

Seiffert, Annemarie; Heimig, Benedikt

## **Innovative Methoden zur Zustandserfassung. FuE-Abschlussbericht B3951.04.04.70009**

---

Verfügbar unter / Available at:

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/110943>

Vorgeschlagene Zitierweise / Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2023): Innovative Methoden zur Zustandserfassung. FuE-Abschlussbericht B3951.04.04.70009. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.



**FuE-Abschlussbericht  
Innovative Methoden zur  
Zustandserfassung**

**B3951.04.04.70009**

**Februar 2023**

**FuE-Abschlussbericht**  
**Innovative Methoden zur Zustandserfassung**

Beginn des Vorhabens: Oktober 2019

Auftragsnummer: BAW-Nr. B3951.04.04.70009

Aufgestellt von:           Abteilung:           Bautechnik  
                                  Referat:            Infrastrukturmanagement  
                                  Auftragsleitung: Annemarie Seiffert  
                                  Bearbeitung:       Benedikt Heimig

Karlsruhe, Februar 2023

Copyright: Creative Commons BY-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Soweit nicht anders angegeben, liegen alle Bildrechte bei der BAW.

## **Zusammenfassung**

Die regelmäßige Inspektion von Ingenieurbauwerken ist unerlässlich, um einen sicheren, wirtschaftlichen und nachhaltigen Betrieb der Infrastruktur zu gewährleisten. Bei Wasserbauwerken wird die Inspektion mindestens alle sechs Jahre in Verbindung mit einer Trockenlegung des Bauwerks durchgeführt, was einen nicht zu vernachlässigenden Aufwand darstellt. Das zunehmende Alter der Bauwerke, ihre oft großen Abmessungen und die Vielfalt der vorhandenen Schadensmechanismen verschärfen die Herausforderungen, die an das Inspektionspersonal gestellt werden.

Angesichts der begrenzten Umfahrmöglichkeiten im Wasserstraßennetz wäre es jedoch von Vorteil, die Inspektionsdauer bei mindestens gleichbleibender Qualität zu verkürzen. Die rasanten Fortschritte in der Digitalisierung mit hochauflösenden Sensoren, leistungsfähigen Speichermedien und intelligenten maschinellen Lernalgorithmen könnten hier eine Chance bieten. Die Möglichkeit, Bauwerke mit innovativen Methoden zu inspizieren, wurde in Pilotprojekten bereits erfolgreich erprobt, jedoch fehlt ein systematischer Überblick über das Potenzial innovativer Methoden zur Unterstützung der Inspektion, insbesondere von Wasserbauwerken.

Um dieses Problem zu adressieren, hat die Bundesanstalt für Wasserbau in Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen das Forschungsprojekt "Innovative Methoden zur Zustandsbewertung" durchgeführt. Um Optimierungspotenziale zu identifizieren, beginnt das Projekt mit einer systematischen Dokumentation des Prozesses der Bauwerksinspektion. Diese bildet die Grundlage für die Auswahl innovativer Methoden, die zur Unterstützung der Inspektion von Wasserbauwerken geeignet sein könnten. Die Methoden wurden in einem praktischen Versuch an einer Schleuse im trockengelegten und gefluteten Zustand erprobt. Getestet wurden die Trägerplattformen unbemanntes Flugsystem und ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug, die Messgeräte terrestrischer Laserscanner, handgeführter Triangulationsscanner, Wärmebildkamera und Fächerecholot sowie die Auswerteverfahren Photogrammetrie und maschinelles Lernen. Deren Benutzerfreundlichkeit und Datenqualität wurden systematisch bewertet, was zu einer Empfehlung für den Einsatz innovativer Methoden bei der Inspektion von Wasserbauwerken führt.

## Summary

The regular inspection of structures is essential to ensure safe, economical, and sustainable operation of infrastructure. Moreover, hydraulic structures need to be drained at least once every six years to ensure a thorough inspection, resulting in considerable efforts. Due to the increasing age, large dimensions, and the variety of stresses, the structures pose an increasing challenge to inspection personnel.

Given the limited number of waterways, it would be beneficial to reduce inspection times, while maintaining same level of quality. The rapid advances in technology such as high-resolution sensors, powerful storage media and intelligent machine learning algorithms, could allow for such a change to take place. New possibilities for inspecting structures with innovative methods have been successfully tested in pilot projects. However, a lack of widespread analysis of the potential of such innovative methods to support the inspection of hydraulic structures exists.

To address this problem, the German Federal Waterways Engineering and Research Institute, in cooperation with the Geodetic Institute of Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, conducted the research project "Innovative Methods for Condition Assessment". In order to identify potential optimization in the current inspection methods, the project started with the systematic documentation of the process of structural inspection. This was used as the basis for the selection of innovative methods that could be suitable for assisting the inspection of hydraulic structures. The following innovative methods were tested on a lock in drained and flooded condition: unmanned aerial systems, remotely operated underwater vehicles, laser scanners, hand held scanners, thermal imaging cameras, multibeam echo sounders, photogrammetry, and machine learning. The user-friendliness and the data quality of the testing methods were systematically evaluated, resulting in an overall recommendation for the use of these innovative methods for the inspection of hydraulic structures.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Problemdarstellung und Ziel	1
1.1	Aufgabenstellung und Ziel	1
1.2	Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)	2
2	Untersuchungsmethoden	3
2.1	Aktuelles Vorgehen bei der Bauwerksinspektion	5
2.1.1	Regelungen zur Bauwerksinspektion	5
2.1.2	Begleitung zweier Bauwerksprüfungen	7
2.2	Innovative Methoden zur Unterstützung der Bauwerksinspektion	12
2.2.1	Trägerplattformen	14
2.2.2	Sensorsysteme	16
2.2.3	Auswerte-/Kollaborationsverfahren	18
2.2.4	Fazit	21
2.3	Eignung innovativer Methoden für die Bauwerksinspektion	23
2.3.1	Vermögen zur Detektion von Schäden	23
2.3.2	Weitere Mehrwertpotenziale	30
2.4	Praktische Erprobung ausgewählter Methoden	32
2.4.1	Planung der Praxistests	32
2.4.2	Durchführung der Praxistests über Wasser	35
2.4.3	Durchführung der Praxistests unter Wasser	39
2.4.4	Methode zur Auswertung der Praxistests	42
3	Ergebnisse	45
3.1	Auswertung der Praxistests	45
3.1.1	Auswertung der Praxistests über Wasser	45
3.1.2	Auswertung der Praxistests unter Wasser	51
3.2	Bewertung der Methoden	53
3.2.1	Entscheidungsbaum	53
3.2.3	Entscheidungsmatrix	56
3.2.4	Steckbriefe	58
4	Fazit und Ausblick	60
5	Literaturverzeichnis	64

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Abbildung 1: Aufbau des Forschungs- und Entwicklungsprojektes	3
Abbildung 2: Gliederung des Forschungs- und Entwicklungsprojektes, BI = Bauwerksinspektion	4
Abbildung 3: Reinigung am Beispiel der Schiffsschleusenanlage Eckersmühlen	6
Abbildung 4: Eingesetzte Hilfsmittel bei der Bauwerksprüfung am Beispiel der Schiffsschleusenanlagen Neckarsteinach (links) und Bamberg (rechts)	7
Abbildung 5: Übersicht über die Hauptprozesse bei den begleiteten Bauwerksprüfungen	8
Abbildung 6: Prozessschritte Detektion von Anomalien und Identifikation von Schäden bei den begleiteten Bauwerksprüfungen	9
Abbildung 7: Prozessschritt Klassifikation von Schäden bei den begleiteten Bauwerksprüfungen, erster Teil	10
Abbildung 8: Prozessschritt Klassifikation von Schäden, zweiter Teil, und Dokumentation von Schäden bei den begleiteten Bauwerksprüfungen	11
Abbildung 9: Vorgehen zur Beurteilung der Eignung der innovativen Methoden zur Schadensdetektion	28
Abbildung 10: Satellitenbild (links) und Längsschnitt durchs Oberhaupt (rechts) der nördlichen Schleusenammer mit Testbereich: Schleusenwand und -tor (grün) und Umlauf (blau) [WSV]	32
Abbildung 11: Blick auf das Unterhaupt (links) und das Tor am Unterhaupt (rechts) der Schleuse Sülfeld	33
Abbildung 12: Abschnitte der nördlichen Kammer der Schleuse Sülfeld, an denen handnah Schäden erfasst werden [WSV]	34
Abbildung 13: Eingesetzte Drohne für den Außenbereich (links) und für den Innenbereich (rechts)	36
Abbildung 14: Durch das UAS erfasste Bereiche der Schleuse Sülfeld, rot in einem Abstand von 1,5 Metern, blau in einem Abstand von 3 Metern [WSV]	37
Abbildung 15: Eingesetzter terrestrischer Laserscanner (links), Wärmebildkamera (Mitte) und handgeführter Triangulationsscanner (rechts)	38
Abbildung 16: Das eingesetzte Unterwasserfahrzeug (links) und das Messboot mit Fächerecholot (rechts)	41
Abbildung 17: Durch manuelle Schadenskartierung erfasste Schäden am dritten Kammerabschnitt, Nord- (links) und Südseite (rechts)	44
Abbildung 18: Durch manuelle Schadenskartierung erfasste Schäden am zwölften Kammerabschnitt, Nord- (links) und Südseite (rechts)	44

Abbildung 19: Orthophotomosaik des dritten Kammerabschnittes an der südlichen Schleusenwand (links) und eine Detailaufnahme eines Pollers (rechts)	46
Abbildung 20: UAS-Aufnahme des Untertors in der Übersicht (links) und im Detail (rechts)	46
Abbildung 21: An der Verankerung des Stahltors vom Algorithmus erkannte Schäden	48
Abbildung 22: Aufnahmen des Laserscanners, eingefärbt nach Intensitätswerten, vom mittleren Kammerabschnitt und Schleusentor Richtung Unterwasser	49
Abbildung 23: Aufnahmen des Laserscanners, eingefärbt nach Intensitätswerten vom dritten Kammerabschnitt, Süd- und Nordseite	49
Abbildung 24: Beispiel für eine mit der Wärmebildkamera detektierte Hohlstelle, links: Wärmebild, rechts: RGB-Bild	50
Abbildung 25: Aufnahmen einer Kammerwand durch das Sonar (links) und die Videokamera (rechts) des ROV	51
Abbildung 26: Aufnahmen des Schleusentores am Oberhaupt (links) und des 12. Kammerabschnittes Südseite durch das Fächerecholot	52
Abbildung 27: Entwurf des Entscheidungsbaumes anhand der Projekterfahrungen an der Schleuse Sülfeld, ja: grüner Pfeil; nein: roter Pfeil	54

<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
Tabelle 1:	Prinzipieller Aufbau des Schadenskataloges, ÜW: über Wasser, UW: unter Wasser	24
Tabelle 2:	Geschätzte Merkmale von Beton- und Stahlbetonschäden mit Relevanz für die Detektion mit innovativen Methoden	26
Tabelle 3:	Recherchierte maximale Leistungsmerkmale der innovativen Methoden, * = Einbildphotogrammetrie	27
Tabelle 4:	Geschätzte Eignung der innovativen Methoden zur Schadenserkennung an Beton- und Stahlbetonbauteilen	29
Tabelle 5:	Übersicht über die bei den Tests über Wasser eingesetzten innovativen Methoden	35
Tabelle 6:	Bei den Unterwassertests zum Einsatz kommende innovative Methoden	40
Tabelle 7:	Festlegungen zur Zählweise der Risse bei der Auswertung der Schadenskartierung und der Messdaten, gelb hinterlegt erster Riss, blau hinterlegt zweiter Riss	43
Tabelle 8:	Anzahl der durch manuelle Schadenskartierung erfassten Schäden am dritten und zwölften Kammerabschnitt, Süd- und Nordseite	43
Tabelle 9:	Endprodukte der UAS-Befliegung am Beispiel des mittleren Kammerbereichs	45

Tabelle 10:	Anzahl der erkannten Risse in den UAS-Aufnahmen und der händisch kartierten Risse im dritten und zwölften Kammerabschnitt, Südseite	47
Tabelle 11:	Anzahl der mittels KI automatisch erkannten Risse, der in den Laserscanner-Aufnahmen identifizierten Risse und der händisch kartierten Risse im dritten und zwölften Kammerabschnitt, Nord- und Südseite	48
Tabelle 12:	Anzahl der in den ROV- und Echolotaufnahmen erkannten Risse und der händisch kartierten Risse im dritten und zwölften Kammerabschnitt unterhalb Oberwasser, Südseite	52
Tabelle 13:	Entscheidungsmatrix für die Auswahl innovativer Methoden auf Basis der Projekterfahrungen	57
Tabelle 14:	Aufbau der Steckbriefe zu den innovativen Methoden	58

## **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1:	Ausführliche Prozessdokumentation der Bauwerksprüfung
Anlage 2:	Steckbriefe zu den innovativen Methoden
Anlage 3:	Schadenskatalog und die Eignung verschiedener innovativen Inspektionsmethoden für Bauwerke aus Beton, Stahlbeton und Mauerwerk

## **Abkürzungsverzeichnis**

AR	Augmented Reality (Erweiterte Realität)
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BHO	Bundshaushaltsordnung
BI	Bauwerksinspektion
BIM	Building Information Modeling
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment (Höhle mit automatisierter, virtueller Umwelt)
FuE	Forschungs- und Entwicklungsprojekt
gia	Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
HPA	Hamburg Port Authority
ICP	Iterative Closest Point
IMU	Inertial Measurement Unit (Inertialmesseinheit)

KI	Künstliche Intelligenz
MBI	BAWMerkblatt Bauwerksinspektion
MSV	BAWMerkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken
ROV	Remotely Operated Underwater Vehicle (Ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug)
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SfM	Struture from Motion
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UAS	Unmanned Aircraft System (Unbemanntes Luftfahrtsystem)
UAV	Unmanned Aircraft Vehicle (Unbemanntes Luftfahrzeug)
VR	Virtual Reality (Virtuelle Realität)
VV	Verwaltungsvorschrift
WInD	Wasserstraßen-Infrastruktur-Daten
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Aufgabenstellung und Ziel**

Der sichere und wirtschaftliche Betrieb der Wasserbauwerke erfordert die regelmäßige Überprüfung ihres Zustandes in Form von Bauwerksinspektionen. Sie sind laut der Verwaltungsvorschrift Bauwerksinspektion VV-WSV 2101 (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022) bei Objekten, die ein besonderes Gefährdungspotenzial und eine Komplexität aufweisen, wie z. B. Schiffsschleusenanlagen, in festgelegten Zyklen durchzuführen. Eine detaillierte Schadenserfassung soll alle drei Jahre, abwechselnd am trockengelegten und nicht trockengelegten Bauwerk stattfinden. In beiden Fällen ist zur Gewährleistung einer reibungslosen Durchführung der Inspektion die Sperrung der Schiffsschleusenanlage für die Schifffahrt notwendig, der wiederum angesichts der begrenzten Umfahrungsmöglichkeiten im Wasserstraßennetz oftmals keine Alternativrouten zur Verfügung stehen.

In Abhängigkeit der Größe der Anlage, der Anzahl der Schäden und des Verschmutzungsgrades kann die Inspektion ohne Trockenlegung eine Sperre von mehreren Tagen, eine Inspektion mit Trockenlegung bereits eine Sperrung von mehreren Wochen erfordern. Ursächlich dafür ist vor allem der mit der Trockenlegung in Verbindung stehende Reinigungsaufwand, der sich in Abbaumaßnahmen bis zu großflächigen Reinigungsarbeiten mit Hochdruckreinigern äußern kann. In jedem Fall ist eine beschleunigt durchgeführte Inspektion der Bauwerke unter Beibehaltung mindestens des gleichen Sicherheitsniveaus erstrebenswert.

Weiteres Verbesserungspotenzial bei der Durchführung der Bauwerksinspektion liegt in einer Reduzierung der möglichen Gefährdung des Inspektionspersonals. Dies ist besonders relevant bei der Inspektion schwer zugänglicher Bereiche wie bei höherliegenden Bauteilen und beengten Platzverhältnissen. Weiterhin wird, wenn eine Trockenlegung der Anlage nicht möglich ist, eine Inspektion mit Tauchern durchgeführt, welches aber mit einem erhöhten Gefährdungspotenzial einhergeht (BAW 2010). Die Schadenserfassung erfolgt in der Regel mittels einer primär visuellen Begutachtung der Anlage durch das Inspektionspersonal unter Hinzunahme kleinerer Hilfsmittel wie z. B. Digitalkameras, Messgeräte und größerer Hilfsmitteln wie z. B. Hubsteiger. Angesichts der oftmals großen Dimensionen und des fortgeschrittenen Alters der Anlagen stellt dieses Vorgehen jedoch einen nicht unerheblichen Aufwand dar. Gleiches gilt für die Dokumentation dieser Schäden, welche mit dem Programmsystem WSVPruf erfolgt.

Gleichzeitig kam es in den letzten Jahrzehnten zu einem rasanten Fortschritt auf dem Gebiet der Digitalisierung in Form von kostengünstigen und hochauflösenden Sensoren, leistungsfähigen Datenspeichergeräten, innovativen Trägersystemen und intelligenten Algorithmen. Es stellt sich die Frage, ob diese Fortschritte genutzt werden können, um den Herausforderungen der Bauwerksinspektion zu begegnen. Bei Brückenbauwerken wurde der unterstützende Einsatz digitaler Technologien bei der Bauwerksinspektion bereits mehrfach erfolgreich getestet (Holst et al. 2016; Hallermann et al. 2018; Moreu et al. 2017). Bei Wasserbauwerken gab es bisher nur ungesteuerte, punktuelle Anwendungen. Doch gerade bei diesen Ingenieurbauwerken ist ein gewinnbringender Einsatz der Methoden aufgrund ihrer großen Abmessungen und unter Wasser liegenden Bereichen sinnvoll.

Insbesondere fehlt ein systematischer Überblick über verschiedene digitale Methoden und deren Einsatzmöglichkeiten für unterschiedliche Fragestellungen und Randbedingungen bei der Inspektion von Wasserbauwerken. Um diesem Umstand zu begegnen, hat die Bundesanstalt für Wasserbau in Kooperation mit dem Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen das Forschungsprojekt „Innovative Methoden zur Zustandserfassung“ gestartet. Es hat sich die Beantwortung der folgenden Forschungsfragen zum Ziel gesetzt:

1. Welche innovativen Methoden eignen sich für den unterstützenden Einsatz bei der Inspektion von Wasserbauwerken?
2. Was sind ihre Anwendungsfälle und -grenzen?
3. Was ist bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung ihres Einsatzes zu beachten?

## **1.2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)**

Das Forschungsvorhaben zielt darauf ab, eine Kostenersparnis, eine Zeitersparnis, eine Qualitätssteigerung und eine Gefahrenreduzierung bei der Inspektion von Wasserbauwerken zu erreichen. Davon würde die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) als Zuständige für den sicheren Betrieb der Wasserbauwerke und damit auch für ihre Inspektion auf direkte Weise profitieren. Ein wichtiger Aspekt ist die Vermittlung der im Zuge des Projektes gemachten Erfahrungen und des erzielten Wissens. Zur Gewährleistung dieses Aspektes startet das Forschungsprojekt bei der Aufnahme des IST-Zustandes in der WSV und endet bei der Wissensvermittlung an die WSV durch die Erstellung von Ablaufdiagrammen und Steckbriefen. Ziel ist es, einen Überblick über die auf dem Markt verfügbaren innovativen Methoden zu geben, die zur Unterstützung der Bauwerksinspektion geeignet sind. Ihre grundlegende Funktionsweise wird erläutert, typische Anwendungsfälle aufgezeigt und Ratschläge für die Planung, Durchführung und Nachbereitung ihres Einsatzes gegeben.

## 2 Untersuchungsmethoden

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Innovative Methoden zur Zustandserfassung“ wird zur Sicherstellung einer gleichzeitig sowohl qualitativ hochwertigen als auch praxisnahen Forschung von zwei flankierenden Maßnahmen durch die Projektphasen hinweg unterstützt, siehe Abbildung 1. Zum einen wird eine Kooperation mit dem Geodätischen Institut und dem Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssystem (gia) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach vereinbart. Sie soll sicherstellen, dass die Erfahrungen, die das Institut bereits mit dem Einsatz innovativer Methoden im Bereich des Bauwesens gemacht hat, ins Projekt miteinfließen. Zum anderen wird ein Beratungsgremium bestehend aus Bauwerksinspektoren, Bauwerksinspektionskoordinatoren aus der WSV und Wissenschaftlern der Bundesanstalt für Wasserbau und der Bundesanstalt für Gewässerkunde eingerichtet. Es dient dazu, die Erkenntnisse aus dem Projekt in die Praxis zu spiegeln, um sie an die dort gemachten Erfahrungen auszurichten.

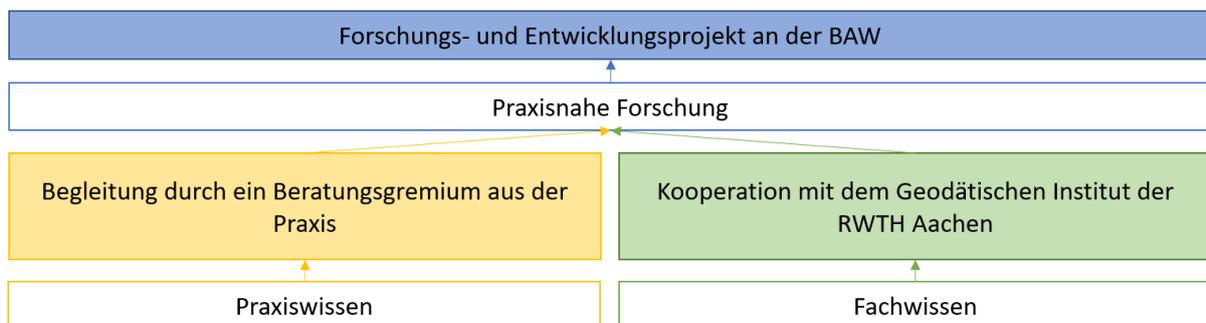


Abbildung 1: Aufbau des Forschungs- und Entwicklungsprojektes

Zur Erreichung des Forschungsziels werden zwei Untersuchungsmethoden angewendet: die theoretische Recherche und die praktische Erprobung. Die Recherche schafft die Voraussetzung für die praktische Erprobung, indem sie auf geeignete und vielversprechende innovative Methoden hinführt. Beiden Untersuchungsmethoden zusammen sind sechs Arbeitspakete zugeordnet, die Abbildung 2 zu entnehmen sind.

Das erste Arbeitspaket „Aktuelles Vorgehen bei der Bauwerksinspektion“ dient der Identifizierung möglicher Verbesserungspotenziale der derzeit durchgeführten Inspektion von Wasserbauwerken. Dazu werden im ersten Schritt auf Basis der aktuellen Regelwerke und Merkblätter die Vorgaben und Hinweise für die Inspektion recherchiert (Kapitel 2.1.1). Im zweiten Schritt werden diese mit der Praxis abgeglichen, indem exemplarisch das Vorgehen bei zwei Bauwerksprüfungen dokumentiert wird (Kapitel 2.1.2).

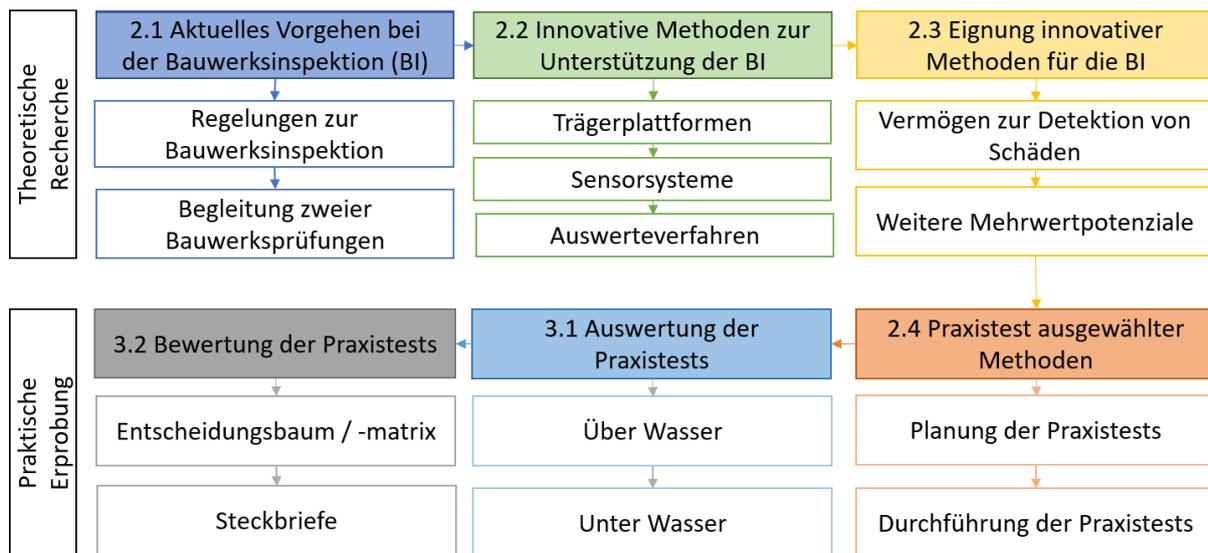


Abbildung 2: Gliederung des Forschungs- und Entwicklungsprojektes, BI = Bauwerksinspektion

Das zweite Arbeitspaket „Innovative Methoden zur Unterstützung der Bauwerksinspektion“ widmet sich der Funktionsweise und den Anwendungsfällen von digitalen Methoden, die derzeit bei der Bauwerksinspektion nicht zum Einsatz kommen, diese aber unterstützen könnten (Kapitel 2.2). Im dritten Themenblock zur „Eignung innovativer Methoden für die Bauwerksinspektion“ wird zunächst das Vermögen der Methoden zur Detektion von Schäden abgeschätzt (Kapitel 2.3.1). Anschließend wird ausgehend von Gesprächen mit dem Beratungsgremium aufgezeigt, welche generellen Mehrwerte der Einsatz der innovativen Methoden für die Bauwerksinspektion liefern kann (Kapitel 2.3.2). Das Arbeitspaket „Praxistest ausgewählter Methoden“ befasst sich mit dem zweiten Teil des Projektes, der Planung und Durchführung der Praxistests (Kapitel 2.4). Die anschließende Auswertung der Praxistests (Kapitel 3.1) bildet schließlich die Basis für die Bewertung der innovativen Methoden für den Einsatz bei der Bauwerksinspektion (Kapitel 3.2), welches mittels eines Entscheidungsbaums, einer Entscheidungsmatrix und Steckbriefen visualisiert wird.

## **2.1 Aktuelles Vorgehen bei der Bauwerksinspektion**

Zu Beginn des Forschungs- und Entwicklungsprojektes steht die Analyse des Ist-Zustandes, d. h. die Bestandsaufnahme der vorherrschenden Methoden zur Inspektion von Wasserbauwerken, im Fokus. Sie soll als Ausgangsbasis für die Identifikation innovativer Methoden dienen, die für den unterstützenden Einsatz bei diesem Anwendungsfall geeignet sind. Die Analyse besteht aus zwei Teilen: zum einen aus der Analyse der bestehenden Regelungen zur Bauwerksinspektion (Kapitel 2.1.1) und zum anderen aus der Begleitung zweier Bauwerksprüfungen (Kapitel 2.1.2).

Ersteres dient der Erfassung der vorgeschriebenen bzw. vorgeschlagenen Vorgehensweise bei der Inspektion von Wasserbauwerken. Sie basiert auf der Verwaltungsvorschrift Bauwerksinspektion VV-WSV 2101 (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022) und den BAW-Merkblättern Bauwerksinspektion (MBI) (BAW 2010) und Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV) (BAW 2018).

Letzteres dient dem Vergleich der theoretischen Regelungen mit dem in der Praxis vorherrschenden Vorgehen, was durch die Begleitung der Durchführung von Bauwerksprüfungen an einer Wehranlage und an einer Schiffsschleusenanlage erreicht werden soll. Dabei geht es weniger darum, von den Vorschriften abweichende Praktiken aufzudecken, sondern vielmehr um die Erfassung von Verfahren, die in der Praxis häufig angewendet werden, aber nicht in den Vorschriften enthalten sind.

Das Endprodukt der Analyse soll eine übersichtliche Darstellung aller Teilschritte der Bauwerksinspektion einschließlich ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten sein, die als Ausgangsbasis für die Auswahl geeigneter innovativer Methoden dienen kann. Mit diesem Ziel vor Augen wurde die Methode der Prozessdokumentation gewählt, da sie eine systematische graphische und textliche Abbildung von Prozessen ermöglicht.

### **2.1.1 Regelungen zur Bauwerksinspektion**

Grundlegende Vorgaben zur Inspektion von Bauwerken, die in der Unterhaltungslast der WSV stehen, gibt die Verwaltungsvorschrift Bauwerksinspektion VV-WSV 2101 (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022). Danach soll bei der Bauwerksinspektion der „Zustand zum Zeitpunkt der Inspektion festgestellt und dokumentiert werden, um aufbauend auf dieser Grundlage notwendige Veranlassungen umgehend zu treffen“ (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022). Objektarten mit besonderem Gefährdungspotenzial und Komplexität, zu denen z. B. Wehr- und Schiffsschleusenanlagen gehören, sind zur Erreichung dieses Zieles mindestens alle sechs Jahre einer Bauwerksprüfung, spätestens drei Jahre danach einer Bauwerkszwischenprüfung und mindestens jährlich einer Bauwerksbesichtigung zu unterziehen.

Die Bauwerksprüfung stellt die umfassendste Art der Inspektion dar. Hier sind „alle, auch die schwer zugänglichen Bauwerksteile, unter Benutzung aller erforderlichen Hilfsgeräte handnah zu untersuchen“ (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022). Die Art der einzusetzenden Hilfsmittel wird in der Vorschrift nicht genannt. Das BAW-Merkblatt Schadensklassifizierung gibt jedoch insofern Auskunft, als dass zur Beurteilung bestimmter Schäden Messwerte, wie z. B. die Rissbreite mit Hilfe einer Risschablone, erhoben werden sollen.

Zu diesem Zweck sind „grundsätzlich alle Bauwerksteile trocken zu legen und Abdeckungen zu öffnen“ (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022). Im Rahmen des Forschungsprojekts wird die Bauwerksprüfung somit stellvertretend für die anderen Inspektionsarten wie Bauwerkszwischenprüfung, Bauwerksüberwachung und Bauwerksbesichtigung, die einen geringeren Untersuchungsumfang aufweisen, betrachtet. Im BAW-Merkblatt Bauwerksinspektion (BAW 2010) wird der Begriff handnah spezifiziert als „hinreichend nah[e] an der Konstruktion [...] um deren Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit beurteilen zu können“. „Hierfür ist das Bauwerk soweit nötig zu reinigen, um alle relevanten Schäden sehen zu können“ (BAW 2010), siehe Abbildung 3. Ist die dafür notwendige Trockenlegung „aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich, so kann das Objekt durch Ingenieurtaucher inspiziert werden“ (BAW 2010). Demnach handelt es sich bei diesen Taucheinsätzen um „besonders gefahrgeneigte Tätigkeiten“ bei denen „die eingesetzten Taucher [...] erhöhten körperlichen Belastungen und Gesundheitsgefahren ausgesetzt“ sind.



Abbildung 3: Reinigung am Beispiel der Schiffsschleusenanlage Eckersmühlen

Hinweise zur Einstufung von Schäden in die Schadensklassen 1 bis 4 gibt BAW (2018). Demnach ist ein Schaden, „der aktuell die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit nicht beeinträchtigt und vermutlich auch zukünftig nicht beeinträchtigen wird“, der Schadensklasse 1 zuzuordnen (BAW 2018). Die Schadensklasse 4 ist dagegen zu vergeben, wenn „die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit des Bauteils [...] nicht mehr gegeben“ ist (BAW 2018). Für die Dokumentation der Schäden einschließlich ihrer Bewertung ist das Programmsystem WSVPruf zu verwenden, das auch die Möglichkeit bietet, den gesamten Ablauf der Bauwerksinspektion digital abzubilden. Zur Schadensdokumentation stehen vordefinierte Begriffe und die Möglichkeit des Hochladens von maximal zwei Schadensbildern zur Verfügung.

## 2.1.2 Begleitung zweier Bauwerksprüfungen

Zur Erfassung der vorherrschenden Vorgehensweise bei der Inspektion von Wasserbauwerken wird die Bauwerksprüfung einer Wehranlage und einer Schiffsschleusenanlage begleitet. Entsprechend der Zielsetzung des Forschungsprojektes liegt dabei ein Augenmerk auf dem gegenwärtigen Einsatz von Hilfsmitteln. Darüber hinaus wird der Inspektionsablauf am Bauwerk mit Hilfe einer Prozessdokumentation erfasst.

Bei den begleiteten Bauwerksprüfungen haben sich zwei Gruppen von Hilfsmitteln für zwei unterschiedliche Zwecke herausgebildet. Dabei handelt es sich zum einen um kleinere Hilfsmittel, die das Inspektionspersonal in der Regel während der Prüfung bei sich trägt und zur Schadensbewertung und -dokumentation verwendet, siehe Abbildung 4, links. Zu den kleineren Hilfsmitteln gehören ein Notizblock oder -brett, eine Digitalkamera, Sprühfarbe oder -kreide, eine Taschenlampe, eine Risssschablone, ein Hammer sowie schriftliche Dokumente wie ältere Inspektionsberichte, Bestandspläne usw. Zum anderen kommen größere Hilfsmittel zum Einsatz, die unabhängig voneinander bewegt oder bei Bedarf herangezogen werden und der Verbesserung der Zugänglichkeit dienen, siehe Abbildung 4, rechts. Zu den größeren Hilfsmitteln zählen Leitern, Hubsteiger, Hebebühnen, Arbeitskörbe oder -bühnen und Gerüste verschiedener Art. Bei bestimmten Schadensarten kommen zusätzliche Messgeräte zur Untersuchung des Schadens, wie z. B. ein Bewehrungssuchgerät, zum Einsatz. In diesem Zusammenhang ist auch das „BAW Merkblatt Schadensklassifizierung“ (BAW 2018) zu beachten, in dem es heißt, dass, wenn „das Inspektionspersonal den Schaden oder die Schadensursache sowie dessen Auswirkungen unter Berücksichtigung von Bestandsstatiken, Bestandsplänen und anderen Unterlagen nicht umfassend beurteilen kann, [...] eine gutachterliche Bewertung des Schadens erforderlich“ ist. Diese „Stellungnahme eines fachkundigen Ingenieurs oder einem Gutachten mit materialtechnischen, experimentellen und/oder statischen Untersuchungen“ (BAW 2018) geht damit über den Rahmen der Bauwerksinspektion hinaus und wird im Rahmen des Forschungsprojektes nicht betrachtet.

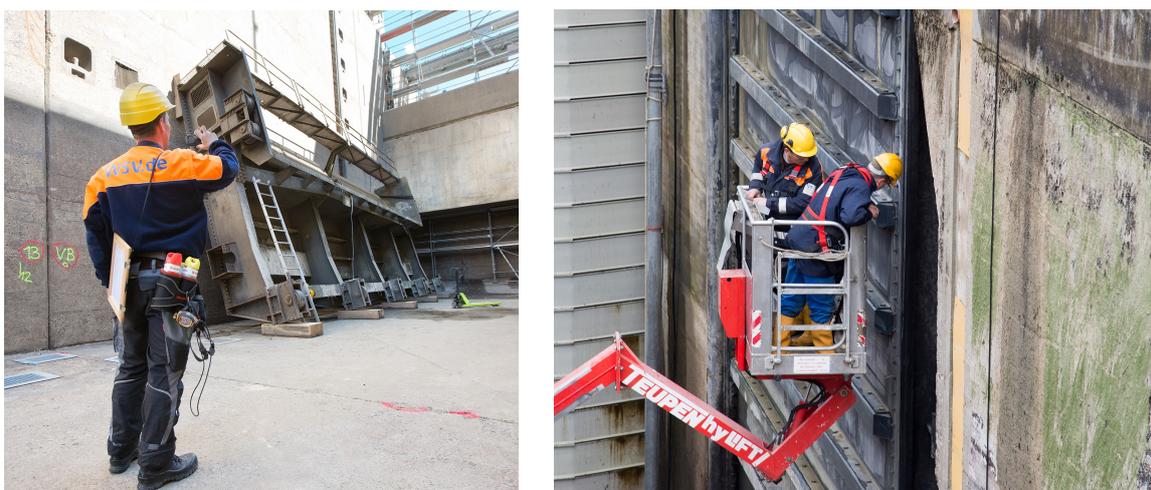


Abbildung 4: Eingesetzte Hilfsmittel bei der Bauwerksprüfung am Beispiel der Schiffsschleusenanlagen Neckarsteinach (links) und Bamberg (rechts)

Um die Möglichkeiten der Integration innovativer Methoden in den Prozess der Bauwerksinspektion zu bewerten, wird der an den Bauwerken beobachtete Ablauf der Bauwerksprüfung in Form einer Prozessdokumentation festgehalten. Abbildung 5 zeigt eine auf die Start- und Endpunkte sowie die Hauptprozesse gekürzte Version der Prozessdokumentation. Eine vollständige Darstellung der Prozessdokumentation ist Abbildung 6, Abbildung 7, Abbildung 8 sowie Anlage 1 zu entnehmen. Entsprechend der Zielsetzung des Projektes, das Inspektionspersonal bei der Durchführung der Inspektion vor Ort zu unterstützen, konzentriert sie sich auf die Schritte der Bauwerksprüfung, die am Bauwerk stattfinden. Entsprechend dieser Abgrenzung wird als Startpunkt des Prozesses der Zeitpunkt gewählt, an dem alle Vorbereitungen für die Prüfung des Bauwerks getroffen wurden. Der Endpunkt wird hingegen in der abgeschlossenen handnahen Untersuchung aller Bauwerksteile und in der Dokumentation der vor Ort festgestellten Schäden gesehen. Daran schließt sich, meist nicht mehr vor Ort, die Eingabe der Schäden in WSVPruf an.

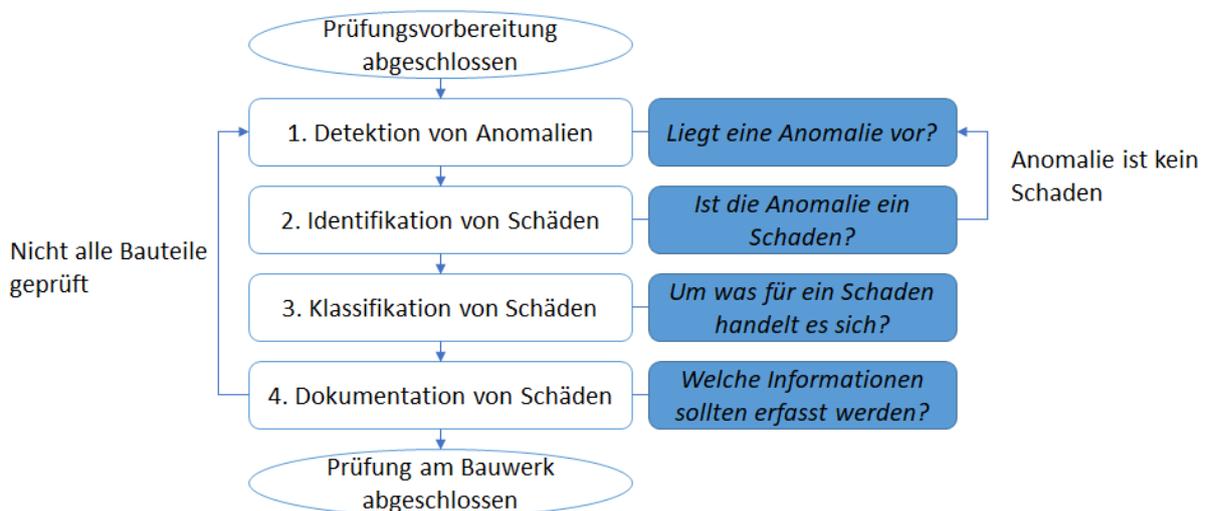


Abbildung 5: Übersicht über die Hauptprozesse bei den begleiteten Bauwerksprüfungen

Der Prozess der Bauwerksprüfung, siehe Abbildung 5, wird als eine Schleife bestehend aus vier Hauptprozessen modelliert. Es handelt sich um die Detektion von Anomalien, die Identifikation von Schäden, die Klassifikation von Schäden und die Dokumentation von Schäden. Die Unterteilung des Prozesses in diese Schritte wurde gewählt, weil jeder Schritt mit einem anderen Detaillierungsgrad der Informationsgewinnung für das Inspektionspersonal verbunden ist. Da der Hauptunterschied der innovativen Methoden in der Art der Informationsgewinnung liegt, wird diese Einteilung als hilfreich für die Auswahl von geeigneten Methoden angesehen.

Die Inspektionsschleife beginnt mit dem Hauptprozessschritt Detektion von Anomalien (Abbildung 6). Hierbei begibt sich das Inspektionspersonal in Handnähe zu bisher nicht überprüften Bauteilbereichen (1.1) und überprüft diese auf Anomalien (1.2). Unter einer Anomalie wird in diesem Kontext eine Abweichung zwischen dem Ist- und dem Soll-Zustand verstanden. Sie kann einen Schaden, d. h. eine „Überschreitung des Toleranzbereiches für die Abweichung zwischen dem Ist- und dem Soll-Zustand“ (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022) darstellen, muss sie aber nicht.

Es folgt der nächste Hauptprozessschritt Identifikation von Schäden (Abbildung 6), in dem die Anomalien mit bekannten Schadensbildern, z. B. aus dem „BAW-Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV)“ (BAW 2018), verglichen werden (2.1). Wird die Anomalie nicht als Schaden identifiziert, wird mit der handnahen Prüfung der Bauwerksoberfläche fortgefahren (1.1), andernfalls wird der gefundene Schaden genauer untersucht. Bei der Begleitung der beiden Bauwerksprüfungen wurde beobachtet, dass die Prozessschritte Detektion von Anomalien und Identifikation von Schäden stark ineinander übergehen und vom Inspektionspersonal häufig nicht als zwei separate Schritte wahrgenommen werden. Die Trennung der beiden Schritte erweist sich jedoch für das Projektziel als sinnvoll, da für die Detektion von Anomalien weniger Informationen benötigt werden als für die Identifikation von Schäden und somit vermutlich mehr innovative Methoden für diese Aufgabe in Frage kommen.

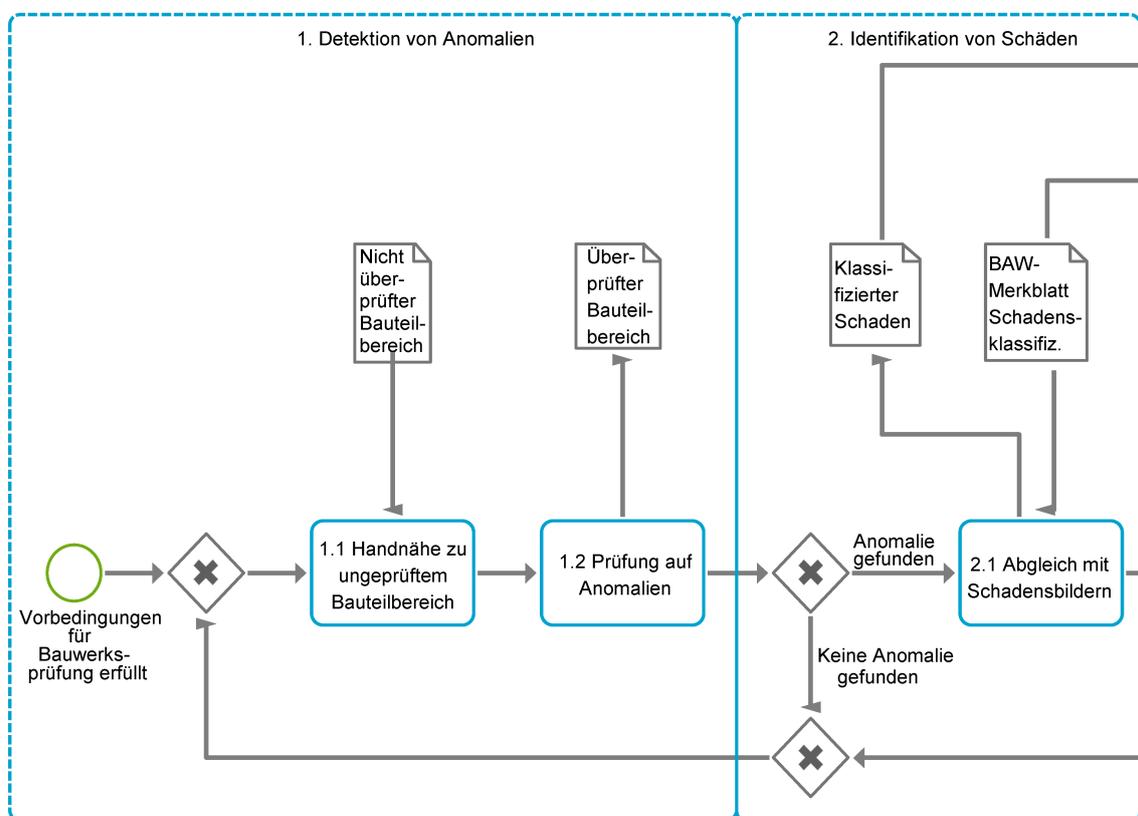


Abbildung 6: Prozessschritte Detektion von Anomalien und Identifikation von Schäden bei den begleiteten Bauwerksprüfungen

Der dritte Hauptprozessschritt ist der Klassifikation von Schäden gewidmet, dessen Teilprozessschritte Abbildung 7 zu entnehmen sind. Zunächst werden Form und Lage des Schadens bestimmt (3.1) und im Abgleich mit dem BAW-Merkblatt Schadensklassifizierung (3.2) weitere für die Bewertung des Schadens notwendige Schadensparameter, wie z. B. die Rissbreite, erhoben (3.3). Für den Fall, dass die Parameter mit den bei der Bauwerksprüfung zur Verfügung stehenden Mitteln nicht vollständig ermittelt werden können, kann es erforderlich sein, zusätzliche Hilfsmittel oder Gutachten zu organisieren (3.4). Die Klassifikation der Schäden dient in erster Linie dazu, alle notwendigen Informationen für die Bewertung des Schadens zu sammeln.

