

**F 2971**

Guido Morgenthal, Norman Hallermann, Michael Achtelik

# **Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken**

F 2971

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9589-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

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

[www.irb.fraunhofer.de/bauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung)

# **Forschungsprojekt**

## ***„Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken“***

„Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft  
Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: II 3-F20-12-1-008 / SWD-10.08.18.7-13.05)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.“

Verfasser: Prof. Dr. Guido Morgenthal  
Dipl.-Ing. Norman Hallermann  
Dipl.-Ing. Michael Achtelik

**– Endbericht –**

**Weimar, 1. Juli 2015**



## Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung .....	4
1. Projektdaten .....	6
1.1 Eckdaten .....	6
1.2 Projektbeteiligte .....	6
1.3 Projektinhalt (Kurzfassung/ Überblick).....	7
1.4 Motivation und Projektziele.....	8
2. Unbemannte Fluggeräte/ Flugsysteme .....	10
2.1 Gesetzliche Vorgaben, Regelungen und Begriffsdefinition.....	10
2.2 Unbemannte Flugsysteme – verfügbare Flugsysteme .....	12
2.3 Konfiguration des Flugsystems – Technische Spezifikationen .....	14
2.4 Einsatzgrenzen der Fluggeräte .....	17
3. Einsatzszenarien und Referenzobjekte .....	19
3.1 Einsatzszenarien .....	20
3.2 Referenzobjekte .....	20
4. Numerische Simulation der Windverhältnisse in Bauwerksnähe.....	30
4.1 Simulationsparameter und Ergebnisse (Kurzdarstellung).....	31
5. Fluggerätetechnik für bauwerksnahe Einsätze der Fluggeräte .....	44
5.1 Steuerungs- und Regelungstechnik, Fluglageregelung .....	44
5.2 Aktive Kollisionsvermeidung und Anprallschutzmechanismen .....	45
6. Fluggerätenavigation zur automatischen Aufnahme von Bauwerken.....	48
6.1 Bauwerksnahe Einsätze der Fluggeräte .....	48
6.1.1 Gebäudenahe Navigation – Windstabilität des Flugsystems .....	48
6.1.2 Navigationssoftware – Anforderungen für die Aufnahme von Bauwerken ..	50
7. Einsatzszenarien – Tests und Untersuchungsergebnisse an den Referenzbauwerken .....	54
7.1 Visuelle Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis hochauflösender Bild- und Videodaten.....	54
7.2 Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis Photogrammetrischer Daten ....	91
7.2.1 Untersuchungen am Referenzobjekt Schiefer Turm von Bad Frankenhausen – Manuelle Datengenerierung .....	91
7.2.2 Untersuchungen am Referenzobjekt Stützwand – Automatische Datengenerierung .....	105
7.2.3 Untersuchungen zur hochgenauen geometrischen Zustandsermittlung und 3D-Rekonstruktion im Rahmen von Restaurierungsmaßnahmen an Denkmalobjekten .....	121

8. Erweiterten Anwendungsszenarien im Bauwesen .....	125
9. Zusammenfassung.....	127
10. Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	130
Literaturverzeichnis .....	131

## Vorwort und Danksagung

In diesem Projekt wurde das Potential des Einsatzes von unbemannten Fluggeräten zur Zustandsermittlung von Bauwerken untersucht. Die Untersuchungen waren sehr praxisnah angelegt, um die tatsächlichen Einsatzmöglichkeiten dieser Hightech-Systeme an Bauwerken möglichst realitätsnah aufzeigen und bewerten zu können. Damit soll eine schnelle Überführung der erzielten Ergebnisse in die Praxis gewährleistet werden. Zusammen mit den beteiligten Projektpartnern Ascending Technologies GmbH und dem Institut für Diagnostik und Konservierung an Bauwerken e.V. wurden verschiedenste Feldversuche an ausgewählten Referenzbauwerken und weiteren Objekten durchgeführt. Für die Durchführung und Auswertung der Untersuchungen an den Bauwerken wurden darüber hinaus die Bauwerksbetreiber und weitere Experten wie Architekten, Vermessungsingenieure, Bauingenieure (Prüfingenieure) und Restauratoren mit einbezogen. Während der praktischen Versuche und der Auswertung der gesammelten Bild- und Videodaten sind enorme Datenmengen entstanden, die bei der projektbearbeitenden Stelle vorgehalten und eingesehen werden können. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen daher nur einen kleinen Ausschnitt aus den umfangreichen Arbeiten in diesem Projekt. Im Zuge der Projektbearbeitung wurden ausgewählte Ergebnisse bereits auf nationalen, wie auch internationalen Konferenzen und Fachmessen vorgestellt. Zusätzlich wurde eine umfangreiche Filmdokumentation zu den praktischen Versuchen an den Referenzbauwerken und den Ergebnissen mit Unterstützung von Ascending Technologies angefertigt. Teile dieser Dokumentation wurden bereits online veröffentlicht und sind im Internet frei verfügbar. Entsprechende Hinweise zu den Online-Veröffentlichungen sind den jeweiligen Kapiteln beigelegt. Im Rahmen des Projektes sind studentische Arbeiten, wie Bachelor- und Masterarbeiten mit dem Schwerpunkt Digitale Bildverarbeitung entstanden.

Besonderer Dank gilt der Ascending Technologies GmbH (AscTec) und hier insbesondere den Herren Michael Achtelik, Martin Stobbe und Johannes Späth, für ihr Engagement bei den Fluggeräte-seitigen Untersuchungen und Entwicklungen sowie bei den praktischen Versuchen an den Referenzbauwerken.

Weiterer Dank gilt dem zweiten Projektpartner, dem Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK), in Person von Herrn Uwe Kalisch, der sich insbesondere für die Untersuchungen von historischen Bauwerken zur Erfüllung der Belange im Denkmalschutz eingesetzt hat.

Ein ausdrücklicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Rodehorst, Inhaber des Lehrstuhls Computer Vision in Engineering an der Bauhaus-Universität Weimar, der besonders bei der Auswertung der Bilddaten mit seiner Fachexpertise wertvolle Beiträge leistete und die erforderliche Infrastruktur für die Aufbereitung der Bilddaten bereitstellte.

Wir bedanken uns ferner beim eingesetzten Beratergremium um Prof. Dr.-Ing. habil. C. Könke, Prof. Dr.-Ing. M. König und Prof. Dr. sc. techn. J. Trabert sowie Dr. M. Brüggemann für die fachliche Beratung im Zuge der Projektbearbeitung.

Wir danken allen nachfolgend aufgeführten Betreibern und Verantwortlichen der Referenzbauwerke, die es uns unkompliziert ermöglicht haben, die hier vorgestellten Untersuchungen und Versuche an den Bauwerken durchzuführen und uns bei der Bewertung der Ergebnisse unterstützt haben.

Herr Wilfried König, Landesamt für Bau und Verkehr in Thüringen, Erfurt

Herr Dr. Volker Lind, IFS – Institut für Sanierung GmbH, Halberstadt

Herr Matthias Strejc, Bürgermeister, Bad Frankenhausen

Herr Ralf Lindemann, Stiftung Dome und Schlösser in Sachsen-Anhalt, Leitzkau

Frau Claudia Wyludda, Domschätze Halberstadt und Quedlinburg, Halberstadt

Herr Carsten Sußmann, süssmann+süssmann architekten u. ingenieure, Magdeburg

Frau Corinna Grimm-Remus, Steinrestaurierung Grimm, Magdeburg

Herr Joachim Schimrosczyk, Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt, Blankenburg

Herr Wieland Albrecht und Hans-Günther Maye, b.a.u.werk, Weimar

Herr Arnd Köhler, meridian Neue Energien GmbH, Suhl

Wir bedanken uns bei allen hier nicht genannten, die uns im Rahmen der Durchführung des Forschungsprojektes unterstützt haben.

# 1. Projektdaten

## 1.1 Eckdaten

**Titel:** Unbemannte Fluggeräte (UAV) zur Zustandsermittlung von Bauwerken  
**Förderer:** BBSR, Forschungsinitiative Zukunft Bau  
**Projektnummer:** SWD-10.08.18.7-13.05  
**Projektzeitraum:** 29.04.2013 – 30.04.2015  
**Fördersumme:** 97.260,00 € (Gesamtsumme: 173.249,52 €)

## 1.2 Projektbeteiligte

---

**Forschungseinrichtung:** Bauhaus-Universität Weimar (BUW)  
**(Antragsteller)** Institut für Konstruktiven Ingenieurbau  
Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion (MSK)  
Marienstraße 13  
99423 Weimar

**Bauhaus-Universität  
Weimar**

**Kontakt:** Prof. Dr. Guido Morgenthal (Projektleiter)  
Tel.: +49 (0)3643 58-4418  
Fax: +49 (0)3643 58-4422  
Web: [www.uni-weimar.de/Bauing/MSK](http://www.uni-weimar.de/Bauing/MSK)  
E-Mail: [guido.morgenthal@uni-weimar.de](mailto:guido.morgenthal@uni-weimar.de)

Dipl.-Ing. Norman Hallermann  
Tel.: +49 (0)3643 58-4854  
E-Mail: [norman.hallermann@uni-weimar.de](mailto:norman.hallermann@uni-weimar.de)

---

**Projektpartner:** Ascending Technologies GmbH (AscTec)  
Konrad-Zuse-Bogen 4  
82152 Krailling

**ASCENDING  
TECHNOLOGIES**

**Kontakt:** Dipl.-Ing. Michael Achtelik (CEO)  
Tel.: +49 (0)89 89556079-0  
Fax: +49 (0)89 89556079-19  
Web: [www.asctec.de](http://www.asctec.de)  
E-Mail: [michael.achtelik@asctec.de](mailto:michael.achtelik@asctec.de)

 Institut für Diagnostik  
und Konservierung an Denkmälern  
in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

---

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in  
Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK)  
Domplatz 3  
06108 Halle (Saale)

**Kontakt:** Dipl.-Ing. Uwe Kalisch (CEO)  
Tel.: +49 (0)345 472257-21  
Fax: +49 (0)345 472257-29  
Web: [www.idk-info.de](http://www.idk-info.de)  
E-Mail: [kalisch@idk-info.de](mailto:kalisch@idk-info.de)

### 1.3 Projektinhalt (Kurzfassung/ Überblick)

In diesem Forschungsprojekt wurden wissenschaftliche Fragestellungen im Zusammenhang mit der Anwendung von unbemannten Fluggeräten/ Flugsystemen, sogenannten UAV-**U**n**m**anned **A**erial **V**ehicles/ UAS-**U**n**m**anned **A**ircraft **S**ystems, im Weiteren kurz UAS genannt, zur Zustandsermittlung von Bauwerken bearbeitet. Mit diesem Projekt konnte ein wesentlicher Beitrag geleistet werden, um das Potential solcher Geräte zur kostengünstigen Inspektion schwer zugänglicher Bauwerke bzw. Bauwerksteile zu aktivieren. Der Forschungsbedarf ergab sich insbesondere aus den komplexen Randbedingungen beim Einsatz von UAS in Bauwerksnähe sowie aus Fragen zur Qualität, Aufbereitung und möglichen Weiterverwendung der gewonnenen Daten. Zunächst wurden die Spezifika verschiedener Bauwerksklassen bestimmt, die als Basis für die Entwicklung von neuen Methoden der Steuerung, Regelung und Absicherung der Fluggeräte dienten. Insbesondere die Bauwerksgeometrie und das lokale Windfeld in Bauwerksnähe wurden hierbei im Detail betrachtet. Auf Fluggeräteseite sollten Steuerungs- und Regelungsalgorithmen auf der Basis der Windfeldsimulationen, von Abstandssensoren sowie einem mechanischen Anprallschutz entwickelt, erprobt und optimiert werden. Auf der Basis konkreter Flugeinsätze an Referenzobjekten wurden bei verschiedenen Witterungsbedingungen (Wind- und Belichtungsverhältnisse) Daten generiert, um eine Bewertung der Qualität von Foto- und Videodaten in Bezug auf die Identifizierbarkeit verschiedener typischer Schäden vorzunehmen. Darüber hinaus wurden Einsatzszenarien automatischer (teilautonom) Flugmissionen zur Datengenerierung an Bauwerken hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden für die Weiterentwicklung bzw. Optimierung einer speziellen Planungssoftware für Flugmissionen an Bauwerken herangezogen. Abschließend wurde einerseits die mögliche Verwendung der gewonnenen Daten in digitalen Modellen zur Vermessung und Visualisierung sowie der Simulation von Bauwerken betrachtet. Weiterhin wurden Perspektiven für einen Einsatz von UAS betrachtet, die über die visuelle Inspektion hinausgehen. Dabei wurde die prinzipielle Anwendbarkeit verschiedener zerstörungsfreier Prüfmethode unter Beachtung der speziellen Eigenschaften solcher Fluggeräte geprüft.

Die Bearbeitungsschwerpunkte waren:

- Potentialanalyse zur kostengünstigen Inspektion schwer zugänglicher Bauwerke,
- Untersuchungen zum lokalen Windfeld in Bauwerksnähe,
- Optimierung der Fluggerätetechnik und Entwicklung eines Prototypen für spezifische Anwendungsszenarien im Bauwesen,
- Erarbeitung geeigneter Strategien zur UAS-basierten Datenaufnahme an Bauwerken (Einzelaufnahmen, automatische/ teilautonomen Aufnahmen),
- Untersuchungen zur Identifizierbarkeit von Bauwerksschäden aus visuellen Daten,
- Untersuchungen von geeigneten Methoden zur Aufbereitung der visuellen Daten,
- Untersuchungen erweiterten Anwendungsszenarien bezüglich zerstörungsfreier Prüfmethode.

## 1.4 Motivation und Projektziele

Bauwerke sind verschiedensten Umwelteinflüssen und Schädigungsmechanismen ausgesetzt und erfordern eine sorgfältige Überwachung, um die im Sinne der Nachhaltigkeit immer länger werdenden Nutzungsdauern zu erfüllen und Erhaltungsmaßnahmen sinnvoll planen zu können. Eine kontinuierliche und umfassende Bauwerksüberwachung ist erforderlich, um Schäden an Konstruktionen frühzeitig zu erkennen. Nicht rechtzeitig erkannte Bauwerksschäden führen häufig zu unnötig hohen Sanierungs- bzw. Instandsetzungskosten und zu teilweise starken Nutzungseinschränkungen. Während bei modernen Bauwerken die Kosteneffizienz und Nachhaltigkeit im Vordergrund steht, sind bei der Erhaltung von Denkmälern auch gesellschaftspolitische Ziele und Notwendigkeiten von außerordentlicher Wichtigkeit. Die Inspektion von Bestandsbauwerken ist technisch, logistisch und personell sehr aufwendig. Die Prüfung schwer zugänglicher Bauwerke bzw. von Bauwerksteilen erfordert im Allgemeinen den Einsatz spezieller Großgeräte, Gerüste, Messtechnik und speziell geschulten Personals, siehe beispielhaft Abbildung 1. Darüber hinaus bestehen aufgrund der komplexen Bauwerksgeometrien und damit verbundenen erschwerten Zugänglichkeit für das eingesetzte Personal zum Teil enorme Einsatzrisiken.



Abbildung 1: Beispiele für die Inspektionen schwer zugänglicher Bauwerke, links oben: Industriekletterer am Schornstein [1], links unten: Brückenuntersichtgerät [2], rechts: Spezialgerüst am historischen Burgfried [3]

Eine präventive Bauwerksüberwachung bzw. Denkmalpflege wird aus den voran genannten Gründen in der Praxis nur selten oder nur unzureichend bzw. gar nicht umgesetzt. Prüfungen erfolgen oftmals nur in sehr großen zeitlichen Abständen oder erst im begründeten Verdachtsfall.

Die Forschungsarbeiten sollten einen wesentlichen Beitrag zur Effizienzsteigerung in der Zustandsermittlung und Überwachung von Bauwerken durch den Einsatz moderner UAS-Technik leisten.

Während UAS ein enormes Potential bieten, um herkömmliche Inspektionsverfahren und -methoden zu ergänzen oder möglicherweise sogar zu ersetzen, schwer zugängliche Bauwerke bzw. Bauwerksteile schnell, effizient und kostengünstig zu inspizieren, waren und sind derartige Einsätze teilweise mit der verfügbaren Technik noch nicht praktikabel. Insbesondere die meist komplizierten Geometrien von Gebäudehüllen und die komplexen Windverhältnisse in Bauwerksnähe schränken die Praxistauglichkeit selbst modernster Flugsysteme erheblich ein. Die Randbedingungen für die spezifischen Einsatzszenarien waren daher zu untersuchen und zu beschreiben, um darauf aufbauend sinnvolle und effiziente Einsatzstrategien für den Einsatz von UAS zu entwickeln. Die Qualität moderner Kameratechnik in Verbindung mit modernsten Computer Vision Methoden erlauben eine visuelle Detektierung verschiedenster typischer Schadensformen wie Risse, Korrosion, Abplatzungen, Ausblühungen oder Feuchteschäden, was zu einer Vereinfachung und gleichzeitigen Qualitätsverbesserung visueller Inspektionsmethoden führt. Obwohl UAS durch GPS und verschiedene Bewegungssensoren (Beschleunigungsaufnehmer und Gyroskope) Funktionen zur Stabilisierung (Fixierung) der Position (Position Hold) bieten, treten im natürlichen Windfeld doch stets Bewegungen in sechs Achsen auf, deren Einfluss auf die generierten Bilder zu untersuchen war. Unter Betrachtung der Steuerungs- und Regelalgorithmen der UAS musste bewertet werden, unter welchen Einsatzbedingungen (Windgeschwindigkeit, Turbulenz in der Windanströmung, Abstand zum Objekt, Lichtverhältnisse) welche Schäden sicher identifiziert werden können. Dies ist im Sinne einer aussagekräftigen und zuverlässigen Beurteilung des Bauwerkszustandes und einer nachhaltigen Bauwerksdokumentation essentiell.

Großflächige Bauwerke bzw. Bauwerksteile bieten die Möglichkeit, UAS automatisiert (teilautonom) einzusetzen, um möglichst effizient große Datenmenge aufzunehmen. Dabei werden Flugrouten vorgeplant und ohne Nutzereingriff abgeflogen. Solche Strategien werden auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht. Bei Bild- und Videobasierten Inspektionen fallen große Datenmengen an, die sinnvoll aufbereitet werden müssen. Insbesondere die Georeferenzierbarkeit von den gewonnenen Daten, bietet hier große Möglichkeiten. Zur sinnvollen Weiterverarbeitung im Ingenieurkontext waren Fragen der Datenaufbereitung und Schnittstellen zu gängigen Gebäudemodellen und Simulationsmethoden zu untersuchen. Die stark begrenzte Traglast üblicher UAS und die erforderlichen Sicherheitsabstände begrenzen die Einsatzmöglichkeiten herkömmlicher zerstörungsfreier Prüfverfahren (z.B. magnetinduktiv, radiometrisch, thermografisch). Die potentielle Erweiterung von UAS zum Einsatz solcher Untersuchungstechnik war zu untersuchen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen insbesondere zu einer Verbesserung der herkömmlichen visuellen Inspektionsmethoden, sowie zu einer Effizienzsteigerung bei Überwachungsaufgaben an Bauwerken führen. Zudem sollen Nutzungs-einschränkungen am Bauwerk und personelle Einsatzrisiken bei Überwachungs-aufgaben reduziert werden.

