu den online-verfügbaren Daten von SIB-Bauwerke vorhält. Vor allem die Einbindung von BIM und des 3D-Modells sollte in SIB-Bauwerke eingepflegt werden. Durch

diesen weiterführenden Ansatz könnte die Digitalisierung konsequent weiterverfolgt werden – von der Modellerstellung und Bauwerksplanung, mithilfe von BIM, bis hin zur Bauwerkserhaltung und -prüfung.

Zur Nutzung einer Anwendung als unterstützendes Medium bei der Bauwerksprüfung ist es von enormer Wichtigkeit, einheitliche Rahmenbedingungen zu schaffen. Vor allem bei der Einbindung eines 3D-Modells und den zugehörigen Bauwerksinformationen kommt es sowohl auf die Modellierungsweise und folglich auf die Detaillierungstiefe an. Hier ist es notwendig, eine klare Festlegung zu treffen, auf welcher Grundlage das Modell eingebunden wird. Dabei könnte man sich am Level of Detail des erstellen digitalen Modells als Zielvorgabe orientieren. Aufbauend darauf ist notwendigerweise festzulegen, in welcher Weise ein As-Build-Modell relevant ist. Sollte ein As-Build-Modell genutzt werden, ist die Überprüfung zwischen Planung und Ausführung relevant. Hierzu muss ein Abgleich durchgeführt werden. Diese Fragen sind von erheblicher Bedeutung, um den Bauwerksprüfer bereits bei der Vorbereitung der Bauwerksprüfung einen bestmöglichen Eindruck der Realität geben zu können. Des Weiteren sollte eine Untersuchung durchgeführt werden, welchen Mehrwert die Einbindung eines Umgebungsmodells mit sich bringen kann. Hierbei spielt vor allem das Thema Verkehrssicherungsplanung sowie Aufstandsflächen für notwendige Arbeitsbühnen, Parkflächen und weitere eine Rolle.

Auch die Einbindung von Monitoringdaten durch dauerhaft oder temporär angebrachte Messwerkzeuge am Bauwerk könnten in eine solche Anwendung integriert werden. Auf Grundlage der im Forschungsprojekt erhaltenen Monitoringdaten gilt es jedoch, zu untersuchen, in welchem Umfang die Daten eingebunden werden sollten und welche für eine Bauwerksprüfung von Relevanz sind. Für die Bauwerksprüfer müssen die abzuleitenden Informationen aus den Monitoringdaten vor Ort übersichtlich gestaltet werden. Sollte es die Möglichkeit eines Echtzeitzugriffes im Bauwerk geben, ist es auch hier notwendig, mittels einer Schnittstelle oder durch Algorithmus die Daten direkt auswerten zu können.

Zusammenfassend haben die im Forschungsprojekt entwickelten Anwendungen die Potenziale, den Bauwerksprüfer kontinuierlich bei seiner Arbeit zu unterstützen. Insbesondere die Zeitersparnis durch

mühseliges Vor- und Nachbereiten wird nachhaltig reduziert. Ein großer Mehrwert für den Bauwerksprüfer ist vor allem die lückenlose Protokollierung von Schäden über den Lebenszyklus eines Bauwerks. Durch die direkte Einbindung von Bildaufnahmen und die Verortung der Schäden durch die Bauwerksprüfer ist ein großer Mehrwert für Bauwerksprüfer und Bewirtschafter des Bauwerks entstanden.

Auch die Hersteller von Peripherie wie z. B. PSA, Messgeräten etc. sind aufgefordert, neue Geräte zu entwickeln, die nicht nur Daten erfassen, sondern auch die gesammelten Informationen u. a. in geeigneten Sicherheitsbrillen darzustellen. Auch könnten integrierte Messgeräte beispielsweise Risse erfassen.

„Schluss mit der Zettelwirtschaft“ – ein Statement, mit dem das Projekt als Ziel gestartet ist. Die Basis zum Kern des Statements konnte in diesem Projekt aufgezeigt und dargestellt werden. Allerdings nur durch eine konsequente Weiterentwicklung, sowohl technologisch als auch bei den Rahmenbedingungen, kann die Digitalisierung im Bereich der Bauwerksprüfung und -erhaltung Einzug erhalten.

Literatur

- ABELN, O., ed., 1995. CAD-Referenzmodell: zur arbeitsgerechten Gestaltung zukünftiger computergestützter Konstruktionsarbeit. Stuttgart: Teubner.
- ABOWD, G.D., ATKESON, C.G., HONG, J., LONG, S., KOOPER, R., and PINKERTON, M., 1997. Cyberguide: A mobile context-aware tour guide. *Wireless Networks* [online]. 3, pp. 421–433. Available from: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=272186.272199&coll=Portal&dl=ACM&CFID=7018182&CFTOKEN=51569678>.
- ALBRECHT, M., 2014. Building Information Modeling (BIM) in der Planung von Bauleistungen. disserta Verlag.
- Anon., 1999. DIN 1076:1999-11, Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung [online]. Beuth Verlag GmbH. Available from: <https://www.beuth.de/de/-/23474630> [Accessed 15 May 2020].
- Anon., 2013. Bauwerksprüfung nach DIN 1076 [online]. [online]. Available from: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/dokumentation-bauwerkspruefung-nach-din-1076.pdf?__blob=publicationFile [Accessed 14 May 2020].
- Anon., 2016. OKSTRA-WFS [online]. [online]. Available from: <http://www.okstra.de/docs/n-dokumente/n0112.pdf> [Accessed 6 Oct 2020].
- Anon., 2017. Bauwerksprüfung RI-EBW-PRÜF – BAsT 2017 [online]. [online]. Available from: https://www.bast.de/BAsT_2017/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/b4-Bauwerkspruefung-RI-EBW-PRUEF/b4-Bauwerkspruefung-RI-EBW-PRUEF.html [Accessed 15 May 2020].
- Anon., 2018a. VDI 2552 Blatt 5 – Building Information Modeling – Datenmanagement [online]. Available from: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2552-blatt-5-building-information-modeling-datenmanagement> [Accessed 24 Apr 2020].
- Anon., 2018b. 3D Laser Scanning for Heritage | Historic England [online]. [online]. Available from: <http://historicengland.org.uk/images-books/publications/3d-laser-scanning-heritage/> [Accessed 19 Oct 2020].
- Anon., 2019. DIN EN ISO 19650-1:2019-08, Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung_ (BIM)_ - Informationsmanagement mit BIM_ - Teil_1: Begriffe und Grundsätze (ISO_19650-1:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_19650-1:2018 [online]. Beuth Verlag GmbH. Available from: <https://www.beuth.de/de/-/299953244> [Accessed 20 Apr 2020].
- Anon., 2020a. DIE INITIATIVE: Planen, Bauen und Betreiben in Deutschland. planen-bauen 4.0 [online]. Available from: <https://planen-bauen40.de/> [Accessed 18 May 2020].
- Anon., 2020b. buildingSMART. buildingSMART International [online]. Available from: <https://www.buildingsmart.org/> [Accessed 22 May 2020].
- Anon., 2020c. Model View Definitions (MVD). buildingSMART Technical [online]. Available from: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/mvd/> [Accessed 28 May 2020].
- Anon., 2020d. IFC-Tunnel – IFCINFRA. Blog [online]. 28 May. Available from: https://ifcinfra.de/ifc_tunnel/ [Accessed 28 May 2020].
- Anon., 2020e. IFC Release Notes. buildingSMART Technical [online]. Available from: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/ifc-release-notes/> [Accessed 29 May 2020].
- Anon., 2020f. BIM Collaboration Format (BCF). buildingSMART Technical [online]. Available from: <https://technical.buildingsmart.org/standards/bcf/> [Accessed 28 May 2020].
- Anon., 2020g. RDF – Semantic Web Standards [online]. [online]. Available from: <https://www.w3.org/RDF/> [Accessed 14 May 2020].
- Anon., 2020h. OWL – Semantic Web Standards [online]. [online]. Available from: <https://www.w3.org/OWL/> [Accessed 14 May 2020].
- Anon., 2020i. ifcOWL. buildingSMART Technical [online]. Available from: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-formats/ifcowl/> [Accessed 14 May 2020].
- Anon., 2020j. WPM Ingenieure GmbH [online]. [online]. Available from: http://www.wpm-ingenieure.de/include.php?path=sib_bauwerke&pid=21&subid=35 [Accessed 15 May 2020].

