

Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 139

The logo for 'bast' is written in a bold, lowercase, green sans-serif font with a white outline. It is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs down the right side of the cover.

Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

von

Martin Sperber
Rainer Gößmann
Corinna Reget
Jörg Müller
Jürgen Nolden
Ralf Köhler

TÜV Rheinland,
Köln

Lukas Kremkau
Spectair,
Meerbusch

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 139

bast

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

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

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

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

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

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.0602/2014/LRB:
Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Fachbetreuung:
Ralph Holst

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-339-8

Bergisch Gladbach, November 2017

Kurzfassung – Abstract

Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die handnahe Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 durch innovative, bildgebende Verfahren zu ergänzen und zu optimieren.

Unbemannte Fluggeräte bzw. UAS (Unmanned Aerial System) bieten vielfältige Möglichkeiten zur Bilderfassung und können als unterstützendes, technisches Hilfsmittel in der Brückenprüfung zum Einsatz kommen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden drei Brücken mithilfe von UAS befliegen. Es handelte sich dabei um die folgenden Bauwerke: das Schildescher Viadukt in Bielefeld, die Talbrücke Nuttlar sowie die Europabrücke in Koblenz. Diese drei Brücken weisen unterschiedliche Charakteristika bezüglich Bauart, Oberfläche und Baujahr auf.

Durch den Einsatz von UAS konnten Schäden an den genannten Brücken identifiziert werden. In diesem Zusammenhang konnten die von einem Brückenprüfer zuvor getroffene Vorabeschätzungen bezüglich der zu identifizierenden Schäden bestätigt bzw. übertroffen werden.

Insbesondere die Möglichkeit zur Befliegung schwer zugänglicher Stellen durch den Einsatz von UAS sowie Zeitersparnis während einer Prüfung, macht diese Technologie für die Brückenprüfung interessant. Durch die gezielte Anwendung der UAS-Technologie wird eine Reduzierung der Nutzungseinschränkung des Bauwerks verbunden mit einer Qualitätssteigerung der Ergebnisse erreicht. Dies gilt nicht nur für die klassische Brückenprüfung gemäß DIN 1076 sondern auch für Sonderprüfungen aufgrund von außergewöhnlichen Ereignissen wie z. B. Hochwasser oder Unfall.

Support for bridge inspections from innovative digital image evaluation – A pilot study

This research project aims to amend and optimize proximity inspections of structures in accordance with standard DIN 1076 by innovative imaging methods.

Unmanned Aerial Systems (UAS) provide a range of possibilities of photo recording and may thus be used as an auxiliary in bridge inspections.

As part of this research project, flights were operated to three bridges. These were the Schildescher Viadukt in Bielefeld, the Talbrücke Nuttlar and the Europabrücke in Koblenz. These three bridges are characterized by differences in design, surface and year of construction.

The use of UAS allowed identifying damage to the bridges in question. The preliminary estimate made by a bridge inspector regarding damage to be identified was thus confirmed or even exceeded.

Given the possibility to operate flights to areas which are not easily accessible as well as time savings during testing offered by the use of UAS, this technology seems attractive for inspections of bridges. The targeted use of UAS will result in reduced service failures and an increase in the quality of results. This does not only apply to traditional bridge inspections in terms of DIN 1076 but also to extraordinary inspection following exceptional events such as floods or accidents.

Summary

Support for bridge inspections from innovative digital image evaluation – A pilot study

1 Introduction and base line

Ensuring the availability of the road infrastructure will present a considerable challenge in the years to come. In this context, measures to conserve bridges will be necessary for ensuring a functioning road infrastructure. Such measures should be performed efficiently. Ideally, roadblocks caused by these measures should be kept to a minimum.

For the purpose of optimizing the inspection of civil engineering works, innovative imaging methods are to be added to proximity inspections. Photo recording and exploration will serve to distinguish between areas which require comprehensive and less comprehensive testing. Unmanned Aerial Systems (UAS) provide a range of possibilities of photo recording and are thus to be used as an auxiliary in bridge inspections. In the past few years, in particular, new developments led to wide-ranging applications of multicopters.

This research aims to demonstrate the possibilities of identifying and assessing bridge damage with the help of unmanned aerial systems in the context of a feasibility study and to present market availability of such technical aids. At the least, the results will have to meet the requirements defined in standard DIN 1076 and of guideline RI-EBW-PRÜF.

2 Typical damage, deficiencies and design failure points

As a first step, we identified typical damage, deficiencies and design failure points, which are suitable for digital photo/data exploration. To this effect, we summarised, among others, our experience from bridge inspections in all of Germany as well as examples for damage provided in RI-EBW-PRÜF 2013 and collected them in a table.

3 Concept for identifying, assessing and presenting damage

3.1 Introduction

The basic concept illustrates the procedures and steps to prepare and perform UAS flights to bridges as well as the assessment of the respective data and information collected.

In essence, the approach follows the three following stages.

3.2 Collection

At the stage of collection, all relevant information is gathered to form the basis for the UAS flight. Moreover, the UAS flight is performed on site during this stage and the data undergo a first quality assurance step. The inspector and the pilot cooperate to ensure the expert collection of the data from the structure. Where necessary, they may be supported by an operator responsible for image tracking and camera shutter release. The flight presupposes excellent planning and timely consideration of all stakeholders involved.

3.3 Analysis/Evaluation

During the stage of evaluation, all data collected from the UAS flight are read and, where necessary, post-processed to improve quality. Based on synchronized data regarding the location and component allocation, the expert appraises the components and classifications of potential damage. The pilot and the operator or assessor (where applicable) accompany and support this activity.

3.4 Processing/Presentation

At the stage of processing/presentation, the data of the UAS bridge inspection are summarized and documented consistently and systematically. Data

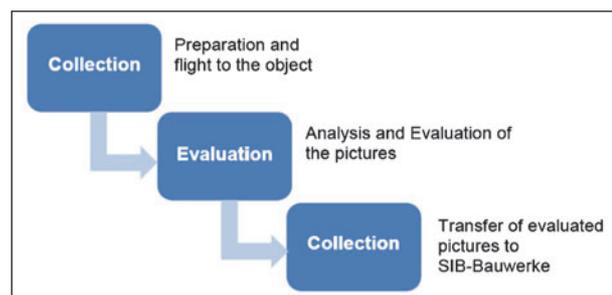


Fig. 1: Overview of stages, Quelle: TÜV Rheinland

are taken from the evaluation stage and presented consistently with the respective requirements and formats. We are contemplating not only conventional reporting formats but also the use of geographic information systems and other expert information systems (SIB-Bauwerke). The nature of processing will depend on the technical parameters of the components used as well as their interaction and output.

4 Non-destructive airborne inspection methods

4.1 Technical conditions

Carrier systems

UAS are already being used as carrier systems for manual and semi-automated (via waypoint navigation) inspection and testing procedures. Tried-and-tested carrier systems include multicopter systems in particular which, given their system design, can be navigated with a high degree of precision and target a defect within a couple of metres safety distance. Such systems usually have 4, 6 or 8 direct-driven engines fed via a battery.

These systems are typically designed for a total weight of 5kg and thus for a payload of 600 to 1200 grams.

Visual methods

After the initial use of mirror-reflex cameras with interchangeable lenses, system cameras with a similar performance, which are however much lighter, have been established for visual inspections. These systems operate according to the same system as mirror-reflex cameras. However, the image is captured directly to the sensor without a hinged mirror mechanism. This will in turn reduce the weight of the system. The reduced weight notably results in longer flight times. The latter ranges from 15 to 20 minutes for professional systems are currently available.

Infra-red systems

In addition to the visual inspection, which are at the heart of many well-established applications, applications based on thermal images from passive infra-red systems have been established. Given the critical weight ranges applicable to IR cameras in

UAS operation, only passive systems are used given the current state of the art.

Other sensor technologies

Besides RGB and IR systems there are other sensor technology systems, which can be used with UAS. These include line scan cameras, RADAR or LIDAR systems as well as multi- and hyperspectral systems. Those provide additional possibilities for the purpose of inspection, too. Since systems of that kind are rarely used and if so, usually as part of experimental or pilot projects, they are not considered mass technologies. Consequently, they are not used for practical application in this project.

4.2 UAS selection for bridge inspections

Essential prerequisites for the suitability of a UAS for bridge inspections include redundancy, agility, a compact design, options for the flexible use of sensors, a camera mount which can be swivelled 180° as well as collision protection. Against the backdrop of the characteristics listed above, we selected the HT-8 C180 manufactured by Height Tech for the flights.

4.3 Overview of the sensor technology used

Photographs (visible light, RGB camera):

Sony Alpha 7R

Sensor: CMOS 36 x 24 mm (full frame/35 mm format), 7,360 x 4,912 pixels (36 MP)

This camera is a frequently used production model, which combines light weight with excellent picture quality.

Sony Alpha 7R II

Sensor: CMOS 36 x 24 mm (full frame/35 mm format), 7,952 x 5,304 pixels (42.4 MP)

This camera is the successor of the Alpha 7R described above. It offers a higher resolution and a sensor stabilization but it also has an additional weight of 150 grams.

GoPro HERO 4

Sensor: 5.75 x 4.28 mm, 3,840 x 2,160 pixels (4K) for video recording

This system is used in combination with the Optris PI 400/450 in order to collect not only thermographic data but also live image data. These facilitate referencing and evaluation.

Infrared/thermal camera

Optris PI 400/450 lightweight

The camera records thermographic data as a radiometric video in the ravi-format. Temperature ranges and the graphic representation can be parameterized. The high image frequency allows for stable and precise pictures.

5 Realisation

5.1 Introduction

As part of this R&D project, aerial vehicles, sensors and the options for image evaluation are tested in practice.

To this effect, three different bridges were inspected by way of example following the procedures of standard DIN 1076:

Schildescher Viadukt Bielefeld

- Test of
 - Procedures
 - Sensors and flight properties
 - Evaluation method (pilot)
 - Thermographics
- Identification of damage

Talbrücke Nuttlar

- Accessibility
- Flight related aspects
- Evaluation method

Europabrücke Koblenz

- Accessibility/identification of damage
- Test in an urban area (approval situation)
- Workflow/evaluation method
- Hollow-box girder

For this purpose, the rough concept (cf. chapter 3) was further developed in light of the specific parameters and adapted accordingly. The main elements include the approval situation, testability and technical performance of the UAS.

During the realisation, the following workflow proved useful in practice:

Test programme

In addition to organisational issues, the test programme identifies components and areas of the structure to consider, details regarding data collection as well as the focus and objectives of data acquisition.

Flight path

The flight path incorporates information given in the test programme and translates them into the perspective of the pilot and the use of the aerial vehicle for the object.

Flight

Within the framework of the R&D project, each on-site flight was preceded by a meeting to provide everyone involved with information on the structure, the components to be tested and the environment of the structure. In addition to these aspects, the meeting also served to discuss safety related questions as well as specific measures for securing traffic and hazard control in order to identify and prevent dangers at an early stage.

There are always several flight phases. The following steps are performed before and after each flight phase:

- Follow-up check of the data
- Have all components been captured in the correct order/perspective, resolution and stereoscopic coverage?
- Estimate of the weather/wind conditions at the structure
- Detailed image/image for photogrammetric plots with suitable coverage

Data processing

Transfer of images/data

Images and data collected by the sensor are transferred in this step and undergo a semi-automated validation/preliminary test.

Overall, optimization and developing were able to significantly improve the visibility of details for images which were taken under average conditions. After completing model calculations and final corrections the model is ready for being exported into an editable format.

An image optimization is recommended in order to obtain optimum results in the area of 3D-modelling and damage evaluation.

5.2 Results

Based on our observations made with the tested structures regarding the identifiability of damage the following conclusions are drawn: It is reasonable and promising to include UAS-assisted bridge inspections in the scope of the RI-EBW-PRÜF as an additional possibility for automated or visual inspection methods.

The use of UAS represents an expedient supplement for many tasks related to bridge inspections. An official standard for/compliant test procedure with the aid of UAS will further foster an innovative development of vehicles and sensors.

6 Perspective

As an outcome of the implementation of the results obtained during this research project as well as the application of the UAS service market within the field of responsibility covered by the Federal Highway Research Agency a further need for research emerges:

In order to guarantee legal certainty, reproducibility, reliability of the results and the integration of the results into the documentation a guideline is planned on UAS-assisted bridge inspections.

Furthermore the rapidly evolving sensor technology for bridge inspections, which is currently available on the market, should be illustrated by way of giving an outlook. This may particularly include distance transducers in connections with the improving flight performance of UAS.

A follow-up project should focus on a study of current trends as well as the adaptation of specific software taking into account requirements for testing. Furthermore, the development of 3D-laser scanning compared to photogrammetrics for creating 3D-models during bridge inspections should be analysed in terms of suitability for the digital surveying of structures with the help of UAS. Another objective includes editing a practical manual for digital photography.

The UAS market is a rather recent one, which is rapidly evolving. From the point of view of the legal

environment, it is possible that amended requirements made by the regulatory authorities change market conditions at any time. Against the backdrop of stricter regulations for drones demanded by the EU and the resulting national activities pursued by the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, Germany will face serious changes regarding the use of UAS in 2016. This will also entail changes with regard to the use of UAS in bridge inspections. It therefore seems reasonable to align a market analysis UAV (unmanned aerial vehicle) and sensor technology with the needs of bridge inspections and adapt it to a changing legal framework. Furthermore, risk analysts should prepare a description of conceivable worst case scenarios for test services offered for bridges/structures using UAS.

As we have illustrated here, the use of UAS presents a number of advantages. Follow-up studies should therefore examine similar test scenarios for the maintenance and operation of structures and test them in practice. This concerns slope protection, noise protection walls, buttress walls and gabion walls.

7 Summary

Given the possibility to operate flights to areas which are not easily accessible as well as time savings during testing offered by the use of UAS, this technology seems attractive for inspections of bridges and other structures mentioned earlier

Inhalt

1	Einleitung	11	6.3.3	UAV-interne Sensoriken	25
2	Typische Schäden	11	6.4	Eingesetzte Software	25
2.1	Bauwerksprüfung und Prüfumfang	11	6.5	Zu beachtende Besonderheiten	25
2.2	Einteilung in Bauwerke und Bauteilgruppen	12	7	Ausgewählte Testbauwerke	27
2.3	Typische Schäden unterteilt nach Bauwerken und Bauteilgruppen	12	7.1	Brückenbauarten	27
3	Grobkonzept UAS-Bauwerksinspektion	14	7.2	Schildescher Viadukt	28
3.1	Einführung	14	7.3	Talbrücke Nuttlar	29
3.2	Erfassung	14	7.4	Europabrücke Koblenz	29
3.3	Analyse/Bewertung	16	8	Umsetzung	30
3.4	Aufbereitung/Darstellung	16	8.1	Einleitung	30
4	Zfp-airborne Verfahren	17	8.1.1	Fliegerische Aspekte	30
5	Rahmenbedingungen für den Einsatz von UAS	17	8.2	Umsetzungsprozess	31
5.1	Einleitung	17	8.2.1	Einleitung	31
5.2	Rechtliche Rahmenbedingungen	17	8.2.2	Vorbereitung	31
5.3	Länderspezifische Genehmigungssituation für UAS	19	8.2.3	Befliegung	32
5.4	Technische Randbedingungen	20	8.2.4	Datenverarbeitung	33
6	Sensortechnik und Software	20	9	Schäden UAS	35
6.1	Einleitung	20	9.1	Schildescher Viadukt	36
6.2	Technische Möglichkeiten	21	9.2	Talbrücke Nuttlar	40
6.3	Eingesetzte Sensoriken und Systeme	24	9.3	Europabrücke Koblenz	48
6.3.1	Fotografische Aufnahmesysteme im Bereich des sichtbaren Lichts	24	9.4	Zusammenstellung	53
6.3.2	Thermografische Aufnahmesysteme im Spektralbereich der thermalen Strahlung	24	10	Auswertung, Bewertung, Ergebnisverarbeitung	54
			10.1	Allgemeines	54
			10.2	Auswertung und Bewertung der UAV-Befunde	54
			10.3	Wirtschaftliche Bewertung des UAV-Einsatzes	55
			10.4	Integration der UAV-Ergebnisse in SIB-Bauwerke	59

11	Analyse des Ausfalls	62
12	Lessons Learned – Verbesserungen der Sicherheit	63
12.1	Einleitung	63
12.2	Einsatz mit 2 PICs	63
12.3	Einschätzung der Risiken	63
12.4	Technische Ebene	64
12.5	Projektorganisation	65
13	Ausblick/weiterer Forschungsbedarf	65
14	Literatur	66

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit der Straßeninfrastruktur sicherzustellen wird in den nächsten Jahren große Herausforderungen an alle Beteiligten stellen. In diesem Zusammenhang sind Erhaltungsmaßnahmen an Brücken notwendig. Eine effiziente Durchführung solcher Maßnahmen ist erstrebenswert. Längere Verkehrsbeeinträchtigungen während derartiger Aktionen sollen nach Möglichkeit vermieden werden.

Als Grundlage der Zustandsbeurteilung gilt gemäß DIN 1076 die regelmäßige, handnahe, visuelle Bauwerksprüfung. Diese Prüfung ist kosten- und aufwandsintensiv und führt in der Regel zu längeren Verkehrsbeeinträchtigungen.

Um die Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 zu optimieren, soll die handnahe Prüfung durch innovative, bildgebende Verfahren ergänzt werden. Intensiv und weniger intensiv zu prüfende Bereiche sollen durch digitale Bilderfassung und -auswertung voneinander selektiert werden. Unbemannte Fluggeräte bieten vielfältige Möglichkeiten zur Bilderfassung und sollen als technisches Hilfsmittel in der Brückenprüfung zum Einsatz kommen. Gerade in den letzten Jahren konnten aufgrund neuer Entwicklungen vielfältige und breitgefächerte Einsatzmöglichkeiten für Multikopter entwickelt werden.

Ziel dieses Forschungsvorhaben ist es, im Rahmen einer Machbarkeitsstudie die Möglichkeiten zur Erkennung und Bewertung von Schäden an Brücken mithilfe von UAS aufzuzeigen und die Verfügbarkeit am Markt für solche technischen Hilfsmittel darzustellen. Die Anforderungen müssen mindestens den Qualitätsanforderungen gemäß DIN 1076 und RI-EBW-PRÜF entsprechen.

In diesem Endbericht werden einleitend im Kapitel 2 typische Schäden an Brücken aufgezeigt. In Kapitel 3 wird ein Grobkonzept zur Bauwerksinspektion mithilfe von UAS beschrieben. In Kapitel 4 folgt eine Untersuchung darüber, welche Zfp-airborne Verfahren mit UAV einsetzbar sind. In Kapitel 5 werden die für den Einsatz von UAS relevanten Rahmenbedingungen beschrieben. Die Sensortechnik und Software wird unter Kapitel 6 dieses Berichtes thematisiert. Unter Kapitel 7 werden drei ausgewählten Testbauwerke vorgestellt. Ferner wird unter Kapitel 8 die Umsetzung der Befliegungen detailliert beschrieben, woraufhin in Kapitel 9 die Schäden an den Bauwerken dargestellt werden. Unter Kapitel 10 kommt es zu einer Auswertung, Bewer-

tung und Ergebnisverarbeitung der zuvor gezeigten Schäden. Anschließend wird in Kapitel 11 der Ausfall des Multikopters im Rahmen der Befliegung der Europabrücke Koblenz thematisiert. Im Kapitel 12 dieses Berichtes wird ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

2 Typische Schäden

In diesem Kapitel werden typische Schäden, Mängel und konstruktive Schwachstellen an Brücken identifiziert, welche aktuell für eine digitale Bild- und Datenauswertung geeignet sind. Hierzu wurden unter anderem die bei TÜV Rheinland vorliegenden Erfahrungen der deutschlandweiten Brückenprüfungen sowie die Schadensbeispiele der RI-EBW-PRÜF (2013) herangezogen.

2.1 Bauwerksprüfung und Prüfumfang

Die aktuelle DIN 1076 (1999) unterscheidet zunächst zwischen Bauwerksprüfung und Bauwerksüberwachung.

Bauwerksprüfungen sind aufgeteilt in:

- Hauptprüfung (H),
- Einfache Prüfung (E),
- Prüfung aus besonderem Anlass (S),
- Prüfung nach besonderen Vorschriften (V).

Für die weiteren Betrachtungen in diesem FE-Projekt sind die einfache Prüfung und die Hauptprüfung als regelmäßige Prüfung von Bedeutung.

Die Prüfung aus besonderem Anlass, z. B. eines Fahrzeuganpralls, Brand oder Hochwasser wird in dem FE-Projekt nicht weiter betrachtet. Ein UAV-Einsatz kann bei diesen Prüfungen jedoch aus Gründen der Arbeitssicherheit sinnvoll sein.

Die Prüfung nach besonderen Vorschriften, z. B. von maschinellen und/oder elektrischen Anlagen werden in dieser Ausarbeitung nicht weiter behandelt.

Einfache Prüfung

Nach DIN 1076 (1999) ist die einfache Prüfung soweit vertretbar, ohne Verwendung von Besichtigungsgeräten oder -einrichtungen als intensive,

erweiterte Sichtprüfung durchzuführen. Bei dieser Prüfung sind auch Funktionsteile, Verankerungen und falls erforderlich Gründungen auf Auskolkungen hin zu überprüfen.

Hauptprüfung

Im Zuge der Hauptprüfung sind alle Bauwerksteile handnah zu prüfen, das erstreckt sich auch auf die schwer zugänglichen. Daher sind für diese Prüfung geeignete Besichtigungseinrichtungen zu Hilfe zu nehmen.

Weiterhin werden in DIN 1076 (1999) detaillierte Angaben zu den mindestens durchzuführen Leistungen gemacht, welche sich auf die folgenden Bereiche beziehen:

- Tragfähigkeit,
- Beschilderung,
- Gründungen,
- massive Bauteile,
- Stahl und andere Metallkonstruktionen,
- Holzkonstruktionen,
- Lager, Übergangskonstruktionen und Gelenke,
- Abdichtungen, Fahrbahnen und Entwässerung,
- Wand- und Deckenverkleidungen,
- Schutzvorrichtungen,
- Korrosionsschutz,
- Versorgungsleitungen,
- Vermessungstechnische Kontrollen.

Die sogenannte „handnahe“ Prüfung wird hierbei mit den folgend aufgeführten, bewährten Methoden durchgeführt:

- Abklopfen von Betonflächen zur Feststellung von Hohlräumen,
- Messen von Rissen mithilfe von Vergleichsmaßstäben, Risslupen usw.,
- Kontrolle von Verbindungsmittel auf festen Sitz,
- Messen von Verformungen, Verschiebungen, Spalten, Durchfahrtshöhen usw.,
- Chemische Untersuchungen wie z. B. Karbonatisierung und Chloridbelastung,
- Betonfestigkeiten, z. B. mittels Rückprallhammer,
- visuell auf Feuchtigkeit, Kiesnester, Rostfahnen, Abplatzungen usw.

2.2 Einteilung in Bauwerke und Bauteilgruppen

Nach ASB-ING (2013) werden folgende Bauwerke unterschieden:

- Brücken,
- Verkehrszeichenbrücken,
- Tunnel/Trogbauwerke,
- Lärmschutz-/Schutzbauwerke,
- Stützbauwerke,
- sonstige Bauwerke.

Weiterhin können nach ASB-ING (2013) die Bauwerke aus folgenden Bauteilgruppen bestehen:

- Überbau (Hauptbauteile der Brücken und Tunnel),
- Unterbau (Hauptbauteile der Brücken und Tunnel),
- Bauwerk (Hauptbauteile der VZ-Brücken, Tunnel-/Trog-/Lärmschutz-/Schutz-/Stützbauwerke, sonstige Bauwerke),
- Vorspannung,
- Gründung,
- Erd-/Felsanker,
- Brückenseile,
- Lager,
- Fahrbahnübergang,
- Abdichtung,
- Beläge,
- Kappen,
- Schutzeinrichtungen,
- Sonstiges (andere Konstruktionsbauteile).

2.3 Typische Schäden unterteilt nach Bauwerken und Bauteilgruppen

Eine ausführliche Darstellung der Schadensbeispiele auf Grundlage der RI-EBW-PRÜF (2013) ist in der Tabelle 1 aufzufinden.

In dieser Tabelle wurden die Schadensbeispiele, die als möglicher geeigneter Befund mit einer digitalen Bildauswertung identifiziert werden können, gelistet.

Hier findet eine umfassende Berücksichtigung des Schadens in Kontext zu dem Bauwerk, der Bauteilgruppe sowie der Lage und Erreichbarkeit statt.

Es handelt sich bei dieser tabellarischen Darstellung um eine erste Einschätzung.

Befund/Schaden	BWP handnah	BWP innovativ mittels Bildauswertung möglich		
		Ja	Nein	eingeschränkt
Verschmutzungen/Staub	X	X		
Fremdstoffe/Rückstände	X	X		
Verwitterung	X	X		
Zerstörungen	X	X		
Abplatzungen	X	X		
Kiesnester	X	X		
Durchfeuchtungen	X	X		
Wasseraustritt	X	X		
Ausblühungen/Aussinterungen	X	X		
Rostflecken/Rostfahnen	X	X		
Freiliegende Bewehrung	X	X		
Korrodierte Bewehrung (sofern freiliegend)	X	X		
Korrosion Art (Narben, Blattrost, ...)	X			X
Korrosionsgrad	X			X
Erkennbarkeit Risse, Breite $b \leq 0,2 \text{ mm}^1$	X		X	
Erkennbarkeit Risse, Breite $b > 0,2 \text{ mm}^1$	X	X		
Mechanische Beschädigung/Anprall	X	X		
Brandschäden	X	X		
Betondeckung	X		X	
Hohlstellen	X		X	
Dichtheit	X		X	X
Karbonatisierung	X		X	
Chloridgehalt	X		X	
Betonfestigkeit	X		X	
Bewehrung: Lage und Durchmesser	X		X	
Freiliegende Hüllrohre	X	X		
Hüllrohre/Spannstahlverpressung	X		X	
Schalungsreste	X	X		
Versprödungen (z. B. Leitungen, Manschetten usw. (kein Stahl))	X	X		
Blasenbildung	X	X		
Funktion/Beweglichkeit	X		X	X
Setzung	X			X
Schiefstellung	X			X
Ausbauchung/Ausbeulung	X			X
Durchbiegung/Verformung	X			X
Anlandung	X			X
Rutschung	X			X
Auskolkung	X		X	
Stellungsanzeiger (Lager, ...)	X	X		X
Vollständigkeit Verbindungsmittel	X	X		

¹ Erkennbarkeit unter günstigen Randbedingungen, wie z. B. Licht, Feuchtigkeit usw. Rissbreitenmessung derzeit noch nicht möglich

Tab. 1: Kurzübersicht Prüfbarkeit typischer Schäden, Quelle TÜV Rheinland

3 Grobkonzept UAS-Bauwerksinspektion

3.1 Einführung

Das vorliegende Grobkonzept skizziert die Abläufe und Arbeitsschritte zur Vorbereitung und zur Durchführung von UAS-Bauwerksbefliegungen sowie zur Auswertung der gewonnenen zugehörigen Daten und Informationen. In der frühen Projektphase konnten erwartungsgemäß noch nicht alle erforderlichen Informationen und Details vorliegen. Diese wurden innerhalb der Projektlaufzeit nach den aus den Befliegungen und Auswertungen gewonnen Erkenntnissen sowie nach Abstimmung und Definition von technischen Parametern und schlussendlich nach der Aufbereitung und Übergabe der Daten kontinuierlich eingearbeitet.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde dieses Grobkonzept auf die Belange der Befliegungen der drei Prüfobjekte weiter ausgearbeitet (siehe Kapitel 8 „Umsetzung“).

Das Grobkonzept beschreibt die Abläufe und teilt den handelnden Akteuren entsprechende Rollen und Aufgaben zu. Die Vorgehensweise richtet sich dabei insbesondere nach den folgenden drei Hauptphasen aus.

Innerhalb der „Erfassungsphase“ werden alle Vorbereitungen zur Durchführung der Befliegung sowie der eigentlichen Erfassung vor Ort zusammengefasst. Die gewonnenen Daten und Informationen werden in der Phase „Bewertung“ aufbereitet, analysiert und fachlich durch den Sachverständigen ausgewertet. In Phase 3 „Darstellung“ erfolgt die Aufbereitung, Visualisierung sowie die Übergabe der Daten in die Zielsysteme bzw. Berichte.

Den handelnden Akteuren wurden folgende Rollen zugeteilt:



Bild 1: Phasenübersicht, Quelle: TÜV Rheinland

Auftraggeber

- Kontrolle der Ergebnisse und Überwachung der Projekte.

Projektleiter

- Projektmanagement auf Seiten des AN (Auftragnehmers).

Prüfer/Sachverständiger

- Fachliche/inhaltliche Betreuung des Projektes, geeignete Kompetenzen zur Bauwerksinspektion. Betreuung der Befliegung, Erfassung sowie fachliche Bewertung der Ergebnisse.

Pilot

- Geschulter Pilot im Umgang mit der entsprechenden UAS-Einheit.

Operator

- Der Operator unterstützt den Pilot bei der Durchführung der Befliegung und Kameraführung (Hinweis: kann später ggf. direkt vom Prüfer/Sachverständigen mit übernommen werden).

Auswerter

- Unterstützung bei der Auswertung/Analyse und Aufbereitung der Daten, Unterstützung bei der Flugvorbereitung und Datenbeschaffung sowie Aufbereitung.

In den folgenden Ausführungen zu den jeweiligen Phasen sind die entsprechenden Rollen im Sinne des Grobkonzeptes in einfacher Form zugeordnet. Zur besseren Übersicht sind die folgenden Phasen, soweit dies möglich ist, nach Arbeitsvorbereitung sowie operativer Durchführung gegliedert.

Die Arbeitsschritte setzen die geeignete Auswahl des UAV-Fluggerätes und der entsprechenden Sensorik (Bild, Thermografie etc.) im Vorfeld voraus.

3.2 Erfassung

In der Erfassungsphase werden alle erforderlichen Informationen zur erfolgreichen Projektdurchführung zusammengetragen und der Grundstein zur

UAS-Befliegung des Bauwerkes gelegt. Darüber hinaus erfolgt in dieser Phase die UAS-Befliegung vor Ort sowie eine erste QS (Qualitätssicherung) der Daten. Im Zusammenspiel zwischen Prüfer und Pilot wird die Erfassung fachgerecht am Bauwerk durchgeführt, dabei erfolgt ggf. in der Phase der Einspielung die Unterstützung durch einen Operator zur Bildführung und Kameraauslösung. Die Projekte setzen eine gewissenhafte und gut vorbereitete Durchführung voraus. Der Pilot wird vor der Befliegung durch den Prüfer in die wichtigen Bauteile der Brücke eingewiesen.

Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung werden u. a. folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

Rolle Prüfer/Sachverständiger

- Beschaffung der Plan- und Bauwerksdaten (GIS (Geoinformationssysteme), CAD (computer-aided design), analoge Bauwerksdokumentationen sowie Auszüge aus SIB-Bauwerken, Beschaffung zurückliegender Prüfberichte etc.),
- Identifikation der intensiv und weniger intensiv zu prüfenden Bereiche, z. B. Koppelfugen und Lager an schwer zugänglichen Bereichen für den Prüfer,
- Festlegung der zu prüfenden/befliegenden Bauteile im Prüfplan,
- Beteiligung Dritter klären, Anträge und Zugänglichkeit der Brücke, Abwicklung sonstiger organisatorischer Aufgaben, Abstimmung und Disponierung von Terminen,
- Vorgabe der erforderlichen Sensortechnik (Bild, Thermografie etc.),
- Einweisung des Piloten mit exakten Bauteilbezeichnungen und Besonderheiten des Bauwerkes,
- Übernahme/Steuerung von Verkehrssicherungsmaßnahmen, Definition von Flugverbotszonen in Abstimmung mit dem Baulasträger etc.,
- Erarbeitung eines Prüfplanes.

Rolle Pilot

- Beschaffung Starterlaubnis und Aufstiegs-genehmigung,
- Witterungs- und Randbedingungen klären, Abstimmung eines geeigneten Termins,

- Sensortechnik auf Prüfaufgabe abstimmen bzw. Kalibrierung der Sensoren und des UAVs,
- Widrigkeiten vor Ort feststellen (Bewuchs, Anfahren, Start-Aufstellplatz),
- Identifizierung von Hilfsmitteln zur Einsicht in Lager etc. notwendig, wenn ja welche?
- Flugdauer ermitteln, Flugplan gemeinsam mit dem Prüfer entwickeln auf Basis des Prüfplanes.