## 2. Unbemannte Fluggeräte/ Flugsysteme

Allgemein können unbemannte Fluggeräte, sogenannte Unmanned Aerial Vehicles (UAV) bzw. Unmanned Aircraft Systems (UAS) oder umgangssprachlich auch Drohnen, als Fluggeräte ohne menschlichen Piloten bezeichnet werden. Ursprünglich wurden diese zwischen 1970 und 1980 für militärische Zwecke entwickelt. Diese Fluggeräte können mit einer Vielzahl an anwendungs-/ einsatzspezifischer Technik ausgestattet werden und ferngesteuert durch einen Piloten am Boden, automatisch oder sogar vollkommen autonom fliegen. Die rasante Entwicklung dieser Technik in den letzten Jahren hat dazu geführt, dass diese Fluggeräte mittlerweile auch in vielen zivilen Bereichen Anwendung finden. So werden Unbemannte Fluggeräte beispielsweise für Anwendungen in der professionellen Foto- und Videografie, der Landvermessung (Photogrammetrie), der Geologie oder auch in der Land- und Forstwirtschaft genutzt. Aber auch Behörden oder Sicherheitskräfte wie Polizei und Feuerwehr setzen solche Fluggeräte inzwischen vermehrt bei ihren Einsätzen ein. Ausgestattet mit verschiedenen Sensoren bzw. Detektoren (Gas, Radioaktivität, Wind, Temperatur etc.) können diese Systeme wertvolle Informationen für Krisen- und Katastrophenkräfte in Einsatzfällen liefern. In diesem Forschungsprojekt werden ausschließlich kleine, elektrisch betriebene Fluggeräte/ Flugsysteme ausgerüstet, mit verschiedenen High-end Foto-/ Videokameras und einem Gesamtgewicht von weniger als 5 kg betrachtet.

In diesem Kapitel wird auf die Begriffsdefinition und die derzeit geltenden gesetzlichen Regelungen eingegangen. Darüber hinaus werden aktuell verfügbare Flugsysteme vorgestellt. Die technischen Spezifikationen solcher Flugsysteme werden beispielhaft anhand der für dieses Projekt verfügbaren Flugsysteme erläutert.

### 2.1 Gesetzliche Vorgaben, Regelungen und Begriffsdefinition

Die gesetzlichen Regelungen zur Nutzung unbemannter Fluggeräte für zivile und hierbei vor allem im Sinne einer kommerziellen/ gewerblichen Nutzung, waren in Deutschland über lange Zeit eine „Grauzone“ und teilweise sehr unklar. Mit der 14. Änderung des Luftverkehrsgesetzes (LuftVG) [4] vom 8. Mai 2012 wurden erstmals kleine unbemannte Fluggeräte mit ihrer zugehörigen Kontrollstation, die nicht zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben werden, offiziell mit dem Begriff „*Unbemannte Luftfahrtsysteme (UAS-Unmanned Aircraft Systems)*“ als Luftfahrzeuge in Deutschland definiert. In diesem Zusammenhang wurden darüber hinaus am 1. Juni 2012 vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) die „*Gemeinsamen Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung der Erlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen gemäß § 16 Absatz 1 Nr. 7 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO)*“ [5] herausgegeben. Im Januar 2014 folgte vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) ergänzend eine „*Kurzinformation über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen*“ [6], die zur Orientierung dient und die wichtigsten Informationen zusammenfasst, die bei der Nutzung von UAS zu beachten sind.

In Deutschland ist gemäß LuftVO §16 Absatz 1 Nr. 7 der Betrieb von UAS erlaubnispflichtig. Die Abgrenzung zwischen unbemannten Luftfahrtsystemen und

Flugmodellen erfolgt ausschließlich über den Zweck der Nutzung. Dient die Nutzung des Geräts dem Zwecke des Sports oder der Freizeitgestaltung, so gelten die Regelungen zu Flugmodellen. Ist mit dem Einsatz hingegen ein sonstiger, insbesondere ein kommerzieller/ gewerblicher Nutzungszweck verbunden (z.B. Bildaufnahmen mit dem Ziel des Verkaufs), so handelt es sich um ein unbemanntes Luftfahrtsystem, welches der Erlaubnispflicht unterliegt.

Für die Erteilung einer Aufstiegserlaubnis sind die Luftfahrtbehörden der Bundesländer zuständig, siehe Kontaktliste [6]. Die Behörden können eine „Allgemeine Aufstiegserlaubnis“ oder eine auf den „Einzelfall bezogene Erlaubnis“ erteilen. Die Aufstiegsgenehmigung ist kostenpflichtig und je nach Bundesland werden Kosten zwischen 120€ und 200€ erhoben.

Gemäß der „Gemeinsamen Grundsätze“, kann für unbemannte Luftfahrtsysteme ohne Verbrennungsmotor bis zu einem maximalen Abflug-/ Gesamtgewicht von 5 kg eine „Allgemeine Aufstiegserlaubnis“ erteilt werden. Diese ist Bundesland- und Personen gebunden und für maximal 2 Jahre gültig. Für alle anderen UAS ist für jeden Aufstieg eine gesonderte Erlaubnis einzuholen. Die Luftfahrtbehörde prüft im Rahmen der Entscheidung über einen beantragten Aufstieg auch, ob die einschlägigen datenschutzrechtlichen Bestimmungen beachtet werden. Mit Hilfe des UAS darf nicht in den Bereich der privaten Lebensgestaltung Dritter eingedrungen werden. Ebenso muss der Steuerer beim Einsatz des UAS darauf achten, dass datenschutzrechtliche Bestimmungen, Urheber- und Persönlichkeitsrechte nicht verletzt werden. Mit der Aufstiegserlaubnis sind die nachfolgenden in Auszügen aufgelisteten Auflagen und Nebenbestimmungen verbunden:

- grundsätzlich kein Einsatz der UAS über Menschenansammlungen, Unglücksorten, Katastrophengebieten und anderen Einsatzorten von Polizei oder anderen Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS), Justizvollzugsanstalten, militärischen Anlagen, Industrieanlagen und Kraftwerken,
- Einsatz über den zuvor genannten Einsatzorten nur bei ausdrücklicher Genehmigung, z.B. durch den Betreiber oder die entsprechende Behörde,
- Einsatz in der Nähe von Flughäfen verlangt einen ständigen Kontakt zur Flugüberwachung im Tower,
- Maximale Flughöhe: 100 m über Grund,
- Nachweisbare Pilotenschulung auf dem genutzten UAS,
- Führung eines detaillierten Logbuchs für Flugeinsätze,
- Nachweis über einen ausreichenden Versicherungsschutz (Haftpflichtversicherung),
- Verbot von „autonomen“ Flügen, Flüge nur mit direkter Sichtverbindung gemäß §15a Absatz 3 LuftVO,
- Nachweis über vorhandene „Notfallprogramme“ zur Gewährleistung des sicheren Umgangs mit dem UAS.

Für die Arbeit am Einsatzort ist vorab die zuständige örtliche Ordnungsbehörde bzw. die zuständige Polizeidienststelle, in Naturschutzgebieten die Naturschutzbehörde zu informieren. Der Start- und Landeplatz ist ausreichend abzusichern und die Nutzung bedarf der Genehmigung des Grundstückseigentümers. Darüber hinaus sind vorab alle erforderlichen Informationen zu den örtlichen Gegebenheiten, zu den meteorologischen Verhältnissen sowie zu den Luftraumverhältnissen einzuholen.

Für bestimmte Einsatzräume in Deutschland, wie beispielsweise das Stadtgebiet Berlin oder die Umgebung von Flughäfen, gelten besondere Auflagen, die bei den zuständigen Behörden zu erfragen sind. In anderen Ländern der EU aber auch weltweit gibt es stark variierende Regelungen, bis hin zu absoluten Flugverboten, wie z.B. in Österreich oder den USA (kommerzieller Einsatz nur mit Sondergenehmigung).

## **2.2 Unbemannte Flugsysteme – verfügbare Flugsysteme**

Am Markt ist derzeit eine Vielzahl unbemannter Flugsysteme verschiedener Hersteller zu finden. Dabei muss zwischen Flugsystemen für professionelle Anwendungen und Freizeit- und Hobbyanwendungen unterschieden werden. Flugsysteme für den Hobby und Freizeiteinsatz sind als Komplettsysteme, aber auch als Selbstbausätze für einen relativ günstigen Preis von 500€ bis 2.500€ erhältlich. Flugsysteme für den professionellen bzw. kommerziellen Einsatz, wie von den Marktführern *Ascending Technologies*, *Microdrones*, *Aibotix* oder *service-drone* sind mit 20.000 € bis 50.000 € in der Grundausstattung (Fluggerät) deutlich preisintensiver. Hinzu kommen die Kosten für die einsatzspezifischen Aufnahmegeräte (Foto-, Video oder Thermalkameras) und weitere Zusatzausstattung. Der deutliche Preisunterschied zwischen den Hobby- und Profisystemen ist nach Auswertung der praktischen Einsätze an den Referenzbauwerken durchaus gerechtfertigt, da sich die professionellen Flugsysteme deutlich zu den Flugsystemen für den Freizeit- und Hobbyeinsatz, insbesondere in der Flugstabilität, möglichen Traglast, Variabilität der Zusatzausstattung, Flugzeit und Redundanz respektive der Sicherheitsfeatures unterscheiden. Auf Basis von vorangegangenen Tests wurden für die Untersuchungen im Forschungsprojekt ausschließlich Flugsysteme für den professionellen Einsatz verwendet.

UAS werden vorrangig nach ihrer Bauart unterschieden. Dabei wird zunächst mit Blick auf die „Erlaubnispflicht“ nach der Antriebsart mit einem Elektromotor oder Verbrennungsmotor unterschieden. In diesem Forschungsprojekt werden nur kleine unbemannte Fluggeräte betrachtet, die der Allgemeinen Aufstiegserlaubnis unterliegen.

Des Weiteren wird zwischen Dreh-Flügler-UAS und Flächen- bzw. Starrflügler-UAS unterschieden. Zuletzt genannte Flugsysteme können mit einer sehr hohen Flug-/Aufnahmegeschwindigkeit operieren und werden daher vor allem für die Luftbildgestützte Aufnahme von sehr großen Flächen (Aerial Mapping) im Bereich der Land- bzw. Flächenvermessung, z.B. von Landwirtschaftlichen oder Forstwirtschaftlichen Nutzflächen, Tagebauflächen oder Geologischen Formationen eingesetzt.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft zwei Flächen-Flügler-UAS, oben ein Gatewing X100 der Firma Trimble und unten ein SIRIUS-UAS der Firma MAVinci.



Abbildung 2: Flächen-Flügler-UAS, oben: Gatewing X100 der Firma Trimble mit spezieller Startvorrichtung [7], unten: SIRIUS-UAS der Firma MAVinci [8]

Aufgrund ihrer Bauart sind solche Flugsysteme für die detaillierte Aufnahme von Bauwerken zur Zustandsermittlung nicht geeignet und werde hier nicht weiter betrachtet.

Dreh-Flügler-UAS oder sogenannte „Kopter“ haben gegenüber Flächen-Flügler-UAS den Vorteil, dass diese senkrecht starten und landen können (VTOL-Vertical Take-Off and Landing) und dafür keine Start- und Landebahn bzw. spezielle Startvorrichtung benötigen. Darüber hinaus haben Dreh-Flügler-UAS die Fähigkeit zu schweben und haben damit eine sehr hohe räumliche Variabilität, was für eine gezielte und äußerst stabile Aufnahme von Daten genutzt werden kann, wie z.B. von hoch detaillierten Foto- und Videoaufnahmen an Bauwerken. Für diese Zwecke kommen nach Auswertung der Projektergebnisse nur Dreh-Flügler-UAS mit einer extrem hohen Windstabilität in Frage. Insbesondere kommt dies bei hohen Windgeschwindigkeiten und starken Turbulenzen, die vor allem beim Einsatz in unmittelbarer Nähe von Bauwerken auftreten, zum Tragen. Darüber hinaus sind eine hochwertige Kameraausstattung und die entsprechende Sicherheit bei der Steuerung der Fluggeräte weitere entscheidende Kriterien, ob diese Flugsysteme für den Einsatz am Bauwerk geeignet sind. Abbildung 3 zeigt eine Auswahl am Markt verfügbarer Dreh-Flügler-UAS für professionelle Einsätze/Anwendungen. Für die Arbeiten in diesem Forschungsprojekt wurde ausschließlich ein UAS für professionelle Anwendungen genutzt. Die Entwicklung eines Prototyps, welcher speziell an die Belange der Bauwerksaufnahme angepasst sein sollte, konzentrierte sich allein auf die Dreh-Flügler-Technik.



Abbildung 3: Elektrisch betriebene Dreh-Flügler-UAS, oben links: microdrones md4-1000 ohne Nutzlast [9], oben rechts: Ascending Technologies Falcon 8 [10], unten links: Service-drone MULTIROTOR G4 Surveying-Robot [11], unten rechts: Aibotix X6 [12]

### 2.3 Konfiguration des Flugsystems – Technische Spezifikationen

Für die in diesem Forschungsprojekt durchzuführenden Untersuchungen zum Einsatz von UAS zur Zustandsermittlung von Bauwerken, wurden Flugsysteme des Projektpartners Ascending Technologies (AscTec) genutzt. Hierfür kamen zwei bereits vorhandene Flugsysteme Typ Falcon 8 (Baujahr 2011) der Bauhaus-Universität Weimar sowie eine Prototypen-Plattform der Firma Ascending Technologies zum Einsatz. Diese Flugsysteme wurden insbesondere hierfür ausgewählt, da diese bereits sehr windstabil waren und zudem aufgrund der Systemgeometrie ein uneingeschränktes 360° - Sichtfeld bieten, was bei der Aufnahme von Bauwerken von besonderer Bedeutung ist.

Die Flugsysteme Falcon 8 basieren auf einer Multirotorplattform mit 8 Rotoren (Oktokopter), die auf zwei motortragenden Armen in V-Form angeordnet sind. Zwischen den beiden Tragarmen befinden sich im Schwerpunkt des Flugsystems die zentrale Recheneinheit zur Steuerung und Regelung sowie die Kamerahalterung. Diese patentierte Bauform und Anordnung der Rotoren führt einerseits zu einer extrem hohen Windstabilität und andererseits zu einem uneingeschränkten 360°-Sichtfeld der Kamera. Die Fluglageregelung und Steuerung des Flugsystems erfolgt über die zentrale Recheneinheit. Verschiedene hochempfindliche Sensoren (Beschleunigungssensoren, Gyroskope, Kompass, Höhensensor) werden mit sehr hohen Datenraten abgetastet und vom Autopiloten zur Bestimmung der Position und Orientierung sowie der Stabilisierung des Fluggerätes verarbeitet. Dabei werden alle flugrelevanten Daten intern und auf einer SD-Karte gespeichert, sodass eine Auswertung der Flugdaten nach dem Flug jederzeit möglich ist. Ausgestattet mit einem Inertial-Messsystem (IMU-Inertial Measurement Unit), einem Kompass und einem Hochleistungs-Global Positioning-System-Modul (GPS-Modul) können Flüge bis zu einer Windgeschwindigkeit von 15m/s (6 bft) durchgeführt werden. Dabei sorgt die GPS-Position-Hold-Funktion für einen

GPS-gestützten Flug und das exakte Halten einer Position (Schweben), was die Steuerung eines solchen Fluggerätes deutlich vereinfacht und zur Flugsicherheit beiträgt. Zur Flugsicherheit trägt zudem die redundante Motor-Rotor-Kombination bei, die auch bei einem Ausfall von bis zu zwei Motoren eine sichere Landung gewährleistet. Darüber hinaus sorgen verschiedene Software-seitig implementierte Sicherheits-Features dafür, dass das Fluggerät auch beim plötzlichen Ausfall der Verbindung zwischen Bodenstation und Fluggerät selbstständig zur Startposition zurückkehrt. Die Steuerung des Fluggerätes erfolgt ferngesteuert mit einer mobilen Bodenstation oder automatisch durch vorprogrammierte Flugrouten. Auf einem Statusdisplay werden alle notwendigen Fluginformationen, wie Höhe, Orientierung oder auch der Kamerawinkel angezeigt. Zudem wird auf einen separaten Monitor auf der Bodenstation ein Livebild der Kamera zur Orientierung des Piloten übertragen. Mit einem zusätzlichen Controlpad kann die On-board Kamera sowie das Fluggerät (eingeschränkt auf die Drehung um die eigene Achse) von einer zweiten Person autark gesteuert werden. Dies bietet sich vor allem bei sehr schwierigen Einsätzen, wie z.B. in Bauwerksnähe oder bei stärkerem Wind an.

Die Standardtraglast dieses Fluggerätes beträgt 800g, was die Verwendung von hochwertigen digitalen Foto- und Videokameras oder auch von leichten Wärmebildkameras erlaubt. Die Kameras sind auf einer aktiv kompensierten Kamerahalterung (Gimble) befestigt, welche die Kamera im Flug horizontal (Roll-stabilisiert) und vertikal (Nick (Pitch)-stabilisiert) stabilisiert. Die spezielle Bauform des Fluggerätes und der einstellbare Kamerawinkel von 90° nach oben und unten, garantiert ein ungestörtes 360°-Sichtfeld. Die Steuerung und das Auslösen der Kamera erfolgt über die mobile Bodenstation, das zweite Controlpad bzw. automatisch bei vorprogrammierten Routen.

Die Energieversorgung des Fluggerätes erfolgt über Lithium-Polymere-Akkus, die Flüge zwischen 15 und 20 Minuten erlauben, je nach Traglast und Witterungsverhältnissen.

Für die Untersuchungen am Bauwerk standen neben dem Prototyp zwei unterschiedlich konfigurierte Flugsysteme zur Verfügung. Das Flugsystem Falcon-Foto wurde mit zwei unterschiedlichen digitalen Fotokameras ausgestattet und diente der Aufnahme von Fotos und HD-Videos am Bauwerk. Zur Ausstattung gehörte eine Panasonic Lumix TZ22 mit einem 16-fach optischen Zoom und eine Systemkamera Sony NEX-5 mit Festbrennweite und verschiedenen Wechselobjektiven. Auf der Prototypenplattform wurde eine Digitale Systemkamera Sony Alpha 7R, ein Sony Camcorder PJ810 sowie eine Inspektionsnutzlast (Kombination aus Digitaler Fotokamera Panasonic TZ und Thermalkamera FLIR Tau640) getestet. Die genutzten Flugsysteme der Bauhaus-Universität Weimar sind in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Flugsysteme der Bauhaus-Universität Weimar mit mobiler Bodenstation und Kameraausstattung, links: Falcon-Foto mit Panasonic Lumix TZ 22 (auf dem Fluggerät installiert) und Sony NEX-5, rechts: Falcon-Video mit BMS Blockkamera

Das Flugsystem Falcon-Video wurde mit einer ultraleichten BMS-UL-HD-Cam (Video Block Kamera) und einem BMS-Hochleistungs-HD-Videolink ausgestattet, der das Kamerabild live in HD-Qualität auf einen separaten Laptop (Bildschirm) übertragen konnte. Dadurch wurde eine Live-Videoanalyse des Bauwerks ermöglicht. Die Videodaten wurden zudem auf dem Laptop aufgezeichnet, sodass diese Daten auch für weitergehende Analysen des Bauwerks nutzbar sind. Darüber hinaus können aus den Videosequenzen Einzelbilder extrahiert werden.

Die Spezifikationen der eingesetzten Foto- und Videokameras auf den vorhandenen Flugsystemen der Bauhaus-Universität sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Tabelle 2 fasst die Kameraspezifikationen auf der prototypischen Testplattform zusammen.