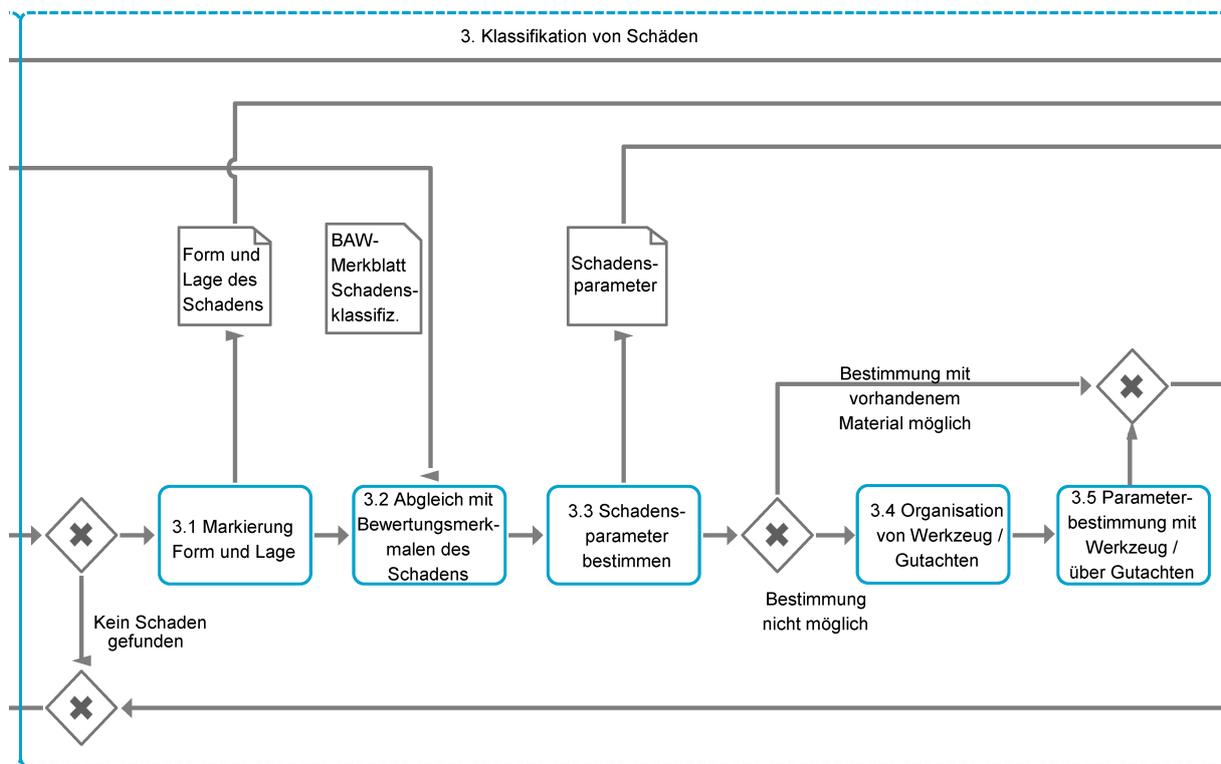


Abbildung 7: Prozessschritt Klassifikation von Schäden bei den begleiteten Bauwerksprüfungen, erster Teil

Darüber hinaus erfolgt in diesem Schritt eine Bewertung des Schadens hinsichtlich der Notwendigkeit von Sofortmaßnahmen (3.6) und die damit verbundene Benachrichtigung des Außenbezirks (3.7) (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022). Die Vermessung des Schadens als erster Schritt des Klassifikationsprozesses stellt wohl die höchsten Anforderungen an die digitale Erhebung, sowohl was den Umfang als auch was den Detaillierungsgrad betrifft. Die weiteren, für die Schadensbewertung zu erhebendem Parameter sind dagegen stark von der Art des Schadens abhängig, aber vermutlich mit innovativen Methoden nur schwer zu erheben.

Der letzte Schritt im Hauptprozess der Schadensaufnahme ist die Dokumentation des Schadens (Abbildung 8), was in diesem Modell die Erfassung aller relevanten Schadensdaten bedeutet. Sie umfasst die fotografische (4.1) und die schriftliche (4.2) Aufnahme des Schadens, wodurch sowohl fotografische als auch textliche Datensätze entstehen. Die Interpretation der Schadensdaten im Hinblick auf eine abschließende Bewertung, wenn keine Sofortmaßnahmen erforderlich sind, muss nicht zwangsläufig am Bauwerk erfolgen, sondern kann auch in der Nachbearbeitung im Zuge der Erstellung des Prüfberichts getätigt werden. Mit der vollständigen handnahen Prüfung aller Bauteiloberflächen ist die Prüfung am Bauwerk abgeschlossen. Der Prozessschritt der Dokumentation ist beim Einsatz digitaler Sensorsysteme mit Speichereinheiten für die vom Sensorsystem erfassbaren Parameter bereits enthalten. Es wird daher im Folgenden als nicht notwendig betrachtet, die Dokumentation als separaten Prozessschritt für die Auswahl von Sensorsystemen zu betrachten.

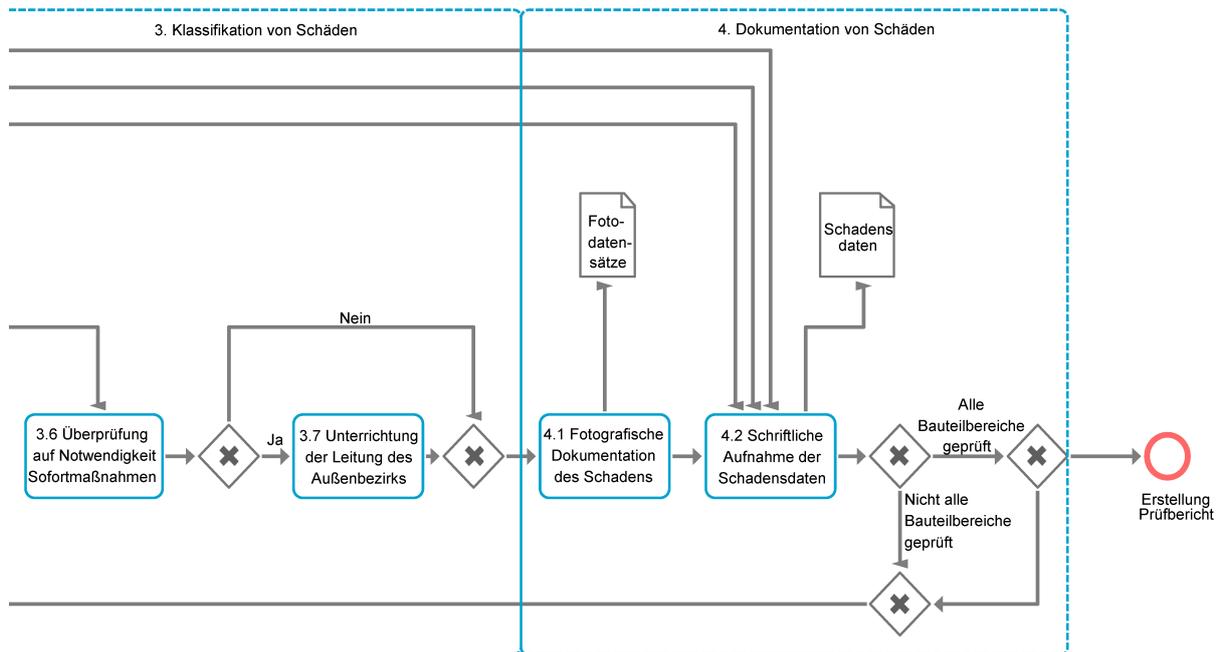


Abbildung 8: Prozessschritt Klassifikation von Schäden, zweiter Teil, und Dokumentation von Schäden bei den begleiteten Bauwerksprüfungen

Zusammenfassend besteht ein wesentliches Ergebnis der Prozessdokumentation darin, dass in Abhängigkeit von der Teilaufgabe des Inspektionsprozesses unterschiedlich hohe Anforderungen an die Datenerfassung zu stellen sind. Deshalb wird bei der Bewertung der Eignung innovativer Methoden für den Einsatz bei der Bauwerksinspektion unterschieden werden, ob Anomalien detektiert, Schäden identifiziert oder klassifiziert werden können. Unter Detektion von Anomalien wird hier lediglich die Erkennung von Abweichungen vom Soll-Zustand verstanden, während unter Identifikation die eindeutige Erkennung eines Schadens entsprechend den Hinweisen in BAW (2018) verstanden wird. Klassifikation wird hingegen so definiert, dass der Schaden auf der Grundlage der mit den innovativen Methoden erhobenen Daten mit einer Schadensklasse bewertet werden kann.

## 2.2 Innovative Methoden zur Unterstützung der Bauwerksinspektion

Nach der Erfassung des derzeit vorherrschenden Vorgehens zur Inspektion von Wasserbauwerken (Kapitel 2.1) widmet sich das folgende Kapitel den derzeit verfügbaren innovativen Methoden. Dazu wird zunächst definiert, was im Rahmen des Forschungsprojekts unter innovativen Methoden verstanden wird. Auf dieser Grundlage wird nach geeigneten innovativen Methoden für die Inspektion von Wasserbauwerken recherchiert.

Laut dem Duden versteht man unter dem Begriff "Innovation" die „Realisierung einer neuartigen, fortschrittlichen Lösung für ein bestimmtes Problem, besonders die Einführung eines neuen Produkts oder die Anwendung eines neuen Verfahrens“. Ausgehend von dieser Definition bezeichnen „innovative Methoden“ neuartige, fortschrittliche Methoden, die über die bisherige Vorgehensweise, im vorliegenden Fall bei der Bauwerksinspektion, hinausgehen. Von diesen Methoden werden im Rahmen des Projektes nur solche betrachtet, die die Inspektion von Wasserbauwerken, d. h. die Erreichung der damit verbundenen Ziele, siehe Kapitel 2.1, unterstützen könnten. Damit wird bereits zu Beginn des Projekts ein begrenzter Rahmen definiert, der sicherstellen soll, dass das Forschungsziel trotz der begrenzten Projektdauer erreicht werden kann.

Der Fokus der Recherche wird auf Methoden gelegt, die

- digital,
- (teil-) automatisierbar,
- am Markt verfügbar,
- nicht ortsfest,
- sich auf die Erfassung der Bauteiloberfläche beschränken und
- für Über- oder Unterwasser geeignet sind.

Die Fokussierung auf digitale und (teil-) automatisierbare Methoden beruht auf der Tatsache, dass diese bei der derzeitigen manuellen Bauwerksinspektion selten eingesetzt werden, siehe Kapitel 2.1, und dass sie das Potenzial haben, Zeit und Kosten bei der Bauwerksinspektion zu sparen, siehe Kapitel 2.2. Darüber hinaus liegt der Fokus auf am Markt verfügbare Technik, da das Projekt die WSV bei der Anwendung innovativer Methoden bei der Bauwerksinspektion unter den derzeitigen Rahmenbedingungen unterstützen möchte. Die Beschränkung auf Methoden, die nicht ortsfest am Bauwerk angebracht sind und nicht in das Innere der Bauteile schauen, ergibt sich aus den Anforderungen, die derzeit an die Bauwerksinspektion gestellt werden. Fest am Bauwerk installierte Sensoren, wie sie im Structural Health Monitoring, z. B. an der sogenannten „intelligenten Brücke“ (Haardt et al. 2017) bei Nürnberg, eingesetzt werden, ermöglichen eine kontinuierliche Zustandsüberwachung auch zwischen den Bauwerksprüfungen. Sie geht damit über das Ziel des Forschungsprojekts hinaus, die derzeit stattfindenden regelmäßigen und temporären Bauwerksinspektionen zu unterstützen.

Darüber hinaus wird der Fokus auf Methoden gelegt, die primär eine Erfassung der Oberfläche und nicht des Inneren des Bauteils ermöglichen, wie es bei zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfmethoden (Taffe und Wiese 2019) häufig der Fall ist. Hintergrund ist, dass sich die Bauwerksprüfung an Wasserbauwerken derzeit, wenn auch nicht vollständig, auf die durch Trockenlegung und Öffnungen freilegbaren Bereiche der Bauteile konzentriert, siehe Kapitel 2.1, und Messgeräten, die in das Innere des Bauteils blicken, wie z. B. Bewehrungssuchgeräte, in Einzelfällen aber nicht standardmäßig eingesetzt werden. Das letzte Kriterium bezieht sich auf die Eigenschaft von Wasserbauwerken Bauteile unter und über Wasser aufzuweisen, weshalb im Rahmen des Projekts Methoden geprüft werden sollen, die für den Einsatz unter oder über Wasser geeignet sind.

Die Auswahl von Methoden, die der obigen Definition entsprechen und als Unterstützung für die Bauwerksinspektion geeignet sein können, basiert auf einer Literaturrecherche. Dabei wird deutlich, dass sich die Methoden je nach ihrer Funktionalität in drei Gruppen einteilen lassen: Trägersysteme, Sensorsysteme und Auswerte- / Kollaborationsmethoden. Davon werden im Rahmen des Projektes die folgenden Methoden betrachtet:

- Trägersysteme
  - Unbemanntes Luftfahrtsystem (UAS)
  - Ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug (ROV)
- Sensorsysteme
  - Terrestrischer Laserscanner (TLS)
  - Terrestrische Kamera
  - Triangulationsscanner
  - Thermographie
  - Bildgebendes Sonar
  - Fächerecholot
- Auswerte-/Kollaborationsmethoden
  - Photogrammetrie
  - Maschinelle Schadenserkennung
  - Building Information Modeling (BIM)
  - Erweiterte Realität (AR)
  - Virtuelle Realität (VR)

Eine kurze Beschreibung der Methoden und eine Zusammenfassung der aus Projektsicht interessanten Literaturstellen werden in den folgenden Kapiteln dargelegt. Eine ausführliche Erläuterung der Funktionsweise der Methoden sowie Hinweise für ihre Anwendung bei der Bauwerksinspektion sind den Steckbriefen in Anlage 2 zu entnehmen.

## 2.2.1 Trägerplattformen

### Unbemanntes Luftfahrzeugsystem (engl. unmanned aerial system, UAS)

Für die Befliegung von Lufträumen können unbemannte Luftfahrzeuge (engl. unmanned aerial vehicle, UAV), umgangssprachlich als Drohne bezeichnet, zum Einsatz kommen, siehe Abbildung 13. Zur Bezeichnung des Fahrzeuges mitsamt seiner Ausrüstung zur Fernsteuerung wird der Begriff unbemanntes Luftfahrzeugsystem (unmanned aircraft system, UAS) verwendet. Die Steuerung kann mittels vorprogrammierter Flugrouten oder manuell erfolgen. Die Systeme können mit unterschiedlichster Sensorik wie z. B. RGB-Kameras, Wärmebildkameras und Laserscanner ausgestattet werden. Ausgestattet mit einer Kamera können als Resultat der Drohnenaufnahme Einzelbilder oder Bildverbände bzw. dreidimensionale Oberflächenmodelle entstehen, wobei in letzteren beiden Fällen von der UAV-Photogrammetrie gesprochen wird. Hierfür ist es zum einen notwendig Passpunkte, d. h. Punkte mit bekannten Positionen (Koordinaten), am Bauwerk anzubringen und zum anderen Bilder mit einer Überdeckungsrate von 60 bis 95 Prozent in beide Richtungen aufzunehmen (Anlage 2). Im Ergebnis entstehen Punktwolken, die durch eine Projektion der Einzelbilder auf das Modell auch texturiert, d. h. mit realer Oberflächenstruktur, dargestellt werden können.

In Nooralishahi et al. (2021) wird eine umfassende Literaturstudie über den Einsatz von UAS bei der Inspektion verschiedener Bauwerksarten beschrieben. Laut dieser Studie deutet der aktuelle Forschungsstand darauf hin, dass Drohnen sowohl die Risiken der Inspektion für die Gesundheit des Inspektionspersonals verringern als auch die Inspektionsqualität verbessern und die Inspektionsdauer verkürzen können. Zu den Herausforderungen beim Einsatz von UAS gehören der Wind, der die Zuverlässigkeit der Daten einschränkt, und die Schwierigkeit, die optimale Aufnahmedistanz zum Objekt zu bestimmen, wobei das Risiko von Kollisionen steigt, je kürzer die Entfernung wird. Hubbard und Hubbard (2020) untersuchen den Beitrag, den der Einsatz von UAS zur Verbesserung der Sicherheit von Brückeninspektionen leisten kann. Sie stützen sich dabei auf eine Literaturrecherche, Interviews mit Inspektionspersonal und Brückenbetreibern sowie auf die Begleitung von Brückeninspektionen. Auf dieser Grundlage werden der Nutzen und die Kosten in Bezug auf die Sicherheit des Einsatzes von UAS bei der Inspektion von Brückenbauwerken abgeschätzt. Das Ergebnis der Nutzen-Kosten-Schätzung ist, dass ein vierjähriger Einsatz von UAS bei Brückeninspektionen zu einem Nutzen-Kosten-Faktor von 1,1 führt, also einem geschätzten Nutzen der Methode, der um etwa zehn Prozent höher ist als seine Kosten. Darüber hinaus werden mehrere Anwendungsfälle für den Einsatz von UAS vor, während und nach der Inspektion gesammelt, wie z. B. der Einsatz zur Abschätzung der für die Inspektion erforderlichen Vorarbeiten. Im Projekt „Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie“ (Holst et al. 2016) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wird eine Machbarkeitsstudie zum Einsatz von UAS zur Schadenserkennung und -bewertung durchgeführt. Das Ergebnis der Studie, die auf Erfahrungen mit drei Testbrückenbauwerken basiert, ist, dass Risse mit einer Breite von mehr als 0,2 Millimetern an Betonbauteilen erkannt werden können. Einschränkungen sehen die Autoren bei Untersuchungen am Bauwerk, die manuelle Tätigkeiten wie Probeentnahmen oder Rissbreitenmessungen erfordern, weshalb sie den Einsatz von UAS als Unterstützung und nicht als Ersatz für die Bauwerksinspektion sehen.

Gegenüber dem Menschen habe sie den entscheidenden wirtschaftlichen Vorteil, dass die benötigte Inspektionszeit nicht mit zunehmender Anzahl von Schäden ansteigt, weshalb die Methode für eine erste, schnelle Beurteilung des Bauwerkszustandes, insbesondere bei erhöhten Anforderungen an die Arbeitssicherheit, geeignet sei (Sperber et al. 2017).

### **Unbemanntes Unterwasserfahrzeug (remotely operated vehicle, ROV)**

Für den Einsatz im Unterwasserbereich kann ein ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug (engl. remotely operated vehicle, ROV) zur Anwendung kommen, siehe Abbildung 16, links. Es handelt sich um ein unbemanntes Unterwasserfahrzeug, an das unterschiedliche Sensoren wie z. B. Kameras und Sonargeräte angebracht und das über ein Kabel an Land mit dem Operator verbunden ist (Anlage 2). Die Steuerung erfolgt zumeist über den Operator am Ufer mithilfe von Kamera- oder Sonarbildern. Eine Auflistung unterschiedlicher Arten von ROVs, die zur Unterstützung der Auswahl eines geeigneten Fahrzeugs dienen kann, ist in Capocci et al. (2017) enthalten. Dort wird zwischen zwei Kategorien an ROVs unterschieden, zwischen den „Intervention-Class ROVs“, die vorrangig bei Offshore-Anlagen zur Ausführung von Arbeiten zum Einsatz kommen, und den „Inspection-Class ROVs“, ausgelegt für die Inspektion von Unterwasserbauteilen. In Sugimoto et al. (2017) wird der Einsatz eines ROVs bei der Inspektion in größeren Wassertiefen am Beispiel von zwei Dämmen in Japan von der Firma „penta-ocean“ getestet. Verwendet wird ein für Inspektionen ausgelegtes Unterwasserfahrzeug, das neben einer Kamera mit einer Bürste zu Reinigung der Oberflächen, einem Messgerät zur Wanddickenmessung, einem Hammergerät zur akustischen Untersuchung und einer Vorrichtung zur Reduzierung der Bildtrübung ausgestattet ist. Das Resultat der Untersuchung ist, dass sich der Einsatz des ROVs auch für die visuelle Inspektion in größeren Tiefen eignet, in denen der Einsatz von Tauchern mit größeren Risiken verbunden ist. Trotz der prinzipiellen Eignung des Systems wurden bei den Praxistests Verbesserungspotenziale in einer Reduzierung der Kosten, Erhöhung der Bedienungsfreundlichkeit und Verbesserung der Hilfsgeräte gesehen.

In António Neves Lousada (2021) wird von der spanischen Hafenverwaltung ein mit einer RGB- und Video-Kamera ausgestattetes ROV zur Inspektion unterschiedlicher Unterwasserbauteile an den Ufern der Kanarischen Inseln eingesetzt. Inspiziert werden Kaiblöcke aus Stahlbeton, das Betonfundament einer Anlegerrampe, eine Kaimauer aus Stahlbeton, eine Unterwasser-Pipeline inklusive ihrer Verbindungselemente und das Fundament eines Liegeplatzes aus Stahlbeton. Als Fazit des Einsatzes wird das ROV, da es sich frei unter Wasser bewegen kann, als neue Alternative für das Management, die Überwachung und Erhaltung für Unterwasserinfrastruktur gesehen.

In einer Analyse von Massot-Campos und Oliver-Codina (2015) wurden optische Sensoren und Methoden zur bildgebenden Erfassung von Unterwasserobjekten untersucht. Sie fanden heraus, dass die Bildqualität der erhobenen Daten durch Lichtverhältnisse, Streuung, Farbabsorption, Schwebpartikel und Luftblasen beeinflusst werden. Diese Faktoren führen zu Unschärfe, reduziertem Kontrast und Bildrauschen.

## 2.2.2 Sensorsysteme

### Terrestrisches Laserscanning (TLS)

Beim terrestrischen Laserscanning (TLS) werden mittels Laserlicht Objekte von festen Instrumentenstandpunkten gescannt, wodurch 3D-Punktwolken entstehen. Bei mehreren Instrumentenstandpunkten sind die einzelnen Punktwolken mittels Registrierung und Georeferenzierung zusammenzuführen (Anlage 2). Eine zusätzliche Ausstattung mit einer RGB-Kamera ist möglich und bei vielen Instrumenten heute der Standard, um die entstehenden Punktwolken realitätsnah einzufärben. Terrestrische Laserscanner werden in der Baubranche bereits häufig zur Dokumentation des Planungs- und Ausführungszustandes eingesetzt, z. B. Becker und Knapp (2019). In Mischo et al. (2019) wird z. B. der Fall betrachtet, dass zu einem Bauwerk keinerlei Bestandsunterlagen vorliegen und diese mittels TLS nachträglich generiert werden. Dazu wird die aus der Laserscanaufnahme resultierende Punktwolke nachbearbeitet und zunächst in ein BIM-Modell und anschließend in ein statisches Modell überführt. Die Vorgehensweise wird an einer Stahlbau- brücke getestet, wobei jedoch die Erfahrung gemacht wurde, dass in diesem Fall ein erhöhter Nachbearbeitungsaufwand erforderlich war. In Hadavandsiri et al. (2019) wird ein terrestrischer Laserscanner zur Aufnahme eines Aquädukts aus Stahlbeton in Kanada eingesetzt. Die daraus resultierende Punktwolke wird verwendet, um darauf einen Klassifizierungs-Algorithmus zur automatischen Erkennung von Schäden anzuwenden. Als Ergebnis des Testes konnten Schäden einer Größe bis zu einem Zentimeter mittels des Algorithmus detektiert werden. Dem Thema der Risserkennung mittels terrestrischem Laserscanner widmet sich ebenfalls Anil et al. (2013) mittels Laborversuchen. Ziel ist es, sowohl die Parameter der Risse als auch die des Laserscanners zu identifizieren, die ihre Erkennbarkeit beeinflussen. Zur Untersuchung dieser Abhängigkeiten wurden künstliche Blöcke mit schwarzen Mustern erstellt, die stellvertretend für einen gerissenen Betonblock herangezogen werden.

### Terrestrische Kamera

Terrestrische Kameras sind im Unterschied zu Kameras, die aus der Luft, z. B. durch UAS, eingesetzt werden, Kameras, die vom Boden aus zum Einsatz kommen. Die Kamera kann entweder vom Menschen getragen oder auf einem Stativ montiert werden. Zur Generierung von dreidimensionalen Modellen können die Bilder bei entsprechender Überlappung und Georeferenzierung mit der Methode der Photogrammetrie nachbearbeitet werden (Anlage 2). Spezielle Risskameras (z. B. Sachverständigen-Bedarf 2022), die zur Gewährleistung eines gleichbleibenden Abstandes mit einem Rahmenvorsatz versehen sind, können zur Bestimmung von Rissbreiten mit Zehntel- millimeter-Genauigkeit verwendet werden (Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021).

## **Triangulationsscanner**

Unter Triangulationsscanner werden handgeführte Scanner verstanden, die mittels einer Kamera und einer aktiven Lichtquelle 3D-Profile generieren können (Anlage 2). Dabei arbeiten Sie mit dem Triangulationsverfahren, welches eine spezielle Methode der Photogrammetrie darstellt. Die Aufnahme erfolgt durch langsames Führen des Scanners entlang des zu vermessenden Objekts, wobei Einzelmessungen zu 3D-Punktwolken zusammengesetzt werden. Die Nutzung von handgeführten Triangulationsscannern wird z. B. in der Automobil-, Kunst- und Modeindustrie in Kus et al. (2009), bei der Restaurierung von denkmalgeschützten Bauten in Fuentes et al. (2007) und zur Aufnahme von Bauteilgeometrien im Labor in Wang et al. (2018) beschrieben. Auf die Nutzung von Laserlinienscannern zur dreidimensionalen Erfassung von Unterwasser-Bauteilen wird unter anderem in Bleier et al. (2021), Castillón et al. (2019), Sardemann et al. (2022) und Hildebrandt et al. (2008) eingegangen, siehe Anlage 2.

## **Thermographie**

Unter Thermographie versteht man ein Verfahren zur Messung der Wärmestrahlung von Objekten mittels Wärmebildkamera. Bei der passiven Thermographie wird die von jedem Objekt natürlich ausgesendete Eigenwärme aufgezeichnet, bei der aktiven Thermographie wird hingegen das Objekt zuvor einer Wärmequelle ausgesetzt. Die Methode wird vor allem im Industriebereich zur Bestimmung von Produktionsfehlern, wie z. B. Hohlräumen, eingesetzt (Anlage 2). Eine Untersuchung zu den Möglichkeiten, mittels der Thermographie Schäden an Brückenbauwerken zu erfassen, wurde beispielsweise in Mold et al. (2020) vorgenommen. Ziel war es dabei, in Ergänzung zu der Erfassung von Oberflächenschäden, z. B. durch UAV oder Laserscan, auch Schäden unter der Oberfläche wie Delamination, Hohlräume und Feuchtigkeitsstellen aufzunehmen. Möglich soll dies durch die Temperaturunterschiede des beschädigten zum unbeschädigten Bereich sein, wobei die Kombination der Thermographie mit einem UAV sogar die flächendeckende Erfassung größerer Bereiche gewährleistet. Voraussetzung zur Erkennung ist ein Temperaturgradient im Objekt, ausgelöst durch eine aktive Bestrahlung oder natürliche Gegebenheiten. Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit dieser Schadenserkennung wurde eine Messkampagne von sowohl Laborversuchen zur Erkennung von Ablösungen und Hohlräumen als auch Feldversuchen zur Erkennung von Delaminationen durchgeführt. Im Ergebnis können bei mehrmaligen Aufnahmen eines Tages unter bestimmten Umweltbedingungen in Betonstrukturen Ablösungen in einer Tiefe von 5 Zentimetern und Risse, vor allem bei feuchten Verhältnissen, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit detektiert werden. Als wesentliche Einflussgröße auf die Detektionsrate und die Möglichkeit, Aussagen zum Schadensausmaß zu treffen, konnte die Sonneneinstrahlung identifiziert werden, da sie zur Veränderung im Wärmefluss führt. In Rocha et al. (2018) wird der Einsatz der Thermographie zur Detektion von Feuchtstellen an einer Hausinnenwand aus Mauerwerk beschrieben. Die Untersuchungen lassen darauf schließen, dass sich Feuchtigkeit gut detektieren lässt, jedoch der Rückschluss aus den Aufnahmen auf die Schwere des Feuchtigkeitschadens schwierig ist.

## **Echolot/Sonar**

Das Echolot bzw. das Sonar, das zumeist an einem Boot angebracht ist, nutzt Schallwellen zur elektroakustischen Vermessung von Gewässern. Unterschieden wird zwischen Einzelstrahl-Echoloten, die mittels eines Senders und Empfängers die Entfernung zu einem Punkt messen, und Fächerecholoten, die mehrere Schallimpulse gleichzeitig aussenden und empfangen (Anlage 2). Des Weiteren sind bildgebende Sonare zu unterscheiden, die kontinuierlich Schallwellen aussenden, deren gestreute Reflektionen gemessen werden, wodurch sie sich weniger für die Vermessung, sondern mehr für die Navigation und Objektdetektion eignen.

Eine Studie zur Anwendung von Multibeam-Fächerecholoten zur Schadenserfassung an Verkehrswasserbauwerken wird in Moisan et al. (2018) durchgeführt. Getestet wurde die Aufnahme einer gemauerten Schleusenkammer mit einem an einem Kranarm befestigten Fächerecholot und die anschließende Verschneidung der resultierenden Punktwolke mit einer durch einen terrestrischen Laserscanner erzeugten Punktwolke. Im Ergebnis konnten Schäden wie fehlende Ziegel und Ausbrüche größer vier Zentimeter erkannt werden. In Holste et al. (2019) wird ein Messsystem zur Erfassung von dreidimensionalen Daten unter Wasser beschrieben, das aus einer Kombination aus Fächerecholot und Tachymeter besteht. Das an einem Boot befestigte Echolot dient zur akustischen Erfassung der unter Wasser liegenden Bauteile und das am Ufer befindliche Tachymeter zu seiner Positionsbestimmung. Die Autoren geben das Erreichen einer Genauigkeit von zwei bis drei Zentimetern an und empfehlen den Einsatz des Systems im Vorfeld zu einer Tauchuntersuchung, um dessen zielgerichtete Durchführung zu gewährleisten. Erfahrungen des Einsatzes eines Fächerecholots an einer Talsperre werden in Müller-Braune (2022) beschrieben. Neben der Nutzung der entstehenden Punktwolke zur Dokumentation des Bauwerkszustandes wird darin auf die Möglichkeit der Erstellung von Bestandsplänen und der Generierung von BIM-Modellen hingewiesen.

### **2.2.3 Auswerte-/Kollaborationsverfahren**

#### **Maschinelle Schadenserkenkung auf Basis von Bildaufnahmen**

Die maschinelle Schadenserkenkung ist eine Auswertemethode zur automatischen Erkennung von Schäden auf Einzelbildern. Sie nutzt zunehmend maschinelle Lehrverfahren, die zunächst mittels Trainingsdaten die charakteristischen Muster von Schäden in Bildaufnahmen erlernen, um anschließend eigenständig anhand der erlernten Muster die Schäden zu erkennen und zu klassifizieren (Anlage 2). Im Rahmen des verkehrsträgerübergreifenden Forschungsformats „BMDV-Expertennetzwerk“ werden unter anderem Methoden zur Unterstützung der Bauwerksinspektion durch bildverarbeitende Systeme untersucht. Ein Projekt widmet sich speziell der Möglichkeit, Risse an Betonbauwerken zu erkennen, indem zunächst die dafür notwendigen Grundlagen beschrieben werden (Reinhardt et al. 2018). Es wird eine Kategorisierung von Rissen vorgenommen, die als eindeutige Kriterien für die Erfassung der Schäden mit automatisierbaren Systemen dienen soll. Im Rahmen eines Projektes der Bundesanstalt für Straßenwesen mit der Bauhaus-Universität Weimar (Morgenthal et al. 2021) wurde untersucht, inwieweit eine (halb-) automatisierte Bildauswertung die Prüfung von Brückenbauwerken unterstützen kann. Im Fokus stand dabei die Erkennung von Rissen mittels künstlicher neuronaler Netze anhand von drohnenbasier-

ten Schadensbildern an Betonbauteilen. Es zeigte sich, dass gerade das Trainieren der Algorithmen mit einem geeigneten Trainingsdatensatz einen großen Raum bei der Projektbearbeitung einnahm. Die Möglichkeit, Risse automatisiert zu erkennen, wurde grundsätzlich bestätigt, Verbesserungspotenzial jedoch bei der Verortung der Schäden sowie in einer Erweiterung um weitere Funktionalitäten, wie z. B. der Messung von Rissbreiten, gesehen. Ebenso wird sich in Dais et al. (2021) der automatisierten und bildbasierten Erkennung von Rissen gewidmet, jedoch an Bauteilen aus Mauerwerk. Auch hier wird das Vorhandensein eines ausreichend großen Trainingsdatensatzes als eine Herausforderung bei der Entwicklung der Algorithmen gesehen. Bei der Risserkennung kann eine Erkennungsrate von ca. 80 bis 95 % erreicht werden, wobei weiterer Forschungsbedarf bei der Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen, wie z. B. einer veränderten Lichtsituation, gesehen wird. Das derzeit laufende Forschungsprojekt des Geodätischen Instituts und Lehrstuhls für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia) der RWTH Aachen und der Firma Massenberg „Digipark“ (Blut et al. 2021) widmet sich ebenfalls der automatisierten Erkennung von Rissen, aber auch von flächigen Schäden, wie Abplatzungen und freiliegender Bewehrung, anhand von Bildern.

### **Building Information Modeling (BIM)**

Building Information Modeling (BIM) ist eine digitale Arbeitsmethode, die auf die vollständige Digitalisierung des gesamten Lebenszyklus von Bauwerken setzt (Eastman 2011). Im Mittelpunkt steht dabei häufig ein dreidimensionales, digitales Modell des Bauwerks, das mit zusätzlichen Informationen in Form von Attributen verknüpft wird (Bödefeld und Lühr 2019). Die so erreichte Lokalisierung der Daten kann auch um die zeitliche Dimension ergänzt werden, wobei alle Daten jederzeit abrufbar sind und örtlich und zeitlich zugeordnet werden können. Der Schwerpunkt der Anwendung von BIM liegt in Deutschland derzeit in der Planungsphase, die Methode bietet aber Potenziale über den gesamten Lebenszyklus, also auch für den Betrieb der Anlagen (Singer und Borrmann 2016). In der „Machbarkeitsstudie BIM für Bestandsbrücken“ (Singer und Borrmann 2016), die von der Technischen Universität München, Institut für Computergestützte Modellierung und Simulation, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt wurde, wird BIM als sehr gut geeignete Grundlage für das Erhaltungsmanagement von Brücken gesehen. „Die zugrundeliegenden digitalen Bauwerksmodelle können sowohl die Datenerfassung der Inspektion unterstützen als auch die darauf aufbauenden Prozesse der Zustandsbewertung (und ggf. -prognose) und der Instandsetzungsplanung und bilden insbesondere eine sehr gute Basis für die dauerhafte Speicherung aller geometrischen und alphanumerischen Informationen zum Brückenbauwerk.“ (Singer und Borrmann 2016). Das Modell fungiert dabei als sogenannter „Digitaler Zwilling“ des realen Bauwerks, da er dieses digital abbildet. In dem von der Hamburg Port Authority initiierten Projekt „smartBRIDGE Hamburg“ wird die Möglichkeit und der Nutzen einer Vereinigung von „BI-Modell sowie analoge und elektronische Zustandserfassung konzeptionell“ am Beispiel der Köhlbrandbrücke in Hamburg untersucht (Ullerich et al. 2020). In einer Forschungs Kooperation mit dem Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH AACHEN und der BAW wurde eine prototypische Umsetzung von BIM im Bestand am Beispiel der neuen Schleuse Trier durchgeführt (Becker und Knapp 2019). Dazu wurde das Bauwerk mit einer Kombination aus einem terrestrischen Laserscanner mit angeschlossener Kamera und einem mit einer Kamera ausgestatteten unbemanntem Luftfahrzeug erfasst. Unter

anderem dient dabei ein „As-built-Modell“ zur Abbildung des gebauten Bauwerks, das als Grundlage für Betrieb und Erhaltung dienen soll.

### **Erweiterte Realität (engl. Augmented Reality, AR)**

Bei der erweiterten Realität (AR) werden reale Objekte mit virtuellen Informationen angereichert und eine Interaktion mit dem Nutzer ermöglicht (Azuma 1997). Über eine transparente Datenbrille, z. B. eine Microsoft HoloLens, ein Smartphone oder ein Tablet wird die Realität aufgenommen und dargestellt, welche mit virtuellen Objekten wie z. B. Messungen und Notizen überlagert werden kann. Ein Konzept und eine Testanwendung zur Nutzung der erweiterten Realität zur Unterstützung der Bauwerksinspektion wird beispielsweise in Karaaslan et al. (2019) beschrieben. Im Fokus steht dabei die Anwendung bei der Inspektion von Brückenbauwerken mittels AR-Brille, die eine Kombination aus Algorithmen und menschlicher Expertise ermöglichen soll. Die Autoren sehen in dieser Anwendung eine gute Möglichkeit, um kurzfristig die Objektivität und langfristig die Effektivität der Inspektion zu steigern. Der möglichen Integration von AR-Anwendungen in eine Bauwerksprüfung nach deutscher Normung widmet sich ein Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hill et al. 2021). Im Fokus des aktuell laufenden Projektes soll die Nutzererfahrung, gewährleistet durch Praxisanwendungen mit Inspektionspersonal, stehen. Mit der Nutzung von AR-Brillen für die Inspektion von Brücken beschäftigt sich auch Nguyen et al. (2022), wobei dort auch die Nutzung der Daten zur Generierung eines BIM-Modells zur Erhaltungsplanung betrachtet wird. Zudem führt u. a. das già das Projekt „Bauwerksinspektor XR“ durch, bei dem ein virtueller Bauwerksinspektor auf Grundlage von BIM-Modellen in erweiterter und virtueller Realität entwickelt werden soll.

### **Virtuelle Realität (engl. Virtual Reality, VR)**

Die virtuelle Realität (VR) bezeichnet eine virtuelle Umgebung zur möglichst realitätsnahen Darstellung einer künstlichen Wirklichkeit (Jerald 2016). Zum Einsatz kommen in der Regel VR-Headsets (z. B. HTC Vive) oder VR-Caves ggf. mit angeschlossenen Eingabegeräten (z. B. Flystick), welche das Eintauchen in die und die Interaktion mit der computergenerierten virtuellen Welt ermöglichen. Viele Forschungsarbeiten, z. B. Karaaslan et al. (2019), beschäftigen sich schwerpunktmäßig mit der Nutzung der erweiterten Realität für die Bauwerksinspektion, die unterstützend am Bauwerk eingesetzt wird. In Omer et al. (2018) wird jedoch auch ein Konzept entwickelt, um die Inspektion eines Brückenbauwerks rein virtuell anhand eines dreidimensionalen Modells durchzuführen. Das Konzept basiert auf einer durch TLS aufgenommenen Punktwolke und wird an einer vielbefahrenen Mauerwerksbrücke in Manchester auf Praxistauglichkeit getestet. Die Autoren bewerten die Anwendung aufgrund ihrer Wetterunabhängigkeit, ihrer höheren Arbeitssicherheit, der fehlenden Notwendigkeit von Verkehrsstilllegungen und höheren zeitlichen Flexibilität als positiv, sehen jedoch noch Weiterentwicklungspotenzial in der Technik.

## 2.2.4 Fazit

Die Recherche hat gezeigt, dass eine ganze Reihe von innovativen Methoden für die Inspektion von Wasserbauwerken in Frage kommen. Aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit ist es jedoch notwendig, die Anzahl der zu untersuchenden Methoden zu begrenzen. Ausschlaggebend für die Auswahl ist zum einen der angenommene direkte Nutzen der Methode für die Durchführung der Bauwerksinspektion und zum anderen der angenommene Aufwand für die Erprobung der Methode.

Für die Bereiche über Wasser sind dies das Trägersystem unbemanntes Luftfahrzeug, die Sensorensysteme terrestrischer Laserscanner, Wärmebildkamera, Triangulationsscanner und die Auswertemethoden Photogrammetrie und maschinelle Schadenserkennung. Das unbemannte Luftfahrzeug und der terrestrische Laserscanner werden ausgewählt, weil sie laut Literatur beide in der Lage sind, hochauflösende Daten von Bereichen über Wasser in relativ kurzer Zeit zu erfassen. Sie werden beide in Betracht gezogen, weil das Luftfahrzeug in Kombination mit der Photogrammetrie den Vorteil eines texturierten Modells und der Laserscan den Vorteil einer präzisen geometrischen Erfassung des Objekts bietet. Die Methode der Thermographie wird als sinnvolle Ergänzung zu den beiden anderen Methoden gesehen, da sie im Unterschied zu diesen ein höheres Potenzial hat, Hohlstellen und -räume zu detektieren. Die Betrachtung eines handgeführten Triangulationsscanners bietet sich insbesondere deshalb an, weil er eine sehr hohe geometrische Detailauflösung sowie Genauigkeit verspricht und dieser bei der Bundesanstalt für Wasserbau bereits vorhanden ist, so dass er ohne großen Aufwand getestet werden kann. Für die Inspektion von Bauwerken könnte er vor allem wegen seiner Möglichkeit der dreidimensionalen Vermessung von Schäden oder Bauteilen gewinnbringend sein. Die bildbasierte Schadenserkennung mittels maschinellen Lernens wird untersucht, da sie geeignet scheint, insbesondere große Mengen an Daten effizient auszuwerten.

Die Testung der terrestrischen Kamera wird, da sie auf die Aufnahme lokaler Bereiche begrenzt ist und ihre Funktionsweise der der UAS mit photogrammetrischer Nachbearbeitung ähnelt, im weiteren Projektverlauf nicht betrachtet. Die Methoden Building Information Modeling und erweiterte sowie virtuelle Realität werden ebenfalls nicht berücksichtigt, da ihre Erprobung aufgrund ihrer Komplexität mit einem größeren Zeitaufwand verbunden wäre.

Unter Wasser werden das Trägersystem ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug und die Sensorensysteme bildgebendes Sonar und Echolot betrachtet. Das ferngesteuerte Unterwasserfahrzeug kann eine effiziente Lösung für die visuelle Inspektion lokaler Bereiche sein. Darüber hinaus kann es mit einem bildgebenden Sonar ausgestattet werden, so dass auch diese Methode ohne großen zusätzlichen Aufwand getestet werden kann. Der Einsatz eines Echolots hingegen scheint für eine effiziente Vermessung großer Flächen und die anschließende Modellerstellung geeignet zu sein, weshalb es als sinnvolle Ergänzung zum Unterwasserfahrzeug angesehen wird.

Damit kommen die folgenden innovativen Methoden bzw. Verfahren bei den Praxistests zum Einsatz:

- Über Wasser
  - Trägersysteme
    - Unbemanntes Luftfahrtsystem (UAS)
  - Sensorsysteme
    - Terrestrischer Laserscanner (TLS)
    - Triangulationsscanner
    - Thermographie
  - Auswerte- / Kollaborationsmethoden
    - Photogrammetrie
    - Maschinelle Schadenserkennung
- Unter Wasser
  - Trägersysteme
    - Ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug (ROV)
  - Sensorsysteme
    - Bildgebendes Sonar
    - Fächerecholot

## **2.3 Eignung innovativer Methoden für die Bauwerksinspektion**

In Kapitel 2.1.2 wird die Detektion, Identifikation, Klassifikation und Dokumentation von Schäden am Bauwerk als Kernaufgabe der Bauwerksinspektion identifiziert. Die Detektion der Schäden ist dabei die Grundvoraussetzung für deren Identifikation, Klassifikation und Dokumentation. In einem ersten Schritt wird daher abgeschätzt, welche innovative Methode sich für die Detektion welcher Schäden eignet. Dafür werden die im BAW-Merkblatt Schadensklassifizierung (BAW 2018) aufgeführten Schäden betrachtet und auf der Grundlage des Merkblatts und anhand von Expertenwissen die erforderlichen Leistungsparameter abgeschätzt. Das Ergebnis ist ein Schadenskatalog in tabellarischer Form mit den erforderlichen Parametern für die Erkennung von Schäden an Bauteiloberflächen. Diese Parameter werden mit den Leistungsparametern der innovativen Methoden verglichen, so dass sich für jede innovative Methode eine Liste potenziell detektierbarer Schäden unterschiedlicher Größe ergibt. Der Vergleich bildet die Grundlage für eine vorläufige Einschätzung der Eignung innovativer Methoden zur Schadenserkenkung, die durch die Praxis-tests überprüft werden soll.

### **2.3.1 Vermögen zur Detektion von Schäden**

Tabelle 1 zeigt die Grundstruktur des Schadenskatalogs, der aus drei inhaltlich zusammengehörenden Teilen besteht. Der erste Teil „Schaden“ enthält die in BAW (2018) enthaltenen Schäden. Der zweite Teil „Schadensmerkmal“ listet die Merkmale der Schäden auf, die vermutlich für ihre Detektion mit den ausgewählten innovativen Methoden relevant sind. Der dritte Teil „Detektion mittels...“ enthält eine erste Einschätzung, ob die jeweiligen innovativen Verfahren sich für die Detektion des Schadens eignen. Dargestellt werden jene Sensorsysteme, die in Kapitel 2.2 vor ausgewählt wurden. Dabei ist zu beachten, dass das unbemannte Luftfahrzeug bzw. Unterwasserfahrzeug sich in der RGB-Photographie für Überwasser bzw. Unterwasser wiederfindet. Für den Überwasserbereich (ÜW) werden die Sensorsysteme RGB-Photographie, Laserscanner (terrestrischer Laserscanner) und Handscanner (handgeführter Triangulationsscanner) sowie die Auswertemethode Photogrammetrie betrachtet, für den Unterwasserbereich (UW) ebenfalls die RGB-Photographie und das Fächerecholot. Nicht im Schadenskatalog enthalten sind damit das bildgebende Sonar, da es primär zur Orientierung des ROVs dient, und die Thermographie, da sie nicht zur Detektion einer Vielzahl von Schäden, sondern nur von ausgewählten Schäden, wie Hohlstellen, genutzt wird.

Tabelle 1: *Prinzipieller Aufbau des Schadenskataloges, ÜW: über Wasser, UW: unter Wasser*

Schaden	Schadensmerkmal				Detektion mittels					
	Feuchtigkeits-/Wasserschäden [Ja/Nein]	Planare Vermessung [mm]	Farbänderung [Ja/Nein]	Tiefenvermessung [mm]	RGB-Photographie (ÜW)	Photogrammetrie (ÜW)	Laserscanner (ÜW)	Handscanner (ÜW)	RGB-Photographie (UW)	Echolot (UW)
Schadensbezeichnung										

Die betrachteten Schäden werden BAW (2018) entnommen, da dieses die gängigsten Schäden an Verkehrswasserbauwerken auflistet und Hinweise über deren Einteilung in Schadensklassen in Abhängigkeit der vorhandenen Randbedingungen gibt. Damit führt es Charakteristika der Schäden auf, die mit den innovativen Methoden erfasst werden sollen. Das Merkblatt enthält Schäden an einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien, weshalb die folgenden Betrachtungen auf die am Testbauwerk vorherrschenden Materialien Beton, Stahl und Korrosionsschutz beschränkt wird. Im Schadenskatalog werden Schäden mehrfach in unterschiedlicher Ausprägung genannt, wenn dies auch im Merkblatt der Fall ist. Eine Auflistung der Schäden an Beton- und Stahlbetonbauteilen findet sich in Tabelle 2, für die Materialien Mauerwerk und Stahl ist Anlage 3 zu betrachten.

Die für die Detektion relevanten Merkmale der Schäden wurden entsprechend der Funktionsweise der ausgewählten Sensorsysteme, siehe Kapitel 2.2, und der möglichen Erscheinungsformen der Schäden nach BAW (2018) bestimmt. Es handelt sich um

- Feuchtigkeits- oder Wasserschaden,
- planare Vermessung,
- Farbänderung und
- Tiefenvermessung.

Die geschätzte planare Vermessung und die Tiefenvermessung sind Merkmale, die sich aus der Leistungsfähigkeit der Sensoren ergeben. Die Berücksichtigung des Umstands, ob der Schaden zu einer Farbänderung an der Oberfläche führt oder mit Feuchtigkeit zusammenhängt, ergibt sich hingegen aus den Einschränkungen bestimmter Sensorsysteme. Der nachfolgende Abschnitt enthält eine detaillierte Erläuterung der Hintergründe für die Auswahl der Merkmale.

Die betrachteten Sensorsysteme haben alle eine bestimmte räumliche Auflösung und Genauigkeit, die begrenzen, welche Objekte in welcher Größe mit ihnen erkannt werden können. Diese Fähigkeit ist unterschiedlich, je nachdem, ob es sich um planare Informationen, d. h. Informationen in einer Ebene (2D), um Daten im Raum (3D) oder um Tiefeninformationen (1D) handelt. Terrestrische Laserscanner sind beispielsweise besser für die 3D-Objekterfassung ganzer Bauwerke geeignet, während RGB-Kameras bei entsprechender Aufnahmeentfernung in der Regel eine höhere 2D-Auflösung aufweisen.