- Anon., 2020k. Öffentliche Ausschreibung Bergisch Gladbach 2017 Z1b-AUS.3.9.8.2.4 – SIB-Bauwerke 2 – Realisierung. Referenznummer der Bekanntmachung: Z1b-AUS.3.9.8.2.4 2017-03-24 [online]. [online]. Available from: https://ausschreibungen-deutschland.de/345825_Z1b-AUS39824_-_SIB-Bauwerke_2_-_RealisierungReferenznummer_der_Bekanntmachung_2017_Bergisch_Gladbach [Accessed 15 May 2020].
- Anon., 2020l. Trimble Connect Lizenzen. Tekla [online]. Available from: <https://www.tekla.com/de/produkte/trimble-connect/die-richtige-trimble-connect-lizenz-w%C3%A4hlen> [Accessed 13 May 2020].
- Anon., 2020m. Projectwise 365 | BIM Collaboration By Bentley [online]. [online]. Available from: [/en/products/product-line/project-delivery-software/projectwise-365](https://en/products/product-line/project-delivery-software/projectwise-365) [Accessed 14 May 2020].
- Anon., 2020n. dRofus [online]. [online]. Available from: <https://www.drofus.no/en/product.html> [Accessed 14 May 2020].
- Anon., 2020o. Viewpoint for Projects – Digital Marketplace [online]. [online]. Available from: <https://www.digitalmarketplace.service.gov.uk/g-cloud/services/409552161937548> [Accessed 13 May 2020].
- Anon., 2020p. Asite, cloud collaboration system for seamless collaboration across disciplines. [online]. [online]. Available from: <https://www.asite.com> [Accessed 13 May 2020].
- Anon., 2020q. Share AR Experiences with Cloud Anchors | ARCore (1.16.0) [online]. [online]. Available from: <https://developers.google.com/ar/develop/java/cloud-anchors/overview-android> [Accessed 30 Apr 2020].
- Anon., 2020r. buildingSMART/BCF-XML. GitHub [online]. Available from: <https://github.com/buildingSMART/BCF-XML> [Accessed 19 Oct 2020].
- Autodesk, 2003. Autodesk White Paper. [online]. Available from: http://www.laiserin.com/features/bim/autodesk_bim.pdf [Accessed 27 May 2020].
- AZUMA, R. T., 1997. A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments [online]. 6 (4), pp. 355–385. Available from: <http://www.mitpressjournals.org/doi/10.1162/pres.1997.6.4.355> [Accessed 6 Mar 2017].
- BACHYNSKYI, M., PALMAS, G., OULASVIRTA, A., STEIMLE, J., and WEINKAUF, T., 2015. Performance and Ergonomics of Touch Surfaces: A Comparative Study using Biomechanical Simulation. In: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems [online]. Seoul, Republic of Korea: Association for Computing Machinery. pp. 1817–1826. Available from: <https://doi.org/10.1145/2702123.2702607> [Accessed 20 May 2020].
- BAHL, P. and PADMANABHAN, V.N., 2000. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system. In: Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064). pp. 775–784 vol. 2.
- BAHLAU, S. and KLEMT-ALBERT, K., 2018. Evaluations on the potentials of Building Information Modeling. Bauingenieur. 93, pp. 286–294.
- BAIER, C.K., 2016. Entwicklung eines Prozessmodells für den holistischen Einsatz der BIM Methodik im nachhaltigen öffentlichen Bauen. [online]. [online]. Available from: http://digdok.bib.thm.de/volltexte/2016/5072/pdf/promo_cb_20160107_de_final_II.pdf [Accessed 20 May 2020].
- BALDWIN, M., 2018. Der BIM-Manager: praktische Anleitung für das BIM-Projektmanagement. 1. Auflage. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH.
- BAS, 2020. ASB-ING und SIB-Bauwerke [online]. [online]. Available from: https://www.bas.de/BAS_2017/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/b4-bauwerksdaten.html [Accessed 15 May 2020].
- BASU, D. and KUMAR, S. S., 1995. Importing mesh entities through IGES/PDES. Advances in Engineering Software. 23 (3), pp. 151–161.
- BAZJANAC, V., 1997. The implementation of Industry Foundation Classes in simulation tools for the building industry. p. 8.
- BCA SINGAPORE, 2013. Singapore BIM Guide, Version 2 [online]. [online]. Available from:

- https://www.corenet.gov.sg/media/586132/Singapore-BIM-Guide_V2.pdf [Accessed 28 May 2020].
- BEETZ, J., VAN LEEUWEN, J., and DE VRIES, B., 2009. IfcOWL: A case of transforming EXPRESS schemas into ontologies. *Ai Edam*. 23 (1), pp. 89–101.
- BENRATH, B., 2019. Cloud aus Deutschland: Die Suche nach dem Hyperscaler. *FAZ.NET* [online]. 4 October. Available from: <https://www.faz.net/1.6411233> [Accessed 30 Jun 2020].
- BENTLEY, R., APPELT, W., BUSBACH, U., HINRICH, E., KERR, D., SIKKEL, K., TREVOR, J., and WOETZEL, G., 1997. Basic support for cooperative work on the World Wide Web. *International Journal of Human-Computer Studies* [online]. 46 (6), pp. 827–846. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581996901081> [Accessed 29 Jan 2015].
- BERGMEISTER, K., FINGERLOOS, F., and WÖRNER, J.-D., 2018. *Beton-Kalender 2018: Schwerpunkte: Instandsetzung*. John Wiley & Sons.
- BILLINGHURST, M., CLARK, A., and LEE, G., 2015. A Survey of Augmented Reality [online]. *A Survey of Augmented Reality*. now. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8186839>.
- BIMBER, O. and RASKAR, R., 2005. *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds: A Modern Approach to Augmented Reality*. Wellesley, Mass: A K Peters Ltd.
- BIME INITIATIVE, 2018. Die BIME Initiative eine Einführung [online]. [online]. Available from: <https://bimexcellence.org/files/The-BIME-Initiative-171001-German.pdf> [Accessed 28 May 2020].
- BLOOR, M. and OWEN, J., 1995. 1995, *Product data exchange*. London: UCL Press.
- Bluetooth Special Interest Group, 2010. *Bluetooth 4.0 Core Specification*. Bluetooth 4.0 Core Specification [online]. Available from: https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=478726 [Accessed 7 May 2020].
- BLUM, L., WETZEL, R., MCCALL, R., OPPERMANN, L., and BROLL, W., 2012. The final TimeWarp: Using Form and Content to Support Player Experience and Presence when Designing Location-Aware Mobile Augmented Reality Games. In: *Designing Interactive Systems* [online]. Presented at the Designing Interactive Systems, Newcastle. Available from: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2318064>.
- BMVI, 2015a. Reformkommission Bau von Großprojekten, Endbericht. [online]. Available from: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/reformkommission-bau-grossprojekte-endbericht.pdf?__blob=publicationFile [Accessed 27 May 2020].
- BMVI, 2015b. *BMVI – Digitales Planen und Bauen*.
- BMVI, 2015c. *Stufenplan Digitales Planen und Bauen* [online]. Available from: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.html> [Accessed 28 May 2020].
- BMVI, 2017. *Strategiepapier Masterplan Bauen 4.0*. [online]. Available from: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/strategiepapier-masterplan-bauen.pdf?__blob=publicationFile [Accessed 27 May 2020].
- BMVI, 2019a. *BIM4INFRA2020 Handreichungen Teil 1* [online]. [online]. Available from: https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/07/BIM4INFRA2020_AP4_Teil1.pdf [Accessed 27 May 2020].
- BMVI, 2019b. *BIM4INFRA2020 Handreichungen Teil 6* [online]. [online]. Available from: https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/07/BIM4INFRA2020_AP4_Teil6.pdf [Accessed 27 May 2020].
- BOLOURIAN, N., SOLTANI, M., ALBAHRIA, A., and HAMMAD, A., 2017. High level framework for bridge inspection using LiDAR-equipped UAV. In: . Presented at the ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, IAARC Publications.
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C., and BEETZ, J., 2015. *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer-Verlag.
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C., and BEETZ, J., eds., 2018. *Building Information*