Tabelle 1: Kameraspezifikationen

	<b>Panasonic Lumix TZ 22 (Digitale Fotokamera)</b>	<b>Sony NEX-5 (Digitale Systemkamera)</b>	<b>BMS-UL-HD-Cam (Digitale Videokamera)</b>
<b>Auflösung</b>	14.1 MP	14.2 MP	2.0 MP
<b>Sensor</b>	1/2,33" CMOS	APS-C CMOS	Sony 1/3-type CMOS
<b>Objektiv</b>	Zoomobjektiv 16x optischer Zoom Brennweite 24-384 mm	Festbrennweite Weitwinkel: 16 mm Normal: 30 mm Tele: 50 mm	Zoomobjektiv 10x optischer Zoom Brennweite 5 – 51 mm
<b>Video</b>	Full-HD (1080/50p)	Full-HD (1080/50p)	Full-HD (1080/720p)
<b>Gewicht</b>	219 g	229 g (mit 16mm Objektiv)	139 g (+160g Digitaler Full-HD Videolink)

Tabelle 2: Kameraspezifikationen des Prototypen

	<b>Inspektionsnutzlast Panasonic DMC-TZ61 + FLIR TAU2 640 (Infrarot + Fotokamera)</b>		<b>Sony Alpha 7R (Digitale Systemkamera)</b>	<b>Sony Camcorder HDR- PJ810E (Digitale Videokamera)</b>
<b>Auflösung</b>	TZ-61: 18,1 MP TAU2 640: 640x512 Pix. (14-Bit-Raw)		36 MP	24 MP
<b>Sensor</b>	1/2,33" CMOS		APS-C CMOS Full frame	Exmor R CMOS
<b>Objektiv</b>	TZ-61: Zoomobjektiv 30x optischer Zoom Brennweite 24-720 mm TAU2 640: 19 mm		Festbrennweite Weitwinkel: 28 mm Normal: 35 mm Tele: 55 mm	12x optischer Zoom
<b>Video</b>	Full-HD (1080/50p)		Full-HD (1080/50p)	Full-HD (1080/50p)
<b>Gewicht</b>	TZ-61: 240g TAU2 640: 200g		465g (ohne Objektiv)	460g

Die Piloten werden bei der Steuerung der Fluggeräte durch verschiedene, bereits werkseitig auf dem Flugsystem implementierte Softwarefeatures unterstützt. Dabei dienen Softwarefeatures wie z.B. der vollständige GPS-gestützte, der Höhenkontrollierte Flugmodus oder auch der Coming-Home-Mode einerseits der einfacheren Handhabung des Fluggerätes und andererseits der Flugsicherheit, was auch explizit seitens der Allgemeinen Aufstiegs Genehmigung gefordert wird. Darüber hinaus können mit einer zusätzlichen Wegpunktnavigations-Software GPS-gestützte Flugrouten für die Fluggeräte programmiert und anschließend vollautomatisch abgeflogen werden. Gerade bei sehr großen/ großflächigen Bauwerken, wie z.B. von Talsperren oder großflächigen Fassaden können diese teilautonomen Flugmissionen für eine schnelle und umfangreiche Datengenerierung am Bauwerk genutzt werden. Die Optimierung solcher bauwerksbezogenen Wegpunktnavigation steht u.a. im Fokus der Untersuchungen. Die gespeicherten Flugdaten ermöglichen darüber hinaus die Georeferenzierung (Aufnahmeposition) der einzelnen Luftbilder. Dies ermöglicht eine direkte Verbindung zwischen den generierten Bilddaten und dem Bauwerk.

## 2.4 Einsatzgrenzen der Fluggeräte

Neben den auf der Hand liegenden Einsatzpotentialen, existieren aber auch gewisse Grenzen und Nutzungseinschränkungen beim Einsatz von UAS, die technisch, witterungs oder gesetzlich bedingt sind. Aufgrund ihrer sehr leichten Bauweise sind diese Fluggeräte sehr windanfällig, sodass Einsätze bei starkem Wind (>15 m/s) oder starken Turbulenzen bisher kaum möglich waren. Da hauptsächlich Daten zur visuellen Ermittlung des Bauwerkszustandes gesammelt werden, entfallen Einsätze bei Regen, Schnee oder starkem Nebel, da dies die Datenqualität sehr negativ beeinflusst.

Aufgrund der geringen Traglast und des geringen zulässigen Gesamtgewichts, können diese Fluggeräte nur sehr kompakte/ sehr leichte Kameras bzw. Zusatzausstattungen tragen, was die mögliche Datenqualität einschränkt. Die geringe Traglast führt aber auch zu begrenzten Flugzeiten, da nur sehr kleine Akkus mitgeführt werden können. Die Flugzeiten sind dadurch auf einen 15 – 20 minütigen Einsatz begrenzt, was bei der Datengewinnung an sehr hohen oder auch großflächigen Bauwerken zu Einschränkungen führen kann. Einsätze bei niedrigen Temperaturen fallen in vielen Fällen noch deutlich kürzer aus. Bei Einsätzen mit großer Flugentfernung kommt erschwerend hinzu, dass dem Piloten die Orientierung und Steuerung des Fluggerätes aufgrund der kompakten (kleinen) Bauweise zunehmend schwerer fällt. Neben den technischen Grenzen spielt aber vor allem die menschliche Komponente, der Pilot, eine entscheidende Rolle. Bei einem plötzlichen Ausfall der technischen Unterstützungskomponenten wie GPS oder der Höhenkontrolle muss das Fluggerät manuell gesteuert werden. Dies führt häufig zu kritischen Flugsituationen. Diese Situationen sind meist nur von sehr erfahrenen Piloten händelbar.

Gesetzliche „Auflagen“ wie z.B. die Begrenzung der Flughöhe oder das Fliegen in direkter Sichtlinie beschränken die Einsatzmöglichkeiten zusätzlich.

### 3. Einsatzszenarien und Referenzobjekte

Aufgrund der großen räumlichen Flexibilität und der sehr stabilen Flugeigenschaften sowie der flexiblen technischen Ausstattung der Fluggeräte mit verschiedensten Kameras, sind die Einsatzmöglichkeiten von UAS im Bauwesen sehr vielfältig. Daher wurden zunächst mögliche sinnvolle Einsatzszenarien und Aufgaben im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Zustandsermittlung bzw. der Zustandsüberwachung und Prüfung von Bauwerken identifiziert. Mögliche Einsatzszenarien ergeben sich beispielsweise aus den teilweise in Vorschriften und Normen geforderten Prüf- und Überwachungsaufgaben an den jeweiligen Bauwerken, wie z.B. in der DIN 1076 [13]. Die Zustandsermittlung/ -prüfung von Bauwerken basiert dabei vorrangig auf einer direkten visuellen Prüfung, der Sichtprüfung durch den Bauwerksprüfer. Häufig sind diese direkten Sichtprüfungen, wie bereits in 1.4 erläutert, aufgrund der enormen Bauwerksgröße und erschwerten Zugänglichkeit sehr aufwändig und nur mit großem logistischem und personellem Einsatz umsetzbar, was zugleich hohe Kosten verursacht. Darüber hinaus sind direkte Sichtprüfungen, vom Menschen durchgeführte Prüfungen und somit immer subjektiv, was unter Umständen zu stark fehlerbehafteten Ergebnissen führen kann [14]. Mit Blick auf die Erhaltungskette eines Bauwerks wird ersichtlich, dass der Zustandserfassung und der daraus geschlussfolgerten Bewertung des Bauwerkszustandes, die beiden wichtigsten Rollen zukommen. In direkten Zusammenhang steht dazu auch die Dokumentation dieser Bestandsdaten, die ebenso wichtig für eine lückenlose Überwachung des Bauwerkszustandes ist. Mit Hilfe von UAS soll ein erster Schritt unternommen werden, den Prozess der Datenerfassung deutlich zu vereinfachen und wo möglich auch zu automatisieren sowie effizienter zu gestalten. Die UAS-basierten Bild- und Videodaten können zur indirekten Sichtprüfung genutzt werden, was in Kombination mit modernen Methoden aus der Photogrammetrie und des Computer Vision zukünftig zu einem automatisiertem Prozess weiterentwickelt werden kann. Damit kommt der Datenqualität dieser Bild- und Videodaten zur indirekten visuellen Bewertung des Bauwerkszustandes eine sehr große Bedeutung zu, da dies ausschlaggebend ist für eine zuverlässige Bewertung des Bauwerkszustandes ist. Dies kann zudem durch Ermittlung „objektiver“ Messwerte aus den Bilddaten zur Reduzierung von Fehlern bei der Zustandserfassung bzw. bei der Bewertung des Bauwerkszustandes beitragen. Die hier untersuchten Einsatzszenarien konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Generierung qualitativ hochwertiger Bild- und Videodaten am Bauwerk zur indirekten Sichtprüfung (Schadenserkennung) sowie auf die Auswertung der Bild- und Videodaten zur 3D-Modellierung von Bauwerken.

Aus den jeweiligen Einsatzszenarien lassen sich typische Bauwerke ableiten, bei denen der Einsatz von UAS-Technik eine deutliche Vereinfachung und Effizienzsteigerung bei der Zustandsermittlung und in der Überwachung dieser Bauwerke erwarten lässt. Diese trifft vor allem für sehr große, hohe und schwer zugängliche Bauwerke (Türme, Talsperren, Stützbauwerken, Windkraftanlagen) zu. Aus den Einsatzszenarien an den jeweiligen Bauwerken können zudem die einsatzspezifischen Anforderungen an die Untersuchungsmethodik bzw. die Methodik der Datengenerierung sowie die technischen Anforderungen an die Flugsysteme abgeleitet werden.

### 3.1 Einsatzszenarien

Allgemein lassen sich für UAS unter Berücksichtigung der derzeit verfügbaren Fluggerätetechnik und möglichen technischen Ausstattungen drei sinnvoll erscheinende Einsatzszenarien in der Zustandsermittlung und Überwachung von Bauwerken identifizieren.

- Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis detaillierter Bild- und Videodaten
  - Erfassung und Dokumentation visuell identifizierbarer Schäden am Bauwerk
  - Einzelaufnahmen von Bauwerksteilen (Hotspots), großflächige Aufnahme des gesamten Bauwerks
  - Live-Videoanalyse des Bauwerks
  - Schadenslokalisierung auf Basis georeferenzierter Bilddaten
- Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis Photogrammetrischer Daten
  - Erfassung und Auswertung Photogrammetrischer Daten zur georeferenzierten 3D-Rekonstruktion (3D-Punktwolken, Modelle) von Bauwerken
  - Detektierung geometrischer Veränderungen (Verschiebungen und Verformungen) am Bauwerk
- Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis von Infrarot-/ Thermografiedaten
  - Erfassung von Bewuchs oder Feuchteschäden an Bauwerken
  - Erfassung von Leckagen und Schäden im Industrie- und Anlagenbau

Sinnvolle Einsatzszenarien im erweiterten Rahmen zerstörungsfreier Prüfmethode, wie z.B. Ultraschallprüfungen, lassen sich bisher noch nicht eindeutig aufzeigen. Gründe dafür sind die begrenzte Traglast der Fluggeräte, da die erforderliche Prüftechnik noch sehr schwer ist. Weitere Faktoren sind die für die meisten Prüfmethode erforderliche sehr kurze Distanz (bis hin zur Berührung des Bauwerks) zum Bauwerk und die Energieversorgung der Sensorik sowie Datenverarbeitung/ -speicherung auf dem Flugsystem bzw. die Live-Datenübertragung.

### 3.2 Referenzobjekte

Für die praxisorientierten Untersuchungen der in 3.1 identifizierten Einsatzszenarien wurden entsprechende Referenzobjekte ausgewählt. Die Auswahl dieser Objekte erfolgte einerseits nach den Anforderungen der Bauwerksprüfung solcher Bauwerke und andererseits nach den Kriterien der Bauwerksgeometrie und dem möglichen Schadenspotential am Bauwerk. Die Referenzobjekte stellen typische Bauwerke der jeweiligen Kategorie dar, bei denen ein Einsatz von UAS-Technik aufgrund der besonderen Eigenschaften dieser Bauwerke sinnvoll erscheint.

Es wurden konkrete Bauwerke aus den Kategorien Hochbau, Historische Bauwerke, Industriebauwerke und Ingenieurbauwerke ausgewählt. Für das jeweilige Bauwerk wurden die bauwerksspezifischen Eigenschaften, wie geografische Lage, Geometrie, Materialien und Oberflächenbeschaffenheit erfasst und die daraus resultierenden Parameter bezüglich der Untersuchung dieses Bauwerks mit UAS abgeleitet.

Das Schadenspotential an diesen Bauwerken beschränkt sich auf Schäden, die auf Basis visueller Daten identifiziert werden können. Dabei handelt es sich um „direkt visuell erkennbare“ Schäden wie Risse, Abplatzungen, Korrosion (Roststellen/-fahnen), Verfärbungen oder Ausblühungen und um „indirekt erkennbare Schäden“ wie Verschiebungen bzw. Verformungen am Bauwerk oder Feuchteschäden.

Die Bauwerksgeometrie ist das entscheidende Kriterium für die Entwicklung geeigneter Befliegungs-/ Aufnahmestrategien an den Bauwerken. Dabei haben unter anderem, die am Bauwerk vorherrschenden Windverhältnisse einen wesentlichen Einfluss auf diese Strategien. Daher wurden diese mit Hilfe numerischer CFD-Simulationen näher untersucht. Diese Simulationen wurden darüber hinaus zur Entwicklung neuer und zur Optimierung bestehender Steuerungs- und Regelungsalgorithmen der Fluggeräte genutzt.

Die teilweise komplexen Geometrien stehen aber auch in engem Zusammenhang zur Steuerung der Flugsysteme in Bezug auf eine manuelle oder automatische Datengenerierung. Dafür wurden einerseits Bauwerke mit sehr komplexen Geometrien (Kirchen, Brücken) ausgewählt, um die Machbarkeit der Datengenerierung an schwer zugänglichen Bauwerken näher zu untersuchen. Andererseits wurden Bauwerke mit „einfachen“ Geometrien ausgewählt, die aber aufgrund ihrer extremen Größe (Höhe, Ausdehnung) in den Fokus für eine automatische Datengenerierung rücken.

Nachfolgend werden die ausgewählten Referenzobjekte kurz vorgestellt.

## Hochbauwerke

### Bürogebäude der Bauhaus-Universität Weimar



Lage: Weimar  
Baujahr: 1981  
Höhe: 25 m  
Breite: 15 m  
Länge: 45 m  
Material: Stahlbeton,  
Stahl und Glas

#### Schadenspotential:

- Betonbauteile: - Risse  
- Abplatzungen  
- Rostfahnen
- Stahlbauteile: - Roststellen  
- Farbabplatzungen
- Konstruktion: - Feuchteschäden  
(allgemein) - Wärmebrücken

#### Besonderheiten:

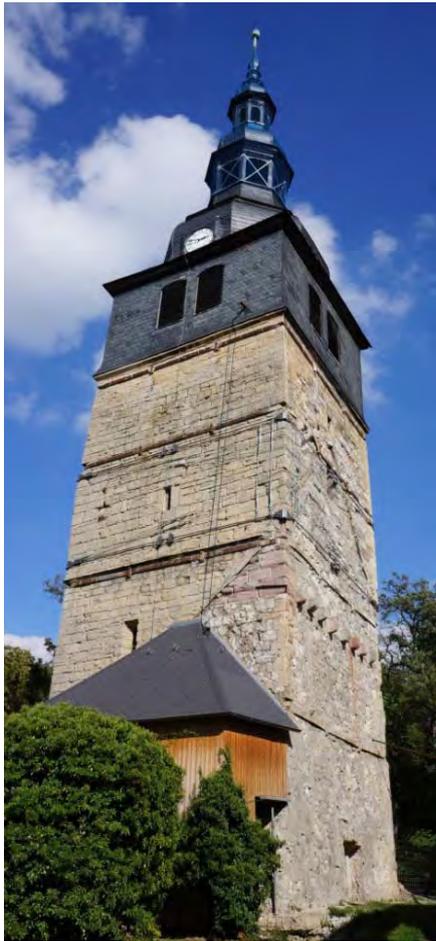
- innerstädtische Lage (enge Bebauung)
- eingeschränkte Platzverhältnisse durch angrenzende Bebauung
- Flächenhaftes Bauwerk mit großflächigen Schäden

#### Untersuchungsschwerpunkt:

- Aufnahme der Fassadenflächen, teilautonome Datengenerierung, großflächige Aufnahmen
- Schadensidentifikation und Schadenskartierung am Bauwerk

## Historische Bauwerke

### Schiefer Turm (Oberkirche) von Bad Frankenhausen



Lage: Bad Frankenhausen

Baujahr: 1382

Höhe: 56 m

Material: Naturstein, Schiefer, Holz

Schadenspotential:

Mauerwerk: - Risse (offene Fugen)  
- Abplatzungen, Ab-/Ausbrüche  
- Verformungen (Ausbeulungen)

Schiefereindeckung: - gebrochene Schieferplatten  
- Fehlstellen

Holzkonstruktion: - Feuchteschäden  
- Risse, Verformungen

Besonderheiten:

- exponierte, innerstädtische Lage (Hanglage, spezielle Windverhältnisse)
- eingeschränkte Platzverhältnisse durch vorhandenen Baumbestand und angrenzende Bebauung
- Schiefstellung des Turm von ca.  $4,9^\circ$  (Lotabweichung: ca. 4,60 m)

Untersuchungsschwerpunkt:

- Untersuchung der Windverhältnisse in Bauwerksnähe
- manuelle Datengenerierung, Hotspot-Befliegung
- Aufnahme der Natursteinfassade (sichtbare Schäden, Verformungen)
- Aufnahme der Dach-/ Schieferfläche (Turm und Turmhaube)
- Aufnahme Holztragwerk Turmhaube
- 3D-Modellierung (Ergänzung vorhandener 3D-Bauwerksdaten, Laser-Scan)
- Schadensidentifikation und Schadenskartierung am Bauwerk

## Historische Bauwerke

### Dom zu Halberstadt



Lage: Halberstadt

Baujahr: 13. Jahrhundert

Material: Naturstein (Sandstein),  
Schiefer

Schadenspotential:

Sandstein: - Risse (offene Fugen)  
- Abplatzungen  
- Verschmutzungen

Schiefer: - Bruch

Konstruktion: - Feuchtigkeitsschäden  
- Schäden an Figuren

### Dom zu Magdeburg



Lage: Magdeburg

Baujahr: 13. Jahrhundert

Höhe: 104 m

Material: Naturstein (Sandstein),  
Schiefer

Schadenspotential:

Sandstein: - Risse (offene Fugen)  
- Abplatzungen  
- Verschmutzungen

Konstruktion: - Feuchtigkeitsschäden  
- Schäden an Figuren

### Besonderheiten:

- besonderes Bauwerksgeometrie (Doppeltürme)
- Bauwerksoberfläche stark gegliedert und zerklüftet
- schwer zugängliche Bauwerksteile

### Untersuchungsschwerpunkt:

- Untersuchung der Windverhältnisse in Bauwerksnähe (Turmbereiche)
- manuelle Datengenerierung, Hotspot-Befliegung
- Aufnahme der Natursteinfassade (sichtbare Schäden, Verformungen)
- Aufnahme der Dach-/ Schieferfläche (Turmhauben und Kirchenschiff)
- Innenraumaufnahmen
- Schadensidentifikation am Bauwerk

## Industriebauwerke

### Schornstein Heizkraftwerk Jena



Lage: Jena  
Baujahr: 1981  
Höhe: 225 m  
Durchmesser: 14 m (0,0 m), 6 m (225,0 m)  
Material: Stahlbeton,  
Ziegelmauerwerk  
(Innenschale),  
Stahl

#### Schadenspotential:

- Betonbauteile: - Risse  
- Abplatzungen  
- Rostfahnen
- Stahlbauteile: - Farbabplatzungen  
- Roststellen
- Mauerwerk: - Risse (offene Fugen)  
- lose Ziegel

#### Besonderheiten:

- extreme Bauwerkshöhe
- sehr schlankes Bauwerk (spezielle Windverhältnisse)
- innerstädtische Lage, starke Industriebebauung in unmittelbarer Umgebung

#### Untersuchungsschwerpunkt:

- Untersuchung der Windverhältnisse in Bauwerksnähe
- manuelle und teilautonome Datengenerierung
- Entwicklung von Befliegungs- /Aufnahmestrategien von turmartigen Bauwerken (unter Berücksichtigung der Beleuchtungs- und Windverhältnisse)
- Aufnahme der Betonoberfläche (sichtbare Schäden)
- Aufnahme der Wartungsplattformen (auch unterhalb)
- Aufnahme der Stahlbauteile
- Aufnahme des Schornsteinkopfes (Innenschale)
- Schadensidentifikation und Schadenskartierung am Bauwerk

## Industriebauwerke

### Windenergieanlagen Windpark Rauschwitz und Bucha



Lage: Rauschwitz, Bucha

Baujahr: 2003, 2011

Höhe: 100 m (Nabe)

Durchmesser: Turm: 4 m

Rotor: 77 m

Material: Stahl (Turm, Maschinenhaus), GFK (Rotorblätter)

Schadenspotential:

Stahlbauteile: - Roststellen  
- Farbabplatzungen

GFK-Bauteile: - Abnutzung  
- Risse

Konstruktion: - lose Schraubverbindungen  
(Kontrollmarkierung)

Besonderheiten:

- On-Shore-Anlage in exponierter Lage (schwierige Windverhältnisse)
- Bauwerkshöhe (Anlagen bis zu 200 m)
- sehr schlankes Bauwerk
- Besondere Bedingungen bei Untersuchungen unter Betrieb