Die betrachteten Schäden äußern sich alle in einer Veränderung an der Bauteiloberfläche, da Schäden im Inneren von Bauteilen aus dem Projektumfang ausgeschlossen wurden, siehe Kapitel 2.2. Daher wird die Hypothese aufgestellt, dass ein Sensorsystem nur dann einen Schaden detektieren kann, wenn die erreichbare Genauigkeit größer ist als die kleinste Dimension der durch den Schaden verursachten Oberflächenveränderung. Das Merkmal „planare Vermessung“ richtet sich an die Folgen eines Schadens in der Bauteilebene. Es handelt sich um einen groben Schätzwert für die kleinste Abmessung der an der Bauteiloberfläche auftretenden Materialveränderung, die durch den Schaden resultiert. Zum Beispiel ergibt sich der Wert für den Schaden „Kiesnest am Beton“ aus dem Mindestdurchmesser der sichtbaren Teile der das Schadensbild bestimmenden Gesteinskörnung. Entscheidend für die hier angegebene Mindestgröße ist also nicht die minimale Größe des Schadens, sondern die minimale Größe der Strukturmerkmale des Schadens, in diesem Fall der einzelnen Gesteinskörnung. Bei Rissen wiederum wird die Größe in Form der Rissbreite durch die kleinste Abmessung des Schadens selbst bestimmt, die sich aus BAW (2018) ergibt. Zur Berücksichtigung der Tiefenausdehnung von Schäden dient das Merkmal Tiefenvermessung als grobe Abschätzung der Schadenstiefe.

Das Merkmal Farbänderung gibt an, ob das Sensorsystem zur Erkennung des Schadens in der Lage sein soll, Farbinformationen zu erfassen. Grundlage für die Einordnung ist das im BAW-Merkblatt beschriebene Erscheinungsbild des Schadens. Das Merkmal ist wichtig für die Bewertung von Technologien wie Sonar und Laserscannern ohne RGB-Kamera. Beispiele für Schäden, bei denen davon ausgegangen wird, dass ihre Erfassung Farbinformationen erfordern, sind Ausblühungen und Rostfahnen. Das Merkmal „Feuchtigkeits- / Wasserschaden“ wird verwendet, um zu erfassen, ob der Schaden mit Feuchtigkeit oder Wasseraustritt verbunden ist. In diesem Fall wird die These getroffen, dass diese Schäden, sobald sie unter Wasser vorliegen, nur eingeschränkt erfasst werden können. Dies ist beispielsweise beim Schaden „Punktuellem Wasseraustritt“ der Fall.

Zur Bewertung geeigneter innovativer Methoden werden im nächsten Schritt die Schadensmerkmale mit den Leistungsmerkmalen der Methoden korreliert. Dazu werden Leistungsmerkmale bestimmt, die notwendig sind um die oben genannten Schadensmerkmale zu erfassen. Es handelt sich um „Unter- und Überwasser“, die „planare Auflösung“, die „Farbinformation“ und die „Tiefenauflösung“. Das Merkmal „Unter- / Überwasser“ enthält die Information, ob die Methode unter Wasser oder über Wasser eingesetzt werden kann. Damit ist es relevant zur Beurteilung, ob Schäden, die das Merkmal „Feuchtigkeits- / Wasserschaden“ erfüllen, detektiert werden können. Ein weiteres Merkmal ist die „planare Auflösung“, die die Auflösung der Methoden in der Bauteilebene enthält und damit bestimmt, welche Schäden welcher „planaren Vermessung“ detektiert werden können. Die „Farbinformation“ gibt an, ob die Methode in der Lage ist, Farbinformationen zu verarbeiten und darzustellen, was notwendig ist zur Erkennung von Schäden, die mit einer „Farbänderung“ verbunden sind. Das letzte Merkmal „Tiefenauflösung“ korreliert wiederum mit dem Schadensmerkmal „Tiefenvermessung“ und berücksichtigt die Auflösung der innovativen Methoden in Tiefenrichtung. Die Werte für die Leistungsmerkmale stammen dabei aus der Recherche der Eigenschaften von am Markt erhältlichen Systemen und sind in Tabelle 3 dargestellt. Es handelt sich jeweils um die maximal mögliche Leistung der Systeme, die von der tatsächlich erreichbaren Leistung in Abhängigkeit der Aufnahmerichtung, des Bildsensors und des Objektivs abweichen kann.

Tabelle 2: Geschätzte Merkmale von Beton- und Stahlbetonschäden mit Relevanz für die Detektion mit innovativen Methoden

Schaden	Schadensmerkmal			
	Feuchtigkeits-/ Wasserschaden [Ja/Nein]	Planare Vermessung [mm]	Farb- änderung [Ja/Nein]	Tiefen- vermes- sung [mm]
Abwitterung der Oberfläche (Feinkorn freiliegend)	Nein	1	Ja	0,2
Abwitterung der Oberfläche (Grobkorn freiliegend)	Nein	1	Ja	2
Oberfläche geschädigt (oberflächen-nah)	Nein	10	Nein	10
Oberfläche geschädigt (tieferge-hend)	Nein	10	Nein	20
Abplatzung über korrodierter Be-wehrung	Nein	10	Ja	5
Schalenablösung (Ablösung infolge oberflächenparalleler Risse)	Nein	0,2	Nein	0,2
Schalenablösung (Ablösung der Vor-satzschale vom Untergrund)	Nein	15	Nein	15
Oberfläche offenporig	Nein	15	Nein	15
Oberfläche haufwerksporig	Nein	1	Nein	1
Kiesnest	Nein	5	Nein	1
Punktuelle Wasseraustritt	Ja	10	Ja	0
Netzrisse durch Treibreaktion (un-ter-schiedliche Rissbreiten)	Nein	0,2	Nein	0,2
	Nein	0,5	Nein	0,5
	Nein	1	Nein	1
Netzrisse durch Schwinden, Frost-(Tausalz-) Angriff (unterschiedliche Rissbreiten)	Nein	0,2	Nein	0,2
	Nein	0,5	Nein	0,5
	Nein	1	Nein	1
Ausblühung	Nein	10	Ja	0
Aussinterung	Nein	10	Ja	0
Rostfahne	Nein	10	Ja	0
Einzelrisse im Stahlbeton (unter-schiedlicher Breite)	Nein	0,4	Nein	0,4
	Nein	0,7	Nein	0,7
	Nein	1	Nein	1
Einzelrisse im unbewehrten Beton (unterschiedlicher Breite)	Nein	1	Nein	1
	Nein	2	Nein	2
	Nein	3	Nein	3
Bewehrungsschäden Gruppe 1	Nein	1	Nein	10
Bewehrungsschäden Gruppe 2 (un-ter-schiedlicher Tiefe)	Nein	2	Nein	0
	Nein	3	Nein	0
	Nein	0,2	Nein	0
Bewehrungsschäden Gruppe 3	Nein	0,2	Nein	0
Bewehrung gerissen	Nein	0,2	Nein	0,1

Tabelle 3: *Recherchierte maximale Leistungsmerkmale der innovativen Methoden, \* = Einbildphotogrammetrie*

Leistungsmerkmal	Innovative Methode					
	RGB-Photographie (ÜW)	RGB-Photogrammetrie*	Laserscanner (ohne RGB-Kamera)	Handscanner	RGB-Photographie (UW)	Echolot
Unter- (UW)/Überwasser (ÜW)	ÜW	ÜW	ÜW	UW	UW	UW
Planare Auflösung [mm]	0,3	0,5	0,8	0,1	0,5	10
Farbinformation	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein
Tiefenauflösung [mm]	-	-	0,1	0,1	-	5

Die Verknüpfung der Schadensmerkmale mit den Leistungsmerkmalen geschieht durch das in Abbildung 9 dargestellte Vorgehen. Ist die innovative Methode laut dem Merkmal „Unter- / Überwasser“ für den Unterwasserbereich geeignet (Schritt 1), wird geprüft, ob ein Feuchtigkeits- oder Wasserschaden vorliegt (Schritt 2). Ist diese Bedingung erfüllt, wird vermutet, dass eine Detektion des Schadens nicht ohne weiteres möglich ist, was über den Text „Nein wegen Wasser (N-W)“ angezeigt wird. Andernfalls wird zum dritten Schritt übergegangen. Somit stellen der erste und zweite Schritt ein Ausschlusskriterium für den Spezialfall „Unterwasser“ dar. Bei Methoden, die für den Überwasserbereich geeignet sind, wird vermutet, dass die Feuchtigkeit weniger Relevanz für die Detektion besitzt, weshalb in diesem Fall der Schritt 1 und 2 übersprungen wird.

Der dritte Schritt besteht in dem Vergleich der planaren Vermessung des Schadens mit der planaren Auflösung der innovativen Methoden. Ist diese kleiner, wird vermutet, dass keine Detektion des Schadens möglich ist und der Text „Nein wegen Größe (N-G)“ vergeben. Andernfalls wird vermutet, dass die mögliche Erfassung der kleinsten planaren Abmessung noch nicht ausreicht, um zu erkennen, dass es sich um einen Schaden handelt, und nur im Zusammenspiel mit einer Farb- oder Tiefenänderung gelingt.

Daher zieht der vierte Schritt einen Vergleich zwischen dem Merkmal „Farbinformation“ der innovativen Methode und „Farbänderung“ des Schadens. Wenn beide Merkmale bejaht werden, spricht der Schaden führt zu Farbänderungen, die mit der innovativen Methode detektiert werden können, wird von einer möglichen erfolgreichen Detektion ausgegangen. Da in diesem Fall angenommen wird, dass die Größe des Schadens und seine Farbänderung zu einer Detektion führen, wird der Text „Ja wegen Größe und Farbe (J-G-F)“ vergeben.

Kann die Abfrage aus dem vierten Schritt nicht erfüllt werden, wird im fünften Schritt die „Tiefenvermessung“ mit der „Tiefenauflösung“ verglichen. Ist diese kleiner wird von einer erfolgreichen Detektion ausgegangen und der Text „Ja wegen Größe und Tiefe (J-G-T)“ vergeben. Ansonsten wird vermutet, dass aufgrund der Farbe und Tiefe keine Detektion ermöglicht wird (N-F-T).

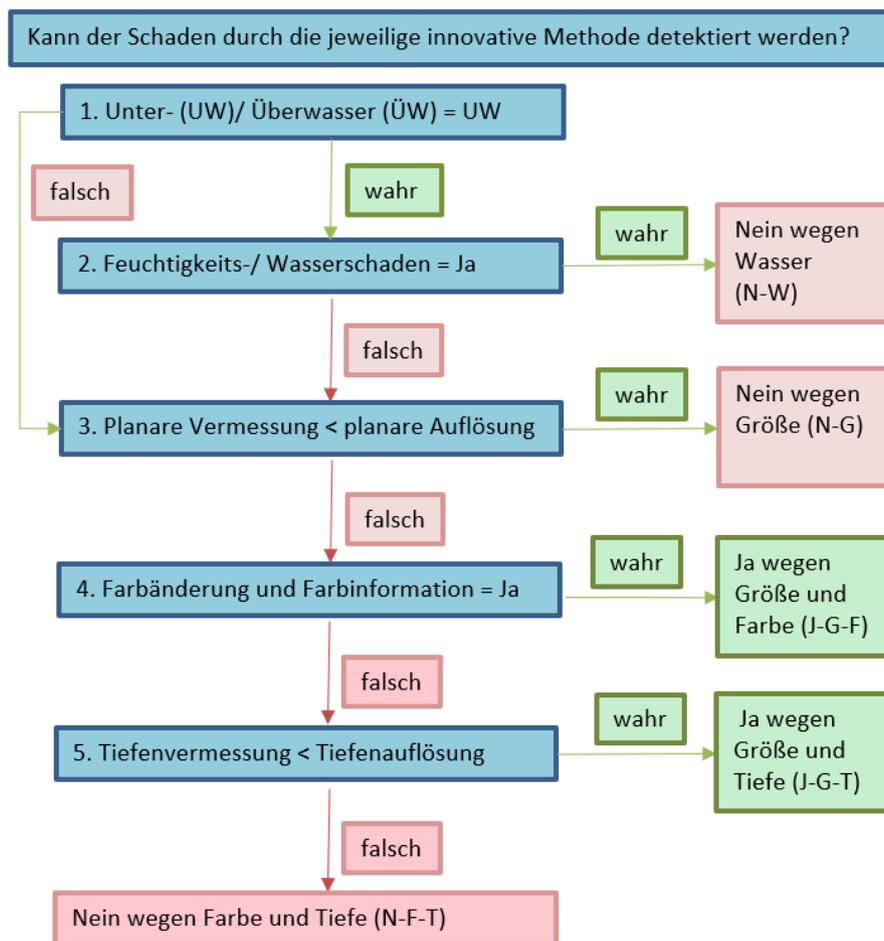


Abbildung 9: Vorgehen zur Beurteilung der Eignung der innovativen Methoden zur Schadensdetektion

Tabelle 4 zeigt die sich nach Anwendung des oben genannten Verfahrens ergebende Eignung der innovativen Methode zur Erkennung des jeweiligen Schadens. Es wird deutlich, dass es Schäden gibt, die wahrscheinlich mit keiner der aufgeführten Methoden erkannt werden können. Dabei handelt es sich aufgrund ihrer Größe um Netzrisse mit einer Breite kleiner oder gleich 0,2 Millimeter und Schalenablösungen, die sich in Form von Rissen gleicher Größe äußern. Ausgehend von dieser Abschätzung kann also davon ausgegangen werden, dass die Erkennung von Schäden an Beton- und Stahlbetonbauteilen mit dem heutigen Stand der Technik nicht hundertprozentig mit digitaler Technik erfolgen kann, sondern immer menschliches Eingreifen erfordert, wie es bereits bei der Schadensbewertung der Fall ist. Alle übrigen Schäden sollten demnach durch RGB-Photographie und -Photogrammetrie erfassbar sein. Das Verfahren zeigt weiterhin, dass der Laserscanner ohne RGB-Kamera vermutlich weniger in der Lage ist, verschiedene Arten von Schäden über Wasser zu erkennen. Im Unterwasserbereich wird vermutet, dass die RGB-Photogrammetrie deutlich mehr Schäden erkennen kann als das Sonar. Bei letzterem wird nur die Detektion von flächigen Schäden wie Abplatzungen, Ablösungen und offenporigen Oberflächen unterstellt, nicht aber von Rissen.

Tabelle 4: Geschätzte Eignung der innovativen Methoden zur Schadenserkennung an Beton- und Stahlbetonbauteilen

Schaden	Planare Vermessung [mm]	Tiefenvermessung [mm]	RGB-Photographie (ÜW)	RGB-Photogrammetrie	Laserscanner	Handscanner	RGB-Photographie (UW)	Echolot
Abwitterung der Oberfläche (Feinkorn freiliegend)	1	0,2	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-T	J-G-F	N-G
Abwitterung der Oberfläche (Grobkorn freiliegend)	1	2	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-T	J-G-F	N-G
Oberfläche geschädigt (oberflächennah)	10	10	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Oberfläche geschädigt (tiefergehend)	10	20	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Abplatzung über korrodierter Bewehrung	10	5	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-T	J-G-F	J-G-T
Schalenablösung (Ablösung infolge oberflächenparalleler Risse)	0,2	0,2	N-G	N-G	N-G	J-G-T	N-G	N-G
Schalenablösung (Ablösung der Vorsatzschale vom Untergrund)	15	15	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Oberfläche offenporig	15	15	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Oberfläche haufwerksporig	1	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Kiesnest	5	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
PunktueLLer Wasseraustritt	10	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	N-W	N-W	N-W
Netzrisse durch Treibreaktion (unterschiedliche Rissbreiten)	0,2	0,2	N-G	N-G	N-G	J-G-T	N-G	N-G
	0,5	0,5	J-G-T	J-G-T	N-G	J-G-T	J-G-T	N-G
	1	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Netzrisse durch Schwinden, Frost- (Tausalz-) Angriff (unterschiedliche Rissbreiten)	0,2	0,2	N-G	N-G	N-G	J-G-T	N-G	N-G
	0,5	0,5	J-G-T	J-G-T	N-G	J-G-T	J-G-T	N-G
	1	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Ausblühung	10	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	N-F-T	J-G-F	N-F-T
Aussinterung	10	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	N-F-T	J-G-F	N-F-T
	10	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	N-F-T	J-G-F	N-F-T
Rostfahne	10	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	N-F-T	J-G-F	N-F-T
Einzelrisse im Stahlbeton (unterschiedlicher Breite)	0,4	0,4	J-G-T	N-G	N-G	J-G-T	N-G	N-G
	0,7	0,7	J-G-T	J-G-T	N-G	J-G-T	J-G-T	N-G
	1	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G

Einzelrisse im unbewehrten Beton (unterschiedlicher Breite)	1	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
	2	2	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
	3	3	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G

### 2.3.2 Weitere Mehrwertpotenziale

Neben der reinen Detektion von Schäden sind weitere Mehrwertpotenziale durch den Einsatz innovativer Methoden im Prozess der Bauwerksinspektion vorstellbar. Ihre Bestimmung geschieht im ersten Schritt durch das Beratungsgremium des Forschungsprojektes. In einem zweiten Schritt wird die vorläufige Bewertung anhand von Praxistests evaluiert. Folgende Mehrwertpotenziale der innovativen Methoden werden als besonders wichtig identifiziert:

- Verbesserung der Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit
- Verringerung des Zeitaufwandes der Inspektion / Auswertung
- Verringerung der Kosten
- Verbesserung der Datenqualität

Die Verbesserung der Erreichbarkeit und der Arbeitssicherheit ist das am häufigsten vom Inspektionspersonal in den Gesprächen genannte Mehrwertpotenzial der innovativen Methoden. Potenziale werden vor allem in der Verringerung der Absturzgefahr bei der Inspektion von höher gelegenen Bauteilen oder Bauwerken, wie z. B. Kameramasten von Schleusen und Leuchttürmen, und in der Verbesserung der Erreichbarkeit in engen Räumen bzw. Bauwerken, wie z. B. Umläufen von Schleusen und Dükern, gesehen. Weiteres Potenzial für den Einsatz innovativer Methoden wird bei Flächen gesehen, die unter Betriebsbedingungen unter Wasser stehen. Die Trockenlegung dieser Bereiche ist mit einem hohen personellen, zeitlichen und monetären Aufwand verbunden und führt bei von der Schifffahrt genutzten Bauwerken, wie z. B. Schiffsschleusenanlagen, zu temporären Nutzungseinschränkungen. Gäbe es technische Systeme, die alle relevanten Schadensdaten im Unterwasserbereich zuverlässig erfassen könnten, würde dies die Möglichkeit eröffnen, die Bauwerke seltener oder für einen kürzeren Zeitraum zu sperren. Darüber hinaus könnten die innovativen Methoden einen Mehrwert für jene Bauwerke bieten, die nicht trockengelegt werden können und daher von Ingenieurtauchern oder Tauchern, die von einem Ingenieur von Land aus gesteuert werden, inspiziert werden. Laut BAW (2010) gehören diese Tauchgänge zu den „besonders gefahrensgefährlichen Tätigkeiten und die eingesetzten Taucher sind erhöhten körperlichen Belastungen und Gesundheitsgefahren ausgesetzt“, weshalb ihre Ersetzung zu einer starken Verbesserung der Arbeitssicherheit führen könnte.

Ein weiterer potenzieller Mehrwert der innovativen Methoden ist die Verringerung des Zeitaufwandes für die Durchführung und die Auswertung der Inspektion. Die verbesserte Zugänglichkeit dürfte mit einer Zeitersparnis einhergehen, da die Inspektion unter Einsatz von Gerüsten oder Fahrzeugen und die Inspektion unter Wasser deutlich mehr Zeit erfordern. Nach den im Projekt geführten Gesprächen bestünde auch ein großes Zeiteinsparungspotenzial in der Beschleunigung der für die Trockenlegung notwendigen Reinigung. Sie kann z. B. bei einer größeren Schiffsschleusenanlage bis zu zwei Wochen dauern und birgt zudem das Risiko einer Fehleinschätzung des Aufwandes. Ein erhöhter Zeitaufwand entsteht auch durch die Dokumentation von Schäden nach der eigentlichen Inspektion des Bauwerks. Auch hier bieten digitale Methoden das Potenzial, durch ihre standardisierte Erfassung die Effektivität der Bewertungs- und Dokumentationsprozesse zu verbessern und damit das Inspektionspersonal zu unterstützen.

Nach Bundeshaushaltsordnung (BHO), § 7, sind „bei Aufstellung und Ausführung des Haushaltsplans [...] die Grundsätze der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit zu beachten“ (BHO, vom 09.12.2019). Die Begrenzung der im Rahmen der Bauwerksinspektion anfallenden Kosten ist somit ein Faktor der Mehrwertbetrachtung. Die Ermittlung der genauen Kosten, die durch die Bauwerksinspektion verursacht werden, konnte in dem begrenzten Projektzeitraum nicht geleistet werden. Aufgrund des hohen Anteils an manuellen Tätigkeiten bei der derzeit vorherrschenden Bauwerksinspektion, siehe Kapitel 2.1.2, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Lohnkosten einen wichtigen Kostenfaktor darstellen. Darüber hinaus ist bei Bauwerksinspektionen, die mit einer Nutzungseinschränkung einhergehen, mit indirekten Kosten, z. B. durch eingeschränkte Schifffahrt, zu rechnen. Der verstärkte Einsatz innovativer Methoden in Verbindung mit einem höheren Automatisierungsgrad und kürzeren Sperrzeiten könnte daher in Abhängigkeit von den Kosten für den Einsatz der Methoden selbst zu Einsparungspotenzialen führen. Mögliche Kosten innovativer Methoden sind in den Steckbriefen im Anhang 2 aufgeführt, können aber je nach technologischem Reifegrad der Methode stark variieren.

Ein weiteres Mehrwertpotenzial des Einsatzes innovativer Methoden liegt in einer Verbesserung der Datenqualität. Sie könnte sich in einer verbesserten Verortung der aufgenommenen Schäden am Bauwerk äußern, die derzeit oft sehr grob vorgenommen wird. Die detaillierte Angabe des Schadensortes oder gar dessen Visualisierung könnte einen wichtigen Beitrag zur Einschätzung von Schadensfolgen und -ursachen, insbesondere im Falle von Rissen, leisten. Eine höhere Aussagekraft der Inspektion könnte auch durch die Vermessung der Schäden durch innovative Methoden erreicht werden. Sie wäre einerseits hilfreich für die Schadensbewertung, andererseits aber auch zur zutreffenden Bestimmung des Instandsetzungsumfangs, z. B. bei der Ausschreibung von Instandsetzungen. Betrachtet man nicht nur eine einzelne Bauwerksinspektion, sondern das Bauwerk in seinem gesamten Lebenszyklus, so wird deutlich, dass innovative Methoden das große Potenzial der einfachen Erstellung von Zeitreihen bieten. Durch ihr standardisiertes Vorgehen geben sie die Möglichkeit, Schäden, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst wurden, zu überlagern, um Schadensfortschritte darzustellen.

## 2.4 Praktische Erprobung ausgewählter Methoden

### 2.4.1 Planung der Praxistests

Nach dem zentralen Objektregister Wasserstraßen-Infrastrukturdaten (WInD) werden von der WSV auf Bundeswasserstraßen 154 verschiedene Objektarten (Stand: 20.06.2022) betrieben. Eine Beschränkung auf diejenigen Objektarten, die nach der VV-WSV 2101 (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022) einer Bauwerksprüfung, einer Bauwerkszwischenprüfung und einer Bauwerksbesichtigung zu unterziehen sind, führt zu immerhin 65 verschiedenen Objektarten. Da der Fokus des Projektes auf Anlagen im Zuständigkeitsbereich der WSV liegt, stehen damit für die Praxistests des Projektes eine Reihe von Anlagen unterschiedlicher Art zur Verfügung. Zur Beurteilung der grundsätzlichen Machbarkeit des Einsatzes innovativer Methoden bei der Bauwerksinspektion sollen die Tests zunächst an der Objektart durchgeführt werden, die dafür voraussichtlich am besten geeignet ist. Zu diesem Zweck werden die folgenden drei Kriterien festgelegt. Erstens sollte die Anlage trockengelegt werden können, um Tests über und unter Wasser zu ermöglichen. Zweitens sollte die Trockenlegung eine direkte Auswirkung auf den Schiffsverkehr haben, um den möglichen zusätzlichen Nutzen einer verkürzten Sperrzeit zu bewerten. Drittens sollte das Bauwerk über möglichst große und flächige Dimensionen verfügen, da in diesem Fall die Erfassung mit teilautomatisierbaren, digitalen Methoden wohlmöglich zur größten Zeitersparnis führt. Die Objektart Schiffsschleusenanlage erfüllt alle diese Kriterien und wird daher als Objektart für die Praxistests ausgewählt.

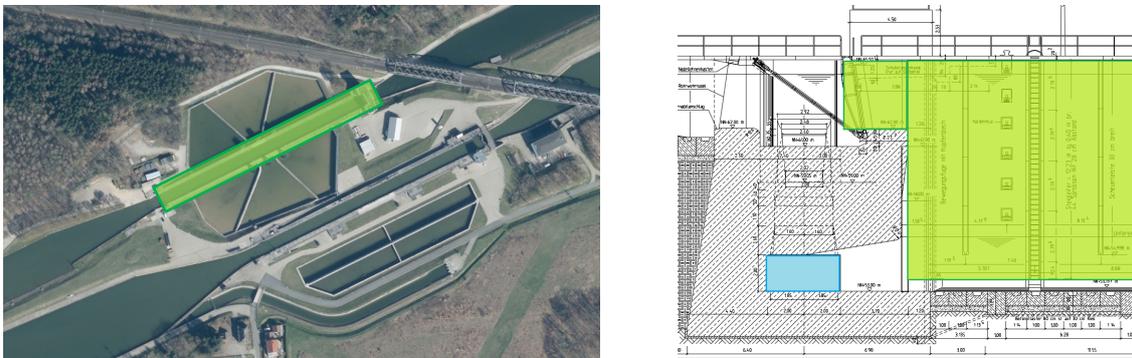


Abbildung 10: Satellitenbild (links) und Längsschnitt durchs Oberhaupt (rechts) der nördlichen Schleusenkammer mit Testbereich: Schleusenwand und -tor (grün) und Umlauf (blau) [WSV]

Sowohl aus organisatorischen als auch aus bautechnischen Gründen wurde die Nordkammer der Schiffsschleusenanlage Sülfeld, siehe Abbildung 10, als Testobjekt ausgewählt. Zu den organisatorischen Gründen gehört, dass der vorgesehene Zeitraum für die Trockenlegung des Bauwerks zum Zwecke der Bauwerksprüfung gut in den geplanten Ablauf der Praxistests des Forschungsprojektes passt. Aus bautechnischer Sicht ist das Bauwerk zum einen geeignet, weil es die Mehrzahl aller Schiffsschleusenanlagen in Deutschland mit einer Kammerkonstruktion in Massivbauweise repräsentiert. Zum anderen weist der Zustandsbericht eine Vielfalt unterschiedlicher Schäden an der Massiv- und Stahlbaukonstruktion auf, die mit den innovativen Methoden detektiert werden könnten.

Die Schiffsschleusenanlage befindet sich bei Kilometer 236,9 des Mittellandkanals im Zuständigkeitsbereich des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes Mittellandkanal / Elbe-Seitenkanal, Außenbezirk Vorsfelde, unweit der Stadt Wolfsburg. Es handelt sich um eine Doppelkammer-Schleuse mit Sparbecken, wobei die praktischen Versuche an der nördlichen und älteren und in einem schlechteren Zustand befindlichen Kammer stattfinden. Sie wurde 1938 mit Schwergewichtswänden aus Beton mit geschlossener Sohle und mit einem Hubsenktor im Oberhaupt und Hubtor im Unterhaupt sowie Umläufen im Oberhaupt (siehe Abbildung 11) erbaut. Im Mai 2021, vor der Bauwerksprüfung, wies ihre Zustandsnote, ihre Teilnote Konstruktion und ihre Teilnote Stahlbau den schlechtesten Wert von 4 auf.



*Abbildung 11: Blick auf das Unterhaupt (links) und das Tor am Unterhaupt (rechts) der Schleuse Sülfeld*

Die Praxistests beschränkten sich auf die Schleusenkammer einschließlich der Verschlüsse und Umläufe der Anlage (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11), da diese für die Funktion der Anlage entscheidend sind. Der Umlauf wurde zudem in die Testreihe zur Erprobung eines für Innenräume konzipierten UAS einbezogen. Aufgrund der höheren Anzahl von Schäden wurde der nördliche Umlauf am Oberhaupt für die Tests ausgewählt. Die ebenfalls funktionsrelevanten Sparbecken wurden nicht untersucht, da sie in einem anderen Inspektionsrhythmus als die Schleusenkammer geprüft werden.

Vier Abschnitte der Kammer (die Nord- und Südseiten der Abschnitte 3 und 12 in Abbildung 12) wurden für eine manuelle Schadenskartierung ausgewählt. Sie geschah auf herkömmliche Weise, d. h. durch manuelle Markierung und Vermessung der Schäden und anschließende fotografische Dokumentation, und dient der Generierung eines Vergleichsdatensatzes zur Beurteilung des Detektionsvermögens der innovativen Methoden. Um die maximale Leistungsfähigkeit der Methoden zu ermitteln, wurden in diesen Bereichen mit dem UAS und dem Laserscanner Aufnahmen mit höchstmöglicher Auflösung angefertigt. Die Kammerabschnitte wurden ausgewählt, da sie eine größere Anzahl von Schäden aufweisen und der Laserscanner bei der Aufnahme gegenüberliegender Wände am effizientesten ist.

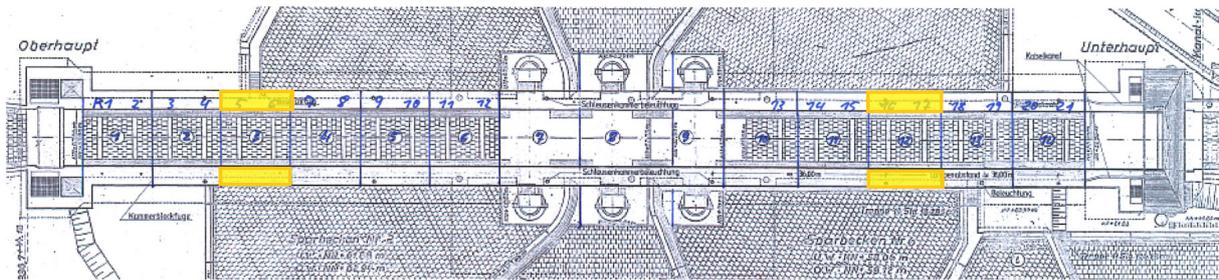


Abbildung 12: Abschnitte der nördlichen Kammer der Schleuse Sülfeld, an denen handnah Schäden erfasst werden [WSV]

Die Versuchsreihenfolge wurde so festgelegt, dass zuerst die Tests am trockengelegten Bauwerk (siehe Kapitel 2.4.2) und anschließend die Tests am gefluteten Bauwerk (siehe Kapitel 2.4.3) durchgeführt wurden. Der Grund dafür ist, dass während der Trockenlegung die Schäden sowohl mit den innovativen Methoden als auch per Hand erfasst werden, welche als Grundlage für die Validierung der Daten unter Wasser dienen. Zur Vorbereitung der praktischen Versuche wurden an vier Stellen in der Schleusenammer Passpunkte, d. h. eindeutig identifizierbare Messmarken, gesetzt und geodätisch bestimmt. Aufgrund ihrer Eigenschaft, in den Daten aller Erfassungsmethoden eindeutig identifizierbar zu sein, dienen sie der eindeutigen Georeferenzierung.

## 2.4.2 Durchführung der Praxistests über Wasser

Vom 5. bis 7. Mai 2021 fanden die Praxistests in der trockengelegten nördlichen Kammer der Schiffsschleusenanlage Sülfeld statt. Ursprünglich sollten die Tests bereits am 4. Mai beginnen, was jedoch aufgrund von Sturmböen von über 50 km/h und der Windanfälligkeit des unbemannten Luftfahrzeugs nicht möglich war. Zum Zeitpunkt der tatsächlich durchgeführten Praxistests herrschten noch Sturmböen von knapp 50 km/h und eine wechselnde Bewölkung. Die Instandhaltungsmaßnahmen waren bis auf den Neuanstrich der Steigeleitern abgeschlossen, so dass wenig Personenverkehr herrschte und außer einem Gerüst zur Sicherung des Zugangs zum Bauwerk keine Gerüste vorhanden waren.

Die verwendeten Sensorsysteme und die zugehörigen Aufnahmeparameter sind Tabelle 5 zu entnehmen. Das unbemannte Luftfahrzeug, der terrestrische Laserscanner, die Thermographie, der handgeführte Triangulationsscanner, die Photogrammetrie und die maschinelle Schadenserken- nung kamen am trockengelegten Bauwerk zum Einsatz. Das unbemannte Luftfahrzeug mit der RGB-Kamera und der terrestrische Laserscanner wurden global, das heißt zur Erfassung der gesamten Schleusen- kammer, eingesetzt. Die von der RGB-Kamera erhobenen Bilddaten wurden mittels Photogrammetrie zu einem texturierten dreidimensionalen Oberflächenmodell der Schleusen- kammer zusammengesetzt. Darüber hinaus wurden sie zur automatischen Erkennung von Schäden mit Hilfe der Methode der künstlichen Intelligenz verwendet. Für die gezielte Erfas- sung von Einzelschäden in einem lokal begrenzten Bereich kam die Wärmebildkamera und der handgeführte Triangulationsscanner zum Einsatz. Die Reihenfolge des Einsatzes der Methoden wurde so gewählt, dass sich die Aufnahmen möglichst wenig gegenseitig behinderten, wobei der parallele Einsatz mehrerer Geräte auch möglich war.

*Tabelle 5: Übersicht über die bei den Tests über Wasser eingesetzten innovativen Methoden*

<b>Methode</b>	<b>Produkt</b>	<b>Bereich</b>	<b>Ergebnis</b>
UAS mit RGB- Kamera	Matrice M300, Sony Alpha 7 RII, Sony RX0II	Kammer, Verschlüsse	Bilder, Orthopho- tos, 3D-Oberflä- chenmodell
		4 Kammerabschnitte	
	Elios, 1/2,3" CMOS, Lepton 3.5 FLIR	Nördl. Umlauf	
Terrestrischer Laserscanner	Leica P30	Kammer, Verschlüsse	3D-Oberflächen- modell
		4 Kammerabschnitte	
Handscanner	Artec MHT	Einzelne Schäden	3D-Oberflächen- modell
Wärmebildkamera	FLIR T660	Einzelne Schäden	Wärmebilder

Für die drohnengestützte Zustandserfassung der Schleusenammer, durchgeführt von einem externen Dienstleister, wurde das unbemannte Luftfahrtsystem „Matrice M300“ eingesetzt (siehe Abbildung 13, links). Das für industrielle Inspektionen konzipierte UAS des Herstellers DJI verfügt über 360-Grad-Sensoren zur Hindernis- und Entfernungserkennung, einen GNSS-Empfänger (globales Navigationssatellitensystem) zur Positionsbestimmung und eine Halterung zur Anbringung weiterer Sensoren. Die Drohne mit einer Länge von 810 Millimeter ohne Propeller, einer Breite von 670 Millimeter und einer Höhe von 430 Millimeter hat laut Hersteller eine maximale Flugzeit von 55 Minuten. Zwei Digitalkameras, die an das UAS angebracht sind, wurden zur Aufnahme von Bildern der Schiffsschleuse verwendet. Die Sony Alpha 7 RII wird zur Erstellung von Nahaufnahmen mit einer Bodenauflösung (Ground Sample Distance) von ca. 0,5 Millimeter verwendet, während die Sony RX0II zur Erstellung von Orthophotos mittels überlappenden Einzelbildern mit einer Bodenauflösung von ca. 2 Zentimetern zum Einsatz kommt. Das UAS wurde manuell ohne vorprogrammierte Flugrouten von einem Team bestehend aus einem Piloten und einem Kameraoperator unter Verwendung der Entfernungssensoren gesteuert.



Abbildung 13: *Eingesetzte Drohne für den Außenbereich (links) und für den Innenbereich (rechts)*

Mit dem UAS wurden die in Abbildung 14 dargestellten Bereiche der Schleusenammer aufgezeichnet. Dabei handelt es sich um die südliche und nördliche Wand, die Sohle, das Tor am Oberhaupt und das Tor am Unterhaupt der Schleusenammer. Bei der Aufnahme der Schleusenanlage wurden zwei verschiedene Genauigkeitsstufen angestrebt, indem der Abstand zwischen dem UAS und dem Objekt variiert wurde. Die Wände der Kammer und die Tore wurden in einem Abstand von etwa drei Metern aufgenommen, während für die vier schadenskartierten Kammerabschnitte der Schleusenammer ein kleinerer Abstand von etwa eineinhalb Metern gewählt wurde, um einen höheren Detaillierungsgrad der Aufnahmen zu erreichen. Jenseits der Schleusenammer wurden auch Teile der Plattform und der Sparbecken in deutlich größerer Entfernung erfasst, welches nicht dem Zwecke der Schadenserkennung, sondern der Einordnung der Schleusenammer in die Umgebung diente. Die Flugbahn verlief im sogenannten Rasterflug von der Oberkante der Schleusenammer bzw. des Schleusentores bis zur Sohle, so dass eine Überlappung der Einzelbilder von sechzig bis siebenzig Prozent gewährleistet werden konnte. Die Reihenfolge, in der die Bauteile aufgenommen wurden, richtete sich nach dem Sonnenstand, so dass immer die der Sonne abgewandten Flächen fotografiert wurden.

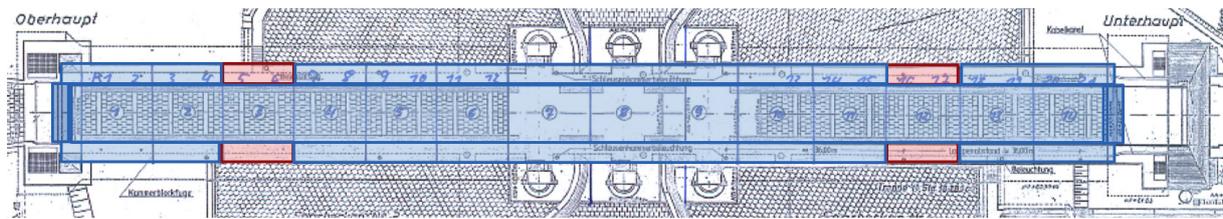


Abbildung 14: Durch das UAS erfasste Bereiche der Schleuse Sülfeld, rot in einem Abstand von 1,5 Metern, blau in einem Abstand von 3 Metern [WSV]

Der Grund dafür ist, dass eine Bildaufnahme mit stark veränderten Belichtungswerten die photogrammetrische Nachbearbeitung, d. h. das Zusammensetzen der Einzelbilder zu einem dreidimensionalen Oberflächenmodell, erschwert. Einschließlich kürzerer niederschlagsbedingter Flugunterbrechungen dauerte die Erfassung der Schleusenwände und der Schleusentore zwei Arbeitstage. Während des Flugs herrschten Windgeschwindigkeiten von knapp 50 km/h, die aber aufgrund der windgeschützten Lage der Schiffsschleusenanlage und der beidseitig geschlossenen Schleusentore wenig Einfluss auf die Lagestabilität des UAS hatten. Lediglich in den oberen ein bis zwei Metern der Schleusenammer wurde eine leichte Beeinträchtigung der Lagestabilität beobachtet. Hinzu kamen insgesamt etwa zweistündige Unterbrechungen durch Niederschläge, die dennoch eine Datenerfassung innerhalb von zwei Arbeitstagen zuließen.

Für den Umlauf am Oberhaupt setzte derselbe Dienstleister ein speziell für Innenräume konzipiertes UAS ein. Es unterscheidet sich von den für Außenräume konzipierten Gerät dadurch, dass es geringere Abstände zum aufzunehmenden Objekt zulässt, um den schlechteren Lichtverhältnissen in Innenräumen entgegenzuwirken. In dem Fall handelte es sich um das Modell Elios der Firma Flyability (siehe Abbildung 13, rechts), dessen Flugkörper durch einen Käfigrahmen vor Anprall geschützt wird. Außerdem ist es rundherum mit Sensoren zur Entfernungsmessung ausgestattet und verfügt über eine Digitalkamera (1/2,3 CMOS) und eine Wärmebildkamera (Lepton 3,5 FLIR). Durch den umgebenden Käfig besitzt das Gesamtsystem einen Durchmesser von knapp vierzig Zentimetern, sein Gewicht liegt bei 1,34 Kilogramm und die mögliche Flugzeit beträgt knapp zehn Minuten. Zur Ausleuchtung des Raumes verfügt das UAS weiterhin über mehrere nach vorne und oben neigbare Leuchten.

Analog zum Außeneinsatz erfolgte die Datenerfassung als Rasterflug mit einer Überlappung der Einzelbilder von sechzig bis siebenzig Prozent und einem Abstand zur Wand von etwa fünfzig Zentimetern. Auf diese Weise wurden sowohl die Wände als auch die Decke des Umlaufs aufgenommen. Die Ausleuchtung des Umlaufs erfolgte über die offene Seite des Umlaufs und über die am UAS angebrachten Leuchten. Für die Dauer der Testanwendung war das obere Umlaufstor geschlossen, wodurch Störungen durch Wind vermieden werden konnten. Allerdings beeinträchtigten die feuchten Flecken an den Wänden durch ihr Reflexionsvermögen die Entfernungssensoren, so dass eine manuelle Korrektur der Entfernungen durch den Piloten notwendig war. Vorsicht war auch wegen eines im Umlauf vorliegenden Wasservorhangs geboten, der von dem spritzwasserempfindlichen UAS umflogen werden musste, was aber den Aufnahmebereich nicht einschränkte.

Die Erprobung des terrestrischen Laserscans erfolgte in Eigenleistung der BAW unter Verwendung des Panoramascanners Leica P30, siehe Abbildung 15, links. Laut Hersteller bietet der Scanner eine Scanrate von einer Millionen Punkten pro Sekunde und eine maximale Reichweite von 120 Metern. Die Aufnahme der gesamten Schleusenammer erfolgte von mehreren, zehn Meter voneinander entfernten Standorten aus mit einem ungefähren effektiven Punktabstand von einem Zentimeter. Die vier schadenskartierten Kammerabschnitte wurden in Äquivalenz zum UAS mit einer höheren Auflösung von etwa 5 Millimetern erfasst. Zur Aufnahme in geringerer Auflösung benötigte der Scanner je Standort etwa zwanzig Minuten, wohingegen er für die Aufnahmen größerer Auflösung knapp eine Stunde brauchte. Die Durchführung der Scans erwies sich als problemlos, auch weil trotz geringen Niederschlages keine Unterbrechung benötigt wurde. Die in der Schleusenammer befindlichen Personen und Fahrzeuge mussten allein darauf achten, den Laserscan nicht zu kreuzen, welches aufgrund der rotierenden Aufnahme machbar war.

Um das Potenzial des Einsatzes der Thermographie bei der Bauwerksinspektion zu testen, wurde die Wärmebildkamera FLIR T660 verwendet, siehe Abbildung 15, Mitte. Sie hat laut Hersteller 640x480 Bildpixel und eine Messgenauigkeit von etwa 2 Grad. Das Hauptziel der Anwendung war die Detektion versteckter Schäden wie Hohlstellen und Schalenablösungen am Massivbau, was ausgehend von der Literaturrecherche, siehe Kapitel 2.2, bei Sonneneinstrahlung möglich sein sollte. Es wurde die Kammerwand aufgenommen, jedoch erst nach etwa einstündiger Sonnenbestrahlung. Da zum Zeitpunkt der Praxistests keine versteckten Schäden bekannt waren, wurde in einem ersten Schritt eine großflächige Aufnahme der Schleusenammer von der gegenüberliegenden Plattform vorgenommen, um mögliche Schadstellen zu finden. In einem zweiten Schritt wurde die potenzielle Schadstelle aus näherer Entfernung aufgenommen und in einem dritten Schritt die Vermutung durch Abklopfen des potenziell beschädigten Bereichs überprüft. Die Bedienung und Handhabung der Wärmebildkamera ist vergleichbar mit der einer Digitalkamera, so dass sie auch ähnliche Vor- und Nachteile aufweist. Vorteilhaft ist ihre flexible Einsetzbarkeit, die schnelle Erfassung und die einfache Bedienung, nachteilig die erschwerte Verortung der Aufnahmen und der damit verbundene erhöhte Dokumentationsaufwand. Ein besonderer Nachteil der Wärmebildkamera ist die Abhängigkeit des Aufnahmezeitpunktes von der Sonneneinstrahlung, der je nach Lage des aufzunehmenden Objektes und Sonnenstand variieren kann.



Abbildung 15: Eingesetzter terrestrischer Laserscanner (links), Wärmebildkamera (Mitte) und handgeführter Triangulationsscanner (rechts)

Der handgeführte Triangulationsscanner, siehe Abbildung 15, rechts, wurde ebenfalls in Eigenleistung unter Verwendung des Modells Artec MHT getestet. Laut Hersteller kann er eine maximale dreidimensionale Auflösung von 0,1 Millimeter erreichen, indem er bis zu 500 Lichtpunkte pro Sekunde aussendet. Der Handscanner wurde exemplarisch für ausgewählte Schäden wie Risse und Abplatzungen im Umlauf, an der Schleusenwand und an den Zugängen zu den Sparbecken eingesetzt. Das Hauptaugenmerk der Tests lag auf der Benutzererfahrung für das Inspektionspersonal, weshalb dieses auch den Test durchführte. Zur Erfassung der Schäden musste der handgeführte Triangulationsscanner mit konstantem Abstand und konstanter Geschwindigkeit über den Schadensbereich bewegt werden. Zur Kontrolle von Abstand und Geschwindigkeit wurde ein mit dem Gerät verbundener Laptop verwendet, der eine Vorschau des erzeugten Modells und eine Warnung bei falscher Handhabung lieferte. Insbesondere der Einsatz des Laptops erwies sich in der Schleusenkammer aufgrund der schmutzigen und nassen Bedingungen vor Ort als schwierig, so dass die Messung häufig mit der Unterstützung einer zweiten Person durchgeführt werden musste. Außerdem zeigten sich an der Schleuse vermehrt Fehlmessungen bei der Erkennung von dunklen Stellen, z. B. durch Feuchtigkeit. Der Nutzen der Methode, die in einer dreidimensionalen Vermessung der Schadstellen besteht, wurde vom Prüfpersonal im Vergleich zum Aufwand für die Durchführung der Methode als gering eingeschätzt. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Auswertung der Aufnahmen in Kapitel 3.1 verzichtet. Im Fall einer technischen Weiterentwicklung des Messsystems, so dass dieses keinen Laptop mehr benötigt und weniger empfindlich gegenüber feuchten Stellen ist, kann die Methode jedoch für Einzelfälle, die eine genaue Messung erfordern, sinnvoll sein.

### **2.4.3 Durchführung der Praxistests unter Wasser**

Die Unterwassertests fanden am 23. und 24. September 2021 statt. Der Zeitraum wurde so gewählt, dass er zeitnah zu den Tests über Wasser lag, gleichzeitig deren Auswertung aber bereits weitestgehend abgeschlossen war. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Außentemperatur 15 bis 19 Grad, die Windgeschwindigkeit maximal 32 km/h und es fiel kein Niederschlag. Die mit einer Secchi-Scheibe, einer schwarz-weißen Blechscheibe zur visuellen Tiefenmessung, gemessene Sichttiefe betrug ca. 0,9 Meter. Die Schleuse wurde am Vortag außer Betrieb genommen, damit sich Schwebstoffe absetzen konnten, und lag während der Tests auf Oberwasser, um eine möglichst große Testfläche zu erhalten. Getestet wurden ein unbemanntes Unterwasserfahrzeug und ein Fächerecholot entsprechend Tabelle 6. Das ferngesteuerte Unterwasserfahrzeug diente zur lokalen Erfassung einzelner Schadensbereiche und war mit einer RGB-Kamera und einem bildlichen Sonar ausgestattet. Das Fächerecholot sollte hingegen die Schleusenkammer in ihrer Gesamtheit erfassen und in ein dreidimensionales Oberflächenmodell überführen.