Im Rahmen der Befliegung/Erfassung werden folgende Aufgaben definiert:

Rolle Prüfer/Sachverständiger

- unterstützt den Piloten vor Ort beim Bauteil-anflug nach Flugplan,
- Referenz-Risskarte vor Ort (Kalibrierung von Lagepunkten sofern erforderlich),
- markiert ggf. mit Laserpointer die exakten zu erfassenden Bereiche,
- Vorabcheck der Bilder, Sensorik, Daten nach Aufzeichnung. Vermeidung von Fehlern und Datenverlusten durch direkte Vor-Ort-Kontrolle, QS,
- Erstellung eines Prüfprotokolles (Ablauf des Fluges, technische Parameter des UAVs, der Sensoren, Ergebnisse der Kalibrierung etc.) zur Dokumentation der UAS-Befliegung am Bauwerk. Dokumentation von nicht bzw. schlecht einsehbaren Bereichen des Bauwerkes.

Rolle Pilot/Operator

- Sensortechnik und Fluggeräte entsprechend der Messaufgabe vorhalten, montieren und kalibrieren,
- Befliegung nach Flugplan, Anfertigung von Datenaufnahmen/Fotos der Bauteile,
- Sensorik wechseln, ggf. Hilfsmittel aufbauen (z. B. zur Lagerbefliegung),
- technische Betreuung des Fluggerätes und Energiemanagement,
- Unterstützung beim Auslesen und Vorabcheck der Daten.

3.3 Analyse/Bewertung

In der Bewertungsphase werden alle erforderlichen Informationen zur erfolgreichen Projektdurchführung aus der UAS-Befliegung zusammengetragen. Die Daten werden hierzu ausgelesen und ggf. einem Postprocessing zur Qualitätsverbesserung zugeführt. Basierend auf den synchronisierten Daten der Lage- und Bauteilzuordnung werden durch den Sachverständigen Bewertungen der Bauteile und Klassifizierungen der ggf. vorhandenen Schäden vorgenommen. Die Arbeiten werden durch den Piloten bzw. ggf. durch den Operator oder Auswerter flankiert bzw. unterstützt.

Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung werden u. a. folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

Rolle Auswerter

- Synchronisierung der Daten, räumliche Zuordnung, Indizierung der Bilder und Daten,
- Postprocessing zur Verbesserung der Lage etc.,
- gespeicherte Bilder ausladen (Originale und nachbearbeitete Bilder),
- gegebenenfalls Nachbearbeitung/Bildverbesserung in Zusammenarbeit mit dem Prüfer.

Rolle Prüfer/Sachverständiger

- Zuordnung der Bilder am Plan zu Bauteilen,
- Vorlage und Nutzung aller erforderlichen aktuellen Richtlinien und Normenwerke.

Innerhalb der Bewertung werden folgende Schritte durchgeführt:

- Auswahl der geeigneten Bilder,
- Bewertung der Bilder nach RI-EBW-PRÜF,
- Ermittlung von Rissbreiten (Anfang und Ende) und Schäden,
- Dokumentation der Schäden und Rissbreiten innerhalb der Bilder. Unterstützung durch IT-Anwendung. Neuindizierung der Bilder,
- Zuordnung der Bilder anhand der Bauteile,
- Übernahme der Bilder in die Dokumentation.

3.4 Aufbereitung/Darstellung

Innerhalb der Aufbereitungs-/Darstellungsphase werden die Daten der UAS-Bauwerksinspektion zusammengefasst und einheitlich sowie systematisch dokumentiert. Die Daten aus der Bewertungsphase werden hierzu strukturiert übernommen und in Abhängigkeit von den Anforderungen und Formaten aufbereitet. Die Darstellungen erfolgen in unterschiedlichen Medien. Neben klassischen Berichtsformen wird die Übergabe und Aufbereitung der Daten in geografischen Informationssystemen sowie sonstigen Fachauskunftssystemen vorgesehen. Die Art und Weise der Aufbereitung ist dabei abhängig von den technischen Parametern der eingesetzten Komponenten und deren Zusammenspiel sowie Output.

Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung werden u. a. folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

Rolle Auswerter

- Vorbereitung der Arbeitsmittel und Konfiguration der entsprechenden Auswertekomponenten (geografisches Informationssystem ArcGis, CAD System, ggf. fotogrammetrische Auswertekomponenten),
- Abstimmung/Definition entsprechender Schnittstellen, z. B. SIB-Bauwerke etc.,
- Anwendung zur teilautomatisierten Berichtserstellung,
- QS der Daten.

Innerhalb der Dokumentation und Darstellung werden folgende Schritte durchgeführt:

- Aufbereitung des Berichtes und Übernahme der erforderlichen Daten und Informationen,
- Aufbereitung des Bauwerkes bzw. der Schäden in Schadensskizze bzw. Lagedokumentation innerhalb eines Informationssystems (GIS),
- Übergabe der Daten an sonstige Fachsysteme z. B. SIB-Bauwerke etc.,
- abschließende QS der Daten und Informationen,
- vollständige Übergabe an den AG.

4 Zfp-airborne Verfahren

Visuelle Verfahren

Für die visuelle Inspektion haben sich nach anfänglichen Ansätzen mit digitalen Spiegelreflexkameras mit Wechselobjektiven vor allem leistungstechnisch vergleichbare, jedoch wesentlich leichtere Systemkameras etabliert. Diese Systeme funktionieren nach dem gleichen Prinzip, wie digitale Spiegelreflexkameras. Das Bild wird jedoch direkt auf den Sensor aufgenommen, ohne Klappspiegelmechanismus, was sich wiederum in geringeren Systemgewichten zeigt. Diese Gewichtsersparnis äußert sich vor allem in mehr Flugzeit. Diese liegt bei aktuellen, professionellen Systemen zwischen 15 und 20 Minuten.

Weitere Sensoriken

Neben RGB- und IR-Systemen existieren weitere Sensoriksysteme, die am UAS eingesetzt werden können. Hierzu zählen Zeilenkamera-Systeme, Radar- oder Lidar-Systeme sowie Multi- und Hyperspektralsysteme; diese bieten zusätzliche Möglichkeiten, auch in Inspektionsanwendungen. Da derartige Systeme jedoch nur vereinzelt und noch deutlich auf experimenteller bzw. Pilotprojekt-Basis eingesetzt werden, fallen sie nicht in den Bereich der Breitentechnologie. Folglich werden sie in der praktischen Anwendung dieses Projektes nicht verwendet.

Ergänzende Daten und Schnittstellen

Die Daten der Sensorsysteme können durch Flug- und Lagedaten des unbemannten Flugsystems sinnvoll ergänzt werden. Inertialsensoren (IMUs) im Fluggerät, die zur Ermittlung der Lage und Beschleunigung entlang aller Achsen verwendet werden sowie ein satellitengestütztes Positionierungssystem (GNSS) werden permanent ausgewertet und protokolliert. Anhand dieser Daten kann die räumliche Darstellung zu Zuordnung von Aufnahmen gewährleistet werden, entsprechend der Genauigkeit von IMU und GNSS.

Eine Einbeziehung dieser Daten unterstützt den Prozess bei der genauen Verortung, Zuordnung und Skalierung der Inspektionsergebnisse. Hier existieren bereits erste Systeme und technische Möglichkeiten, die auch in diesem Projekt berücksichtigt werden (siehe Kapitel 6 „Sensortechnik und Software“).

5 Rahmenbedingungen für den Einsatz von UAS

5.1 Einleitung

Drohnen sind unbemannte Flugobjekte und unterteilen sich prinzipiell in Flächenflugzeuge, Drehflügler (Helikopter) und Multikopter. Im Rahmen dieses Projektes werden ausschließlich Multikopter betrachtet.

Mit UAV (Unmanned Aerial Vehicle) wird nur der Kopter beschrieben, mit UAS wird das komplette System, also Kopter inklusive Sensorik, definiert. Multikopter werden ferngesteuert von einem Piloten geflogen, können aber auch teilautomatisch über eine sogenannte Waypointbefliegung GPS gestützt eingesetzt werden.

Oft wird der Begriff Drohne als Synonym für Militär- bzw. Kampfdrohnen verwendet. Neben dem militärischen Einsatz werden Multikopter aber auch für eine Vielzahl an zivilen Anwendungsgebieten benutzt, beispielsweise werden sie in der Forstwirtschaft sowie bei Feuerwehr- und Polizeieinsätzen erfolgreich eingesetzt.

Charakteristisch für den UAS-Markt ist, dass es sich um einen jungen Markt handelt. Aktuell gibt es zwar eine große Anzahl von Anbietern für den Hobbybereich, aber nur eine begrenzte Anzahl an Anbietern für den gewerblichen/professionellen Bereich. Darüber hinaus fehlt es zum jetzigen Zeitpunkt an quantitativen Marktanalysen, die Marktvolumen und Marktwachstum aufzeigen. Der technische Status Quo ist von einem rapiden Wechsel und Fortschritt geprägt.

5.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die rechtliche Lage bezüglich des Einsatzes von UAS stellt sich folgendermaßen dar:

Generell ist zwischen privater (nicht-kommerzieller Nutzung) und kommerzieller Nutzung zu unterscheiden.

- Dient die Nutzung des Luftfahrzeugs dem Zwecke des Sports oder der Freizeitgestaltung, so gelten lediglich die Regelungen über Flugmodelle der Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). Sie sind von der Erlaubnispflicht ausgenommen, sofern sie ein Gewicht von unter fünf Kilogramm haben. Auch werden keine Anforderungen an

den Führer eines unbemannten Flugmodells gestellt.

- Ist mit dem Einsatz hingegen ein sonstiger, insbesondere ein gewerblicher Nutzungszweck verbunden, so handelt es sich um ein unbemanntes Luftfahrtsystem mit der Folge, dass neben der Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) auch der Anwendungsbereich des Luftverkehrsgesetz (LuftVG) eröffnet ist.
 - Gemäß Verordnung (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates obliegt die Zulassung von unbemannten Luftfahrzeugen (UAS) mit einer höchstzulässigen Abflugmasse von mehr als 150 kg der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA). Unterhalb dieser Gewichtsgrenze fallen UAS in die Zuständigkeit der Mitgliedstaaten (sog. Annex II Gerät). Derzeit gibt es allerdings keine EU-Regelungen für die Zulassung und den Betrieb von UAS.
 - In Deutschland unterliegt der zivile Betrieb von UAS gemäß § 16 Absatz 1 Nummer 7 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) der Erlaubnispflicht; er ist gemäß § 15a LuftVO grundsätzlich verboten, soweit er außerhalb der Sichtweite des Steuerers erfolgt (Außerhalb der Sichtweite erfolgt der Betrieb, wenn das Luftfahrzeug ohne besondere optische Hilfsmittel nicht mehr zu sehen oder eindeutig zu erkennen ist) oder das Gerät eine Gesamtmasse von über 25 Kilogramm aufweist.
 - Die Zuständigkeit für die Erteilung der Aufstiegserlaubnis für UAS liegt gemäß § 31 Absatz 2 Nummer 17 LuftVG in Verbindung mit

§ 16 LuftVO bei den Luftfahrtbehörden der Länder. Nach § 16 Absatz 4 LuftVO wird die Erlaubnis erteilt, wenn die beabsichtigte Nutzung nicht zu einer Gefahr für die Sicherheit des Luftverkehrs oder die öffentliche Sicherheit oder Ordnung führt.

- Weitere Einschränkungen erfolgen durch eine Flugraumbegrenzung. Zu Flugplätzen ist ein Mindestabstand von 1,5 Kilometern einzuhalten. Spezielle Flugverbotszonen bestehen etwa bei Flügen über Industrieanlagen, Menschenansammlungen, Unglücksorten oder Katastrophengebieten. Überflüge bedürfen hierzu einer gesonderten amtlichen Genehmigung der jeweiligen Einsatzbehörde.

UAS gelten als Luftfahrzeuge und unterliegen dem Luftverkehrsgesetz. Werden Luftbilddaufnahmen mithilfe von UAS erstellt, bedarf es in jedem Falle einer Aufstiegsgenehmigung, die von der jeweiligen Landesluftfahrtbehörde ausgestellt wird. Hierbei kann zwischen einer Allgemeinerlaubnis und einer Einzelerlaubnis unterschieden werden. Eine Allgemeinerlaubnis kann bei einem Abfluggewicht bis zu 5 Kilogramm erteilt werden, eine Einzelerlaubnis wird in der Regel bei einem Abfluggewicht von über 5 Kilogramm bis maximal 25 Kilogramm ausgestellt. Eine detaillierte Übersicht über die Klassifizierung von UAS liefert Tabelle 2.

Zur praxisherechten und flexiblen Umsetzung (insbesondere wegen der erforderlichen behördlichen Genehmigungen) kam im Rahmen dieses Projektes nur der Einsatz von solchen UAS infrage, die ein maximales Abfluggewicht von 5 Kilogramm nicht überschreiten (BMVI, 2016, S. 3 ff.).

Gewichtsklasse (MTOW*)	Zulassungen	Versicherung
≤ 5 kg	Allgemeinerlaubnis durch Landesluftfahrtbehörde	Spezielle UAS Haftpflichtversicherung
> 5 kg ≤ 25 kg	Einzelerlaubnis durch Landesluftfahrtbehörde	
> 25 kg ≤ 150 kg	Grundsätzlich verboten, Ausnahmen möglich (Kann-Vorschrift) durch Landesluftfahrtbehörde	
> 150 kg	Zulassung durch EASA	

Tab. 2: Klassifizierung UAS, Quelle: TÜV Rheinland

5.3 Länderspezifische Genehmigungssituation für UAS

Bild 2 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Arten von Aufstiegsgenehmigungen in den einzelnen Bundesländern.

Hinweis

In Baden-Württemberg gibt es eine Allgemein Genehmigung, diese gilt aber nur für außerorts. Für Flüge innerorts bedarf es immer einer Einzelgenehmigung.

In Berlin gilt eine absolute Sperrzone für UAVs in einem Radius von 1 Seemeile (= 1,852 km) rund um den Reichstag.

In Bayern haben die beiden zuständigen Luftämter (Nord, Süd) jeweils Allgemeinverfügungen erlas-

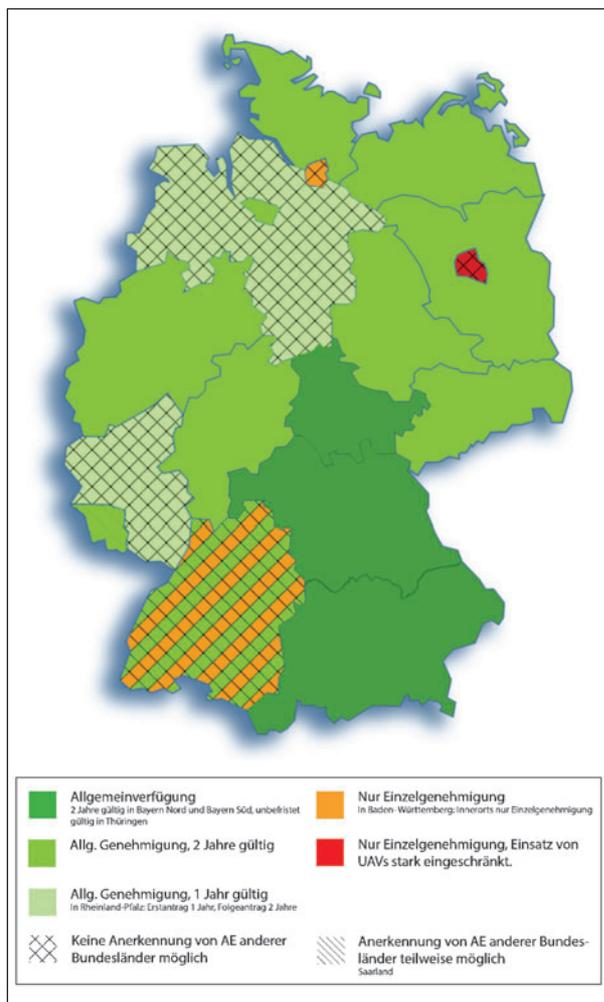


Bild 2: Länderspezifische Genehmigungssituation, Quelle: SPECTAIR_ACADEMY

sen. Gesonderte Genehmigungen sind nicht mehr erforderlich. Lediglich eine Erklärung zur Einhaltung der Bedingungen gemäß der Allgemeinverfügungen muss im Vorfeld beigebracht werden (3 Werktage). Diese Erklärung ist 2 Jahre wirksam, vorbehaltlich Änderungen der Luftämter.

In Thüringen gibt es ebenfalls eine Allgemeinverfügung seit Ende 2015.

Stand: 01.03.2016

Das bedeutet, dass im Rahmen der Allgemein Genehmigung Flüge

- bei Fluggeräten unter 5 kg,
- zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang (zzgl. 30 min),
- bis 100 m Höhe,
- wenn nicht über Menschen geflogen wird,

grundsätzlich möglich sind.

Für alle anderen Fälle muss eine Einzelgenehmigung beantragt werden. Diese wird ausgestellt, sofern es nicht zu einer Gefährdung der öffentlichen Sicherheit oder des sicheren Luftverkehrs kommen könnte. (Hinweis: dieser Passus wird von den örtlichen Behörden höchst unterschiedlich ausgelegt !)

Unberührt von der Aufstiegsgenehmigung sind die folgenden Erlaubnisse einzuholen:

- des Grundstückseigentümers bzw. eines Verfügungsberechtigten,
- Innerorts: die Zustimmung des Ordnungsamtes (vorbehaltlicher Prüfung),
- bei Einsätzen über Wasserstraßen: des zuständigen Bundesamtes,
- bei Einsätzen in einem Naturschutzgebiet: der zuständigen Naturschutzbehörde,
- bei Einsätzen direkt an oder über Straßen: der Verkehrsabteilung des Ordnungsamtes (je nach Straßenwegesetz),
- bei Einsätzen im kontrollierten Luftraum: Flugverkehrs freigabe der Flugleitung (Auch Heli-Landeplätze z. B. an Krankenhäusern !).

Bei Einsätzen über JVA (Justizvollzugsanstalt), Militär- oder Industrieanlagen ist eine explizit gesonderte Genehmigung des Grundstückseigners einzuholen, der Betrieb von UAV über Unglücks- oder Katastrophengebieten ist untersagt.

5.4 Technische Randbedingungen

Für einen Einsatz im Rahmen der Brückenprüfung kommen nur solche UAS infrage, die durch agiles Flugverhalten schwer zugängliche Stellen befliegen können und ruhige Flugeigenschaften aufweisen. Der Transport der Nutzlast bei verhältnismäßig langer Flugzeit ist ebenfalls ein Charakteristikum, das bei der Brückenbefliegung von größter Wichtigkeit ist.

Redundanz, Agilität, eine kompakte Bauform, die Möglichkeit zur flexiblen Sensorenausstattung, eine um 180° schwenkbare Kameraaufhängung sowie das Vorhandensein eines Kollisionsschutzes können somit als Indikatoren für die Eignung eines UAS für die Brückenprüfung betrachtet werden.

Vor dem Hintergrund der zuvor gelisteten Merkmale wurde der HT-8 C180 der Firma Height Tech für die Befliegungen im Rahmen diese Vorhabens ausgewählt (siehe Bild3).

Die Antriebsredundanz des HT-8 C180 stellt sicher, dass im Falle eines Antriebsausfalles eine Kompensation stattfindet. Ferner weist dieses Luftfahrzeug durch kleine Rotoren und hohe Drehzahlen ein agiles Flugverhalten auf und kann somit schnell schwer erreichbare Punkte anfliegen und in kurzer Zeit das Prüfobjekt komplett abfliegen. Durch die kompakte Bauform des HT-8 C180 wird die Befliegung schwer zugänglicher Stellen zusätzlich erleichtert. Die Sensoren des Oktokopters können schnell und flexibel gewechselt werden, was auch ein wesentliches Auswahlkriterium für dieses Projekt war. Die um 180° schwenkbare Kameraaufhängung ermöglicht ein großes Sichtfenster für Aufnahmen ohne störende Propeller im Bild. Darüber hinaus besitzt das Model des Herstellers Height Tech einen Propellerschutz in Form eines Schutzrings, wodurch Kopter und Prüfobjekt im Falle eines Zusammenstoßes geschützt sind. Dieser Kollisionsschutz ist in Kamerablickrichtung nach vorne geöffnet und garantiert somit die freie Sicht auf das Prüfobjekt.

	Height Tech HT-8 C180
Bauformm	Oktokopter
Länge x Breite x Höhe	80 x 100 x 26 cm
Max. Nutzlast	~1.500 g
Max. Abfluggewicht	5.000 g
Kameraaufhängung	180° schwenkbare Kameraaufhängung (am Bug des Kopters)
Flugzeit	max. 20 Min.
Steigrate	max. 8 m/s
Max. Geschwindigkeit	65 km/h (18 m/s)
Akku	Lithium Polymer 14,8V/5.800 mAh
Ladezeit	circa 1 h
Kollisionsschutz	Propellerschutz in Form eines Rings, Gewicht 300 g, Kollisionsschutz ist nach vorne geöffnet und bietet freie Sicht für die Kameraaufhängung
Redundanz	Antriebsredundanz
Besonderheiten	DUO-Akkuschacht /DUO-Ladegerät, agiles Flugverhalten durch kleine Rotoren

Bild 3: Height Tech HT-8 C180, Quelle: TÜV Rheinland/Height Tech/spectair

6 Sensortechnik und Software

6.1 Einleitung

Im Rahmen dieses FE-Projektes wurden umfangreiche Recherchen über auf dem Markt befindliche UAV-Trägersysteme durchgeführt und eine eingehende technische Bewertung dieser Systeme vorgenommen. Dabei lag der Fokus insbesondere auf flexiblen Trägersystemen, welche es ermöglichen, unterschiedliche Sensoren zu implementieren und damit einen Test von ausgewählten verfügbaren Sensoren im Rahmen der Bauwerksüberwachung durchzuführen. Im Folgenden aufgeführte Sensorik erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Auswahl und Bewertung erfolgte durch das Gewicht der Sensoren und der Eignung zur Bauwerksinspektion. Darüber hinaus war die Marktverfügbarkeit in Kombination mit dem Trägersystem zum Zeitpunkt der Untersuchung entscheidend.

Bei der rasant fortschreitenden Entwicklung auf dem Markt der UAVs ist ebenso eine dynamische Weiterentwicklung der Sensorik zu erwarten. Die Systeme werden kleiner und leistungsfähiger. Es ist davon auszugehen, dass zukünftig noch qualitativ hochwertigere Abbildungen möglich sein werden.

Auf dem aktuellen Consumer Markt ist eine Vielzahl von Herstellern mit qualitativ hochwertigen digitalen Systemkameras vertreten. Diese neue Kamera-gattung unterscheidet sich von klassischen Spiegelreflexsystemen vor allem durch den Verzicht auf klappbare Spiegel und optische Sucher und spart so Volumen und Masse ein. Dadurch ist dieses Kamerasystem besonders dafür geeignet, in Verbindung mit UAVs der mittleren Größe und Tragfähigkeit eingesetzt zu werden. Es ermöglicht eine flexiblere Positionierung und Ausrichtung innerhalb bzw. auf dem UAV und so auch die freiere Gestaltung des UAV-Rahmens. Die erreichbaren hohen Auflösungen der Systemkameras in Verbindung mit dem Einsatz lichtstarker und verzerrungs- armer Optiken schaffen sehr gute Voraussetzungen für fotogrammetrische Schadensauswertungen aufgenommener Objekte und Bauwerke.

6.2 Technische Möglichkeiten

Zusätzlich zu den hier ausschließlich erstellten Einzelbildaufnahmen ist es modellspezifisch auch möglich, Videoaufnahmen mit einer Auflösung in 4 K (4.096×2.160 Pixel, Sony Alpha 7R II) aufzuzeichnen. Der Vorteil liegt hier in einem kontinuierlichen Bilderstrom und der Möglichkeit, eine Verortung von Details oder Schäden durch die aufgenommene Zeitachse vorzunehmen. Darüber hinaus ist kein Auslassen von Einzelaufnahmen oder der Verlust durch unscharfe Bilder möglich.

Als nachteilig können sich dagegen die im Folgenden genannten Punkte erweisen:

- nur 4K-Auflösung (vergleichbar zu einer 8 Megapixel Kamera),
- kein RAW-Format,
- für Erkennung kleinster Schäden aus normalem Abstand (bis zu 5 m) aufgrund der geringeren Auflösung (~ 8 Megapixel) sind schlechtere Ergebnisse zu erwarten.

Auch der Einsatz von Laserscannern auf UAVs ist technisch gesehen möglich. Zum Zeitpunkt der

Auswertung verliefen jedoch die Vorerkundungen mit den verfügbaren Systemen aufgrund der schwierigen Stabilität des Flugsystems und der erwartungsgemäß hohen Vibrationen nicht zufriedenstellend. Die Ergebnisse der aktuellen Laserscans sind derzeit im Flugbetrieb nicht für die Bauwerksuntersuchung geeignet. Hier sind jedoch mittlerweile auch leistungsfähige Systeme auf dem Markt verfügbar.

Mit der kontinuierlichen Ausweitung der Fähigkeiten des UAV werden regelmäßig weitere Sensoriken hinzugefügt. Hierzu gehören in Zukunft Abstands- und Lagesensoriken für eine Verbesserung der Flugstabilität und -sicherheit, sowie weitere Datenerfassungs-Sensoriken.

Internal Measuring Unit (IMU, Bordcomputer) zur Aufzeichnung der Flugtrajektorie

Im Rahmen von klassischen luftgestützten Fernerkundungsprojekten werden diese Systeme, welche aus einer Vielzahl von kombinierten einzelnen Sensoren bestehen und in Echtzeit die Beschleunigung, Geschwindigkeit sowie Richtungsänderung etc. aufnehmen und aufzeichnen, zur Lageermittlung neben den GPS-Systemen bereits seit langem erfolgreich eingesetzt. Das Prinzip beruht darauf, dass die Lage des UAVs und die Aufnahme-position sowie die Ausrichtung des Sensors im Raum in Echtzeit bzw. in der Postprozessierung ermittelt werden. Insbesondere im Bereich der GPS-Satellitenabschattung z. B. unterhalb eines Bauwerkes, kann die Position sowie der Aufnahmewinkel im Vergleich zur reinen GPS-Aufzeichnung dabei deutlich verbessert werden.

Im Rahmen der Projektdurchführung konnte noch kein entsprechend ausgestattetes System zur Verfügung gestellt werden. Entsprechend ausgestattete Systeme sind jedoch auf dem UAV-Markt verfügbar.

Aufgrund der enormen Möglichkeiten der fotogrammetrischen Software zur Auswertung und Lagezuordnung der aufgenommenen Fotos, kann eine Durchführung im aktuellen Projekt auch ohne diese Sensorik (bzw. einfache Sensoren des Fluggerätes) durchgeführt werden. Eine deutliche Verbesserung der direkten Zuordnung der Lage und Ausrichtung ist durch eine entsprechende Sensorik zu erwarten. Damit können weitere Arbeitsschritte insbesondere bei der Zuordnung schwer lokalisierbarer Bilder vereinfacht werden.

Zur Auswertung der gewonnenen Daten und Informationen der jeweiligen eingesetzten Sensoren, steht eine Auswahl an unterschiedlichen Softwaresystemen zur Verfügung.

Neben spezieller Software zur Flugvorbereitung und Planung, sowie zur Kalibrierung der Systeme und zum Auslesen bzw. Aufbereiten von Messdaten und Bildern, soll hier der Schwerpunkt insbesondere auf verfügbare leistungsfähige Auswertesoftware zur fotogrammetrischen Erfassung und Verarbeitung der Messwerte/Daten gelegt werden.

Insbesondere aufgrund des limitierenden Faktors des UAV-Fluggewichtes und der Verfügbarkeit leistungsfähiger kostengünstiger Sensoren zur fotografischen Aufnahme, in Verbindung mit rasant wachsenden Speicher- und Rechenkapazitäten und Verfahren/Algorithmen zur automatisierten Mustererkennung, erlebt die fotogrammetrische Auswertung derzeit eine Renaissance. Waren es noch vor wenigen Jahren sehr aufwendige Verfahren, ist es heute möglich, sehr schnell und kostengünstig und nahezu ohne weitere Vorbereitung automatische Zuordnungen von Bildern durchzuführen und basierend auf diesen Daten die Lage des Bildes/UAVs zum Zeitpunkt der Aufnahme sowie das Bauwerk selbst in 3D zu rekonstruieren. In Verbindung mit bekannten Referenzpunkten bzw. eingemessenen Koordinaten als Stützpunkte, können die Objekte so detailgetreu und maßstabgerecht dreidimensional abgebildet werden.

Einschränkungen bestehen im Bereich reflektierender sowie glatter, texturarmer Oberflächen, welche keine geeigneten Vergleichspunkte für Bildzuordnungen ermöglichen.

Bei einer großen Menge von hochauflösenden Bildern, ist die Rechenzeit noch ein limitierender Faktor. Bei einer Auflösung von 30 Megapixeln und einer Vielzahl an Bildern bei großer räumlicher Ausdehnung des Objektes/Bauwerkes, kann die Rechenzeit erheblich sein. Leistungsfähige Workstations/Server sind hier unabdingbare Voraussetzung für eine zeitnahe Bearbeitung.

Nahbereichsfotogrammetrie

Die Software ermöglicht das automatisierte Einlesen und Verarbeiten der fotografischen Aufnahmen, die im Rahmen der Befliegungen erstellt wurden, zur Generierung dreidimensionaler, digitaler Modelle.

Innerhalb der Marktanalyse wurden für das Feld der Nahbereichsfotogrammetrie die folgenden, proprietären Produkte identifiziert:

- AgiSoft Photoscan (Pro),
- Pix4Dmapper,
- ContextCapture.

Daneben existieren verschiedene freie und auf OpenSource basierende Toolboxen und Lösungen sowie Onlineanbieter, die hochgeladene Bilder automatisiert und zu 3D-Modellen weiterverarbeiten.

Diese Software bedient sich der sogenannten „Structure from Motion“ (SfM) Methodik, in der räumliche Strukturen aufgrund von übereinstimmenden Punkten in den vorhandenen Bildern berechnet werden. Sie ist vergleichbar mit der aus der klassischen Fotogrammetrie bekannten „Mehrbild-Fotogrammetrie“ (POMASKA, 2013).

Bei bekannter Kamerageometrie und Optik (Brennweite, Sensorgröße, optische Verzerrungen) sind wesentliche Parameter für die spätere Zuordnung und Auswertung der Bilder bereits bekannt. Die Systeme erlauben den Import der Bilder aus der Messkampagne und deren automatisierte Verknüpfung. So werden in den Aufnahmen, die eine Überdeckung von ca. 80 % der Bildfläche in Längsrichtung und ca. 50 % in Querrichtung aufweisen sollten, übereinstimmende Passpunkte durch Mustererkennung identifiziert und ein Bildverbund gerechnet (siehe Bilder 4-6).

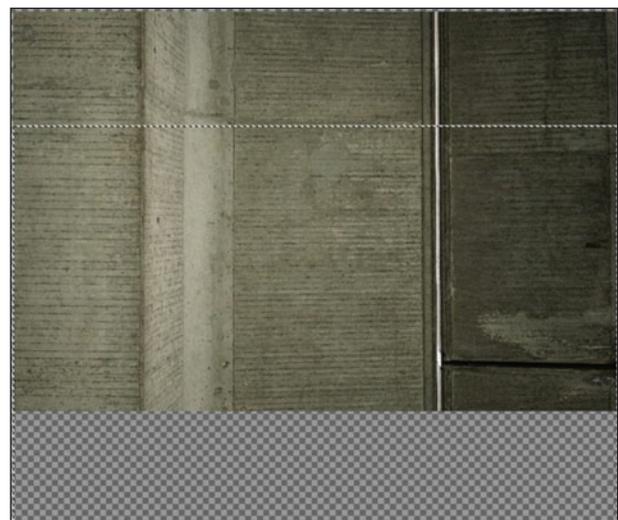


Bild 4: Überlappung Teil 1, Quelle: TÜV Rheinland

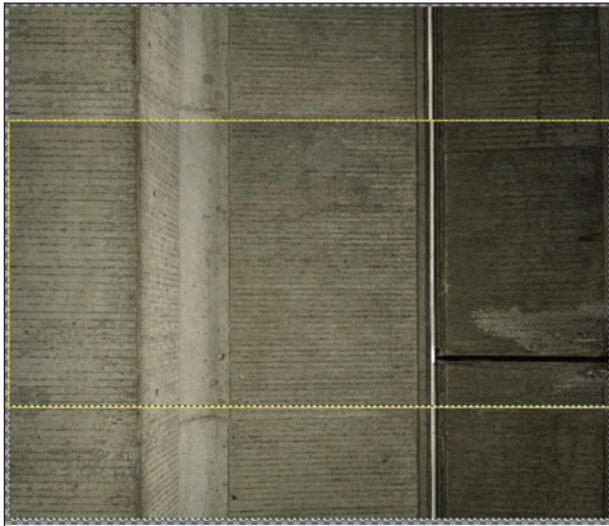


Bild 5: Überlappung Teil 2, Quelle: TÜV Rheinland

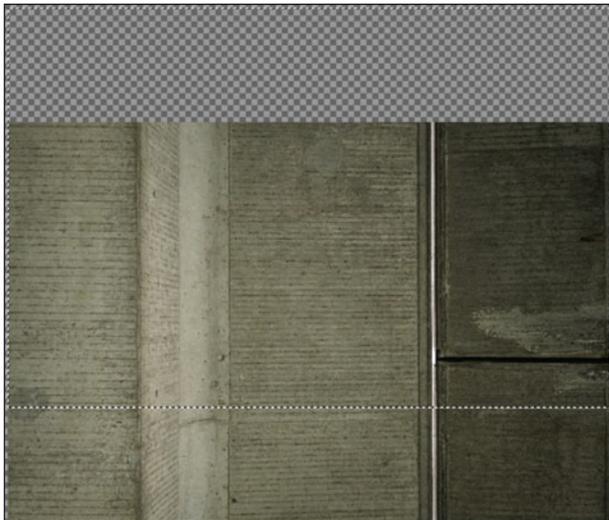


Bild 6: Überlappung Teil 3, Quelle: TÜV Rheinland

Dieser Vorgang kann mit der Erstellung eines Panoramabildes verglichen werden. Aufgrund der Änderung der Aufnahmeposition der Kamera und des UAVs im Raum zum Objekt, bei bekannten festen Kameraparametern und übereinstimmenden selektierten Passpunkten, errechnet die Software vereinfacht dargestellt die Kameraposition, Ausrichtung und Entfernung zum Objekt zum Zeitpunkt der Aufnahme. In weiteren Schritten berechnet die Software aus diesem Modell eine Punktwolke des Objektes und ein Oberflächenmodell als Dreiecksvermaschung aus diesen Punkten.