- Modeling: Technology Foundations and Industry Practice [online]. Springer International Publishing. Available from: <https://www.springer.com/de/book/9783319928616> [Accessed 13 May 2020].
- BORRMANN, A., MUHIČ, S., HYVÄRINEN, J., CHIPMAN, T., JAUD, S., CASTAING, C., DU-MOULIN, C., LIEBICH, T., and MOL, L., 2019. The IFC-Bridge project – Extending the IFC standard to enable high-quality exchange of bridge information models. In: Proceedings of the 2019 European Conference for Computing in Construction.
- BRAMANN, H. and MAY, I., 2015. BMVI – Digitales Planen und Bauen. [online]. Available from: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/digitales-bauen.html> [Accessed 14 May 2020].
- BROLL, W., LINDT, I., OHLENBURG, J., WITTKÄMPER, M., YUAN, C., NOVOTNY, T., FATAH GEN. SCHIECK, A., MOTTRAM, C., and STROTHMANN, A., 2004. ARTHUR: A Collaborative Augmented Environment for Architectural Design and Urban Planning. *JVRB – Journal of Virtual Reality and Broadcasting* [online]. 1(2004) (1). Available from: <http://www.jvr.org/past-issues/1.2004/34>.
- BROOKS, F.P., Jr., 1987. Walkthrough—a Dynamic Graphics System for Simulating Virtual Buildings. In: Proceedings of the 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics [online]. New York, NY, USA: ACM. pp. 9–21. Available from: <http://doi.acm.org/10.1145/319120.319122> [Accessed 11 May 2016].
- BURDEA, G. C., COIFFET, P., 2003. *Virtual Reality Technology*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Son.
- CHEN, C., LU, X., MARKHAM, A., and TRIGONI, N., 2018. IONet: Learning to Cure the Curse of Drift in Inertial Odometry. arXiv:1802.02209 [cs] [online]. Available from: <http://arxiv.org/abs/1802.02209> [Accessed 5 May 2020].
- CLASSEN, K., 2013. Zur Psychologie von Technikakzeptanz im höheren Lebensalter: Die Rolle von Technikgenerationen. Dissertation. [online]. Available from: <https://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/14295/> [Accessed 20 May 2020].
- CZAJA, S. J., CHARNESS, N., FISK, A. D., HERTZOG, C., NAIR, S. N., ROGERS, W. A., and SHARIT, J., 2006. Factors predicting the use of technology: Findings from the center for research and education on aging and technology enhancement (create). *Psychology and Aging*. 21 (2), pp. 333–352.
- VAN DAM, A., 1997. Post-WIMP user interfaces. *Communications of the ACM* [online]. 40 (2), pp. 63–67. Available from: <https://doi.org/10.1145/253671.253708> [Accessed 4 May 2020].
- DANG, N. and SHIM, C., 2020. BIM-based innovative bridge maintenance system using augmented reality technology. In: C. HA-MINH, D.V. DAO, F. BENBOUDJEMA, S. DERRIBLE, D.V.K. HUYNH and A.M. TANG, eds. *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*. Singapore: Springer. pp. 1217–1222.
- DEGES, 2019. Digitales Planen und Bauen bei der DEGES. [online]. Available from: https://www.deges.de/wp-content/uploads/2019/08/1_DEGES-BIM-Leitfaden_V15.pdf [Accessed 18 May 2020].
- DELMERICO, J. and SCARAMUZZA, D., 2018. A Benchmark Comparison of Monocular Visual-Inertial Odometry Algorithms for Flying Robots. In: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Presented at the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 2502–2509.
- DIAKITÉ, A., 2018. About the Geo-referencing of BIM models.
- DICKINSON, P., CIELNIAK, G., SZYMANEZYK, O., and MANNION, M., 2016. Indoor positioning of shoppers using a network of Bluetooth Low Energy beacons. In: 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Presented at the 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). pp. 1–8.
- DONATH, D., 2009. *Baufaufnahme und Planung im Bestand: Grundlagen – Verfahren – Darstellung – Beispiele*. Springer-Verlag.
- DÖRNER, R., BROLL, W., GRIMM, P. F., and JUNG, B., eds., 2013. *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der*

- Virtuellen und Augmentierten Realität. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- DÖRNER, R., GEIGER, C., OPPERMANN, L., and PAELKE, V., 2013. Interaktionen in Virtuellen Welten. In: R. DÖRNER, W. BROLL, P. GRIMM and B. JUNG, eds. *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp. 157–193. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-28903-3_6 [Accessed 4 May 2020].
- EASTMAN, C., FISHER, D., LAFUE, G., LIVIDINI, J., STOKER, D., and YESSIOS, C., 1974. An Outline of the Building Description System. [online]. Available from: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED113833.pdf> [Accessed 27 May 2020].
- EHN, P., 1993. Scandinavian Design: On Participation and Skill. In: D. SCHULER and A. NAMIOKA, eds. *Participatory Design: Principles and Practices*. Lawrence Erlbaum Associates. pp. 41–77.
- ENS, B., LANIR, J., TANG, A., BATEMAN, S., LEE, G., PIUMSOMBOON, T., and BILLINGHURST, M., 2019. Revisiting collaboration through mixed reality: The evolution of groupware. *International Journal of Human-Computer Studies* [online]. 131, pp. 81–98. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581919300606> [Accessed 30 Aug 2019].
- ENTZIAN, K., 2015. BIM für das Facility Management. In: A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH and J. BEETZ, eds. *Building Information Modeling* [online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. pp. 385–396. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-05606-3_25 [Accessed 28 May 2020].
- ENTZIAN, K. and SCHARMANN, R., 2015. BIM für Bauen im Bestand. In: A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH and J. BEETZ, eds. *Building Information Modeling* [online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. pp. 371–383. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-05606-3_24 [Accessed 28 May 2020].
- FERRIES, B., 2001. Contribution to an IFC Extension in the Bridge domain. Contribution to an IFC Extension in the Bridge domain [online]. Available from: <http://www.laurenti.com/publis/Bridge2001.pdf> [Accessed 28 May 2020].
- FISHER, S.S., 2003. An Authoring Toolkit for Mixed Reality Experiences. In: R. NAKATSU and J. HOSHINO, eds. *Entertainment Computing* [online]. Boston, MA: Springer US. pp. 487–494. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-35660-0_59 [Accessed 4 May 2020].
- Google, 2019. Neu in Google Maps: Augmented Reality mit Live View – Google Maps Community [online]. [online]. Available from: <https://support.google.com/maps/thread/12938628?hl=de> [Accessed 29 Apr 2020].
- GÜNTHNER, W. and BORRMANN, A., 2011. *Digitale Baustelle- innovativer Planen, effizienter Ausführen: Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert*. Springer-Verlag.
- HAM, Y., HAN, K. K., LIN, J. J., and GOLPARVARFARD, M., 2016. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. *Visualization in Engineering* [online]. 4 (1), p. 1. Available from: <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0029-z> [Accessed 15 May 2020].
- HARTSON, H.R. and PYLA, P.S., 2012. *The UX Book: process and guidelines for ensuring a quality user experience*. Amsterdam ; Boston: Elsevier.
- HEILIG, M.L., 1962. Sensorama simulator. [online]. Available from: <https://patents.google.com/patent/US3050870A/en> [Accessed 7 May 2020].
- HINRICHS, E., BASSANINO, M., PIDDINGTON, C., GAUTIER, G., KHOSROSHAHI, F., FERN, T., and SKJÆRBÆK, J. O., 2008. *Mobile Maintenance Workspaces: Solving Unforeseen Events on Construction Sites More Efficiently*.
- HOCHMUTH, M., 2017. BIM im Brückenbau. [online]. 92. Available from: https://www.opb.de/fileadmin/user_upload/Presse/2017-04_Bauingenieur_BIM-im-Brueckenbau_S-133-137.pdf [Accessed 20 May 2020].
- HORST, R. and DÖRNER, R., 2019. Virtual Reality Forge: Pattern-Oriented Authoring of Virtual Reality Nuggets. In: *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* [online]. Presented at the VRST '19: 25th ACM