Tabelle 6: Bei den Unterwassertests zum Einsatz kommende innovative Methoden

Sensorik	Produkt	Bereich	Ergebnis
ROV mit RGB-Kamera und bildlichem Sonar	RGB-Kamera, Blueprint Oculus Multibeam Sonars - M1200D	Kammerabschnitte	Videos, Sonarbilder
		Einzelne Schäden	
Fächerecholot	Multibeam Teledyne SeaBat T50-P	Kammer, Verschlüsse	3D-Oberflächenmodell

Als unbemanntes Unterwasserfahrzeug (Remotely Operated Vehicle (ROV)) wurde das Deep Trekker Revolution mit dem integrierten bildgebenden Sonar Blueprint Oculus Multibeam Sonar - M1200D eingesetzt, siehe Abbildung 16, links. Das ROV wird durch integrierte Akkus betrieben und ist über ein Kabel mit der Fernsteuerung des Piloten verbunden, das Sensordaten und Steuersignale überträgt. Eine Besonderheit des Deep Trekker Revolution ist der nach oben und unten schwenkbare Sensorkopf, an dem Licht, Laseremitter zur Größenreferenzierung, eine hochauflösende RGB-Kamera und das bildgebende Sonar angebracht sind. Das ROV wiegt 25 kg, hat aber einen leichten Auftrieb im Wasser, so dass es Position und Lage über eine Reihe von Steuerpropellern beibehält, die über eine zentrale Steuereinheit mit Trägheits- und Drucksensoren verbunden sind.

Der Einlass des Bootes in die Schleusenkammer geschah über die Schleusenplattform, so dass vor dem Versuch keine weiteren Vorbereitungsmaßnahmen getroffen werden mussten. Die Steuerung erfolgte per Fernsteuerung ebenfalls von der Schleusenplattform aus. Untersucht wurden die südlichen Kammerabschnitte Nr. 3 und 12, da für sie eine Schadenskartierung vorlag und sie im Vergleich zu den nördlichen Abschnitten eine höhere Anzahl von Schäden aufwiesen. Zuerst wurde das ROV in verschiedenen Tiefen im Abstand von zwei Metern vor der Kammerwand positioniert und mit dem Sonar Aufnahmen aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen. Dann wurde der Wandabschnitt in einem Abstand von etwa einem halben Meter in horizontalen Reihen unterschiedlicher Tiefe abgefahren, um Videoaufnahmen davon zu erzeugen. Die Aufnahmen der beiden Kammerabschnitte mit dem ROV dauerten ca. drei Stunden. Zum Schluss wurde das ROV durch die Schleusenkammer, in einen Umlauf am Oberhaupt und in einen Zulauf zum Sparbecken gefahren, um Störkörper zu detektieren und seine Manövrierbarkeit zu testen. Die Navigation in den Innenräumen geschah über das Sonar.



*Abbildung 16: Das eingesetzte Unterwasserfahrzeug (links) und das Messboot mit Fächerecholot (rechts)*

Für die flächenhafte Erfassung der Schiffsschleuse wurde ein Vermessungssystem für Unterwasser eingesetzt, bestehend aus einem Boot, einem Fächerecholot und einem Tachymeter (siehe Abbildung 16, rechts). Das Boot hat einen geringen Tiefgang und Querstrahlruder zur Richtungsstabilisierung (Holste et al. 2019). Als Fächerecholot wurde das Multibeam Teledyne SeaBat T50-P eingesetzt, das eine Messfrequenz von 200 bis 400 kHz und eine Distanzauflösung von sechs Millimetern hat sowie bis zu fünf Reflexionssignale pro ausgesendetem Schallsignal empfängt. Das Echolot ist an einer Teleskopstange an der Unterseite des Messbootes befestigt. Die Position des Messbootes wird durch einen auf der Schleusenplattform installierten Tachymeter bestimmt, der mit Hilfe von an der Schleuse installierten Fixpunkten georeferenziert wird. Das System wurde zur Vermessung der gesamten Schleusenammer, bestehend aus den Wänden, der Sohle und den Verschlüssen, verwendet. Aufgrund der Abmessungen der Bauteile wurden die Wände und die Sohle in Bewegung mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,5 m/s und die Verschlüsse im Stehen von verschiedenen Fixpunkten aus erfasst. Nach mehreren Testfahrten zur Kalibrierung des Messsystems und zur Positionsbestimmung erfolgte die Vermessung der Kammerwände und -sohle. Um die Wand über ihre gesamte Höhe zu vermessen, wurde das Echolot einmal in drei Metern und einmal in sechs Metern Tiefe positioniert.

Außerdem wurden die Messungen mit unterschiedlicher Ausrichtung des Sensors durchgeführt, einmal senkrecht zur Kammerwand, einmal in Fahrtrichtung nach vorne und einmal nach hinten, so dass insgesamt sechs Messfahrten erforderlich waren, um die gesamte Kammerwand und die Sohle zu erfassen. Nach einer Modifikation des Messsystems wurden die Verschlüsse ausgehend von fünf Fixpunkten in einem Abstand von ca. drei Metern zum Stahlkörper und erneut bei Positionierung des Echolots in drei und sechs Metern Tiefe gemessen.

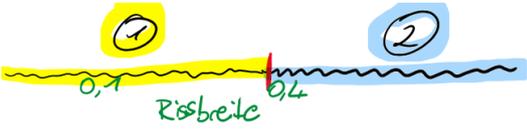
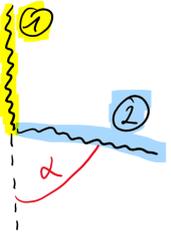
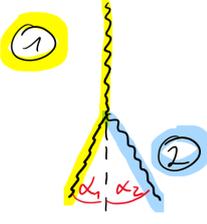
#### **2.4.4 Methode zur Auswertung der Praxistests**

Die bei den Praxistests eingesetzten innovativen Methoden wurden nach ihrer Fähigkeit, Schäden zu erkennen, ausgewertet und über den Vergleich mit einer manuellen Schadensaufnahme durch einen Menschen bewertet. Auf diese Weise wurden die innovativen Methoden mit der derzeit vorherrschenden Methode zur Inspektion von Wasserbauwerken verglichen. Um diesen Vergleich zu ermöglichen, wurden während der Trockenlegung nicht nur die innovativen Verfahren getestet, sondern auch eine manuelle Schadensaufnahme durchgeführt. Ziel war es, den in Kapitel 2.3.1 vorgestellten Schadenskatalog mit der vermuteten Fähigkeit der innovativen Methoden, Schäden einer bestimmten Größe zu erkennen, zu validieren.

Um die Grenzen der Leistungsfähigkeit der innovativen Methoden zu ermitteln, war es notwendig, auch kleinräumige Schäden zu erfassen. Daher wurden bei der Schadenskartierung alle vom Menschen erkennbaren Schäden erfasst, unabhängig von ihrer Relevanz für die Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Bauteils. Allerdings gab es in der Schleusenkammer eine Vielzahl von kleinen Schäden, so dass der Umfang der manuellen Schadenskartierung begrenzt werden musste.

Wegen ihrer besseren Zugänglichkeit fiel die Wahl auf die Kammerwand, von der vier Abschnitte von je 12 Metern Länge wegen ihrer höheren Anzahl von Schäden ausgewählt wurden (siehe Kapitel 2.4.1). Dies sind die in Abbildung 12 dargestellten Kammerabschnitte 3 und 12 mit ihren Nord- und Südwänden. Die Vorgehensweise bei der Schadenskartierung entsprach der in der Prozessdokumentation zur Bauwerksprüfung beschriebenen Vorgehensweise (siehe Kapitel 2.1.2). Die Schäden wurden durch einen Projektmitarbeiter der BAW visuell mit Hilfe eines Hubsteigers detektiert, in ihrer Größe vermessen, am Objekt markiert und fotografisch festgehalten. Im Nachgang wurden die Schäden mit Hilfe eines Zeichenprogramms auf der Grundlage der aufgenommenen Fotos kartiert. Es folgte die Zählung der in der Kartierung vorhandenen Schäden, wobei die Risse nach den Bestimmungen der Tabelle 7 gezählt wurden. Ziel der Festlegung war weniger die absolute Bestimmung der Anzahl der vorhandenen Risse, sondern vielmehr die eindeutige Festlegung einer Zählweise, die es ermöglicht, verschiedene Datensätze miteinander zu vergleichen. Ein Riss, der seine Richtung um weniger bzw. mehr als etwa 45 Grad änderte, wurde als ein Riss bzw. zwei Risse gezählt (1. / 2. Fall). Ein Riss, der über seine Länge eine variierende Breite aufwies, wurde ab dem Zeitpunkt der verändert gemessenen Rissbreite als eigenständiger Riss gezählt (3. Fall).

Tabelle 7: Festlegungen zur Zählweise der Risse bei der Auswertung der Schadenskartierung und der Messdaten, gelb hinterlegt erster Riss, blau hinterlegt zweiter Riss

1. Umlenkung von Rissen um $\alpha < \sim 45$ Grad	3. Änderung der Breite von Rissen
	
2. Umlenkung von Rissen um $\alpha > \sim 45$ Grad	4. Aufspaltung von Rissen um $\alpha_1 < \sim 45$ Grad und $\alpha_2 > \sim 45$ Grad
	

Ein Riss, der sich in zwei Risse aufspaltete, wurde als zwei Risse gezählt, wenn der Winkel des ersten Spaltrisses zum ursprünglichen Riss kleiner als etwa 45 Grad war (4. Fall), als drei Risse, wenn er größer als etwa 45 Grad war (1. /4. Fall). Das Ergebnis der handnahen Schadenskartierung ist in Tabelle 8 und für Kammerblock 3 in Abbildung 17 und für Kammerblock 12 in Abbildung 18 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die vorherrschenden Schadensbilder an den Kammerwänden Risse waren, demgegenüber Korrosionsschäden und Ausbrüche weitaus seltener anzutreffen waren. Aufgrund ihrer geringen Anzahl ist es schwierig, für diese Schadensarten Aussagen über ihre Erkennungsrate mittels innovativer Methoden zu treffen, weshalb sie bei der Auswertung in Kapitel 3.1 nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 8: Anzahl der durch manuelle Schadenskartierung erfassten Schäden am dritten und zwölften Kammerabschnitt, Süd- und Nordseite

Risse der Breite in mm											Alle Risse	Korrosionsschäden	Ausbrüche	Alle Schäden
0,1	0,2	0,3	0,1-0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,5	> 0,3				
260	164	85	509	12	12	6	3	5	3	41	550	11	1	562

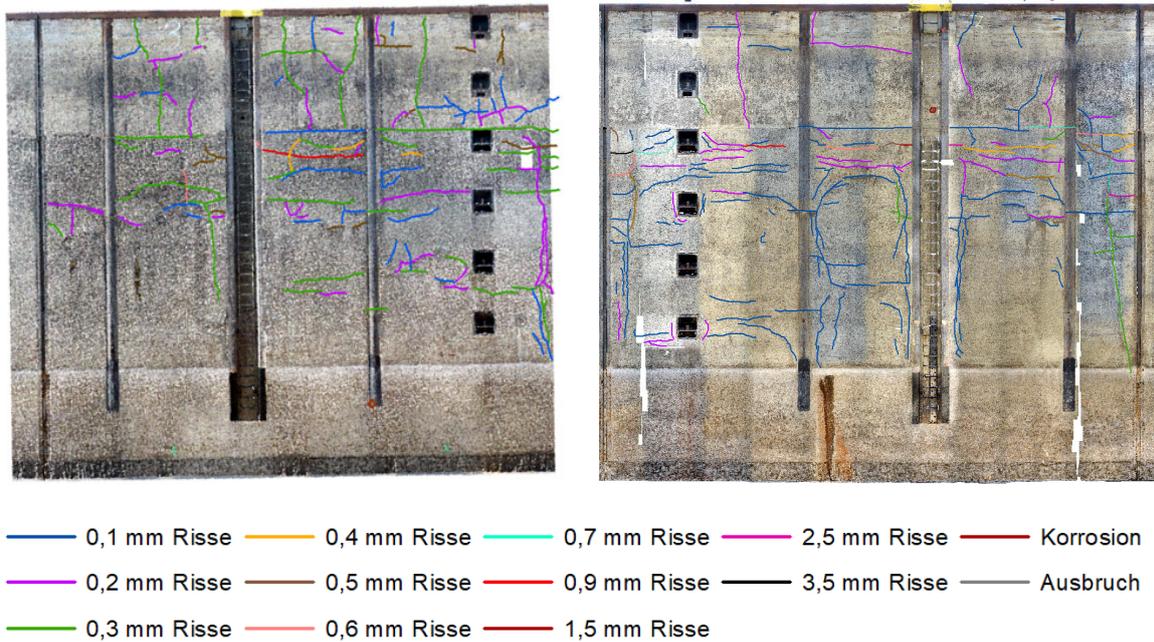


Abbildung 17: Durch manuelle Schadenskartierung erfasste Schäden am dritten Kammerabschnitt, Nord- (links) und Südseite (rechts)

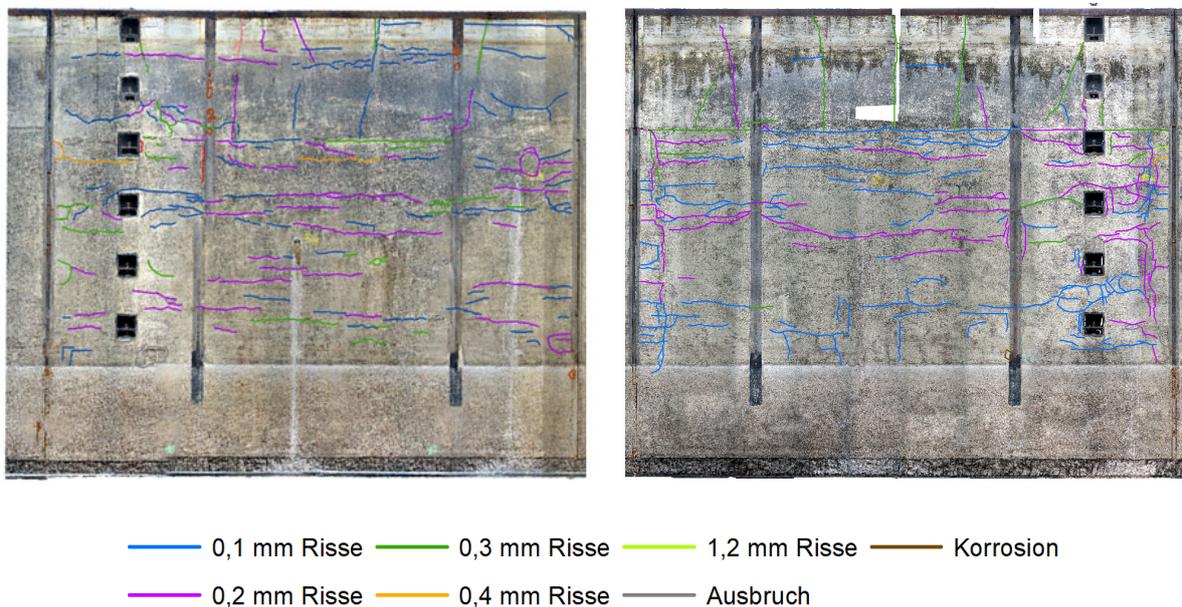


Abbildung 18: Durch manuelle Schadenskartierung erfasste Schäden am zwölften Kammerabschnitt, Nord- (links) und Südseite (rechts)

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Auswertung der Praxistests

##### 3.1.1 Auswertung der Praxistests über Wasser

Die Befliegung der Schleusenammer mittels dem UAS führte zu zwei wesentlichen Endergebnissen: einem 3D-Oberflächenmodell der gesamten Kammer und einem Orthophotomosaik von vier Kammerabschnitten. Tabelle 9 zeigt die notwendigen Schritte zur Erstellung des Oberflächenmodells am Beispiel des mittleren Abschnitts der Schleusenammer, in dem sich die Zuläufe zu den Sparbecken befinden. Das unmittelbare Ergebnis der UAS-Befliegung waren fotografische Nahaufnahmen der Bauteile in Form von überlappenden Einzelbildern (a). Sie wurden anschließend photogrammetrisch nachbearbeitet (siehe Kapitel, 2.2), so dass im ersten Schritt eine Punktwolke entstand (b). Durch Vermaschung wurde die Punktwolke in ein Netzmodell (Mesh) umgewandelt (c), auf das im letzten Schritt die Einzelbilder projiziert wurden. Das Ergebnis ist ein dreidimensionales, texturiertes Modell der Oberflächen der Schleusenammer (d).

Außerdem wurden die Einzelbilder mit der Methode der Photogrammetrie zu eindimensionalen, verzerrungsfreien und maßstabsgetreuen Bildern, sogenannten Orthophotos, zusammengesetzt. Die Kombination mehrerer Orthophotos ergibt ein Orthophotomosaik eines größeren Bildbereichs, z. B. eines Kammerabschnittes (siehe Abbildung 19, links). Solche Bilder wurden von den vier Kammerabschnitten angefertigt, die das UAS mit einer höheren Auflösung aufgenommen hatte. Bei der Auswertung der Bilder wurde deutlich, dass Orthophotomosaik bei ebenen Flächen gegenüber 3D-Modellen den entscheidenden Vorteil haben, dass keine spezielle Software für eine dreidimensionale Darstellung benötigt wird.

Tabelle 9: Endprodukte der UAS-Befliegung am Beispiel des mittleren Kammerbereichs

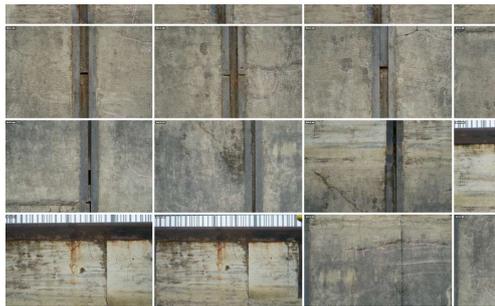
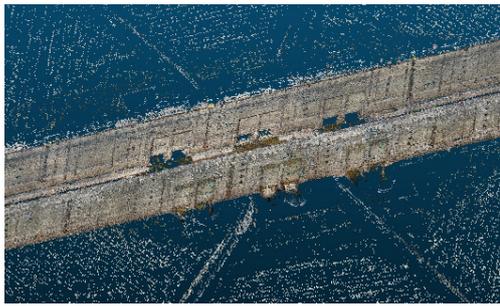
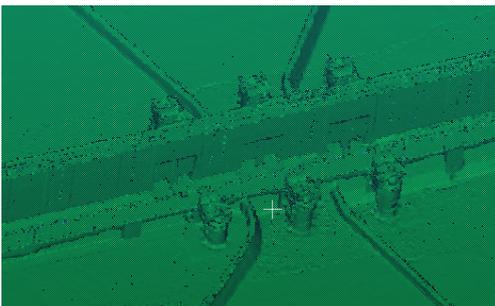
<p>a.) Überlappende Bilder</p>		<p>b.) Punktwolken-Modell</p>	
<p>c.) Mesh-Modell</p>		<p>d.) Texturiertes Modell</p>	



Abbildung 19: Orthophotomosaik des dritten Kammerabschnittes an der südlichen Schleusenwand (links) und eine Detailaufnahme eines Pollers (rechts)

Darüber hinaus haben sie aber den gleichen Vorteil wie das 3D-Modell, nämlich die Möglichkeit der Lokalisierung von Schäden. Abbildung 19, rechts, zeigt auf einem vergrößerten Ausschnitt des Orthophotomosaiks die Ecke eines Nischenpollers, was die hohe Auflösung der Bilder deutlich macht. Das Orthophotomosaik liefert also zweierlei: ein Übersichtsbild, das die Lage des Schadens zeigt, und ein Detailbild, das das genaue Aussehen des Schadens zeigt. Aufgrund dieser beiden Fähigkeiten wurden die Aufnahmen herangezogen, um zu beurteilen, wie gut sich Schäden auf den UAS-Aufnahmen erkennen lassen. Abbildung 20 zeigt weiterhin durch das UAS generierte Aufnahmen vom Schleusentor im Unterhaupt. Dargestellt ist eine Übersicht des Tores und die Detailaufnahme der Verankerung, wo erneut die hohe Auflösung der Aufnahmen deutlich wird.

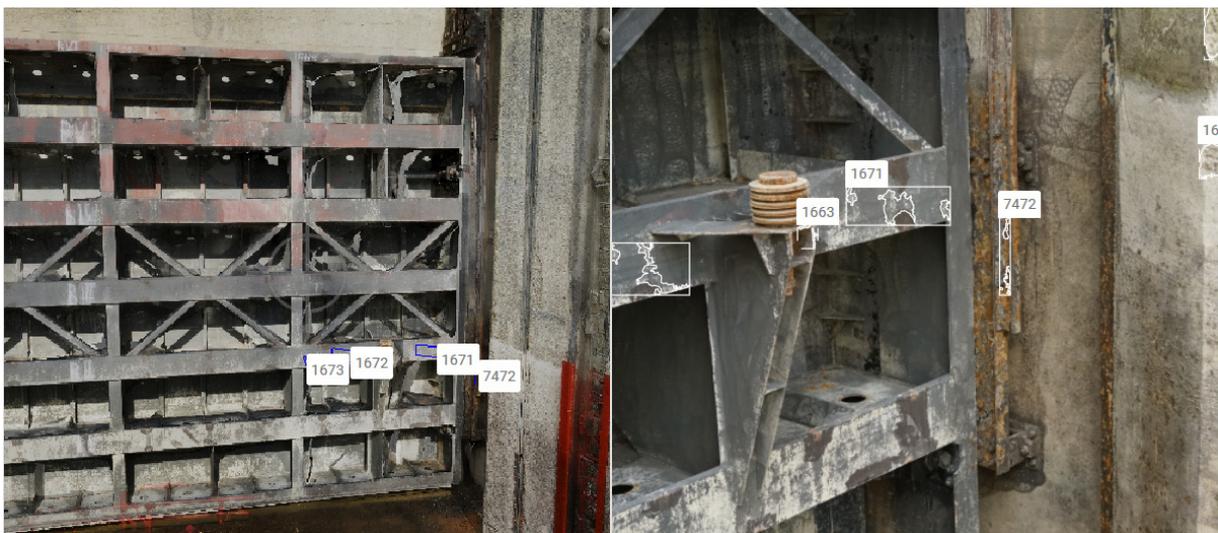


Abbildung 20: UAS-Aufnahme des Untertors in der Übersicht (links) und im Detail (rechts)

Die Orthophotomosaik der Kammerabschnitte 3 und 12 der Südwand der Kammer wurden hinsichtlich ihrer Eignung zur Schadenserkenkung bewertet, da sie eine erhöhte Anzahl von Schäden aufwiesen. Dazu wurden in einem ersten Schritt alle vermuteten Schadensstellen einschließlich der vermuteten Schadensart in den Orthofotos markiert. Durchgeführt wurde die Markierung durch einen Projektmitarbeiter der BAW, der jedoch nicht der Person entsprach, die die manuelle Schadenskartierung am Bauwerk vorgenommen hatte. Im zweiten Schritt wurde die ermittelte Anzahl an Schäden mit den gemäß der manuellen Schadenskartierung vorhandenen Schäden und der dort enthaltenen Rissbreite verglichen. Tabelle 10 zeigt das Ergebnis der Auswertung, wonach 71 % der von einem Menschen erkennbaren Risse an den beiden Kammerabschnitten auf den UAS-Kamerabildern erkannt werden können. Dabei konnten Risse einer Breite größer 0,3 Millimeter mit einer leicht verbesserten Rate von 76 % erkannt werden. Die Abweichung zwischen der konventionellen und der innovativen Schadensaufnahme lässt sich vermutlich durch die inhomogene Struktur des aufgenommenen Betons erklären. Dafür spricht, dass bei der Auswertung der UAS-Aufnahmen oft schwierig zu beurteilen war, ob ein Riss vorliegt oder nicht. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist aber zu beachten, dass auch bei der händischen Schadenskartierung Fehler passieren bzw. diese von einer Subjektivität geprägt ist, die nicht die korrekte Aufnahme aller Schäden gewährleistet.

*Tabelle 10: Anzahl der erkannten Risse in den UAS-Aufnahmen und der händisch kartierten Risse im dritten und zwölften Kammerabschnitt, Südseite*

	Risse der Breite in mm											Alle Risse
	0,1	0,2	0,3	<b>0,1-0,3</b>	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,5	> 0,3	
Manuell	162	80	24	<b>266</b>	6	4	4	3	2	3	<b>22</b>	<b>288</b>
UAS	105	65	18	<b>188</b>	5	3	4	2	1	1	<b>16</b>	<b>204</b>
UAS/Manuell	0,65	0,81	0,75	<b>0,71</b>	0,83	0,75	1,00	0,67	0,50	0,33	<b>0,76</b>	<b>0,71</b>

Die Aufnahme der UAS wurden des Weiteren verwendet, um zu testen, inwieweit künstliche Intelligenz (KI) zur automatisierten Erkennung von Schäden beitragen kann. Abbildung 21 zeigt beispielsweise die in einem Teilbereich des Schleusentors markierten Schäden. Auf der linken Seite und in der Mitte der Abbildung ist ein Ausschnitt des Tors mitsamt der weiß umrandeten und nummerierten Schäden enthalten, die der KI-Algorithmus ermittelt hat. Die rechte Seite zeigt eine Liste der erkannten Schäden mit der angenommenen Schadensart und einer Schadensbewertung. Tabelle 11 zeigt allerdings, dass lediglich zehn Prozent der laut der Schadenskartierung vorhandenen Risse, in absoluten Zahlen 56 Risse, durch den Algorithmus automatisch erkannt werden konnten. Eine derartige Erkennungsrate, sollte sie sich bei weiteren Tests bestätigen, wäre für den Einsatz bei der Bauwerksinspektion nicht ausreichend. Der Dienstleister, der den KI-Algorithmus entwickelt hat, führt als Grund das inhomogene Erscheinungsbild der Kammerwände an, welches stark von dem Aussehen an Brücken abweicht, mit dessen Daten der

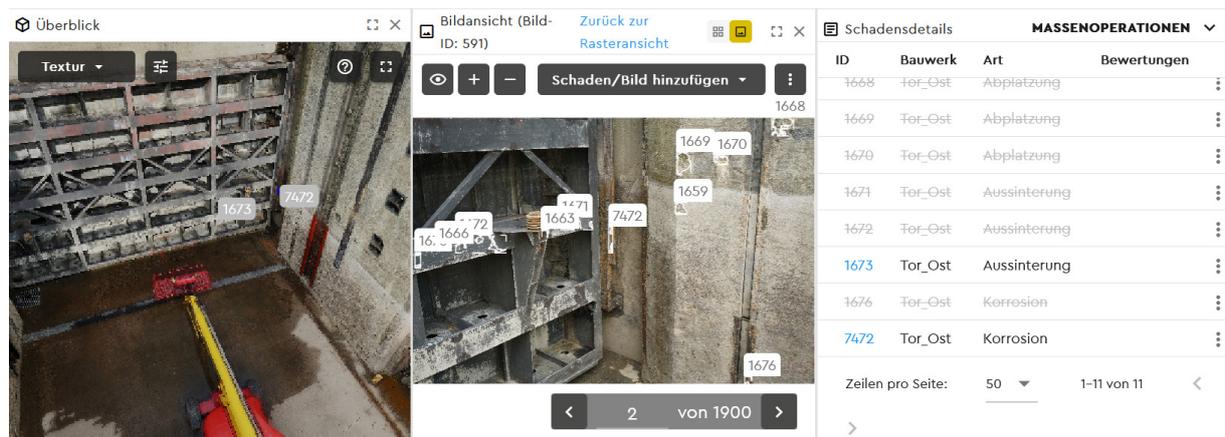


Abbildung 21: An der Verankerung des Stahltors vom Algorithmus erkannte Schäden

Tabelle 11: Anzahl der mittels KI automatisch erkannten Risse, der in den Laserscanner-Aufnahmen identifizierten Risse und der händisch kartierten Risse im dritten und zwölften Kammerabschnitt, Nord- und Südseite

Methode	Risse der Breite in mm											Alle Risse
	0,1	0,2	0,3	0,1-0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,5	> 0,3	
Manuell	260	164	85	509	12	12	6	3	5	3	41	550
KI	17	21	10	48	2	1	2	2	1	0	8	56
KI/Manuell	0,07	0,13	0,12	0,09	0,17	0,08	0,33	0,67	0,20	0	0,20	0,10
Laserscan	199	136	71	406	10	10	4	3	3	2	32	438
La- serscan/Ma- nuell	0,77	0,83	0,84	0,80	0,83	0,83	0,67	1,00	0,75	0,67	0,78	0,80

Algorithmus trainiert sei. Ob die schlechte Erkennungsrate wirklich auf fehlende Trainingsdaten von Wasserbauwerken zurückzuführen ist, lies sich im Rahmen des Projektes nicht überprüfen, in der Literatur wird allerdings von weitaus höheren Erkennungsraten beim Einsatz von KI-Algorithmus zur Schadenserkenung berichtet (siehe Kapitel 2.1).

Die Laserscan-Aufnahmen der Schleusenkammer, eingefärbt nach Intensitätswerten, sind Abbildung 22 und Abbildung 23 entnehmen. Dargestellt ist ein Teil des mittleren Kammerbereichs und das Schleusentor am Unterhaupt (Abbildung 22) und die Nord- und Südseite des dritten Kammerabschnittes (Abbildung 23). Entgegen den Erwartungen vor den praktischen Tests wurde die höchste Anzahl an Rissen nicht auf den UAS-Bildern, sondern in diesen nach Intensitätswerten des reflektierten Signals eingefärbten Laserscan-Punktwolken erkannt. Wie aus Tabelle 11

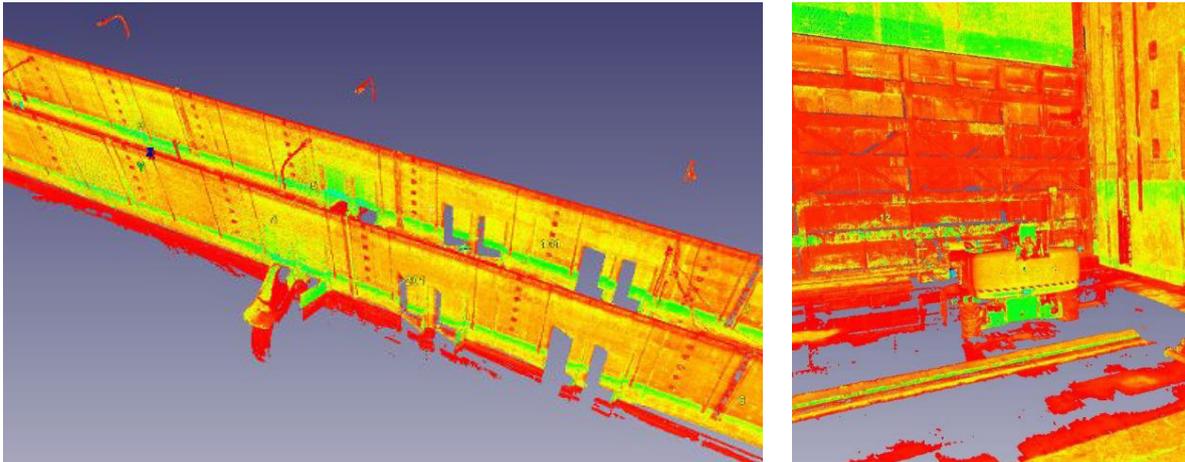


Abbildung 22: Aufnahmen des Laserscanners, eingefärbt nach Intensitätswerten, vom mittleren Kammerabschnitt und Schleusentor Richtung Unterwasser

hervorgeht, wurde eine Erkennungsrate von 80 %, d. h. 438 von 550 erkannten Rissen, erreicht. Dabei scheint es weniger auf die Rissbreite als vielmehr auf die Lage der Risse anzukommen, wie Abbildung 21 zeigt. Risse, die sich oberhalb des Oberwasserspiegels der Schleuse und damit dauerhaft im Trockenen befinden, waren schlechter zu erkennen als die Risse, die sich in der Wasserwechselzone befinden. Dieser Umstand lässt vermuten, dass die Feuchtigkeit und damit ein verändertes Reflektionsverhalten des Signals einen positiven Einfluss auf die Risserkennung in Laserscanaufnahmen hat, was in weiteren Untersuchungen überprüft werden sollte. Sollte sich diese Vermutung bestätigen, könnte dies ein Grund für die bessere Erkennungsrate des Laserscanners im Vergleich zum UAS am Schleusenbauwerk sein. Darüber hinaus ist auf den Laserscan-Bildern zu erkennen, dass Risse, wenn sie sichtbar sind, im Vergleich zu den UAS-Bildern viel deutlicher hervortreten, so dass die Unsicherheit bei der Risserkennung geringer ist, was ein zweiter Grund für die bessere Erkennungsrate sein könnte.

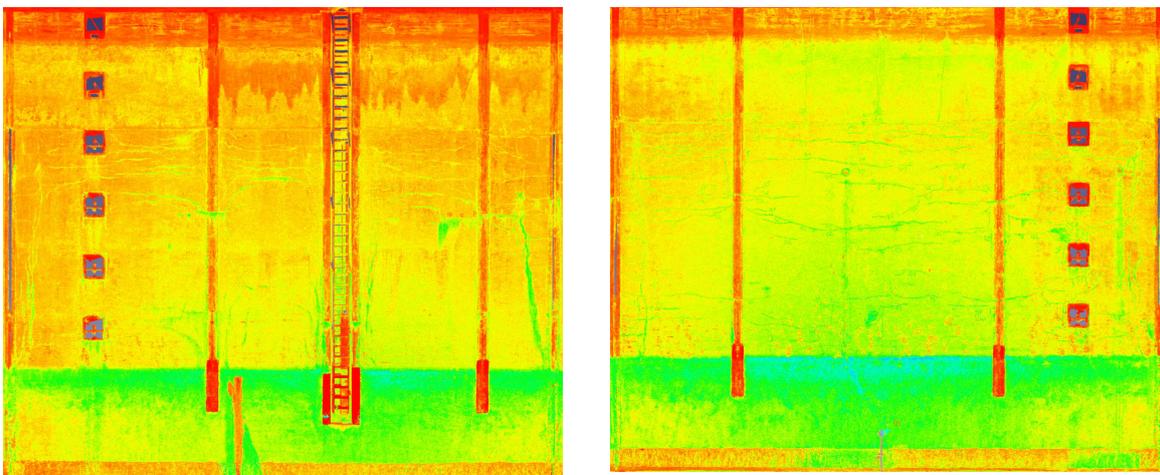


Abbildung 23: Aufnahmen des Laserscanners, eingefärbt nach Intensitätswerten vom dritten Kammerabschnitt, Süd- und Nordseite

Bei der Anwendung der Wärmebildkamera stand weniger die Erkennung von Rissen als vielmehr die von Hohlstellen im Fokus. Die hierfür stichprobenartig aufgenommenen Aufnahmen zeigten, dass Hohlstellen nach einer Sonneneinstrahlung von mindestens einer halben Stunde erkannt werden können. Abbildung 22 zeigt ein Beispiel für eine derartig detektierte Hohlstelle, von denen bis zu zehn Stück an der Schleusenwand gefunden wurden. Zu beachten ist, dass die Überprüfung der Verdachtsstelle allein auf Grundlage des Abklopfens des Bereichs getätigt wurde. Um genaue Aussagen zu den Grenzen und der Zuverlässigkeit der Methode treffen zu können, sind weitere Untersuchungen mit einer tiefergehenden Evaluierung notwendig. Es zeigte sich jedoch, dass die Methode einfach zu handhaben und schnell anzuwenden ist, insbesondere, wenn man die Möglichkeit betrachtet, die Wärmebildkamera an ein UAS zu montieren.

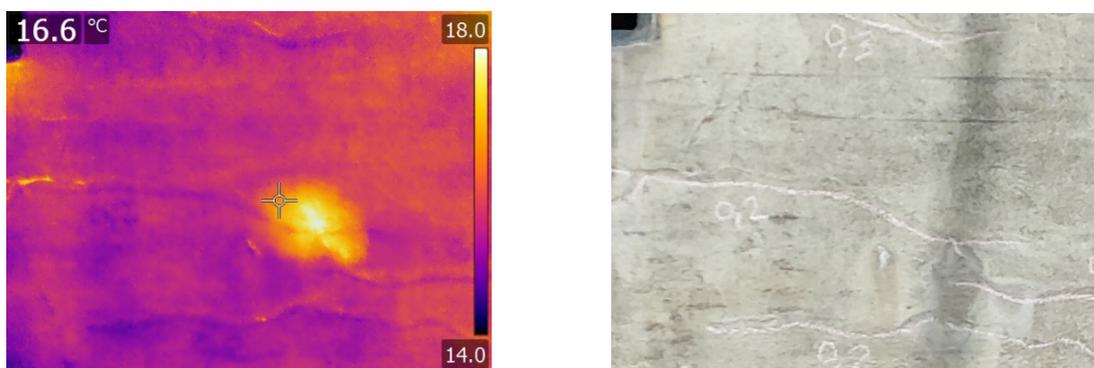


Abbildung 24: Beispiel für eine mit der Wärmebildkamera detektierte Hohlstelle, links: Wärmebild, rechts: RGB-Bild

### 3.1.2 Auswertung der Praxistests unter Wasser

Beispiele für die aus den Unterwasseraufnahmen resultierenden Aufnahmen zeigen Abbildung 25 und Abbildung 26. Abbildung 25 stellt auf der linken Seite einen Riss auf den Sonar-Aufnahmen (links) und den Videoaufnahmen (rechts) des ROV's dar. Das durch den Fächerecholot resultierende Modell des Oberhauptes ist hingegen Abbildung 25, links, und eines Kammerabschnittes Abbildung 25, rechts zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zu den Aufnahmen, die über Wasser generiert wurden, wesentlich schlechtere Auflösungen erreicht werden konnten.

Tabelle 12 zeigt die Anzahl der Risse an den südlichen Kammerabschnitten 3 und 12, die auf den ROV-Bildern, getrennt durch RGB-Kamera und bildlichem Sonar, und auf den Fächerecholot-Bildern im Vergleich zur manuellen Schadenskartierung am Bauwerk erkannt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass es sehr viel schwieriger war, Risse auf den unter Wasser als auf den über Wasser aufgenommenen Bildern zu erkennen. Die ROV-RGB-Bilder zeigen 47 Risse, etwa 18 % der kartierten Risse, während die Sonarbilder mit 27 Rissen, welches 11 % der kartierten Risse entspricht, noch schlechtere Werte aufweisen. Auffallend ist, dass in beiden Fällen nur Risse von geringer Breite erkannt werden konnten, ein Umstand, für den im Rahmen des Projekts keine zuverlässige Erklärung gefunden wurde. Dies zeigt, dass weitere Forschung notwendig ist, um das Potenzial des ROV für den Einsatz bei der Schadenserkenkung bewerten zu können. Trotz dieses Forschungsbedarfs konnten die Tests jedoch die hohe Anwenderfreundlichkeit der Methode belegen. Bei der Auswertung der Bilder des Fächerecholots stellt sich die Situation hinsichtlich der Schadenserkenkung noch schlechter dar, da keinerlei Schäden sichtbar waren. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Hauptzweck dieser Methode nicht die Schadenserkenkung ist, sondern die Erstellung eines dreidimensionalen Oberflächenmodells des Bauwerks.

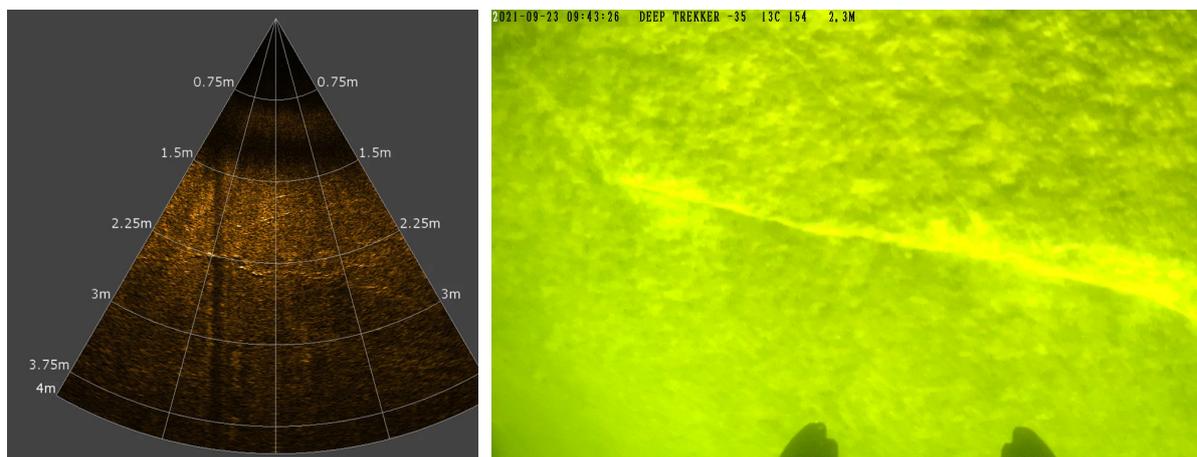


Abbildung 25: Aufnahmen einer Kammerwand durch das Sonar (links) und die Videokamera (rechts) des ROV

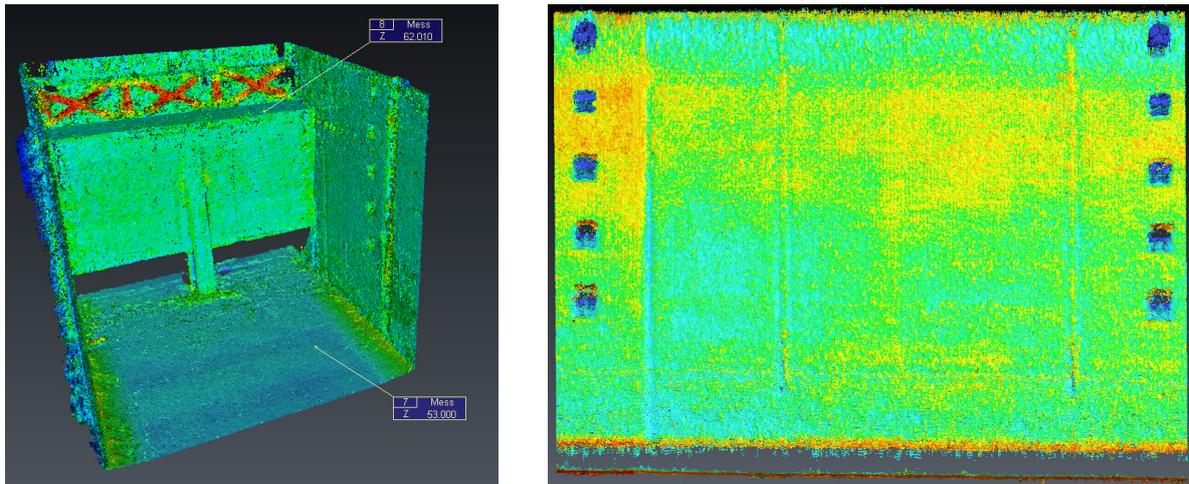


Abbildung 26: Aufnahmen des Schleusentores am Oberhaupt (links) und des 12. Kammerabschnittes Südseite durch das Fächerecholot

Tabelle 12: Anzahl der in den ROV- und Echolotaufnahmen erkannten Risse und der händisch kartierten Risse im dritten und zwölften Kammerabschnitt unterhalb Oberwasser, Südseite

Methode	Risse der Breite											Alle Risse
	0,1	0,2	0,3	0,1-0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,5	> 0,3	
Manuell	150	69	16	<b>235</b>	6	4	4	3	2	3	<b>22</b>	<b>257</b>
ROV RGB	23	16	5	<b>44</b>	3	0	0	0	0	0	<b>3</b>	<b>47</b>
ROV RGB / Manuell	0,15	0,23	0,31	<b>0,19</b>	0,50	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0,18</b>
ROV Sonar	13	12	2	<b>27</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>27</b>
ROV Sonar / Manuell	0,09	0,17	0,13	<b>0,10</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0,11</b>
Echolot	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>

## 3.2 Bewertung der Methoden

In dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde die Beantwortung der nachfolgenden Forschungsfragen als Projektziel formuliert:

1. Welche innovativen Methoden eignen sich für den unterstützenden Einsatz bei der Inspektion von Wasserbauwerken?
2. Was sind ihre Anwendungsfälle und -grenzen?
3. Was ist bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung ihres Einsatzes zu beachten?

Diese Fragen haben einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad, der auch bei ihrer Beantwortung aufgegriffen wird. Die Idee ist, einem potenziellen Anwender, der keine Vorkenntnisse über innovative Methoden hat, eine Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Methoden zu geben, ohne ihn mit Informationen zu überfluten. Dazu werden die folgenden Visualisierungsinstrumente, aufgelistet mit steigendem Detaillierungsgrad, eingesetzt: der Entscheidungsbaum, die Entscheidungsmatrix und der Steckbrief. Der Entscheidungsbaum dient dazu, qualitativ herauszuarbeiten, welche innovative Methode zur Beantwortung welcher Fragestellung wahrscheinlich am besten geeignet ist. Die Matrix hingegen bietet einen quantitativen Vergleich der wichtigsten Merkmale der innovativen Methoden, einschließlich konkreter Anwendungsfälle. Die Steckbriefe liefern schließlich eine detaillierte Auflistung aller relevanten Informationen, die basierend auf den Erfahrungen des Projekts für den Einsatz innovativer Methoden bei der Bauwerksinspektion notwendig sind.

### 3.2.1 Entscheidungsbaum

Die Recherche zu innovativen Methoden (Kapitel 2.2) und die Analyse des Verbesserungspotenzials bei der Bauwerksinspektion (Kapitel 2.1) haben gezeigt, dass es wahrscheinlich nicht nur eine geeignete innovative Methode für die Bauwerksinspektion gibt. Vielmehr sind unterschiedliche Methoden für unterschiedliche Anwendungszwecke geeignet. Diese Vermutung konnte durch die Praxistests (Kapitel 2.4 und 3.1) bestätigt werden. Aus diesem Grund wird es als wichtiges Projektziel definiert, zu vermitteln, welche innovativen Methoden für welche Fragestellungen im Rahmen der Bauwerksinspektion in Frage kommen könnten. Zur Veranschaulichung wird ein Entscheidungsbaum gewählt, der je nach Problemstellung bei der Bauwerksinspektion zu der vermutlich am besten geeigneten innovativen Methode führt. Um die Darstellung möglichst übersichtlich zu gestalten, vernachlässigt der Entscheidungsbaum die Tatsache, dass für eine Anwendung oft mehrere Methoden geeignet sind und führt nur die vermutlich am besten geeignete Methode auf. Dieser Umstand wird jedoch in der Entscheidungsmatrix berücksichtigt, da diese eine übersichtlichere Darstellung von mehr Informationen ermöglicht. Des Weiteren ist zu beachten, dass der Entscheidungsbaum nur die im Projekt gemachten Erfahrungen aus dem Praxistest widerspiegelt und somit zunächst als Entwurf zu betrachten ist, der um weitere Erfahrungen zu ergänzen ist. Der Entwurf für den Entscheidungsbaum ist in Abbildung 23 zu sehen, wobei die grünen Pfeile eine bejahende Antwort auf die Frage und die roten Pfeile eine verneinende Antwort anzeigen.