Untersuchungsschwerpunkt:

- manuelle Datengenerierung (Hotspots)
- Aufnahme der Stahlbauteile (Turm, Maschinenhaus)
- Aufnahme der GFK-Bauteile (Rotorblätter)
- Schadensidentifikation am Bauwerk

# Ingenieurbauwerke

## Rappbodetalsperre



Lage: L96 Rübeland - Wendefurth (Harz)

Baujahr: 1959

Höhe: 106 m

Länge: 415 m (Krone)

Material: Stahlbeton (Ortbeton-Schwergewichtsmauer)

Schadenspotential:

Betonbauteile: - Oberflächenabnutzung (Rauigkeit, Über-/Ablaufbereich)  
- Risse  
- Abplatzungen (Kronenbereich, Überlauf)

Konstruktion: - Feuchtigkeitseinbrüche an den Randbereichen  
- Pflanzenbewuchs (Moosbildung)

Besonderheiten:

- extreme Bauwerksgröße (Betonoberfläche)
- geneigte Oberfläche

Untersuchungsschwerpunkt:

- teilautonome Datengenerierung, Umgang mit großen Datenmengen
- Aufnahme der Betonoberfläche
- Aufnahme des Kronenbereichs (auch unterhalb)
- Aufnahme des Überlaufbereichs (Rauigkeit)
- Schadensidentifikation und Schadenskartierung am Bauwerk

## Ingenieurbauwerke

### Stützwand entlang der BAB 4



Lage: BAB 4 bei Bucha

Baujahr: 2014

Höhe: 20 m

Länge: 700 m

Material: Rückverankerte Spritzbetonschale mit vorgesetzten Zyklopenmauerwerk aus Granitblöcken

Schadenspotential:

- Spritzbetonschale: - Verschiebungen (Versagen von Ankerkörpern)
- Zyklopenmauerwerk: - großflächige horizontale und vertikale Verschiebungen
- lokale horizontale und vertikale Verschiebungen
- Abbrüche an einzelnen Granitblöcken
- Ausbrüche einzelner Steine (Zwickelsteine)

Besonderheiten:

- extreme Bauwerksgröße
- geneigtes Bauwerk über mehrere Ebenen
- besondere Aufnahmebedingungen (fließender Autobahnverkehr)

Untersuchungsschwerpunkt:

- Aufnahme des Gesamtbauwerkes
- Schadensidentifikation und Schadenskartierung am Bauwerk (Verschiebungen)
- 3D-Modellierung
- vollautomatische Datengenerierung
- Aufbereitung sehr großer Datenmengen

## Ingenieurbauwerke

### Wirrbachtalbrücke Geschwenda (Bogenbrücke)



Lage: B88 bei Geschwenda

Baujahr: 2002

Höhe: 40 m

Länge: 235 m

Material: Stahlbeton

Schadenspotential:

- Betonbauteile: - Risse
- Abplatzungen
- Rostfahnen

Besonderheiten:

- komplexe Bauwerksgeometrie (Bogentragwerk)
- erschwerte Zugänglichkeit einzelner Bauteile (Bogenunterseite, Stützen auf dem Boden, Unterseite Überbaukonstruktion)

Untersuchungsschwerpunkt:

- Untersuchung der Windverhältnisse in Bauwerksnähe (Überbauquerschnitt)
- Aufnahme einzelner Bauwerksteile (Detailaufnahmen)
- Schadensidentifikation und Schadenskartierung am Bauwerk
- teilautonome Datengenerierung (Aufnahmen am Bogen und Überbaukonstruktion)

## 4. Numerische Simulation der Windverhältnisse in Bauwerksnähe

Die bisherigen theoretischen und praktischen Voruntersuchungen zum Einsatz von UAS haben gezeigt, dass die vorherrschenden Windverhältnisse insbesondere in Bauwerksnähe einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten des Fluggerätes und damit auf die erreichbare Datenqualität bei fotografischen Aufnahmen darstellt. Um den Einfluss der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzen auf die Datenqualität näher zu untersuchen, wurden numerische CFD-Simulationen der Windverhältnisse durchgeführt.

Numerische Simulationsmethoden der Fluidmechanik (Computational Fluid Dynamics (CFD)) werden als Ergänzung oder Alternative zu physischen Experimenten umfangreich eingesetzt, um die Eigenschaften der Umströmung von Festkörpern zu untersuchen, siehe z.B. [14], [16]. Ein aktueller Überblick über Methoden, Ansätze und Probleme kann z.B. [17] entnommen werden.

Für die hier durchgeführten numerischen Simulationen wurde auf eine Implementierung der Vortex-Partikel-Methode zurückgegriffen. Die Software VXflow wurde durch den Antragsteller Prof. Morgenthal über einen Zeitraum von 15 Jahren entwickelt und an einer Großzahl von praktischen Problemen des Windingenieurwesens validiert und angewendet. Die Software basiert auf der Abbildung der zweidimensionalen Körpergeometrie und der Simulation der Umströmung durch Partikel, die das Wirbelstärkefeld der Strömung diskretisieren.

Vortex-Partikel-Methoden (VPM) haben sich insbesondere zur Simulation stark instationärer, abgelöster und wirbelbehafteter Strömungen bei hohen Reynoldszahlen als Alternative etabliert, siehe [18] für einen Überblick. Die bei Strömungen mit hoher Reynolds-Zahl an der Körperoberfläche generierte Turbulenz ist ein inherent dreidimensionales Phänomen. Zweidimensionale sowie auch Reynoldszahl-reduzierte Modellierungen können daher nur Approximationen darstellen. Insbesondere im Grenzbereich zur Turbulenz sowie bei Strömungen, die durch Abrisse an scharfen Kanten gekennzeichnet sind, ist der Einfluss der Turbulenz und der Dreidimensionalität jedoch begrenzt [19], [20] und Vortex-Partikel-Methoden können ausgezeichnete Ergebnisse liefern, siehe z.B. [21]-[25]. Für die Simulationen der bauwerksnahen Windverhältnisse wurde ein zweidimensionaler Ansatz gewählt, da dieser für die Abbildung der Strömungsphänomene und den Vergleich mit den auf dem Fluggerät gespeicherten Flugdaten als ausreichend genau betrachtet wird und den rechentechnischen Aufwand auch auf Standard-PC-Hardware in erträglichen Grenzen hält.

Für Anwendungen im Windingenieurwesen werden numerisch besonders robuste Vortex-Partikel-Methoden benutzt, z.B. unter Verwendung von Random Walks für die Simulation der Diffusion. Die verwendeten Ansätze erlauben die Anwendung auf geometrisch quasi beliebig komplexe Körpergeometrien. Vortex-Partikel-Methoden basieren auf einer netzfreien Formulierung, bei der die Wirbelstärke  $\omega$  durch Partikel mit einer Stärke  $\Gamma_p$  und einen Kernel  $f_\sigma$  diskretisiert wird, d.h. in  $R^2$ :

$$\omega(x, t) = \sum_{p=1}^{N_p} f_{\sigma} (x - x_p(t)) \Gamma_p . \quad (1)$$

Die Navier-Stokes-Gleichungen der Fluidmechanik lassen sich dann unter Annahme von Inkompressibilität, Zweidimensionalität sowie bei einer separaten Behandlung der Diffusion überführen in

$$\frac{D\omega}{Dt} = 0 . \quad (2)$$

Werden die Wirbelstärke diskretisierenden Partikel mit dem Geschwindigkeitsfeld konvektiert (Lagrange'sche Betrachtungsweise), so bleibt deren Stärke  $\Gamma_p$  demnach konstant. Die Konvektion der Partikel durch Zeitintegration von

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = u_i \quad (3)$$

erfordert eine Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes an den Partikelpositionen  $x_i$ . Dabei lässt sich das Geschwindigkeitsfeld ausdrücken durch die Stromfunktion  $\Psi$  und in Geschwindigkeitspotential  $\phi$ :

$$u = \nabla \times \Psi + \nabla \phi . \quad (4)$$

Bei freier konstanter Umgebungsströmung ist  $\nabla \phi = U_{\infty}$ . Die Rotation von (4) liefert

$$-\omega = \nabla^2 \Psi . \quad (5)$$

In der klassischen Vortex-Methode z.B. nach Chorin [26] wird diese Poisson-Gleichung mit einem Green'schen Ansatz gelöst, der zu einer Integralform führt, die in  $R^2$  lautet:

$$u(x) = U_{\infty} - \frac{1}{2\pi} \iint_D \frac{\omega(x_0) \times (x_0 - x)}{|x_0 - x|^2} dD_0 . \quad (6)$$

Bei der hier verwendeten Implementierung VXflow hingegen wird ein numerisch hocheffizientes hybrides Verfahren zur Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes eingesetzt.

#### 4.1 Simulationsparameter und Ergebnisse (Kurzdarstellung)

Die numerischen Simulationen der bauwerksnahen Windverhältnisse wurden für typische Bauwerksgeometrien durchgeführt, die sich an den gewählten Referenzobjekten orientieren. Die Bauwerksparameter wurden den zur Verfügung stehenden Bauwerksdokumentationen der Referenzobjekte entnommen.

Die globale Anströmgeschwindigkeit  $U_{\infty}$  wurde auf 10 m/s festgelegt, was im oberen Grenzbereich der Einsetzbarkeit von UAS liegt. Um die in Realität ständig wechselnden Windverhältnisse (Anströmrichtung) darstellen zu können, wurden die Simulationen für verschiedene Anströmrichtungen des Windes in Bezug auf das Bauwerk durchgeführt. Der Anströmwinkel variiert, je nach Querschnittsgeometrie zwischen  $0^{\circ}$  und  $90^{\circ}$ .

Der Simulationsbereich um das Bauwerk und die Querschnittsgeometrie wurden so gewählt, dass Aussagen zum bauwerksnahen Einsatz der Fluggeräte und zum

Annäherungsbereich an das Bauwerk möglich sind. Die Entfernung vom Fluggerät zum Bauwerk ist stark abhängig von der Bauwerksgeometrie, den Windverhältnissen, den Umgebungsbedingungen und letztendlich auch von der Erfahrung des Piloten. Ohne eine aktive Abstandskontrolle zwischen Fluggerät und Bauwerk oder technische Anprallschutzmechanismen beträgt der Abstand zum Objekt in praktischen Einsätzen (mindestens) 5 bis 15 m.

Aus den Zeitreihen der instationären Strömungsparameter wurden statistische Parameter errechnet und dargestellt. Einerseits wird die zeitlich gemittelte absolute Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  dargestellt, aus denen die infolge der lokalen aerodynamischen Verhältnisse entstehenden Abschattungs- und Beschleunigungseffekte sichtbar werden. Andererseits wurde für die Zeitreihen der absoluten Geschwindigkeit die Standardabweichung  $\sigma_u$  ermittelt, die ein Maß für die durch Turbulenz entstehenden Fluktuationen, d.h. zeitlichen Veränderungen der Windgeschwindigkeit, darstellt.

Aus den Simulationen wird ersichtlich, dass die mittlere Windgeschwindigkeit an den Bauwerkskanten infolge von Strömungsabriss sehr stark ansteigt und sich teilweise auch auf größere Entfernung ausbreitet. Leeseitig (windabgewandte Seite) bildet sich hingegen ein Abschattungsbereich mit geringen mittleren Geschwindigkeiten. In den durch Ablöseerscheinungen wesentlich beeinflussten Bereichen zeigen sich erhebliche Fluktuationen, da hier instabile Strömungsvorgänge dominieren. Die Bereiche mit starken Fluktuationen in der Windgeschwindigkeit (Turbulenzen) kennzeichnen die kritischen Einsatzbereiche für UAS, da hier eine ständige Korrektur des Antriebes erforderlich ist, weil das Fluggerät stark zeitlich variierenden Kräften aus der Anströmung ausgesetzt ist. Eine quasi-statische Positionierung ist hier nicht möglich, da gewisse Bewegungen, deren Größe von den Fluktuationen des Windes sowie den im Fluggerät verwendeten Sensoren und dessen Regelalgorithmus abhängen, nicht zu vermeiden sind.

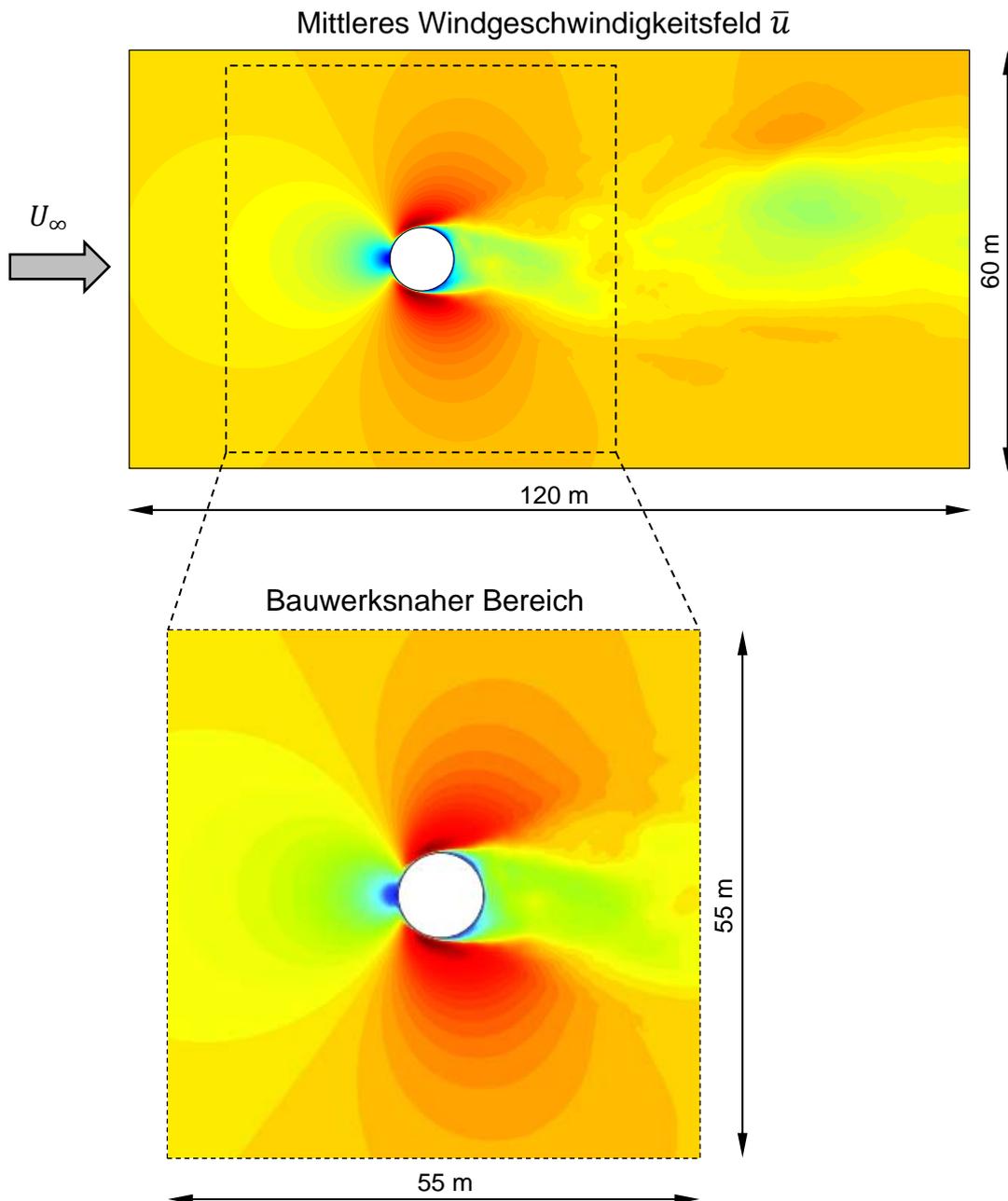
Die Darstellungen auf den folgenden Seiten zeigen die mittleren und fluktuierenden Anteile der Strömungsgeschwindigkeiten in Bezug auf die globale Windgeschwindigkeit, so dass sie unter Annahme eines weitgehend Reynoldszahl-unabhängigen Verhaltens für beliebige Windgeschwindigkeiten aussagefähig sind.

Nicht betrachtet wurde der Einfluss atmosphärischer Turbulenz, d.h. von Fluktuationen als Ergebnis der Turbulenz der atmosphärischen Grenzschicht (Böen). Die entsprechenden Fluktuationen können das Verhalten des UAS ebenfalls beeinflussen, sind jedoch typischerweise mit niedrigeren Frequenzanteilen behaftet und somit leichter vom Regelalgorithmus des Gerätes zu kompensieren. In Bauwerksnähe spielen sie daher in den meisten Fällen eine untergeordnete Rolle.

## Simulationsparameter

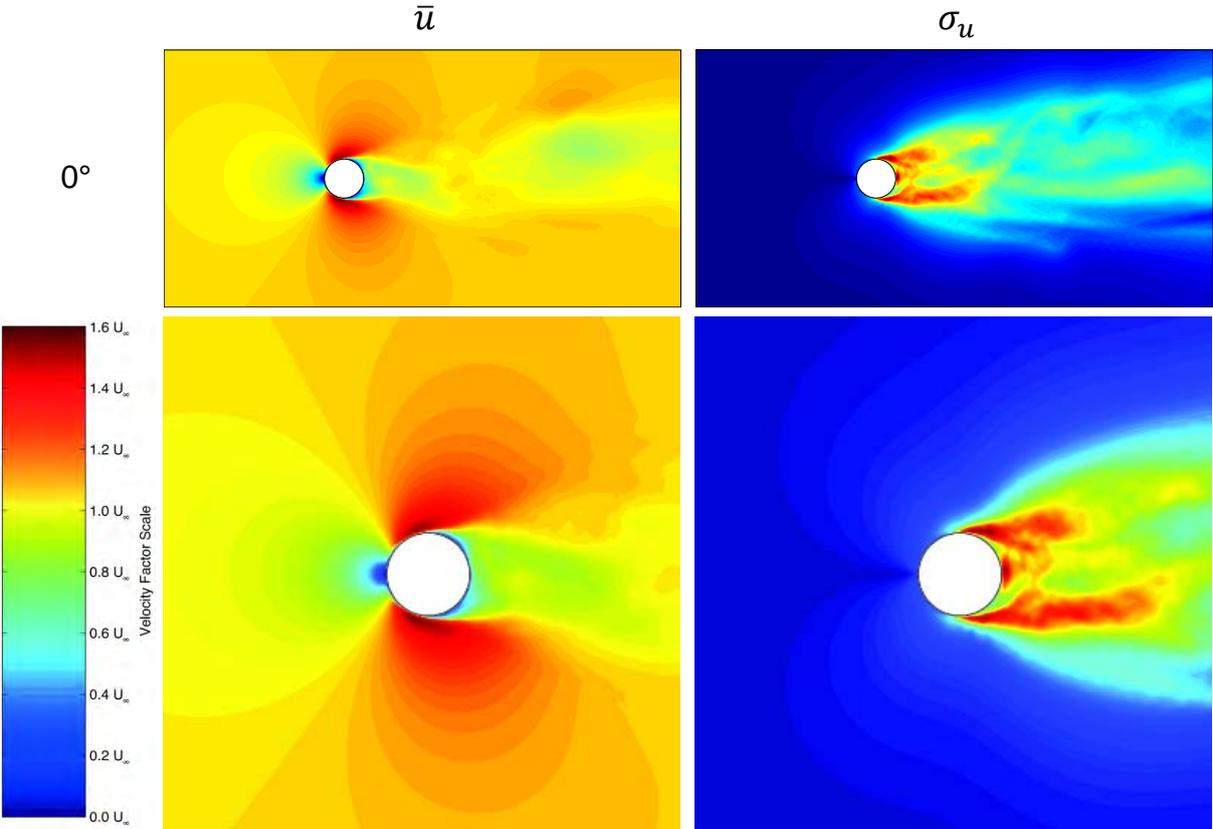
Anströmrichtung: West nach Ost (links nach rechts)  
Anströmwinkel:  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  (in definierten Schritten)  
Anströmgeschwindigkeit:  $U_\infty = 10$  m/s  
Simulationsbereich: 120 m x 60 m (Bauwerksnaher Bereich 55 m x 55 m)