- Symposium on Virtual Reality Software and Technology, Parramatta NSW Australia: ACM. pp. 1–12. Available from: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3359996.3364261> [Accessed 4 May 2020].
- KANO, N., 2011. CiNii Article – Attractive Quality and Must-Be Quality [online]. [online]. Available from: <https://web.archive.org/web/20110813145926/http://ci.nii.ac.jp/Detail/detail.do?LOCALE=LID=ART0003570680&lang=en> [Accessed 21 Oct 2020].
- KHEMLANI, L., 2005. CORENET e-PlanCheck: Singapore's Automated Code Checking System AECbytes „Building [online]. [online]. Available from: http://www.novacitynets.com/pdf/aecbytes_20052610.pdf [Accessed 28 May 2020].
- KIND, S., FERDINAND, J.-P., JETZKE, T., RICHTER, S., and WEIDE, S., 2019. Virtual und Augmented Reality – Status quo, Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen [online]. TA-Vorstudie No. 180. Available from: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/untersuchungen/uV006.html> [Accessed 26 Feb 2020].
- KLEMT-ALBERT, K. and BAHLAU, S., 2017. Das BIM-Modell als Single Source of Truth. *Bauwirtschaft*. 2, pp. 74–79.
- KLEMT-ALBERT, K., HAGEDORN, P., and PULLMANN, T., 2018. Utilising the Potenzial of Standardised BIM Models by a Fundamental Transformation of Collaboration Processes. In: I. F. C. SMITH and B. DOMER, eds. *Advanced Computing Strategies for Engineering*. Cham: Springer International Publishing. pp. 470–486.
- KÖNIG, M., BORRMANN, A., and AMANN, J., 2017. Wissenschaftliche Begleitung der BMVI-Pilotprojekte zur Anwendung von Building Information Modeling (BIM) im Infrastrukturbau. [online]. Available from: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/endbericht-wissenschaftliche-begleitung-pilotprojekt-talbruecken-auenbach.pdf?__blob=publicationFile [Accessed 27 May 2020].
- KOTARU, M., JOSHI, K., BHARADIA, D., and KATTI, S., 2015. SpotFi: Decimeter Level Localization Using WiFi. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* [online]. 45 (4), pp. 269–282. Available from: <https://doi.org/10.1145/2829988.2787487>.
- KOZAK, T. and HAMDAN, A.-H., 2019. Ein ontologisches Modell zur Repräsentation von Brücken. In: . Presented at the 31. Forum Bauinformatik: 11.–13. September 2019 in Berlin. Proceedings, Universitätsverlag der TU Berlin. p. 125.
- KRACKE, E.-A. and LODDE, K., 2011. *Leitfaden Straßenbrücken: Entwurf, Baudurchführung, Erhaltung*. John Wiley & Sons.
- LAAKSO, M. and KIVINIEMI, A., 2012. THE IFC STANDARD – A REVIEW OF HISTORY, DEVELOPMENT, AND STANDARDIZATION. p. 29.
- LANZISERA, S., ZATS, D., and PISTER, K.S.J., 2011. Radio Frequency Time-of-Flight Distance Measurement for Low-Cost Wireless Sensor Localization. *IEEE Sensors Journal*. 11 (3), pp. 837–845.
- LAVIOLA, J.J., KRUIJFF, E., MCMAHAN, R.P., BOWMAN, D.A., and POUPYREV, I., 2017. *3D user interfaces: theory and practice*. Second edition. Boston: Addison-Wesley.
- LEBEGUE, E., GUAL, J., ARTHAUD, G., and LIEBICH, T., 2007. *IFC-Bridge V2 data model*. BuildingSMART, CSTB, France.
- LINDT, I., OHLENBURG, J., PANKOKE-BABATZ, U., GHELLAL, S., OPPERMANN, L., and ADAMS, M., 2005. *Designing Cross Media Games*. In: *PerGames Workshop*. Munich, Germany.
- LOCATIS, C. and AL-NUAIM, H., 1999. Interactive technology and authoring tools: A historical review and analysis. *Educational Technology Research and Development* [online]. 47 (3), pp. 63–75. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/BF02299634> [Accessed 4 May 2020].
- MARKIČ, Š., 2017. IFC-Bridge: Previous Initiatives and Their Proposals. In: *Proc. of the 29th Forum Bauinformatik*, Dresden, Germany.
- MERTENS, M., ed., 2015. *Handbuch Bauwerksprüfung: Zustandsprüfung im Bestand: Stand-sicherheit, Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit*. Köln: Rudolf Müller.
- MESSAOUDI, F., KSENTINI, A., SIMON, G., and BERTIN, P., 2017. *Performance Analysis of Game Engines on Mobile and Fixed Devices*.

- ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl. [online]. 13 (4). Available from: <https://doi.org/10.1145/3115934>.
- MESSNER, J.I., YERRAPATHRUNI, S.C.M., BARATTA, A.J., and WHISKER, V.E., 2003. Using Virtual Reality to Improve Construction Engineering Education. In: THE PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY, ed. [online]. Presented at the American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Anthony_Baratta/publication/249864710_Using_Virtual_Reality_to_Improve_Construction_Engineering_Education/links/00b7d53a050f2ee407000000.pdf [Accessed 12 May 2020].
- MILGRAM, P., TAKEMURA, H., UTSUMI, A., and KISHINO, F., 1995. Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In: Telemanipulator and Telepresence Technologies [online]. Presented at the Telemanipulator and Telepresence Technologies, International Society for Optics and Photonics. pp. 282–292. Available from: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/2351/0000/Augmented-reality--a-class-of-displays-on-the-reality/10.1117/12.197321.short> [Accessed 29 Apr 2020].
- MIYAKE, M., FUKUDA, T., YABUKI, N., and MOTAMEDI, A., 2017. Outdoor MarkerLess Augmented Reality – A System for Visualizing Building Models Using Simultaneous Localization and Mapping. In: Protocols, Flows, and Glitches – Proceedings of the 22nd CAADRIA Conference [online]. Xi'an Jiaotong-Liverpool University: CUMINCAD. pp. 95–104. Available from: http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?caadria2017_079 [Accessed 29 Apr 2020].
- MOHEBBI, P., STROULIA, E., and NIKOLAIDIS, I., 2017. Indoor Localization: A Cost-Effectiveness vs. Accuracy Study. In: 2017 IEEE 30th International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS). Presented at the 2017 IEEE 30th International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS). pp. 552–557.
- MONFARED, S., NGUYEN, T., PETRILLO, L., DE DONCKER, P., and HORLIN, F., 2018. Experimental Demonstration of BLE Transmitter Positioning Based on AOA Estimation. In: 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Presented at the 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). pp. 856–859.
- MOORE, G.E., 1965. Cramping more components onto integrated circuits. Electronics [online]. 38 (8). Available from: <https://newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2018/05/moores-law-electronics.pdf> [Accessed 7 May 2020].
- MORGENTHAL, G., RODEHORST, V., HALLERMANN, N., DEBUS, P., and BENZ, C., 2021. Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-)automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte). [online]. Available from: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/2551> [Accessed 21 Oct 2021].
- MORI, M., 1970. Bukimi no tani [The uncanny valley]. Energy [online]. 7 (4), pp. 33–35. Available from: citeulike-article-id:5637988.
- National BIM Standard, 2012. National BIM Standard United States Version 2. [online]. Available from: <http://www.bim.org.tw/ThesisFile/20120629001/National%20BIM%20Standard-United%20States%20Version%202.pdf> [Accessed 28 May 2020].
- VAN NEDERVEEN, G. A. and TOLMAN, F. P., 1992. Modelling multiple views on buildings. Automation in Construction [online]. 1 (3), pp. 215–224. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/092658059290014B> [Accessed 27 May 2020].
- NISTER, D., NARODITSKY, O., and BERGEN, J., 2004. Visual odometry. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Presented at the Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. p. I–I.
- OHLENBURG, J., BROLL, W., and LINDT, I., 2007. DEVAL – A Device Abstraction Layer for VR/AR. In: C. STEPHANIDIS, ed. Universal Access in Human Computer Interaction. Coping with

- Diversity. Berlin, Heidelberg: Springer. pp. 497–506.
- OPPERMANN, L., 2021. Vom Büro ins Bauwerk – Kooperationsmöglichkeiten mit Mixed Reality [online]. [online]. Available from: : https://www.researchgate.net/publication/353038993_Vom_Buro_ins_Bauwerk_-Kooperationsmoglichkeiten_mit_Mixed_Reality [Accessed 27 Sep 2021].
- OPPERMANN, L., SHEKOW, M., and BICER, D., 2016. Mobile Cross-Media Visualisations made from Building Information Modelling Data. In: *MobileHCI 2016 Adjunct Proceedings*. Presented at the Mobile HCI, Florence, Italy. pp. 823–830.
- PARN, E. A. and EDWARDS, D., 2019. Cyber threats confronting the digital built environment: Common data environment vulnerabilities and block chain deterrence. *Engineering, Construction and Architectural Management* [online]. 26 (2), pp. 245–266. Available from: <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2018-0101> [Accessed 14 May 2020].
- PAUWELS, P., ZHANG, S., and LEE, Y.-C., 2017. Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview. *Automation in Construction* [online]. 73, pp. 145–165. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580516302928> [Accessed 14 May 2020].
- Planen-Bauen 4.0, 2019. Neues nationales BIM-Kompetenzzentrum des Bundes gegründet. [online]. Available from: https://www.kompetenzzentrum-planen-und-bauen.digital/kos/WNetz?art=File.download&id=2258&name=190701_pb40_PM_WEB.pdf [Accessed 27 May 2020].
- POSS, R., 2017. BIM-Erlass. [online]. Available from: <https://www.bim-cluster-sachsen-anhalt.de/o.red/theme/files/datei/1493023275-eerlass-bmub.pdf> [Accessed 27 May 2020].
- PREIDEL, C., BORRMANN, A., OBERENDER, C.-H., and TRETHERWAY, M., 2016. Seamless Integration of Common Data Environment Access into BIM Authoring Applications: the BIM Integration Framework. In: .
- RAIMBAUD, P., LOU, R., MERIENNE, F., DANGLADE, F., FIGUEROA, P., and HERNÁNDEZ, J.T., 2019. BIM-based Mixed Reality Application for Supervision of Construction. In: *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. Presented at the 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). pp. 1903–1907.
- RAKHA, T. and GORODETSKY, A., 2018. Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. *Automation in Construction* [online]. 93, pp. 252–264. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580518300165> [Accessed 10 Jun 2021].
- Razer USA Ltd, 2011. Razer Hydra. Razerzone [online]. Available from: <https://dl.razerzone.com/master-guides/Hydra/HydraOMG-ENG.pdf> [Accessed 30 Apr 2020].
- REN, G., DING, R., and LI, H., 2019. Building an ontological knowledgebase for bridge maintenance. *Advances in Engineering Software* [online]. 130, pp. 24–40. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997818307634> [Accessed 14 May 2020].
- RIEDLINGER, U., BICER, D., SEPIN, S., and OPPERMANN, L., 2016. Using Google Tango for Mobile Interactive Visualisations of BIM Data. In: *Virtuelle und Erweiterte Realität*. Presented at the 13. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR, Bielefeld: Shaker. pp. 1–8.
- RIEDLINGER, U., OPPERMANN, L., and PRINZ, W., 2019. Tango vs. HoloLens: A Comparison of Collaborative Indoor AR Visualisations Using Hand-Held and Hands-Free Devices. *Multimodal Technologies and Interaction* [online]. 3 (2), p. 23. Available from: <https://www.mdpi.com/2414-4088/3/2/23> [Accessed 24 Oct 2019].
- ROBUSTELLI, U., BAIOCCHI, V., and PUGLIANO, G., 2019. Assessment of dual frequency GNSS observations from a Xiaomi Mi 8 Android smartphone and positioning performance analysis. *Electronics*. 8 (1), p. 91.
- RÜPPEL, U., 1997. Multimediale Gestaltung von Bestandsverwaltungsprozessen im Bauwesen. [online]. Available from: <https://e-pub.uni-wei-mar.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/483> [Accessed 20 May 2020].
- SALAMAK, M. and JANUSZKA, M., 2015. BIM models and augmented reality for concrete bridge