Abschließend werden die fotografischen Bilder als Textur auf das fotogrammetrisch berechnete 3D-Modell projiziert. Es entsteht ein fotorealistisches 3D-Modell als Abbildung des Bauwerkes bzw. Bauteils. Die Verknüpfung von einzeln erfassten Bauteilen zu einem Gesamtmodell, ist ebenfalls möglich. Die folgenden Bilder zeigen den in vier Schritten erfolgten Arbeitsablauf exemplarisch auf (Bild 7).

Thermalsoftware

Für die Kalibrierung und Optimierung der Infrarot-/Thermaldaten, stehen abhängig vom Hersteller und vom System entsprechende Spezialanwendungen zur Verfügung. Diese Anwendungen dienen dazu, ähnlich wie bei den Rohdaten von Kamerasystemen zur Aufnahme des sichtbaren Lichtes, die auf dem Sensor aufgenommen Originaldaten einzulesen, diese entsprechend der zu betrachtenden Bauteile und Temperaturbereiche zu kalibrieren und für das menschliche Auge interpretierbare Bilder in Form von farblich klassifizierten Temperatur-

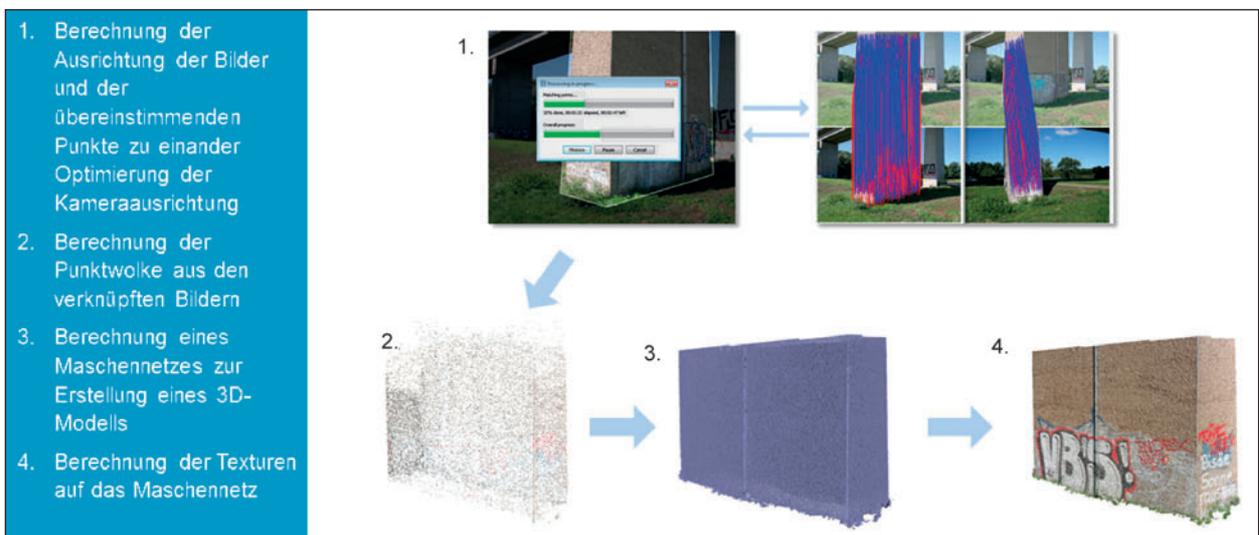


Bild 7: Agisoft Prozessierungsschritte, Quelle: TÜV Rheinland

bereichen auszugeben. Analog zu den Sensoren aus dem Bereich des sichtbaren Spektrums des Lichtes können thermografische Aufnahmen ebenfalls fotogrammetrisch ausgewertet werden.

Bildvorbereitung/Entwicklung

Es stehen mehrere Softwareprodukte auf dem Markt zur Verfügung, welche das Auslesen der Bilder aus der Kamera und eine Optimierung/Entwicklung der Bilder/Sensordaten aus den Rohdaten ermöglichen. Im Falle fotografischer Aufnahmen, wird bei den Kamerasystemen durch die Hersteller zumeist eine Software zum Auslesen, Sortieren und Entwickeln der RAW-Daten mitgeliefert.

6.3 Eingesetzte Sensoriken und Systeme

Im Rahmen der Bauwerksbefliegung kamen die im Folgenden genannten Sensoriken zum Einsatz und wurden seitens des UAS-Betreibers vorgegeben. Mit seiner Auswahl legte der Betreiber Wert auf ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Aufnahmequalität, Gesamtgewicht des bildgebenden Systems und der Bedienbarkeit.

6.3.1 Fotografische Aufnahmesysteme im Bereich des sichtbaren Lichts

Fotografische Aufnahmesysteme können für den Menschen sichtbares Licht von ca. 0,4 bis 0,7 μm Wellenlänge (ALBERTZ 1986, S. 11) auf dem elektromagnetischen Spektrum aufnehmen. Da dieses Verfahren reflektierendes Licht von Objekten aufnimmt, arbeitet es passiv und ist somit zerstörungsfrei gegenüber dem aufzunehmenden Objekt.

Die folgenden Aufnahmesysteme wurden für die detaillierte Bauwerksbetrachtung und Inspektion ausschließlich zur Erstellung von Einzelbilddaten eingesetzt. Es kamen die folgenden Kamerasysteme zum Einsatz:

Sony Alpha 7R

Sensor: CMOS 36 x 24 mm (Vollformat/Kleinbild), 7.360 x 4912 Pixel (36 MP)

Diese Kamera ist ein häufig eingesetztes Serienmodell, welches ein geringes Eigengewicht mit sehr guten Bildergebnissen verbindet. In der Kamera ist kein Tiefpassfilter eingebaut und erhöht so nochmals das Schärfepotenzial der Aufnahmen.

Sony Alpha 7R II

Sensor: CMOS 36 x 24 mm (Vollformat/Kleinbild), 7.952 x 5.304 Pixel (42,4 MP)

Diese Kamera ist der Nachfolger der o. g. Alpha 7R und bietet eine verbesserte Auflösung sowie einen stabilisierten Sensor, jedoch hat sie auch ein Mehrgewicht von 150 Gramm. In der Kamera ist kein Tiefpassfilter eingebaut, dadurch erhöhen sich nochmals das Schärfepotenzial und der Detailgrad der Aufnahmen.

Mit diesem System wurden die Aufnahmen für die fotogrammetrische Auswertung erstellt:

Sony Alpha 5100

Sensor: APS-C 23,6 x 15,8 mm, 6.000 x 4.000 Pixel (24 MP)

Diese Kamera ist als besonders leichtes Sensorsystem mit kleinerem Sensor gut für Fotogrammetrie geeignet. Die entstehenden Bilder sind kleiner (Datenmenge) und daher leichter zu handhaben. Für eine präzise visuelle Inspektion sind Daten aus Vollformat-Systemen vorzuziehen.

GoPro HERO 4

Sensor: 5,75 x 4,28 mm, 3.840 x 2.160 Pixel (4K) im Videobetrieb

Dieses Sensorsystem wird in Kombination mit der im Folgenden beschriebenen Optris PI 640 eingesetzt, um parallel zu den thermografischen Daten auch Echtdatendaten zu erheben. Diese erlauben eine vereinfachte Referenzierung und Auswertung sowie eine einfachere Orientierung des Kameramann bzw. Bauwerksprüfers.

6.3.2 Thermografische Aufnahmesysteme im Spektralbereich der thermalen Strahlung

Optris PI 640 lightweight

- Optische Auflösung: 640 x 480 Pixel,
- Temperaturbereiche:
 - -20 °C bis 100 °C,
 - 0 °C bis 250 °C,
 - 150 °C bis 900 °C,
 - von -20 °C bis 900 °C,
- Spektralbereich: 7,5 bis 13 μm ,
- Bildwiederholungsfrequenz: 32 Hz,

- Optiken (FOV):
 - 33° x 25° FOV/f = 18,7 mm oder
 - 15° x 11° FOV/f = 41,5 mm oder
 - 60° x 45° FOV/f = 10,5 mm oder
 - 90° x 66° FOV/f = 7,3 mm,
- Thermische Empfindlichkeit (NETD): 75 mK,
- Systemgenauigkeit: ± 2 °C oder ± 2 %,
- Umgebungstemperatur (TUmng): 0 °C bis 50 °C,
- Lagertemperatur: -40 °C bis 70 °C,
- Relative Luftfeuchtigkeit: 20-80 %, nicht kondensiert,
- Gehäuse (Größe/Schutzklasse): 46 mm x 56 mm x 90 mm/IP 67 (NEMA 4),
- Gewicht: 320 Gramm.

Die Kamera zeichnet thermografische Daten als radiometrisches Video im ravi-Format auf. Die Parameter für den Temperaturbereich und die grafische Darstellung lassen sich individuell und den Befliegungsbedingungen entsprechend einstellen. Durch die hohe Bildfrequenz sind stabile und präzise Aufnahmen möglich.

6.3.3 UAV-interne Sensoriken

GPS, IMU, Magnetometer

Innerhalb des UAVs sind satellitengestützte Positionierungs-Systeme (GNSS, Global Navigation Satellite System) sowie Lage- und Beschleunigungssensoriken (IMU/Inertial Measuring Unit) und ein Magnetometer (Kompass zur Ausrichtungssteuerung) verbaut worden. Diese unterstützen das UAV bei der Navigation und der Stabilisierung.

6.4 Eingesetzte Software

Nahbereichsfotogrammetrie

Aufgrund der Kontrolle über die Bilddaten und der Möglichkeit, manuell in die verschiedenen Arbeitsschritte einzugreifen und Korrekturen vorzunehmen, schieden Online-Anbieter für diese Dienste aus. Darüber hinaus fiel die Auswahl bedingt durch das allgemeine positive Handling und die kurze Einarbeitungszeit auf das Produkt Agisoft Photoscan.

Bildentwicklung

Es empfiehlt sich für qualitativ hochwertige Ergebnisse die zuvor genannte Bildoptimierung mit Agisoft Photoscan durchzuführen und damit eine deutliche Verbesserung des Detailgrades gegenüber den kameraintern erstellten JPGs zu erreichen.

Bei allen Arbeitsschritten ist immer darauf zu achten, dass keine umfangreichen geometrischen Optimierungen wie Entzerrungen an den Bilddaten vorgenommen werden, da ansonsten die fotogrammetrische Auswertung keine hinreichenden Ergebnisse liefert.

Für die Entwicklung des herstellerspezifischen RAW-Formats wurden die folgenden Produkte verwendet:

- Image Data Converter (Sony),
- RAWTherapee (Opensource, Freeware).

Thermalbildentwicklung

Bei der Entwicklung und Kalibrierung der Thermal-aufnahmen wurde die Software des Herstellers Optris eingesetzt:

- Optris PI Connect.

6.5 Zu beachtende Besonderheiten

Die Bildqualität reduziert sich mit jedem Arbeitsschritt. Die Datenmenge dagegen entwickelt sich in umgekehrter Weise.

Die 3D-Modellberechnungen nach dem SfM-Verfahren setzen grundsätzlich leistungsstärkere Computerarbeitsplätze voraus. Um eine sehr detaillierte und genaueste 3D-Modelldarstellung zu erreichen, die mit den höchstmöglichen einstellbaren Qualitätsstufen innerhalb des SfM-Verfahrens erreichbar sind, sind sehr leistungsfähige und gut ausgestattete Computerarbeitsplätze erforderlich. Auch die weitere Darstellung und Verarbeitung setzt in diesen Fällen gut ausgestattete Computerarbeitsplätze voraus. Die Datenmengen steigen bei solch umfangreicheren Projekten schnell in den GB (Gigabyte) Bereich. An dieser Stelle muss es eine Balance zwischen Datenmenge, optischer und quantitativer Qualität, der Rechneranforderungen sowie dem Einsatzzweck gefunden werden (reine Darstellung, Auswertung grober oder detaillierter Dokumentation).

Neben dem gerenderten 3D-Modell kann in den Programmsystemen immer auf die Originaldateien zurückgegriffen werden. Insbesondere eine Auswertung von Details, wie z. B. kleine Risse, Volumenberechnungen oder Vermessungen (nach Kalibrierung) von Löchern, Spalten, Abplatzungen etc. ist mit dieser Auswertungsmethode möglich.

Neben der Erstellung von 3D-Modellen, ist auch die Erstellung und Bearbeitung von entzerrten zusammengerechneten Orthofotos (eine verzerrungsfreie und maßstabsgerechte Darstellung der Erdoberfläche) möglich. Hierbei wird die Oberfläche des Objektes flächig als Bildverbund dargestellt.

Durch eine Orientierung des Modells im Raum und Zuweisung von realen Koordinaten kann im Programmsystem das Objekt vermessen werden (Volumen, Flächen, Maße).

Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Produkte ermöglichen nach Abschluss der Arbeiten einen Export der Daten. So können die 3D-Daten beispielsweise (als einfachste Möglichkeit) im Adobe PDF-E Format zur weiteren Auswertung und Dokumentation/Kennzeichnung der Schäden ausgegeben werden. Darüber hinaus können die Daten auch an CAD/BIM-Softwaresysteme zur weiteren Verarbeitung ausgegeben bzw. exportiert werden.

Es ist zu beachten, dass bei einem Export insbesondere von Bilddaten immer eine Komprimierung und damit eine Qualitätsreduzierung der Ausgangsdaten erfolgt.

In den verfügbaren Programmsystemen kann jedoch keine umfangreiche Erfassung und Speicherung sowie Einzeichnung von Schäden vorgenommen werden, wie sie nach den Anforderungen zur Dokumentation von Bauwerksschäden durchzuführen sind. Die Systeme sind erwartungsgemäß nicht dafür optimiert Bauwerksprüfungen zu dokumentieren. Die Dokumentation kann jedoch z. B. sehr gut innerhalb des Acrobat Readers im 3D-Modell vorgenommen werden. Hier ist es möglich, die Schäden einzzeichnen und die zugehörigen Sichten und Maßstäbe rekonstruierbar dauerhaft zu speichern.

Um optimale Ergebnisse im Bereich der fotogrammetrischen Auswertesoftware zu erhalten, empfiehlt es sich folgende Regeln und Kennwerte zu beachten:

- Aufnahmen erfolgen parallel im kamerainternen JPG- und RAW-Format,

- JPGs für die schnelle Durchsicht und Vorselektierung (Vollständigkeit, Überlagerung, Bildausschnitt und Bildqualität, Überlappung) der weiter zu verarbeitenden RAWs (evtl. auch zur Erstellung eines schnellen, ersten 3D-Modells),
- selektierte RAWs für anschließende Optimierung der Bildqualität (Schärfe, Kontrast, Helligkeit, Gammawerte, Weißabgleich, Helligkeitsanpassung) zur Schadensauswertung und fotogrammetrischen Weiterverarbeitungen durch entsprechende Software (z. B. Agisoft PhotoScan),
- Belichtungsreihen (-1, 0, +1 Blende) in lichtkritischen Situationen,
- Verschlusszeiten von 1/800 sek oder kürzer zur Reduzierung der Verwackelungsgefahr, die durch systembedingte Vibrationen und Abweichungen der Position entstehen können,
- Reduzierung des Auto-ISO-Wertes auf ein vertretbares Minimum (Kamerasystemabhängig, Alpha 7R II z. B. 800 ISO). Hiermit wird einem zu starken Bildrauschen entgegengewirkt, was ansonsten zu einem Verlust von Bildinformationen führen würde.
- Für eine digital fotogrammetrische Weiterverarbeitung der Bilddaten können folgende Lichtsituationen maßgeblich negative Einflüsse haben: spiegelnde/glänzende Oberflächen wie Glas oder polierte Bauwerksverkleidungen, dunkle Bildbereiche wie Schattenseiten und schlecht einsehbare Bereiche und unter Umständen auch glatte bzw. unstrukturierte Oberflächen.

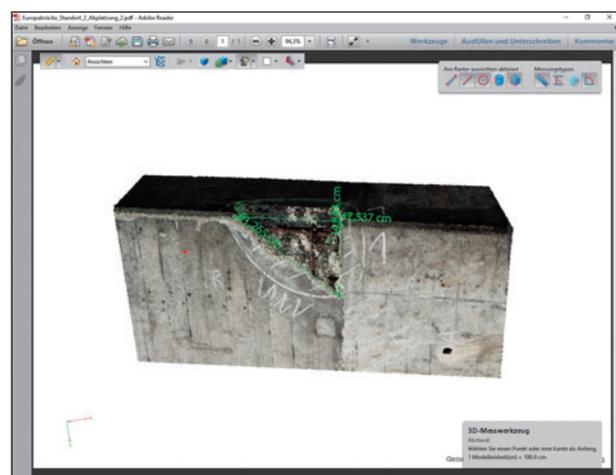


Bild 8: 3D-PDF mit Messung des Ausmaßes der Abplatzungen, Quelle: TÜV Rheinland unter der Verwendung der Software Agisoft PhotoScan Version 1.2

- Kontinuierliche Aufnahmezeilen, keine Einzelbildersammlungen, erleichtern die räumliche Zuordnung und die geschlossene Weiterverarbeitung bei der 3D-Modellierung.
- Aufnahme des Objektes oder Bauwerkes sollten für fotogrammetrische Bearbeitungen nach Möglichkeit im 90° Winkel zum Objekt (Paralle-

lität von Sensorfläche zur Bauwerksoberfläche) erbracht werden. Fortlaufende Aufnahmen sollten durch Änderung des Standortes und nicht des Aufnahmewinkels erstellt werden. Diese Vorgabe sieht ebenfalls das Handbuch der fotogrammetrischen Software Photoscan der Firma AgiSoft vor (siehe Bild 9 und 10).

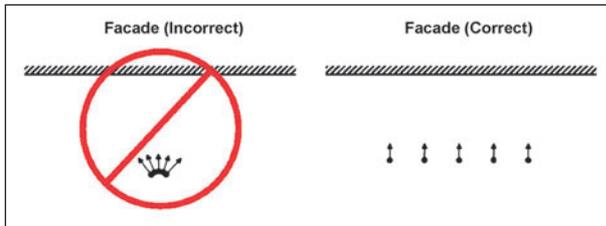


Bild 9: Aufnahmeszenarien 1 – Screenshots aus dem User-Manual von Agisoft PhotoScan, Quelle http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_2_en.pdf, S. 5, 2015-10

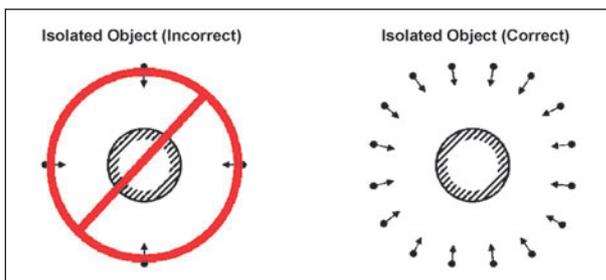


Bild 10: Aufnahmeszenarien 2 – Screenshots aus dem User-Manual von Agisoft PhotoScan, Quelle http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_2_en.pdf, S. 5, 2015-10

7 Ausgewählte Testbauwerke

7.1 Brückenbauarten

Aus Bild 11 und Bild 12 ist zu entnehmen, dass die auf den Bundesfernstraßen deutlich vorherrschende Bauart die in Spannbeton ist, und die größte Anzahl der Bauwerke in den Jahren 1970 bis 1979 errichtet wurden.

Damit das auszuwählende Referenzobjekt bzw. die Referenzprojekte an welchem die Umsetzung erfolgen soll, möglichst repräsentativ ist, sollte es die folgenden Randbedingungen aufweisen:

Bauart: Spannbeton,

Baujahr: 1970-1979.

Darüber hinaus gelten für dieses Pilotprojekt noch weitere Randbedingungen der Referenzbrücke, welche zu berücksichtigen sind:

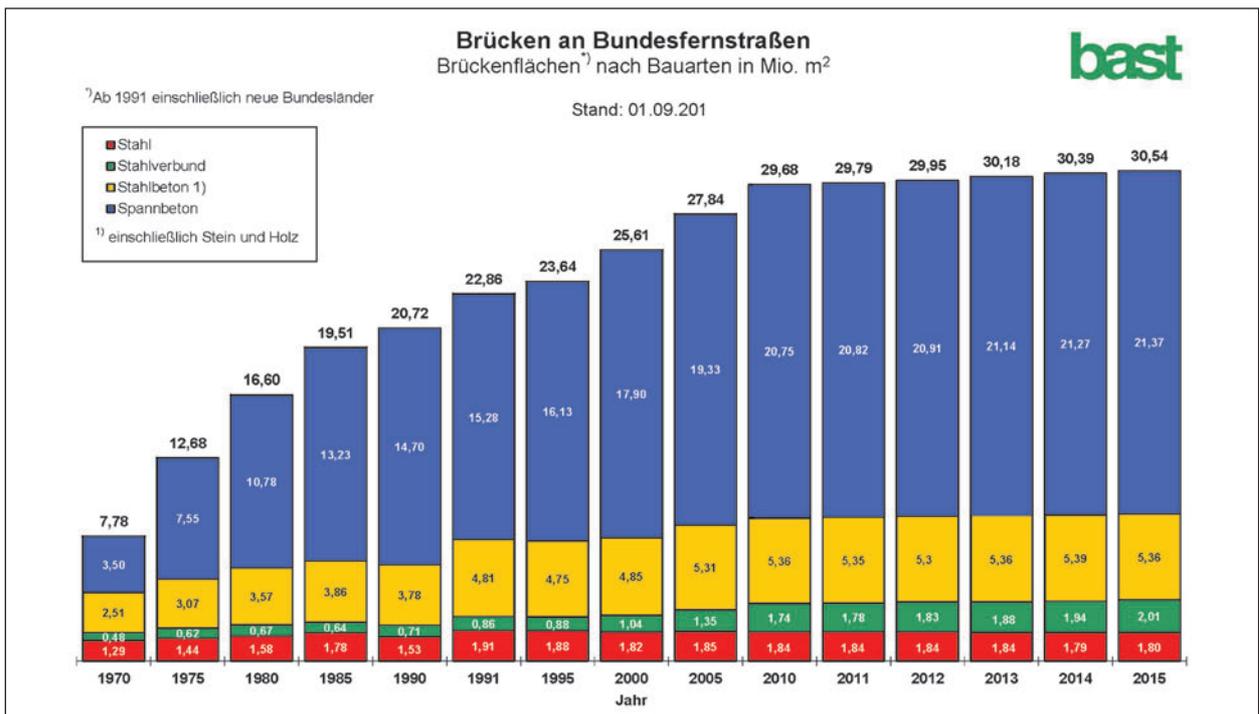


Bild 11: Brückenfläche nach Bauarten, Quelle: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

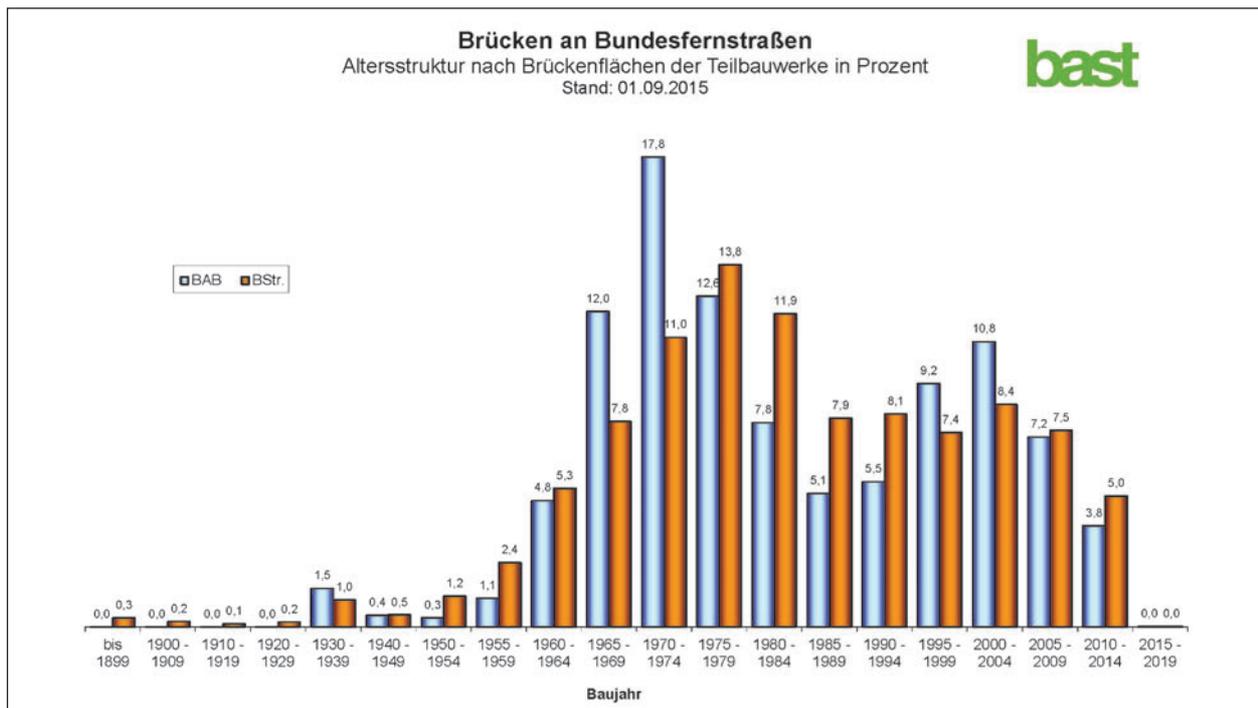


Bild 12: Altersstruktur nach Brückenflächen der Teilbauwerke, Quelle: Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)

- möglichst vielfältige Bauarten und Oberflächenstrukturen,
- ausreichende Platzverhältnisse für die Versuchsdurchführung,
- möglichst keine/geringe Verkehrsgefährdung während der Versuchsdurchführung,
- Genehmigungen und Erlaubnisse müssen im vertretbaren Maß erreichbar sein.

Es wurden folgende drei Bauwerke aufgrund ihrer unterschiedlichen Charakteristika ausgewählt: der Schildescher Viadukt, die Talbrücke Nuttlar sowie die Europabrücke Koblenz. Nachstehend werden diese Bauwerke inkl. ihrer Besonderheiten beschrieben.

7.2 Schildescher Viadukt

Datum Befliegung: 10.09.2015

Baujahr der Brücke: 1840-1985

Art: Kombinierte Gewölbe-/Spannbetonbrücke

Besonderheiten: Bekannte Schäden am Bauwerk

Schwerpunkte: Testen von Abläufen, Sensoren & Flugeigenschaften, Auswerteverfahren zur Vorbereitung Identifizierung von Schäden

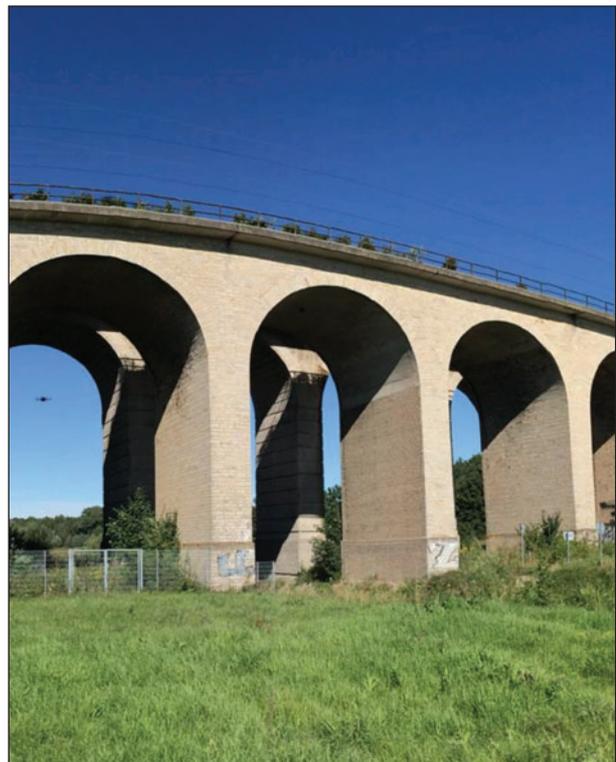


Bild 13: Schildescher Viadukt, Quelle: TÜV Rheinland

7.3 Talbrücke Nuttlar

Datum Befliegung: 02.10.2015

Baujahr der Brücke: Im Bau

Art: Überbau in Stahlverbundbauweise, Stahlhohlkasten mit Stahlbetonplatte

Besonderheiten: Höhe von bis zu 115 Metern

Schwerpunkte: Erreichbarkeit, Fliegerische Aspekte, Auswerteverfahren



Bild 14: Talbrücke Nuttlar, Quelle: TÜV Rheinland

7.4 Europabrücke Koblenz

Datum Befliegung: 23.10.2015

Baujahr der Brücke: 1934-1974

Art: Hohlkastenbrücke sowie Plattenbalken aus Spannbeton,

Besonderheiten: Verschiedene Überbauquerschnitte: Hohlkasten und Plattenbalken, Überspannung der Mosel Hohes Verkehrsaufkommen

Schwerpunkte: Erkennbarkeit/Identifizierung von Schäden, Prüfung im urbanen Bereich (Genehmigungssituation), Workflow, Auswerteverfahren

Dieses Bauwerk entspricht dem im Kapitel „7.1 Brückenbauarten“ ermittelten, repräsentativen Referenzobjekt mit folgenden Randbedingungen: Bauart Spannbeton und Baujahr: 1970-1979.



Bild 15: Europabrücke Koblenz, Quelle: TÜV Rheinland

8 Umsetzung

8.1 Einleitung

Im Rahmen des vorliegenden FE-Projektes wurden die theoretischen Betrachtungen zu Fluggeräten, Sensoren und Möglichkeiten der Bildauswertung anhand der zuvor genannten drei Bauwerke exemplarisch untersucht.

Diese Bauwerke wurden jeweils mit einer Spectair HT-8 C180 Drohne und dem Einsatz unterschiedlicher Sensorik einer exemplarischen Bauwerksprüfung unterzogen. Dabei sollte keine vollständige Auswertung und Begutachtung des Bauwerkes durchgeführt werden, sondern vielmehr der Schwerpunkt auf der Erkennbarkeit von Schäden und Auffälligkeiten durch den UAV-Einsatz unterschiedlicher Sensorik liegen.

Die Zielsetzung kann wie folgt fixiert werden:

- Minimierung des Aufwands (z. B. bei Eingriffen in den Straßen und Eisenbahnverkehr und der Schifffahrt),
- Erreichbarkeit schwer zugänglicher oder unzugänglicher Bauteile (Minimierung des Einsatzes von Hilfsmitteln zur Durchführung der Prüfung),
- Optimierung durch:
 - Kombination von digitaler Bilderfassung und Bildauswertung,
 - Selektierung intensiver und weniger intensiv zu prüfender Bereiche,
- zusätzlicher Nutzen bei der Schadenerkennung und -bewertung (Einsatz unterschiedlicher Erfassungsgeräte),
- Verwendung von kombinierten, multispektralen Sensorsystemen,
- Erstellung detaillierter Schadensbilder zur Analyse, mit HD-Oberflächenauflösung (Skalierung und Referenzierung der Ergebnisse anhand fotogrammetrischer bzw. sonstiger Techniken).