Beispiel: Mittleres Windgeschwindigkeitsfeld  $\bar{u}$

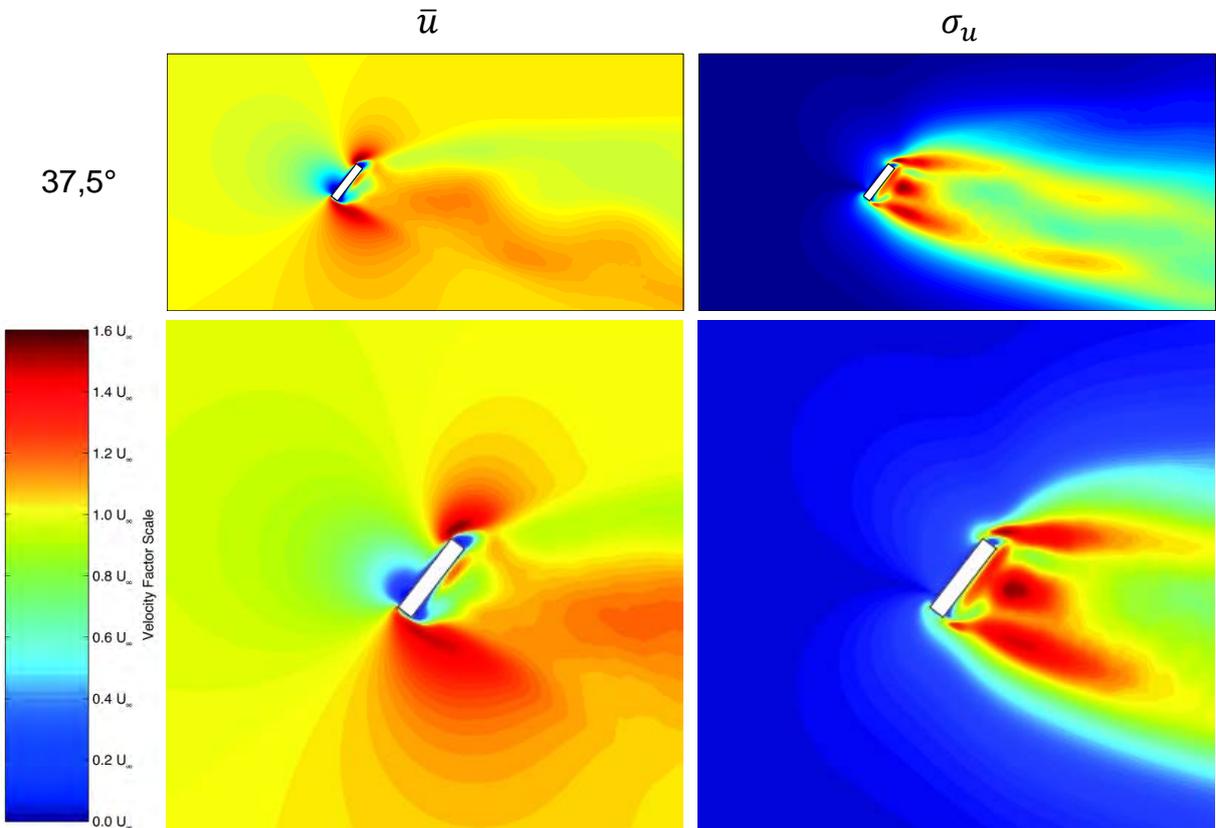
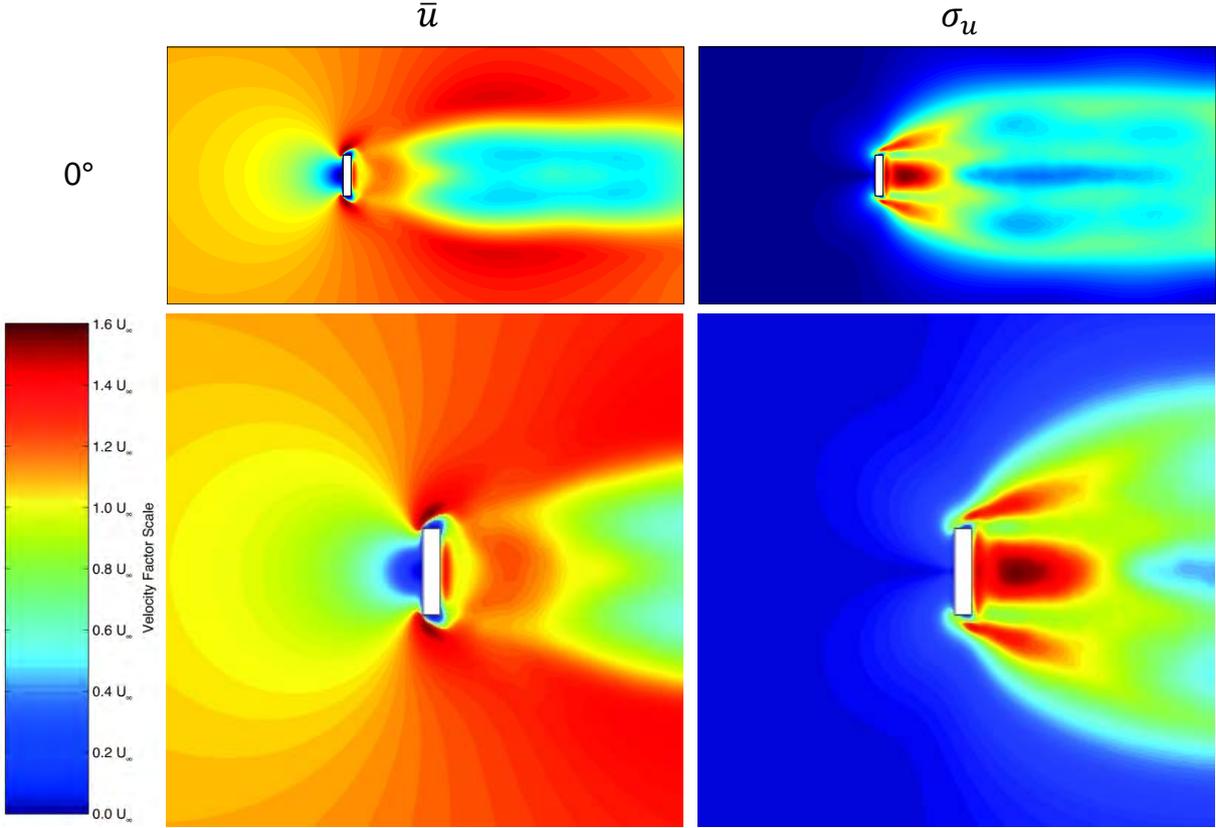


Kreisquerschnitt,  $\varnothing = 10,0 \text{ m}$

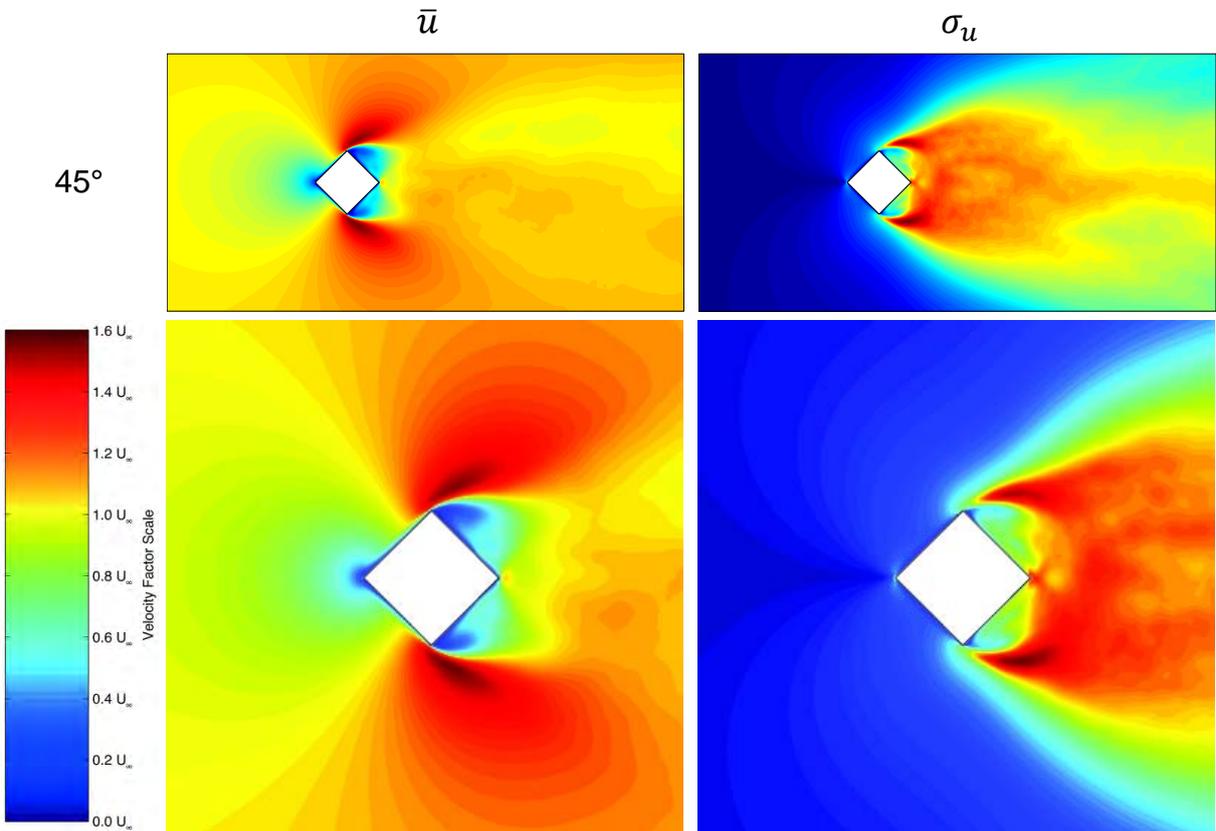
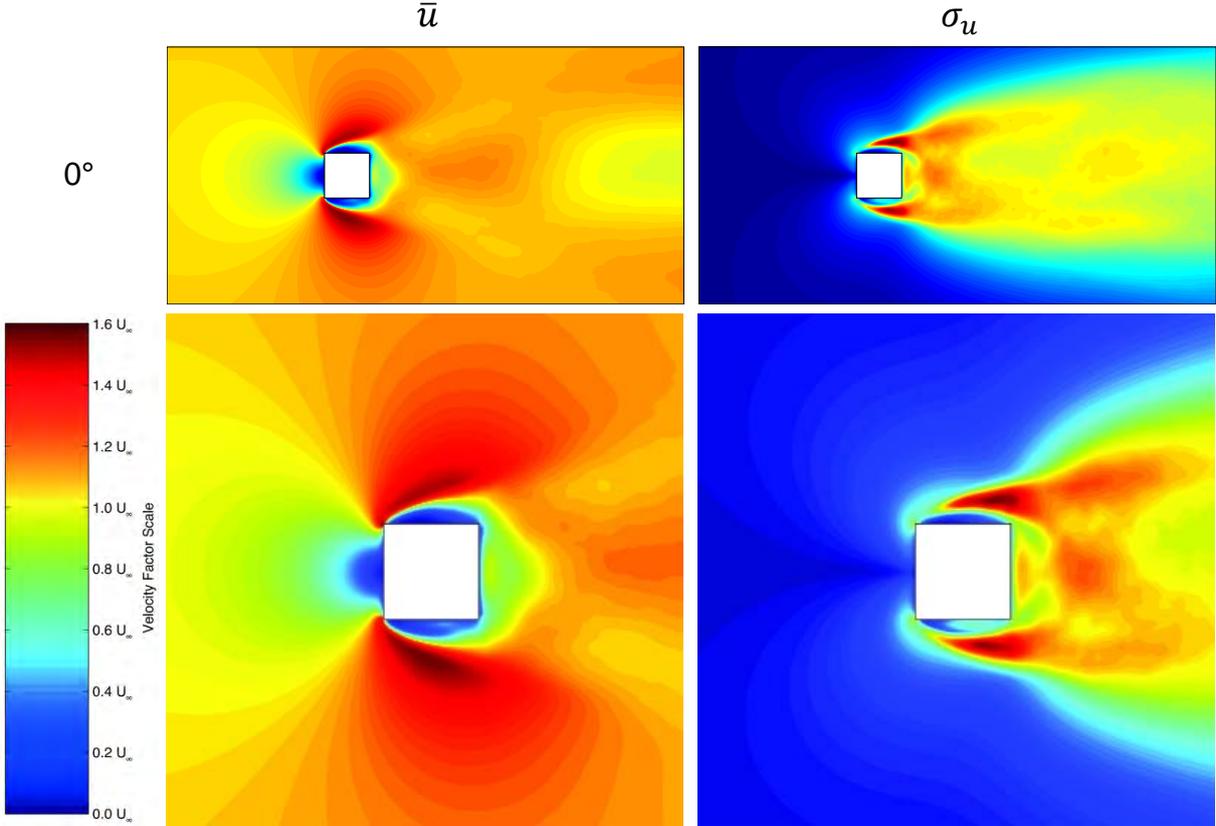
Schornsteine, Türme, Kühltürme, Maste, Brückenpfeiler



Rechteckquerschnitt, 2,0 m x 11,5 m  
Hochbauwerke/ -häuser, Brückenpfeiler

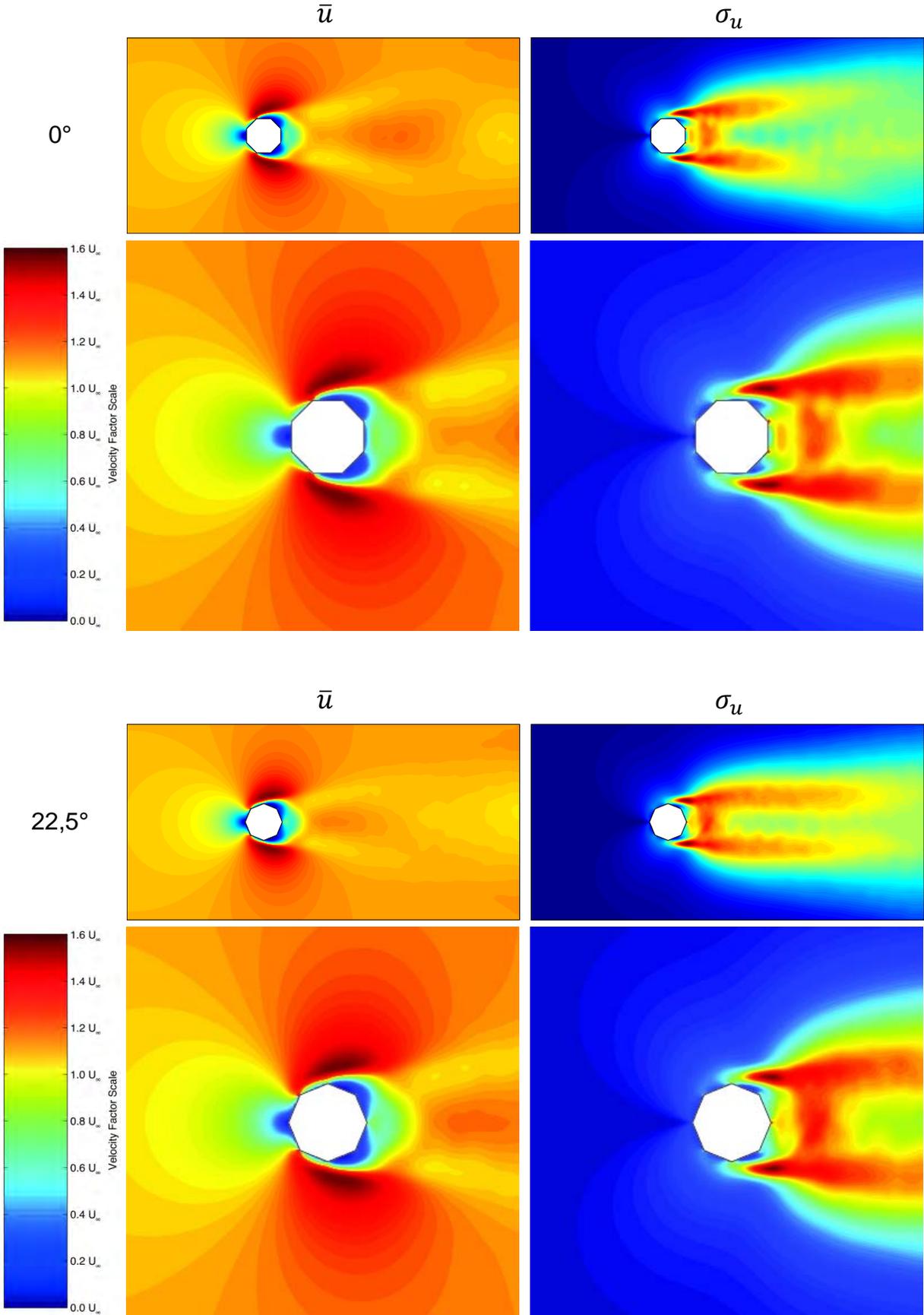


Quadratischer Querschnitt, 11,5 m x 11,5 m  
Türme, Hochhäuser



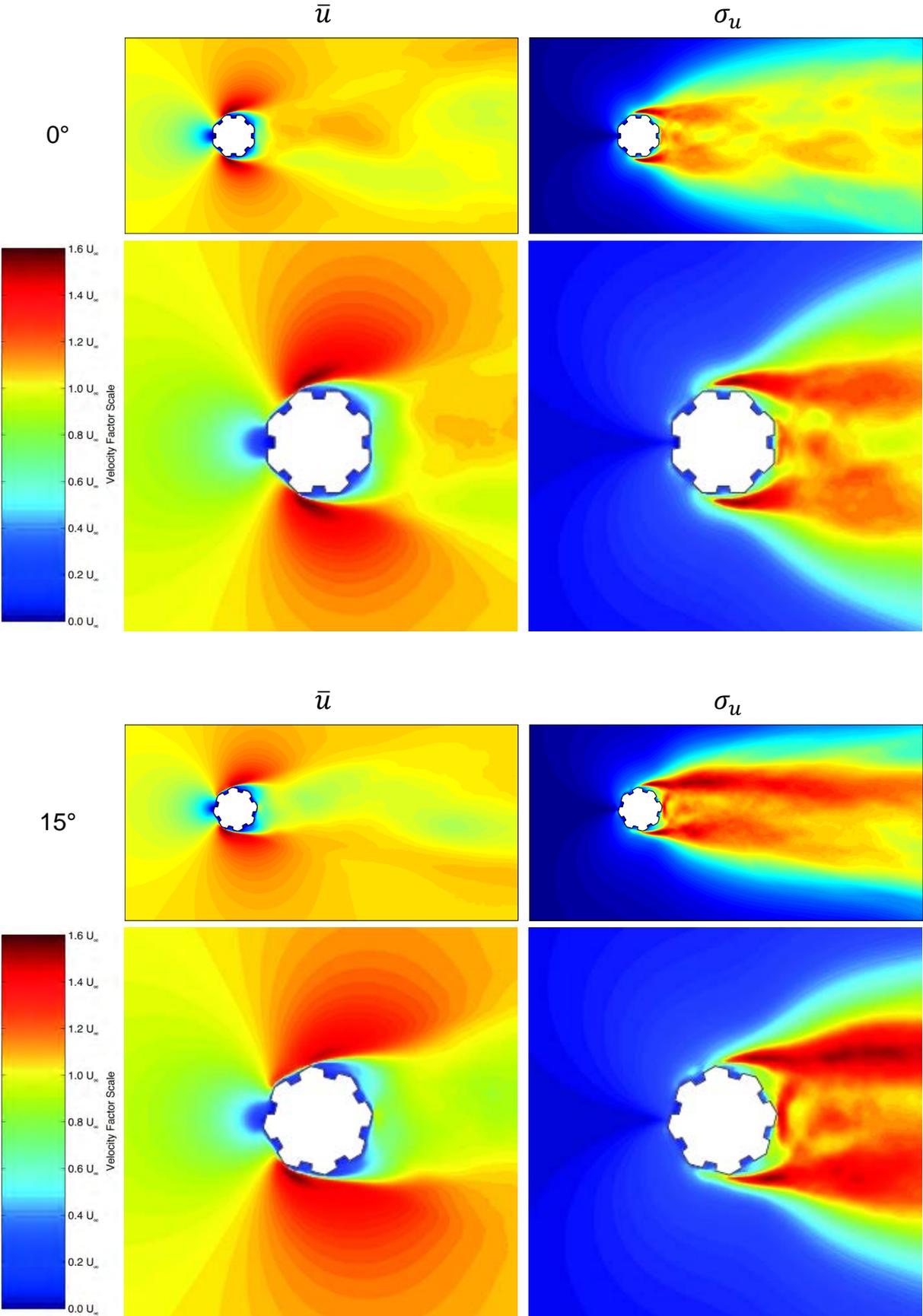
Achteckiger Querschnitt,  $\varnothing = 11,5 \text{ m}$