- inspections. In: . Presented at the 11th CCC Congress, Hainburg. pp. 25–28.
- SAPUTRA, M.R.U., MARKHAM, A., and TRIGONI, N., 2018. Visual SLAM and Structure from Motion in Dynamic Environments: A Survey. *ACM Comput. Surv.* [online]. 51 (2). Available from: <https://doi.org/10.1145/3177853>.
- SAVAGE, P.G., 1998. Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 1: Attitude Algorithms. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* [online]. 21 (1), pp. 19–28. Available from: <https://doi.org/10.2514/2.4228> [Accessed 5 May 2020].
- SCARAMUZZA, D. and FRAUNDORFER, F., 2011. Visual Odometry [Tutorial]. *IEEE Robotics Automation Magazine*. 18 (4), pp. 80–92.
- SHERVIN [HRSG, H., KUNIBERT [HRSG, L., and SASCHA [HRSG, G., 2019. 30. BBB-Assistententreffen in Karlsruhe – Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter Bauwirtschaft | Baubetrieb | Bauverfahrenstechnik: 10. – 12. Juli 2019, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT) [online]. PDF. KIT Scientific Publishing. Available from: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000091800> [Accessed 27 May 2020].
- SHNEIDERMAN, B., 1996. The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations. In: *Proceedings of the 1996 IEEE Symposium on Visual Languages* [online]. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. pp. 336–. Available from: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=832277.834354> [Accessed 7 Jun 2019].
- SINGER, D. and BORRMANN, A., 2017. Machbarkeitsstudie BIM für Bestandsbrücken: Schlussbericht; FE 89.0309 [online]. Technische Universität München. Available from: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/index/index/docId/1746> [Accessed 21 Apr 2020].
- SOHN, H., 2019. UAV-based Autonomous and Instantaneous Bridge Diagnosis. *SHMII-9* [online]. Available from: <http://koasas.kaist.ac.kr/handle/10203/271698> [Accessed 18 May 2020].
- STANGE, M., 2020. Stand der BIM-Praxis. In: *Building Information Modelling im Planungs- und Bauprozess* [online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. pp. 303–350. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-29838-8_4 [Accessed 28 May 2020].
- SUNDMACHER, D., 2015. BIM bei SSF Ingenieure. In: A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH and J. BEETZ, eds. *Building Information Modeling* [online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. pp. 471–490. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-05606-3_32 [Accessed 28 May 2020].
- SURYAVANSHI, N. B., VISWAVARDHAN REDDY, K., and CHANDRIKA, V. R., 2019. Direction Finding Capability in Bluetooth 5.1 Standard. In: N. KUMAR and R. VENKATESHA PRASAD, eds. *Ubiquitous Communications and Network Computing* [online]. Cham: Springer International Publishing. pp. 53–65. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-20615-4_4 [Accessed 7 May 2020].
- SUTHERLAND, I.E., 1968. A Head-mounted Three Dimensional Display. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I* [online]. New York, NY, USA: ACM. pp. 757–764. Available from: <http://doi.acm.org/10.1145/1476589.1476686> [Accessed 20 Jun 2016].
- TOLMAN, F.P., 1999. Product modeling standards for the building and construction industry: past, present and future. *Automation in construction*. 8 (3), pp. 227–235.
- VAJNA, S., WEBER, C., SCHLINGENSIEPEN, J., and SCHLOTTMANN, D., 2013. *CAD/CAM für Ingenieure: Hardware, Software, Strategien*. Springer-Verlag.
- VLAHAKIS, V., IOANNIDIS, M., KARIGIANNIS, J., TSOTROS, M., GOUNARIS, M., STRICKER, D., GLEUE, T., DAEHNE, P., and ALMEIDA, L., 2002. Archeoguide: an augmented reality guide for archaeological sites. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 22 (5), pp. 52–60.
- VOLLRATH, F. and TATHOFF, H., 2002. *Handbuch der Brückeninstandhaltung*. 2nd ed.
- WANG, Y., LANGLOTZ, T., BILLINGHURST, M., and BELL, T., 2009. An Authoring Tool for Mobile Phone AR Environments. In: *Proceedings of New Zealand Computer Science Research Student Conference 09 (NZCSRSC '09)* [online]. Available from: <http://hci.otago.ac>

- nz/papers/ YuanNZCSRSC2009.pdf [Accessed 4 May 2020].
- WEN M.-C. and KANG S.-C., 2014. Augmented Reality and Unmanned Aerial Vehicle Assist in Construction Management. *Computing in Civil and Building Engineering (2014)* [online]. pp. 1570–1577. Available from: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784413616.195> [Accessed 4 May 2020].
- WERBROUCK, J., PAUWELS, P., BEETZ, J., and VAN BERLO, L., 2019. Towards a Decentralised Common Data Environment using Linked Building Data and the Solid Ecosystem. In: .
- WETZEL, R., BLUM, L., JURGELIONIS, A., and OPPERMANN, L., 2012. Shapes, Marbles and Pebbles: Template-based Content creation for location-Based Games. In: *ResearchGate* [online]. Presented at the IADIS International Conference Game and Entertainment Technologies, GET2012. Available from: https://www.researchgate.net/publication/230597806_Shapes_Marbles_and_Pebbles_Template-based_Content_creation_for_location-Based_Games [Accessed 25 May 2016].
- WIX, J. and BLOOMFELD, D. P., 1995. Standardisation in the building industry the STEP building construction core model. In: *Proceedings of the 1995 W078 Conference*. pp. 184–195.
- WOJCIECHOWSKI, R., WALCZAK, K., WHITE, M., and CELLARY, W., 2004. Building Virtual and Augmented Reality museum exhibitions. In: *Proceedings of the ninth international conference on 3D Web technology* [online]. Monterey, California: Association for Computing Machinery. pp. 135–144. Available from: <https://doi.org/10.1145/985040.985060> [Accessed 4 May 2020].
- Xella, 2019. Xella und Eisfeld Ingenieure präsentierten die HoloLens live auf der Baustelle – Xella International Newsroom [online]. [online]. Available from: [//news.xella.com/digitalization/xella-and-eisfeld-engineers-presented-the-hololens-live-on-the-construction-site](https://news.xella.com/digitalization/xella-and-eisfeld-engineers-presented-the-hololens-live-on-the-construction-site) [Accessed 30 Apr 2020].
- YABUKI, N. and SHITANI, T., 2003. An IFC-based product model for RC or PC slab bridges. *CIB REPORT*. 284, p. 463.
- YOUSSEF, M. and AGRAWALA, A., 2008. The Horus location determination system. *Wireless Networks* [online]. 14 (3), pp. 357–374. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11276-006-0725-7>.
- ZIMMERMAN, T. G., LANIER, J., BLANCHARD, C., BRYSON, S., and HARVILL, Y., 1986. A hand gesture interface device. *ACM SIGCHI Bulletin* [online]. 18 (4), pp. 189–192. Available from: <https://doi.org/10.1145/1165387.275628> [Accessed 7 May 2020].
- ZOU, Y., BARATI, M., DEL REY CASTILLO, E., AMOR, R., GUO, B. H., and LIU, J., 2019. Automated UAV Route Planning for Bridge Inspection Using BIM-GIS Data. In: . Presented at the Proceedings of the 4th International Conference on Civil and Building Engineering Informatics.