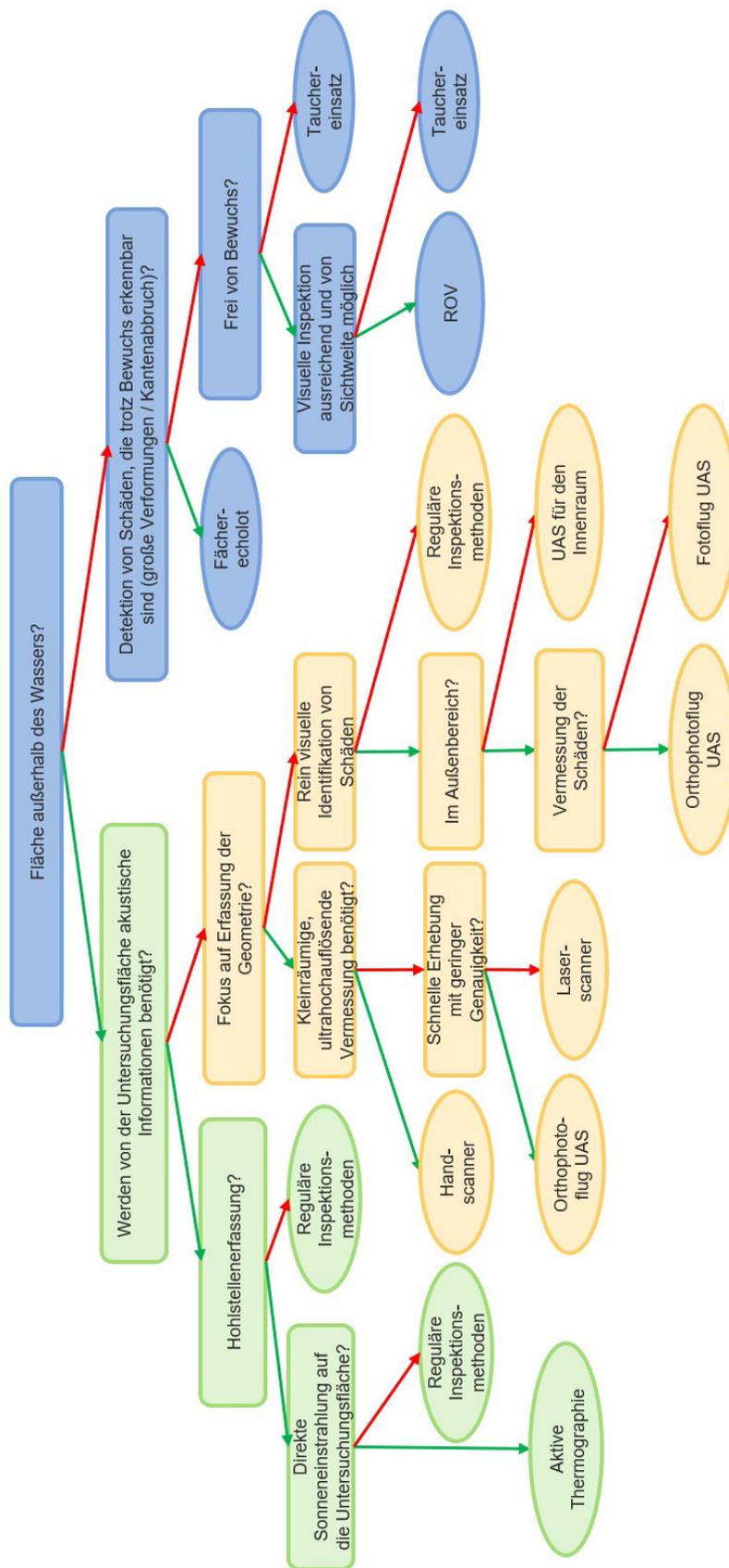


Abbildung 27: Entwurf des Entscheidungsbaumes anhand der Projekterfahrungen an der Schleuse Sülzfeld, ja: grüner Pfeil; nein: roter Pfeil

Die erste Frage des Entscheidungsbaums unterscheidet, ob der Einsatz der innovativen Methoden an einer Fläche unter oder über Wasser geplant ist. Im Falle eines geplanten Einsatzes unter Wasser (blaue Balken in Abbildung 23) entscheidet zunächst die Größe des zu detektierenden Schadens über die in Frage kommenden innovativen Methoden. Bei größeren Schäden von mehreren Zentimetern, die trotz Bewuchs erkannt werden können, könnte sich eine Erfassung mit einem Fächerecholot anbieten. Das Fächerecholot bietet das Potenzial einer schnellen Erfassung großer Flächen sowie einer anschließenden Generierung eines dreidimensionalen Oberflächenmodells in Form einer 3D-Punktwolke. Nach den Erfahrungen des Projekts ist es jedoch für die Erfassung von kleineren Schäden im Zentimeter- bis Millimeterbereich nicht geeignet, wofür der Einsatz eines ROV's (ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug) oder eines Tauchers eher in Frage kommt. Der Einsatz des ROV's benötigt als Voraussetzung eine nur leichte bis keine Verschmutzung der zu untersuchenden Bereiche. Aufgrund der im Projekt erkannten Grenzen des ROV's ist aber ein kombinierter Einsatz von ROV und Taucher zu präferieren, so dass sich der Taucher mehr auf die Schadensuntersuchung und weniger auf die Schadensdokumentation konzentrieren kann.

Im Falle der Untersuchung von Flächen über Wasser erfolgt im Entscheidungsbaum zunächst die Abfrage, ob akustische Informationen, z. B. durch ein Abklopfen der Flächen, benötigt werden (grüne Balken). Hintergrund der Abfrage ist die bei den begleitenden Bauwerksinspektionen gemachte Beobachtung, dass zur Untersuchung bestimmter Schadensarten, wie z. B. Hohlräumen und lockeren Befestigungen, die Schadensbereiche abgeklopft werden. In diesen Fällen wird das Vorliegen eines Schadens durch das akustische Signal beim Klopfen bestimmt. Die durchgeführten Praxistests deuten darauf hin, dass Hohlstellen bei direkter Sonneneinstrahlung durch die Methode der aktiven Thermographie erkennbar sind. Für alle anderen Schadenstypen und bei fehlender direkter Sonnenstrahlung wurde im Projekt keine Methode getestet, so dass der Entscheidungsbaum in diesem Fall auf die reguläre, manuelle Inspektion führt.

Werden keine akustischen Untersuchungen vom Schaden benötigt, wird mit dem nächsten Ast des Entscheidungsbaumes abgefragt, ob der Schwerpunkt auf der Erfassung der Geometrie des Bauwerks liegt. Besteht der Bedarf an einer kleinräumigen und hochauflösenden Vermessung, könnte sich die Verwendung eines Handscanners (handgeführter Triangulationsscanner) anbieten. In allen anderen Fällen, d. h. wenn größere Flächen, wie z. B. eine Schleusenkammer, vermessen werden sollen, könnte in Abhängigkeit von der gewünschten Genauigkeit der Einsatz eines UAS oder eines terrestrischen Laserscanners sinnvoll sein. In diesem Fall ist es empfehlenswert, dass die UAS-Bilder aus sich überlappenden Einzelbildern bestehen, die mit der Methode der Photogrammetrie zu einem Orthofoto zusammengesetzt werden (Orthophotoflug UAS). Gleiches gilt, wenn eine Vermessung von Schäden gewünscht ist. Ist das Ziel der Geometrieerfassung gegenüber der Schadenserkennung sekundär, könnte die Aufnahme von nicht überlappenden Einzelbildern mittels UAS (Photoflug UAS) geeignet sein, sofern eine rein visuelle Betrachtung ausreicht. In diesem Fall ist eine photogrammetrische Nachbearbeitung der Bilder nicht erforderlich. Ist die Erfassung weiterer Schadensdaten auf nicht nur visuelle Weise gewünscht, sollte die Durchführung einer konventionellen Inspektion in Betracht gezogen werden.

### 3.2.3 Entscheidungsmatrix

Um einem potenziellen Anwender eine weitere Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter innovativer Methoden zu geben, wurde zusätzlich zum Entscheidungsbaum eine Entscheidungsmatrix erstellt. Der Schwerpunkt des Entscheidungsbaums liegt auf der Darstellung der wesentlichen Unterschiede zwischen den innovativen Methoden. Die Entscheidungsmatrix ergänzt diese Darstellung, indem sie konkrete Erfahrungen, die mit den innovativen Methoden im Projekt gemacht wurden, auflistet und daraus mögliche Anwendungsfälle ableitet. In der Matrix werden die wichtigsten Merkmale der Methoden verglichen, während in den Steckbriefen eine detaillierte Beschreibung pro Methode erfolgt. Tabelle 13 zeigt die resultierende Matrix, die eine Einschätzung der im Projekt erreichten maximalen Auflösung und 3D-Genauigkeit sowie des Zeitaufwands für die Datenerhebung und der Kosten jeder Methode enthält. Bei der Interpretation der Daten ist zu beachten, dass sie die Erfahrungen des Projektes widerspiegeln und daher keine allgemeingültigen Aussagen, sondern nur Tendenzen daraus abgeleitet werden können. Dies gilt insbesondere für die angegebene Auflösung und Genauigkeit, die von dem jeweils verwendeten Sensor, der Aufnahmeentfernung und weiteren Faktoren, wie z. B. der Genauigkeit der Georeferenzierung, abhängt.

Aus diesem Grund erfolgt die Angabe der beiden Werte rein qualitativ, indem ein Plussymbol für einen geringen Wert und drei Plussymbole für einen hohen Wert stehen. Nach den Erfahrungen des Projekts kann die höchste Auflösung mit dem handgeführten Triangulationsscanner erreicht werden. Danach folgen das UAS und der terrestrische Laserscanner, die im Projekt ebenfalls Schäden im Submillimeter-Bereich erfassen konnten. Die aktive Thermographie und das Fächerecholot waren dagegen auf die Erfassung von Schäden von mehreren Zentimetern Größe beschränkt. Eine Aussage zur Auflösung des ROV's kann auf Grundlage der Projekterfahrungen nicht sicher getroffen werden. Die Bewertung der erreichbaren 3D-Genauigkeit ist in der Matrix nur für die Methoden aufgeführt, die auch zu einem 3D-Modell führen, also für die Methoden UAS mit Orthophotoflug, terrestrischer Laserscanner, handgeführter Triangulationsscanner und Fächerecholot. Auch hier wurden die besten Werte im Submillimeter-Bereich mit dem Handscanner erzielt, gefolgt von den anderen Erfassungsmethoden, die eine Genauigkeit im Millimeter- und Zentimeterbereich gewährleisten konnten. Die in der Matrix angegebene Zeit für die Datenerhebung bezieht sich auf die Dimensionen des Versuchsobjektes, die nördliche Kammer der Schiffsschleusenanlage Sülfeld. Neben der Dimension des Objektes können auch die örtlichen Gegebenheiten, die Witterungsbedingungen sowie die Erfahrung des Messtrupps einen signifikanten Einfluss auf die Dauer der Datenerfassung haben. Bei den durchgeführten Tests benötigte die Erfassung mit der Thermographie und dem Fächerecholot die geringste Zeit, während der handgeführte Triangulationsscanner hierfür die längste Zeit benötigte. Die Kosten der Methoden werden aufgrund der großen Anzahl verfügbarer Sensoren und Anbietern ebenfalls qualitativ angegeben, wobei ein Pluszeichen für einen geringen Kostenvorteil und drei Pluszeichen für einen großen Kostenvorteil stehen. Ersteres trifft nach den Erfahrungen des Projekts auf das Fächerecholot zu, letzteres auf das UAS und den handgeführten Triangulationsscanner.

Tabelle 13: Entscheidungsmatrix für die Auswahl innovativer Methoden auf Basis der Projekterfahrungen

Methode	Auflösung**	3D-Genauigkeit**	Zeit für die Datenerhebung am Versuchsobjekt	Kosten	Mögliche Anwendungsfälle									
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	
UAS ohne Orthophotoflug	++		1 Arbeitstag pro Schleusenkamer*	+++		x	x							
UAS mit Orthophotoflug	++	+	1 Arbeitstag pro 4 Kammerabschnitte*	++	x	x	x	x				x		
Innenraum-UAS	++		½ Arbeitstag pro Umlauf*	++		x	x							
Terrestrischer Laserscanner	++	++	2 Arbeitstage pro Schleusenkamer*	++	x	x			x	x				
Aktive Thermographie	+		½ Arbeitstag pro Schleusenkamer*	++									x	
Handgeführter Triangulationsscanner	+++	+++	10 min pro 1 m <sup>2</sup>	+++				x		x	x			
Fächerecholot	+	+	½ Arbeitstag pro Schleusenkamer*	+	x						x			x
ROV	k. A.		2 h pro Kammerabschnitt*	++		x	x							x
<p>* Referenzobjekt Schleuse Sülfeld: Schleusenkamer: 6000m<sup>2</sup>, Kammerabschnitt: 160m<sup>2</sup>, Umlauf: 150 m<sup>2</sup>.</p> <p>** Angaben sind als grobe Orientierung zu verstehen, da die Auflösung und Genauigkeit i.d.R. vom konkret verwendeten Sensor, der Aufnahmeentfernung sowie weiteren Faktoren (z. B. Genauigkeit der Georeferenzierung) abhängig sind.</p>														
<p>Anwendungsfall:</p> <p>1: 3D-Modellgenerierung</p> <p>2: Schadensdetektion</p> <p>3: Visuelle Identifikation von Schäden</p> <p>4: Vermessung visuell identifizierbarer Schäden</p>					<p>5: Abplatzungsidentifikation und -vermessung</p> <p>6: Verformungsmessung</p> <p>7: Vermessung von Einzelschäden</p> <p>8: Hohlstellenidentifikation</p> <p>9: Fremdkörpererkennung</p>									

### 3.2.4 Steckbriefe

Ergänzend zum Entscheidungsbaum und der Entscheidungsmatrix wurden vom Projektpartner *gia* ein Steckbrief je innovative Methode angefertigt. Das Ziel ihrer Erstellung ist die Vermittlung zum einen von Fachwissen auf Basis anerkannter Fachliteratur und zum anderen von Erfahrungswissen auf Basis unterschiedlicher Forschungsprojekte. Der Fokus soll dabei auf den Informationen zu den innovativen Methoden liegen, die für ihren Einsatz bei der Inspektion von Wasserbauwerken benötigt werden. Die Hoffnung ist, durch die Vermittlung von Wissen die WSV bei der Auswahl, der Planung, der Vergabe oder im Fall einer Eigenleistung der Durchführung sowie der Überwachung der Maßnahme und der Interpretation der Ergebnisse zu unterstützen. Trotz dieser Zielvorstellung sollen die Steckbriefe eine gewisse Übersicht bewahren, weshalb sie in Themenfelder gruppiert werden und teilweise mit Fließtext, teilweise mit Stichworten gefüllt werden.

Tabelle 14 zeigt den Aufbau der Steckbriefe mit den folgenden Themenfeldern: Anwendungsfall, technischer Hintergrund, Mehrwert, Voraussetzungen, Umsetzung, Output und Referenzen. Im Zuge der Erstellung der Steckbriefe wurde erkannt, dass gerade die Vermittlung der Funktionsweise vieler Fachbegriffe bedarf, die daher in einem den Steckbriefen vorgeschalteten Glossar erläutert werden.

*Tabelle 14: Aufbau der Steckbriefe zu den innovativen Methoden*

<b>Anwendungsfall</b>	Anwendungsbereich
	Rahmenbedingungen
<b>Technischer Hintergrund</b>	Definition
	Erläuterung der Funktionsweise
<b>Mehrwert</b>	Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit
	Zeitaufwand Inspektion
	Kosten
	Datenqualität
<b>Voraussetzungen</b>	Hardware
	Vorbereitung Untersuchungsobjekt
	Vorbereitung Datenerhebung
	Umweltbedingungen
	Erforderliche Genehmigungen
<b>Umsetzung</b>	Datenerhebung
	Datenprozessierung
	Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden
<b>Output</b>	Informationen
	Dateiformate
<b>Referenzen</b>	Beispielanbieter
	Beispielanwendungen

Der Steckbrief startet mit den Anwendungsbereichen der innovativen Methoden und den dafür notwendigen Rahmenbedingungen, um den Leser direkt auf die für seinen Anwendungsfall geeignete Methode zu leiten. Es folgt die Vermittlung des grundlegenden technischen Hintergrunds der Methode als Voraussetzung für das Verständnis der nachfolgenden Abschnitte des Steckbriefs. Im Anschluss wird im Kapitel Mehrwert in Anlehnung an Kapitel 2.3.2 eine erste Einschätzung der Mehrwertpotenziale der Methoden vorgenommen, die je nach vorliegenden Erfahrungswerten und ihrem Verfügbarkeitsgrad am Markt in einem unterschiedlichen Konkretisierungsgrad getroffen werden kann. Danach wird im Detail auf die für den Einsatz innovativer Methoden notwendigen Voraussetzungen hinsichtlich Hardware, Vorbereitung am Untersuchungsobjekt, Vorbereitung zur Datenerhebung, Umweltbedingungen und Genehmigungen eingegangen. Im Kapitel Umsetzung wird auf Punkte verwiesen, die bei der Anwendung zu beachten sind, getrennt nach den Arbeitsschritten Datenerhebung und Datenprozessierung, und auf die Kompatibilität mit anderen Methoden eingegangen. Weiterhin wird aufgeführt, welche Informationen in welchen Dateiformaten durch die innovativen Methoden generiert werden, um den Nutzen der Methode und die zur Ergebnisdarstellung notwendige Software einschätzen zu können. Das letzte Kapitel widmet sich durch die Aufführung von Beispielanbietern und -anwendungen der Vermittlung von eventuellen Kontaktpersonen zum Erfahrungsaustausch. Die Steckbriefe sind Anlage 2 zu entnehmen.

## 4 Fazit und Ausblick

Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprojekts war es, das Unterstützungspotenzial innovativer Methoden für die Inspektion von Wasserbauwerken zu untersuchen. Als innovative Methoden wurden solche definiert, die digital, teilautomatisierbar, am Markt verfügbar, nicht ortsfest und für den Einsatz über oder unter Wasser geeignet sind und sich auf die Erfassung von Bauteiloberflächen beschränken. Mit dieser Definition wurden Monitoringsysteme, die üblicherweise ortsfest am Objekt angebracht sind, und zerstörungsfreie Prüfmethode, sofern sie eine Erfassung des Bauteilinneren ermöglichen, nicht betrachtet. Als Voraussetzung für die Auswahl geeigneter Methoden diente die Erfassung des Ist-Zustandes der Durchführung der Bauwerksinspektion im Bereich von Wasserbauwerken. Als Grundlage dienten zum einen die Regelwerke und Merkblätter, die Vorgaben und Hinweise für die Inspektion geben, und zum anderen die praktischen Beobachtungen, die bei der Begleitung von zwei Bauwerksprüfungen gemacht wurden. Ein interessantes Ergebnis der Analyse war der derzeit vorherrschende Einsatz von Hilfsmitteln, die sich in kleinere Hilfsmittel zur Schadensdokumentation und -messung und größere Hilfsmittel zur Unterstützung der Zugänglichkeit aufteilen lassen. Soweit bei den beiden Bauwerksprüfungen beobachtet werden konnte, ist das einzige digitale Hilfsmittel, das regelmäßig zum Einsatz kommt, die Digitalkamera.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde nicht nur der Ist-Zustand in Bezug auf die Bauwerksinspektion erfasst, sondern auch in Bezug auf innovativen Methoden, die zu ihrer Unterstützung zur Verfügung stehen. Dabei wurde zum einen deutlich, dass eine ganze Reihe von unterschiedlichen Trägerplattformen, Sensorsystemen und Auswerte- / Kollaborationssystemen existieren, und zum anderen, dass in einer Vielzahl von Projekten bereits unterschiedliche Erfahrungen mit ihnen gesammelt wurden. Anhand ihres vermuteten direkten Nutzens für die Inspektion von Wasserbauwerken und unter Berücksichtigung des zu erwartenden Prüfaufwands wurden acht Verfahren zur weiteren Betrachtung ausgewählt. Zunächst wurden für diese acht Verfahren die Möglichkeiten der Schadenserkenkung abgeschätzt. Dies geschah unter Hinzunahme des Merkblatts zur Schadensklassifizierung und Expertenmeinungen und soll eine grobe Orientierung geben, welches Verfahren für die Erkennung welcher Schadensart voraussichtlich am besten geeignet ist. Auf Seiten der Schäden ist von Interesse, dass es Schäden gab wie Netzrisse, die wohlmöglich mit keiner betrachteten Methode erkannt werden können. Was die Methoden betrifft, so ließen sich mit einem handgeführten Triangulationsscanner und einem mit einer RGB-Kamera ausgestatteten UAS die meisten verschiedenen Schadensarten erkennen.

Um die Vorüberlegungen zu verifizieren und die Praxistauglichkeit der Methoden zu beurteilen, wurden praktische Versuche an einem realen Wasserbauwerk, der Nordkammer der Schiffschleuse Sülfeld, durchgeführt. Sie wurden sowohl am trockengelegten als auch am gefluteten Bauwerk durchgeführt. Am trockengelegten Bauwerk wurden das UAS, der terrestrische Laserscanner, die Thermographie, der handgeführte Triangulationsscanner, die Photogrammetrie und die maschinelle Schadenserkenkung getestet. An der gefluteten Anlage hingegen wurden das ROV, ausgestattet mit einer RGB-Kamera und einem Sonar, und das Fächerecholot eingesetzt.

Je nach Anwendungsbereich kann man zwischen Methoden unterscheiden, die global eingesetzt wurden, wie das UAS, der terrestrische Laserscanner und das Fächerecholot, und Methoden, die lokal eingesetzt wurden, wie die Thermographie, der handgeführte Triangulationsscanner und das ROV.

Zur Beurteilung der Tests wurden Vergleichsdaten herangezogen, die durch eine manuelle Schadenskartierung von vier Kammerabschnitten von zwölf Metern Breite gewonnen wurden. Es zeigte sich, dass die vorherrschenden Schadensbilder an den Kammerabschnitten Risse waren, weshalb die Verfahren hinsichtlich ihrer Fähigkeit, diese in ihren Bildern darzustellen, bewertet wurden. Die besten Werte mit ca. 80 % der laut der Schadenskartierung an den Kammerabschnitten vorhandenen Schäden wurden demnach auf den Laserscanaufnahmen erkannt. Die zweitbeste Erkennungsrate zeigten die vom UAS generierten Bilder, auf denen ca. 70 % der Risse zu erkennen waren. Die Anwendung der automatisierten Schadenserkenkung auf die UAS-Aufnahmen lieferte dagegen mit einer Erkennungsrate von etwa 10 % nur unbefriedigende Ergebnisse. Dasselbe galt für die Unterwassermethoden. So konnten auf den ROV-Aufnahmen ca. 11 % der Risse und auf den Echolot-Aufnahmen keine Risse erkannt werden, wobei sich letzteres für eine schnelle Erstellung von Oberflächenmodellen eignete. Bei beiden Methoden wurde weiterer Forschungsbedarf festgestellt, um ihre Zuverlässigkeit auskömmlich zu bewerten. Potenzial wies hingegen der exemplarische Einsatz der Thermographie zur Hohlstellenerkennung auf, der ebenfalls in einer ausführlicheren Studie untersucht werden sollte. Der handgeführte Triangulationsscanner war die einzige Methode, die aufgrund der notwendigen Hinzunahme eines Laptops eine geringe Praxistauglichkeit, insbesondere im Vergleich zu ihrem Nutzen, aufwies und deren Ergebnisse daher nicht detailliert ausgewertet wurden. Die Erfahrungen des Projekts wurden mit drei unterschiedlichen Visualisierungsmethoden festgehalten: einem Entscheidungsbaum, einer Entscheidungsmatrix und Steckbriefen. Insbesondere die Steckbriefe, die ausführliche Informationen zu den innovativen Methoden mit dem Fokus auf deren potenziellen Einsatz bei der Bauwerksinspektion liefern, sollen als Handlungsempfehlung für die WSV dienen.

Möglichkeiten, die durchgeführten Forschungsarbeiten weiter zu führen, sind vielfältig. Sie können in einer weiteren Auswertung der im Projekt generierten Daten, in einer Variation des zu testenden Objekts, in einer Variation der zu testenden Methoden und in einer Überführung der gemachten Erkenntnisse in die Praxis liegen.

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Auswertungen fokussierten aufgrund ihrer großen Bedeutung, die sie bei der Bauwerksinspektion einnimmt, stark auf der Erkennung von Schäden. Die Methoden zeigten jedoch weiteres Potenzial im Prozess der Inspektion, dass bei der Auswahl einer geeigneten Methode berücksichtigt werden sollte. So können beispielsweise die UAS-Bilder bei entsprechender Erfassung zu einem 3D- Oberflächenmodell zusammengesetzt werden. Ebenso führen der terrestrische Laserscanner und das Fächerecholot zu einem dreidimensionalen Oberflächenmodell. Die Einsatzmöglichkeiten der Modelle sind vielfältig und reichen von der Verortung und Vermessung von Schäden bis hin zur Planung von Erhaltungsmaßnahmen. Die Entwicklung eines Konzepts für die Verwendung solcher Oberflächenmodelle bei der Bauwerkserhaltung unter Berücksichtigung der spezifischen Bedürfnisse und Rahmenbedingungen der WSV könnte eine interessante Folgearbeit dieses Forschungsprojekts sein. In diesem Zuge ist auch eine

genauere Evaluierung der im Projekt erzeugten Modelle, insbesondere im Hinblick auf ihre Genauigkeit und ihr Optimierungspotenzial, z. B. hinsichtlich des Nachbearbeitungsaufwands, von Interesse.

Ein weiterer klarer Vorteil des Einsatzes digitaler Methoden bei der Bauwerksinspektion liegt in der effizienten Dokumentation. So liefert die vollflächige Aufnahme einer Anlage erstmals auch ein Bild aller unbeschädigten Bereiche, was z. B. bei der Rekonstruktion von Schadensfällen von Interesse sein könnte. Der Nutzen der Schadensdokumentation durch die innovativen Methoden könnte am besten realisiert werden, wenn eine Integration oder Verknüpfung zum IT-System WSVPruf erfolgen würde, dass derzeit für die Schadensdokumentation in der WSV genutzt wird. Auch hier sind weitere konzeptionelle Überlegungen erforderlich, die von einer einfachen Weiterleitung von Schadensdaten bis hin zur Integration ganzer 3D-Modelle in das IT-System reichen könnten. Im Hinblick auf die Dokumentation ist es zudem von besonderem Interesse, wenn nicht nur der aktuelle Zeitpunkt, sondern der gesamte Lebenszyklus des Bauwerks betrachtet wird. Hier haben die meisten digitalen Verfahren aufgrund ihrer systematischen Aufnahmemethode die Möglichkeit, Bilder von verschiedenen Zeitpunkten zu überlagern. Es wäre also interessant, dass hier betrachtete Testobjekt in einigen Jahren erneut mit innovativen Methoden zu untersuchen, um den Schadensfortschritt zu beurteilen. Die genaue Kenntnis der Geschwindigkeit der Schadensentwicklung könnte ein wichtiger Faktor bei der Bewertung von Schäden und auch bei der Suche nach Schadensursachen sein.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Fortführung der hier durchgeführten Praxistests an anderen Objektarten, an anderen Materialien oder bei anderen Randbedingungen, als sie bei den Praxistests dieses Projekts vorlagen. In diesem Zusammenhang wäre es von besonderem Interesse, die Detektionsfähigkeit der Verfahren an Stahlbauteilen wie Wehrverschlüssen und Schleusentoren zu bewerten. Auch die mit einer UAS durchgeführten Tests im Innenbereich bedürfen einer weiteren Erprobung unter anderen Randbedingungen, da die Innenraum-Inspektion mit anderen Herausforderungen verbunden ist als die im Außenbereich. Ebenso sollte der kombinierte Einsatz eines UAS mit einer Wärmebildkamera hinsichtlich seines Potenzials Hohlstellen und -körper auf effiziente Weise zu erfassen, untersucht werden. Geringe Erkennungsraten bei den Schäden gab es bei den Unterwasseraufnahmen, bei denen eine weitere technische Entwicklung der Systeme zur Erreichung einer höheren Zuverlässigkeit hilfreich wäre. Um die Zuverlässigkeit der Schadenserkenung zu überprüfen, wäre es wichtig, verschiedene Arten von Schäden unter verschiedenen Bedingungen zu berücksichtigen, was z. B. durch die Verwendung von vorbereiteten Prüfkörpern, die unter Wasser gelassen werden, erreicht werden könnte. Beim Einsatz unter Wasser sollte auch geklärt werden, wie die Oberflächen vor der Anwendung der innovativen Methoden gereinigt werden können. Das Projekt hat gezeigt, dass der Grad der Oberflächenverschmutzung insbesondere bei Wasserbauwerken nicht unerheblich ist und deren Beseitigung daher eine notwendige Voraussetzung für eine zuverlässige Schadenserkenung und -bewertung ist. Die Betrachtung der Möglichkeiten zur Reinigung von Oberflächen unter Wasser ging über den Rahmen des Projekts hinaus, wird aber als wichtiger nächster Schritt angesehen, wenn Detektionsmethoden unter Wasser eingesetzt werden sollen.

Möglichkeiten, die hier angestellten Überlegungen und Versuche fortzusetzen, bestehen auch in der Untersuchung von Methoden, die im Projekt nicht berücksichtigt wurden. Hier ist der Einsatz eines terrestrischen Laserscanners mit Kamera zu nennen, der das Potenzial hat, texturierte Bilder mit hoher Genauigkeit zu erzeugen. Insbesondere aufgrund der positiven Erfahrungen mit dem terrestrischen Laserscanner an der Schleuse wäre die Berücksichtigung dieser Methode von großem Interesse.

Darüber hinaus könnte die Kombination der UAS-Bilder mit den Bildern eines terrestrischen Laserscanners ohne Kamera zum gleichen Ergebnis, einem aus Bildern bestehenden dreidimensionalen Oberflächenmodell hoher Genauigkeit, führen. Eine weitere, in Betracht zu ziehende Methode für Unterwasser ist der Laserlinienscanner, der im Vergleich zum Fächerecholot qualitativ hochwertigere Bilder liefern könnte. Aber auch Auswertemethoden für eine effizientere Auswertung der ROV-Bilder sowie die Navigationsunterstützung des ROV's wären interessante weitere Forschungsfelder.

Im Hinblick auf eine breite Anwendung der innovativen Methoden sei erwähnt, dass nach den Erfahrungen der Projektteilnehmer alle digitale Technik nicht hilfreich ist, wenn die Akzeptanz der Beteiligten nicht vorhanden ist. Aus diesem Grund sollte in Folgeprojekten betrachtet werden, wie die innovativen Methoden am sinnvollsten in den bestehenden Prozess der Bauwerksinspektion integriert werden könnten. Hierzu liefert die im Projekt erstellte Prozessdokumentation für die Durchführung der Inspektion an Wasserbauwerken erste hilfreiche Anhaltspunkte. Deren Betrachtungsumfang sollte aber in jedem Fall auf die Planung und Nachbereitung der Bauwerksinspektion und idealerweise auf die nachfolgenden Schritte der Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen erweitert werden. Der Austausch mit dem Beratungsgremium hat gezeigt, dass für den Einsatz innovativer Methoden bei der Bauwerksinspektion einige offene Punkte, wie z. B. die Visualisierungsmöglichkeiten von 3D-Modellen oder die Zuständigkeiten bei der Umsetzung der Methoden, geklärt werden müssen.

Ebenso haben die Praxistests gezeigt, dass die an die Bauwerksinspektion gestellten Anforderungen von den zur Verfügung stehenden innovativen Methoden nicht vollumfänglich erfüllt werden können. Neben einer Weiterentwicklung der Methoden kann hier auch eine Überprüfung bzw. Abstufung der Anforderungen an die Bauwerksinspektion die Hemmschwelle zur Anwendung innovativer Methoden absenken. Es wäre vorstellbar, dass bei einer Schleuse, deren Schwachstellen bekannt sind, die keine Auffälligkeiten zeigt und die geodätisch überwacht wird, größere Toleranzen bei der Detektion von Schäden unter Wasser akzeptiert werden können und somit entwickelte Verfahren zum Einsatz kommen können.

## 5 Literaturverzeichnis

Aderhold, Jochen; Bauer, Norbert (Hg.) (2005): Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie. Zer-  
störungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung. Unter Mitarbeit von Norbert Bauer. Fraunhofer-Alli-  
anz Vision. Erlangen, Stuttgart: Fraunhofer-Allianz Vision; Fraunhofer-IRB-Verl. (Vision, 8).

AI Volution. Digitalisierung für die Verwirklichung eines INTELLIGENTEN STRASSEN  
INFORMATION SYSTEM (ISIS). STRUCINSPECT.

António Neves Lousada, Sérgio (Hg.) (2021): Underwater Work. Erscheinungsort nicht ermittel-  
bar: IntechOpen.

Azuma, Ronald T. (1997): A Survey of Augmented Reality. In: *Presence: Teleoperators & Virtual  
Environments* 6 (4), S. 355–385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355.

Balaras, C. A.; Argiriou, A. A. (2002): Infrared thermography for building diagnostics. In: *Energy  
and Buildings* 34 (2), S. 171–183. DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00105-0.

Barbosa, Maria Teresa Gomes; Rosse, Vicente Junio; Laurindo, Náira Gaudereto (2021): Ther-  
mography evaluation strategy proposal due moisture damage on building facades. In: *Journal of  
Building Engineering* 43, S. 102555. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102555.

BAW (Hg.) (2010): BAWMerkblatt Bauwerksinspektion (MBI). Ausgabe 2010. Karlsruhe: Bun-  
desanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter).

BAW (Hg.) (2018): BAWMerkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken  
(MSV). Ausgabe 2018. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter).

Becker, Ralf; Knapp, Sigfrid (2019): BIM im Wasserbau – von der Planung zu Betrieb und Unter-  
haltung. Das Initialprojekt 'Neue Schleuse Trier'. In: *Leitfaden Geodäsie und BIM*, S. 160–162. On-  
line verfügbar unter

[http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/107123/1/19667\\_Knapp\\_Becker\\_BIM-  
Wasserbau\\_DVW-Merkblatt\\_LeitfadenGeod%a4sieundBIM\\_2019\\_0.pdf](http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/107123/1/19667_Knapp_Becker_BIM-Wasserbau_DVW-Merkblatt_LeitfadenGeod%a4sieundBIM_2019_0.pdf).

Behrens, Joachim (2002): Gewässervermessung – eine Kernaufgabe der Wasser- und Schiff-  
fahrtsverwaltung (WSV). In: Allgemeine Vermessungsnachrichten (Hg.): Allgemeine Vermes-  
sungsnachrichten Band 85: VDE VERLAG GmbH, Berlin - Offenbach (Allgemeine Vermessungs-  
nachrichten, 85), S. 399–406. Online verfügbar unter [https://gispoint.de/artikelar-  
chiv/avn/2014/avn-ausgabe-11-122014/2577-gewaesservermessung-eine-kernaufgabe-der-  
wasser-und-schifffahrtsverwaltung-wsv.html](https://gispoint.de/artikelarchiv/avn/2014/avn-ausgabe-11-122014/2577-gewaesservermessung-eine-kernaufgabe-der-wasser-und-schifffahrtsverwaltung-wsv.html).

Blankenbach, Jörg; Schwermann, Raimund (2014): Photogrammetrische Deformationsvermes-  
sung von Haubenschildrohren für den Rohr-vortrieb. In: Andreas Wieser (Hg.): Ingenieurver-  
messung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Zürich, 2014 ; [vom  
14. bis zum 18. Januar 2014. Berlin: Wichmann/VDE-Verl.

Bleier, Michael; van der Lucht, Joschka; Nüchter, Andreas (2021): SCOUT3D – ein Unterwasser-  
Laserscanner für mobile Kartierung. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 2021 (4), S. 171–  
180. Online verfügbar unter [https://robotik.informatik.uni-wuerzburg.de/telematics/down-  
load/avn2021.pdf](https://robotik.informatik.uni-wuerzburg.de/telematics/download/avn2021.pdf), zuletzt geprüft am 25.09.2022.

Blut, Christoph; Büttner, Till; Becker, Ralf; Wollenberg, Raymond; Özcan, Baris; Stahl, Heiner; Blankenbach, Jörg (2021): DigiPark - Digitalisierung in der Bauwerksinstandsetzung. In: *kevb* 7 (1), S. 91–100.

Bödefeld, Jörg; Lühr, Stefan (2019): BIM – Hype, Risiken und Chancen. In: *Neubau von Wasserbauwerken*, S. 73–83. Online verfügbar unter [http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/106506/1/12\\_B%3%b6defeld-L%3%bchr\\_BIM%20-%20Hype%20Risiken%20Chancen\\_.pdf](http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/106506/1/12_B%3%b6defeld-L%3%bchr_BIM%20-%20Hype%20Risiken%20Chancen_.pdf).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hg.) (2022): Bauwerksinspektion VV-WSV 2101 (Verwaltungsvorschrift der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes).

Bundestag (14.06.2021): Gesetz zur Anpassung nationaler Regelungen an die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge, - LuftVO: Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten vom 14. Juni 2021. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I 1766 Nr. 32 Bonn., Fundstelle: (BGBl. I S. 1766). In: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 32. Online verfügbar unter [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBL&start=///\\*\[@attr\\_id=%27bgbl121s1766.pdf%27\]#\\_bgbl\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl121s1766.pdf%27%5D\\_1663929239863](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&start=///*[@attr_id=%27bgbl121s1766.pdf%27]#_bgbl_%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s1766.pdf%27%5D_1663929239863).

Capocci, Romano; Dooly, Gerard; Omerdić, Edin; Coleman, Joseph; Newe, Thomas; Toal, Daniel (2017): Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review. In: *JMSE* 5 (1), S. 13. DOI: 10.3390/jmse5010013.

Castillón, Miguel; Palomer, Albert; Forest, Josep; Ridao, Pere (2019): State of the Art of Underwater Active Optical 3D Scanners. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19 (23). DOI: 10.3390/s19235161.

CEVNI European Code for Inland Waterways (2022): United Nations. Online verfügbar unter [https://unece.org/DAM/trans/doc/finaldocs/sc3/ECE-TRANS-SC3-115-Rev.5e\\_WEB.pdf](https://unece.org/DAM/trans/doc/finaldocs/sc3/ECE-TRANS-SC3-115-Rev.5e_WEB.pdf).

Christ, B.; Michel, D. (2022): The Inspection And Light Work Class ROV Explosion. In: *ON&T* 2011, 23.09.2022 (17). Online verfügbar unter <http://digital.oceannews.com/publication/?m=9767&i=60148&p=62&ver=html5>, zuletzt geprüft am 23.09.2022.

Cruz-Neira, Carolina; Sandin, Daniel J.; DeFanti, Thomas A.; Kenyon, Robert V.; Hart, John C. (1992): The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. In: *Commun. ACM* 35 (6), 35,36,64–72. DOI: 10.1145/129888.129892.

Dais, Dimitris; Bal, İhsan Engin; Smyrou, Eleni; Sarhosis, Vasilis (2021): Automatic crack classification and segmentation on masonry surfaces using convolutional neural networks and transfer learning. In: *Automation in Construction* 125, S. 103606. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103606.

DIN EN ISO 9712: DIN EN ISO 9712:2021-02, Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung (ISO/DIS\_9712:2021); Deutsche und Englische Fassung prEN\_ISO\_9712:2021.

Eastman, Charles M. (2011): BIM handbook. A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. 2. ed. Hoboken, NJ: Wiley.

Fiedler, Sebastian (2019): 3D-Punktwolke mit thermografischer Information. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* (2/2019), S. 119–128. DOI: 10.12902/zfv-0247-2018.

Flohre, M. (2002): Wärmetechnische Schwachstellen: Aufgedeckt, lokalisiert und bewertet mittels Infrarot-Thermografie-Messungen. In: *Bauphysik* 24 (5), S. 308–312. DOI: 10.1002/bapi.200201300.

Fouad, Nabil A.; Richter, Torsten (2007): Leitfaden Thermografie im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung. 2., unveränd. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl.

Fuentes, L. M.; Finat, Javier; Fernández-Martin, J. J.; Martínez, J.; SanJose, J. I. (2007): Some Experiences in 3D Laser Scanning for Assisting Restoration and Evaluating Damage in Cultural Heritage. In: Johann Nimmrichter, Wolfgang Kautek und Manfred Schreiner (Hg.): *Lasers in the conservation of artworks. LACONA VI proceedings, Vienna, Austria, Sept. 21 - 25, 2005, Bd. 116*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (Springer proceedings in physics, 116), S. 543–551.

Geodätisches Institut RWTH Aachen: Abschlussbericht zur Konzeption der Bestandsdatenerfassung und BIM-basierten Modellierung von Wasserbauwerken mit Evaluation am Demonstrator Neue Schleuse Trier.

Geomar (2014): 100 Jahre Echolot. Die Tiefe hören (2014). Online verfügbar unter [https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/30830/1/140624\\_Echolot\\_Broschuere\\_June2014.pdf](https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/30830/1/140624_Echolot_Broschuere_June2014.pdf), zuletzt geprüft am 28.09.2022.

Haardt, Peter; Dabringhaus, Sarah; Friebel, Wolf Dieter; Bayerstorfer, Robert; Bäumler, Tobias; Freundt, Ursula (2017): Die intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn. In: *Bautechnik* 94 (7), S. 438–444. DOI: 10.1002/bate.201700035.

Hadavandsiri, Zahra; Lichti, Derek D.; Jahraus, Adam; Jarron, David (2019): Concrete Preliminary Damage Inspection by Classification of Terrestrial Laser Scanner Point Clouds through Systematic Threshold Definition. In: *IJGI* 8 (12), S. 585. DOI: 10.3390/ijgi8120585.

Hallermann, Norman; Helmrich, Marcel; Morgenthal, Guido; Schnitzler, Elke; Rodehorst, Volker; Debus, Paul (2018): UAS-basierte Diagnostik von Infrastrukturbauwerken. In: *Bautechnik* 95 (10), S. 720–726. DOI: 10.1002/bate.201800066.

Hesse, Christian; Holste, Carsten (2019): 3D HydroMapper. Automatisierte 3D-Bauwerksaufnahme mittels Uf'f'id 'Schadgens— erkennung unter Wasser für die Bauwerksinspektion und das Building Information Modelling-. In: *Hydrographische Nachrichten*.

Hildebrandt, Marc; Kerdels, Jochen; Albiez, Jan; Kirchner, Frank (2008): A practical underwater 3D-Laserscanner. In: *Oceans 2008*. Quebec City, QC, Canada, 15 - 18 September 2008. OCEANS 2008. Quebec City, QC, Canada, 9/15/2008 - 9/18/2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–5.

Hill, Marcos; Neumann, Sonja; Holst, Ralph; Bahlau, Sascha (2021): Bauwerksprüfung mittels Virtual/Augmented Reality - Prozessablauf. In: *dtv* 1 (1), S. 401–407.

- Hoffmann, Klaus (2002): Fächerlot- und Sonarsysteme. In: *Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschung von Wasserstraßen* (85), S. 139–142. Online verfügbar unter <http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/102659/1/hoffmann.pdf>.
- Holst, Ralph; Sperber, Martin; Gößmann, Rainer (2016): Bauwerksprüfung unterstützt durch neuartige Besichtigungstechniken – Erste Erfahrungen. In: *Bautechnik* 93 (10), S. 742–746.
- Holste, Karsten; Hesse, Christian; Neumann, Ingo; Bassen, Sebastian (2019): 3D HydroMapper – digitale Inspektion von Bauwerken über und unter Wasser. In: *Bautechnik* 96 (12), S. 951–953. DOI: 10.1002/bate.201900097.
- Hubbard, Bryan; Hubbard, Sarah (2020): Unmanned Aircraft Systems (UAS) for Bridge Inspection Safety. In: *Drones* 4 (3), S. 40. DOI: 10.3390/drones4030040.
- Jang, Arum; Kim, Jihyung; Park, Min Jae; Ju, Young K.; Kim, Sung Jig (2022): Analysis of Machine Learning for Detect Concrete Crack Depths Using Infrared Thermography Technique. In: IABSE Symposium, Prague 2022: Challenges for Existing and Oncoming Structures. IABSE Symposium, Prague 2022: Challenges for Existing and Oncoming Structures. Prague, Czech Republic, 25.05.2022 - 27.05.2022: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Zurich, Switzerland (IABSE Reports), S. 758–765.
- Jerald, Jason. (2016): *The VR book. Human-centered design for virtual reality*. First edition. New York, San Rafael, California: Association for Computing Machinery (ACM Digital Library, #8). Online verfügbar unter <https://dl.acm.org/action/showBook?doi=10.1145/2792790>.
- Jutz, L.; Özcan, B. (2022): Automated Detection of Cracks based on Statistical Analysis of Image Histograms. In: S. Slepicka, L. Kolbeck, S. Esser, K. Forth, F. Noichl und J. Schlenger (Hg.): 33. Forum Bauinformatik 2022. 33. Forum Bauinformatik 2022. Leonhard Obermeyer Center (TUM), 07.-09.09.2022: Technical University of Munich.
- Karaaslan, Enes; Bagci, Ulas; Catbas, Fikret Necati (2019): Artificial Intelligence Assisted Infrastructure Assessment using Mixed Reality Systems. In: *Transportation Research Record* 2673 (12), S. 413–424. DOI: 10.1177/0361198119839988.
- Kuhlmann, Heiner; Holst, Christopher (2017): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. In: Willi Freeden, Reinhard Rummel und Willfried Schwarz (Hg.): *Ingenieurgeodäsie*. Berlin: Springer Spektrum (Springer Reference Naturwissenschaften).
- Kus, A.; Unver, E.; Taylor, A. (2009): A comparative study of 3D scanning in engineering, product and transport design and fashion design education. In: *Comput. Appl. Eng. Educ.* 17 (3), S. 263–271. DOI: 10.1002/cae.20213.
- LaValle, Steven M. (2020): *VIRTUAL REALITY*. Hg. v. Cambridge University Press. Cambridge University Press. Online verfügbar unter <http://lavalle.pl/vr/>.
- Lucchi, Elena (2018): Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, S. 3077–3090. DOI: 10.1016/j.rser.2017.10.031.

Luhmann, Thomas (2018): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen - Methoden -Beispiele. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Offenbach: Wichmann. Online verfügbar unter <http://www.vde-verlag.de/buecher/537640/nahbereichsphotogrammetrie.html>.

Maierhofer, C.; A. Hasenstab; M. Röllig; A. Schönitz: Praktische Anwendung der aktiven Thermografie zur Untersuchung von Stahlbetonbauteilen. Online verfügbar unter <https://www.ndt.net/article/bau-zfp2008/Inhalt/p13.pdf>, zuletzt geprüft am 23.09.2022.

Martens, Jan; Blankenbach, Jörg: VOX2BIM : A Fast Method for Automated Point Cloud Segmentation. Online verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/842885/files/842885.pdf>, zuletzt geprüft am 23.09.2022.

Massot-Campos, Miquel; Oliver-Codina, Gabriel (2015): Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 15 (12), S. 31525–31557. DOI: 10.3390/s151229864.

Mischo, Hendrik; Seifried, Jörg; Thiele, Klaus; Schanzenbach, Stephan; Grassl, Martin (2019): Vom 3-D-Laserscan zum BIM-Modell. In: *Bautechnik* 96 (7), S. 564–571. DOI: 10.1002/bate.201900031.

Moisan, Emmanuel; Charbonnier, Pierre; Foucher, Philippe; Grussenmeyer, Pierre; Guillemin, Samuel (2018): Evaluating a Static Multibeam Sonar Scanner for 3D Surveys in Confined Underwater Environments. In: *Remote Sensing* 10 (9), S. 1395. DOI: 10.3390/rs10091395.