8.1.1 Fliegerische Aspekte

Unabhängig vom Brückentyp waren die größten Herausforderungen der verschiedenen Befliegungen die Windverhältnisse am Objekt. Brückenbauwerke stellen aerodynamisch sehr komplexe Gebilde dar.

Zum einen stehen Brücken an exponierten Stellen, in der Regel ein Tal o. Ä. überspannend. Dieser Umstand bedeutet, dass selbst bei moderaten Windbedingungen der Wind am Bauwerk i. d. R. relativ stark ist (Düseneffekt aufgrund der Topografie).

Dieser starke Wind trifft nun auf das Bauwerk und wird an verschiedenen Punkten des Bauwerks verwirbelt, beschleunigt oder gestaut. Entsprechend entstehen starke Druck- und Sog-Effekte.

Da ein Einsatz zur Inspektion an einer Brücke eine relative Nähe zum Objekt (ca. 5 m) erfordert, ist das Fluggerät von diesen lokal schnell wechselnden Verhältnissen unmittelbar beeinflusst.

Dies stellt hohe Anforderungen bzgl. der Windstabilität des Fluggerätes sowie der Fähigkeiten des Piloten. Gleichzeitig beschränkt es die möglichen Wetterbedingungen, bei denen ein entsprechender Einsatz am Bauwerk möglich ist.

Auch bei den erfolgten Kollisionen spielten die lokalen Strömungsverhältnisse an der Brücke eine Rolle.

Für Brückenbefliegungen ist es erforderlich, dass sich das Fluggerät teilweise in relativ großer Distanz (> 50 m) zum Piloten befindet. In dieser Entfernung ist der Pilot teilweise nicht mehr in der Lage, die Position des Fluggerätes in der Tiefe exakt abzuschätzen. Hierfür wird teils auf das Kamerabild bzw. auf koordinierende Kommandos des Kamera-Operators zurückgegriffen.

Zukünftig wird ein Verfahren erwogen, bei dem zwei Piloten gemeinsam steuern, um das Problem der Tiefenwahrnehmung zu eliminieren. Genauere Ausführungen dazu befinden sich in Kapitel 12.

Ein besonderer Aspekt der Brückenbefliegung ist, dass der Pilot (im Unterschied zu herkömmlichen Befliegungen) den GPS-gestützten Flugmodus teilweise nicht anwenden kann, da das GPS Signal an bzw. unter der Brücke zu stark gestört wird (Abschirmung, Reflexion). Demnach muss der Pilot komplett manuell (oder nur mit Höhensensor) fliegen, was sich im Hinblick auf die o. g. Bedingungen als „besonders anspruchsvoll“ (und damit auch relativ zeitintensiv) beschreiben lässt.

Seitenbereiche einer Brücke sind i. d. R. am einfachsten zu befliegen.

Die Stützpfeiler sind ebenfalls relativ einfach zu befliegen, sofern der Pilot sich am Fuße dieser positionieren kann.

Am kompliziertesten ist die Befliegung der Unterseite einer Brücke. Hier herrschen starke Winde und es muss in jedem Fall manuell geflogen werden.

8.2 Umsetzungsprozess

8.2.1 Einleitung

Der Ablauf eines Projektes gliedert sich, wie Bild 16 zeigt, in vier wichtigen Projektphasen:

1. Vorbereitung,
2. Befliegung,
3. Datenverarbeitung und
4. Auswertung der Ergebnisse.

Im Folgenden werden die Arbeitsschritte für alle folgenden Projekte und Bauwerksprüfungen beschrieben.

8.2.2 Vorbereitung

Datenrecherche/Verfügbare Daten

Im Rahmen der Projektvorbereitung werden die Ziele der Befliegung und Auswertung definiert und die erforderlichen Daten zum Bauwerk recherchiert.

Bei dieser Recherche werden bestehende Pläne, die Anfahrt, wichtige Kenndaten des Bauwerkes, technische Ausführungen sowie die Zugänglichkeit und nicht zuletzt bestehende Prüfunterlagen und CAD Daten zusammengestellt. Parallel wird das

direkte Umfeld des Bauwerkes in die Betrachtungen einbezogen, um eine umfassende Risikobetrachtung und Bewertung im Vorfeld der Befliegung durchführen zu können.

Auch technische Detailinformationen der wichtigen zu untersuchenden Bauteile des Bauwerkes werden recherchiert. Beispielhaft seien hier Verbindungen, Oberflächenbeschichtungen und spezielle Ausprägungen zu nennen. Vorschäden der Bauteile, erkennbare Risse sowie sonstige Schäden werden ebenfalls dokumentiert.

Erstellung Prüfplan

Innerhalb eines Prüfplanes werden neben organisatorischen Aspekten die zu erfassenden Bauteile und Bereiche des Bauwerkes, Details zur Erfassung sowie die Schwerpunkte und Ziele der Datenakquisition festgehalten.

Befliegungsplan

Der Flugplan nimmt die Informationen aus dem Prüfplan auf und übersetzt die Inhalte auf die Sicht des Piloten und den Einsatz des Fluggerätes am Objekt.

Dabei werden die Auswahl des Fluggerätes sowie der Einsatz der jeweiligen Sensorik auf die Aufgabe und Zielsetzung abgestimmt. Neben diesen Inhalten werden alle Beschränkungen und sicherheitsrelevanten Aspekte, die während der Befliegung zu beachten sind und aus der objektbezogenen Risikoanalyse resultieren dokumentiert. Damit kann

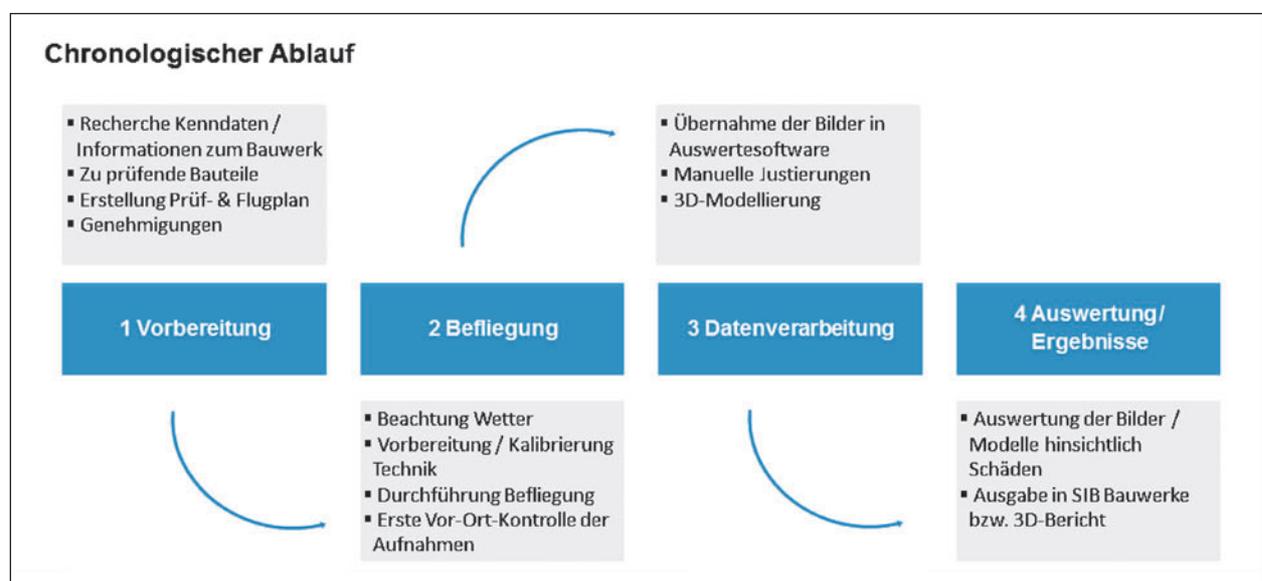


Bild 16: Projektablauf, Quelle: TÜV Rheinland

die Befliegung organisatorisch und technisch optimal vorbereitet werden.

Genehmigung

Mit den Informationen aus dem Prüfplan, dem Flugplan, der internen Risikobewertung und den entsprechenden Sicherungsmaßnahmen wird die Genehmigung (sofern erforderlich) bei den jeweils zuständigen Behörden beantragt:

- Bezirksregierung,
- Ordnungsamt,
- Amt für Verkehrsmanagement,
- Grünflächenamt,
- Deutsche Flugsicherung etc.,
- WSA (Wasser- und Schifffahrtsamt).

Zeitplan

Wenn alle Informationen und Genehmigungen vorliegen, kann die Terminierung der Befliegung erfolgen. Hierzu werden die Wettersituation sowie die am Bauwerk spezifischen Licht- und Sichtverhältnisse berücksichtigt. Bei Thermalaufnahmen ist auch die Einstrahlungsintensität auf das Bauwerk/Bauteil sowie die Entwicklung der Einstrahlung/Temperatur des Bauwerkes vor der Aufnahme zu berücksichtigen. Neben diesen Faktoren, ist auch die Verkehrssituation sowie weitere begrenzende Faktoren wie Zugänglichkeit etc. zu beachten.

8.2.3 Befliegung

Vorbesprechung

Innerhalb des FE-Projektes wurde vor Beginn der Befliegungen vor Ort jeweils eine Besprechung durchgeführt und die Beteiligten in das Bauwerk sowie die zu prüfenden Bauteile und das Umfeld des Bauwerkes eingewiesen (Bild 17). Neben diesen Aspekten sollten in der Besprechung, insbesondere die zu beachtenden Sicherheitsaspekte und die zu treffenden spezifischen Maßnahmen auch zur Verkehrssicherung und Gefahrenabwehr besprochen werden, um Gefahren frühzeitig zu erkennen und abzuwehren.

Vorbereitung/Kalibrierung

Neben der Einrichtung der Sensorik und der Konfiguration der entsprechenden Parameter, erfolgten

ein Systemtest und die Kalibrierung der weiteren Systeme.

Vor dem Start der Befliegung wurde ein geeigneter Start- und Landeplatz ausgewählt. Anschließend wurde dieser entsprechend präpariert. Es wurde eine Plane ausgelegt und entsprechende Sicherheitsvorkehrungen wurden getroffen. Beispielsweise wurden die Begrenzungen des Start- und Landeplatzes durch das Aufstellen von Pylonen als solche kenntlich gemacht.

Am Bauwerk wurden in Abhängigkeit vom Messverfahren, Passpunkte zur späteren Zuordnung und Orientierung der Daten angebracht. Eine Rissbreitentafel mit Maßstab wurde zur Verbesserung der späteren Zuordnung und Einschätzung der Erkennbarkeit von Rissen und Schäden am Bauwerk angebracht.

Nach Abschluss aller Arbeiten erfolgte ein Systemtest und ein anschließender kurzer Testflug.

Zur Vorbereitung gehörte die Aufzeichnung der Temperatur und des Verlaufs, sowie die Einstrahlungsintensität/Beleuchtungssituation am Bauwerk und dessen Umfeld. Neben diesen Parametern erfolgte die Messung der Windgeschwindigkeit vor allem zur Abschätzung von Böen (nur am Boden). Diese Maßnahmen dienen insbesondere der späteren Datenkalibrierung und Einschätzung der Aufnahmeverhältnisse als Metadaten zum Projekt.

Befliegung

Es gibt mehrere Flugphasen. Vor und nach jeder Flugphase sollten die nachstehenden Schritte ausgeführt werden:



Bild 17: Vorbesprechung Europabrücke Koblenz, Quelle: TÜV Rheinland

- Nachkontrolle der Daten, Einstellung der richtigen Kameraparameter,
- Prüfung, ob alle Bauteile in der richtigen Reihenfolge/Perspektive, Detailauflösung und Stereoüberdeckung aufgenommen worden sind,
- Einschätzung der Wetter und Windsituation am Bauwerk,
- Detailaufnahmen/Aufnahmen für fotogrammetrische Auswertungen mit entsprechender Überdeckung 80/50 %.

8.2.4 Datenverarbeitung

Übernahme Bilder/Messdaten

Die Bilder und Daten der Sensoren werden in diesem Arbeitsschritt übernommen und einer teilautomatisierten Validierung/Vorprüfung unterzogen.

Geeignete Bilder werden für die Weiterverarbeitung ausgewählt (siehe Bild 18).

Bilder können in Abhängigkeit des jeweils eingesetzten Fluggerätes direkt mit Lage und Ausrichtungsinformationen visualisiert werden. Damit wird die Vorselektion deutlich erleichtert.

Neben den Bilddaten werden auch die Lageinformationen aus den internen Sensoren des UAVs ausgelesen und gespeichert. Damit kann der Flugtrack zur späteren Dokumentation des Flugpfades visualisiert werden.

Sonstige Messdaten z. B. der Thermalkamera werden ebenfalls ausgelesen, validiert und gespeichert.

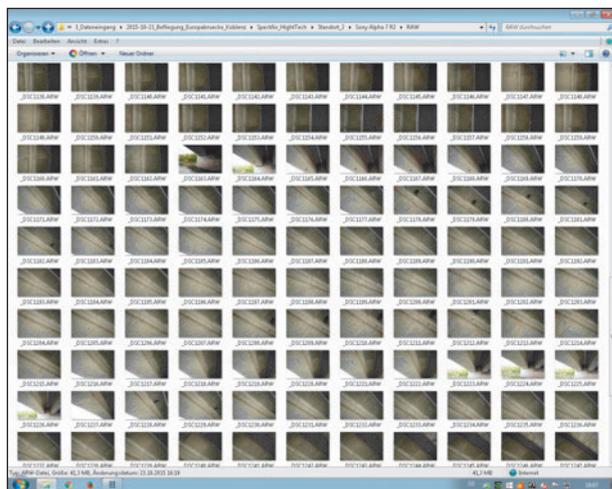


Bild 18: Auswahl geeigneter Bilder (die Thumbs sind ein Screenshot vom Windows 10 (Datei-)Explorer, Quelle: TÜV Rheinland, die Software Windows 10 (Datei-)Explorer, 2016)

Manuelle Nachbearbeitungen/Bildentwicklung

Die Bilddaten werden aus den originalen RAW Dateien ausgelesen und nach spezifischer Optimierung entwickelt. Die Optimierung kann z. B. folgende Prozessschritte beinhalten:

- Schärfe, Kontrast, Helligkeit, Gamma,
- Speicherung im tif-Format.

Insgesamt können die Bilder bei durchschnittlichen Aufnahmebedingungen nach durchgeführter Optimierung und Bildentwicklung eine deutliche Verbesserung der Sichtbarkeit von Details verzeichnen. Dies ist in Bild 19 bei einer Gegenüberstellung eines kamerainternen zu einem aus RAW entwickelten Bildes veranschaulicht. Eine Bildoptimierung wird empfohlen, um optimale Ergebnisse im Bereich der 3D-Modellierung und Schadensauswertung zu erreichen.

3D-Modellierung/digitale Bildverarbeitung

Die Bearbeitung der Bilder erfolgt als nahbereichsfotogrammetrische Auswertung exemplarisch innerhalb des Programmsystems Agisoft Photoscan. Die Software wurde bereits zuvor beschrieben.

Der Ablauf der Verarbeitung innerhalb des Programmsystems findet wie folgt statt (vergleiche auch Bild 7):

1. Schritt „Projekterstellung“

Ein neues Projekt wird erstellt und die vorselektierten und optimierten Bildquellen/Bilddateien werden zu diesem Projekt hinzugefügt.

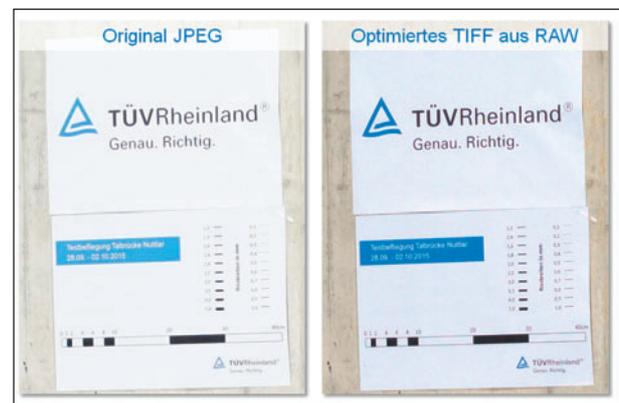


Bild 19: Qualitätsvergleich „Original JPEG/Optimiertes tiff aus RAW“, Quelle: TÜV Rheinland

- 2. Schritt „Alignement“

Mit dem Start dieses Arbeitsschrittes berechnet die Software anhand bekannter, fotogrammetrischer Parameter wie Verzerrungsgrad, Brennweite und Sensorgröße des Kamerasystems, die relative Lage der Kamera und des jeweiligen Bildes im Raum. Dazu werden Verknüpfungspunkte/Passpunkte der Bilder zueinander ermittelt. Sind genügend dieser Passpunkte auf allen Bildern vorhanden, werden die relative Lage und die Passpunkte trigonometrisch miteinander verrechnet. Daraus entsteht eine erste, dünne Punktwolke, aus der im weiteren Verlauf die Bilder zu einem räumlichen Verbund zusammengerechnet werden. Die Software kann diese Arbeitsschritte zwar auch ohne Kenntnisse des realen Kamerastandpunktes (z. B. GPS-Koordinate) ermitteln, allerdings fällt dadurch die Präzision und die Quote verortbarer Bilder mit entsprechend vorhandenen Koordinaten höher aus.

Nicht verort- und verknüpfbare Bilder müssen in separaten Schritten (siehe Nachbearbeitung) beurteilt und nachbearbeitet werden. Dies erfolgt separat als Unterprojekt durch Wiederholung der Arbeitsschritte 1-3. Im Anschluss daran müssen die verschiedenen Teilprojekte wieder zusammengefügt werden.

- 3. Schritt „Punktwolke“

Im weiteren Verlauf wird auf Basis der ersten, dünnen Punktwolke die Berechnung einer sehr viel detaillierteren, dichten Punktwolke durchgeführt (siehe Bild 20 und 21). Die Punkte dieser dichten Punktwolke dienen als Basis für die weitere Erstellung der dreidimensionalen Modelle. Die Auswahl der Qualität zur Berechnung der dichten Punktwolke bestimmt in ihrem Ergebnis sowohl die Genauigkeit der Details einzelner Modellbereiche, als auch die Menge des allgemeinen Datenumfanges bzw. auch die Händelbarkeit der Daten selbst. An dieser Stelle ist eine Abwägung zu treffen, welche Argumente für die weiteren Verwendungszwecke schwerer wiegen.

Nachbearbeitung „Punktwolke“

Zur Nachbearbeitung gehören an dieser Stelle das Zuschneiden und Freistellen der dichten Punktwolke auf die objektrelevante Umgebung. Das Entfernen von zu stark abweichenden bzw. unrealis-

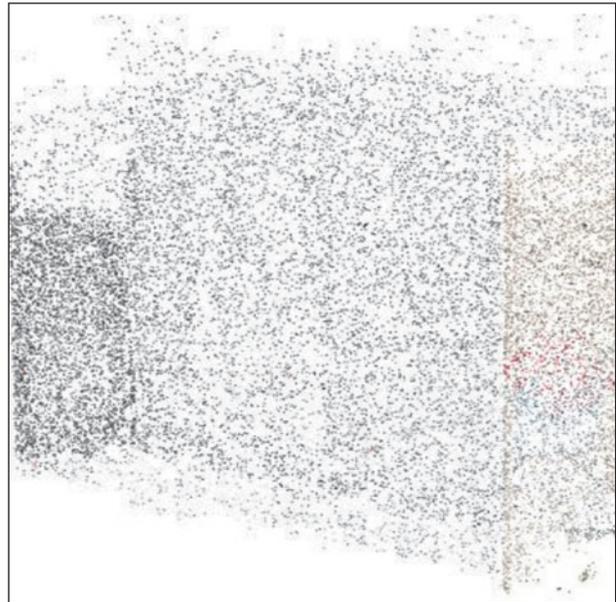


Bild 20: Entwicklung Punktwolke 1 – freigestellte, eigene Ergebnisse aus den fotogrammetrischen Berechnungen der Bilddaten, Quelle: TÜV Rheinland 2015, Software: Agisoft PhotoScan Version 1.2

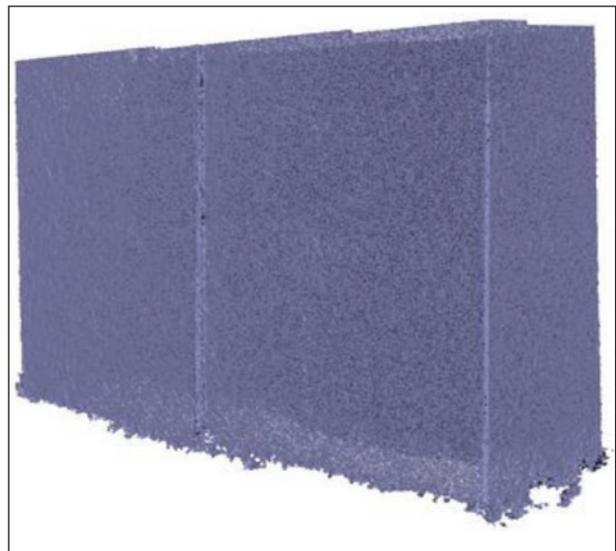


Bild 21: Entwicklung Punktwolke 2 – freigestellte, eigene Ergebnisse aus den fotogrammetrischen Berechnungen der Bilddaten, Quelle: TÜV Rheinland 2015, Software: Agisoft PhotoScan Version 1.2

tischen Punkten und sofern möglich eine Einmessung zur besseren Skalierung.

- 4. Schritt „3D-Visualisierung“

Aus der dichten Punktwolke heraus wird in diesem Schritt die optische Visualisierung vorgenommen. Dazu werden nach Definition verschiedener Para-



Bild 22: 3D-Visualisierung – freigestellte, eigene Ergebnisse aus den fotogrammetrischen Berechnungen der Bild-daten, Quelle: TÜV Rheinland 2015, Software: Agisoft PhotoScan Version 1.2

meter die einzelnen Punkte der dichten Punktwolke zu einem zusammenhängenden Netz aus Dreiecken berechnet (Drahtgitternetz oder auch Dreiecksvermaschung). Auf das fertige, vernetzte Modell werden schließlich die einzelnen Bilder als Textur u einem fotorealistischen Abbild aufgelegt“ (siehe Bild 22).

Nachbearbeitung „3D-Visualisierung“

Eine Nachbearbeitung kann notwendig werden, wenn z. B. Dreiecksverknüpfungen nicht der Wirklichkeit nahe kommen. Dass macht eine manuelle Korrektur erforderlich.

- 5. Schritt „Export“

Nach Beendigung der Modellberechnungen und der letzten Korrekturen steht das Modell bereit zum Export in ein z. B. bearbeitbares Format. Als praktikabel hat sich das PDF-E-Format erwiesen, das in der Lage ist, dreidimensionale Objekte über ein aktuelles PDF-Programm (z. B. den Adobe Acrobat Reader) wiederzugeben und zu editieren (Bild 22).

Der zeitliche Aufwand für die Berechnung eines gesamten Bauwerks oder eines Teilstückes ist sehr stark abhängig von den folgenden vier Faktoren:

1. Anzahl der Aufnahmen (zwischen 9 und einigen hunderten),

2. Qualität der Aufnahmen (Auflösung, Dateigröße),
3. Qualität bzw. Detailgrad der Berechnungen (je Arbeitsschritt gilt es sich für einen von mehreren Detailgrade/Qualitätsgrade zu entscheiden),
4. Rechenkraft der Workstation/des Servers.

Allgemein gilt, je höher die qualitativen Ansprüche desto höher fällt die Rechenzeit aus. Dies kann zwischen einer Stunde (z. B. 9 hochauflösende Bilder und weitere Berechnungen im höchsten Detailgrad) und einigen Tagen (ca. 300 hochauflösender Bilder und weitere Berechnungen im mittleren bis niedrigeren Detailgrad) liegen. Dem kann bis zu einem gewissen Grad mit leistungsstärkeren Computer-Komponenten entgegen gewirkt werden (mehr RAM, höher getaktete CPU, 2 x 6 Core CPUs, Grafikarten-Cluster).

Für unsere Berechnungen setzten wir eine Workstation mittlerer Leistungsstärke mit einem Core i5-3470 @ 3,2 GHz, 16 GB RAM, 250 GB SSD und einer Nvidia GeForce GTX 970 Grafikkarte ein.

- 6. Schadensbewertung und Ausgabe der Daten nach SIB-Bauwerke

Die Auswertung der Ergebnisse wird im nächsten Kapitel beschrieben.

9 Schäden UAS

Im Folgenden werden die an den Testbauwerken identifizierten Schäden dargestellt.

Anschließend erfolgt eine Zusammenstellung über eine allgemeine Einschätzung der Identifizierbarkeit von Schäden.

9.1 Schildescher Viadukt

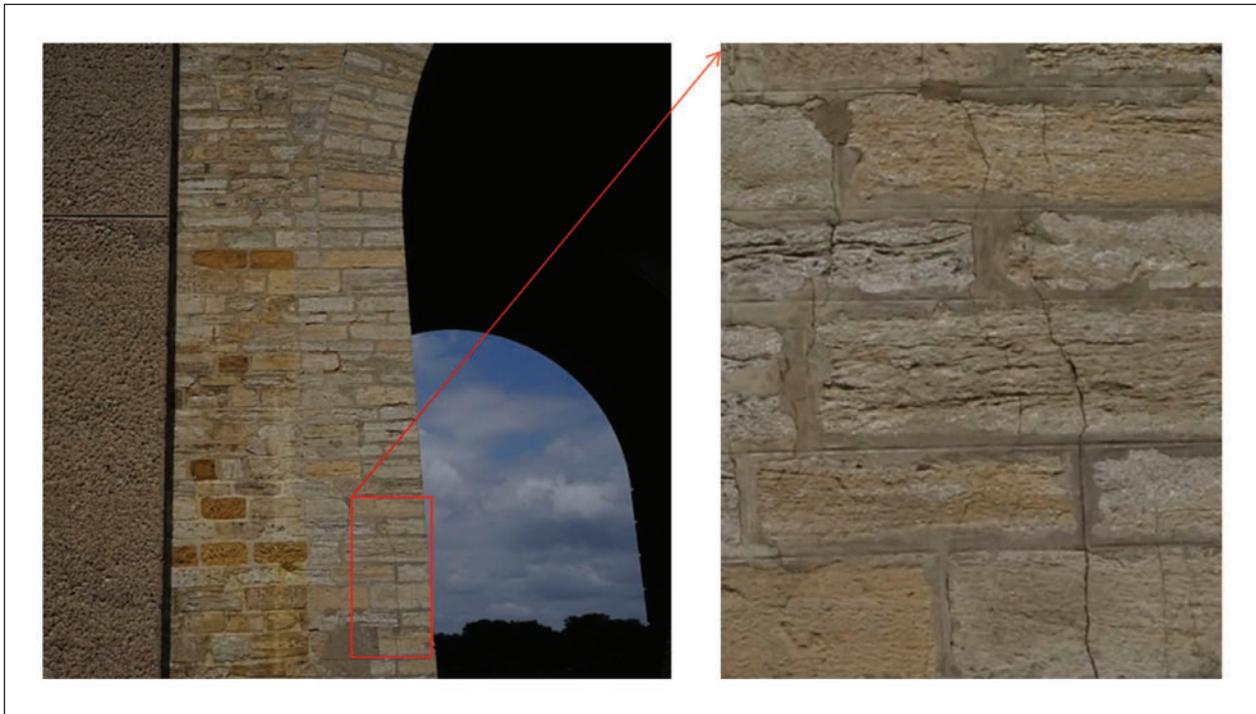


Bild 23: Bogenbrücke – Pfeiler mit Natursteinverkleidung, Risse durch Steine und Mauerwerksfugen, Quelle: TÜV Rheinland



Bild 24: Bogen, Scheitel, Stirnseite – Risse durch Steine und Mauerwerksfugen, Quelle: TÜV Rheinland

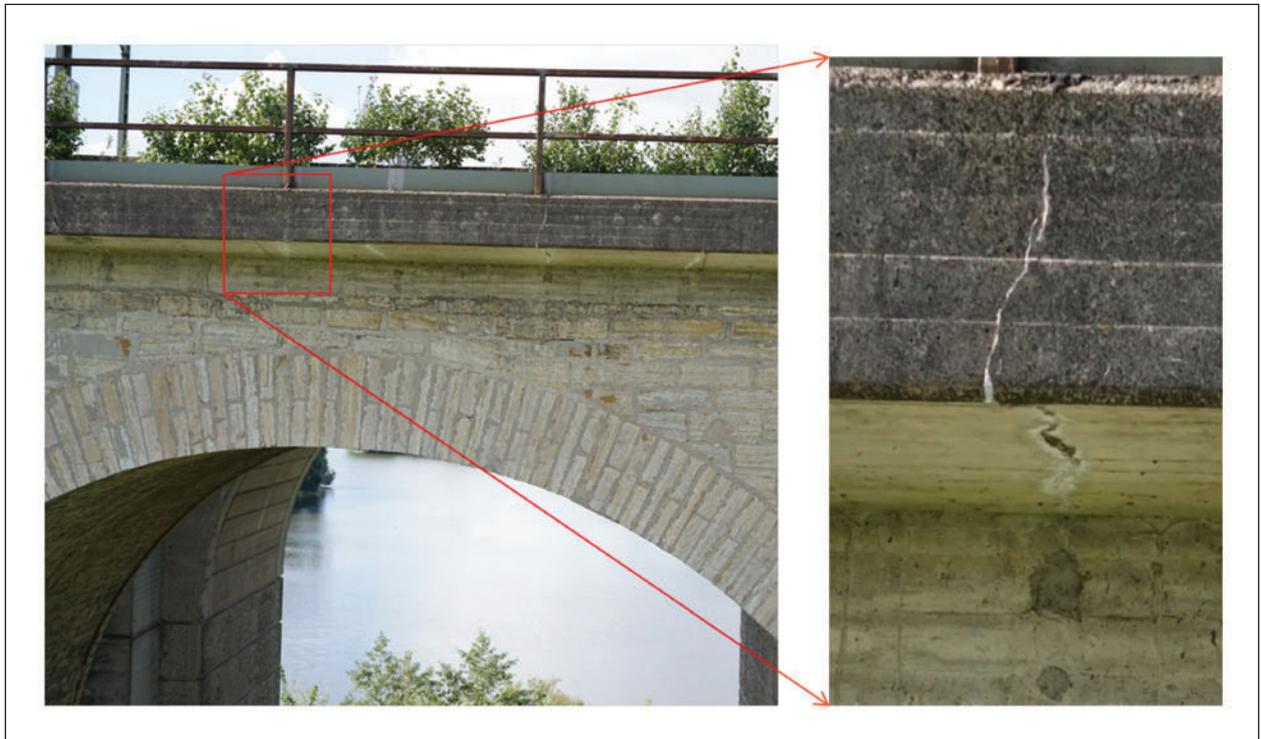


Bild 25: Kappe: Stirn- und Unterseite Risse mit Aussinterung, Quelle: TÜV Rheinland

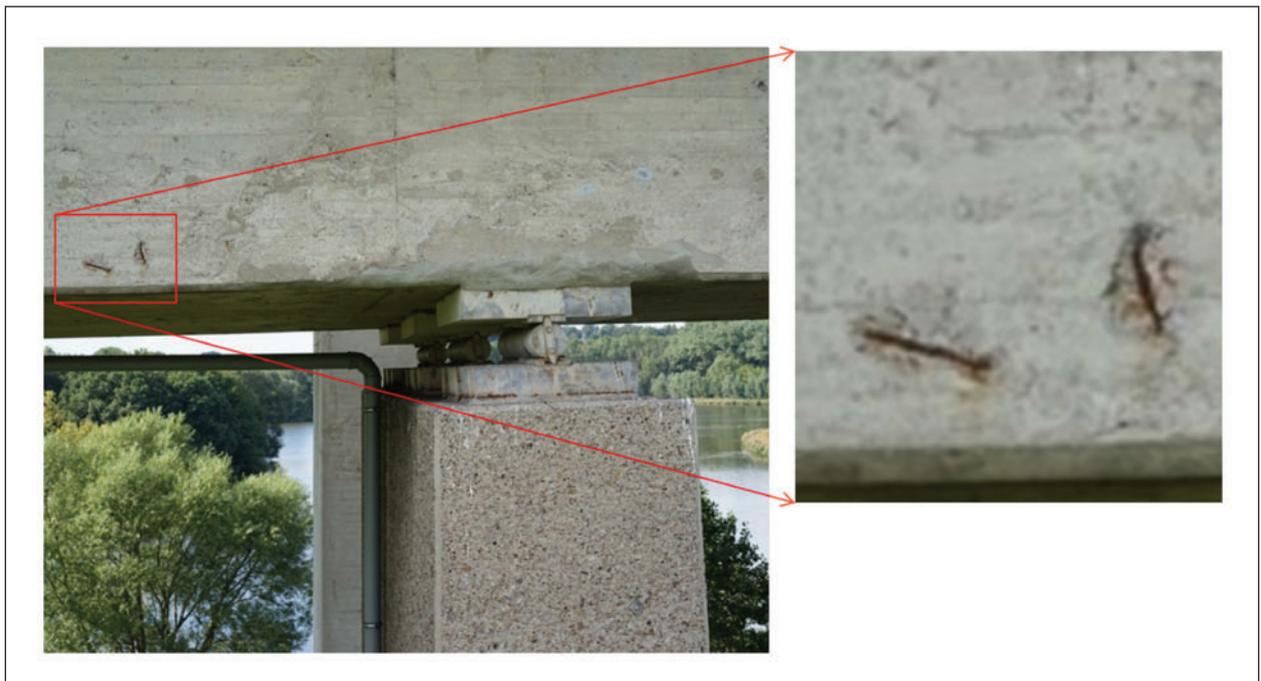


Bild 26: Plattenbalkenbrücke – Balken/Hohlkasten: Seitenfläche Betonabplatzung mit freiliegender, korrodierender Bewehrung, Quelle: TÜV Rheinland