Türme (speziell Kirchtürme)

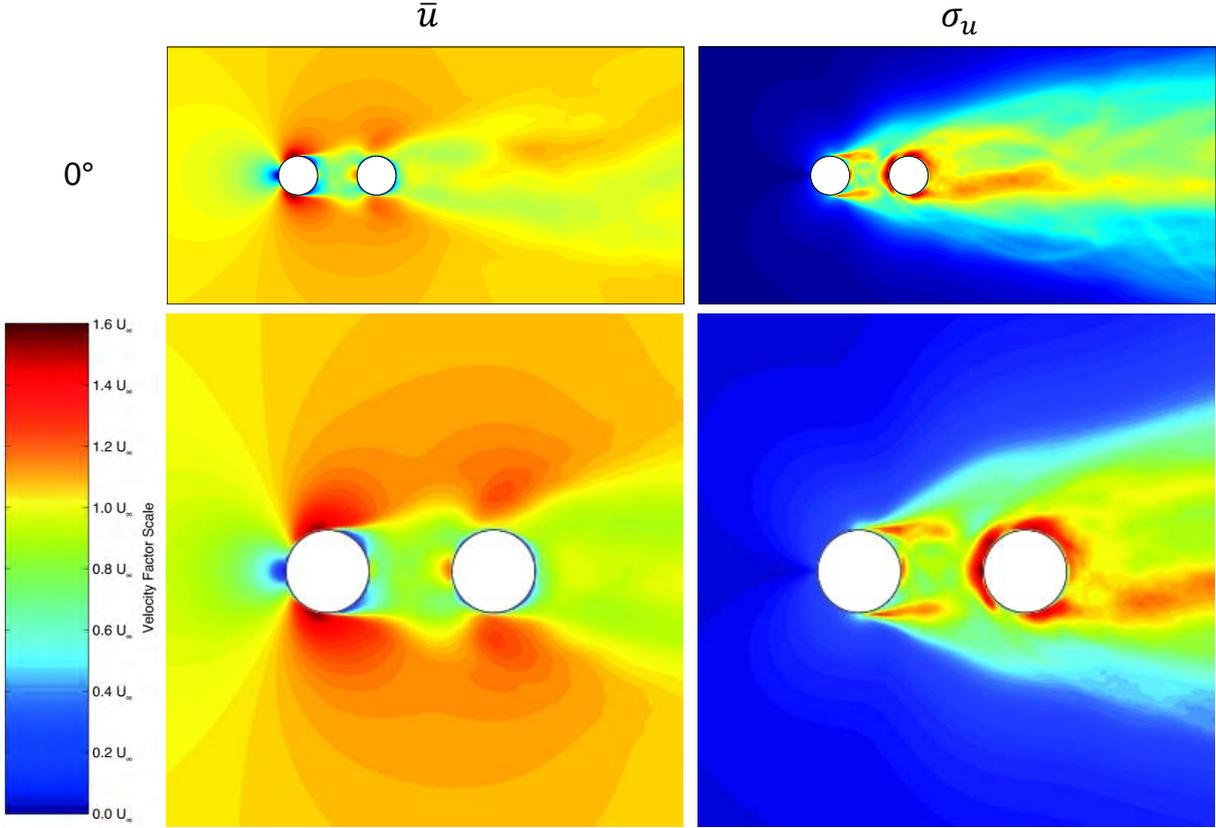


Achteckiger Querschnitt (stark gegliedert),  $\varnothing = 11,5 \text{ m}$

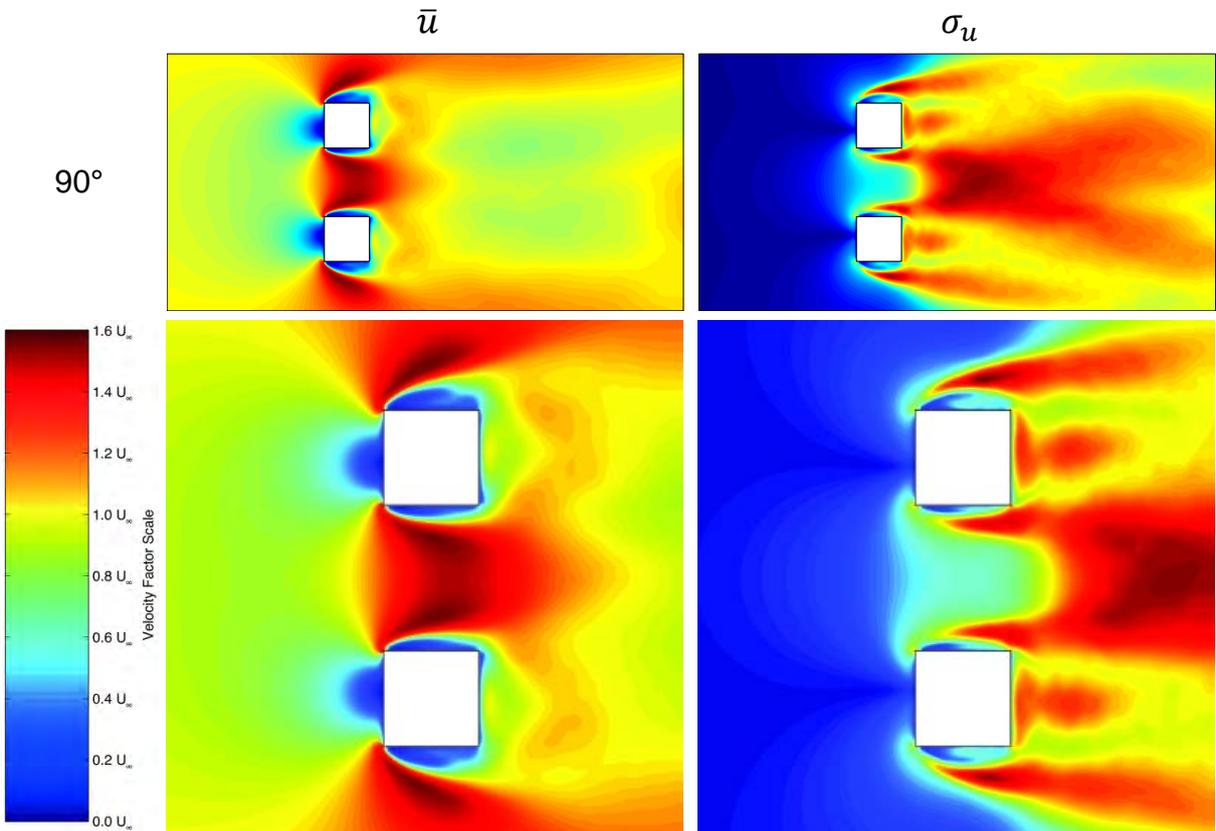
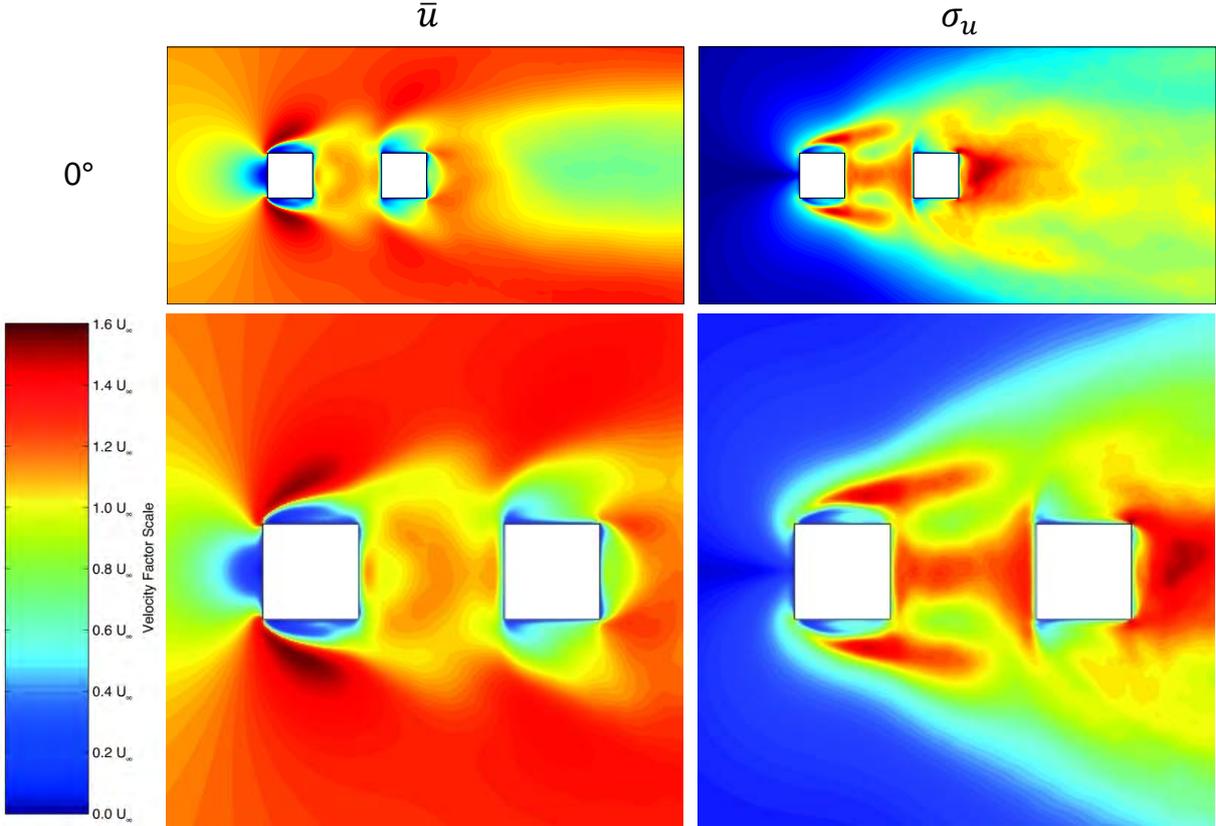
Türme (speziell Kirchtürme mit Nischenbereichen (Fenster))



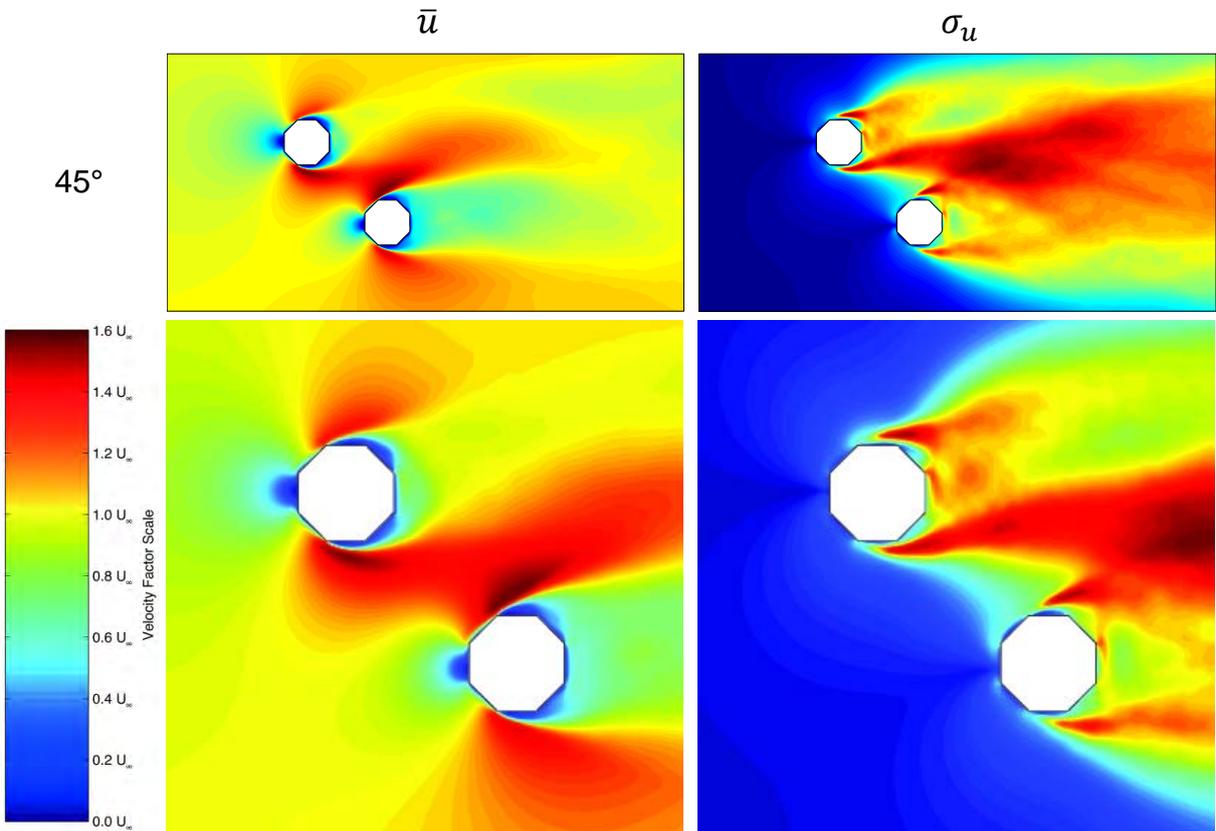
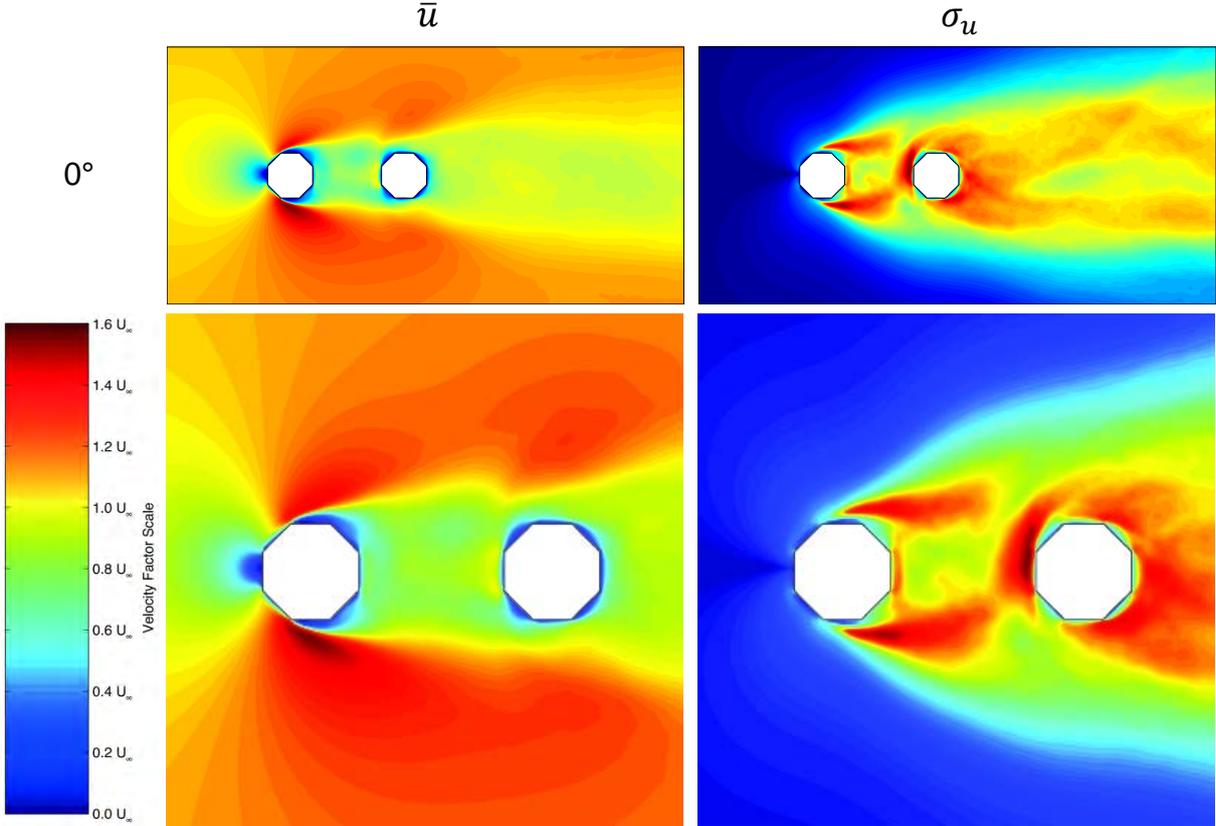
Doppelter Kreisquerschnitt,  $2 \times \varnothing = 10,0 \text{ m}$  (Lichter Abstand  $10,0 \text{ m}$ )  
 Doppeltürme, benachbarte Schornsteine, Kühltürme oder Brückenpfeiler