Mold, Lisa; Auer, Mathias; Strauss, Alfred; Hoffmann, Markus; Täubling, Benjamin (2020): Thermografie zur Erfassung von Schäden an Brückenbauwerken. In: *Bautechnik* 97 (11), S. 789–801.

Moreu, Fernando; Bleck, Brian; Vemuganti, Shreya; Rogers, David; Mascarenas, David (2017): Augmented Reality Tools for Enhanced Structural Inspection. In: Fu-Kuo Chang und Fotis Kopsaftopoulos (Hg.): *Structural health monitoring 2017. Real-time material state awareness and data-driven safety assurance. Structural Health Monitoring 2017. USA; International Workshop on Structural Health Monitoring; Biennial International Workshop on Structural Health Monitoring; IWSHM. Lancaster, Pennsylvania, U.S.A.: DEStech Publishing Inc.*

Morgenthal, Guido; Rodehorst, Volker; Hallermann, Norman; Debus, Paul; Benz, Christian (2021): Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-)automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte). *Inspections of structures in accordance with DIN 1076 – support by (semi-)automated image analysis with UAV (unmanned aerial vehicles).*

Müller, Christian; Lindner, Joachim; Feldmann, Markus; Stroetmann, Richard; Kuhlmann, Ulrike (Hg.) (2014): Eurocode 3. Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten : Band 1: Allgemeine Regeln und Hochbau : DIN EN 1993-1-1 mit Nationalem Anhang Kommentar und Beispiele. Bauforumstahl e.V.; Bundesingenieurkammer; Deutscher Ausschuss für Stahlbau; Deutsches Institut für Normung e. V (DIN); Wilhelm Ernst & Sohn. 1. Auflage, konsolidierte Fassung. Berlin, Wien, Zürich, Berlin: Beuth; Ernst & Sohn (Beuth Kommentar).

Müller-Braune, Frederic (2022): Damm- und Staubeckenuntersuchung mit Multibeam- und Laserscan: Talsperre Cranzahl - Ein Fallbeispiel von Sitowise in Zusammenarbeit mit der LTV Sachsen. XII. Mittweidaer Talsperrentag. In: Hochschule Mittweida, University of Applied Science (Hg.): Messtechnische Überwachung von Stauanlagen. XII. Mittweidaer Talsperrentag.

Nguyen, Duy-Cuong; Nguyen, The-Quan; Jin, Ruoyu; Jeon, Chi-Ho; Shim, Chang-Su (2022): BIM-based mixed-reality application for bridge inspection and maintenance. In: *CI* 22 (3), S. 487–503. DOI: 10.1108/CI-04-2021-0069.

Nooralishahi, Parham; Ibarra-Castanedo, Clemente; Deane, Shakeb; López, Fernando; Pant, Shashank; Genest, Marc et al. (2021): Drone-Based Non-Destructive Inspection of Industrial Sites. A Review and Case Studies. In: *Drones* 5 (4), S. 106. DOI: 10.3390/drones5040106.

Omer, Muhammad; Hewitt, Sam; Hadi Mosleh, Mojgan; Margetts, Lee; Parwaiz, Muhammad (Hg.) (2018): Performance evaluation of bridges using virtual reality. 6th Conference on Computational Mechanics; 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics. Glasgow, UK, 11-15 June 2018.

Pearson, C. (2011): Thermal imaging of building fabric. Bracknell: BSRIA (BSRIA guide, BG 39/2011).

Pfaffenholz, Jens-André; Stenz, Ulrich; Wujanz, Daniel; Neitzel, Frank; Neumann, Ingo (Dezember 2017): 3D-Punktwolken-basiertes Monitoring von Infrastrukturbauwerken am Beispiel einer historischen Gewölbebrücke.

Pfeifer, Norbert; Mandlbürger, Gottfried; Glira, Philipp (2017): Laserscanning. In: Christian Heipke, Willi Freeden und Reinhard Rummel (Hg.): Photogrammetrie und Fernerkundung. 1. Auflage. Berlin: Springer Spektrum (Springer Reference Naturwissenschaften).

Reinhardt, Markus; Gebauer, Daniel; Marx, Steffen (2018): Anforderungen und Konzept für eine automatisierte Zustandserfassung von Bauwerken mittels Bilderfassung und -auswertung. In: *Bautechnik* 95 (10), S. 705–711. DOI: 10.1002/bate.201800065.

Rocha, J.H.A.; Santos, C. F.; Póvoas, Y. V. (2018): Evaluation of the infrared thermography technique for capillarity moisture detection in buildings. In: *Procedia Structural Integrity* 11, S. 107–113. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.11.015.

Sardemann, Hannes; Mulsow, Christian; Maas, Hans-Gerd (2022): Accuracy Analysis of an Oblique Underwater Laser Lightsheet Triangulation System. In: *PFG* 90 (1), S. 3–18. DOI: 10.1007/s41064-022-00196-x.

Schmechtig, O. (2017): UAV in der Ingenieurvermessung – Anwendungen, Möglichkeiten und Erfahrungswerte aus der Praxis gesehen. In: Aiham Hassan (Hg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). Beiträge zum 156. DVW-Seminar am 9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart. Augsburg: Wißner-Verlag (Beiträge zum ... DVW-Seminar, 156).

Sham, F. C.; Chen, Nelson; Long, Liu (2008): Surface crack detection by flash thermography on concrete surface. In: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 50 (5), S. 240–243. DOI: 10.1784/insi.2008.50.5.240.

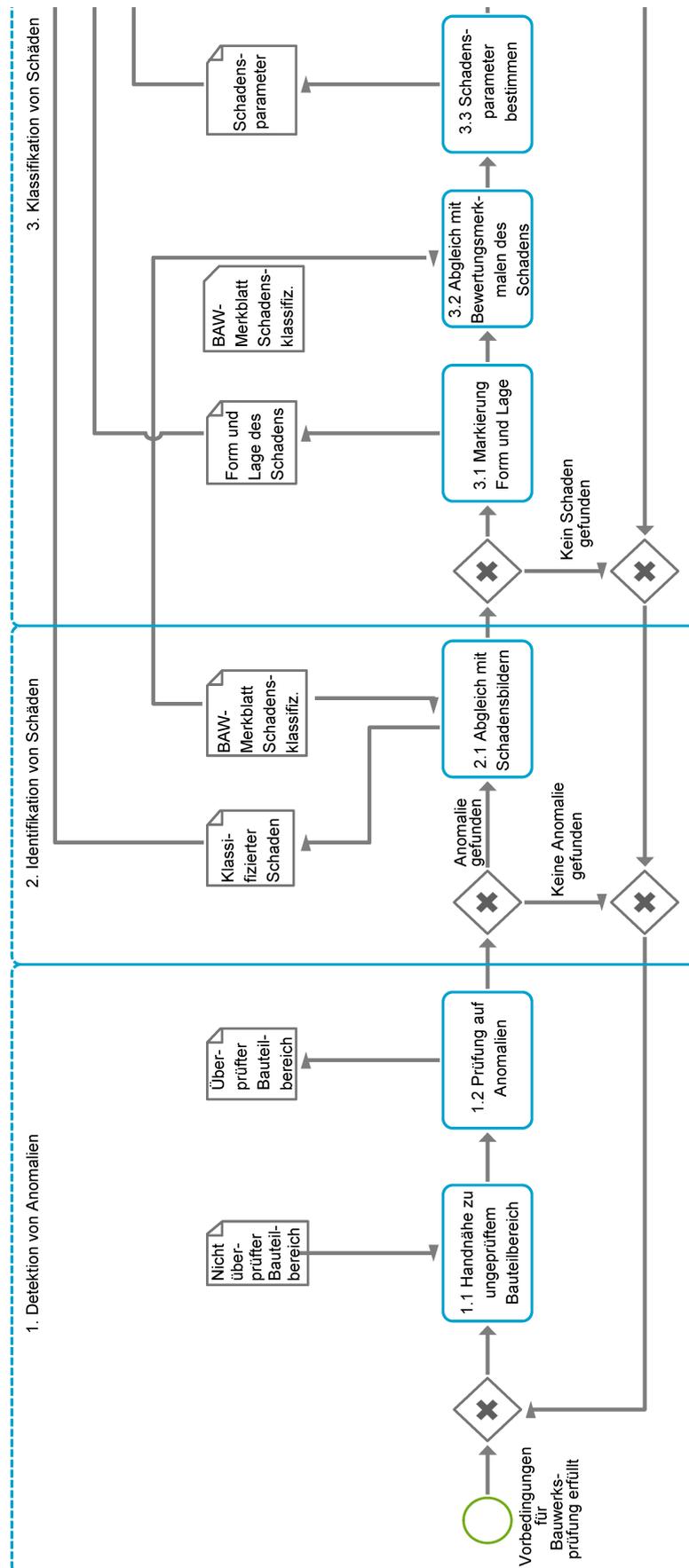
- Sherman, William R. (2019): Understanding virtual reality. Interface, application, and design. Unter Mitarbeit von Alan B. Craig. Second Edition. Cambridge, MA: Elsevier MK Morgan Kaufmann Publishers (The Morgan Kaufmann series in computer graphics). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5754454>.
- Shi, Pengfei; Fan, Xinnan; Ni, Jianjun; Khan, Zubair; Li, Min (2017): A novel underwater dam crack detection and classification approach based on sonar images. In: *PloS one* 12 (6), e0179627. DOI: 10.1371/journal.pone.0179627.
- Singer, D.; Borrmann, A. (2016): Machbarkeitsstudie. BIM für Bestandsbrücken, 15.03.2016.
- Slater, Mel (2009): Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364 (1535), S. 3549–3557. DOI: 10.1098/rstb.2009.0138.
- Sperber, Martin; Gößmann, Rainer; Regert, Corinna; Müller, Jörg; Nolden, Jürgen; Köhler, Ralf (2017): Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, B139).
- Sugimoto, Hideki; Moriya, Yoichi; Ogasawara, Tetsuya (2017): Underwater survey system of dam embankment by remotely operated vehicle. In: 2017 IEEE Underwater Technology (IEEE OES International Symposium on Underwater Technology 2017 Busan). UT 2017 Busan, February 21-24, 2017, Novotel Ambassador Hotel on Haeundae, Busan, South Korea. 2017 IEEE Underwater Technology (UT). Busan, South Korea, 2/21/2017 - 2/24/2017. Oceanic Engineering Society; Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–6.
- Taffe, A.; Wiggenhauser, H. (2008): Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – angewandte Forschung und Praxis. Online verfügbar unter <https://www.ndt.net/article/dgzfp2008/inhalt/mi4a1.pdf>.
- Tomita, Ko; Chew, Michael Yit Lin (2022): A Review of Infrared Thermography for Delamination Detection on Infrastructures and Buildings. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 22 (2), S. 423. DOI: 10.3390/s22020423.
- Truong-Hong, Linh; Laefer, Debra F. (2014): Application of Terrestrial Laser Scanner In Bridge Inspection: Review and an Opportunity. In: IABSE Symposium, Madrid 2014: Engineering for Progress, Nature and People. IABSE Symposium, Madrid 2014: Engineering for Progress, Nature and People. Madrid, Spain, 9/3/2014 - 9/5/2014: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Zurich, Switzerland (IABSE Reports), S. 2713–2720.
- Ullerich, Christof; Grabe, Matthias; Wenner, Marc; Herbrand, Martin (2020): smartBRIDGE Hamburg – prototypische Pilotierung eines digitalen Zwillings. In: *kbr* 4 (1), S. 441–449.
- Wang, Chao; Harper, Christofer; Lee, Yongcheol; Harris, Rebecca; Berryman, Charles (Hg.) (2018): Construction Research Congress 2018. Construction Information Technology. Construction Research Congress 2018. New Orleans, Louisiana, April 2–4, 2018. Reston: American Society of Civil Engineers.
- Wiggenhagen, Manfred; Steensen, Torge (2021): Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. = Guide for photogrammetry and remote sensing. 6., neu bearbeitete und erweiterte

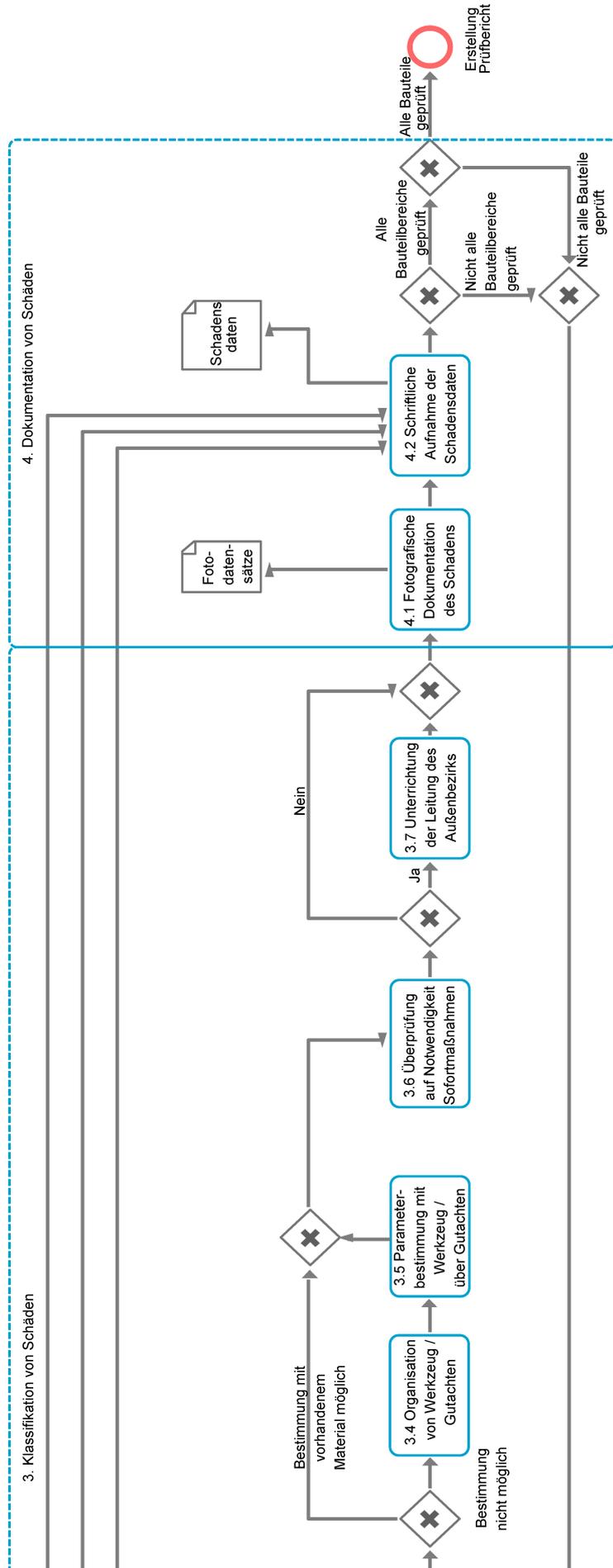
Auflage. Berlin, Offenbach: Wichmann. Online verfügbar unter [https://www.content-select.com/index.php?id=bib\\_view&ean=9783879076796](https://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783879076796).

Witte, Bertold; Sparla, Peter; Blankenbach, Jörg (2020): Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik. 9., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Offenbach: Wichmann. Online verfügbar unter [http://www.content-select.com/index.php?id=bib\\_view&ean=9783879076581](http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783879076581).

Yang, X.; Xing, Y. (2021): Tuning for robust and optimal dynamic positioning control in BlueROV2. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1201 (1), S. 12015. DOI: 10.1088/1757-899X/1201/1/012015.

## Anlage 1: Ausführliche Prozessdokumentation der Bauwerksprüfung





## **Anlage 2**

### **Steckbriefe zu den innovativen Methoden**

#### **Inhaltsverzeichnis**

Glossar	2
Ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge (ROV)	16
Terrestrisches Laserscanning (TLS)	22
RGB-Photogrammetrie	28
Handscanner und Laserlinienscanner (Triangulationsscanner)	35
Thermografie	42
Echolot/Sonar	48
Maschinelle Schadenserkennung auf Basis von Bildaufnahmen	55
Virtuelle Realität (engl. Virtual Reality, VR)	61

## Glossar

- Bildfaltung:** Anwendung einer Filtermatrix auf ein Zielbild. Die Filtermatrix hat dabei oft eine kleine und ungerade Größe (bspw.  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ , ...) und wird mit jedem Pixel des Zielbildes verknüpft. Hierbei wird eine gewichtete Summe des jeweiligen Pixels und seiner Nachbarschaft durchgeführt, was schließlich das entsprechende Pixel im Ergebnisbild darstellt. Das Ergebnisbild wird dabei häufig auch als *gefaltetes* Bild bezeichnet. Die Werte in der Filtermatrix, oft auch Gewichte genannt, entscheiden darüber, welche Effekte im Ergebnisbild hervorgerufen werden. Dies kann beispielsweise eine Weichzeichnung, Schärfung oder auch die Extraktion von Merkmalen wie bspw. Kanten sein.
- Bildmaske:** Eine Matrix, welche bestimmte Bereiche in einem Zielbild markiert. Die Matrix ist dabei in der Regel genauso groß wie das Zielbild und jeder Wert in der Matrix korrespondiert mit dem Pixel an der gleichen Position im Zielbild. Bei der Segmentierung (s.o.) von Bildern können Bildmasken eingesetzt werden, um den Pixeln des Zielbildes eine bestimmte Gruppe zuzuweisen (durch die Zuweisung eines Wertes für eine bestimmte Klasse an der entsprechenden Position in der Matrix).
- Bildmaßstab:** Verhältnis von Kamerakonstante (Objektivbrennweite) zur Aufnahmeentfernung. Der Bildmaßstab beeinflusst maßgeblich die erzielbare Messgenauigkeit und sollte möglichst groß sein.
- Bildorientierung:** Mit der Bildorientierung wird die Aufnahmesituation mathematisch rekonstruiert. D.h. die Positionen und Rotationen (Drehungen) der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme (die sog. Posen) werden nachträglich rechnerisch bestimmt. Die Bildorientierung ist elementare Voraussetzung dafür, dass in den Aufnahmen des Bildverbandes gemessen werden bzw. die Auswertung stattfinden kann. Das Ergebnis der Bildorientierung sind die Daten der Inneren Orientierung (Kameradaten) und Äußerer Orientierung (Posen).
- Bildpaar/Bildverband:** Die photogrammetrischen 3D-Messungen basieren auf dem Triangulationsprinzip (s.u.). Hierzu müssen Aufnahmen von unterschiedlichen Standorten mit überlappenden Bildbereichen vorliegen, die in ihrer Gesamtheit den Bildverband formen. Zwei Aufnahmen bilden ein Bildpaar; sind die Aufnahmen in Stereoanordnung erstellt, sind die Voraussetzungen für Stereoauswertungen (unter räumlicher Betrachtung der Szene) gegeben.
- Bildrate:** Die Bildrate wird beim Echtzeitrendering häufig auch als Bilder pro Sekunde (engl. Frames per Second, FPS) angegeben und definiert die Anzahl der ausgegebenen Einzelbilder in einem Zeitintervall. Für AR-Anwendungen werden mindestens 60 FPS empfohlen.

- Detektion:** Lokalisierung und Klassifizierung von Objekten. In den Bildern werden Objekte gesucht, die durch umgrenzende Rechtecke lokalisiert werden. Zusätzlich wird jedem gefundenen Objekt eine Klasse zugewiesen.
- Emissionsgrad:** Der Emissionsgrad ist ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, Strahlung auszusenden. Der Wertebereich für den Emissionsgrad liegt zwischen 0 und 1, wobei ein Emissionsgrad von 1 (100%) in der Realität nie auftritt, da reale Körper zusätzlich reflektieren und eventuell transmittieren. Die Ausprägung des Emissionsgrades ist stets in Abhängigkeit der Wellenlänge zu betrachten und maßgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers abhängig. Nichtmetallische und nichttransparente Objekte strahlen in der Regel viel Wärme aus und weisen einen Emissionsgrad von über 80% auf. Bei metallischen Oberflächen kann der Emissionsgrad hingegen stark variieren. Hierbei gilt, dass je glänzender ein Metall ist, desto niedriger ist der Emissionsgrad.
- Erweiterte Realität:** Die erweiterte Realität (engl. Augmented Reality, AR) ist die interaktive Erweiterung der physischen Umgebung durch die Integration zusätzlicher virtueller Informationen. Es zeichnet sich durch drei Hauptmerkmale aus: (1) Es kombiniert reale und virtuelle Elemente, (2) Es vereint virtuelle und reale Objekte im dreidimensionalen Raum, (3) Es ist in Echtzeit interaktiv.
- Faltendes Neuronales Netz:** Eine spezielle Art Künstlicher Neuronaler Netze (KNN), welche häufig bei zwei- oder auch dreidimensional und in einer geordneten Reihenfolge vorliegenden Daten verwendet wird. Bei dem „Standardmodell“ eines KNN (dem Multi-layer Perceptron) durchlaufen die Eingabevariablen das Netz unabhängig voneinander. Insbesondere bei der Bilderkennung spielt die Nachbarschaft von Pixeln jedoch eine entscheidende Rolle. Bei Bildern werden daher aufgrund der zweidimensionalen und geordneten Struktur von Pixeln fast ausschließlich faltende Neuronale Netze (engl. Convolutional Neural Networks, CNN) verwendet. Diese beinhalten in einem ersten Schritt eine Abfolge von sogenannten Faltungsoperatoren (Bildfaltung (s.u.)) und Pooling (s.u.), um aus einem Zielbild relevante Merkmale zu extrahieren. Diese Merkmale durchlaufen anschließend den restlichen Teil des Netzes, welches der Eingabe schließlich bspw. eine bestimmte Klasse zuordnet.
- Field of View:** Der Begriff Field of View (Sichtfeld) beschreibt die mit einer (Thermal)Kamera erfassbare Fläche. Das Sichtfeld ist von der Entfernung zwischen Messobjekt und Kamera sowie von dem verwendeten Objektiv abhängig. Während sich Weitwinkelobjektive für große Sichtfelder eignen, dienen Teleobjektive für eine strukturiertere räumliche Auflösung.

Fortbewegung in VR:	Etablierte Fortbewegungsmethoden in VR-Umgebungen sind Flug-Modi und Teleportationen. Beide Fortbewegungsarten erfolgen durch Eingaben an einem physischen Controller. Für Flüge werden die Gravitationseigenschaften der virtuellen Welt deaktiviert, so dass frei durch die Welt navigiert werden kann. Teleportationen werden durch Auswahl von Zielpositionen, zu denen gesprungen werden kann, realisiert.
Genauigkeit:	Die erzielbare Genauigkeit hängt in der Photogrammetrie im Wesentlichen von den Faktoren Bildmaßstab, Bildanzahl, Schnittgeometrie der Bildstrahlen und Bildmessgenauigkeit ab. Die photogrammetrische Punktbestimmung basiert auf dem Triangulationsprinzip, weshalb die (absoluten) Genauigkeitsangaben in metrischen Dimensionen etwa wie Millimeter oder Zentimeter daher immer im Verhältnis zur Objektgröße gesehen werden müssen. Hierbei wird das Genauigkeitsmaß (Standardabweichung) ins Verhältnis zur (maximalen) Objektausdehnung gesetzt. Ein Beispiel wäre eine Angabe wie 1 : 8.000; bei einer Objektgröße von 15 m wäre in diesem Fall mit einer (absoluten) Genauigkeit von etwa 2 mm zu rechnen.
HomePlug AV:	HomePlug AV ist eine Spezifikation für ein Computernetzwerk via Stromleitung (Trägerfrequenzanlage), also so genannte Powerline Communication. Dabei ist eine Datenübertragungsrate von bis zu 200 Mbit/s möglich. Es ist die Nachfolgerspezifikation zu HomePlug.
ICP-Algorithmus:	Der ICP-Algorithmus (engl. Iterative Closest Point) ist ein Verfahren um Punktwolken optimal aufeinander einzupassen. Bei der Durchführung des Algorithmus wird versucht, die überlappenden Punktwolken mittels Rotation und Translation möglichst gut miteinander in Deckung zu bringen.
Impulslaufzeitverfahren:	Für die elektrooptische Streckenmessung wird bei jedem „Laserschuss“ die Laufzeit des zurückkommenden Signals gemessen. Zusammen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit kann auf der Grundlage des Weg-Zeit-Gesetzes die Strecke berechnet werden. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Zeitmessung ist die Genauigkeit i.a. geringer als beim Phasenvergleichsverfahren, allerdings sind damit größere Reichweiten erzielbar.
Inertialmesseinheit:	Eine Inertialmesseinheit kombiniert verschiedene Inertialsensoren wie Accelerometer, Gyroskop und Magnetometer in einem Sensorsystem. Benutzt werden Inertialsensoren für die Trägheitsnavigation, d.h. die Positions- und Orientierungsbestimmung von bewegten Objekten (z. B. Fahrzeugen), und häufig in Kombination mit globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS), um bspw. bei GNSS-Ausfall die Positionsbestimmung nahtlos fortführen zu können.

Klassifizierung:	Einteilung eines Objekts zu einer bestimmten Klasse aus einer vordefinierten Menge von Klassen.
Laserscanning:	Beim Laserscanning werden Laserstrahlen verwendet, um Oberflächen zeilen- und/oder rasterartig abzutasten und diese in Form von 2D-Punktprofilen (Profilschanner) oder 3D-Punktwolken abzubilden.
Nadirrichtung:	Die Nadirrichtung ist eine auf den Erdkörper bzw. das Erdschwerefeld bezogene Richtungsangabe und entspricht der Lotrichtung. Sie ist damit die der Zenitrichtung (Lotrichtung nach oben) entgegengesetzte Richtung.
PACM	PACM (engl. Phased Array Corrosion Mapping) ist eine zerstörungsfreie Inspektionstechnik zur Materialstärkemessung auf Grundlage von Ultraschall. Es können Unterschiede in der Materialstärke aufgrund von Korrosion detektiert und grafisch dargestellt werden.
Phasenvergleichsverfahren:	Beim Phasenvergleichsverfahren zur elektrooptischen Entfernungsmessung arbeitet der Laserscanner mit einer sinusförmigen Welle, die eine feste, definierte Länge besitzt. Die Strecke setzt sich aus der Anzahl ganzer Schwingungen sowie einem Wellenreststück zusammen. Das Reststück wird durch den Vergleich der Phasenlage mit einem geräteinternen Referenzsignal ermittelt. Im Unterschied zum Impulslaufzeitverfahren ist die Streckenmessung tendenziell genauer und es können deutlich höhere Scanraten (> 1 Mio. Punkte/sec) erzielt werden. Die maximalen Messdistanzen sind jedoch durch die Wellenlängen limitiert (max. 100-200 m).
Pooling:	Unterabtastung eines gefalteten Bildes. Hierbei wird das (gefaltete) Bild verkleinert, indem relevante Informationen des Bildes zusammengefasst werden. Auf diese Weise werden überschüssige Informationen im Bild verworfen, was zu einer besseren Generalisierbarkeit des Künstlichen Neuronalen Netz führt. Außerdem führt die Reduzierung der Bildgröße zu einer Verringerung des Speicherbedarfs und des Rechenaufwands.
Pose:	Als Pose wird die Position und Rotation, d.h. der Standpunkt und die Ausrichtung, eines Systems im Raum bezeichnet. Die Pose bezieht sich i.d.R. auf ein übergeordnetes Koordinatensystem (z. B. Bauwerkskoordinatensystem).
Pose-Trackingsystem:	Das Pose-Trackingsystem bestimmt die Pose des AR-Gerätes (Smartphone, Tablet, Headset) in Echtzeit in einem vom Trackingsystem aufgespannten Koordinatensystem und überträgt diese auf die virtuelle Kamera, so dass Bewegungen im physischen Raum 1:1 in den virtuellen Raum übertragen werden, um die reale Umgebung mit der virtuellen Umgebung zu verknüpfen.

Punktwolke:	Eine Punktwolke ist eine Menge an räumlich (=3D) erfasster (Mess)Punkte. Einzelne Punkte können neben ihren dreidimensionalen Koordinatenwerte noch weitere Attribute, wie bspw. Farbwerte oder Rückstrahlintensitäten, enthalten.
Registrierung:	Die Punktwolken werden originär in dem Sensorkoordinatensystem des Laserscanners erfasst. Die einzelnen Scans werden im Zuge der Registrierung durch räumliche Transformationen zu einer Gesamtpunktwolke in einem lokalen oder übergeordneten Koordinatensystem zusammengebracht.
Relative Genauigkeit:	Die erzielbare Genauigkeit hängt in der Photogrammetrie im Wesentlichen von den Faktoren Bildmaßstab, Bildanzahl, Schnittgeometrie der Bildstrahlen und Bildmessgenauigkeit ab. Die photogrammetrische Punktbestimmung basiert auf dem Triangulationsprinzip, weshalb die (absoluten) Genauigkeitsangaben in metrischen Dimensionen etwa wie Millimeter oder Zentimeter daher immer im Verhältnis zur Objektgröße gesehen werden müssen. Hierbei wird das Genauigkeitsmaß (Standardabweichung) ins Verhältnis zur (maximalen) Objektausdehnung gesetzt. Ein Beispiel wäre eine Angabe wie 1 : 8.000; bei einer Objektgröße von 15 m wäre in diesem Fall mit einer (absoluten) Genauigkeit von etwa 2 mm zu rechnen.
ROV:	Ein ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug (Tauchroboter), in der Fachliteratur auch als ROUV (engl. Remotely Operated Underwater Vehicle) oder kurz als ROV bezeichnet, ist ein kabelgeführtes Tauchboot für unterschiedliche Anwendungen in Wissenschaft, Industrie und beim Militär.
Segmentierung:	Zerlegung eines Ganzen in einzelne Segmente bzw. Abschnitte. Bei Bildern wird eine Segmentierung durchgeführt, indem das Bild in zusammenhängende Bereiche bzw. Regionen unterteilt wird bzw. die Pixel in dem Bild einzelnen Segmenten zugeordnet werden.
Semantische Eigenschaften:	Neben der Geometrie beinhalten Punktwolken und Bildaufnahmen auch Informationen über nicht geometrische Eigenschaften (z. B. Material) der Objekte. Diese können durch Interpretation der Farbwerte (der Pixel bzw. der eingefärbten Punktwolke) oder radiometrischen Informationen (z. B. der Rückstrahlintensität beim Laserscanner) zum Zwecke der Objektbildung ausgewertet werden.
Structure from Motion:	Structure from Motion (SfM) ist ein Verfahren aus der Robotik, mit dem aus der Verschiebung von markanten Objekten in Kamerabildern die Verschiebung und Drehung des Bildsensors und gleichzeitig die 3D-Koordinaten der Merkmalspunkte bestimmt werden.

Sub-Bottom Profiler:	Sub-Bottom Profiler sind eine besondere Art von Einstrahlecholoten, die mit sehr niedrigen Frequenzen arbeiten und es ermöglichen, die oberen Schichten des Meeresbodens zu durchdringen und abzutasten.
Thermogramm:	Als Thermogramm wird die bildliche Darstellung der gemessenen Temperaturwerte einer Thermalkamera bezeichnet. Thermogramme liefern somit einen visuellen Überblick zu den thermischen Verhältnissen am Messobjekt. Dabei repräsentiert jede Farbe oder Schattierung eine einzelne Temperatur.
Tiefenschärfe:	Bei der Erstellung von Bildaufnahmen mit Kameras ist neben der richtigen Belichtung dafür zu sorgen, dass alle Objektbereiche scharf abgebildet sind. Der Entfernungsbereich zwischen dem vordersten und dem hintersten scharf abgebildeten Objektpunkt ist die Tiefenschärfe (alternative Bezeichnung: Schärfentiefe). Die Tiefenschärfe hängt ab von Blende, Brennweite und Aufnahmeabstand. Vor allem bei Nahaufnahmen kann die Sicherstellung der Tiefenschärfe problematisch sein.
TOFD	Das TOFD-Verfahren (engl. Time of Flight Diffraction) ist ein Ultraschall-Prüfverfahren, welches vor allem bei der Prüfung von Schweißnähten eingesetzt wird. Während üblicherweise Fehlstellen im Material durch die Analyse von reflektierten Signalen aufgespürt werden, nutzt TOFD vor allem die Beugungssignale, die von Fehlstellen herrühren.
Transmissionsgrad:	Der Transmissionsgrad ist ein Maß für die Fähigkeit eines Materials Strahlung durchzulassen. Der Wertebereich für den Transmissionsgrad liegt zwischen 0 und 1. Der jeweilige Wert steht in Abhängigkeit zu der Art und Dicke des Materials. Die meisten Materialien sind für langwellige Strahlungen nicht durchlässig.
Triangulationsprinzip:	Die photogrammetrische Punktbestimmung basiert auf dem Triangulationsprinzip. Hierbei erfolgt die Punktbestimmung rechnerisch durch das Vorwärtseinschneiden von orientierten Bildstrahlen. In allen Bildern (erforderlich sind mindestens zwei), in denen der zu bestimmende Objektpunkt abgebildet ist, werden hierfür die Bildkoordinaten gemessen, woraus dann in Verbindung mit den aus der Bildorientierung bekannten Daten der Inneren Orientierung (Kameradaten) und Äußeren Orientierung jeweils Lage und Richtung des abbildenden Strahls im Raum rekonstruiert werden. Durch den Vorwärtsschnitt – also das Verschneiden – dieser Raumgeraden gelangt man dann zu den 3D-Koordinaten des Objektpunktes.

USBL:	USBL (engl. Ultra Short Baseline) ist ein Unterwasserpositionierungssystem, das auf der Messung von Laufzeiten von Wasserschallimpulsen zwischen dem Objekt und mehreren Bezugspunkten basiert. USBL-Systeme werden benutzt, um die Position von Objekten oder Geräten unter Wasser zu bestimmen.
UTM:	UTM (engl. Ultrasonic Thickness Measurement) ist eine zerstörungsfreie Methode, um die Materialstärke von Schiffshüllen, Metallröhren und Baustahl zu bestimmen. UTM wird in der Industrie zur Überwachung von Korrosion, Erosion und Schäden eingesetzt.
Verknüpfungspunkte:	Bei der Registrierung erfolgt die Verknüpfung der Scans zu einer Gesamtpunktwolke über identische Merkmale in den Punktwolken. Häufig werden hierzu Passpunkte als Verknüpfungspunkte verwendet, die über das Objekt verteilt in den einzelnen Scans detektiert werden.
Virtuelle Realität:	Als Virtuelle Realität (engl. Virtual Reality, VR) wird eine in Echtzeit computergenerierte, interaktive virtuelle Umgebung zur Darstellung und gleichzeitigen Wahrnehmung einer künstlichen Wirklichkeit und ihrer Eigenschaften bezeichnet
Zielzeichen:	Mit Zielzeichen (auch Zielmarken) werden Objekte bzw. Objektpunkte (z. B. Passpunkte) künstlich signalisiert. Üblich sind kreisförmige, kugel- oder zylinderförmige, linienhafte Zielzeichen oder codierte Muster, optional mit retro-reflektierenden Eigenschaften. Beim Laserscanning kann die Verknüpfung von Punktwolken im Rahmen der Registrierung mit Hilfe von Zielzeichen hergestellt werden. Wichtige Einsatzzwecke in der Photogrammetrie sind die Bereitstellung von eindeutigen Objektpunkten für Vergleichsmessungen und die Steigerung der Bildmessgenauigkeit für Deformationsmessungen. Künstliche Zielzeichen sind dabei häufig mit einem eindeutigen Muster für die Kodierung der Punktnummer ausgestattet, was die automatische Punktidentifizierung in den Bildern ermöglicht.

## UAV-Photogrammetrie

### Definition



Die UAV-Photogrammetrie erfasst geometrische und bildlich-*semantische* Objektzustände mit einem unbemannten Luftfahrzeug (Unmanned Aerial Vehicles, UAV), das mit einer kleinformatischen Kamera für die Erstellung von Bildaufnahmen aus der Luft ausgestattet ist. Methodisch ist das Verfahren eng an die klassische Luftbildphotogrammetrie angelehnt und liefert in erster Linie bildbasierte Punktwolken, 3D-Oberflächenmodelle und Orthophotos als Ergebnis (Luhmann 2018).

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich



- Befliegungen mit einem Unmanned Aerial Vehicle (UAV, „Drohne“), das mit einer Kamera für flächenhafte Erfassungen und Erstellung von 3D-Oberflächenmodellen ausgestattet ist
- Vermessung und Überwachung von hohen bzw. schwerzugänglichen Bauwerken
- Generierung von dreidimensionalen Oberflächenmodellen
- Schadensdetektion von Rissen ab 0,5 mm Rissweite, Abplatzungen, Aussinterungen, Kantenabbrüchen
- Visuelle Identifikation von Schäden
- Vermessung visuell identifizierbarer Schäden

### Rahmenbedingungen



- Die Aufnahmesensorik (Kamera und Objektiv) bedingt die Ausleuchtung der Objekte durch natürliches Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich.
- Der sinnvolle Einsatz ist besonders gegeben bei Objekten mit einer Größe bis zu ca. 100 m.
- Bei der UAV-Befliegung sind die rechtlichen Bestimmungen der Luftverkehrsordnung zu beachten (Bundestag 14.06.2021).
- Einsetzbare Kameratechnik von der Nutzlastkapazität des Fluggerätes abhängig.

(Luhmann 2018)

## Technischer Hintergrund

### Erläuterung der Funktionsweise



Als unbemannte Luftfahrzeuge werden vorwiegend senkrecht startende Multikoptersysteme in unterschiedlichen Nutzlastklassen eingesetzt, die mit Kameras für photogrammetrische Zwecke ausgestattet sind. Für die *Bildorientierung* sowie Georeferenzierung werden vorbereitend Passpunkte (d.h. Punkte mit bekannten Koordinaten) eingerichtet und eingemessen. Bei der Bilddatenerfassung können neben den typischen Senkrechtaufnahmen in *Nadirrichtung* auch Schrägaufnahmen für die Untersuchung von Bauwerken erstellt werden. Die manuell oder Flugrouten gesteuerten UAV-Befliegungen der überwiegend flächenhaften Objekte erfolgen systematisch mit hohen Überdeckungsraten von 60 bis 95 % (Längs- und Querrichtung), wobei *Bildverbände* mit bis zu mehreren hundert Bildern entstehen. Das wichtigste Ergebnis der UAV-Photogrammetrie sind bildbasierte Punktwolken. Die Auswertung der Aufnahmen und die Ableitung der Punktwolken aus den dichten Bildverbänden sind durch einen hohen Automatisierungsgrad gekennzeichnet. Die Gewinnung der (hochdichten) Punktwolken geschieht durch dichte Bildzuordnung (Dense Image Matching). Die 3D-Koordinaten der Objektpunkte ergeben sich vom Grundsatz her – wie in der klassischen RGB-Photogrammetrie – auf der Grundlage des photogrammetrischen *Triangulationsprinzips*.

(Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021; Witte et al. 2020)

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Die Untersuchung von schwer zugänglichen Objekten (z.B. Hochbauwerke) wird erleichtert.
- Einschlägige rechtliche Vorschriften der Luftfahrt sind zu beachten und führen zu Einschränkungen der Einsatzmöglichkeiten.
- Kurze, bzw. keine Aufenthaltszeiten bei der Erhebung in Gefahrenzonen vor Ort erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit.

## Zeitaufwand Inspektion

- Die Zeitersparnis ist durch die flexiblen Einsatzmöglichkeiten und den hohen Automatisierungsgrad bei der Ableitung von hochdichten Punktwolken und 3D-Oberflächenmodellen signifikant gegeben. Ein UAV-Projekt in der Größe z.B. einer Schleuse beansprucht 1,5 bis 2 Tage.
- Wenn aus den Punktwolken weitere geometrische Strukturinformationen (Punkte, Kanten etc.) bestimmt werden sollen, führt dies zu ähnlichem Zeitaufwand wie die (manuelle) Auswertung von Bildern in der RGB-Photogrammetrie.

## Kosten

- Erfassungssensorik (UAV und Kamera): ca. 3.000,- bis 20.000,- EUR (abhängig von Nutzlast und Kamertechnik, Marktrecherche 2022)
- Verarbeitungs- und Auswertesoftware: ca. 2.000,- bis 10.000,- EUR (abhängig vom Leistungsumfang und Automatisierungsgrad, Marktrecherche 2022)
- Personalkosten für Aufnahmen und Auswertung

## Datenqualität

- Die bildbasierten Punktwolken repräsentieren die geometrischen Objekteigenschaften, hauptsächlich der Objektoberfläche, mit Punktabständen im Subzentimeterbereich.
- Die Aufnahmen selbst dokumentieren zusätzlich die bildlich-semantischen Objekteigenschaften.
- Die geometrische Genauigkeit hängt neben der Aufnahmeanordnung und dem *Bildmaßstab* hauptsächlich vom Überdeckungsgrad der Aufnahmen ab. Bei der Lagegenauigkeit ist vom 0,5- bis 0,75-fachen und bei der Tiefenmessgenauigkeit vom 1,0 bis 2,0-fachen der Pixelauflösung am Objekt auszugehen.

(Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021)

## Voraussetzungen

### Hardware



- Batteriebetriebene Flugdrohne (UAV) mit Steuerungshardware und -software
- Leichtgewichtige Kamera
- Geodätisches Messinstrumentarium (Globales Navigations satellitensystem (GNSS)/Tachymeter) für die Einmessung von Passpunkten
- *Zielzeichen* für die Signalisierung von Passpunkten
- Für die Berechnung der Punktwolken: Computer mit hoher Leistung (z.B. i7-Prozessor, 64 GB RAM Arbeitsspeicher, Grafikprozessor mit Hardwarebeschleunigung)
- Auswertesoftware für Bestimmung von bildbasierten Punktwolken

### Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Generell keine Vorbereitung des Untersuchungsobjektes notwendig
- Einrichtung und Einmessung von Passpunkten

### Vorbereitung Datenerhebung



- Definition der angestrebten 3D-Genauigkeit in der Auswertung; ggf. Simulationsrechnungen im Vorfeld mit Planung der Flugtrajektorien
- Auswahl der Sensoraufösung (Pixelanzahl der Kamera) im Hinblick auf die notwendige Detailerkennbarkeit und Bodenpixelaufösung (Pixelgröße am Objekt)
- Auswahl der Kamera-Objektiv-Kombination im Hinblick auf den erforderlichen (durchschnittlichen) *Bildmaßstab*
- Festlegung von Belichtungszeit und Blendeneinstellung vor dem Hintergrund der gegebenen Lichtverhältnisse, erforderlichen *Tiefenschärfe* und zu erwartenden Bewegungsunschärfen
- Festlegung von Überdeckungsgrad (Überlappung benachbarter Aufnahmen) und Anzahl der Aufnahmen im Hinblick auf die angestrebte *Genauigkeit* und Punktwolkendichte

(Wiggenhagen und Steensen 2021; Luhmann 2018)

## Umweltbedingungen



- Normales Tageslicht stellt gewöhnlich ausreichende Lichtverhältnisse sicher mit Spielraum in den Kameraeinstellungen
- Trockene Witterungsverhältnisse erforderlich
- Einsatzbeschränkungen bei Wind gemäß Angaben des UAV-Herstellers (Max. ca. 10 m/s)

## Erforderliche Genehmigungen



- Keine Genehmigungen erforderlich, sofern die einschlägigen Gewichts- und Abstandsgrenzen für den erlaubnisfreien UAV-Betrieb gemäß Luftverkehrsverordnung eingehalten sind; andernfalls Einholung der Erlaubnis bei den Luftfahrtbehörden der Länder.
- Steuerer eines UAV muss über einen besonderen Kenntnissnachweis verfügen („Drohnenführerschein“)

(Bundestag 14.06.2021)

## Umsetzung

### Datenerhebung



- Einrichtung und Einmessung der Passpunkte
- Durchführung der UAV-Befliegung und Erstellung der Aufnahmen gemäß den Vorüberlegungen zur Datenerhebung

(Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021)

### Datenprozessierung



- Koordinatenberechnung der Passpunkte
- Durchführung der Bildauswertung und Generierung der bildbasierten Punktwolken
- Nachbereitung der Punktwolken (Fehlerbereinigung, Ausdünnung etc.)
- Ableitung von Folgeprodukten aus den UAV-Punktwolken: Dreiecksvermaschung, Digitale Oberflächenmodelle (DOM) mit und ohne Texturierung, Orthophotos/RGB-Bildpläne

- Profilerfassung in den Punktwolken anhand von horizontalen/vertikalen/schrägen Schnittebenen
- Erfassung von geometrischen Objekteigenschaften in den Punktwolken in Form von Ecken, Kanten und Ebenen
- 3D-Modellierung von Bauwerken, fallweise in Kombination mit Objektbildung für Building Information Modeling (BIM) (überwiegend manuell)

(Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021; Witte et al. 2020)

### Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Die UAV-Photogrammetrie ist vorteilhaft mit dem Laserscanning kombinierbar; beide Verfahren liefern Punktwolken als primäres Ergebnis, die sich ergänzen können.

### Output

#### Informationen



- Dichte, bildbasierte Punktwolken
- 3D-Oberflächenmodelle
- Orthophotos
- Schnittpläne
- 3D-Bauwerksmodelle

#### Dateiformate



- Aufnahmen in Standard-Rasterdatenformaten (i.d.R. JPG)
- Alle gängigen Datenformate für die Speicherung von Punktwolken (LAS, E57 etc.)
- Ergebniskoordinaten: ASCII
- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

## Referenzen

### Beispielanbieter



- Geodätisches Institut der RWTH Aachen (gia, [www.gia.rwth-aachen.de](http://www.gia.rwth-aachen.de))
- PHOCAD GmbH ([www.phocad.de](http://www.phocad.de))
- Abteilung Wasserbau BAW (<https://www.baw.de/DE/wasserbau/wasserbau.html>)

### Beispielanwendungen



- *Segmentierung* von Punktwolken für die Bauteilmodellierung (Martens und Blankenbach)
- UAV in der Ingenieurvermessung (Schmechtig 2017)
- Bestimmung von Punktwolken, 3D-Oberflächenmodellen und Orthophotos für Renaturierungsplanungen am Entwässerungskanal Deichverband Kleve (Geodätisches Institut RWTH Aachen, unveröffentlicht)

## Ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge (ROV)

### Definition



Ein ROV (Remotely Operate Vehicle) ist ein miniaturisiertes, unbemanntes Unterseeboot, das mit verschiedenen Sensoren (Kamera, Sonar etc.) ausgerüstet ist und über ein schwimmfähiges Kabel gesteuert (und in der Regel auch angetrieben) wird. Das ROV ist üblicherweise mit einem oder mehreren menschlichen Bedienern an der Oberfläche verbunden, die sich entweder an der Küste oder auf einem Überwasserschiff oder Ponton befinden.

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich



- Visuelle Inspektion von Unterwasserobjekten
- Sonarinspektion von Unterwasserobjekten
- Unterwasser-Wartungsarbeiten

(Christ und Michel 2022)

### Rahmenbedingungen



- Vor Ort sind möglichst kurze Messzeiten gewünscht oder erforderlich (zum Beispiel Wasserbauwerke mit Zugangsbeschränkungen aufgrund hochfrequenten Betriebes).
- Die Wasserströmung muss geringer sein als die Höchstgeschwindigkeit des ROVs.
- Motoren/Rotoren des ROV können je nach Art und Menge der Wasserverschmutzungen oder des Bewuchses verstopfen.
- Je nach Art der durchzuführenden Inspektion oder zerstörungsfreien Prüfung und der Umgebung (Hindernisse usw.) sollte das Wasser möglichst wenig getrübt sein, damit der menschliche Operateur die Situation über das Kamerabild überwachen kann und die Person, die die Inspektion durchführt, den Zustand des zu inspizierenden Objekts ausreichend gut erkennen kann.
- Unterwasserobjekte sollten vor der Inspektion mit Werkzeugen wie mechanischen Schabern, Bürsten und Hochdruckwasserstrahlern von Bewuchs befreit werden.