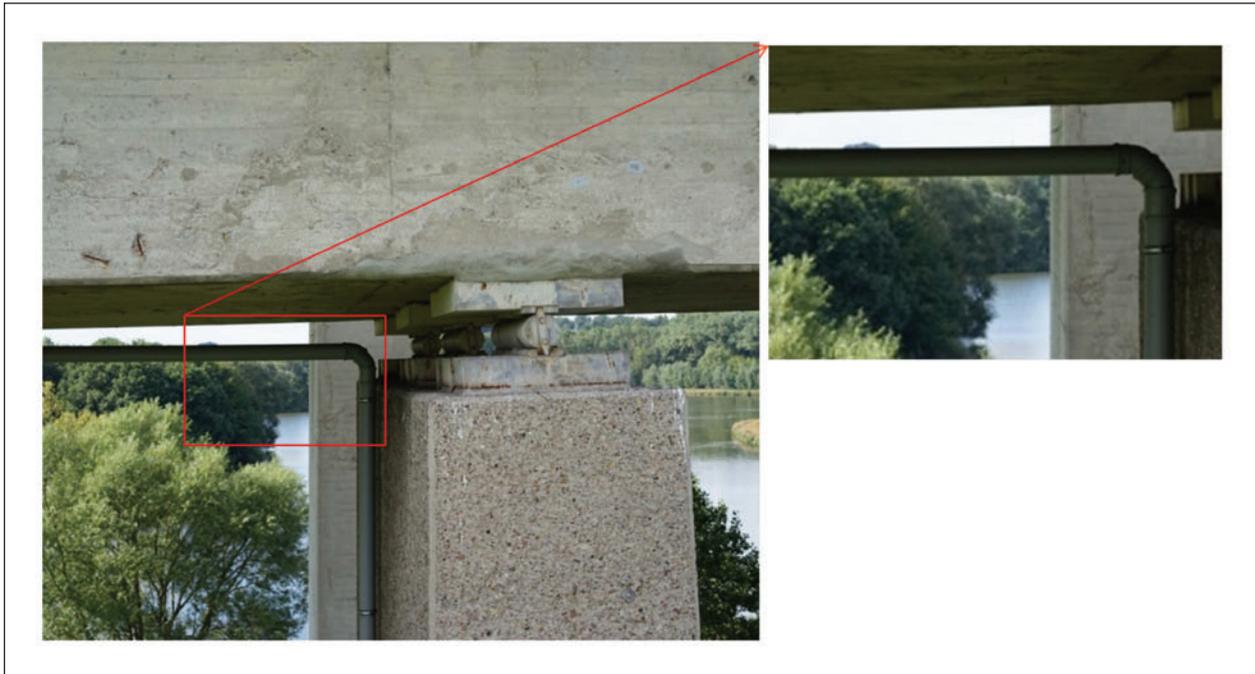


Bild 27: Plattenbalkenbrücke Bauwerksentwässerung – Es ist erkennbar, dass Leitungsmaterial und Befestigung nicht dem Regelwerk/ZTV-ING entsprechen. Weiterhin ist die fehlende elastische Rohrverbindung zwischen Über- und Unterbau erkennbar, Quelle: TÜV Rheinland

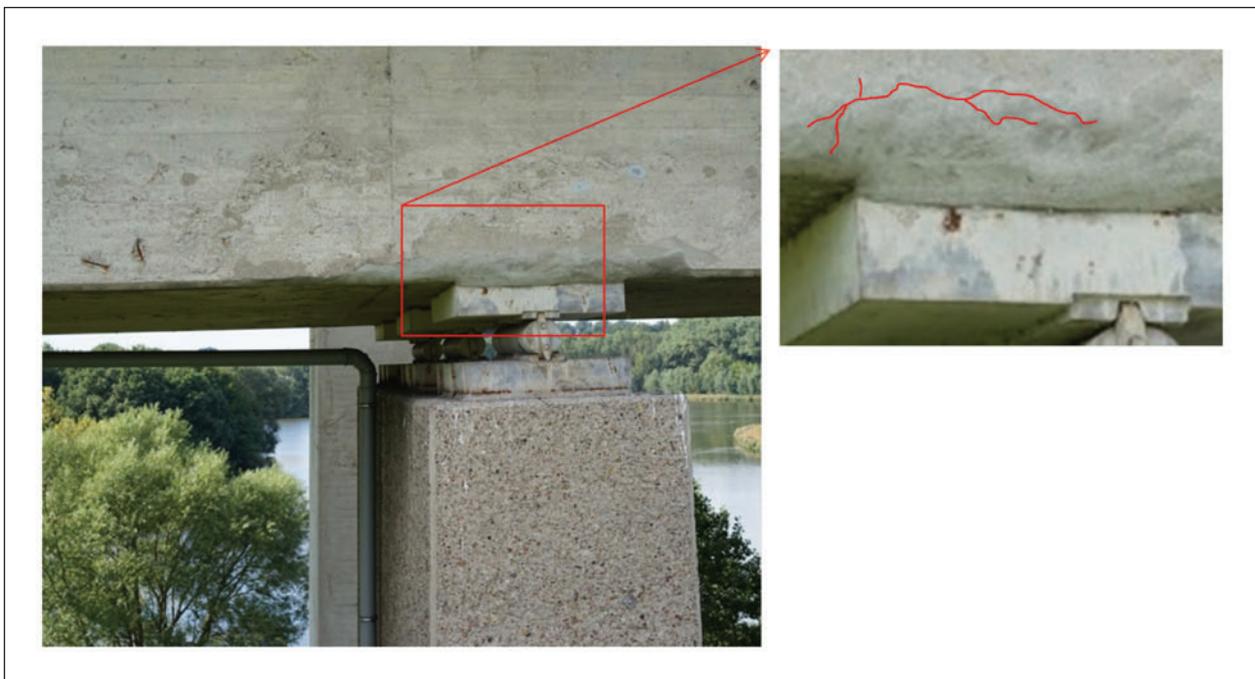


Bild 28: Plattenbalkenbrücke – Reparaturfläche/Betonersatzsystem: Haarrisse, Quelle: TÜV Rheinland

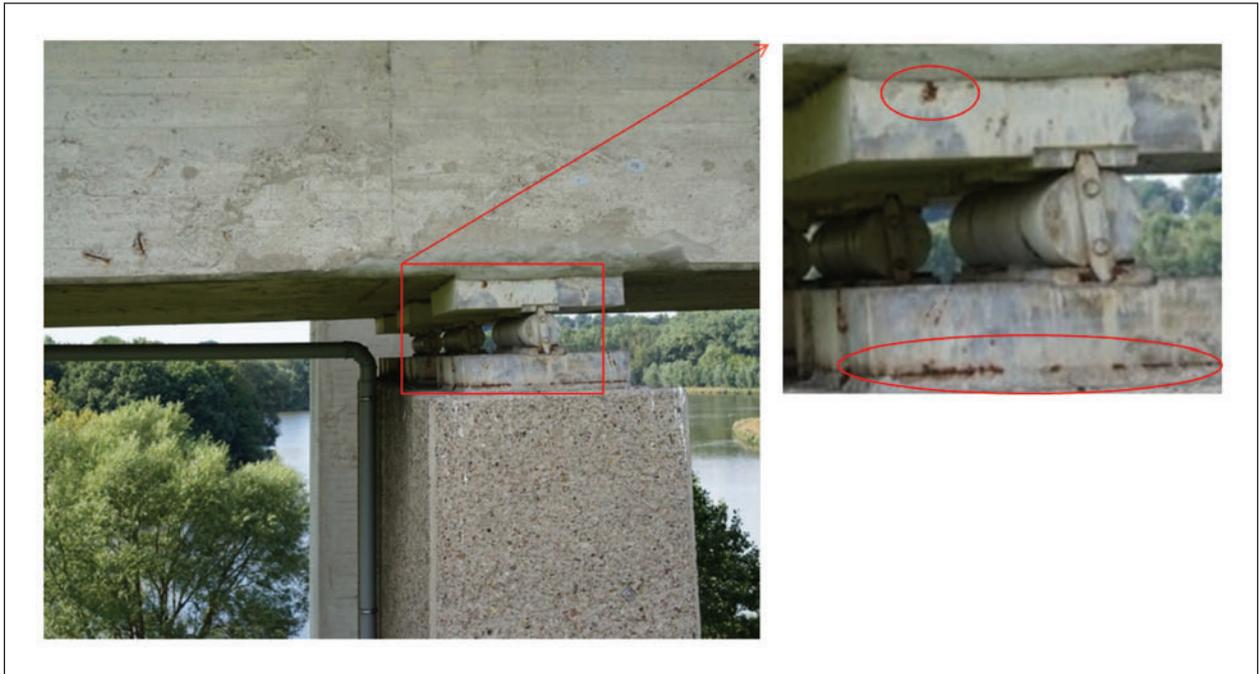


Bild 29: Lagerplatten oben und unten mit beginnender Korrosion. Rollenlager soweit einsehbar ohne augenscheinlichen Befund, Quelle: TÜV Rheinland

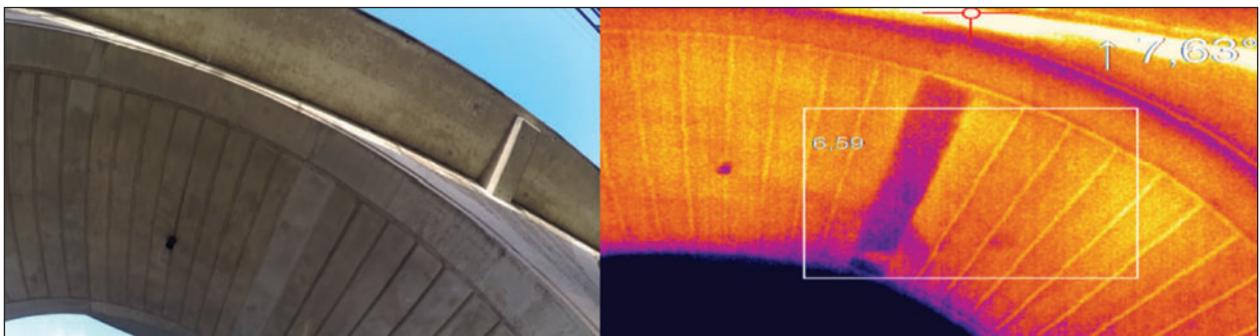


Bild 30: Bogenbrücke – Thermografie-Aufnahmen. Anomalien werden besser erkennbar, z. B. aufgrund von Feuchtigkeit oder unterschiedlichen Baumaterialien (im Bild: Reparaturmörtel der Betonsanierung), Quelle: TÜV Rheinland

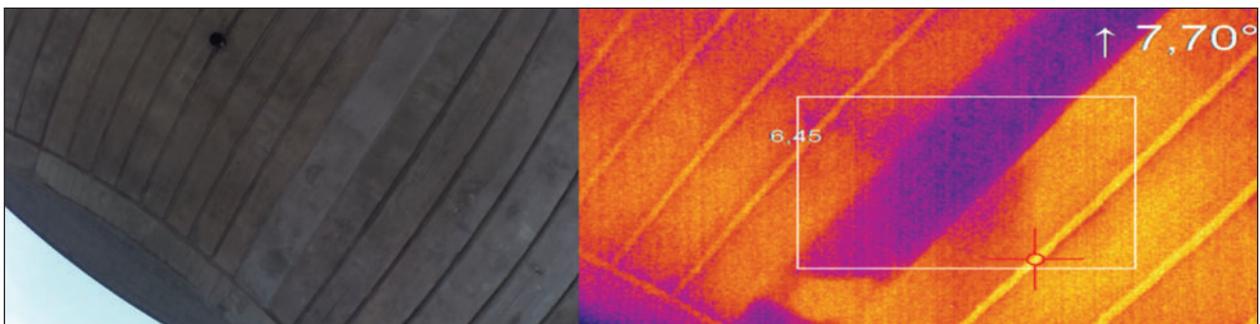


Bild 31: Bogenbrücke – Thermografie-Aufnahmen. Anomalien werden besser erkennbar, z. B. aufgrund von Feuchtigkeit oder unterschiedlichen Baumaterialien (im Bild: Reparaturmörtel der Betonsanierung), Quelle: TÜV Rheinland

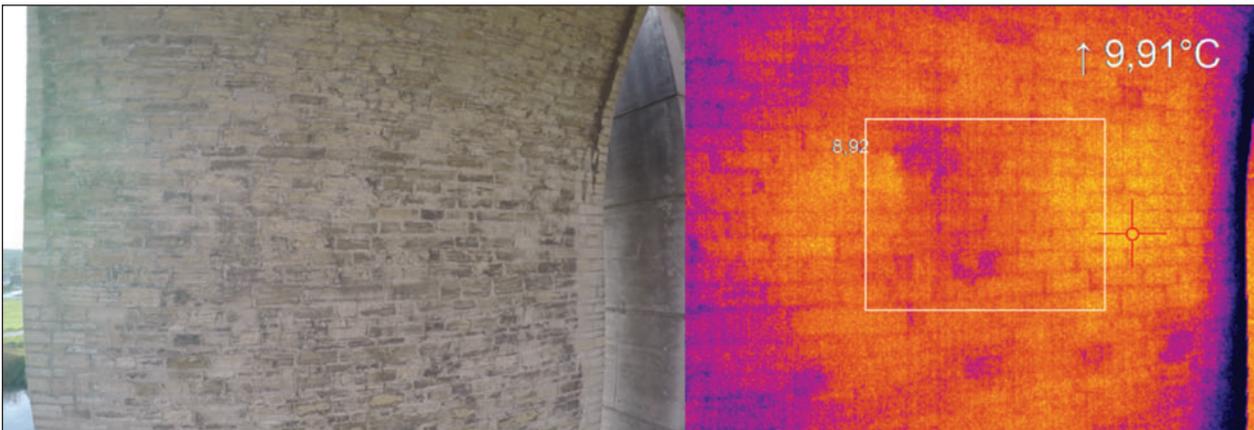


Bild 32: Bogenbrücke – Thermografie-Aufnahmen. Anomalien werden besser erkennbar, z. B. aufgrund von Feuchtigkeit oder unterschiedlichen Baumaterialien, Quelle: TÜV Rheinland

9.2 Talbrücke Nuttlar

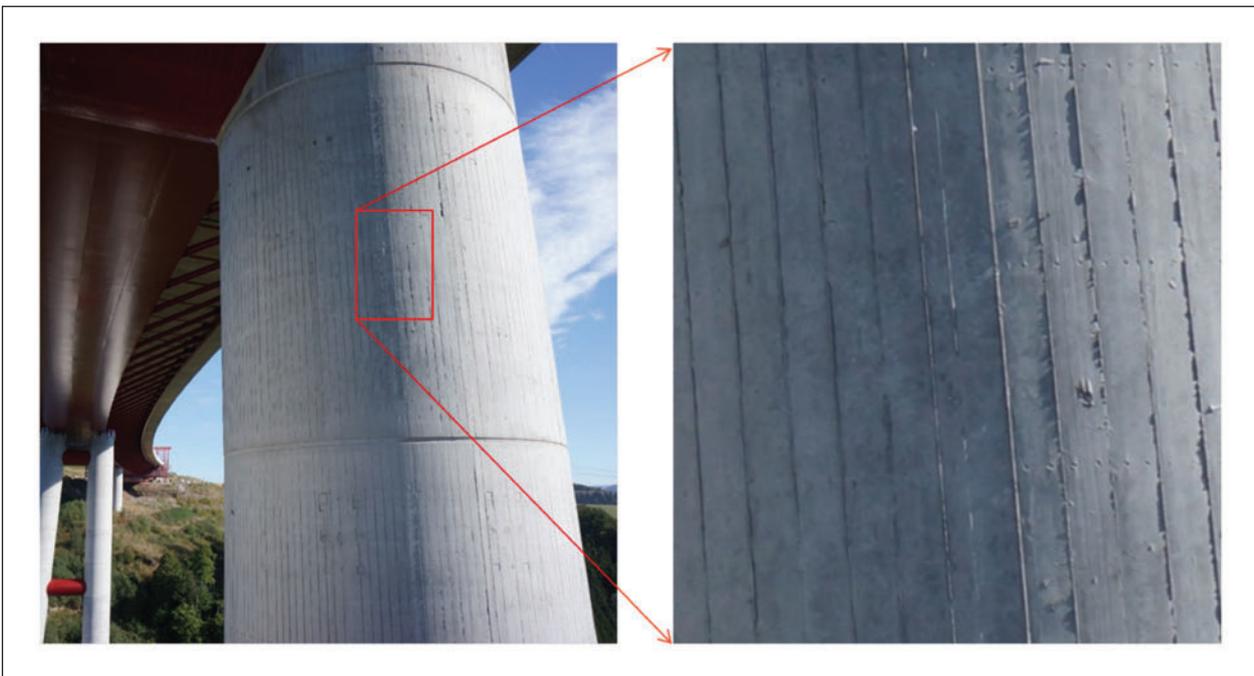


Bild 33: Brückenpfeiler aus Stahlbeton – Betonoberfläche ohne augenscheinliche Risse. Die Ausführungsqualität der Sichtbetonflächen kann bei der H1-Prüfung mit der vertraglich geschuldeten Leistung verglichen werden (z. B. DBV-Merkblatt „Sichtbeton“ mit Klassen SB 1-4, Textur, Porigkeit, Farbtongleichheit, Ebenheit, Schalhautklasse, Nagel- und Reparaturlöcher usw.), Quelle: TÜV Rheinland

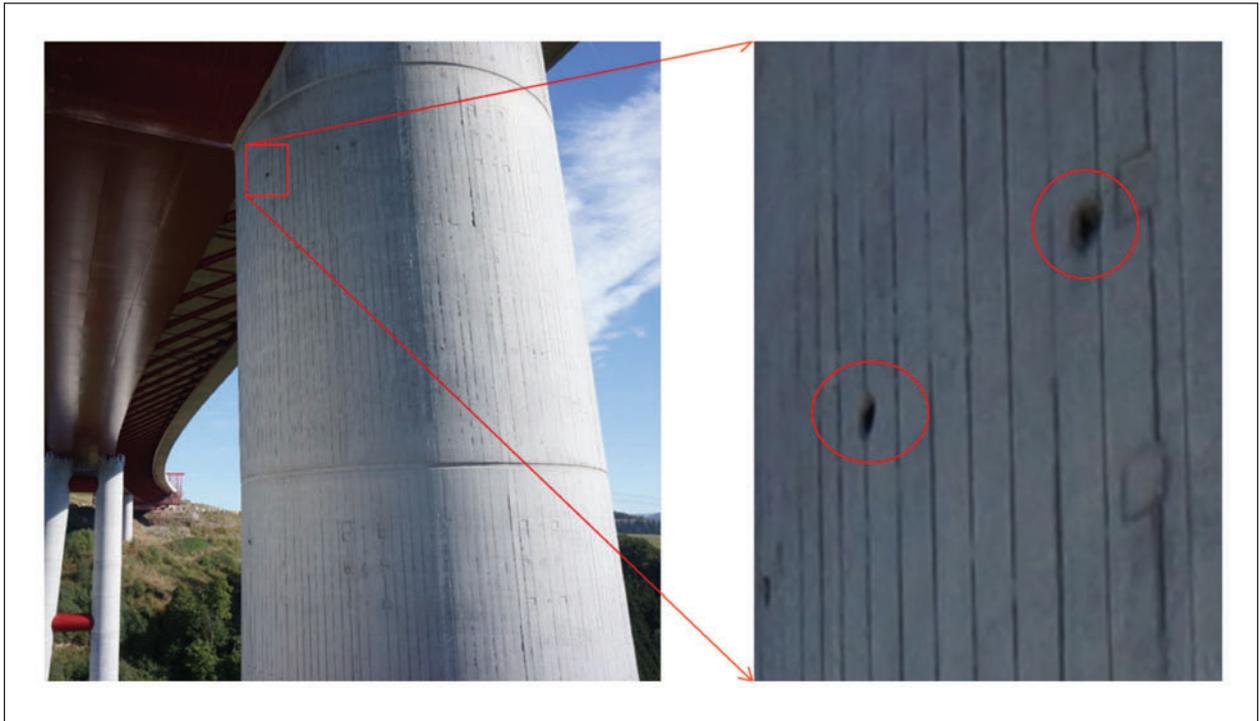


Bild 34: Brückenpfeiler aus Stahlbeton – Einzelne Schalungsankerdurchführungen sind nicht ausreichend oberflächenbündig verschlossen, Quelle: TÜV Rheinland

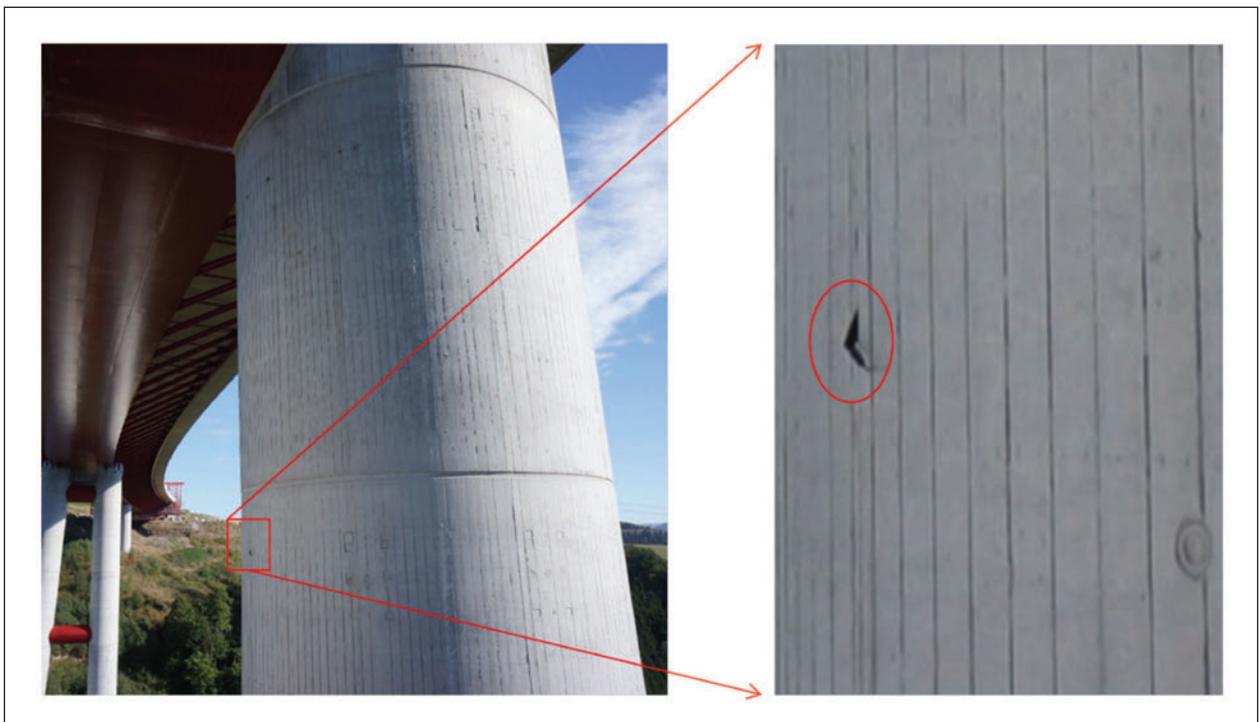


Bild 35: Brückenpfeiler aus Stahlbeton – Bindedrahtrest an Betonoberfläche, beginnende Korrosion/Rostfahne, Quelle: TÜV Rheinland

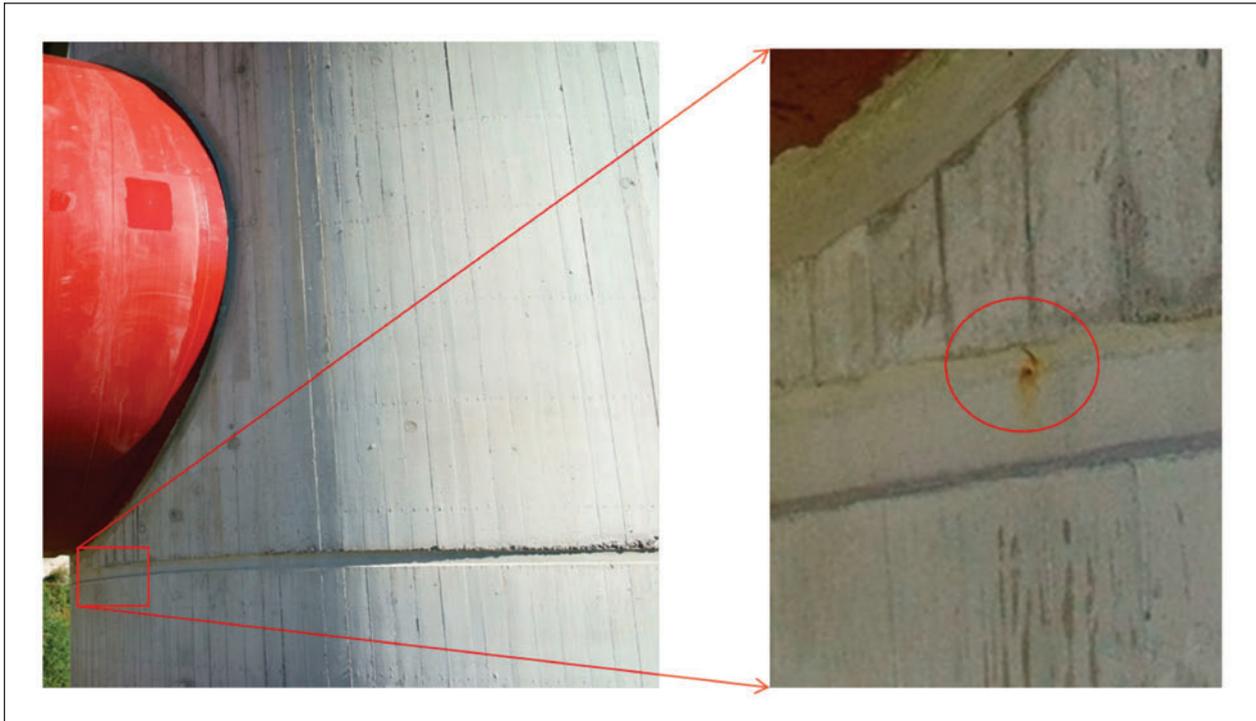


Bild 36: Brückenpfeiler aus Stahlbeton – Bindedrahtrest an Betonoberfläche, beginnende Korrosion/Rostfahne, Quelle: TÜV Rheinland



Bild 37: Brückenpfeiler aus Stahlbeton – Grobkornstellen im geringen Umfang im Bereich der Arbeitsfugen, Quelle: TÜV Rheinland

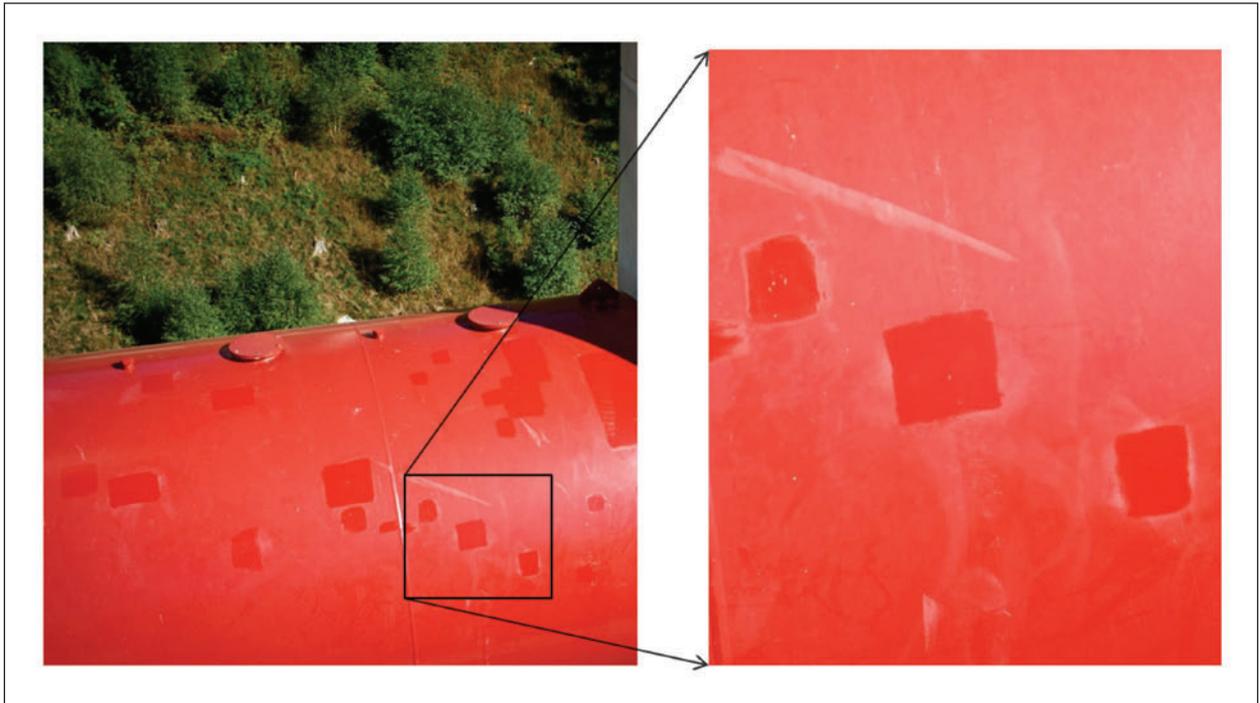


Bild 38: Querriegel als Stahlmantelrohr – Visuelle Auffälligkeit der Ausbesserungen/Ausfleckungen der Korrosionsschutz-Beschichtung.

Beispiel für Maßnahmenempfehlung: Schichtdickenkontrolle bei H1-Prüfung und Vergleich mit Regelwerksvorgaben ZTV-ING: Ausbesserung von Bestandsbauwerken max. 5% der Fläche, darüber hinaus vollflächige Deckbeschichtung, Quelle: TÜV Rheinland

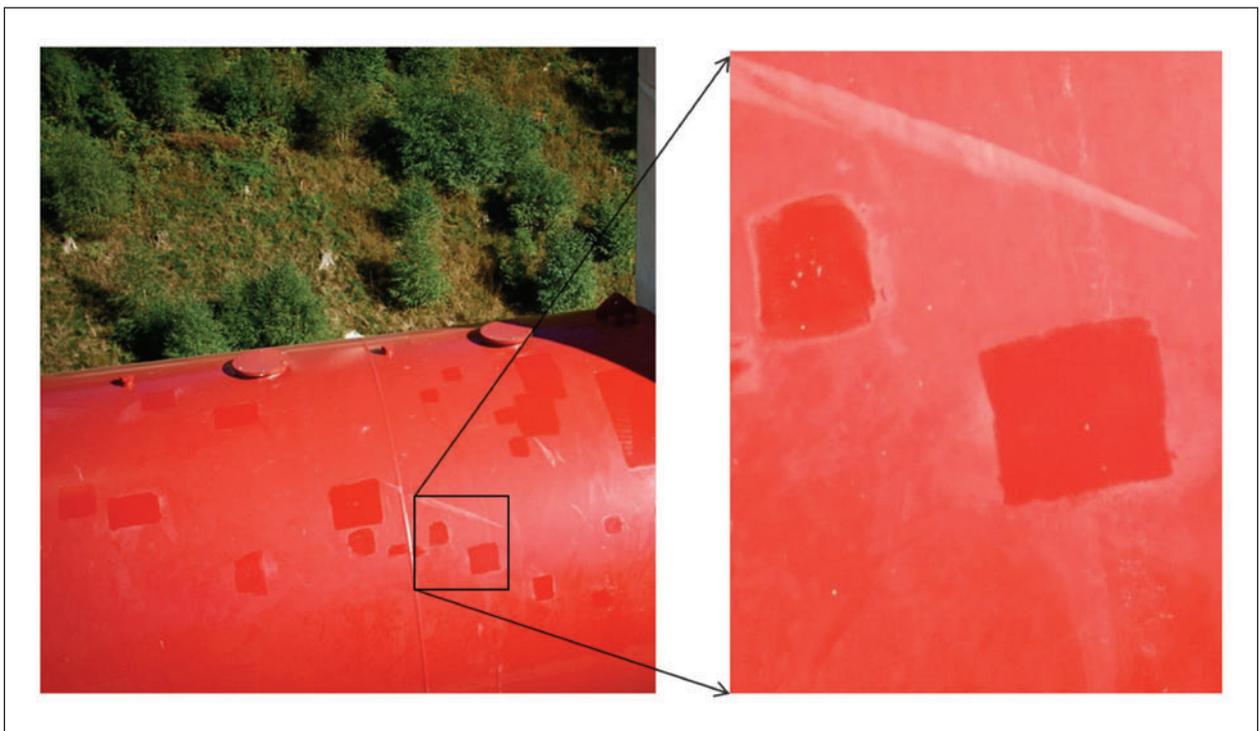


Bild 39: Querriegel als Stahlmantelrohr – Auffälligkeit der geringen Abmessungen der Ausbesserungsstellen.