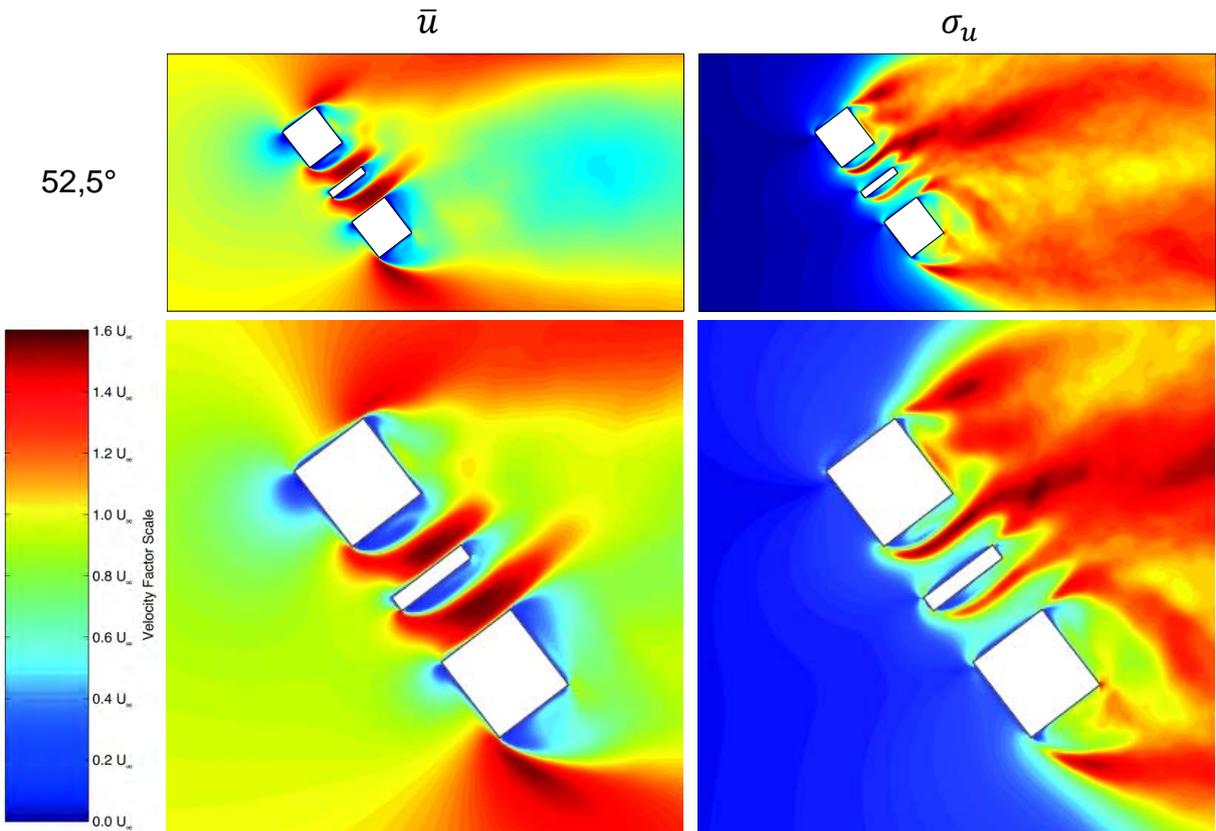
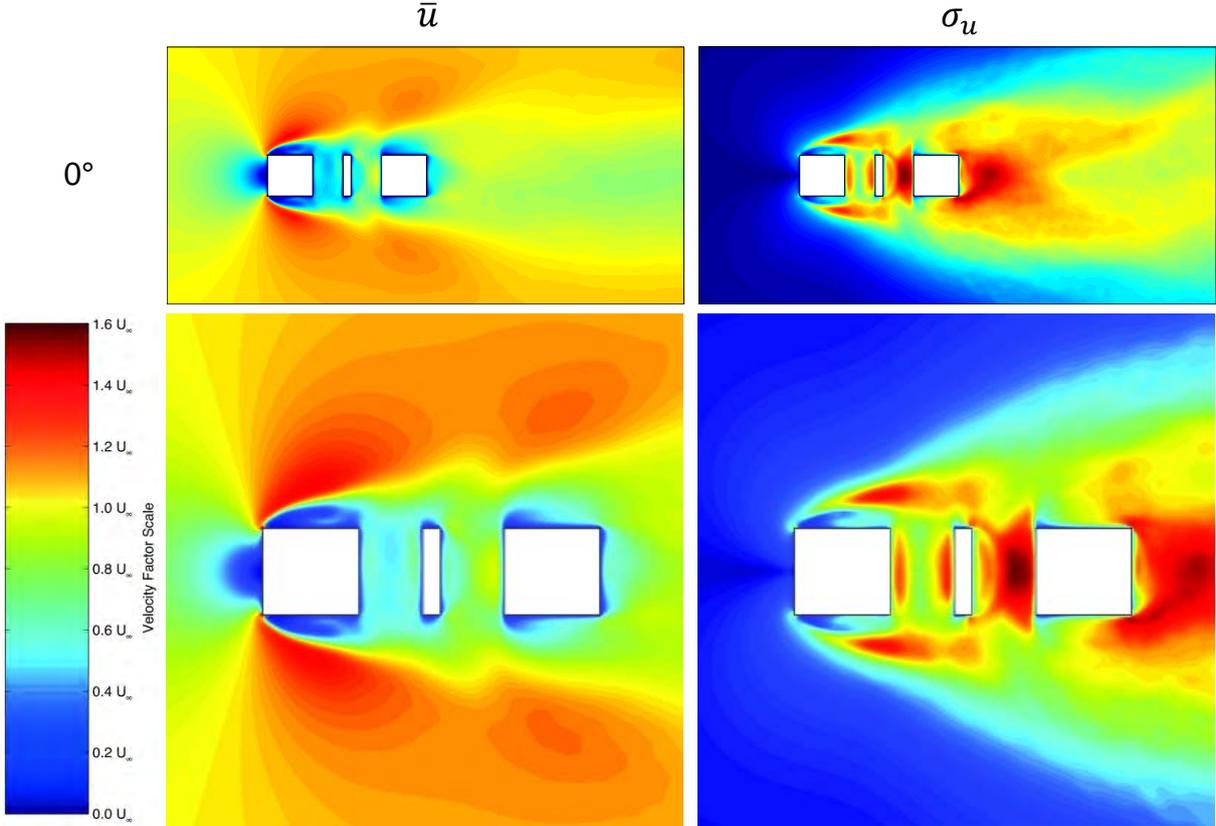
Doppelter Quadratischer Querschnitt, 11,5 m x 11,5 m (Lichter Abstand 17,6 m)  
Doppeltürme, Doppelpfeiler, benachbarte Hochhäuser



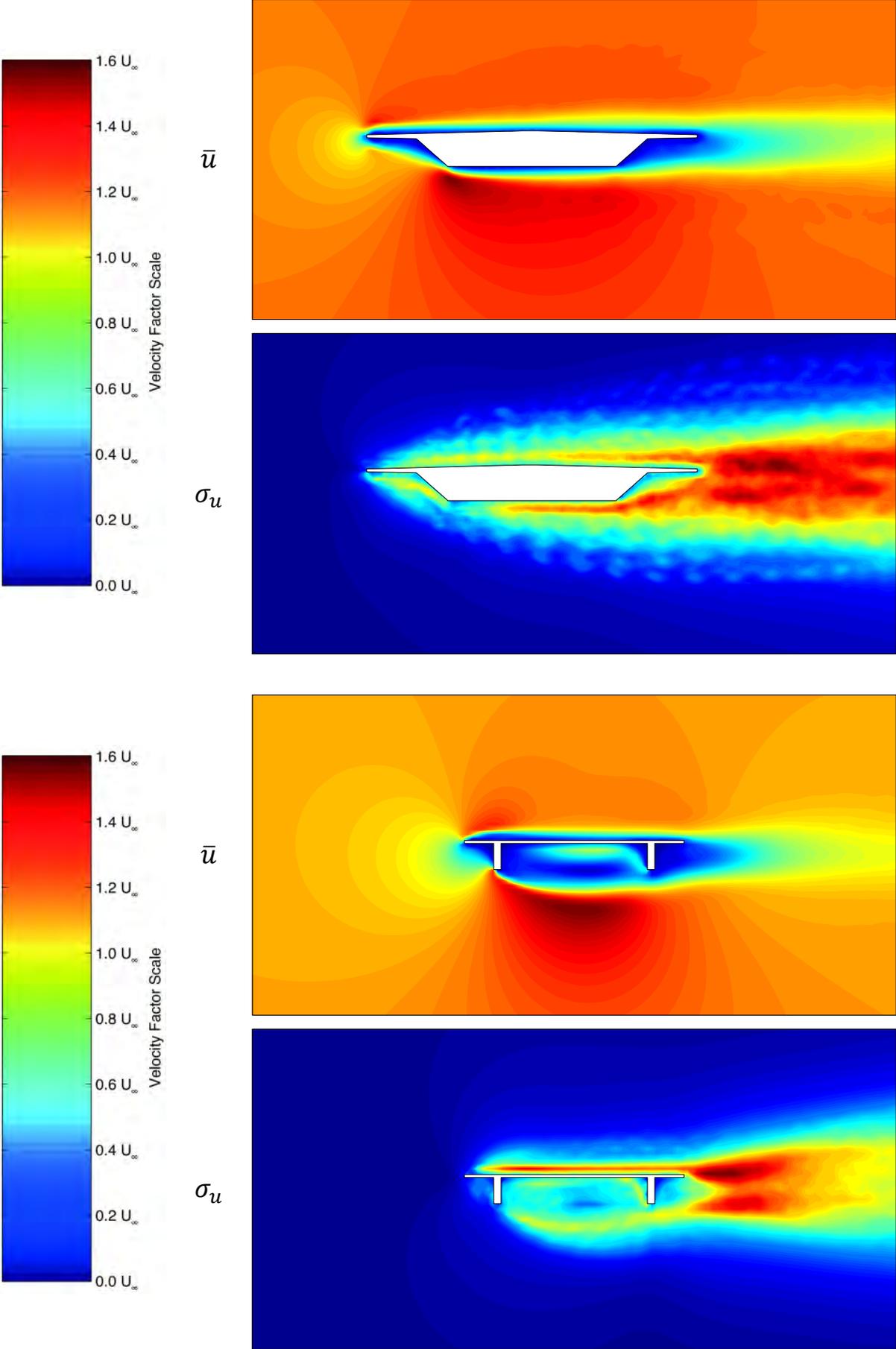
Doppelter Achteckiger Querschnitt,  $\varnothing = 11,5 \text{ m}$   
Doppeltürme, Doppelpfeiler



Mehrfach gegliederte Querschnitte, 2 x 11,5 m x 11,5 m + 1 x 2,0 m x 11,5 m  
 Doppeltürme (Dachanschluss zw. den Türmen, Referenzobjekt Magdeburger Dom)



Brückenüberbauquerschnitte (Hohlkastenquerschnitt, Doppel-T-Querschnitt)  
Simulationsbereich: 40 m x 20 m



## **5. Fluggerätetechnik für bauwerksnahe Einsätze der Fluggeräte**

Erste praktische Tests in verschiedenen Einsatzszenarien haben sehr schnell gezeigt, dass der Wind und vor allem die auftretenden Turbulenzen in Bauwerksnähe die kritischsten Parameter beim Einsatz solcher Flugsysteme sind. Daher wurden die Prioritäten bei der Optimierung der Fluggeräte auf die Windstabilität gelegt. Auf Basis der in 4 vorgestellten Windsimulationen an typischen Bauwerksquerschnitten in Verbindung mit den realen Einsätzen an den Referenzbauwerken, sollten die Steuerungs- und Regelungstechniken/ -algorithmen der Fluggeräte so optimiert werden, dass auch bei schwierigen Windverhältnissen ein sicherer und möglichst windstabiler Einsatz in Bauwerksnähe ermöglicht wird. Im Zuge der genaueren Untersuchungen der Windsimulationen in Verbindung mit den Feldversuchen an den Referenzbauwerken wurde sehr schnell ersichtlich, dass die bauwerksnahen Turbulenzen entscheidenden Einfluss auf die Fluglageregelung und somit auf die Stabilität des Fluggerätes haben. Um auch bei starken Turbulenzen, die vor allem bei ungünstigen Anströmwinden des Windes und an sehr zerklüfteten Bauwerksoberflächen entstehen, eine sichere Steuerung des Fluggerätes zu erreichen, ist eine hochfrequente Fluglageregelung des Fluggerätes erforderlich. Hier zeigte sich bereits bei ersten Versuchen, dass Fluggeräte mit einem möglichst geringem Gesamtgewicht und vielen kleinen Rotoren deutliche Vorteile gegenüber sehr schweren und mit wenigen großen Rotoren ausgestatteten Fluggeräten haben. Die Optimierung der Fluglageregelung sollte einen wesentlichen Beitrag zur sicheren Handhabung der Fluggeräte, aber auch zur Verbesserung der Qualität der Bild- und Videodaten leisten, insbesondere bei Einsätzen unter schwierigen Windverhältnissen und in Bauwerksnähe. Einen weiteren Beitrag zur sicheren Handhabung der Fluggeräte sollten die Untersuchungen zu verschiedenen aktiven Elementen (Abstandssensorik) zur Kollisionsvermeidung leisten, die möglichst in die Fluglageregelung eingebunden werden sollten. Diese Abstandssensorik, wie auch die mechanischen Anprallschutzsysteme wurde im Rahmen des Projektes im praktischen Einsatz getestet.

### **5.1 Steuerungs- und Regelungstechnik, Fluglageregelung**

Entscheidend für eine stabile und sehr präzise bauwerksnahe Navigation ist eine neuartige Flugsteuerungselektronik. Im Rahmen eines kompletten Redesigns der vorhandenen Flugsteuerungselektronik wurden unter anderem die Erfahrungen aus den Flugstunden an den Referenzbauwerken zusammengefasst und in die Optimierung der Steuerungselektronik eingebracht. Wesentliche Schwerpunkte bei der Optimierung der Steuerungselektronik war die Erhöhung der Ausfallsicherheit, die verbesserte Datenfusion der Sensordaten, die verbesserte Stabilisierung der Kamera und eine neuartige Trajektorienregelung beim Abfliegen vorprogrammierter Flugrouten.

So konnte in diesem Projekt ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung einer verbesserten Flugsteuerungselektronik (AscTec Trinity) geleistet werden. Wesentliche Merkmale dieser optimierten Flugsteuerungselektronik sind:

- Hohe Ausfallsicherheit und Verfügbarkeit durch 3-fache Redundanz.
- Verbesserte Datenfusion: durch eine tiefgreifende Fusion aller Sensordaten konnte die Positionsgenauigkeit deutlich verbessert werden. Insbesondere in Bauwerks-nähe ist die so gewonnen Präzision von entscheidender Bedeutung.
- Verbesserte Stabilisierung der Kamera: Die neue Datenfusion ist insbesondere auch Robust gegen das sogenannte Wegdriften des Horizonts bei Kreisförmigen Flugbahnen.
- Neuartige Trajektorienregelung: Bisherige Systeme fliegen Wegpunkte sequenziell von Punkt zu Punkt an. Die Flugbahn gleicht insbesondere unter Windeinfluss der sogenannten Hundekurve. Gerade in Bauwerksnähe kommt es jedoch darauf an, nicht nur die Aufnahmeposition des Flugsystems zu regeln sondern auch auf dem Weg dorthin einem vordefinierten Pfad zu folgen. Die neue Regelung ermöglicht genau das. Eine Trajektorie wird (unter Berücksichtigung der möglichen Dynamik) des UAS durch alle Wegpunkte geplant und permanent ausgeregelt. Dies ermöglicht auch ganz neue Befliegungsstrategien.

Diese Aufzählung ist nur ein kleiner Teil, der durch die neue Flugsteuerungselektronik erreichten Verbesserungen, die neue Standards hinsichtlich Performance, Robustheit und Komfort setzen wird.

Abbildung 5 zeigt den ersten Prototypen der überarbeiteten dreifach redundanten Flugsteuerungselektronik.

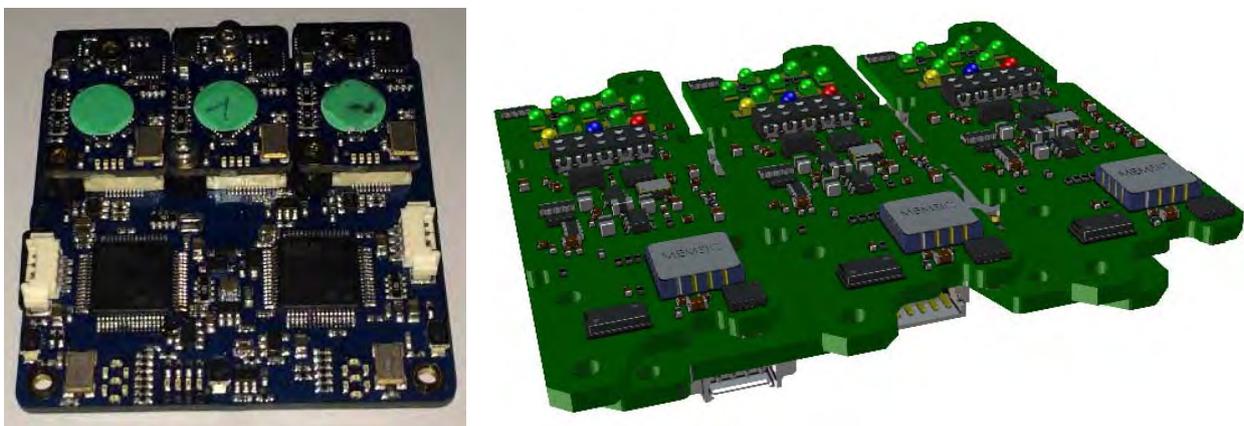


Abbildung 5: Prototyp dreifach redundantes Flugsteuerungsmodul AscTec Trinity

## 5.2 Aktive Kollisionsvermeidung und Anprallschutzmechanismen

### Anprallschutzmechanismen

Auch die genaueste Fluglageregelung ist weiterhin auf präzise Sensoren zur Positionsbestimmung angewiesen. Bisher erfolgt die Positionsbestimmung und -regelung per GPS-Signal (Global Positioning System) und die Bestimmung der Barometrischen Höhe. Aber gerade in Bauwerksnähe wird das GPS-Signal durch die aufgehenden Gebäude stark beeinträchtigt. Man spricht von einer Abschattung des Signals, die zu einer nachlassenden Präzision in der Positionsgenauigkeit in Richtung

Bauwerk führt. Eine sichere automatische Befliegung mit nur geringem Abstand zum Bauwerk basierend auf vorprogrammierten Positionen bzw. Flugpfaden ist zum jetzigen Zeitpunkt unmöglich. Aus diesem Grund wurden auch Möglichkeiten zur automatischen Abstandshaltung und Kollisionsvermeidung erprobt, die im folgenden Abschnitt erläutert werden. Versuche wurden für verschiedene Konzepte durchgeführt. Dabei können grundlegend die Konzepte mechanisch und rein virtuell unterschieden werden.

#### Mechanischer Anprallschutz:

Ein mechanischer Anprallschutz wird, wie in Abbildung 6 gezeigt, um das Flugsystem herum gebaut, um die Rotoren bei Kollisionen zu schützen und um Beschädigungen zu vermeiden. Schon der Ausfall eines Rotors kann bei einem System mit einer geringen Anzahl an Rotoren schnell zu einem Absturz des Flugsystems führen.



Abbildung 6: Getestete mechanische Anprallschutzmechanismen, links: mechanischer Schutzring am AscTec Pelican [Foto: Späth, AscTec], rechts: Test eines mechanischen Schutzrings am AscTec Falcon 8 beim Kollisionsversuch am Bauwerk

Die Versuche mit verschiedenen Anprallschutzmechanismen haben gezeigt, dass diese Art des Anprallschutzes in der Praxis mehr Nachteile als Vorteile mit sich bringen und daher weniger empfehlenswert sind. Der zu montierende mechanische Anprallschutz ist im Vergleich zum Gesamtgewicht des Flugsystems relativ schwer und führt zu einer deutlichen Steigerung des Gesamtgewichtes. Dies führt wiederum zu einem erhöhten Energiebedarf, einer Verringerung der Flugzeit und der möglichen Traglast sowie zur Verschlechterung der Agilität des Fluggerätes. Hinzu kommt, dass durch die schlechte Demontierbarkeit des Anprallschutzes die Flexibilität und die Transportmöglichkeiten sehr stark eingeschränkt bzw. deutlich verschlechtert werden. Durch die Vergrößerung der „Gesamtfläche“ (Windangriffsfläche) des Fluggerätes werden auch die Einflüsse des Windes auf das Fluggerät viel stärker. Daher konnte der getestete Anprallschutz auch nur bei geringen Windgeschwindigkeiten eingesetzt werden. Insbesondere bei höheren Belastungen, bei höheren Flug- bzw. Windgeschwindigkeiten konnte dieser nicht mehr standhalten und führte zudem zu einem sehr instabilen Flugverhalten. An unebenen Wänden, Vorsprüngen an Bauwerken oder weit aus kragenden Elementen war die Gefahr des Hängenbleibens sehr hoch. Anprallversuche bei verschiedenen Anprallgeschwindigkeiten haben gezeigt, dass ein möglichst leichter Anprallschutz

schon bei einem sanften Anprall versagt. Ein in der Stabilität geeigneter Anprallschutz für wahrscheinliche Anprallgeschwindigkeiten (zwischen 5 und 10 m/s) ist hingegen viel zu schwer und daher ungeeignet. Ein weiteres Kriterium, was den Einsatz eines mechanischen Anprallschutzes erschwert, ist die spezielle Fluglageregelung, die entsprechend schnell und robust auf einen Anprall in geeigneter Weise reagieren muss.

Elektronischer Anprallschutz:

Ein grundlegend anderes Konzept ist es den Anprallschutz rein virtuell auszuführen. Mithilfe elektronischer Sensoren wird ein virtueller Schutzring um das Fluggerät aufgebaut. In den letzten Jahren wurden hier verschiedene Technologien wie Laserscanner, Ultraschall, sowie Kameras intensiv untersucht. Im Rahmen des Projektes wurden auch diese Sensoren exemplarisch am Bauwerk getestet. Kritisch waren auch bei diesen Systemen das Gewicht sowie die Robustheit gegenüber Störfaktoren, wie variierende Lichtverhältnisse oder Oberflächenbeschaffenheit (Stein, Glas, Wasser etc.). Durch den Einsatz des Intel RealSense Sensor, einer Kombination aus „Structured Light“ und Stereo Vision, konnten viele der angesprochenen Nachteile behoben und ein sehr guter Kompromiss aus Robustheit und Gewicht gefunden werden. In ersten Tests konnte selbst bei schwierigen Umgebungsbedingungen eine robuste Hinderniserkennung erzielt werden (vor allem bei Licht und Schatten sowie reflektierenden Oberflächen). Dennoch handelt es sich auch hier bislang nur um Prototypen. Aufgrund der engen Kooperation der Firma Intel mit der Ascending Technologies GmbH sind auf dem Gebiet, des Einsatzes der RealSense Technologie auf UAS, schnelle Fortschritte zu erwarten.