## Technischer Hintergrund

### Erläuterung der Funktionsweise



Das ROV wird in der Nähe des zu inspizierenden Objekts ins Wasser abgelassen. Anhand einer vorhandenen Karte oder lokaler Kenntnisse weist der Betriebsleiter dem ROV-Operator den Weg zu dem zu inspizierenden Bereich. Während der Messfahrt steuert der menschliche Operateur das ROV anhand des Kamera- und ggf. Sonarbildes, das auf die Fernsteuerung übertragen wird. Neben der visuellen Inspektion können auch sonargestützte Technologien wie bildgebende Sonare eingesetzt werden. Zerstörungsfreie Prüfungen wie Phased Array Corrosion Mapping, Ultraschall-Dickenprüfung und Flugzeitbeugung sind ebenso möglich. ROVs haben üblicherweise keinen Ballast und verfügen über einen positiven Auftrieb mit nach oben gerichteten Triebwerken, die es ihnen ermöglichen, zu tauchen und Unterwasser zu bleiben. ROVs werden entweder durch Batterien an Bord des Fahrzeugs (z. B. Lithium-Ionen-Batterien) oder durch eine Stromquelle an der Oberfläche mit Energie versorgt. Die Energie wird im Letztgenannten Fall über ein Kabel übertragen. Die Datenverbindung ist entweder Netzwerk-basiert (*Homeplug AV* ermöglicht eine Verbindung über große Entfernungen) oder über Glasfaserkabel. Die Positionierung von ROVs kann mit einem USBL-Unterwasser-Positionierungssystem (Ultra-Short-Baseline) erfolgen. In der Praxis werden die ROVs jedoch zumeist manuell und visuell durch den menschlichen Bediener anhand des Kamerabildes gesteuert.

(Christ und Michel 2022; Yang und Xing 2021)

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- ROVs können für ausgewählte Inspektionsaufgaben (z.B. visuelle Inspektion) den Einsatz von Tauchern oder das Trockenlegen des Bauwerks mit anschließender konventioneller Inspektion ersetzen. Hierdurch werden die Gefahren, die bei Tauchgängen mit menschlichen Tauchern existieren, vermieden.
- ROVs können je nach Größe und Ausprägung in Bereiche gesteuert werden, die für Taucher unzugänglich oder zu gefährlich sind bzw. in denen die Gefahrensituation nicht ausreichend abgeschätzt werden kann.

## Zeitaufwand Inspektion



- Das Trockenlegen von Wasserbauwerken für eine konventionelle Inspektion ist zeitaufwendig und kostspielig und behindert oftmals den Schiffsverkehr. ROVs können daher für ausgewählte Arbeiten zu einer deutlichen Zeit- und Kostenersparnis führen.
- Der Zeitaufwand für die Einweisung und Nachbesprechung von Tauchern ist nicht erforderlich, da die Bauwerksinspektoren die Inspektion am Bildschirm „begleiten“ können.

## Kosten



- Eine ROV-Inspektion kostet ca. 1500 – 4000 EUR pro Tag.

## Datenqualität



- Die Qualität der Daten hängt von mehreren Faktoren ab. Im Falle der zumeist verwendeten bild- und videobasierten Datenerfassung sind dies die Wassertrübung, die am ROV adaptierte Beleuchtung, Aufnahmeentfernung und die Qualität der Sensoren (Optik, Bildauflösung).
- Die von bildgebenden Sonaren erzeugten Bilder können genutzt werden, um Gegenstände/Objekte/Hindernisse auch in stark getrübbten Gewässern zu orten und je nach Anwendung und Typ auch Schäden zu erkennen.
- Die auf ROVs mitgeführten Sensoren erfassen die Daten in der Regel digital, so dass eine nachträgliche Auswertung und Analyse jederzeit möglich ist.

(Yang und Xing 2021)

## Voraussetzungen

### Hardware



- Ein ROV mit zugehöriger Steuerungs- und Stromversorgungsausrüstung
- ROV-Sensoren, z.B. bildgebendes Sonar, RGB-Kamera
- Ggf. ein USBL-Ortungssystem.

## Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Keine oder nur geringe Wasserströmung (Strömungsgeschwindigkeit sollte deutlich kleiner als die maximale Geschwindigkeit des ROVs sein)
- Möglichst geringe Wassertrübung. Vor der Inspektion sollte das Wasser nicht aufgewühlt werden
- Reinigung der zu inspizierenden Flächen von Bewuchs (z.B. Algen, Muscheln)

## Vorbereitung Datenerhebung



- Bestandpläne des zu inspizierenden Objektes mit den Abmessungen, Hindernissen etc. sollten vorliegen.
- Vorüberlegungen zu der Art von Schäden bzw. zu erfassenden Daten, da hiervon die Auswahl der Sensoren abhängt.
- Prüfen, ob und wo das ROV zu Wasser gelassen werden kann und wo der ideale Standort des Bedieners sein sollte. Davonsind auch die benötigte Kabellänge sowie die Länge der Sicherungsleine abhängig.

## Umweltbedingungen



- Eisfreiheit
- Nicht zu stark getrübt Wasser
- Der Betrieb ist (mit aktiver Beleuchtung am ROV) grundsätzlich auch in der Nacht möglich.

## Erforderliche Genehmigungen



- Im Europäischen Binnenschiffahrtskodex heißt es: "Das Tauchen unter Wasser ist in Gebieten, in denen die Schifffahrt behindert werden könnte, ohne besondere Erlaubnis verboten." Der Kodex schreibt eine besondere Kennzeichnung für Schiffe vor, die Tauchgänge durchführen (siehe Artikel 3.36). Eine gelbe Boje kennzeichnet in der Regel das Gebiet, in dem Unterwasserarbeiten durchgeführt werden

(CEVNI European Code for Inland Waterways 2022)

## Umsetzung

### Datenerhebung



- Kamera-Videos und Daten von bildgebenden Sonaren und anderen Sensoren/Instrumenten sollten mit Zeitstempel und ggf. Positions- und Orientierungsdaten des ROV digital aufgezeichnet werden.

### Datenprozessierung



- Bildgebende Sonare verarbeiten die Daten in Echtzeit, eine zusätzliche Datenverarbeitung ist in der Regel nicht erforderlich.
- Die Kamera- bzw. Videoinspektion erfordert ebenfalls keine spezielle Datenverarbeitung. Im Postprocessing können die Bilddaten mit Hilfe von Bildoperationen (z.B. Filter) und Bildanalysen (Objektdetektion) weiterverarbeitet werden, um bspw. Schäden teilautomatisiert zu erkennen. Ebenso können 3D-Punktwolken aus den Videosequenzen im Postprozess erstellt werden.

### Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- ROVs können grundsätzlich mit anderen Inspektionsmethoden kombiniert werden z.B. mit Fächerecholoten und sedimentechographischer Vermessung (*sub-bottom profilers*). Sinnvoll erscheint vor allem der komplementäre Einsatz, z.B. in Bereichen, in denen eine Trockenlegung nicht möglich oder die Begehung durch einen Taucher zu gefährlich ist. Auf ROVs kann eine Vielzahl von Instrumenten montiert werden, darunter Wechselstromfeldmessung, Computertomografie, Ultraschall-Dickensensoren und Phased Array Corrosion Mapping.

## Output

### Informationen



- Dies hängt von den Sensoren an Bord des ROV ab und kann Folgendes umfassen:
- Videosequenzen
- Hochauflösende RGB-Bilder
- Sonarbilder

- 3D-Punktwolken (Postprocessing)
- Erscheinungsbild von Objekten, wenn sie visuell zu erkennen und frei von Bewuchs sind
- Erkennung und Größenbestimmung von Oberflächenrissen auf Metalloberflächen (Wechselstromfeldmessung)
- Hochauflösende tomografische Bilder von Rohrleitungsinhalt und Wanddicke (für Computertomografie)
- Dicke von Metallteilen (für Ultraschall-Dickensensoren und Phased Array Corrosion Mapping.)

(Shi et al. 2017)

### Dateiformate

- Verschiedene gängige Video- und Bilddateiformate

### Referenzen

#### Beispielanbieter

- <https://www.rovco.com/industries/civils-inshore/>
- <https://www.geoceans.com/>

#### Beispielanwendungen

- [https://www.researchgate.net/publication/315321632\\_Inspection-Class\\_Remotely\\_Operated\\_Vehicles-A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/315321632_Inspection-Class_Remotely_Operated_Vehicles-A_Review)

## Terrestrisches Laserscanning (TLS)

### Definition



Beim terrestrischen Laserscanning (TLS) werden die Objekte flächenhaft oder profilweise mittels Laserlicht (LiDAR) mit Messraten von bis zu mehr als 1 Mio. Punkten pro Sekunde abgetastet. Gewöhnlich werden die Objekte von mehreren, frei wählbaren Scanstandorten aus erfasst. Das Ergebnis pro Scan ist eine 3D-Punktwolke in einem lokalen Koordinatensystem, die im Zuge einer *Registrierung* und Georeferenzierung zusammengeführt werden. Enorme Datenmengen mit mehreren Millionen bzw. Milliarden Punkten stellen hohe Anforderungen an die Verarbeitungshardware und -software.

(Witte et al. 2020)

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich



- Geometrische Dokumentation von dreidimensionalen Objekten mit einer nahezu dimensionsunabhängigen Genauigkeit von 2 bis 10 mm
- Quantitative Erfassung von Oberflächenänderungen wie z.B. Abplatzungen oder Kantenausbrüchen sowie von Verformungen, insbesondere über die Zeit
- Vielfach einsetzbar im Massiv- und Stahlbau für Objekte mit beliebiger Größe.
- Vermessung und Monitoring von Nahbereichsobjekten in 5 bis 250 m Entfernung (z.B. Deformationen im Stahlwasserbau)
- Generierung von 3D-Oberflächenmodellen
- Schadensdetektion von Abplatzungen, Aussinterungen, Kantenabbrüchen, freiliegender Bewehrung
- Abplatzungsidentifikation
- Verformungsmessungen

#### Rahmenbedingungen



- Einsatz bei allen Lichtverhältnissen möglich (auch in Dunkelheit)
- Niederschlagsfreiheit beim Einsatz im Außenbereich erforderlich
- Spiegelnde Oberflächen können zu Ergebnisverfälschungen führen

- Der sinnvolle Einsatz ist besonders gegeben bei Bedarf einer detaillierten Erfassung mit einer gleichzeitig hohen Informationsdichte.

## Technischer Hintergrund

### Erläuterung der Funktionsweise



Laserscanner verwenden gebündeltes und kohärentes (Lichtwellen mit gleicher Phasenlage) Laserlicht mit einer Wellenlänge im nahen Infrarot und sind ein aktives Multi-Sensor-System, optional ausgestattet mit Neigungssensoren, Kompass, Kamera, Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und *Inertialmesseinheit* (IMU). In der Bauart als 3D-Scanner registriert ein Scanner originär dreidimensionale Polarkoordinaten, indem die Objektoberflächen systematisch in vordefinierten Winkelschritten und in Verbindung mit einer simultanen Distanzmessung durch den Laser abgetastet werden. Die Messelemente setzen sich aus zwei Winkeln sowie einer Schrägdistanz zusammen, die für die Weiterverarbeitung in kartesische (X/Y/Z)-Koordinaten umgerechnet werden. Die meisten Scanner sind in der Lage, neben der geometrischen Information zusätzlich Intensitätswerte und Attribute wie Echopulsverformungen als radiometrische Informationen zu registrieren, die die Reflektivität der Objektoberflächen widerspiegeln. Die Streckenmessungen sind, abhängig von der Bauart, zentimeter- oder subzentimetergenau und beruhen entweder auf dem *Impulslaufzeitverfahren* (Time of Flight, ToF) oder dem *Phasenvergleichsverfahren*. Häufig werden die Laserscanner zusätzlich mit internen oder externen RGB-Kameras ausgestattet. Anhand der Kamerabilder können die Punktwolken dann bei der Weiterverarbeitung durch perspektivische Projektion der Pixel auf die Punkte eingefärbt werden. Bei den terrestrischen Laserscannern lassen sich hinsichtlich des Sichtfeldes die drei Bauformen Kamera-, Panorama- und Hybrid-Scanner unterscheiden. Hiervon hängt ab, ob pro Scan eine Abtastung bereichsbegrenzt ähnlich eines Kamerabildes oder vertikal und horizontal in einer 360°-Umgebung (Panorama) erfolgt. Für die Weiterverwendung überführt der Registrierungsprozess die Punktwolken der einzelnen Aufnahmen in ein gemeinsames Koordinatensystem, für den entsprechende Software des Herstellers mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad zur Verfügung steht. Die *Registrierung* kann über hochreflektierende *Zielzeichen* (Reflexfolien, -kugeln oder -zylinder, die als Passpunkte dienen), in den Punktwolken extrahierbare Merkmale wie Ecken, Kanten oder Ebenenstücke sowie über die Punktwolken selbst erfolgen.

(Witte et al. 2020; Pfeifer et al. 2017; Kuhlmann und Holst 2017)

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Aufnahmen aus großer Entfernung sind unproblematisch bzw. stellen eine Stärke des Verfahrens dar
- Kurze Aufenthaltszeiten vor Ort erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit

### Zeitaufwand Inspektion



- Die Zeitersparnis ist in erster Linie bei den Arbeiten vor Ort gegeben. Den größten Zeitumfang beansprucht die Auswertung der Punktwolken, wenn weitere geometrische Strukturinformationen gewünscht sind. Der Aufwand hängt vom Dokumentationsziel und den Automatisierungsmöglichkeiten ab, wobei objektabhängig mehrere Tage bzw. Wochen anzusetzen sind. Ein Projekt in der Größe z.B. einer Schleuse beansprucht ca. 3 bis 5 Tage.

### Kosten



- Erfassungssensorik (Laserscanner): ca. 50.000,- bis 100.000,- EUR (abhängig von der Scanrate und Messgenauigkeit, Marktrecherche 2022)
- Verarbeitungs- und Auswertesoftware: ca. 10.000,- bis 20.000,- EUR (abhängig vom Leistungsumfang und Automatisierungsgrad, Marktrecherche 2022)
- Personalkosten für Aufnahmen und Auswertung

### Datenqualität



- Die Punktwolken dokumentieren in erster Linie die geometrischen, weniger die bildlich-*semantischen* Objekteigenschaften wie zum Beispiel Färbung der Oberfläche.
- Die geometrische Genauigkeit beträgt nahezu unabhängig von der Scandistanz 2 bis 10 mm für die Standardabweichung von Einzelpunkten. Verformungsmessungen mit höherer Genauigkeit sind mit spezieller Hardware und entsprechendem Messdesign möglich.

(Kuhlmann und Holst 2017; Witte et al. 2020)

## Voraussetzungen

### Hardware



- Laserscanner (inklusive Stativ)
- Geodätisches Messinstrument für die Einmessung von Passpunkten
- Reflexfolien, -kugeln oder -zylinder als Passpunkte für die *Registrierung*/Georeferenzierung der Punktwolken
- Computer mit hoher Leistung (z.B. i7-Prozessor, 64 GB RAM Arbeitsspeicher) zur Prozessierung, Auswertung und Betrachtung von 3D-Punktwolken
- Software für *Registrierung*, Georeferenzierung und Auswertung

### Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Generell keine Vorbereitung des Untersuchungsobjektes notwendig
- Einrichtung und Einmessung von Passpunkten für *Registrierung*/Georeferenzierung
- Ggf. Präparierung (Abdeckung) von spiegelnden Flächen

### Vorbereitung Datenerhebung



- Definition der angestrebten 3D-Genauigkeit in den Punktdaten; ggf. Simulationsrechnungen im Vorfeld mit Planung der Scanstandorte
- Definition der Scanparameter (Winkelschritte, Streckenmessgenauigkeit) im Hinblick auf die notwendige Detailerkennbarkeit und Punktdichte

(Witte et al. 2020; Müller et al. 2014; Kuhlmann und Holst 2017)

### Umweltbedingungen



- Kein Niederschlag bei Datenerhebung

## Erforderliche Genehmigungen



- Keine Genehmigungen erforderlich (Ausnahmen in sicherheitsrelevanten Einrichtungen)

## Umsetzung

### Datenerhebung



- Einrichtung und Einmessung der Passpunkte/*Verknüpfungspunkte*
- Durchführung der Laserscans und Aufzeichnung der Punktwolken gemäß den Vorüberlegungen zur Datenerhebung

(Witte et al. 2020)

### Datenprozessierung



- Koordinatenberechnung der Passpunkte/*Verknüpfungspunkte*
- Durchführung der Punktwolkenregistrierungen
- Ableitung von Folgeprodukten aus den Punktwolken: Dreiecksvermaschung, Digitale Oberflächenmodelle (DOM) mit und ohne Texturierung
- Profilerfassung in den Punktwolken anhand von horizontalen/vertikalen/schrägen Schnittebenen
- Konturbezogene Erfassung von Strukturen in den Punktwolken in Form von Ecken, Kanten und Ebenen
- 3D-Modellierung von Bauwerken, fallweise in Kombination mit Objektbildung (z.B. für Building Information Modeling (BIM))

(Witte et al. 2020; Kuhlmann und Holst 2017)

### Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Terrestrisches Laserscanning ist vorteilhaft mit RGB- und UAV-Photogrammetrie kombinierbar, da beide Verfahren die Nachteile des jeweils anderen kompensieren: z.B. be-

sitzt das Laserscanning nicht die Entfernungsabhängigkeit bei der Tiefenmessgenauigkeit, wogegen Photogrammetrie Vorteile bei der Messung von Ecken bzw. Kanten und in der Detailauflösung aufweist.

## Output

### Informationen



- Dichte Punktwolken
- 3D-Oberflächenmodelle
- Schnittpläne
- 3D-Bauwerksmodelle

### Dateiformate



- Alle gängigen Datenformate für die Speicherung von Punktwolken; offene (herstellerunabhängige) Formate wie LAS, E57 etc. sind empfehlenswert im Hinblick auf die Zukunftssicherheit.
- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

## Referenzen

### Beispielanbieter



- Geodätisches Institut der RWTH Aachen (gia, <http://www.gia.rwth-aachen.de>)
- PHOCAD GmbH ([www.phocad.de](http://www.phocad.de))
- Abteilung Wasserbau BAW (<https://www.baw.de/DE/wasserbau/wasserbau.html>)

### Beispielanwendungen



- Modellierung Neue Schleuse Trier (Geodätisches Institut RWTH Aachen)
- Prüfung von Verkehrswasserbauwerken (Hesse und Holste 2019)
- Monitoring von Infrastrukturbauwerken (Pfaffenholz et al. Dezember 2017)

## RGB-Photogrammetrie

### Definition



Photogrammetrie ist ein Verfahren zur Bestimmung von Gestalt, Form und Lage von dreidimensionalen Objekten aus (RGB-)Bildern. Die Photogrammetrie ist ein berührungsloses Mess-verfahren und kann überall dort eingesetzt werden, wo ein Objekt fotografisch abgebildet und ausgewertet werden kann.

(Luhmann 2018)

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich



- Geometrische und inhaltliche Dokumentation von dreidimensionalen Objekten mit einfacher (1:1.000) bis höchster (1:100.000) (relativer) Genauigkeit.
- Qualitative und quantitative Erfassung von Oberflächenänderungen wie z.B. Abplatzungen oder Kantenausbrüchen sowie von Verformungen, insbesondere über die Zeit.
- Vielfach einsetzbar im Massiv- und Stahlbau für Objekte mit beliebiger Größe.
- Generierung von dreidimensionalen Oberflächenmodellen
- Schadensdetektion von Rissen ab 0,5 mm Rissweite, Abplatzungen, Aussinterungen, Kantenabbrüchen
- Visuelle Identifikation von Schäden
- Vermessung visuell identifizierbarer Schäden

### Rahmenbedingungen



- Die Aufnahmesensorik (Kamera) bedingt die Ausleuchtung der Objekte durch natürliches oder künstliches Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich.
- Der sinnvolle Einsatz ist besonders gegeben bei Bedarf einer detaillierten Erfassung mit einer gleichzeitig hohen Informationsdichte.
- Die Objekte sind möglicherweise nur schlecht zugänglich bzw. es herrscht vor Ort ein hohes Gefahrenpotenzial (zum Beispiel Industrieanlagen).
- Vor Ort sind möglichst kurze Messzeiten gewünscht oder erforderlich (zum Beispiel Wasserbauwerke mit Zugangsbeschränkungen aufgrund hochfrequentem Betrieb).

(Luhmann 2018)

## Technischer Hintergrund

### Erläuterung der Funktionsweise



Das zu untersuchende Objekt wird mit einer RGB-Kamera von verschiedenen Standorten und aus unterschiedlichen Richtungen fotografiert, wobei die innere Abbildungsgeometrie der Kamera (vor allem Objektivbrennweite und Fokuseinstellung) unveränderlich sein sollten. Die Kamera kann dabei stationär (z.B. auf einem Stativ am Boden) aufgestellt oder freihändig vom menschlichen Operateur getragen werden. Auch die kinematische Anwendung auf bewegten Plattformen bzw. Fahrzeugen aller Art (vgl. z.B. Steckbrief UAV-Photogrammetrie) ist möglich.

Die Einsatzform (statisch, kinematisch) sowie Anzahl und Anordnung der Bildaufnahmen richten sich nach dem Vermessungszweck; alle zu erfassenden Objektbereiche sollten in mindestens zwei Aufnahmen abgebildet sein. Die Aufnahmeanalysen vor Ort werden ergänzt durch die Bestimmung von zumeist signalisierten Passpunkten (d.h. Punkte mit bekannten Koordinaten) mittels geodätischer Messverfahren wie der Tachymetrie, die für die *Bildorientierung* benötigt werden. Die digitalen Aufnahmen entstehen nach dem Gesetz der Zentralperspektive und gehen als Einzelbilder, *Bildpaare* (Stereobilder) oder Bildverbände in die Bildauswertung bzw. Bildanalyse ein (Witte et al. 2020). Als elementare Voraussetzung der Bildauswertung muss zunächst die *Bildorientierung* durchgeführt werden, die manuell oder – mit entsprechender Software – automatisch stattfinden kann. Als *Bildorientierung* bezeichnet man die mathematische Rekonstruktion der geometrischen Aufnahmesituation (Bestimmung der Kameraposen zum Zeitpunkt der Aufnahme), wobei regelmäßig simultan die Kalibrierung des Kamera-Objektiv-Systems erfolgt. Den zeitmäßig größten Aufwand beansprucht die photogrammetrische Auswertung. Hierbei werden die geometrischen und bildlich-*semantischen* Eigenschaften des zu untersuchenden Objektes anhand der Aufnahmen erfasst und dokumentiert. Das Grundprinzip der 3D-Objektpunktbestimmung beruht auf dem *Triangulationsprinzip*. Die Auswertung kann in Teilen automatisch, muss aber oftmals manuell stattfinden. Als Ergebnis erhält man dreidimensionale Informationen in Gestalt von Koordinaten einzelner Punkte, Kanten und Linien oder Orthophotos. Bildserien in zeitlichen Abständen ermöglichen die Dokumentation von dynamischen Prozessen.

Auf dem Prinzip der einfachen Bildauswertung basieren sogenannte Risskameras, wobei verschiedene Ausführungen am Markt existieren. Kameras mit einem mechanischen Rahmenvorsatz (z.B. Sachverständigen-Bedarf 2022) ermöglichen es, die Kamera in einem festen Abstand auf die Fläche aufzusetzen und zusammen mit einem Risslineal den Riss (oder Ausschnitte des Risses) zu fotografieren. Eine integrierte Beleuchtungseinheit für eine homogene Ausleuchtung und eine variable Vergrößerungsoptik (bis zu mehr als 30-fach) ermöglichen die sichere Bestimmung der Rissbreiten in den Bildern durch Risslinealvergleich mit Zehntelmillimeter-Genauigkeit.

(Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021)

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Aufnahmen aus großer Entfernung sind unproblematisch bzw. stellen sogar eine Stärke des Verfahrens dar
- Kurze Aufenthaltszeiten vor Ort erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit
- Für vom Boden nicht erreichbare Bereiche können die Bildaufnahmen auch von einem Hubsteiger, Gerüst o.ä. gemacht werden.

### Zeitaufwand Inspektion



- Die Zeitersparnis ist in erster Linie bei den Arbeiten vor Ort gegeben. Den größten Zeitaufwand beansprucht die Auswertung, wobei der Aufwand vom Dokumentationsziel und den Automatisierungsmöglichkeiten abhängt. Für die bildliche Auswertung in Form von Orthophotos sind ca. 4 Stunden (bis zu 50 Aufnahmen inkl. Rüstzeiten), für detaillierte 3D-CAD-Zeichnungen sind objektabhängig mehrere Tage bzw. Wochen anzusetzen.

### Kosten



- Erfassungssensorik (Kamera mit Objektiven): ca. 2.000,- EUR (Marktrecherche 2022)
- Verarbeitungs- und Auswertesoftware: ca. 2.000,- bis 20.000,- EUR (abhängig vom Leistungsumfang und Automatisierungsgrad, Marktrecherche 2022)
- Personalkosten für Aufnahmen und Auswertung

## Datenqualität



- Die Aufnahmen dokumentieren neben den geometrischen gleichzeitig auch die *bildlich-semanticen* Objekteigenschaften.
- Die geometrische Genauigkeit hängt neben der Aufnahmeanordnung hauptsächlich vom *Bildmaßstab* der Aufnahmen ab und muss daher relativ auf die Objektdimensionen bezogen werden. *Relative Genauigkeiten* bis 1:100.000 und besser sind in Verbindung mit einer Signalisierung (d.h. Präparierung mit *Zielzeichen*) der Objektoberfläche möglich (z.B. für Verformungsmessungen).

(Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021; Blankenbach und Schwermann 2014)

## Voraussetzungen

### Hardware



- Kamera, idealerweise mit Wechselobjektiven
- Geodätisches Messinstrument (Tachymeter, Globales Navigationssatellitensystem (GNSS)) für die Einmessung von Passpunkten
- *Zielzeichen* für die Signalisierung von Passpunkten und/oder der Objektoberfläche
- Kameras mit eingebauten GNSS (GNSS-Kameras) oder als Teilkomponenten eines Multi-Sensorsystems ermöglichen unter entsprechenden Bedingungen (z.B. GNSS-Empfang) eine direkte Georeferenzierung der Aufnahmen bei geringeren Genauigkeitsanforderungen und/oder die Bestimmung von Näherungswerten für die *Bildorientierung*
- Computer mit mittlerer Leistung (z.B. i5-Prozessor, 16 GB RAM Arbeitsspeicher)
- Photogrammetrische Auswertesoftware

### Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Generell keine Vorbereitung des Untersuchungsobjektes selbst notwendig; für Verformungsmessungen ist die Präparierung mit (kodierten) *Zielzeichen* Bestandteil der Arbeiten vor Ort
- Einrichtung und Einmessung von Passpunkten

## Vorbereitung Datenerhebung

- Definition der angestrebten 3D-Genauigkeit in der Auswertung; ggf. Simulationsrechnungen im Vorfeld mit Planung der Kameraposen (Standorte und Aufnahmerichtungen)
- Auswahl der Sensorauflösung (Pixelanzahl) im Hinblick auf die notwendige Detailerkennbarkeit
- Auswahl der Kamera-Objektiv-Kombination im Hinblick auf den erforderlichen (durchschnittlichen) *Bildmaßstab*
- Festlegung von Belichtungszeit und Blendeneinstellung vor dem Hintergrund der gegebenen Lichtverhältnisse und erforderlichen Tiefenschärfe
- Festlegung von Überdeckungsgrad (Überlappung benachbarter Bilder) und Anzahl der Aufnahmen im Hinblick auf die angestrebte Genauigkeit
- Ggf. Vorhalten eines Gerüsts, Hubsteigers o.ä. für höher gelegene Bereiche

(Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021)

## Umweltbedingungen

- Normales Tageslicht stellt gewöhnlich ausreichende Lichtverhältnisse sicher mit Spielraum in den Kameraeinstellungen; ggf. muss künstliche Beleuchtung vorgehalten werden.
- Trockene Witterung nicht zwingend erforderlich

## Erforderliche Genehmigungen

- Genehmigungen sind nicht erforderlich

## Umsetzung

### Datenerhebung

- Einrichtung und Einmessung der Passpunkte
- Ggf. Präparierung der Objektoberfläche mit (kodierte) *Zielzeichen* (bei Verformungsmessungen)
- Erstellung der Aufnahmen gemäß den Vorüberlegungen zur Datenerhebung

(Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021)

## Datenprozessierung



- Koordinatenberechnung der Passpunkte
- Durchführung der *Bildorientierung* einschließlich Kamerakalibrierung
- Bildauswertung (Einzelbilder/*Bildpaare*/Bildverbände)
- Kartographische Nachbereitung der grafischen Auswerteergebnisse (ggf. zeichnerische Überarbeitung der Rohauswertung, Beschriftungen)
- Deformationsanalyse bei dynamischen Prozessen (Vergleich von Geometriezuständen zu unterschiedlichen Zeitpunkten)

(Luhmann 2018; Wiggenhagen und Steensen 2021; Witte et al. 2020)

## Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Photogrammetrie ist vorteilhaft mit dem (terrestrischen) Laserscanning kombinierbar, da beide Verfahren die Nachteile des jeweils anderen kompensieren; z.B. besitzt das Laserscanning nicht die Entfernungsabhängigkeit bei der Messgenauigkeit, wogegen die Messung von Ecken und Kanten in der Photogrammetrie unproblematisch ist.
- UAV-Photogrammetrie weist methodisch Ähnlichkeiten auf; durch die bewegliche Plattform liegen Aufnahmen aus der Luftperspektive vor, die das Anwendungsspektrum erweitern.

## Output

### Informationen



- Koordinaten von einzelnen Punkten
- Grafische (CAD-)Daten der geometrischen Objektstruktur
- 3D-Oberflächenmodelle
- RGB-Bildpläne (Orthophotos)
- *Bildlich-semantische* Helligkeits- und Farbinformationen

## Dateiformate

- Aufnahmen in Standard-Rasterdatenformaten (i.d.R. JPG)
- Ergebniskoordinaten: ASCII
- Grafische Ergebnisdaten: DWG, DGN etc.
- Bildpläne/Orthophotos: RGB-Rasterdatenformate (JPG, TIF etc.)
- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

## Referenzen

### Beispielanbieter

- Geodätisches Institut der RWTH Aachen (gia, <http://www.gia.rwth-aachen.de>)
- PHOCAD GmbH ([www.phocad.de](http://www.phocad.de))
- Abteilung Wasserbau BAW (<https://www.baw.de/DE/wasserbau/wasserbau.html>)

### Beispielanwendungen

- Modellierung Neue Schleuse Trier (Geodätisches Institut RWTH Aachen)
- Bestimmung von Rissen auf Betonoberflächen durch bildbasierte Histogrammanalyse (Jutz und Özcan 2022)
- Kamerabasierte Rauigkeitsbestimmung an Betonoberflächen (Blut et al. 2021)
- Deformationsvermessung von Haubenschildrohren (Blankenbach und Schwermann 2014)

## Handscanner und Laserlinienscanner (Triangulationsscanner)

### Definition



Handgeführte Scanner mit Kamera und aktiver Lichtquelle arbeiten nach dem Triangulationsverfahren, einer speziellen Anwendung der Photogrammetrie. Das von einem Linienlaser (→ Laserlinienscanner) oder Streifenlichtprojektor (→ Streifenlichtscanner) projizierte Licht wird mit einer Kamera aufgenommen. Die Lichtquelle ist relativ zur Kamera fixiert und exakt kalibriert. Aus der Lage der abgebildeten Linien im Kamerabild können in Verbindung mit der bekannten Lage der Lichtebenen relativ zur Kamera 3D-Profile berechnet werden. Für jeden einzelnen Punkt wird im Prinzip eine Dreiecksberechnung (Triangulation) durchgeführt, durch die sich auch die begrenzte Reichweite erklärt. Mit zunehmendem Abstand werden die Dreiecke sehr spitz und die Unsicherheit nimmt mit zunehmender Entfernung überproportional zu.

Unterschieden wird zwischen Laserlinienscannern, bei denen nur eine oder wenige Lichtebenen aktiv sind und Streifenlichtscannern, die mit einem Projektor viele parallele Linien erzeugen.

(Bleier et al. 2021)

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich



- Triangulationsscanner werden üblicherweise in der Qualitätssicherung in der industriellen Messtechnik (z.B. Formprüfung) eingesetzt
- In der Bauwerksinspektion sind sie vielfach einsetzbar für beliebige Oberflächen und kleine komplexe Objekte oder lokal begrenzte Bereiche mit einer Ausdehnung von wenigen Metern
- Erfassung von Oberflächenänderungen wie z.B. Abplatzungen oder Kantenausbrüchen sowie von lokalen Verformungen
- Vermessung und Monitoring von Details und kleinen Objekten im Nahbereich von weniger als 1 m Entfernung (z.B. Deformationen und Schäden im Stahl- und Massivbau)
- Generierung von einzelnen Messprofilen und 3D-Oberflächen- oder Volumenmodellen (abhängig von der Art der Lichtquelle evtl. auch texturiert)
- Schadensdetektion von Abplatzungen, Aussinterungen, Kantenabbrüchen, freiliegender Bewehrung, Rissen > 1mm
- Die meisten Geräte sind ausschließlich für den Einsatz über Wasser vorgesehen. Es gibt aber auch spezielle Instrumente für den Einsatz unter Wasser

## Rahmenbedingungen



- Gute Sichtbarkeit und Zugänglichkeit der Oberflächen aus verschiedenen Richtungen
- Matte, diffus reflektierende Oberflächen. Stark spiegelnde Oberflächen sind nicht messbar.
- Umgebungsbeleuchtung muss im Vergleich zur Lichtstärke des Projektors gering sein, keine direkte Sonneneinstrahlung.
- Der sinnvolle Einsatz ist besonders gegeben bei Bedarf einer besonders detaillierten Erfassung lokaler Bereiche mit einer gleichzeitig hohen Informationsdichte.
- Bei starken Laserlinienprojektoren sind gegebenenfalls die Sicherheitsvorschriften der entsprechenden Laserschutzklasse nach DIN EN 60825-1 zu berücksichtigen

## Technischer Hintergrund

### Erläuterung der Funktionsweise



Bei Laserlinienscannern wird ein Lichtstrahl mit einer Zylinderlinse zu einer Lichtebeine aufgeweitet. Ein Streifenlichtscanner erzeugt mit einem lichtstarken Projektor viele Lichtebeine, die durch eine Codierung unterschieden werden. Die Codierung wird durch Bitmuster, mehrere aufeinanderfolgende Hell-Dunkel-Phasen, realisiert. Jede Lichtebeine hat ein festes individuelles Muster, das sich für jedes Pixel in den aufgenommenen Bildsequenzen eindeutig zuordnen lässt.

Die Messgenauigkeit und der Messbereich werden im Wesentlichen durch den Winkel und Abstand zwischen Lichtebeine und Kamera bestimmt. Je kleiner der Messbereich, umso höher ist in der Regel die Messgenauigkeit. Das Verfahren wurde ursprünglich vorwiegend im industriellen Bereich mit stationären Scannern eingesetzt, wo Genauigkeiten bis in den  $\mu\text{m}$ -Bereich möglich sind, aber auch mit frei geführten Handscannern können Genauigkeiten im Submillimeterbereich erzielt werden.

Mit speziellen abgedichteten Geräten ist auch der Einsatz unter Wasser möglich. Der Messbereich wird dann zusätzlich durch die Wassertrübung und Absorption des Lichts begrenzt.

Für die Vermessung von Oberflächen wird das Messsystem kontinuierlich entlang der Oberfläche geführt und die Einzelmessungen zu 3D-Punktwolken oder Oberflächen zusammengesetzt. Dazu muss ständig die genaue Position der Kamera relativ zu den bisherigen Aufnahmen bestimmt werden. Bei frei geführten Handscannern für den Außeneinsatz erfolgt die Bestimmung der aktuellen Lage (Position und Rotation) kontinuierlich und relativ zur vorherigen Position. Es gibt geometriebasierte

Verfahren bei denen überlappende 3D-Punktwolken verwendet werden (*ICP*, Iterative Closest Point) und bildbasierte Verfahren, bei denen überlappende Bildbereiche für die Lageänderung herangezogen werden (*SfM*, Structure from Motion). Die maximale Messfrequenz hängt von der Empfindlichkeit der Kamera, der Lichtstärke des Projektors, der Kameraauflösung und der Bandbreite der Datenübertragung ab und kann zwischen 1 Hz und mehr als 100 Hz liegen.

Aufgrund der geringen Baugröße von Handscannern beträgt der Aufnahmeabstand nur wenige Dezimeter. Die maximale Reichweite von Laserlinienscannern für den Einsatz unter Wasser hängt auch von der Wellenlänge bzw. Farbe des Lichts ab. Rotes Licht (Wellenlänge >700 nm) wird stärker absorbiert als grünes (500-600 nm) oder blaues Licht (< 500 nm).

(Sardemann et al. 2022; Castellón et al. 2019)

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Für den Einsatz von Handscannern gibt es aufgrund des geringen Gewichts (teilweise < 1 kg) kaum Einschränkungen. Das Messobjekt muss aufgrund der sehr begrenzten Reichweite aber direkt zugänglich sein. Der maximale Arbeitsbereich kann durch die Datenübertragung zum PC beschränkt sein (Kabel oder drahtlos)
- Für den Einsatz von Laserlinienscannern unter Wasser gilt: Im Vergleich zu Tauchgängen ist die Arbeitssicherheit deutlich höher. Das Bedienpersonal bleibt über Wasser und das Laserliniensystem wird von der Wasseroberfläche aus gesteuert. Die üblichen Sicherheitsvorschriften bei Arbeiten am Wasser sind weiterhin zu beachten.
- Bei Systemen mit Laserlichtquellen muss die Laserschutzklasse berücksichtigt werden. Häufig werden Systeme mit Laserschutzklasse 2 (eingeschränkt augensicher) eingesetzt.

### Zeitaufwand Inspektion



- Eine Zeitersparnis ist erheblich, weil die Ergebnisse unmittelbar nach der Aufnahme der Profile in digitaler Form vorliegen und keine händische Kartierung erforderlich ist. Die Aufnahmezeit pro Objekt oder Schadstelle beträgt wenige Sekunden oder Minuten.

## Kosten



- Die Kosten für Komplettsysteme mit Handscanner, PC und Software oder Laserlinienprojektor, Kamera und weiteren Sensoren für die Positionierung hängen von vielen Faktoren ab, unter anderem Messgenauigkeit, Reichweite und Messfrequenz (> 10.000 EUR).
- Die Personalkosten für Aufnahmen und Auswertung von kleineren Einzelbereichen sind aufgrund der geringen Messzeit pro Objekt eher gering und gut kalkulierbar.
- Für die Vermessung größerer Teile von Bauwerken (z.B. gesamte Schleusenwand) kann der Aufwand schnell unwirtschaftlich werden.

## Datenqualität



- Die geometrische Genauigkeit der Einzelprofile hängt von der Entfernung zwischen der Kamera und der Oberfläche ab. Aufgrund des Triangulationsverfahrens steigt die Unsicherheit der Messung überproportional an, wenn der Winkel zwischen Laserebene und Bildstrahl klein ist. Bei einem typischen Abstand von wenigen dm zwischen Kamera und Laserebene liegt die Messgenauigkeit im Submillimeterbereich.
- Die Genauigkeit der gemessenen absoluten Position und Rotation des gesamten Laserliniensystems bestimmt die Genauigkeit des resultierenden Oberflächenmodells. Die Qualität hängt aufgrund des *ICP*-Verfahrens nicht nur von der Dimension des Objektes, sondern auch von der Form und Beschaffenheit der Oberfläche und der Überlappung zwischen den Einzelaufnahmen ab. Ungünstig sind z.B. tiefschwarze oder spiegelnde Oberflächen oder Hohlräume mit Überhängen.
- Zusätzlich zur Geometrie der Oberfläche können einige Scansysteme auch die Bildinformationen auf die Oberfläche zurück projizieren, so dass schließlich ein photorealistisches Modell mit hochauflösender Textur entsteht.

## Voraussetzungen

### Hardware



- Sensoreinheit mit LED- oder Laserprojektor und Einzel- oder Stereokamera
- Eventuell zusätzliche Sensoren zur Bestimmung der Position der Sensoreinheit
- Computer zur Aufzeichnung und Auswertung der Kameradaten und weiterer Sensordaten oder evtl. Echtzeitauswertung

### Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Bei spiegelnden Oberflächen: Präparierung der Oberfläche mit mattem Sprühlack
- Gegebenenfalls Befreiung der Oberflächen von Algen oder anderem Bewuchs
- Gegebenenfalls Reduzierung von Umgebungslicht (Abschattung)
- Bei Aufnahmen unter Wasser: Möglichst lange Zeit vor der Messung keine Aufwirbelung von Sediment, um gute Sicht zu gewährleisten

### Vorbereitung Datenerhebung



- Falls das Kamerasystem nicht bereits vom Hersteller kalibriert und fixiert ist, gegebenenfalls Kalibrierungsmessung zur Bestimmung der relativen Position der Kamera zur Laserebene
- Für mechanischen bewegte Laserlinienscannern: Definition der Belichtungszeit, Messfrequenz, Bewegungsgeschwindigkeit anhängig von Messentfernung, Lichtstärke, Messdichte usw.

(Hildebrandt et al. 2008)

### Umweltbedingungen



- Kein direktes Sonnenlicht bei Datenerhebung
- Vorgaben des Herstellers bezüglich Temperaturbereich beachten
- Für Aufnahmen unter Wasser: Geringe Wassertrübung

### Erforderliche Genehmigungen



- Keine Genehmigungen erforderlich (Ausnahmen in sicherheitsrelevanten Einrichtungen)

## Umsetzung

### Datenerhebung

- Durchführung von Testaufnahmen zur Beurteilung der maximalen Reichweite, Lichtstärke, Erkennbarkeit der Laserlinie, und maximalen Messgeschwindigkeit
- Durchführung der Profilmessungen und Aufzeichnung der Messdaten gemäß den Vorüberlegungen zur Datenerhebung

### Datenprozessierung

- Die Berechnung der 3D-Punktwolke wird direkt in der Steuersoftware für das Messsystem vollautomatisch durchgeführt und besteht intern grob aus folgenden Schritten
  - Detektion der Line(n) in den Einzelbildern
  - Berechnung der Tiefenwerte bezogen auf das Kamerasystem
  - Berechnung der absoluten Position und Rotation des Systems zu jedem Zeitpunkt
  - Transformation der Einzelprofile in den 3D-Raum
- Filterung der Gesamtpunktwolke, Entfernung von Fehlmessungen
- Bei großen Objekten: evtl. Zusammenführen von getrennt gemessenen Teilbereichen zu einer Gesamtpunktwolke
- Erzeugung eines Oberflächenmodells (Dreiecksflächennetz)
- Datenanalyse, Detektion von Schadstellen, Vergleich mit vorherigen Messungen

### Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden

- Die Messungen mit Triangulationsscannern basieren zwar auf einem völlig unterschiedlichen Messverfahren gegenüber terrestrischen Laserscannern (TLS) (siehe Steckbrief TLS), erzeugen aber ähnliche Ergebnisse. Unterschiedlich sind die Reichweite, Auflösung und Punktdichte.
- Überschneidungen gibt es auch mit ROV, weil es Trägerplattform für ein Laserlinienmesssystem sein kann.

## Output

### Informationen



- 3D-Punktwolken
- Oberflächenmodelle
- Digitale Höhen- und Oberflächenmodelle
- Profilschnitte
- Orthophotos, Schadenskartierungen

### Dateiformate



- Bei Messungen mit geringer Messfrequenz und geringen Datenmengen können Textdateien mit einfachen Listen 3D-Koordinaten ausreichend sein.
- 3D-Punktwolken: LAS, PTX, E57, XYZRGB
- Oberflächenmodelle: STL, OBJ, PLY, WRL
- CAD-Formate, Volumenmodelle: STEP, IGES
- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

## Referenzen

### Beispielanbieter



#### Handscanner:

- CREAFORM <https://www.creaform3d.com/de>
- SCANTECH <https://www.3d-scantech.com/de/>
- Artec3D <https://www.artec3d.com/de>
- SHINING 3D <https://shining3d.com/de/>

#### Laserlinienscanner für Einsätze unter Wasser:

- VOYIS Imaging Inc. (vor 2021: 2G Robotics), Ontario, Kanada <https://voyis.com/>
- Savante Offshore Services Ltd, Großbritannien <https://www.savante.co.uk/>

### Beispielanwendungen



- Nicht bekannt

## Thermografie

### Definition



Thermografie ist ein zerstörungsfreies Verfahren zur Messung und Visualisierung, d.h. zur bildhaften Darstellung, der von einem Objekt ausgesendeten Wärmestrahlung, welche für das menschliche Auge unsichtbar ist. Anhand der Wärmestrahlung kann die Verteilung der Wärmeemission am Objekt erkannt werden.

Unterschieden werden kann zwischen *passiver* und *aktiver* Thermografie. Bei der passiven Thermografie wird die vom Objekt ausgesendete Eigenwärme passiv detektiert, während bei der aktiven Thermografie das Objekt zuvor oder gleichzeitig mit einer Wärmequelle (z.B. Infrarotstrahler) angeregt wird, so dass mit der Thermalkamera der künstlich erzeugte Wärmefluss detektiert wird.

(Flohrer 2002; Taffe und Wiggerhauser 2008)

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich



- Thermische Bestandsaufnahme zur Detektion von Schäden oder Baumängeln, wie z.B. Risse, Einschlüsse von Hohlräumen
- Lokalisierung von Wärmebrücken
- Lokalisierung und Visualisierung von feuchten Stellen/Feuchtigkeitsschäden und ggf. Identifikation von Ursachen (Leckageortung)

### Rahmenbedingungen



- Windgeschwindigkeiten unter 5m/s
- kein Regen, Schneefall oder Nebel
- Neben Außen- auch Innenthermografien von Gebäuden erfassbar
- Qualitativ hochwertige Ausrüstung mit hochauflösender Kamera für scharfe, gut erkennbare Thermografieaufnahmen. Nach DIN EN ISO 9712 zertifizierter Thermograf<sup>8</sup>
- Im Vorfeld der Messung sollten die täglichen Temperaturschwankungen möglichst gering sein. Ein bedeckter Himmel ist ebenfalls vorteilhaft, da direkte Sonneneinstrahlung die Gebäudeteile je nach Himmelsrichtung und Neigung unterschiedlich erwärmt und diese Wirkung nur allmählich abklingt
- Stabile Klimasituation vor und während der Messung wünschenswert<sup>11</sup>

- Günstiger Messzeitpunkt in den Monaten von November bis März in den frühen Morgenstunden von 6:00 bis 8:30 Uhr

(Pearson 2011; Lucchi 2018; Tomita und Chew 2022; DIN EN ISO 9712)

## Technischer Hintergrund

### Erläuterung der Funktionsweise



Die *passive Thermografie* basiert darauf, dass alle Gegenstände mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) Strahlung aussenden. Die Temperatur des jeweiligen Körpers sowie die Intensität der ausgesendeten Strahlung hängt von den physikalischen Eigenschaften des Körpers in Bezug auf Wärmeaufnahme und -abgabe ab (bspw. Oberflächenbeschaffenheit, *Emissionsgrad*, Transmission, Wärmespeicherfähigkeit). Dabei gilt, dass je höher die Temperatur eines Objekts ist, desto intensiver ist die von ihm abgegebene Strahlung.

Die Wärmestrahlung liegt im Infrarotbereich und ist für das menschliche Auge nicht sichtbar. Mit Hilfe der Thermographie ist es jedoch möglich, die Intensität der Wärmestrahlung zu messen, daraus die entsprechenden Temperaturen zu ermitteln und diese zu visualisieren, d.h. in einem Bild in unterschiedlichen Farben darzustellen. Daher wird die Thermographie umgangssprachlich auch als „Wärmebildtechnik“ bezeichnet.