Beispiel für Maßnahmenempfehlung: Schichtdickenkontrolle bei H1-Prüfung und Vergleich mit Regelwerksvorgaben ZTV-ING: Reparaturstellen sollen schichtenweise aufgebaut werden, mit jeweils 50 mm Überlappung. Folglich beträgt die Mindestabmessung 100 mm, sofern nur die Deckbeschichtung beschädigt wurde, Quelle: TÜV Rheinland

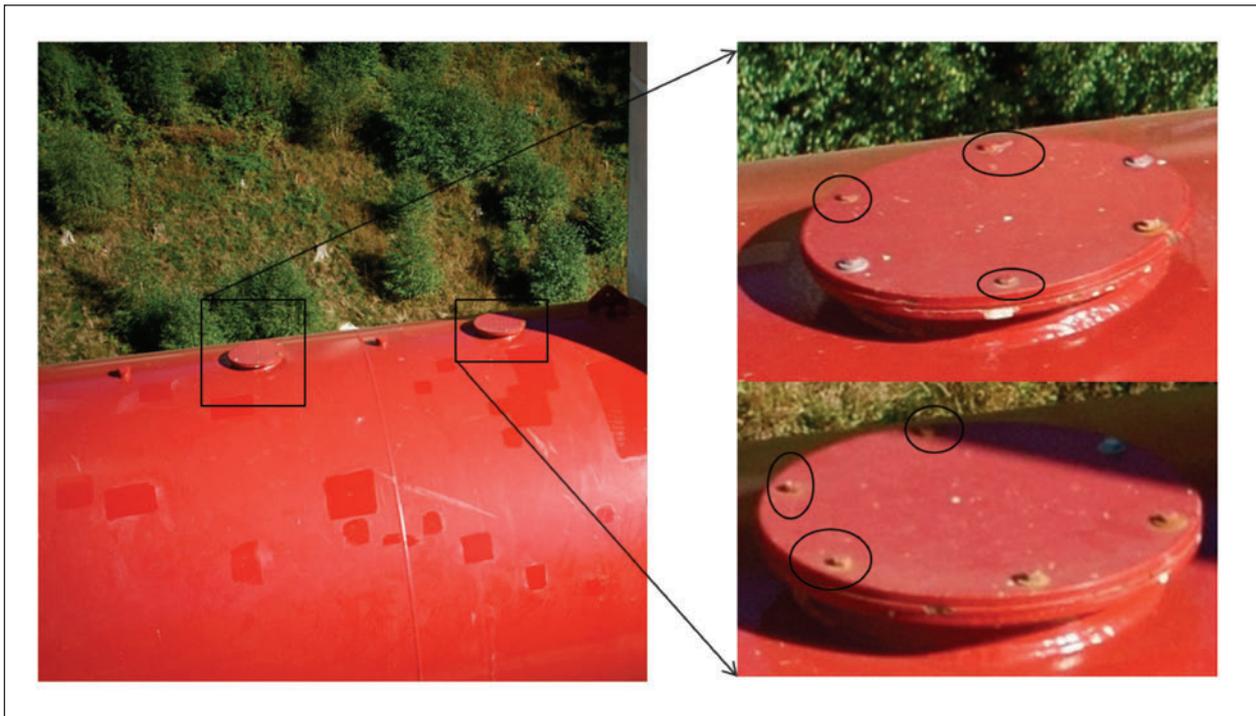


Bild 40: Querriegel als Stahlmantelrohr – Teilweise fehlen die erforderlichen Unterlegscheiben bei der Verschraubung der Verschlüsse von den Betonier- und Entlüftungsöffnungen, Quelle: TÜV Rheinland

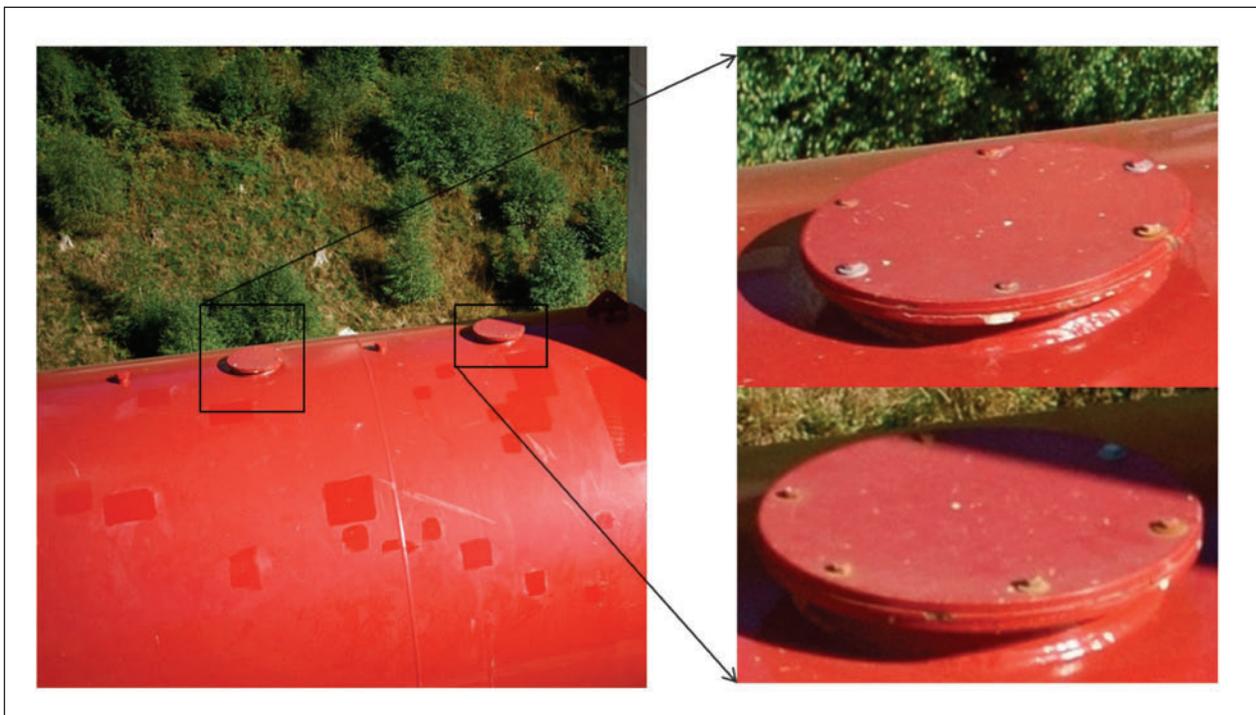


Bild 41: Querriegel als Stahlmantelrohr – Die Schraubenköpfe weisen fehlende Beschichtung und Korrosion auf, Quelle: TÜV Rheinland

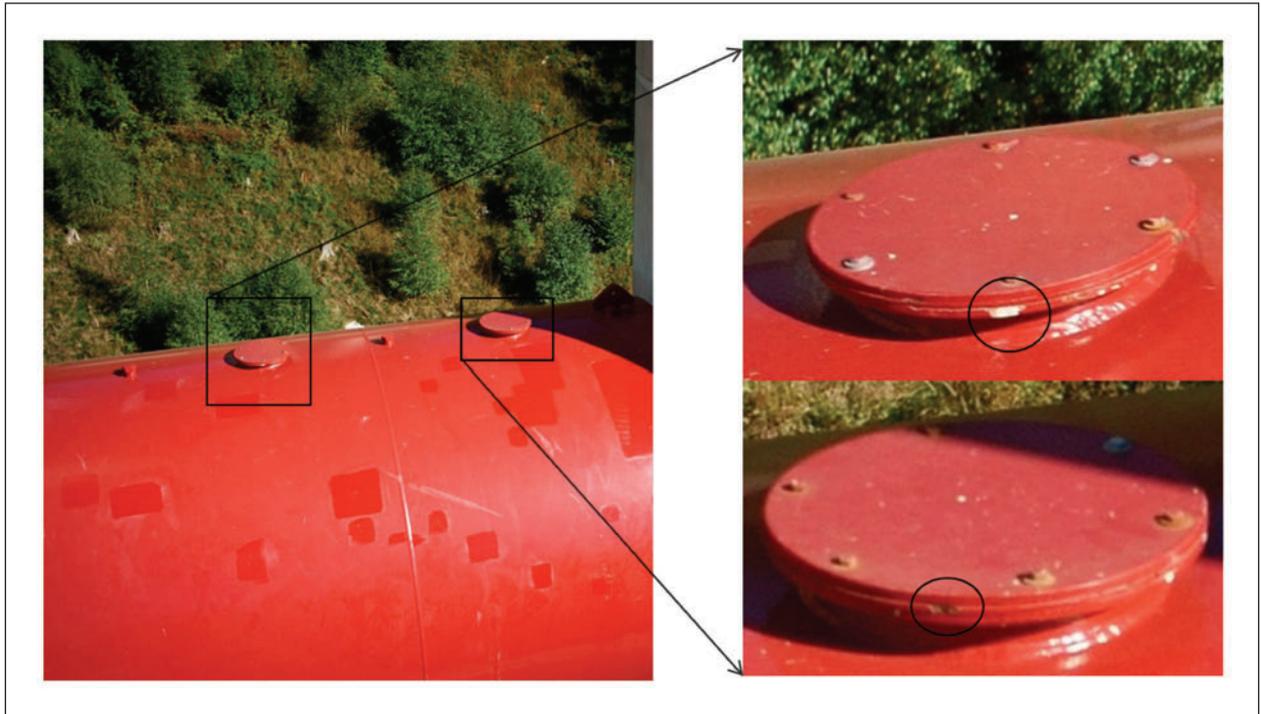


Bild 42: Querriegel als Stahlmantelrohr – An den Schraubflanschen sind stirnseitige Abplatzungen des Korrosionsschutzes sowie beginnende Korrosion vorhanden, Quelle: TÜV Rheinland

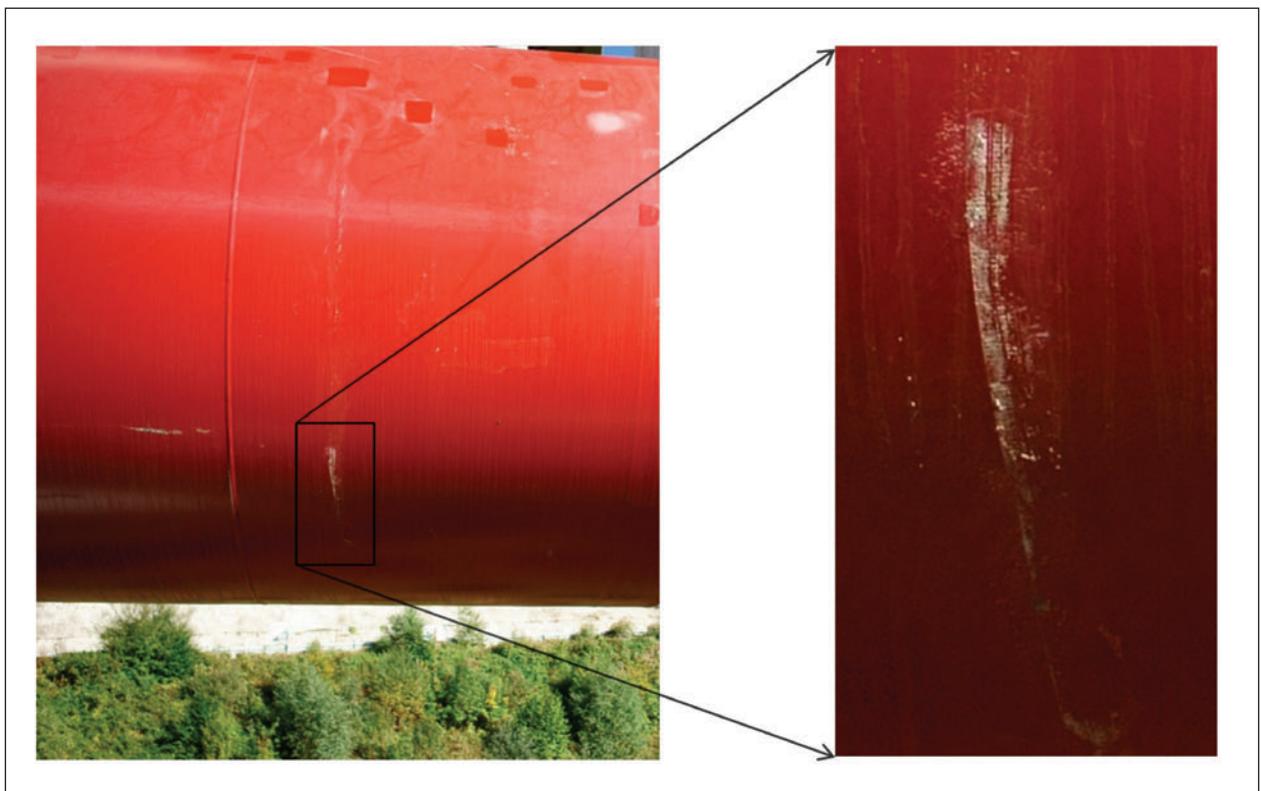


Bild 43: Querriegel als Stahlmantelrohr – Anhaftungen/Klebebandrückstände an der Beschichtungsoberfläche, Quelle: TÜV Rheinland

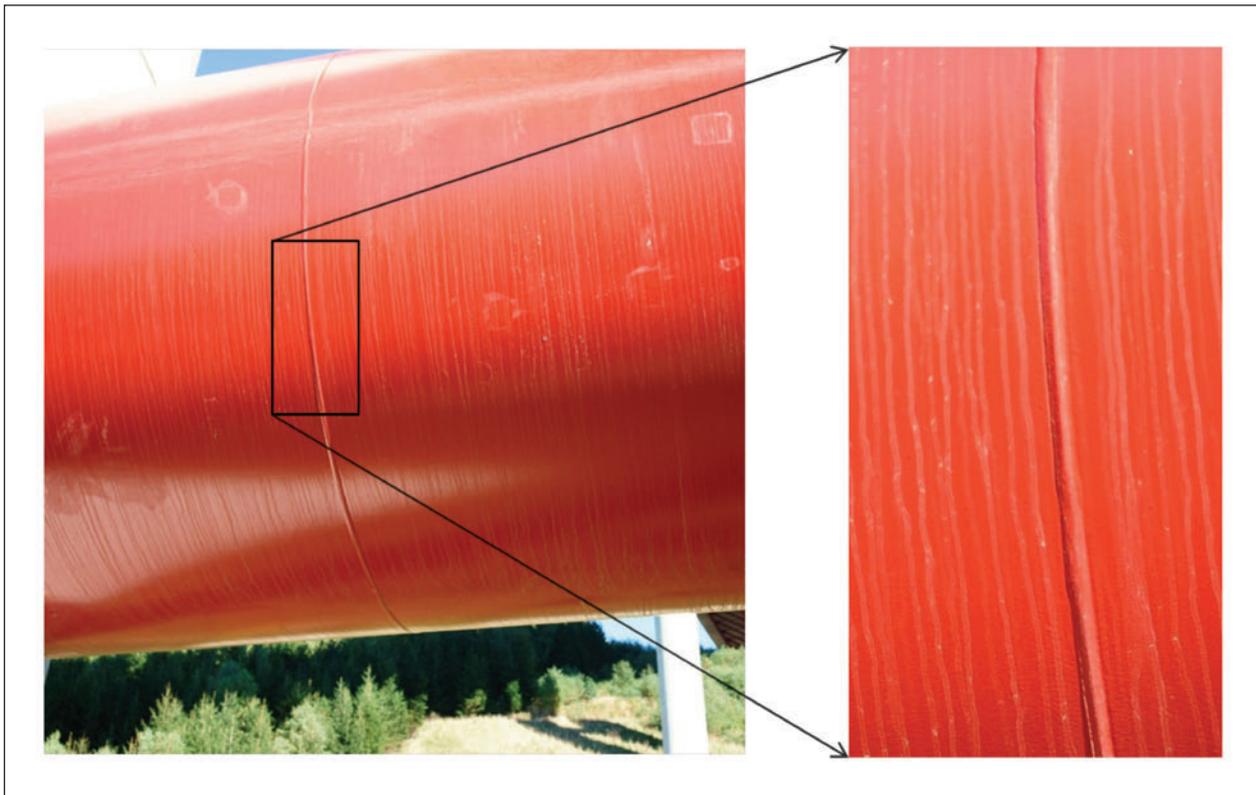


Bild 44: Querriegel als Stahlmantelrohr – Schweißnähte ohne augenscheinlichen Befund, Quelle: TÜV Rheinland

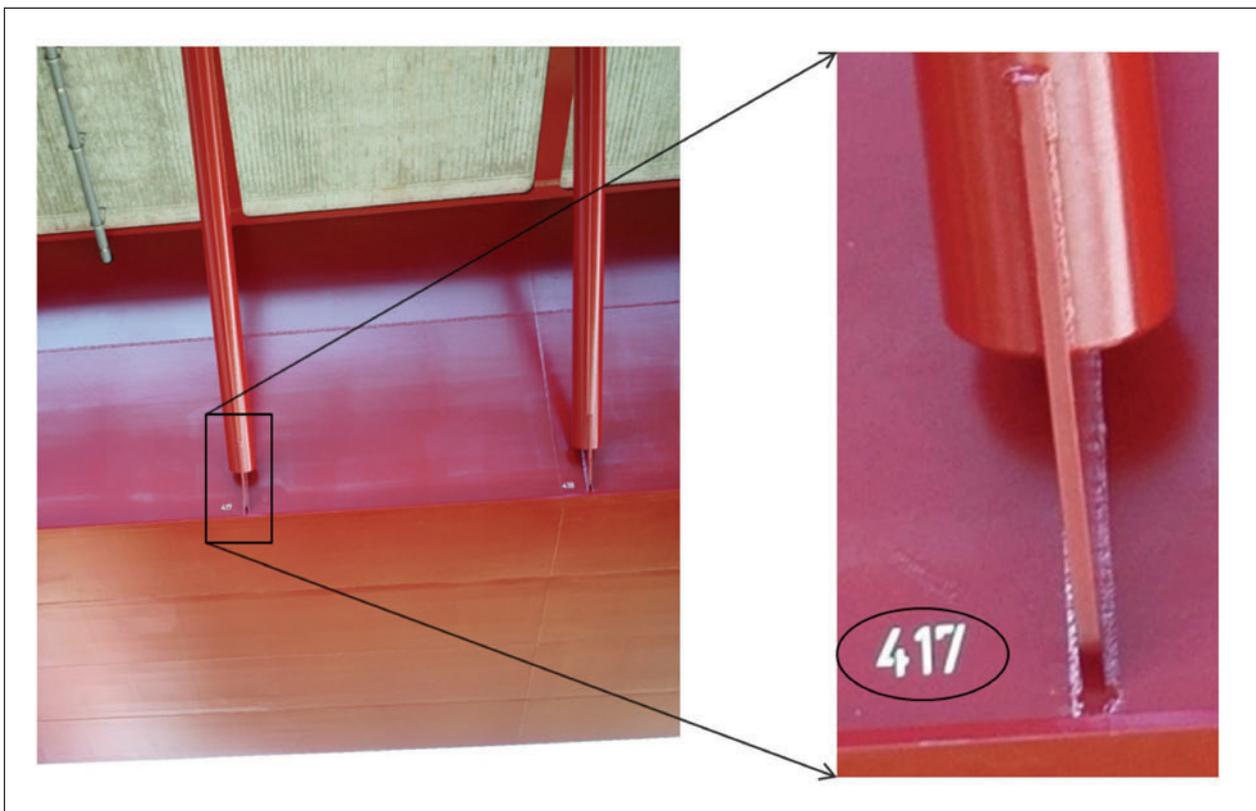


Bild 45: Überbau und Strebenanschlüsse – Aufgrund der am Bauwerk vorhandenen Nummerierung der Streben ist eine eindeutige Zuordnung möglich, Quelle: TÜV Rheinland

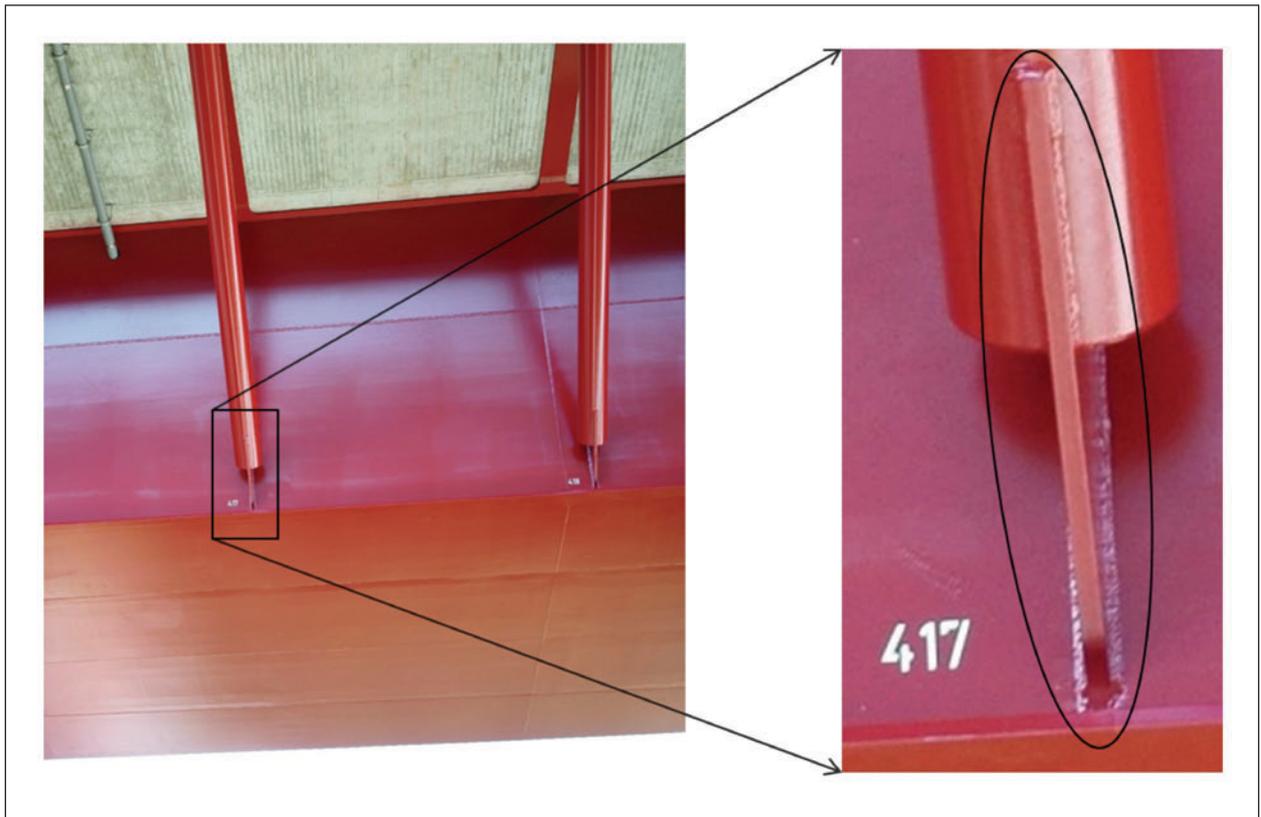


Bild 46: Überbau und Strebenanschlüsse – Schweißnähte sowie Umschweißungen sind erkennbar und ohne augenscheinlichen Befund, Quelle: TÜV Rheinland

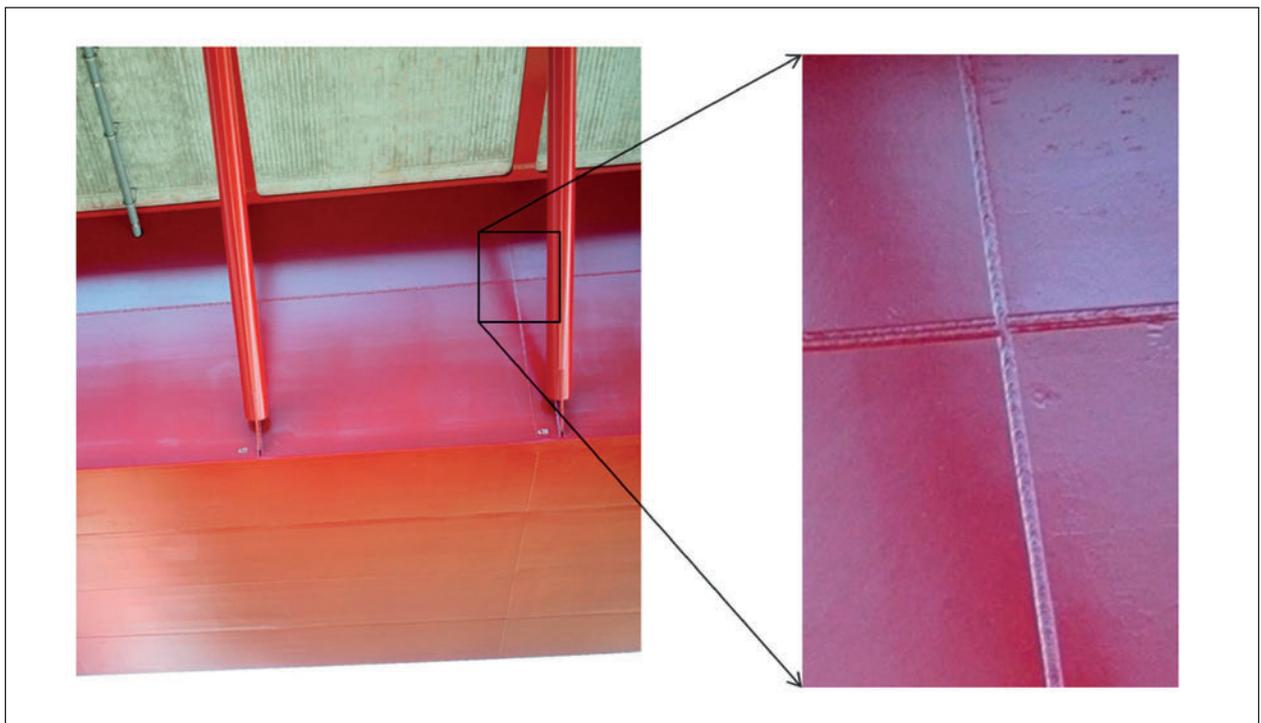


Bild 47: Überbau und Strebenanschlüsse – Ausführung des Schweißnahtverlaufs ist bei hohen/unzugänglichen Bauwerken erkennbar, Quelle: TÜV Rheinland

9.3 Europabrücke Koblenz

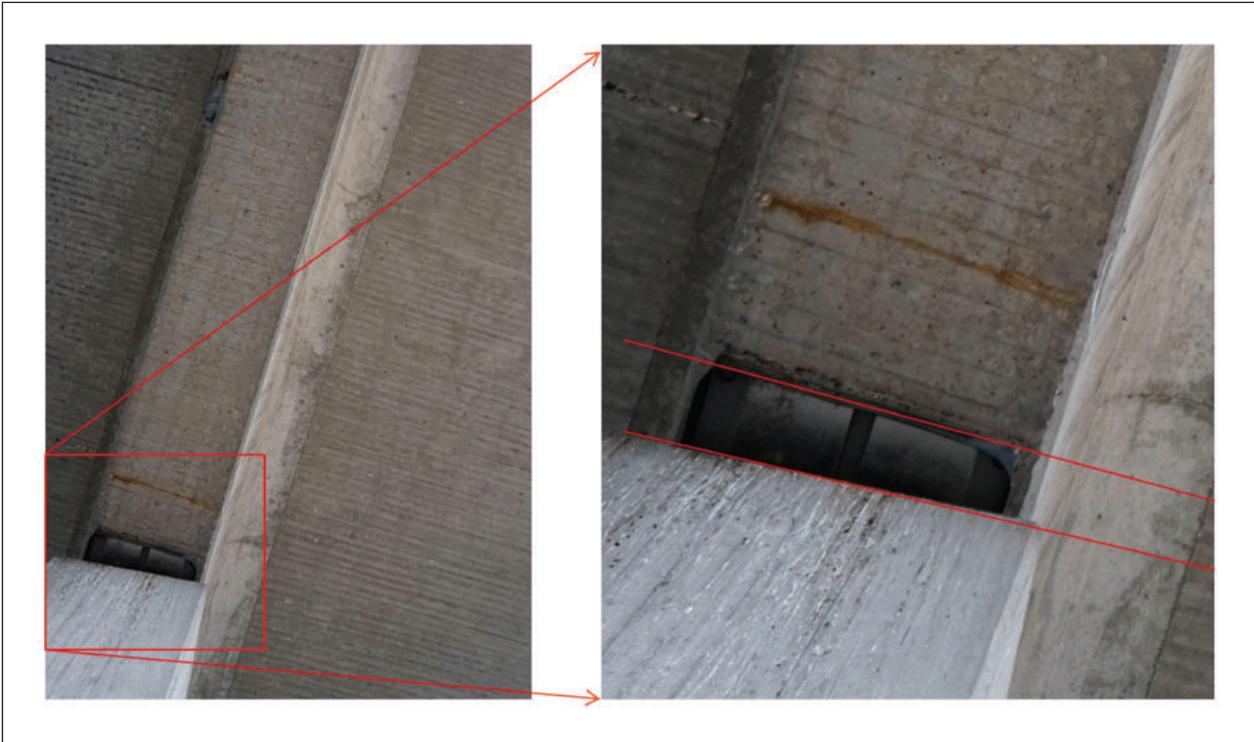


Bild 48: Pfeiler und Lager – Der Pfeiler wurde nicht in Achse der Längsträger errichtet (Verdrehung), Quelle: TÜV Rheinland



Bild 49: Pfeiler und Lager – Lagerstands-Anzeigen sind ablesbar. Aufgrund von Schutzvorrichtungen ist das Lager nicht einsehbar, Quelle: TÜV Rheinland

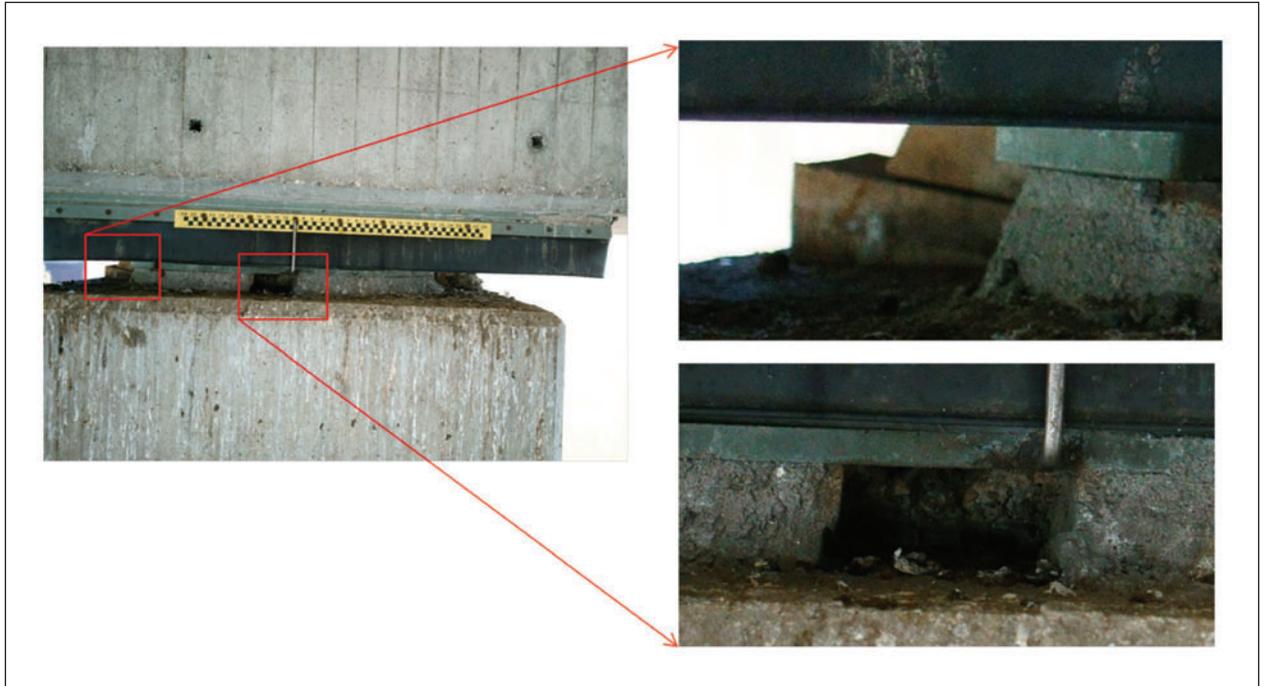


Bild 50: Pfeiler und Lager – Die Lagerplatten-Unterkeilung aus der Bauzeit wurde teilweise nicht entfernt. Weiterhin fand bei den entfernten Holzkeilen keine Vervollständigung der Lagerplatten-Unterstopfung statt, Quelle: TÜV Rheinland



Bild 51: Überbau Plattenbalken – Unterseite Längsbalken, Bindedrahtreste mit Korrosion an der Betonoberfläche, Quelle: TÜV Rheinland



Bild 52: Überbau Plattenbalken – Kleine Betonabplatzung im Kantenbereich, Quelle: TÜV Rheinland



Bild 53: Überbau Plattenbalken – Fremdkörper an der Betonoberfläche, Quelle: TÜV Rheinland



Bild 54: Überbau Plattenbalken – Mechanische Beschädigung/Kratzer an der Platten-Unterseite, Quelle: TÜV Rheinland



Bild 55: Hohlkasten – Enorme Staubentwicklung (ggf. zuvor Reinigung oder Befeuchtung erforderlich um Staubentwicklung entgegen zu wirken). Lärm: etwa 76 dB mit „Straßenverkehrslärm“ und etwa 92 dB bei UAS-Betrieb, Quelle: TÜV Rheinland



Bild 56: Hohlkasten – Aufgrund von Staubentwicklung sind kaum Befunde erkennbar. Bsp. Hohlkastendecke, Höhe etwa 6,0 m, Längsriss 0,1 bis 0,2 mm Breite ist nicht feststellbar, Quelle: TÜV Rheinland

9.4 Zusammenstellung

Auf Grundlage der an den Testbauwerken gesammelten Erfahrungen über die Identifizierbarkeit von Schäden, erfolgt in Tabelle 3 eine Zusammenstellung.