Bilder

- Bild 1: Übersicht der Arbeitspakete im Projekt
- Bild 2: Zukunftsvision einer handnahen Bauwerksprüfung unterstützt mithilfe von AR-HMD's
- Bild 3: BIM-Reifegradmodell nach BEW & RICHARDS (2008)
- Bild 4: Inhärente (enthaltene) und referenzierte (externe) Informationen eines Building Information Models
- Bild 5: Stufenplan BMVI zur Einführung von BIM nach (BRAMANN and MAY, 2015)
- Bild 6: Die Geschichte der IFC nach (BORRMANN et al., 2018)
- Bild 7: Digitales Aufmaß einer Punktwolke
- Bild 8: Arthur (Foto: Fraunhofer FIT)
- Bild 9: CoSpaces (Foto: Fraunhofer FIT)
- Bild 10: Beispiel einer markerbasierten AR-Visualisierung auf einem Gebäudeplan (aus: RIEDLINGER et al., 2016)
- Bild 11: Visualisiertes Stadtmodell Köln aus Laserscans (Quelle: HHVISION)

- Bild 12: Das Perfect Planning Programm als math. Optimierungstool für ein Layout-Design mit VR-Anbindung (Quelle: HHVISION)
- Bild 13: BIM-gestütztes CAD-Modell in der Unreal-Engine mit Darstellung der BIM-Daten eines Teilmodells (Quelle: HHVISION)
- Bild 14: Anforderungsanalyse für das Unterstützungssystem
- Bild 15: Exemplarische Prüfung der Betonfläche durch Abklopfen
- Bild 16: Exemplarische Prüfung des Brückenoberbaus
- Bild 17: Hard Coding der Pilotbrücke
- Bild 18: Darstellung des Kano-Modells
- Bild 19: Beispielhafte Darstellung einer Arbeitskarte
- Bild 20: Anbindung BIM-Software an Game Engine via Direktimport
- Bild 21: Anbindung BIM-Software an Game Engine via indirekten Import
- Bild 22: Darstellung zur Verortung von Schäden
- Bild 23: Darstellung der Möglichkeit zur Bildaufnahme
- Bild 24: Möglichkeiten zur Aufnahme von Abmessung
- Bild 25: Kommentierungsmöglichkeiten bei der Beschreibung von Schadensbilder
- Bild 26: Einsatz digitaler Messmethoden
- Bild 27: Möglichkeit zum Abruf von Arbeitshilfen, Normen und Richtlinien
- Bild 28: Darstellung der Verortung eines Schadens im 3D-Modell
- Bild 29: Verknüpfung einer Bildaufnahmen am 3D-Modell und Schadensposition
- Bild 30: Exemplarische Darstellung einer Abmessung mithilfe des Demonstrators
- Bild 31: Bedeutungseinordnung der einzelnen Stufen (Levels) der Technology-Readiness-Levels
- Bild 32: Anbindung BIM-Software an Game Engine via Direktimport (links) und indirektem Import (rechts)
- Bild 33: Darstellung des Gesamtprozesses der digitalen Bauwerksprüfung
- Bild 34: Darstellung der Gliederung der Arbeitskarte „Deckblatt“
- Bild 35: Darstellung der Gliederung Arbeitskarte „Inhaltsverzeichnis“
- Bild 36: Schemata der Modelldaten und deren Verknüpfung
- Bild 37: FBX (links) und IFC (rechts)
- Bild 38: Workflow zur dateibasierten Datenverarbeitung mit Aufteilung von 3D-Modell und Metadaten
- Bild 39: Alternativer Workflow mit externer IFC-Konvertierungssoftware
- Bild 40: Detailansicht des durch IfcOpenShell fehlerhaft importierten Hohlkastens
- Bild 41: Aus Revit exportierter Ausschnitt des Brückenmodells in der Unity Entwicklungsumgebung
- Bild 42: Self Reporting mittels oder Positionsangabe auf zweidimensionaler Karte (links, Foto: Fraunhofer FIT) und Button-Navigation (Early Prototype, rechts)
- Bild 43: Mögliche Schadensverortung mithilfe von 3D-Objekten (Foto: Fraunhofer FIT)
- Bild 44: Mögliche Schadensverortung unter Verwendung eines dreidimensionalen Pfeils (Montage)
- Bild 45: Mögliche Schadensverortung mittels 2D-Objekt (Montage)
- Bild 46: Mögliche zweidimensionale Darstellung vorhandener Schäden (Montage)
- Bild 47: Workflow zur Synchronisierung mit dem CDE
- Bild 48: Übersicht der Nutzung der Anwendung aus der Sicht des Users
- Bild 49: Auswahl des Anzeigemodus beim Start der VR-Anwendung

- Bild 50: Übersicht des Aufbaus der Anwendung sowie der Kommunikation der Hauptklassen in der Anwendung
- Bild 51: Screenshot der Ordnerhierarchie in BSync Client
- Bild 52: Viewer Szene
- Bild 53: Vergleich des Aufbaus der User Prefabs
- Bild 54: Desktop-VR Ansicht mit HUD-Overlay
- Bild 55: PDF-Viewer im Desktop-VR Modus
- Bild 56: Listendarstellung der verzeichneten Schäden
- Bild 57: Schadenskarten im HMD-VR Modus
- Bild 58: PDF-Viewer im HMD-VR Modus
- Bild 59: Radiales Menü innerhalb der HMD-VR auf dem Motion Controller
- Bild 60: Grafik einer typischen Raum-Triangulation
- Bild 61: Screenshot nach der Interaktion mit der Schadenskarte in Bild 16
- Bild 62: Laser Pointer Tools in der HMD-VR
- Bild 63: Messtools in Desktop-VR
- Bild 64: Messtools in HMD-VR
- Bild 65: Vergleich der beiden Marker
- Bild 66: BIM-Daten aus dem nativen CAD-Programm (links) und die dazugehörige Information der BIM-Daten innerhalb der Desktop-VR/HMD-VR Anwendung (rechts)
- Bild 67: UI zur Schadenauswertung/Bemerkung am Bauwerk
- Bild 68: File Browser nach Betätigen des Messdaten Buttons
- Bild 69: Exemplarische Darstellung von Messdaten als UI-Element innerhalb der Anwendung
- Bild 70: Schematisch vereinfachte Ansicht der Markermessung aus der Vogelperspektive
- Bild 71: Ergebnis der Markermessung für ARKit (Apple iPad Pro 2019) mit Raumbeleuchtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).
- Bild 72: Ergebnis der Markermessung für ARKit (Apple iPad Pro 2019) ohne Raumbeleuchtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).
- Bild 73: Ergebnis der Markermessung für ARCore (Samsung Galaxy Tab S3) mit Raumbeleuchtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).
- Bild 74: Ergebnis der Markermessung für ARCore (Samsung Galaxy Tab S3) ohne Raumbeleuchtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).
- Bild 75: Durchschnittliche Tracking-Differenz zwischen ARKit und ARCore (ARKit „minus“ ARCore) bei eingeschalteter Raumbelichtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).
- Bild 77: Durchschnittliche Tracking-Differenz zwischen ARKit und ARCore (ARKit „minus“ ARCore) bei ausgeschalteter Raumbelichtung. fwd = „forward“ (Messung bei Zugehen auf den Marker), bwd = „backward“ (Messung beim Entfernen vom Marker).
- Bild 77: Modi der mobilen Anwendung vor Ort
- Bild 78: Ablauf der einzelnen Schritte für das Start-Menü
- Bild 79: Mockup des initialen Bildschirms zur Eingabe von BSCW-URL, Nutzernamen und Passwort. Die favorisierte und dieser Form ähnliche Ansicht ist mit einem roten Stern markiert.
- Bild 80: Mockup des Bildschirms im Falle einer fehlenden Internetverbindung. Die favorisierte und dieser Form ähnliche Ansicht ist mit einem roten Stern markiert.