Die abgestrahlte Energie wird in der Kamera auf Sensoren gelenkt, die diese in ein elektrisches Signal umwandeln. Dieses Signal wird digitalisiert und in die Temperatur umgerechnet. Die Messergebnisse werden dann in Form eines Wärmeverteilungsbildes auf einen Bildschirm projiziert und für eine spätere Analyse gespeichert. Zur einfachen Identifizierung können die spezifischen Temperaturen mit unterschiedlichen Farben dargestellt werden.

Mit der Kamera selbst wird nur Strahlung empfangen, es wird keine Strahlung ausgesendet. Somit ist die Messung im Rahmen der passiven Thermografie berührungslos und ohne Einwirkung von außen.

Dem gegenüber wirkt bei der *aktiven Thermografie* ein Wärmeimpuls auf das Bauteil ein. Als Wärmequellen eignen sich hierfür Infrarotstrahler, Lampen oder auch Laser. Eingesetzt wird diese Form der Thermografie vor allem im Industriesektor. Nimmt die Wärmeleitfähigkeit an einer bestimmten Stelle ab, kann dies auf einen Produktfehler wie z.B. einen Hohlraum, ein Loch oder einen Riss hindeuten.

(Aderhold und Bauer 2005; Fouad und Richter 2007; Taffe und Wiggenhauser 2008; Maierhofer et al.)

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Berührungslose und somit zerstörungsfreie Messung der Objekte
- Kurze Aufenthaltszeiten vor Ort erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit
- Bei Wasserbauwerken konnte in ersten Versuchen der Mehrwert von Thermografiekameras als Instrument für die Erkennung von Schäden (z.B. Risse) festgestellt werden, da der Feuchtigkeitsgehalt von Schadstellen mutmaßlich zu einem messbaren Temperaturdifferential führt.

### Zeitaufwand Inspektion



- Erheblich bei Kombination der Methode mit einem UAS

## Kosten



- Erfassungssensorik (Thermalkamera mit Objektiven): > 10.000 EUR (Marktrecherche 2022)
- Beispiel: Mittelklasse-Thermalkamera FLIR B360
- Preise abhängig von Sensordaten (Erfassbare Temperaturbereiche, thermische Empfindlichkeit, Sichtfeld, Auflösung, Gehäuseschutz, ...)
- Auswertesoftware: ca. 200 bis 1500 EUR (Marktrecherche 2022)
- Wärmestrahler (nur für aktive Thermografie): Infrarot Stativstrahler für industrielle Anwendungen ab ca. 1000 EUR (Wärmelampen oder herkömmliche Infrarotstrahler für Messungen kleinerer Bereiche günstiger)
- ggf. Personalkosten (zertifizierter Thermograf) für Aufnahmen und Auswertung

## Datenqualität



- In Abhängigkeit der verwendeten Sensorik (Erfassbare Temperaturbereiche, thermische Empfindlichkeit, Kameraauflösung, ...)
- Am Beispiel der Thermalkamera FLIR B360:
- Ortung, Messung und Visualisierung der Wärmeabstrahlung eines Gebäudes oder Gegenstands mit einer Auflösung von 0,06 Grad Celsius.
- Auflösung des *Thermogramms* (Bildauflösung): 320 Pixel in der Horizontalen und 240 Pixel in der Vertikalen (also insgesamt 76.800 Einzelmessungen).

## Voraussetzungen

### Hardware



- Thermalkamera mit Objektiv(en)
- evtl. zusätzliche Optiken und Displays
- Wärmestrahler (bei aktiver Thermografie)

### Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Generell keine Vorbereitung des Untersuchungsobjektes selbst notwendig
- bewegliche Gegenstände im Außenbereich wegen Wärmerückstrahlung bzw. Eigenstrahlung vom Bauwerk entfernen

### Vorbereitung Datenerhebung



- Konfiguration der Systemeinstellungen der Kamera in Abhängigkeit des Anwendungsfalls

### Umweltbedingungen



- Windgeschwindigkeiten unter 1 -2 m/s, kein Regen, Schneefall oder Nebel.
- Im Vorfeld der Messung sollten die täglichen Temperaturschwankungen möglichst gering sein. Ein bedeckter Himmel ist ebenfalls vorteilhaft, da direkte Sonneneinstrahlung

die Bauwerksteile je nach Himmelsrichtung und Neigung unterschiedlich erwärmt und diese Wirkung nur allmählich abklingt. Zusammengefasst ist eine stabile Klimasituation vor und während der Messung wünschenswert.

## Erforderliche Genehmigungen



- ggf. Genehmigungen erforderlich für die Begehung des Bauwerks

## Umsetzung

### Datenerhebung



- in Abhängigkeit der zu erfassenden Fläche können einzelne Aufnahmen oder gesamte Bildverbände aufgenommen werden

### Datenprozessierung



- ggf. individuelle Anpassung der Farbschemata zur visuellen Darstellung von Temperaturen
- Prozessierung der Bildverbände zu gesamtheitlichen *Thermogrammen* des Bauwerks
- Für die räumliche Referenzierung der Aufnahmen sind ggf. Verfahren zur Georeferenzierung oder *Registrierung* bzw. Koregistrierung mit anderen Datenquellen (z.B. RGB-Bildern) erforderlich

### Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Kombinierbar mit anderen (bildhaften) Messmethoden (Photogrammetrie, Laserscanner, ...) um z.B. Objekte dreidimensional zu vermessen und mit dem Wärmebildern zu überlagern
- Thermalkameras können sowohl vom menschlichen Operateur getragen und bedient als auch von anderen Trägerplattformen (z.B. UAV) betrieben werden

## Output

### Informationen



- Temperaturmesswerte
- *Emissionsgrad*
- Transmission
- Umgebungstemperatur
- *Field of View*

### Dateiformate



- Standard-Bilddateiformate mit oder ohne radiometrische Daten (z.B. JPG)
- Rohdaten (z.B. IS2)

## Referenzen

### Beispielanbieter



- Kreher und Lindner GbR, Ingenieurbüro in Aachen (<https://www.bau-messtechnik.de/>)
- BAUING & IMM, Energieberatung in Wuppertal (<https://www.bauing-immobilien.de/>)

### Beispielanwendungen



- Detektion von Rissen auf Betonoberflächen
- Maschinelle Lernverfahren zur Ermittlung von Risstiefen unter Nutzung von Thermografie
- Bewertung von (Feuchtigkeits-) Schäden an Gebäuden
- Inspektion elektrischer Anschlüsse in Bauwerken zur Gefahrenprävention
- Diagnose energetischer Gebäudedaten (Analyse von Heizungs- und Kühlsystemen sowie elektrischer und mechanischer Installationen zur Detektion von Energieverlusten von Bauwerken)
- Bestandsaufnahme mittels Einfärbung von 3D -Punktwolken mit thermografischen Bilddaten

(Sham et al. 2008; Jang et al. 2022; Barbosa et al. 2021; Maierhofer et al.; Balaras und Argiriou 2002; Fiedler 2019)

## Echolot/Sonar

### Definition



Echolote bzw. Sonare bezeichnen Instrumente zur elektroakustischen Vermessung von Gewässern, d.h. die Nutzung von Schall zu Vermessungszwecken unter Wasser.

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich



- Erfassung der Lage, Form und Dimension von Objekten bzw. der Topografie unter Wasser
- Bathymetrie/Gewässervermessung: 3D-Erfassung des Gewässer-/Meeresgrundes
- Erzeugung von Unterwassergeländemodellen (DGM-W)
- 3D-Erfassung der Bauwerksgeometrie unter Wasser
- Erfassung (großflächiger) Schäden unter Wasser
- Kartierung, Navigation und Objektsuche (z.B. Wracksuche) unter Wasser

### Rahmenbedingungen



- Die Anwendung erfolgt im Wasser i.d.R. von einem Boot oder Schiff
- Die Mindestmesstiefe des Echolots/Sonars muss gewährleistet sein
- Für die absolute räumliche Verortung der Daten wird die Verbindung mit einem Georeferenzierungssystem (z.B. GNSS) benötigt
- Echolote/Sonare müssen kalibriert werden (insbesondere die Position und Rotationswinkel relativ zum Georeferenzierungssystem)

### Technischer Hintergrund

#### Erläuterung der Funktionsweise



Das Echolot / Sonar wird an einem Boot oder Schiff befestigt, so dass sich der Schallkopf unter Wasser befindet und in Richtung des zu vermessenden Phänomens (z.B. Gewässerboden, Bauwerksbereich) ausgerichtet ist. Echolote/Sonare bestehen aus einer Schallsender, Schallempfänger (zusammen auch als Schallwandler oder Schwinger be-

zeichnet) und einer Zeitmesseinrichtung. Im Betrieb senden sie kontinuierlich Schallimpulse – meist im Ultraschallfrequenzbereich – aus, die am zu vermessenden Objekt reflektiert und als Schallecho von Empfänger wieder detektiert werden. Durch Messung der Laufzeit des Schallimpulses kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wasser auf die Entfernung zwischen Sender und Objekt geschlossen werden. Die Bestimmung der spezifischen Schallgeschwindigkeit ist ein neuralgischer Punkt für die Genauigkeit der Messung und erfolgt daher kontinuierlich durch einen Sensor. Der Eintreffwinkel des Schallechos wird durch Lagesensoren und Signalverarbeitung bestimmt, so dass aus den Laufzeitmessungen bei Echoloten 3D-Punkte (z.B. zur Erstellung von Geländemodellen oder Oberflächenmodellen von Bauwerken unter Wasser) oder bei bildgebenden Systemen georeferenzierte akustische Bilddarstellungen abgeleitet werden können. Unterschieden werden kann daher zwischen Vermessungs-Echoloten und bildgebenden Systemen:

- Einzelstrahl-Echolot (Singlebeam): Singlebeam-Echolotsysteme (Einfachschwingersysteme) bestehen aus einem Sender und Empfänger. Sie sind zumeist derart am Trägerfahrzeug gefestigt, dass sie ein Schallsignal gebündelt näherungsweise in *Nadirrichtung* aussenden und empfangen. Im Ergebnis misst das Singelbeam-Echolot jeweils eine Entfernung zu einem Punkt, so dass für eine flächen- oder linienhafte Aufnahme das Gebiet entsprechend profilweise befahren werden muss. Fächer- und Flächen(echo)lot (Multibeam): Beim Multibeam-Echolotsystem werden mehrere gebündelte Schallimpulse, d.h. mehrere Einzelstrahlen, entweder gleichzeitig oder nacheinander ausgesendet und empfangen. Auf diese Weise können pro Messung unmittelbar Punktprofile gemessen werden, was insbesondere für flächenhafte Aufnahmen von Vorteil ist. Unterschieden werden können Flächen(echo)lote (Mehrfachschwingersysteme), bei denen mehrere Schallwandler in einem definierten Abstand nebeneinander angeordnet sind oder Fächer(echo)lote, bei denen ein Schwinger Schallimpulse von einer Position in unterschiedlichen Winkeln in sehr kurzer Zeitfolge nacheinander fächerförmig aussendet.
- Bildgebende Systeme (z.B. Seitensichtsonare) dienen im Gegensatz zu den zuvor genannten Echoloten nicht zur Vermessung, sondern zur Kartierung und Navigation. Dazu werden während der Messung kontinuierlich Schallwellen über einen größeren Öffnungswinkel ausgesendet. Aufgrund des im Vergleich zu Single- und Multibeam weniger gebündelten Schalls, ergibt sich eine große Anzahl von Schallechos am Objekt bzw. Untergrund, die aufgrund der Rauigkeit gestreut reflektiert werden. Nur die Rückstreuungswerte können im Empfänger aufgezeichnet und anschließend in Abhängigkeit von der Zeit des Eintreffens einer Zelle in einem Vektor bzw. einer Matrix zugeordnet werden. Durch Einfärbung der Rückstreuungswerte können daraus akustische Bilder des Untergrunds abgeleitet werden.

(Behrens 2002; Hoffmann 2002; Geomar 2014)

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Echolote/Sonare sind berührungslose Verfahren, wodurch auf den Einsatz von Tauchern oder taktile Vermessungsverfahren verzichtet werden kann
- Aufgrund der Verwendung von Schallimpulsen ist auch der Einsatz in getrübten Gewässern möglich.
- Erfasst werden können nur Bereiche, die sich in direkter Sichtverbindung zum Echolot befinden.

### Zeitaufwand Inspektion



- Das Bauwerk muss für die Inspektion nicht trockengelegt werden.
- Aufnahme von großen Bereichen in kurzer Zeit möglich durch flächenhafte Erfassung

### Kosten



- Erfassungssensorik (Echolot/Sonar): Preis abhängig vom Gerätetyp
- Software zur Datenverarbeitung, z.B. Qinsy von QPS: Preis abhängig von Softwaretyp und Preismodell
- Software für die Sekundärnutzung der Daten, z.B. CAD- oder GIS-Software: Preis abhängig von Softwaretyp und Preismodell
- Personalkosten für Aufnahmen und Auswertung

### Datenqualität



- Die Aufnahmen dokumentieren den geometrischen (Echolote) oder die bildlichen Objekteigenschaften (z.B. Seitensichtsonar).
- Die geometrische Genauigkeit bei Echoloten hängt vom eingesetzten Sensor ab und liegt im Bereich von Zentimetern bis Dezimetern und ist damit nicht vergleichbar mit photogrammetrischen oder laserbasierten Methoden.

- Mehrfachreflexionen (z.B. an Schleusenwänden bzw. am Boden), Verdeckungen, Pflanzenbewuchs oder auch der Untergrund selbst (Eindringen des Schallimpulses in den Boden) können die Qualität der Ergebnisse negativ beeinflussen.

## Voraussetzungen

### Hardware



- Echolot (Singlebeam, Multibeam) bzw. Sonargerät (z.B. Seitensichtsonar)
- Georeferenzierungssystem (z.B. GNSS, IMU, Tachymeter)
- Computer mit mittlerer Leistung (z.B. i5-Prozessor, 16 GB RAM Arbeitsspeicher)
- Auswertesoftware

### Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Generell keine Vorbereitung des Untersuchungsobjektes selbst notwendig
- Ggf. ist jedoch eine Reinigung der zu vermessenden Objekte (z.B. von Algen, Muscheln etc.) erforderlich.
- Es sollte sichergestellt sein, dass die Messung nicht durch Luftblasen, z.B. von Tauchern gestört wird

### Vorbereitung Datenerhebung



- Justierung des Echolots in Abhängigkeit des zu erfassenden Bereichs
- Kalibrierung der relativen Lage des Echolots relativ zum Georeferenzierungssystem
- Bestimmung der spezifischen Wasserdichte über die gesamte Tiefe
- Bei großen Tiefen ggf. Messung eines Schallprofils zur Korrektur von Brechungseffekten (Refraktion) an Wasserschichtgrenzen aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Dichten
- Diverse Konfigurationseinstellungen, z.B. Schallfrequenz, Pulslänge, Pulsrate, Sendeleistung etc.

## Umweltbedingungen



- Das Wasser sollte eisfrei und möglichst frei von Bewuchs oder sonstiger Sichthindernisse sein
- Wetter und Strömung sollten eine möglichst ruhige Fahrt des Bootes ohne starke Schwankungen ermöglichen
- Echolote/Sonare stellen ansonsten keine besonderen Anforderungen an die Umweltbedingungen

## Erforderliche Genehmigungen



- Neben der allgemeinen Genehmigung zur Befahrung des Gewässers sind weitere Genehmigungen für die Echolotmessung nicht erforderlich

## Umsetzung

### Datenerhebung



- Installation und Kalibrierung der Sensorik
- Missionsplanung zur Definition der Trajektorien und Ausrichtung des Echolots/Sonars

### Datenprozessierung



- Ggf. Anbringung von Korrekturen (z.B. Kalibrierwerte)
- Filterung der Daten (Ausreißer/Fehlmessungen)
- Erstellung von 3D-Punktwolken, Profilen oder Tiefenkarten

### Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Echolotdaten können mit Daten anderer 3D-Erfassungsverfahren, z.B. TLS oder Photogrammetrie, fusioniert werden

- Sonarbilder können mit RGB-Bildaufnahmen als komplementäre Darstellung kombiniert werden.

## Output

### Informationen



- Koordinaten von einzelnen Punkten (Echolote)
- Grafische (CAD-)Daten der geometrischen Objektstruktur (Echolote)
- 3D-Oberflächenmodelle (Echolote)
- Bildliche Darstellungen (Sonar)
- Intensitätsverteilung (Sonar)

### Dateiformate



- Proprietäre Rohdatenformate der Hersteller, aber Export in andere Formate (z.B. XPS, ASCII-Formate) möglich
- Typische Punktwolkenformate, z.B. LAS/LAZ
- Gängige Bildformate, z.B. GeoTIFF
- Flächendarstellungen, z.B. S-57 ENC, ArcView Grid, KML

## Referenzen

### Beispielanbieter



- Geodätisches Institut der RWTH Aachen (gia), <http://www.gia.rwth-aachen.de>
- Hydromapper GmbH, <https://www.hydromapper.de>
- Geo-DV GmbH Ingenieurbüro für Datenmanagement und Vermessung, <https://www.geo-dv.de>
- RiverDynamics Weka UG, <https://riverdynamics.de/>
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

### Beispielanwendungen



- Erfassung der Schleuse Sülfeld (Fa. Hydromapper, 2021)

- Erfassung der Schleuse Trier (Geodätisches Institut RWTH Aachen)

## Maschinelle Schadenserkennung auf Basis von Bildaufnahmen

### Definition



Die maschinelle Schadenserkennung auf Basis von Bildaufnahmen ist ein Verfahren zur automatischen Analyse von Schäden in Einzelbildaufnahmen, bei der die Schäden in einzelne Typen eingeteilt, durch Rechtecke umgrenzt oder mithilfe von *Bildmasken* hervorgehoben werden. Das Verfahren ist berührungslos und somit auch zerstörungsfrei und kann überall dort eingesetzt werden, wo ein Objekt fotografisch abgebildet und ausgewertet werden kann.

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich



- Bildhafte Erfassung und Dokumentation von Schadstellen an Bauwerken, wie bspw. Risse und Abplatzungen bzw. Abblätterungen.
- Manuelle oder (halb)automatische Detektion und *Klassifizierung* visuell identifizierbarer Schäden.
- Bildbasierte Vermessung von erfassten Schäden.

### Rahmenbedingungen



- Die Aufnahmesensorik (Kamera) erfordert die Ausleuchtung der zu vermessenden Oberfläche durch natürliches oder künstliches Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich.
- Die Objekte sind möglicherweise nur schlecht zugänglich bzw. es herrscht vor Ort ein hohes Gefahrenpotenzial (zum Beispiel Industrieanlagen).
- Vor Ort sind möglichst kurze Messzeiten gewünscht oder erforderlich (zum Beispiel Wasserbauwerke mit Zugangsbeschränkungen aufgrund hochfrequenten Betriebes).

## Technischer Hintergrund

### Erläuterung der Funktionsweise



- Die zu untersuchende Bauwerksoberfläche wird mit einer Kamera aus einer vorzugsweise senkrechten Aufnahmerichtung zur Oberfläche mit einem Einzelbild fotografiert. Dabei sollte der erfasste Schaden möglichst vollständig im Bild abgebildet werden und in der *Tiefenschärfe* der Kamera liegen. Die genaue innere Abbildungsgeometrie der Kamera (bspw. Objektivbrennweite und Fokuseinstellung) spielt dabei eine untergeordnete Rolle.
- Für die Erkennung von Schäden wird zunehmend auf sogenannte maschinelle Lernverfahren, vorwiegend Neuronale Netze, zurückgegriffen. Insbesondere bei Bildern werden meist falten-de Neuronale Netze (engl. Convolutional Neural Networks, kurz: CNNs) verwendet, die eigen-ständig Merkmale in den Bildern, die bspw. Zur *Klassifizierung* maßgeblich entscheidend sind, erlernen und extrahieren. Je nach Anforderung bzw. Art und Architektur des Netzwerks liefert dieses dann die Ausgabe einer Schadenstyp (bei einer Klassifizierungsaufgabe), eines umgrenzenden Rechtecks (engl. Bounding Box) (bei einer Detektionsaufgabe), einer *Bildmaske* (bei einer Segmentierungsaufgabe) oder auch Kombinationen dieser für die Schäden in den Bildern. Eine *Bildmaske* ist dabei eine Matrix, welche beispielsweise die Bereiche eines Zielbildes, die von Interesse sind, markiert. Im Falle der Schadenserkenung würde eine solche *Bildmaske* beispielsweise die Bereiche eines Schadensbildes markieren, in denen sich der Schaden befindet.
- Vor dem Produktiveinsatz eines Neuronalen Netzwerks muss das Netz jedoch zunächst mit entsprechenden Trainingsdaten konfrontiert werden, um Muster und Gesetzmäßigkeiten in diesen zu erlernen. Im Falle der Schadenserkenung umfassen die Trainingsdaten Bilder von Schäden und die entsprechenden Zielausgaben, bestehend aus bspw. den Schadenstypen, um-grenzenden Rechtecken oder auch *Bildmasken*, je nach Aufgabenstellung. In diesem Zusammenhang spricht man auch von der Trainingsphase des Netzwerks. Bei einer ausreichend hohen Anzahl an Trainingsdaten und -zyklen kann das Netzwerk die Daten schließlich ausreichend gut generalisieren, um für neue, unbekannte Daten zuverlässige Prädiktionen liefern zu können. Dies wird häufig auch als Inferenzphase des Netzwerks bezeichnet.
- Die Auswertung geschieht vollautomatisch. Typischerweise weisen die trainierten Netze je-doch eine gewisse Fehlerrate auf, so dass bei vielen Anwendungen, wie auch bei der Schadenserkenung, eine nachträgliche manuelle Begutachtung der Ergebnisse erforderlich ist.
- Bei georeferenzierten Aufnahmen bzw. bei bekannter äußerer Orientierung der Kamera ist es zudem möglich, die in den Bildaufnahmen erkannten Schäden räumlich zu verorten und auf diese Weise auch bspw. In ein bestehendes digitales Bauwerksmodell (BIM-Modell) zu überführen.

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Verfahren ist berührungslos und somit auch zerstörungsfrei
- Kurze Aufenthaltszeiten vor Ort erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit

### Zeitaufwand Inspektion



- Die Zeitersparnis ist sowohl bei den Arbeiten vor Ort als auch – beim Einsatz automatisierter Bildanalyseverfahren – bei der späteren Auswertung gegeben.
- Den größten Zeitumfang beansprucht vorab (meist) einmalig sowohl die Akquise von Trainingsdaten als auch die Konstruktion, Optimierung und das Training des Neuronalen Netzes.
- Es entsteht i.d.R. ein zusätzlicher Zeitaufwand für eine nachträgliche Begutachtung bzw. Validierung der Ergebnisse durch einen menschlichen Operateur.

### Kosten



- Erfassungssensorik (gewöhnliche (Smartphone-)Kamera): ca. 500,- EUR (Marktrecherche 2022)
- Dienstleister für die Datenerfassung und/oder die Auswertung der Daten: Kosten in Abhängigkeit von der Größe des Objektes
- Ggf. Personalkosten für nachträgliche manuelle Begutachtung der Ergebnisse

### Datenqualität



- Die Aufnahmen dokumentieren neben den geometrischen gleichzeitig auch die bildlich-*semantischen* Objekteigenschaften.
- Insbesondere die maschinelle Bildanalyse zur automatisierten Schadenserkenkung ist noch eine vergleichsweise junge Methode, die sich noch in der Entwicklung befindet, so dass die Qualität der Detektion und *Klassifizierung* heute noch deutlich variieren kann. Erfahrungen mit selbst trainierten Neuronalen Netzwerken haben bei Betonoberflächen

in Parkbauten (vgl. Forschungsprojekt „DigiPark“) vielversprechende Ergebnisse geliefert. Der Algorithmus eines Dienstleisters zur bildbasierten Schadensdetektion in einer Schleuse zeigte dagegen unbefriedigende und für die Praxis unbrauchbare Ergebnisse.

## Voraussetzungen

### Hardware



- Gewöhnliche (Smartphone-)Kamera (mit  $\geq 5$  Megapixel)
- Computer mit mittlerer Leistung (z.B. i5-Prozessor, 16 Gigabyte Arbeitsspeicher)

### Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Zu vermessenden Oberfläche sollte unverdeckt sein.
- Oberfläche sollte gereinigt sein, damit der Schaden im Bild sichtbar ist und sich deutlich von der Umgebung abhebt.
- Eine diffuse, gleichmäßige Ausleuchtung der zu vermessenden Oberfläche ist erforderlich

### Vorbereitung Datenerhebung



- Auswahl der Sensorauflösung (Pixelanzahl) und des Aufnahmeabstands im Hinblick auf die notwendige Detailerkennbarkeit.
- Definition des angestrebten Zieles: *Klassifizierung*, *Detektion* oder *Segmentierung* der Schäden.
- Das Modell des maschinellen Netzwerks muss auf zum Objekt vergleichbaren Daten (z.B. Risse/Schäden auf Betonoberflächen) trainiert worden sein

### Umweltbedingungen



- Normales Tageslicht stellt gewöhnlich ausreichende Lichtverhältnisse sicher; ggf. muss künstliche Beleuchtung vorgehalten werden.
- Schattenwürfe auf die zu vermessende Oberfläche sind möglichst zu vermeiden.

- Trockene Witterung nicht zwingend erforderlich...
- Oberflächen sollte eine homogene Textur aufweisen (z.B. Vermeidung von sowohl nassen als auch trockenen Oberflächen)

### Erforderliche Genehmigungen



- Genehmigungen sind ggf. für die Zugänglichkeit oder Befliegung des Objektes zur Bildaufnahme erforderlich

### Umsetzung

#### Datenerhebung



- Erstellung der Aufnahmen gemäß den Vorüberlegungen zur Datenerhebung

#### Datenprozessierung



- Neuronales Netz erhält als Eingabe Bildaufnahmen, für welche Prädiktionen vorgenommen werden.
- Ggf. zusätzliche (Vor-)Prozessierung für das Training des Netzwerks erforderlich.

#### Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Das Verfahren kann mit allen photogrammetrischen Verfahren (UAV, terrestrisch) und grundsätzlich auch in Ergänzung zu komplementären Verfahren wie Laserscanning eingesetzt werden.
- Verschiedene Neuronale Netze können kombiniert bzw. komplementär eingesetzt werden, um für unterschiedliche Anwendungsfälle bzw. Anforderungen die Vorteile dieser Netze zu vereinen oder auch um robustere Prädiktionen zu gewährleisten.

## Output

### Informationen



- Schadenstyp
- Koordinaten von umgrenzenden Rechtecken
- *Bildmaske*
  - *Bildlich-semantische* Helligkeits- und Farbinformationen

### Dateiformate



- Aufnahmen in Standard-Rasterdatenformaten (i.d.R. JPG)
- Klassenangaben: ASCII
- Koordinaten der umgrenzenden Rechtecke: ASCII
- *Bildmasken* in Standard-Rasterdatenformaten (i.d.R. JPG)
- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

## Referenzen

### Beispielanbieter



- Geodätisches Institut der RWTH Aachen (gia, <http://www.gia.rwth-aachen.de>)
- PALFINGER Structural Inspection GmbH (STRUCINSPECT, <https://strucinspect.com>)
- <https://www.infralytica.com>
- <http://swissinspect.io>

### Beispielanwendungen



- Erkennung von Rissen auf Betonoberflächen durch statistische Analyse von Bildhistogrammen (Jutz und Özcan 2022)
- Forschungsprojekt „DigiPark“: Entwicklung eines mobilen Systems zur georeferenzierten Erfassung und Dokumentation von Bauwerksschäden – Pilotprojekt an Parkhäusern (Geodätisches Institut RWTH Aachen)
- Automatisierte Erkennung von Schäden Brückenbauwerken aus Drohnenbilddaufnahmen (Fa. STRUCINSPECT)

## Virtuelle Realität (engl. Virtual Reality, VR)

### Definition



Als Virtuelle Realität (engl. Virtual Reality, VR) wird eine in Echtzeit computergenerierte, interaktive virtuelle Umgebung zur Darstellung und gleichzeitigen Wahrnehmung einer künstlichen Wirklichkeit und ihrer Eigenschaften bezeichnet.

(Jerald 2016)

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich



- Immersive ortsunabhängige interaktive Visualisierung von Objekten und Umgebungen
- Intuitive visuelle ortsunabhängige 3D-Inspektion von Objekten und Umgebungen
- Virtuelle Durchführung kostspieliger oder gefährlicher Inspektionsszenarien zu Übung- oder Ausbildungszwecken
- Virtuelle Besprechungen am digitalen Objekt

### Rahmenbedingungen



- Hardware: Spezialisierte VR-Hardware wie VR-Brille (engl. Head-Mounted Display (HMD)) oder eine Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) ist notwendig
- VR-Brille: Es werden VR-Komponenten wie eine VR-Brille und VR-Controller und ggf. ein Personal Computer (PC) benötigt, abhängig von der Art der VR-Brille. Autarke VR-Brillen können ohne PC betrieben werden und beinhalten neben der Optik bereits Recheneinheiten, Datenspeicher und andere essenzielle Hardware oder stellen nur die Optik zur Verfügung und erfordern ein eingesetztes Smartphone. Autarke Systeme sind bezüglich des Anwendungsortes flexibel, jedoch weniger performant als rechnergebundene VR-Brillen. Mit leistungsfähiger PC-Hardware ermöglichen PC-gebundene VR-Brillen häufig höher aufgelöster und flüssigere Visualisierungen der virtuellen Umgebung und steigern so die Erkennbarkeit von Details und die Immersion.
- VR-CAVE: Es wird ein dedizierter Raum mit rundum angeordneten speziell beschichteten Leinwänden, mehreren hochauflösenden Projektoren und einem leistungsfähigen Sound- sowie Trackingsystem benötigt. Die Anzahl der Komponenten

skaliert mit der Größe des Raumes. Zum Betrieb des Systems sind spezialisierte Software und leistungsstarke Rechencluster eine Voraussetzung.

- Daten: Für die virtuelle Visualisierung und Inspektion realer Objekte oder Szenen müssen diese zuvor erfasst, ggf. dreidimensional modelliert und dem VR-System zur Verfügung gestellt werden. Die Detailierung der VR-Umgebung hängt maßgeblich von der Qualität der erfassten Daten ab.
- Bewegungsraum: Für Fortbewegungen und Interaktionen in der VR-Umgebung sind entsprechende freie Bewegungsräume /-flächen in der Realität notwendig (Sherman 2019; LaValle 2020; Cruz-Neira et al. 1992)

## Technischer Hintergrund

### Erläuterung der Funktionsweise



Ein Ziel von VR ist einen hohen Grad an Immersion zu erzeugen, d.h. Nutzer/innen möglichst gut in die virtuelle Umgebung einzubetten, so dass die künstliche Wirklichkeit als real empfunden wird. Einige Anforderungen dazu sind zum Beispiel, dass die virtuelle Welt plausibel erscheint und interaktiv ist, d.h. dass Aktionen Einfluss auf die Welt haben. Für eine hohe Immersion werden in der Regel VR-Brillen oder eine VR-CAVE eingesetzt.

- VR-Brille: Üblicherweise wird mit zwei hochauflösenden Bildschirmen (Stereo) eine 3D-Wahrnehmung geschaffen, indem die Bildschirme in bestimmten Abständen vor den Augen und zueinander platziert sind. Auf den Bildschirmen werden in Echtzeit und in Abhängigkeit von der Translation und Rotation (*Pose*) der VR-Brille Bilder der virtuellen Welt ausgegeben. Die *Pose* wird mit Hilfe von *Pose*-Trackingsystemen, die beispielsweise in der realen Umgebung installiert werden oder in der VR-Brille integriert sind, bestimmt. Interaktionen mit der virtuellen Welt werden durch Eingabegeräte in der physischen Realität - oft handgetragene Controller - umgesetzt. Mit den Controllern können abhängig von den implementierten Funktionalitäten Objekte bewegt, Teleportationen durchgeführt oder virtuelle Werkzeuge, wie Messwerkzeuge, bedient werden.
- VR-CAVE: Eine Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) ist ein dedizierter mit rundum angeordneten speziell beschichteten Leinwänden, mehreren hochauflösenden Projektoren und einem leistungsfähigen Sound- sowie Trackingsystem ausgestatteter Raum. Die Projektoren visualisieren abhängig von Interaktionen die virtuelle Umgebung auf den Flächen des Raumes. Bewegungen werden von einem im Raum installierten *Pose*-Trackingsystem erfasst. Das Akustiksystem ergänzt das Visuelle durch Musik, Klänge und Töne. Interaktionen mit der virtuellen Welt werden durch Eingabegeräte in der physischen Realität - oft handgetragene Controller - umgesetzt

- VR-Brille/VR-CAVE: Beide VR-Systeme können als immersiv angesehen werden. Die Wahl des Systems ist abhängig vom Anwendungsfall. Während VR-Brillen vergleichsweise kostengünstig und zugänglich sind, benötigt das CAVE-System spezialisierte Hardware und ist daher kostspielig. Vorteilhaft bei der VR-CAVE sind die Kollaborationsmöglichkeiten mit anderen Nutzern/innen. Je nach Aufbau der Systeme ist der Raumbedarf in etwa ausgeglichen.  
(Slater 2009; Sherman 2019; LaValle 2020; Cruz-Neira et al. 1992)

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Immersive interaktive Visualisierung und Inspektionen der realen Gegebenheiten, ohne physische Präsenz, erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit
- Virtuelle Durchführung kostspieliger oder gefährlicher Inspektionsszenarien zu Übung- oder Ausbildungszwecken

### Zeitaufwand Inspektion



- Die Zeitersparnis liegt vor allem in der ortsunabhängigen digitalen Arbeitsweise. Nach der initialen Erfassung der realen Objekte oder Umgebung, können Inspektionen virtuell in beliebiger Anzahl und Dauer, unabhängig von der physischen Realität, durchgeführt werden.
- Der zeitliche Aufwand für An- und Abfahrtswege entfällt
- Effiziente Fortbewegungsmethoden wie Teleportation verkürzen die Begehungszeit am Objekt
- (Semi-)Automatische Methoden zur Unterstützung der Inspektion und digitale Dokumentation verkürzen die Inspektions- und Nachbearbeitungszeit

## Kosten



- Die Kostenersparnis liegt vor allem in der ortsunabhängigen digitalen Arbeitsweise. Nach der Erfassung der realen Objekte oder Umgebung, können Inspektionen virtuell in beliebiger Anzahl und Dauer unabhängig von der Realität durchgeführt werden. Beispielsweise entfallen die Kosten für An- und Abfahrtswege
- Durch effiziente Fortbewegungsmethoden wie Teleportation und (semi-)automatische Methoden zur Unterstützung der Inspektion und digitale Dokumentation, können Inspektionen effizienter durchgeführt und Personalkosten gespart werden
- VR-Hardware
  - VR-Brille:
    - Autarke Smartphone-basierte VR-Brille: ca. 50 - 100,- EUR + Smartphone ca. 500 – 1500,-EUR (Marktrecherche 2022)
    - Autarke VR-Brille inklusive VR-Controller: ca. 500,-EUR (Marktrecherche 2022)
    - PC-gebundene VR-Brille inklusive VR-Controller und Trackingsystem: ca. 1300,-EUR + PC ca. 3.000 – 10.000,-EUR (Marktrecherche 2022)
  - VR-CAVE: ab ca. 80.000€ (Marktrecherche 2022)
  - VR-Software: ca. 2.000,- bis 20.000,- EUR (abhängig vom Leistungsumfang, Marktrecherche 2022)
  - Personalkosten für die initiale Erfassung und ggf. Modellierung der realen Objekte
  - Personalkosten für virtuelle Auswertungen

## Datenqualität



- Eine hohe Qualität der Daten ist die Basis für eine hochwertige VR-Umgebung. Der Geometrie- und Farb- bzw. Texturdetailgrad definiert die visuelle Darstellung von Objekten in VR und beeinflusst die Erkennbarkeit von Details sowie den Immersionsgrad.

## Voraussetzungen

### Hardware



- Mit der Leistungsfähigkeit der Hardware steigt auch der Granularität und die Performanz der Visualisierung. Beispielsweise können 3D-Modelle mit mehr Details gerendert und Bewegungen oder Animationen flüssiger dargestellt werden. Einflussreiche Aspekte sind die Bildauflösung und *Bildrate*.

- Spezialisierte VR-Hardware, wie VR-Brille inklusive VR-Controller und ggf. externem VR-Trackingsystem oder VR-Raum, wie eine VR-CAVE
- Ggf. Smartphone oder leistungsstarker PC (z.B. i7-Prozessor, NVIDIA GeForce RTX 3080 TI, 32 Gigabyte Arbeitsspeicher, 1.000 Gigabyte Datenspeicherplatz (Solid-State-Drive, SSD) für VR-Brille oder ein professionelles Visualisierungscluster (z.B. 24 gekoppelte leistungsstarke Rechner mit insgesamt 48 CPU, 48 GPU und ca. 4.600 Gigabyte Arbeitsspeicher (siehe z.B. aixCAVE, <https://www.itc.rwth-aachen.de/cms/IT-Center/Forschung-Projekte/Virtuelle-Realitaet/Infrastruktur/~fgqa/aixCAVE>))

### Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Zur Darstellung und Inspektion in VR müssen visuelle Daten des realen Objekts digital vorliegen, zum Beispiel als *Punktwolke* oder 3D-Modell (Building Information Modeling (BIM)-Modell). Für die initiale Erfassung des realen Objektes ist die Präparierung ggf. mit (kodierten) *Zielzeichen* Bestandteil der Arbeiten vor Ort

### Vorbereitung Datenerhebung



- Erfassung des realen Objektes vor Ort, beispielsweise mit massenpunktbasierten Verfahren (z.B. *Laserscanning*) als 3D-*Punktwolke* (siehe Blankenbach et al. (2021) und Witte et al. (2020)) und ggf. Modellierung als 3D-Modell (BIM-Modell)
- Import der Daten in die VR-Umgebung

### Umweltbedingungen



- Für die initiale Erfassung des Objektes ist normales Tageslicht ausreichend; ggf. muss künstliche Beleuchtung vorgehalten werden. Trockene Witterung nicht zwingend erforderlich
- Inspektionen in VR sind unabhängig von Wetter und Tageszeiten. Für Bewegungen und Interaktionen in der virtuellen Welt sind Bewegungsräume in der physischen Realität notwendig.
- Die VR-Trackingsysteme werden beispielsweise durch Reflektionen und Sonnenlicht beeinflusst, daher sollten Räume ohne reflektierende Flächen (z.B. Glas) und größeren Fenstern vermieden werden

## Erforderliche Genehmigungen



- Genehmigungen sind nicht erforderlich

## Umsetzung

### Datenerhebung



- VR-Applikation starten und VR-Brille, VR-Controller und ggf. weitere Hardware anziehen
- Navigation durch die virtuelle Umgebung zu Inspektionsstellen
- Virtuelle Inspektion des Objekts
- Visuelle Überprüfung
- Einsatz von digitalen Werkzeugen, beispielsweise Messwerkzeug, um Ausmaß der Verformungen, Schäden, etc. zu erfassen oder digitale Fotos zu machen
- Ggf. digitale Dokumentation

### Datenprozessierung



- Die erfassten Daten liegen nach der Inspektion in der VR-Umgebung bereits digital vor. Objekte werden üblicherweise in einem 1:1-Verhältnis zur Realität dargestellt. Maße können daher intuitiv beispielsweise im Metrischen Einheitssystem aufgenommen und problemlos in reale Dokumente übertragen werden

### Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- VR ist erfolgversprechend mit der erweiterten Realität (engl. Augmented Reality, AR) kombinierbar, um beispielsweise die Vorteile ortsunabhängiger virtueller Inspektionen und physischer Vor-Ort-Inspektionen zu vereinen. Während beispielsweise in VR-Umgebungen höher gelegene Objekte mit Hilfe von Teleportation oder einem „Flug-Modus“ erreicht oder Wände problemlos passiert werden können, erlauben AR-Umgebungen ergänzende Daten vor dem Hintergrund der Realität zu betrachten und so in VR verdeckte Details zu erfassen.

## Output

### Informationen



- In VR erfasste Inspektionsdaten, wie
  - Maße
  - Fotos
  - Notizen

### Dateiformate



- Maße, Notizen, etc.: Textformat (ASCII)
- Fotos in Standard-Rasterdatenformaten (i.d.R. JPG)
- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

## Referenzen

### Beispielanbieter



- Geodätisches Institut der RWTH Aachen (gia, <http://www.gia.rwth-aachen.de>)
- TEMA Technologie Marketing (<https://www.tema.de>)
- Kompetenzzentrum Saarbrücken (<https://kompetenzzentrum-saarbruecken.digital/technologieradar-vrmi>)
- VR-Dynamix (<https://vr-dynamix.com>)

### Beispielanwendungen



- VR-Umgebung Neue Schleuse Trier (Geodätisches Institut RWTH Aachen)
- BMWK-gefördertes Forschungsprojekt energyTWIN (Geodätisches Institut RWTH Aachen)
- BMWK-gefördertes ZIM-Forschungsprojekt Bauwerksinspektor XR (Geodätisches Institut RWTH Aachen)

### Anlage 3

## Schadenskatalog und die Eignung verschiedener innovativen Inspektionsmethoden für Bauwerke aus Beton, Stahlbeton und Mauerwerk

Schaden	Feuchtigkeits-/Wasserschaden [Ja/Nein]	Planare Vermessung [mm]	Farbänderung [Ja/Nein]	Tiefenvermessung [mm]	RGB-Photographie	RGB-Photogrammetrie	Laserscanner	Photographie	Laserscanner	Echolot
Abwitterung der Oberfläche (Feinkorn freiliegend)	Nein	1	Ja	0,2	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-F	J-G-T	N-G
Abwitterung der Oberfläche (Grobkorn freiliegend)	Nein	1	Ja	2	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-F	J-G-T	N-G
Oberfläche geschädigt (oberflächennah)	Nein	10	Nein	10	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Oberfläche geschädigt (tiefergehend)	Nein	10	Nein	20	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Abplatzung über korrodierter Bewehrung	Nein	10	Ja	5	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-F	J-G-T	J-G-T
Schalenablösung (Ablösung infolge oberflächenparalleler Risse)	Nein	0,2	Nein	0,2	N-G	N-G	N-G	N-G	J-G-T	N-G
Schalenablösung (Ablösung der Vorsatzschale vom Untergrund)	Nein	15	Nein	15	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Oberfläche offenporig	Nein	15	Nein	15	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Oberfläche haufwerksporig	Nein	1	Nein	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Kiesnest	Nein	5	Nein	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Punktuelle Wasseraustritt	Ja	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	N-W	N-W	N-W
Netzrisse durch Treibreaktion (unterschiedliche Rissbreiten)	Nein	0,2	Nein	0,2	N-G	N-G	N-G	N-G	J-G-T	N-G
	Nein	0,5	Nein	0,5	J-G-T	J-G-T	N-G	J-G-T	J-G-T	N-G
	Nein	1	Nein	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Netzrisse durch Schwinden, Frost- (Tausalz-) Angriff (unterschiedliche Rissbreiten)	Nein	0,2	Nein	0,2	N-G	N-G	N-G	N-G	J-G-T	N-G
	Nein	0,5	Nein	0,5	J-G-T	J-G-T	N-G	J-G-T	J-G-T	N-G
	Nein	1	Nein	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Ausblühung	Nein	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-F-T
Aussinterung	Nein	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-F-T
	Nein	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-F-T
Rostfahne	Nein	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-F-T
	Nein	5	Nein	5	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G

Schäden an Mörtelfugen (unterschiedlicher Tiefe)	Nein	5	Nein	10	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
	Nein	10	Nein	40	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Mörtelfuge mit Aussinterung	Nein	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-F-T
Mörtelfuge mit Ausblühungen	Nein	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-F-T
Steine schadhaf (unterschiedlichen Ausmaßes)	Nein	10	Nein	10	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Steine mit Ausblüfung	Nein	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-F-T
Schäden am Gesamtmauerwerk (unterschiedlicher Tiefe)	Nein	10	Nein	5	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
	Nein	10	Nein	10	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Ablösen der Verblendschale	Nein	10	Nein	0,2	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-F-T
	Nein	10	Nein	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
	Nein	15	Nein	15	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T
Oberfläche mit Feuchtigkeitsaustritt	Ja	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	N-W	N-W	N-W
punktuellem Wasseraustritt	Ja	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	N-W	N-W	N-W
Druckwasseraustritt aus Fugen	Ja	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	N-W	N-W	N-W
Einzelrisse im Stahlbeton (unterschiedlicher Breite)	Nein	0,4	Nein	0,4	J-G-T	N-G	N-G	N-G	J-G-T	N-G
	Nein	0,7	Nein	0,7	J-G-T	J-G-T	N-G	J-G-T	J-G-T	N-G
	Nein	1	Nein	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Einzelrisse im unbewehrten Beton (unterschiedlicher Breite)	Nein	1	Nein	1	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
	Nein	2	Nein	2	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
	Nein	3	Nein	3	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Bewehrungsschäden Gruppe 1	Nein	1	Nein	10	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Bewehrungsschäden Gruppe 2 (unterschiedlicher Tiefe)	Nein	2	Nein	0	N-F-T	N-F-T	N-F-T	N-F-T	N-F-T	N-G
	Nein	3	Nein	0	N-F-T	N-F-T	N-F-T	N-F-T	N-F-T	N-G
	Nein	0,2	Nein	0	N-G	N-G	N-G	N-G	N-F-T	N-G
Bewehrungsschäden Gruppe 3	Nein	0,2	Nein	0	N-G	N-G	N-G	N-G	N-F-T	N-G
Bewehrung gerissen	Nein	0,2	Nein	0,1	N-G	N-G	N-G	N-G	N-F-T	N-G
Mulden- /Narbenkorrosion	Nein	1	Ja	0,1	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-F	N-F-T	N-G
Flächige Korrosion	Nein	1	Ja	0,1	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-F	N-F-T	N-G
Spaltkorrosion	Nein	5	Ja	1	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-F	J-G-T	N-G
Kontaktkorrosion	Nein	5	Ja	1	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-F	J-G-T	N-G
Kantenabrostung an Biegeträger	Nein	10	Ja	1	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-F	J-G-T	J-G-T
Kantenabrostung an Druckstäben	Nein	10	Ja	1	J-G-F	J-G-F	J-G-T	J-G-F	J-G-T	J-G-T
Risse	Nein	0,1	Nein	0,1	N-G	N-G	N-G	N-G	N-F-T	N-G
Schäden an Schrauben und Nieten	Nein	5	Nein	nicht relevant	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Schäden an Schweißnähten	Nein	5	Nein	nicht relevant	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Unter- oder angerostet	Nein	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-F-T
Kante nicht umschweißt	Nein	5	Nein	nicht relevant	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	J-G-T	N-G
Risse	Nein	0,1	Nein	0,1	N-G	N-G	N-G	N-G	N-F-T	N-G
Risse in der Beschichtung	Nein	0,1	Ja	0,1	N-G	N-G	N-G	N-G	N-F-T	N-G

Blasen in der Beschichtung	Nein	0,5	Ja	1	J-G-F	J-G-F	N-G	J-G-F	J-G-T	N-G
Abblätterung der Beschichtung	Nein	10	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-F-T
Rostgrad der Beschichtung	Nein	1	Ja	0	J-G-F	J-G-F	N-F-T	J-G-F	N-F-T	N-G
Kathodischer Korrosionsschutz	Nein	0	Ja	0	N-G	N-G	N-G	N-G	N-G	N-G



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe  
Tel. +49 (0) 721 9726-0 · Fax +49 (0) 721 9726-4540

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg  
Tel. +49 (0) 40 81908-0 · Fax +49 (0) 40 81908-373

[www.baw.de](http://www.baw.de)