Schaden-Beispiel	Ersteinschätzung	Aktuelle Einschätzung
Allgemein		
Bauwerke aus Beton/Außenflächen		
Bauwerke aus Stahl/Außenflächen		
Bauwerke aus Stein/Außenflächen		
Hohlkästen/Innenflächen		
Pfeiler/Stützen: Verdrehung/Schiefstellung		
Feuchtigkeit/Nässe: z. B. mittels Thermografie		
Verschmutzungen/Bewuchs/Graffiti		
Beton		
Betonoberfläche: Abplatzung/Bindedrahtreste/Fremdkörper/mechan. Beschädigungen		
Betonoberfläche: Schalungsanker/Grobkornstelle/Anhaftung		
Betonoberflächen: Einstufung in Sichtbetonqualitätsstufe		
Betondeckung		
Karbonatisierung		
Tausalze/Chlorideinwirkungen		
Alkali-Kieselsäurereaktion		
Erkennbarkeit Risse, Breite $b \leq 0,2 \text{ mm}^1$		
Erkennbarkeit Risse, Breite $b > 0,2 \text{ mm}^1$		
Abplatzung/freiliegende Bewehrung		
Aussinterung		
Instandsetzung/Betonersatzsystem: Haarrisse		
Stahl		
Schraube/Unterlegscheibe/Niet		
Schweißnähte/Umschweißungen		
Korrosion		
Korrosionsschutzbeschichtung: Oberfläche/Ausbesserung/Anhaftung/Kantenabplatzung		
Stein		
Risse		
Abplatzungen		
Ausstattung		
Rollenlager ohne Schutzeinrichtung, Lagerplatten oben und unten		
Lagerstände/Lagerstandsanzeige		
Lagerplattenunterstopfung/Fremdkörper		
Entwässerungsleitungen		
Legende: Überwiegend prüfbar Teilweise prüfbar Überwiegend nicht prüfbar		
¹ Erkennbarkeit unter günstigen Randbedingungen, wie z. B. Licht, Feuchtigkeit usw. Rissbreitenmessung derzeit noch nicht möglich		

Tab. 3: Identifizierbarkeit von Schäden, Quelle: TÜV Rheinland

10 Auswertung, Bewertung, Ergebnisverarbeitung

10.1 Allgemeines

Der Einsatz von automatisierten bzw. visuellen Prüfverfahren ist unter bestimmten Randbedingungen in der RI-EBW-PRÜF beschrieben. Das betrifft das Laser-Scanner-Verfahren im Tunnelbau sowie die visuelle Prüfung von Brückenseilen mittels Roboter-Befahrung.

In Analogie zu diesen Verfahren kann die zur Bauwerksprüfung ergänzende visuelle Prüfung mittels UAS-Befliegung eingeordnet werden.

Bei der ergänzenden visuellen Prüfung mittels UAS-Befliegung ist sicher zu stellen, dass Schäden sicher erkannt werden, welche Beeinträchtigungen der Standsicherheit, Verkehrssicherheit oder Dauerhaftigkeit zur Folge haben.

Schäden oder Mängel mit Einzelbewertungen S, V, $D \geq 2$ sind daher durch eine handnahe Prüfung eingehender zu untersuchen. Hierbei sind die ggf. erforderlichen Besichtigungseinrichtungen zu Hilfe zu nehmen.

Werden unklare Schadenssituationen angetroffen, so ist in diesen Bereichen der Prüfumfang ebenfalls auf eine handnahe Prüfung auszudehnen.

In ungeschädigten und geringfügig geschädigten Bereichen (Einzelbewertungen S, V, $D < 2$) findet eine Plausibilitäts-/Stichprobenprüfung statt. In diesen Bauwerksabschnitten kann diese handnahe Prüfung durch eine Besichtigung ersetzt werden.

Bereiche des Bauwerks, welche mit dem automatisierten visuellen Prüfverfahren nicht einsehbar/prüfbar sind, sind im Rahmen einer HP ergänzend handnah zu prüfen.

Die vorgenannten Festlegungen verdeutlichen, dass dieses visuelle Prüfverfahren mittels UAS-Befliegung nur als Ergänzung zur Hauptprüfung, jedoch nicht als Ersatz der Hauptprüfung einzu-stufen ist.

Die Befliegung/visuelle Prüfung ist im Vorfeld der handnahen Prüfung durchzuführen, damit Befunde mit Einzelbewertungen ≥ 2 , nicht einseh-bare Bereiche sowie unklare Schadensbereiche handnah nachgeprüft werden können.

10.2 Auswertung und Bewertung der UAV-Befunde

Dem Kapitel 9 kann entnommen werden, welche Schäden/Befunde mit einem UAS-Einsatz identifizierbar sind. Grundsätzlich können Schäden oder Befunde gut festgestellt werden, welche auch im Zuge einer handnahen Prüfung rein visuell testiert werden können. Grenzen treten dort auf, wo Materialproben entnommen (z. B. Bohrmehl für Chlorid-Untersuchung, Karbonatisierungstiefe usw.), manuelle Tätigkeiten erforderlich werden (z. B. entfernen von Verkleidungen, abklopfen nach Hohlstellen, Überprüfung auf Holzfäulnis usw.) und Messungen durchzuführen sind (z. B. Betondeckung, Rissbreiten usw.).

Aus diesem Grund kann der UAS-Einsatz die Bauwerksprüfung nicht ersetzen, vielmehr ist nur eine sinnvolle Unterstützung der Bauwerksprüfung möglich.

Insbesondere die Feststellung der Rissbreiten bei Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken stellt bei der Bauwerksprüfung einen wichtigen Punkt dar. Das spiegeln auch die Schadensbeispiele der RI-EBW-PRÜF mit den Bewertungsvorschlägen wieder (siehe Bild 57).

Feine, zumeist netzartige, oberflächennahe Risse sind in Betonkonstruktion für die Standsicherheit unschädlich.

Sie können jedoch für die Dauerhaftigkeit ($D \geq 2$) von Bedeutung werden, sofern sie bis an die Bewehrung heran reichen, sich im Sprühnebelbereich befinden und Rissweiten ab 0,2 mm aufweisen.

Trennrisse in Betonkonstruktionen erstrecken sich meist über wesentliche Teile des Querschnitts. Auch für diese Rissart können nach o. a. Bewertungsbeispielen ab einer Rissbreite von 0,2 mm Einzelbewertungen der Dauerhaftigkeit von ≥ 2 zur Folge haben.

Folglich müssen als Anforderungsprofil für visuelle Prüfungen Risse ab 0,2 mm Breite sicher erkannt werden können. Denn ab dieser Breite ist eine Einzelbewertung von S, V, D mit ≥ 2 möglich.

Ab dieser Einzelbewertung sind – wie im Kapitel 10.1 beschrieben – ergänzende handnahe Prüfungen vorzunehmen.

006-00	Brücken, Überbau / * / Beton / Risse, 1. Beispielauswahl (Standicherheit)	S	V	D
006-01-	oberflächennahe Risse	0		
006-02-	Stahlbeton, Trennrisse bei Stahlbetonüberbauten mit Rissweiten < 0,4 mm	0		
006-03-	Stahlbeton, Trennrisse bei Stahlbetonüberbauten mit Rissweiten > = 0,4 mm	1		
006-04-	Spannbeton, spannstahlparallele Risse	1		
006-05-	Spannbeton, Trennrisse bei Stahlbetonüberbauten, Durchlaufträger, Baujahr nach 1981	2		
006-06-	Spannbeton, Trennrisse bei Stahlbetonüberbauten, Durchlaufträger, Baujahr vor 1981	3		
006-07-	Spannbeton, Spannbeton, Trennrisse bei Stahlbetonüberbauten, Einfeld	3		
006-08-	sich unter Verkehrslast bewegende Risse > 0,4 mm	4		
006-00-2	Brücken, Überbau / * / Beton / Risse, 2. Beispielauswahl (Dauerhaftigkeit)			
006-00-	Risse außerhalb des Sprühnebelbereiches mit Rissweiten 0,1 < 0,2 mm		0	1
006-00-	Risse im Sprühnebelbereich mit Rissweiten 0,1 - < 0,2 mm		0	2
006-00-	Risse außerhalb des Sprühnebelbereiches mit Rissweiten 0,2 < 0,4 mm		0	2
006-00-	Risse im Sprühnebelbereich mit Rissweiten 0,2 - < 0,4 mm		0	3
006-00-	Risse außerhalb des Sprühnebelbereiches mit Rissweiten > = 0,4 mm		0	3
006-00-	Risse im Sprühnebelbereich mit Rissweiten > = 0,4 mm, D = 3-4		0	
006-00-	sich unter Verkehrslast bewegende Risse > 0,4 mm		0	4

Bild 57: Auszug aus RI-EBW-PRÜF Schadenkategorien mit Bewertungsvorschlägen für Brückenüberbauten mit Rissen

Derzeit können mit den bei den Befliegungen eingesetzten visuellen Prüfverfahren keine exakten Messungen der Rissbreiten vorgenommen werden. Vielmehr kann nur von der Erkennbarkeit der Risse ausgegangen werden.

Es konnte im Rahmen des FE-Projektes festgestellt werden, dass die Rissbreite mittels der visuellen Prüfverfahren relativ gut eingeschätzt werden konnte. Das war bei günstigen Randbedingungen, wie z. B. Licht, Feuchtigkeit usw. möglich.

Teilweise war es sogar gelungen, netzförmige Haarrisse zu identifizieren.

Vergleichend zur Rissbreitenmessung im Zuge der handnahen Prüfung ist folgendes anmerken:

Art oder Methode der Rissbreitenmessung sind nicht normativ geregelt. Im Rahmen der Bauwerksprüfungen werden die Rissbreitenmessungen i. d. R. mit einer Risslupe oder einem Rissvergleichsmaßstab durchgeführt. In der Prüfpraxis hat sich der Rissvergleichsmaßstab überwiegend durchgesetzt. Hierbei wird eine Karte mit verschiedenen Strichstärken vergleichend über die Rissbreite gehalten und eine passende ausgewählt.

Folgende Einflussgrößen können die Genauigkeit dieses Verfahrens beeinflussen:

- Qualität des Maßstabes (hierbei handelt es sich zumeist nicht um ein kalibriertes Messwerkzeug/Lehre),
- Erosion an den Rissufern,
- Feuchtigkeitszustand und Lichtverhältnisse,
- Ableseungenauigkeiten.

Nach RI-EBW-PRÜF sind bei der Dokumentation und Bewertung von Rissen unter anderem die Bauwerkstemperatur und die Witterungsverhältnisse (Sonneneinstrahlung, Wolken, Wind) zu berücksichtigen.

Diese Daten können im Zuge der visuellen Prüfung stets ermittelt werden.

10.3 Wirtschaftliche Bewertung des UAV-Einsatzes

Eine wirtschaftliche Bewertung des UAV-Einsatzes ist Einzelfall-/Bauwerksabhängig vorzunehmen. Wie auch die Bauwerksprüfung selbst, hängt der Aufwand von folgenden wesentlichen Einflussgrößen ab:

- Prüfungsart (EP, HP, SP),
- Bauwerksgröße,

- Bauwerksart,
- Baustoff,
- Anzahl der Schäden (Bauwerkszustand),
- Lage des Bauwerks (urban, ländlich, angrenzende Verkehrswege, angrenzender (Baum-) Bewuchs usw.),
- Ausstattung des Bauwerks (z. B. Besichtigungseinrichtungen),
- Anteile der schwer/nicht einsehbaren Bereiche (z. B. Abdeckungen, Verkleidungen usw.).

Prüfungsart Einfache Prüfung (EP)

Die Einfache Prüfung kann nach DIN 1076, soweit vertretbar, ohne Verwendung von Besichtigungsgeräten oder -einrichtungen als intensive, erweiterte Sichtprüfung durchgeführt werden. Die Ergebnisse der vorangegangenen/letzten Hauptprüfung sind dabei zu berücksichtigen und insbesondere die mit EP gekennzeichneten Mängel und Schäden sind zu prüfen.

Daher sind bei der Hauptprüfung nur Schäden und Mängel mit EP zu kennzeichnen, welche bei Schadensbewertungen S, V, D von ≥ 2 in absehbarer Zeit größere Auswirkung auf das Bauwerk haben können.

Wie in Kapitel 11.1 beschrieben, sind jedoch bei Einzelbewertungen ≥ 2 die visuellen Prüfverfahren mittels UAV-Befliegung durch eine handnahe Prüfung zu ergänzen.

Die Befliegung bringt daher in diesem Fall keine Vorteile. Mit der EP-Kennzeichnung ist zumeist eine solch hohe Bewertung verbunden, dass sowieso von Hand nachzuprüfen ist.

Der UAV-Einsatz im Rahmen einer einfachen Prüfung ist daher lediglich eingeschränkt sinnvoll.

Hierbei sollte im Einzelfall entschieden werden, wenn verschiedene Rahmenbedingungen für einen Einsatz sprechen, z. B. erforderlicher Einsatz von Besichtigungsgeräten, starke Verkehrsbeeinträchtigungen durch Verkehrssicherung und Besichtigungsgeräteeinsatz, Arbeitssicherheit usw.

Prüfungsart Hauptprüfung (HP)

Bei der Hauptprüfung sind nach DIN 1076 alle Bauwerksteile handnah zu prüfen. Das schließt auch die schwer zugänglichen Bereiche, ggf. unter

Zuhilfenahme von Besichtigungseinrichtungen, Rüstungen usw. ein.

Der Einsatz solcher Besichtigungseinrichtungen, wie z. B. Untersichtsgeräte, Hubsteiger usw., geht i. d. R. mit einer Verkehrsbeeinträchtigung einher. Zumeist sind diese Fahrzeuge im Verkehrsraum aufzustellen. Daher werden Fahrbahnabspernungen und Sicherungen erforderlich. Verkehrsstaus und Unfallgefahren sind die Folge.

Sofern sich der zeitliche Geräteeinsatz von Verkehrssicherung und Besichtigungsgerät durch den UAV-Einsatz reduzieren lässt, kann ein wirtschaftlicher Vorteil bei den Prüfkosten vorliegen. Die Bezifferung des Vorteils sollte durch Angebote für jeden Einzelfall (Bauwerk, Randbedingungen, Bieterkreis) ermittelt werden.



Bild 58: Aufbau eines Besichtigungsgerätes (Bühne/Steggerät) auf der Europabrücke. Eine von 4 Richtungsfahrbahnen wird als Aufstellfläche benötigt, Quelle: TÜV Rheinland



Bild 59: Verkehrssicherung für das Besichtigungsgerät auf der Europabrücke. Eine von 4 Richtungsfahrbahnen wird für die Dauer des Geräteeinsatzes gesperrt, Quelle: TÜV Rheinland

Aus volkswirtschaftlicher Sicht stellt die Unterstützung der Bauwerksprüfung durch UAV-Einsatz einen schwer zu beziffernden Vorteil dar. Durch die Befliegung können die Einsatzzeiten der Besichtigungsgeräte reduziert werden, was eine Verringerung der Verkehrsbeeinträchtigung und weniger Staus nach sich zieht. Experten der Bundesregierung (www.bundesregierung.de) beziffern den täglichen staubedingten Kraftstoffverbrauch auf 33 Millionen Liter, den Zeitverlust auf 13 Millionen Stunden. Der volkswirtschaftliche Schaden liegt allein in Deutschland bei 250 Millionen Euro am Tag.

Prüfungsart Sonderprüfung (SP)

Sonderprüfungen werden nach größeren Ereignissen, welche den Bauwerkszustand beeinträchtigt haben können, durchgeführt. Das ist z. B. nach einem unerwartet auftretenden Umweltereignis (Hochwasser, Unwetter) oder einer extremen Nutzungsbeanspruchung (Anprall, Überbelastung) der Fall.

Der Prüfumfang ergibt sich hierbei aus dem jeweiligen Anlass bzw. Ereignis. Daher ist der sinnvolle UAV-Einsatz prüfaufgabenabhängig zu betrachten. Hier ist insbesondere im Hinblick auf erste Schnelleinschätzungen sowie der Sicherheit/Arbeitssicherheit ein Vorteil zu erkennen.

Bauwerksgröße

Große bzw. lang gestreckte Bauwerke sind für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung günstiger zu bewerten als kleine mit geringen Spannweiten.

Bauwerksart

Große, glatte und frei einsehbare Prüfflächen am Bauwerk stellen einen deutlichen Vorteil für die UAV-unterstützte Bauwerksprüfung dar. Hierunter fallen z. B. Platten-, Plattenbalken- und die Außenflächen von Hohlkastensystemen.

Der wirtschaftlich sinnvolle UAV-Einsatz bei schwer einsehbaren Konstruktionsarten, wie z. B. bei klein bzw. eng gegliederten Tragstrukturen (Trägerrost, orthotrope Platte) und Fachwerken ist objektbezogen zu prüfen.

Baustoff

Wie sich bei den Testbefliegungen an verschiedenen Bauwerken zeigte, können baustoffüber-

greifend an Beton-, Stahlbeton-, Spannbeton-, Mauerwerks- und Stahlkonstruktionen Befunde ausreichend sicher erkannt werden.

Einschränkungen liegen bei sehr feinen Rissen in Stahlkonstruktionen, sowie generell bei Holz vor.

Anzahl der Schäden (Bauwerkszustand)

Bei der handnahen Prüfung nimmt die Dauer der Prüfung deutlich zu, je mehr Schäden vorhanden sind. Die Schäden sind vor Ort aufzunehmen und in die Schadensskizze zu übernehmen/dokumentieren.

Mit zunehmender Prüfdauer wird auch die Einsatzdauer von Besichtigungsgerät und Verkehrssicherung länger.

Bei einer UAV-unterstützten Prüfung liegt keine ausgeprägte Verknüpfung zwischen Anzahl der Schäden und Dokumentationsdauer vor. Die Aufnahmen der Oberflächen werden stets systematisch und vollständig durchgeführt, unabhängig der Schadensanzahl.

Folglich ist bei Bauwerken mit ausgeprägter Anzahl an Schäden ein wirtschaftlicher Vorteil bei einer UAV-Befliegung zu erwarten.

Lage des Bauwerks

Zur Durchführung einer Befliegung ist es unerlässlich, dass ein freies und für den Piloten einsehbares Flugfeld vorhanden ist.

Daher ist bei jedem UAV-Einsatz im Vorfeld zu prüfen, ob diese Bedingung erfüllt ist.

Hierbei können im ländlichen Bereich ausreichend freie Flugflächen zur Verfügung stehen (vgl. Schildescher Viadukt, Talbrücke Nutlar) oder aber, z. B. durch dichten Baumbewuchs, einen UAV-Einsatz erschweren/verhindern. Gleiches kann im urbanen Bereich sein, ausreichende oder unzulängliche Platzverhältnisse. Weiterhin kann die Nähe zu angrenzenden dritten Verkehrswegen die Einsatzmöglichkeiten beeinflussen.

Ausstattung des Bauwerks

Sofern sich am Bauwerk eine fest installierte Befahranlage befindet, wie es bei einigen größeren Tal-/Flussbrücken der Fall ist, so ist mit einer ergänzenden Befliegung kein direkter wirtschaftlicher Vorteil bei den Prüfkosten zu erwarten.



Bild 60: Am Bauwerk fest installierte Befahranlage, bzw. Arbeitsbühnen zwischen den Haupt-/Längsträgern, Quelle: TÜV Rheinland

Die Befahranlage deckt i. d. R. die Prüfflächen der Überbau-Unterseite ab. Daher wird kein Untersichtsgeräte- und Verkehrssicherungseinsatz erforderlich. Ausnahme stellen meist die sehr hohen Brückenpfeiler dar. Diese können von Untersichtsgeräten mit speziellen Ausstattungen, wie z. B. Pfeilerbefahrkörben, befahren werden. Bei der Prüfung dieser Bauteile kann eine Befliegung (vgl. Testbefliegung Talbrücke Nuttlar) durchaus einen wirtschaftlichen Vorteil darstellen.

Anteile der schwer/nicht einsehbaren Bereiche

Unabdingbar für den wirtschaftlichen Einsatz einer unterstützenden UAV-Befliegung sind frei einsehbare Prüfflächen an dem Bauwerk.

Bauwerke mit großen Anteilen an schwer oder nicht einsehbaren Bereichen, wie z. B. Abdeckungen, Verkleidungen, Hohlkästen, klein bzw. eng gegliederten Tragstrukturen (Trägerrost) usw., sind nur bedingt wirtschaftlich sinnvoll mittels UAV-Befliegung prüfbar.

Bei solchen Voraussetzungen sollte über den Einsatz stets im Einzelfall entschieden werden.

Beispiel Europabrücke

Folgend sollen die unterschiedlichen Aufwendungen einer Hauptprüfung zu einer Hauptprüfung mit Unterstützung mittels Befliegung mit visuellem Prüfverfahren abgeschätzt werden.

Das wird am Beispiel der Europabrücke in Koblenz vorgenommen, da zu diesem Bauwerk Erfahrungen der Aufwendungen für eine Hauptprüfung vorliegen.

Die Europabrücke besteht aus 5 Teilbauwerken mit einer Gesamtbrückenfläche von 18.543 m².

Der Mehr-/Minderaufwand für eine UAV-Befliegung wird folgend schematisch dargestellt. Hierbei bedeuten:

-/-	unverändert/gleicher Aufwand		
AT	Arbeitstag/Manntag		
ET	Einsatztag für Gerät		
+/- 1	Mehr-/Mindertag für Mann/Gerät		
Prüfvorbereitung			
	Projektanbahnung mit AG	-/-	
	Verkehrsrechtliche Anordnung	-/-	
	Wasserrechtliche Anordnung	-/-	
	Arbeitsvorbereitung	-/-	
	Prüfplan aufstellen	-/-	
	Befliegungsplan Risikoanalyse	+ 1	AT
	Aufstiegserlaubnis/Behörden	+ 1	AT
Prüfdurchführung			
	Hohlkästen innen	-/-	
	Ausstattung: Lager, Entw., ÜKO	-/-	
	Schutzeinrichtungen	-/-	
	Beläge: Fahrbahn, Geh-, Radweg	-/-	
	Beschilderung, Durchfahrtshöhen	-/-	
	Pfeiler und Überbauunterseite:		
	Einsatz Hubsteiger	-/-	
	Einsatz Korbgerät (ca. 50%)	- 6	ET
	1 Prüfer auf Korbgerät	-/-	AT
	Einsatz Steggerät (ca. 50%)	- 2,5	ET
	2 Prüfer auf Steggerät	- 2,5	AT
	örtl. Schadensdokumentation	- 2	AT
	Einsatz Verkehrssicherung	- 8,5	ET
	UAS-Einsatz	+ 5	ET
Auswertung			
	Bewertung Bildmaterial	+ 2	AT
	Aufbereitung und Darstellung	+ 2	AT
	Bewertung der Befunde	-/-	
	Berichterstellung SIB-Bauwerke	-/-	
Zusammenstellung			
Aus obiger Auflistung ergeben sich folgende Aufwandsverschiebungen:			
	• Prüfer	+ 1,5	AT
	• Besichtigungsgerät	- 8,5	ET
	• Verkehrssicherung	- 8,5	ET
	• UAS-Einsatz	+ 5	ET

10.4 Integration der UAV-Ergebnisse in SIB-Bauwerke

Die Ergebnisse der Bauwerksprüfung (inkl. Schadensskizzen, evtl. Messdaten, Ergebnisse von Zusatzuntersuchungen usw.) sind in einem Prüfbericht zu dokumentieren. Um eine möglichst bundesweit einheitliche Erfassung und Bewertung der Bauwerkszustandsdaten zu erreichen, wurden bereits vor Jahren die RI-EBW-PRÜF sowie das Programmsystem SIB-Bauwerke mittels Allgemeiner Rundschreiben Straßenbau (ARS) eingeführt. Das Programmsystem SIB-Bauwerke (sowie die Vorgänger BWPRUF und BWPRUF II) sind Eigentum der Straßenbauverwaltungen von Bund und Ländern. Aufgrund der Einführung des Programmsystems SIB-Bauwerke durch das Allgemeine Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 3/1998 des Bundesverkehrsministers, wurde die Anwendung zum bundesweiten Standard.

Folglich sind auch die Ergebnisse einer UAV unterstützten Bauwerksprüfungen in SIB-Bauwerke zu integrieren.

Die Vorgehensweise weicht im Wesentlichen nicht von der Erfassung der handnah gewonnenen Feststellungen ab.

Nach dem Vorliegen eines Prüfauftrages sind die Bauwerksdateien des AG in SIB-Bauwerke einzulesen und die entsprechende Prüfung ist anzulegen.

Sobald die Ergebnisse der Bildserien aus der Befliegung durch den Bauwerksprüfer ausgewertet sind, können die Einzelschäden wie üblich angelegt und bewertet werden. Sofern Einzelaufnahmen für die Schadendarstellung verwendet werden, ist ggf. eine Größenreduzierung des hochauflösenden Fotos zu empfehlen.

Bei der Darstellung der Schadensskizze stehen jedoch zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung.

1. Übertrag aller Befunde in eine Schadensskizze. Die hieraus generierte Datei im tif-Format wird in SIB-Bauwerke unter „Skizzen“ eingefügt. Die Vorteile bei dieser Vorgehensweise sind die geringere Datenmenge sowie die Möglichkeit, die Schadensskizze als Anlage des Prüfberichtes zu drucken/auszugeben.
2. Generierung von 3D-Modellen der Bauwerksteile aus den Aufnahmeserien der Befliegung.

Die Ausgabe erfolgt in einem 3D-PDF-Format, welche in SIB-Bauwerke unter „Dokumente“ eingefügt wird. Die Vorteile dieser Vorgehensweise sind eine deutlich verbesserte/anschaulichere Darstellung und ein hoher Wiedererkennungsgrad, was insbesondere zur Feststellung von Schadensveränderungen bei Folgeprüfungen von Nutzen ist.

Der Versuch die Vorteile beider Möglichkeiten zu vereinen, in dem das 3D-PDF in eine tif-Datei konvertiert wird, führt zu keinen verwertbaren Ergebnissen.

In den Bildern 61 bis 72 wird der Arbeitsablauf, bzw. das Vorgehen dargestellt.



Bild 61: 1. Software SIB-Bauwerke starten und Bauwerksdateien einlesen (CAB-Datei des AG oder je nach Auftrag, als neues Bauwerk anlegen)



Bild 62: 2. Objekt auswählen und öffnen



Bild 63: 3. Teilbauwerk wählen



Bild 66: 6. Schadensskizzen Möglichkeit 1 – Hinterlegung der Schadensskizzen unter dem Button „Skizzen“ (Markierung). Hier können ausschließlich Dateien im tif-Format hinterlegt werden.

Vorteil:

- Schadensskizzen können automatisch als Anhang zu dem Prüfbericht ausgedruckt werden,
- kleinere Datenmenge.

Nachteil:

- nur skizzenhafte/schematische Darstellung der Schäden,
- geringe Wiedererkennungsmöglichkeit, insbesondere zur Feststellung der Schadensveränderungen bei Folgeprüfungen



Bild 64: 4. Neue Prüfung des Teilbauwerks anlegen

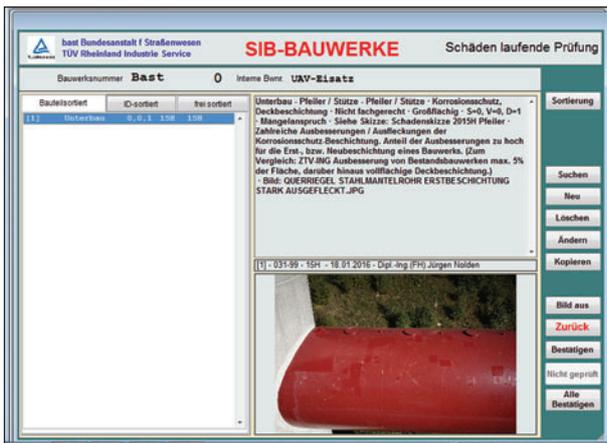


Bild 65: 5. Anlegen und Bewerten der Einzelschäden, Verwendung ausgewählter einzelner Aufnahmen aus den Bilderserien (ggf. zuvor Reduzierung der Bildgröße). Bei der Einzelschaden-Dokumentation der Hinweis auf eine Schadensskizze (rote Markierung)

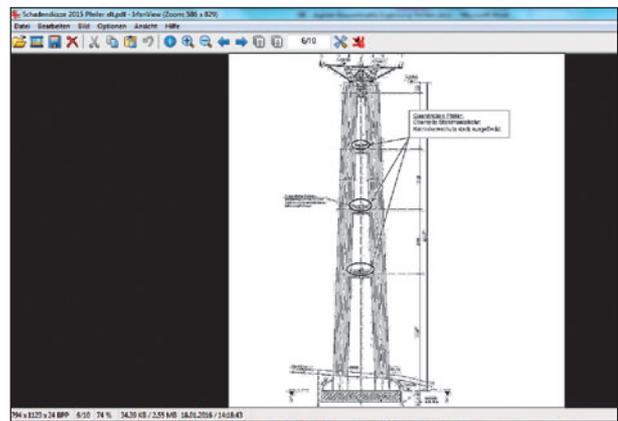


Bild 67: 6.1 Schadensskizzen Möglichkeit 1 – Erstellung der Schadensskizze auf Grundlage vorhandener Bestandszeichnungen oder Abwicklungsdarstellungen der Bauwerks oberflächen im tif-Format

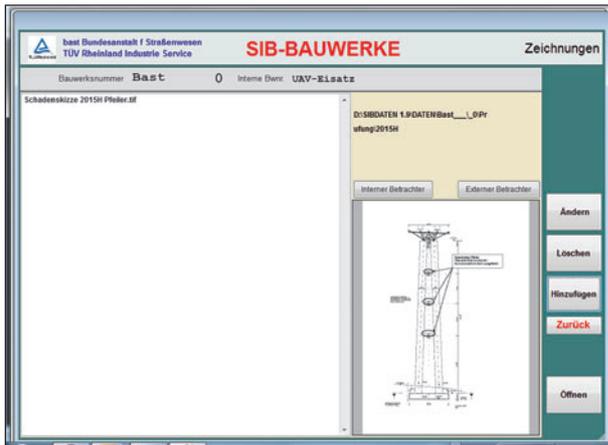


Bild 68: 6.2 Schadensskizzen Möglichkeit 1 – Hinzufügen der Schadensskizze (tif) in SIB-Bauwerke unter dem Button „Skizzen“



Bild 69: 7. Schadensskizzen Möglichkeit 2 – Hinterlegung der Schadensskizzen unter dem Button „Dokumente“ (Markierung). Es können Dateien im doc-, xls-, txt- und PDF-Format hinterlegt werden. Hier wird das 3D-PDF eingefügt

Vorteil:

- hohe Wiedererkennungsmöglichkeit, insbesondere zur Feststellung der Schadensveränderungen bei Folgeprüfungen

Nachteil:

- die 3D-Darstellung wird nicht automatisch als Anhang zu dem Prüfbericht ausgedruckt, sie muss über externe Programme (z. B. Acrobat Reader) geöffnet und betrachtet werden,
- größere Datenmenge.