- Bild 81: Mockup der favorisierten Variante des Start-Menüs inkl. Modell-Auswahl
- Bild 82: Weitere Mockup-Alternativen zum Start-Menü
- Bild 83: Screenshot des umgesetzten Login-Screens auf dem iPad
- Bild 84: Screenshot des umgesetzten Start-Menüs auf dem iPad. Das ausgewählte Modell ist hellblau hinterlegt.
- Bild 85: Screenshot des Menüs zur Dateiauswahl
- Bild 86: Screenshot des PDF-Reader-Plugins auf dem iPad mit einem geöffneten PDF-Dokument, das eine Beispiel-Titelseite eines Prüfberichts zeigt
- Bild 87: Übersicht über die zentralen, bereits implementierten Skripte der verschiedenen Unity Szenen. Geteilte Skripte wurden über mehrere Spalten dargestellt.
- Bild 88: Schematische Darstellung des Aufbaus einer BCF-Datei
- Bild 89: Screenshot des Demo-Modus. Das Modell ist beweglich über ein einfaches Klicken auf der horizontalen Fläche (gepunktet). Sobald das Modell skaliert wird, wird es fest verankert („Model movable“ deaktiviert). Zudem ist eine Rotation in y-Richtung möglich.
- Bild 90: Screenshot der Metadaten-Ansicht des Überbaus. Exemplarisch werden hier die aus der IfcXML Datei ausgelesenen Informationen in einem übersichtlichen Layout präsentiert.
- Bild 91: Screenshot des UI zu einem Schadenspunkt
- Bild 92: Screenshot des Model View Modus mit initialer, aus den Modelldaten errechneten, Kameraposition und -orientierung. Unten links die Buttonsteuerung zum Bewegen durch das Modell.
- Bild 93: Screenshot des AR-Modus unter Laborbedingungen
- Bild 94: Screenshot des AR-Modus mit transparentem 3D-Modell unter Laborbedingungen
- Bild 95: Erprobung der AR-Anwendung vor Ort
- Bild 96: Ergebnisse des Speedtests aus dem Hohlkasten im Telekom-Netz. Die Zahlenwerte in den beiden rechten Spalten bezeichnen den Down- bzw. Upload (v. l. n. r.) in MBit/s.
- Bild 97: Ergebnisse des Speedtests aus dem Hohlkasten im Vodafone-Netz. Die Zahlenwerte in den beiden rechten Spalten bezeichnen den Down- bzw. Upload (v. l. n. r.) in MBit/s.
- Bild 98: Screenshot des AR-Messtools in Laborumgebung
- Bild 99: Angepasster Workflow zur Synchronisierung mit der CDE
- Bild 100: Grundstruktur des BSCW-Workspace. Workspace Name sowie Dateibezeichnungen können frei gewählt werden. Jedoch gilt die Einschränkung, dass die Dateien innerhalb eines Modell-Ordners (nicht des „documents“ Ordners) den gleichen Namen tragen müssen.
- Bild 101: Beispiel einer Ordnerstruktur, wie sie zur Nutzung der Anwendung erforderlich ist
- Bild 102: Ergebnisse des Speedtests aus dem Hohlkasten im Telekom-Netz. Die Zahlenwerte in den beiden rechten Spalten bezeichnen den Down- bzw. Upload (v. l. n. r.) in MBit/s.
- Bild 103: Ergebnisse des Speedtests aus dem Hohlkasten im Vodafone-Netz. Die Zahlenwerte in den beiden rechten Spalten bezeichnen den Down- bzw. Upload (v. l. n. r.) in MBit/s.
- Bild 104: Ergebnis des Speedtests am Eingang der Brücke im Autobahnkreuz Nürnberg, getestet mit einem iPhone 12 Pro im Telekom-Netz
- Bild 105: Button der Notfall-Mail im UI zur direkten Mailkommunikation zu einem expliziten Schadenspunkt
- Bild 106: Halbtransparente Modellüberlagerung vor Ort. Sichtbar ebenfalls das zur Evaluation angepasste User Interface.

- Bild 107: Screenshot der umgesetzten Beschreibung der Notfalltaste
- Bild 108: Überprüfung der Lokalisierung des Demonstrators im Hohlkasten mit intransparentem Modell
- Bild 109: Anpassungen des UIs zur Schadenseingabe und Farbgebung der Schadenspunkte
- Bild 110: UI zur Eingabe eines neuen Schadenspunktes
- Bild 111: Überarbeitetes Hauptmenü des Demonstrators
- Bild 112: Ablaufschema der Evaluation
- Bild 113: Vorstellung Demonstrator
- Bild 114: Darstellung der Schadenspositionierung und der Schadensuntersuchung (Messen)
- Bild 115: Offener Austausch mit den einzelnen Teilnehmern
- Bild 116: Betrachtung der aufgenommenen Schadensinformationen mittels VR-Anwendung nach der Bauwerksprüfung
- Tab. 9: Immersive Flächenprojektionslösungen
- Tab. 10: Übersicht der Trackingverfahren von AR-/VR-Systemen
- Tab. 11: Ausgewählte Hilfsmittel und Prüfgeräten bei einer Bauwerksprüfung
- Tab. 12: Übersicht aller Technologien und Kategorisierung nach dem Kano-Modell
- Tab. 13: Übersicht der festgelegten Technologien auf Grundlage der Experteninterviews
- Tab. 14: Betrachtete BIM-basierte Modellierungssoftwares und ihr Technology-Readiness-Level (TRL)
- Tab. 15: Betrachtete Softwares für Common Data Environments (CDE) und ihr Technology-Readiness-Level (TRL)
- Tab. 16: Übersicht konkreter MR-/AR-Brillen zum Projekt
- Tab. 17: Übersicht möglicher stationärer VR-Brillen für das Projekt
- Tab. 18: Übersicht der Diagramme der Teilprozesse inkl. ihrer referenzierten Nummer und in welchem Anhang sie zu finden sind
- Tab. 19: Vergleich der Kriterien der verschiedenen IFC-Import-Plugins
- Tab. 20: Anforderungen an die verwendete Software

Tabellen

- Tab. 1: Herausforderungen im Bereich von Baugroßprojekten und Verbesserungsvorschläge
- Tab. 2: Pilotprojekte BMVI (BORRMANN et al., 2017)
- Tab. 3: Pilotprojekte BMVI in der erweiterten Pilotphase (Quelle: BIM4Infra und BIM4Rail)
- Tab. 4: Pilotprojekte BMUB (planen-bauen 4.0)
- Tab. 5: Übersicht über einige aktuell am Markt verfügbare Plattformen mit CDE-Funktionalität
- Tab. 6: Übersicht MR-/AR-Brillen
- Tab. 7: Übersicht mobile VR-Brillen
- Tab. 8: Übersicht performance VR-Brillen
- Tab. 21: Vergleich verschiedener Unity-Plugins zur Fernkommunikation
- Tab. 22: Verbindungen und jeweilige Stabilität während der Test-Anrufe

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2018

B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Paschen, Dürrer, Gronau, Rentmeister

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

Wirker, Donner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband

€ 16,00

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems

Lebhardt, Seiler, Gerdas € 15,50

2021

B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staack, Eilers € 15,50

**B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke
Mess-technische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis
von instrumentierten Fahrbahnübergängen**

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende
Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen**

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für
Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt**

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rade-
macher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung
durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Un-
manned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)**

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfas-
sung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträ-
gern mit Ultraschallsensoren**

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke,
Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelin-
nenschalen aus Stahlbeton**

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten
Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen
Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)**

Purtak, Möbius

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus
Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen**

Staeck

€ 15,00

**B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke
Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung
von Messdaten**

Freundt, Böning, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im
Digitalen Testfeld Autobahn**

Windmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für
die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutsch-
land**

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktio-
nen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung**

Schreck, Decker, Wawrzyniak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten

Maurer, Wentzek, Hegger, Adam, Rombach, Harter, Zilch, Tecusan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Über-
prüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen**

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brennerberger, Zulauf,

Locher

€ 18,00

**B 184: Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von
Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken**

Kindl, Stadler, Walther, Bornmann, Freitag

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 185: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und
erweiterter/virtueller Realität**

Hill, Bahlau, Butenhof, Degener, Klein, Kukushkin, Riedlinger,
Oppermann, Lambracht, Mertens

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter
<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Web-
site finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf
Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.