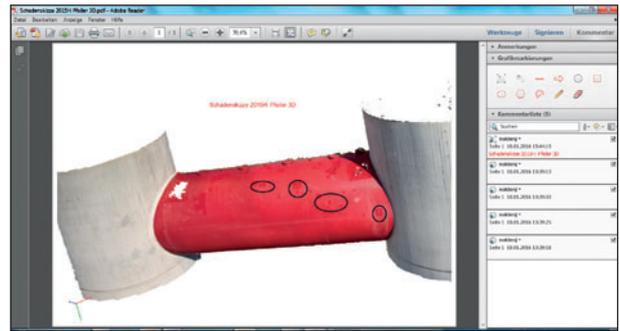


Bild 70: 7.1 Schadensskizzen Möglichkeit 2 – Generierung eines 3D-PDF aus den Aufnahmen der Befliegung. Erforderlichenfalls können besondere Markierungen/ Erläuterungen usw. ergänzt werden

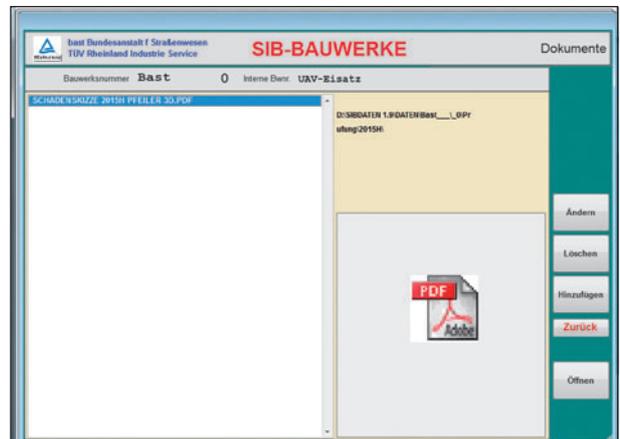


Bild 71: 7.2 Schadensskizzen Möglichkeit 2 – Hinzufügung des 3D-PDF unter dem Button „Dokumente“

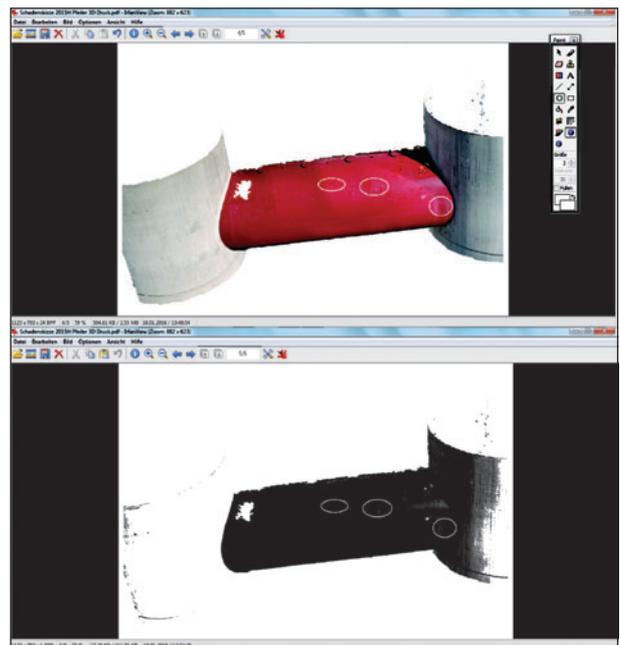


Bild 72: 8. Eine Konvertierung des 3D-PDF in eine tif-Datei ist nicht sinnvoll/zielführend

11 Analyse des Ausfalls

Im Rahmen eines Testprojektes fand am 23.10.2015 die Befliegung der Europabrücke Koblenz in drei Teilbereichen statt.

Die äußeren Bedingungen für die Befliegung waren zunächst ideal, es herrschte nahezu totale Windstille.

Die Befliegung des ersten Teilabschnittes dauerte ca. 3 Stunden und verlief höchst zufriedenstellend.

Im zweiten Abschnitt sollte die Brücke seitlich sowie von der Unterseite auf einer Länge von ca. 90 m über die Mosel hinweg befliegen werden.

Zunächst erfolgte der seitliche Teil der Brückenbefliegung, die ebenso ohne Probleme verlief. Anzumerken ist, dass sämtliche Befliegungen ohne GPS-Unterstützung durchgeführt wurden, da die Brückenstruktur durch Reflexionen und Abschattung die Satellitensignale stark verfälschen. Lediglich die barometrische Höhenregelung wurde aktiviert.

Der Flug zur Aufnahme der Unterseite der Brückenstruktur wurde (wie auch bereits der Flug für die Aufnahme der Seite) so durchgeführt, dass das Fluggerät sich vom Piloten entfernte, also auf das gegenüberliegende Ufer flog.

Mittlerweile hatte leichter Wind eingesetzt, der sich im Flugverhalten (Turbulenzen) nahe der Brücke bemerkbar machte.

Vor dem Brückenpfeiler am gegenüber liegenden Ufer wurde das Fluggerät manuell in Position gehalten, um den noch verbleibenden Abstand zum Brückenpfeiler zu bestimmen, als Referenz hierzu diente ein Schacht an der Unterseite der Brücke in einer Entfernung von ca. 10 m zur tragenden Struktur der Brücke.

Als die Bestimmung erfolgt war und noch ca. 5 m zurückgelegt werden sollten, sackte das Fluggerät plötzlich schlagartig ca. 3-4 m ab, die Logfiles zeigen einen Leistungsabfall von > 600 Watt auf < 400 Watt auf. Die Ursache hierfür kann nicht eindeutig geklärt werden, allerdings zeigen die Logfiles ein kurzzeitig reduziertes PWM-Signal auf dem Gaskanal, der jedoch nicht händisch initiiert wurde. Der Pilot fing das Fluggerät ab und brachte es wieder auf Einsatzhöhe. Während des Abfangens steuerte der Pilot aus Sicherheitsgründen etwas von dem Brückenpfeiler weg. Während des Aufstei-

gens auf Ausgangshöhe bewegte sich das Fluggerät dann (vermutlich aufgrund einer Windböe) unbemerkt weiter auf den Brückenpfeiler zu. In der Annahme, ca. 15 m vom Brückenpfeiler entfernt zu sein, steuerte der Pilot nun wieder etwas auf die Brücke zu, um zur Orientierung bzw. zur Kontrolle der Position erneut den Schacht anzuvisieren.

Durch diese Fehlkalkulation der Position kollidierte das Fluggerät mit der Brücke. Der Versuch, den Copter nach der Kollision zu stabilisieren schlug fehl, sodass dieser schließlich ins Wasser fiel.

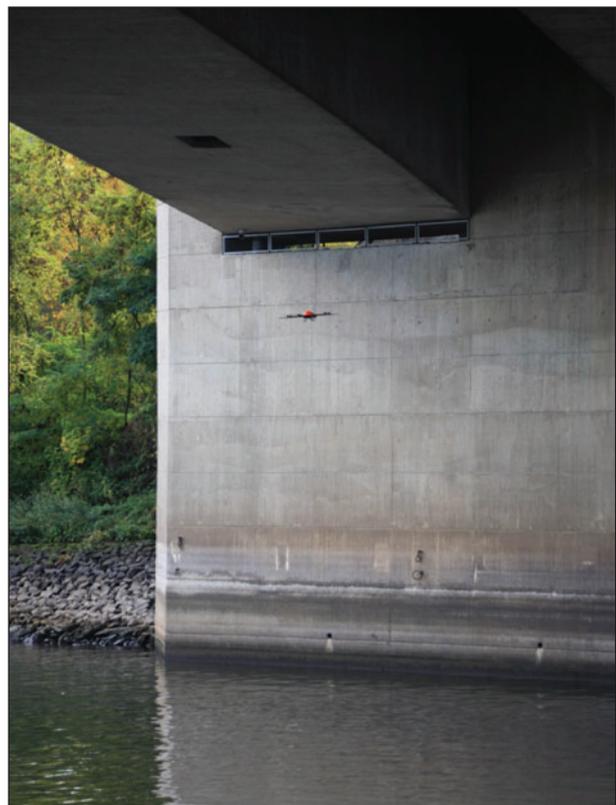


Bild 73: Copter kurz vor der Kollision, Quelle: TÜV Rheinland

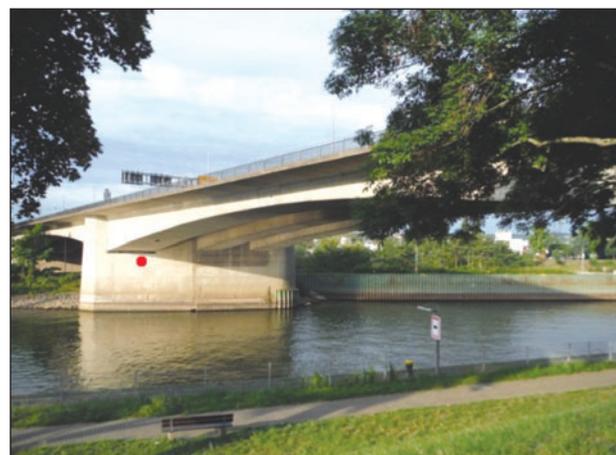


Bild 74: Stelle des Aufpralls, Quelle: TÜV Rheinland

12 Lessons Learned – Verbesserungen der Sicherheit

12.1 Einleitung

Die Erfahrungen der praktischen Umsetzungen zeigen deutliche Herausforderungen, die eine hohe Sicherheitsrelevanz haben. Dies führt zu erhöhten Anforderungen an die Sicherheitskonzepte. Gleichzeitig konnte in der Erprobung kein Sicherheitsrisiko identifiziert werden, welches derart komplex oder unkalkulierbar ist, dass es eine Bauwerksprüfung mit UAV-Technik generell oder zumindest im aktuellen Stand der Technik, nicht vertretbar macht.

Eine ausreichende Absicherung von Start- und Landezonen, sowie von zu befliegenden Bereichen ist weiterhin erforderlich und genießt eine hohe Priorität. So kann beispielsweise bei der Befliegung über Straßen oder Gehwegen eine Sperrung im Vergleich zur Nutzung eines Hubwagens zeitlich deutlich verringert werden (nämlich flexibel und nur für den Zeitraum des aktiven Flugs) – jedoch kann nicht darauf verzichtet werden.

12.2 Einsatz mit 2 PICs

Vorschläge für die Befliegung von Brücken aus Pilotensicht – Einsatz mit 2 PICs

Um Kollisionen mit zu inspizierenden Bauwerken zu vermeiden, wird nun ein neues Konzept erprobt.

Dieses sieht eine Befliegung mit zwei PICs (Pilot in Command) vor, wobei PIC1 und PIC2 sich jeweils so positionieren, dass sich ihre Sichtlinien orthogonal schneiden.

Die Fernsteuerungen werden über ein Funkmodul miteinander gekoppelt und es werden jeweils zwei Achsen gesteuert. Somit entfällt der Risikofaktor der (in der Entfernung unmöglichen) Abschätzung der Position des Fluggerätes auf (bzw. entlang) der Sichtachse.

Somit kann die Entfernung zum Objekt auf jeder Achse von den Piloten relativ exakt bestimmt und so das Risiko für Kollisionen mit dem Objekt vermieden werden.

12.3 Einschätzung der Risiken

Ein Risiko definiert sich immer aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ereignisses sowie der zu erwartenden Auswirkungen für den Fall des Eintretens.

Tabelle 4 zeigt die verschiedenen Kombinationen aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung eines Ereignisses.

Für einzelne Aspekte einer Befliegung werden jeweils die verschiedenen Faktoren der Risikoanalyse betrachtet und bewertet. Auf dieser Grundlage werden dann ggf. weitere Maßnahmen zur Risikominimierung getroffen.

In Tabelle 5 ist die Risikoanalyse für die Befliegung der Europabrücke dargestellt.

	Unbedenklich	Schwache Auswirkungen	Ernste Auswirkungen	Schlimme Auswirkungen
Unwahrscheinlich	1	2	3	4
Möglich	2	4	6	8
Wahrscheinlich	3	6	9	12
Sehr wahrscheinlich	4	8	12	16
Legende:	Keine Maßnahmen erforderlich	Präventivmaßnahmen erforderlich (z. B. Notfallfläche ausgucken/schaffen)	Erhöhte Sicherheitsmaßnahmen erforderlich (z. B. großzügig absperren)	UAS-Einsatz nicht möglich

Tab. 4: Risikomanagement, Quelle: Spectair

			Schadensausmaß			
			S1 unbedenklich	S2 Schwache Auswirkungen	S3 Ernste Auswirkungen	S4 Schlimme Auswirkungen
Eintrittswahrscheinlichkeit	W1	unwahrscheinlich	1	2	3	4
	W2	möglich	2	4	6	8
	W3	wahrscheinlich	3	6	9	12
	W4	Sehr wahrscheinlich	4	8	12	16
Risikobeschreibung		Maßnahme	Risikobewertung nach Maßnahme			
Behörden, Eigentümer, Dritte, Genehmigungen						
Nicht vorliegende oder unzureichende/ unzutreffende Aufstiegserteilung.		Einholen und Vorliegen der Aufstiegserteilung nach zuvoriger präziser Abstimmung der Befliegungs-	W1	S3	3	
Umvollständige Vorlage von Einverständnissen zustimmungspflichtiger Behörden, Beteiligten, Eigentümern und sonstigen Betroffenen.		Recherche und einholen der schriftlichen Einverständnisse von Bauwerkseigentümern, Ordnungsamt, Grünflächenamt, Wasser- und Schiffsamt, Grundstückseigentümer sowie der örtlich vorhandenen Baustelle.	W1	S2	2	
Beeinträchtigung von Rettungs- und Polizeieinsätzen.		Vorinformation sowie zusätzlich telefonische An- und Abmeldung der Befliegung bei den Leitstellen des Rettungshubschraubers Christoph 23 sowie der Polizeihubschrauberstaffel Koblenz-Winningen.	W1	S4	4	
Verletzung von Persönlichkeitsrechten, Urheberrechten usw.		Die Kamera wird auf das Objekt/die Brücke ausgerichtet, angrenzende Gebäude (Büro-, Wohngebäude) werden nicht angefragt/ aufgenommen.	W1	S2	2	
Unvorhergesehene Störung/ Beeinträchtigung der öffentlichen Sicherheit oder Ordnung.		Örtliche ad hoc Entscheidung im Einzelfall über einen gefahrlosen Weiterbetrieb durch das Prüfpersonal/ den Piloten.	W1	S2	2	
Geräteinsatz						
Technischer Ausfall/Störung UAS		Ersatzgerät des UAV sowie der Sensoren/Kameras vor Ort.	W2	S2	4	
Antriebsausfall während der Befliegung		Einsatz von UAS mit Antriebsredundanz und agilem Flugverhalten als Oktokopter.	W2	S2	4	
Verletzung/Beeinträchtigung von Passanten, Prüfpersonal und Piloten im niedrigen Start- und Landevorgang.		Absperrung des Start- und Landeplatzes mit ausreichend seitlichem Sicherheitsabstand (ca. 15/15 m) und Auslegung einer Plane zur Reduzierung von Staub- und Schmutzaufwirbelungen.	W1	S2	2	
Personaleinsatz						
Gefährdung des Prüfpersonals und der Piloten durch Straßenverkehr, Lärm, usw.		Tragen von Warnkleidung, Sicherheitsschuhen, Gehörschutz, ggf. Sehhilfen, Schutzbrillen, Sonnenbrillen. Weiterhin werden die Einsatz- und Standorte durch Pylone gekennzeichnet und gesichert.	W1	S2	2	
Pilotenausfall, Krankheit der in der Aufstiegserteilung genannten Person.		Ausreichende Benennung von Ersatzpiloten bei der Beantragung der Aufstiegserteilung.	W1	S2	2	
Nicht rechtzeitiges wahrnehmen von plötzlichen Hindernissen, Personen, Fahrzeugen usw.		Betrieb des UAS ausschließlich mit mindestens zwei Personen/Piloten und nur in Sichtweite des verantwortlichen Steuerers.	W2	S2	4	

Tab. 5: Risikoanalyse für die Befliegung der Europabrücke, Quelle: TÜV Rheinland

12.4 Technische Ebene

Zeitnah sollen auf technischer Ebene Systeme zur Kollisionsvermeidung implementiert werden. Derzeit arbeitet HEIGHT TECH an einem ultraschallbasiertem Antikollisionssystem. Dieses greift aktiv in die Regelung der Flugsteuerung ein und verhindert, dass das Fluggerät eine definierte Distanz zu jeglichen Objekten unterschreitet. Das System wird im Laufe des Jahres 2016 einsatzbereit sein.

Ein weiterer Ansatz könnte die Implementierung des RealSense-Systems von Intel/Ascending Technologies sein. Dieses basiert auf optical flow und prozessiert in Echtzeit ein Kamerabild, um Kollisionen zu verhindern. Auch RealSense greift aktiv in die Steuerung ein. Aufgrund des Gewichts und des notwendigen Platzes zur Integration erscheint eine Implementierung in die Fluggeräte von HEIGHT TECH jedoch nicht ohne weiteres umsetzbar zu sein, bietet perspektivisch jedoch erhebliches Potenzial.

			Schadensausmaß			
			S1 unbedenklich	S2 Schwache Auswirkungen	S3 Ernste Auswirkungen	S4 Schlimme Auswirkungen
Eintrittswahrscheinlichkeit	W1	unwahrscheinlich	1	2	3	4
	W2	möglich	2	4	6	8
	W3	wahrscheinlich	3	6	9	12
	W4	Sehr wahrscheinlich	4	8	12	16
Risikobeschreibung		Maßnahme	Risikobewertung nach Maßnahme			
Standort 1: Vorlandbrücke						
Absturz auf Fahrzeuge und Fußgänger auf der B9 (Bauwerksobenseite).		Kein Überfliegen von Personen und Fahrzeugen, max. Flughöhe nur bis Bauwerkshöhe, bzw. 10 m ü.O.K.Gel.	W1	S4	4	
Ablenkung der Fahrzeugführer auf der B9 (Bauwerksobenseite) durch Sichtkontakt.		Begrenzte Flughöhe, daher kein Sichtkontakt.	W1	S3	3	
Ablenkung der Fußgänger auf der B9 (Bauwerksobenseite) durch Sichtkontakt.		Tolerierbar, da genügend örtliche Personalpräsenz	W3	S1	3	
Ablenkung der Fahrzeugführer unterhalb des Bauwerks durch Sichtkontakt.		Sehr geringes Verkehrsaufkommen und Baustellenbeschilderung vorhanden. Weiterhin Personalpräsenz und zusätzliche Pylonenaufstellung.	W2	S2	4	
Ablenkung der Fußgänger/ Radfahrer unterhalb des Bauwerks durch Sichtkontakt.		Baustellenbeschilderung vorhanden. Bereiche weit einsehbar. Weiterhin Personalpräsenz und zusätzliche Pylonenaufstellung.	W3	S1	3	
Absturz auf Bauarbeiter und Baugeräte im Baustellenbereich.		Kein Überfliegen von Personen und Fahrzeugen bzw. Geräten.	W1	S4	4	
Ablenkung von Bauarbeitern und Geräteführern im Baustellenbereich.		Ausreichend zeitliche Information/ Vorankündigung bei der Bauleitung.	W2	S2	4	
Absturz auf Gelände unter dem Bauwerk.		Tolerierbar, da es sich um abgesperrten Baustellenbereich handelt.	W2	S1	2	
Standort 2: Flussbereich, Schiffsahrtsöffnung						
Absturz auf Fahrzeuge und Fußgänger auf der B9 (Bauwerksobenseite).		Kein Überfliegen von Personen und Fahrzeugen, max. Flughöhe nur bis Bauwerkshöhe, bzw. 10 m ü.O.K.Gel.	W1	S4	4	
Ablenkung der Fahrzeugführer auf der B9 (Bauwerksobenseite) durch Sichtkontakt.		Begrenzte Flughöhe, daher kein Sichtkontakt.	W1	S3	3	
Ablenkung der Fußgänger auf der B9 (Bauwerksobenseite) durch Sichtkontakt.		Tolerierbar, da genügend örtliche Personalpräsenz	W3	S1	3	
Absturz auf Gewässer (Mosel) unter dem Bauwerk.		Tolerierbar, da keine Gefahr sondern nur Sachschaden (Verlust UAS) zu erwarten ist.	W2	S1	2	
Absturz auf Schiffe.		Kein Überfliegen von Personen und Fahrzeugen bzw. Schiffen.	W1	S4	4	
Ablenkung der Schiffsführer/Kapitäne unterhalb des Bauwerks durch Sichtkontakt.		Vorinformation der Schiffe erfolgt durch WSA, bzw. Schleusenwärter per Funk. Weiterhin Personalpräsenz.	W2	S2	4	
Ablenkung der Fußgänger/Radfahrer unterhalb des Bauwerks durch Sichtkontakt.		Zusätzliche Warnbeschilderung wird aufgestellt. Bereiche weit einsehbar. Weiterhin Personalpräsenz und zusätzliche Pylonenaufstellung.	W3	S1	3	
Standort 3: Hohlkasten Innenbereich						
Absturz auf Fahrzeuge und Fußgänger auf der B9 (Bauwerksobenseite) sowie unterhalb des Bauwerks.		Befliegung innerhalb des Hohlkastens, daher nicht möglich.	W1	S1	1	
Ablenkung der Fahrzeugführer und Fußgänger durch Sichtkontakt.		Befliegung innerhalb des Hohlkastens, daher nicht möglich.	W1	S1	1	
Kein ausreichender Sichtkontakt zu UAS aufgrund ungenügender Lichtverhältnisse.		Aufstellung von zusätzlicher Beleuchtung im Hohlkasten.	W2	S2	4	

Tab. 5: Fortsetzung

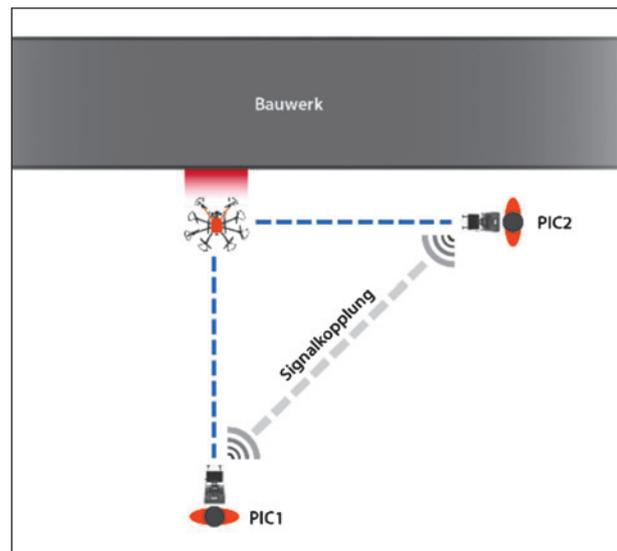


Bild 75: Kollisionsvermeidung, Quelle: Spectair

12.5 Projektorganisation

Bei allen Beteiligten – Auftraggebern, Sachverständigen, Piloten und auch genehmigenden Behörden – hat sich der im Projekt entwickelte Workflow aus der Erstellung eines kombinierten Prüf- und Befliegungsplans deutlich positiv dargestellt. Die hierin klar definierten Aufgabenstellungen und erwarteten Ergebnisse vereinfachen die Arbeit aller Beteiligten deutlich.

Besonders zu betonen ist hier das positive Feedback der genehmigenden Behörden. Hier zeigt ein solcher Plan nicht nur deutlich den geplanten Einsatz auf, sondern vermittelt auch eine differenzierte, professionelle Herangehensweise. Gerade in diesem noch recht neuen behördlichen Bereich schafft dieser Workflow Sicherheit.

13 Ausblick/weiterer Forschungsbedarf

Im Verlauf dieses Projektes wurde deutlich, dass das Thema Unterstützung der Bauwerksprüfung mithilfe von UAS eine ganze Reihe von Aspekten besitzt, die am Anfang des Projektes so nicht absehbar waren. Beispielsweise sind das Aspekte zu Flugrecht, Versicherung und Flugbetrieb sowie schnell voranschreitende Sensortechnik.

Zur Implementierung der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens, sowie der Anwendung des UAS-Dienstleistungsmarktes in die BAST-Zuständigkeiten ergibt sich nachstehender weiterer Forschungsbedarf.

I

Um Rechtssicherheit, Reproduzierbarkeit, Ergebnissicherheit und Einbindung der Ergebnisse in die Dokumentation zu gewährleisten, soll ein Leitfaden für die Bauwerksprüfung mithilfe von UAS erstellt werden. Dieser Leitfaden soll optimalerweise in die ZTV-ING integriert werden. Die Erstellung dieses Leitfadens für die Bauwerksprüfung inklusive einer Leistungsbeschreibung kann als Grundvoraussetzung gesehen werden, um die Qualität einer Befliegung zu gewährleisten. Zum einen erleichtert ein solcher Leitfaden die Planung und Durchführung einer Befliegung. Zum anderen kann das Ziel/Ergebnis einer Befliegung klar definiert und kommuniziert werden. Darüber hinaus können Angebote von UAS-Servicedienstleistern vergleichbar gemacht

werden, wodurch Transparenz auf einem eher undurchsichtigen Markt geschaffen wird. Das Anforderungsprofil des Bauwerksprüfers wird sich ebenfalls erweitern. Die grundlegenden Anforderungen an den Bauwerksprüfer sind in der DIN 1076 beschrieben, darüber hinaus sollte der Bauwerksprüfer für den unterstützenden Einsatz von UAS besonders geschult und qualifiziert werden. Ein Ausbildungskonzept von der Arbeitsvorbereitung, den einzuhaltenden Rahmenbedingungen, der einzusetzenden Sensortechnik, Analyse und Bewertung bis hin zur Ergebnisverarbeitung der Daten sollte einem festgelegten Qualitätsstandard entsprechen.

II

Im Rahmen des aktuellen Projektes konnten Schäden mithilfe der digitalen Bildaufnahme und -auswertung identifiziert werden. Die Lokalisierung dieser Schäden (genaue Lage) konnte nur sehr aufwendig mithilfe von Fotogrammetrie und Überführung in ein 3D-Modell ermittelt werden. Die in diesem Projekt eingesetzte Software ist zurzeit jedoch nicht praxistauglich für die Bedürfnisse der Bauwerksprüfung im klassischen Sinne. Deshalb sollten in einem Anschlussprojekt die aktuell existierenden Programme hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit zur digitalen Vermessung von Bauwerken mithilfe von UAS analysiert werden. Ziel ist, die Erstellung eines Praxisleitfadens für die digitale Fotografie zu erstellen. Dies beinhaltet eine Verfahrensbeschreibung zur Aufnahme und Menge der 2D-Bilder, den Einsatz von stereometrischer Auswertesoftware sowie die Übergabe an SIB-Bauwerke.

III

Der UAS-Markt ist ein junger Markt, der sich sehr schnell weiterentwickelt. Im Hinblick auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen besteht die Möglichkeit, dass Änderungen von Seiten der Aufsichtsbehörden den Markt jederzeit verändern können. Vor dem Hintergrund der von der EU geforderten schärferen Regeln für Drohnen (Die Welt: EU fordert Flugverbotszonen für Drohnen in Europa, 07.01.2016) und den daraus entstanden nationalen Aktivitäten im BMVI werden sich im Jahre 2016 gravierende Neuerungen hinsichtlich des Einsatzes von UAS in Deutschland ergeben. Dies werden voraussichtlich Änderungen hinsichtlich der Gewichtsklassen, Wegfall der 5kg-Grenze sowie die Einführung von Einsatzkategorien und damit verbundenen Risikoanalysen sein.

Das aktuelle Forschungsprojekt fand unter der Berücksichtigung der derzeitigen legislativen Rahmenbedingungen statt. Insbesondere sind hier die 5kg-Regelung bezüglich des Abfluggewichtes sowie die flugbetrieblichen Aspekte der Aufstiegs-genehmigung zu nennen.

Durch die o. g. voraussichtlichen Neuerungen, ergeben sich Änderungen bezüglich des Einsatzes von UAS in der Brückenprüfung.

Es ist daher sinnvoll, eine Marktanalyse UAV- und Sensortechnik mit den Bedürfnissen der Bauwerksprüfung an die Änderungen der legislativen Rahmenbedingungen anzupassen.

Ergänzend gilt es für die Risikoanalyse eine Beschreibungen denkbarer Worst-Case-Szenarien für Prüfdienstleistungen an Brücken/Bauwerken mit UAS auszuarbeiten.

IV

Wie im Fazit beschrieben ergeben sich durch den Einsatz von UAS Vorteile für die Brückenprüfung. In einer weiterführenden Studie sollten daher ähnliche Prüfzenarien zur Erhaltung und Betrieb von Bauwerken betrachtet und praktisch erprobt werden. Dies betrifft Verkehrszeichenbrücken, Lärmschutzwände, Stützwände sowie Gabionenwände.

Insbesondere die Möglichkeit zur Befliegung schwer zugänglicher Stellen durch den Einsatz von UAS sowie die Zeitersparnis während einer Prüfung, macht diese Technologie auch für die Prüfung der zuvor genannten Bauwerke interessant.

V

Im Kapitel 10.3 wurden erste Ansätze zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung herausgearbeitet. Eine monetäre Bewertung kann zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund der Vielzahl der einwirkenden Parameter nicht erfolgen. Es wird aber jetzt schon deutlich, dass die Bauwerksprüfung mit Unterstützung durch UAS einige Ansätze zur Optimierung liefert, die Bauwerksprüfung in Zukunft effizienter, sicherer (Arbeitsschutz) und kostenoptimierter zu gestalten. Um genauere Aussagen zur Wirtschaftlichkeit von UAV-unterstützter Brückenprüfungen gegenüber konventioneller Brückenprüfungen treffen zu können, sollte dies daher in Form einer Gegenüberstellung analysiert werden. Insbesondere der volkswirtschaftliche Nutzen einer innovativen, bildgebenden Bauwerksprüfung ließe sich ggf. dann in einer Wirtschaftlichkeitsberechnung darstellen.

14 Literatur

- Agisoft (2016): Agisoft PhotoScan User Manual Standard Edition, Version 1.2. URL: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_2_en.pdf.
- ALBERTZ, J. (1986): Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, Darmstadt
- ASB-ING (2013): Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (o. J.): Bedeutung, Organisation, Kosten – Dokumentation. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2016): Kurzinformation über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/LF/unbemannte-luftfahrtsysteme.pdf?__blob=publicationFile
- Bundesregierung (2010): Hightech-Strategie. Mobilität durch Fahrzeug- und Verkehrstechnologien. URL: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/WissenschaftWohlstand/2008-01-01-hightech-verkehr-innovationsstrategie-januar-2008.html>
- DIN 1076 (1999): Deutsche Norm. Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Überwachung und Prüfung, Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Berlin
- POMASKA, G., Prof. Dr.-Ing. (2013): Structure from Motion. URL: <http://www.scanner.imagefact.de/de/sfm.html>
- RI-EBW-PRÜF (2013): Richtlinie zur Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
- Spectair Academy (2016): Länderspezifische Genehmigungssituation [Aus den Schulungsunterlagen der Spectair Academy]

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen
Friedrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse
Borrmann, Fischer, Dori, Wild
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken
Neumann, Rauert € 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken
Hegger, Herbrand € 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton
Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken
Müller € 15,00

2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken
Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke, Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen
Placzek, Pohl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brennerberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brenninger, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton
Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells
Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Stand- sicherheit und Gebrauchstauglichkeit
Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln
Schmidt, Simon, Guder, Juknat,
Hegemann, Dehn € 16,00

B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger
Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 121: Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse
Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken
Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staeck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung
Geißler, Krohn € 15,50

B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke
Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit
Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thró
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur
Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen
Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags
Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke
Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit
Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchtigungskonzepte von Straßenbrücken
Gehrlein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln
Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden
Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton
Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken
Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie
Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden,
Köhler, Kremkau € 16,50

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de