Abbildung 7: Prototyp AscTec Firefly mit Intel RealSense-Technologie (6 Kameras zur Hinderniserkennung) [Foto: Späth, AscTec]

Weitere Informationen zur Entwicklung eines elektronischen Anprallschutzes auf Basis von Intel RealSense unter:

<https://www.youtube.com/watch?v=Us0BqJvsF9k>

## **6. Fluggerätenavigation zur automatischen Aufnahme von Bauwerken**

Der Einsatz unbemannter Fluggeräte erfolgt trotz rasanter Weiterentwicklung der Fluggerätetechnik größtenteils immer noch manuell gesteuert. Unterstützt wird der Fluggerätepilot in den meisten Fällen durch eine GPS-gestützte Flugsteuerung, bei der die Position des Fluggerätes in alle Richtung stabil gehalten wird. Ohne GPS-Unterstützung (beispielsweise bei Innenraumeinsätzen oder auch bei sehr starkem Wind) kann der Pilot noch durch einen Höhen-kontrollierten Modus (auf Basis der barometrischen Höhe) unterstützt werden. Sehr erfahrene Piloten steuern die Fluggeräte bei äußerst komplexen Randbedingungen auch im manuellen Modus. Die Aufnahme, insbesondere von großen Bauwerken, kann bei solch „manuellen“ Einsätzen zeitlich sehr aufwendig und damit sehr schnell ineffizient werden. Zudem besteht die Gefahr, dass Teilbereiche des Bauwerkes nur unzureichend bzw. gar nicht aufgenommen werden oder dass auch unnötig viele Daten aufgenommen werden, die die Datenauswertung verzögern bzw. negativ beeinflussen.

Ein Ziel des Projektes war die Identifizierung und Entwicklung geeigneter, effizienter Aufnahmestrategien von Bauwerken. Hierbei sollte vor allem die Möglichkeit der automatischen Datengenerierung an Bauwerken untersucht werden. Für diese automatische Bauwerksaufnahme wurden zunächst wichtige bauwerksbezogene aber auch ergebnisorientierte Parameter betrachtet, die in die Entwicklung einer geeigneten GPS-gestützten Navigation einfließen. Im Vordergrund stand die Navigation für vollautomatische Aufnahme von sehr großen (großflächige Bauwerke) und zunächst „geometrisch einfachen“ Bauwerken (turmartige Bauwerke). Vor allem bei großflächigen Bauwerken kann dies zu einer enormen Zeitersparnis führen.

### **6.1 Bauwerksnahe Einsätze der Fluggeräte**

#### **6.1.1 Gebäudenahe Navigation – Windstabilität des Flugsystems**

Die maßgebenden Einflüsse aus Wind und Turbulenzen an Bauwerken zu kennen ist ein erster wichtiger Schritt. Hat man dieses Wissen, kann die Flugstrategie entsprechend angepasst werden. Parallel dazu wurde aber auch die Agilität sowie Robustheit gegenüber Störungen optimiert. Durch neue adaptive Steuerungs- und Regelungsalgorithmen konnte die Stabilität auch unter Einflüssen turbulenter Störungen deutlich verbessert werden. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass das physikalisch Mögliche aufgrund der Adaption der Motorkommandos voll ausgenutzt werden kann und das UAS somit „kräftiger“ und schneller auf Störungen reagieren kann. In letzter Instanz wird hier aber auch das bereits beschriebene Konzept der elektronischen Kollisionsvermeidung an Bedeutung gewinnen.

Entscheidend ist weiterhin, dass die gewünschten Aufnahmepositionen präzise angefliegen werden und stabil gehalten werden. Auch dies wird durch die neu konzipierte Flugsteuerung/ -regelung erreicht. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die mit einer Flugsystem-unabhängigen Software errechneten Kamera-/ Bildpositionen eindrucksvoll. Abbildung 8 zeigt die errechneten Kamerapositionen nach einer GPS-

basierten, voll automatischen Testbefliegung und -aufnahme einer Kiesgrube basierend auf der optimierten Flugsteuerung.

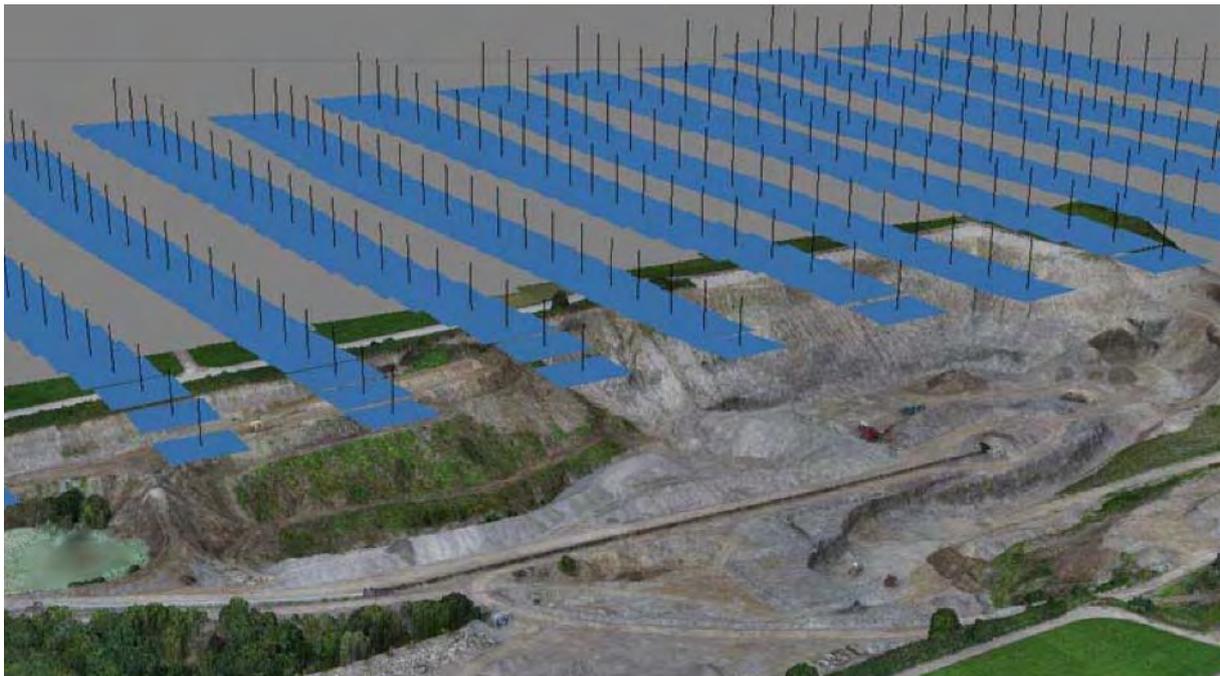


Abbildung 8: Errechnete Bild-/ Kamerapositionen bei einer automatischen Befliegung und Aufnahme einer Kiesgrube (Software: Agisoft PhotoScan)

Abbildung 9 zeigt anhand der exakten Bildpositionen (Symmetrie) zur Aufnahme eines 360°-Kugelpanoramas die sehr präzise Kamerapositionierung während der Aufnahme der Bilder. Diese ist auf die extreme Positionsstabilität des Fluggerätes nach Optimierung der Fluglageregelung zurückzuführen.



Abbildung 9: Errechnete Bildpositionen bei der Erzeugung eines 360°-Kugelpanorama (Ausschnitt)

Gerade bei großflächigen Befliegungen und Aufnahmen spielt auch der Zeitbedarf eine entscheidende Rolle. Wie schon in 2.2 erläutert, können Flächenflugzeuge große Gebiete in kurzer Zeit befliegen und aufnehmen. Multikopter hingegen sehr präzise dicht an Gebäuden und auf engem Raum arbeiten. Es ergeben sich aber auch immer mehr Anwendungen, bei denen die Kombination beider Konzepte erforderlich ist, wie z.B. bei der Aufnahme großer Stützbauwerke oder Talsperren. Durch die neue Flugsteuerungseinheit sowie eine sinnvolle Planung konnten diese Lücke zwischen Flächenflugzeug und Multikopter geschlossen werden. Ein Testflug unter realen Bedingungen lieferte beispielsweise für die vollständige (lückenlose Aufnahme) Aufnahme einer Fläche von 35 Hektar in einem 12-Minuten-Flug eine

Bodenpixelauflösung von 2 Zentimetern bei einer Flughöhe von ca. 150m (Sony Alpha 7R mit 35mm Objektiv).

### 6.1.2 Navigationssoftware – Anforderungen für die Aufnahme von Bauwerken

Die Anforderungsanalyse an die Navigationssoftware hat klar aufgezeigt, dass Bauwerke nicht einfach als flache Ebene betrachtet und mit dafür entwickelten Strategien befliegen werden können. Die Neuentwicklungen hinsichtlich der Trajektorienregelung ermöglichen hier gänzlich neue Herangehensweisen. Untersucht wurden zeilenweise oder spaltenweise Strategien gegen z.B. Spiralen oder Kreisbahnen um Türme. Jede dieser Strategien bringt ihre eigenen Vor- und Nachteile mit sich. Die Steuerungssoftware lässt hier nahezu jede erdenkbare Strategie zu. Tests an den Referenzbauwerken haben gezeigt, dass Strategien wie in 7.2 näher beschrieben, bereits in der Praxis anwendbar sind. Ein offener Punkt ist jedoch noch die Entwicklung einer speziell für Bauwerksaufnahmen geeigneten und einfach handhabbaren Bedieneroberfläche, was nicht Bestandteil dieses Projektes war. Aber auch wenn es noch nicht sinnvoll möglich ist 3D-Gelände oder Bauwerksdaten automatisiert einzulesen und darauf aufbauend automatische Befliegungsstrategien zu generieren, bieten die derzeit verfügbaren Software Tools bereits umfangreiche Möglichkeiten, die die Planung von Hand erheblich erleichtern. Abbildung 10 zeigt die Bedieneroberfläche der derzeit verfügbaren Wegpunktplanungssoftware AscTec Navigator.

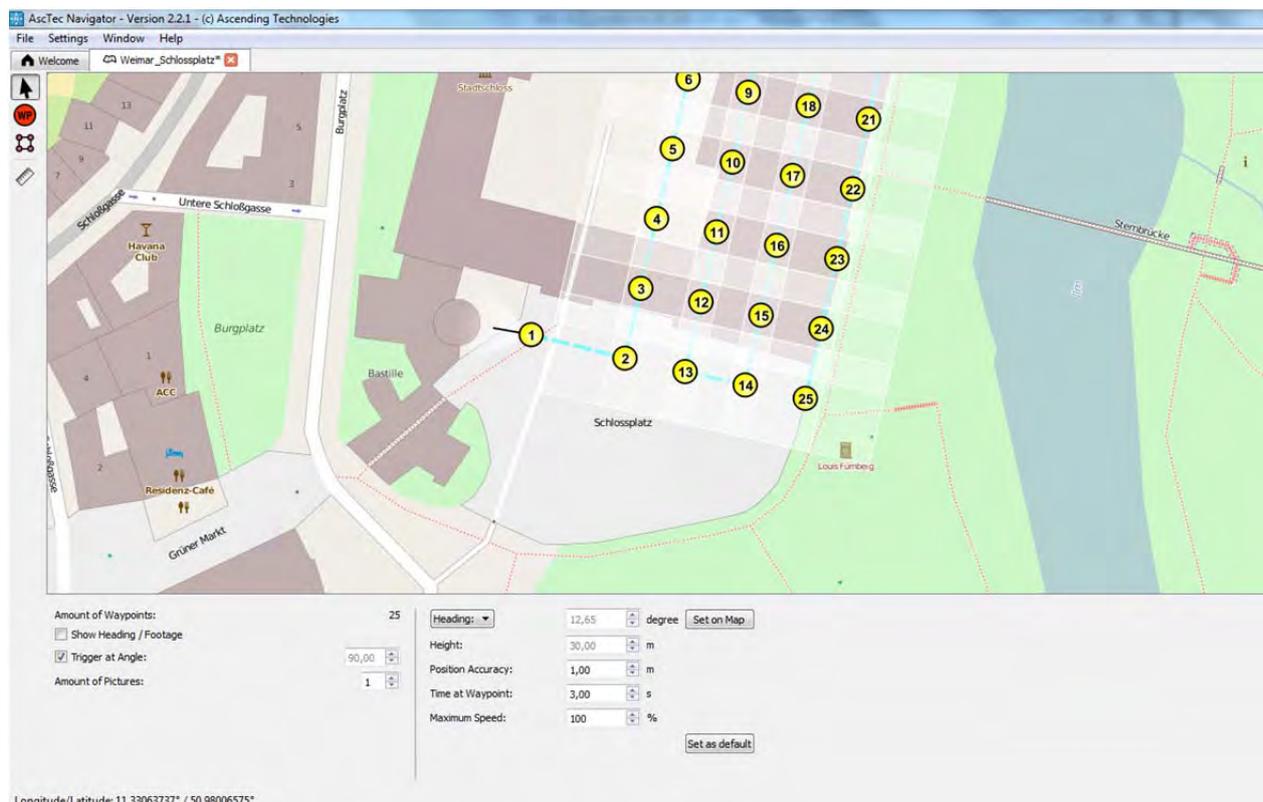


Abbildung 10: Navigationssoftware AscTec Navigator: Bedieneroberfläche zur interaktiven Planung von Flugrouten

Nachfolgend werden drei ausgewählte Funktionen der Wegpunktplanungssoftware kurz erläutert.

## Wegpunkte

Mit Hilfe der Wegpunktplanungssoftware können auf Basis einer georeferenzierten Karte oder eines georeferenzierten Luftbildes (auch selbst mit dem UAS erzeugt) einzelne Wegpunkte definiert und abgeflogen werden. Für die Wegpunkte lassen sich die Höhe und die Orientierung (Heading) sowie die Positionsgenauigkeit festlegen. Dazu können noch die jeweiligen Aufnahmeparameter für die Bildgenerierung gewählt werden, wie z.B. der Aufnahmewinkel und die Anzahl der Bilder pro Wegpunkt. Somit lassen sich auch aus einzelnen Wegpunkten sehr schnell Flugrouten zur Aufnahme eines Bauwerks planen. Darüber hinaus bietet die Software auch die Möglichkeit Wegpunkte (Koordinaten) einzulesen. Damit können entsprechend modifizierte Bauwerkskoordinaten zur Generierung der Flugroute genutzt werden, siehe z.B. 7.2.2.

## Matrix

Eine Matrixplanung findet immer dort Anwendung, wenn ein vorher definiertes Gebiet systematisch aufgenommen werden soll, z.B. die Aufnahme von großen Dachflächen (Flachdach). Zunächst wird ein beliebiges, sich nicht überschneidendes Polygon über die aufzunehmende Fläche gezogen:



Abbildung 11: Navigationssoftware AscTec Navigator: Aufnahmemodus Matrix, Definition der Aufnahmefläche (farblich gekennzeichnete Polygonzug)

Im nächsten Schritt werden die Parameter zur Flughöhe und Kamera eingestellt. Dabei kann entweder für eine gegebene Kamera und Bodenauflösung die Flughöhe bestimmt werden oder umgekehrt. Die erforderliche Überlappung in horizontaler und vertikaler Richtung ist festzulegen.

Camera:	Sony Alpha 7R	Height:	30,00 m
Camera Horizontal Angle:	54.3027	Ground Sample Distance:	4,18 mm
Camera Vertical Angle:	37.8493	Horizontal Overlap:	60 %
Matrix Alignment:	< >	Vertical Overlap:	30 %
<input checked="" type="checkbox"/> Orientation in fly direction		Area:	2264.75 m <sup>2</sup>
<input type="button" value="Generate Matrix"/>		<input type="button" value="Apply"/>	

Basierend auf diesen Informationen und erfolgter Vorgabe der Aufnahmerichtung wird die Matrix generiert und der Flugplan vollautomatisch erstellt.

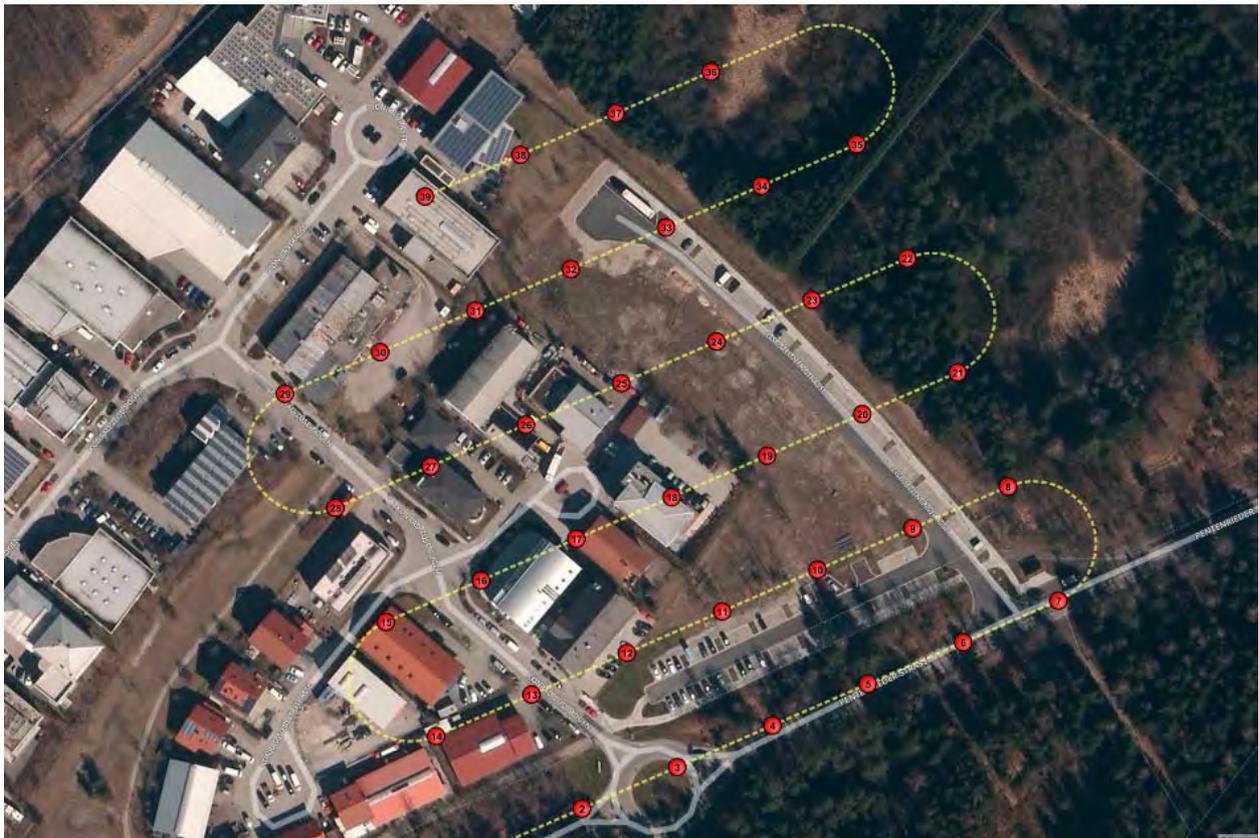


Abbildung 12: Navigationssoftware AscTec Navigator: Aufnahmemodus Matrix, automatische Generierung der Flugroute bzw. der Wegpunkte

### Circle of Interest (CoI)

Eine weitere komfortable Planungsmöglichkeit wird mit dem Circle of Interest zur Verfügung gestellt. Es wird wie in Abbildung 13 gezeigt ein Aufnahmezentrum (Koordinate) sowie ein Radius („Abstand zum Objekt“) definiert. Anhand gewählter Parameter wie z.B. Flughöhe Kamerawinkel und Winkelinkrement werden die Wegpunkte automatisch generiert und die Kamera immer auf das ausgewählte Objekt ausgerichtet. Dieser Aufnahmemodus eignet sich sehr gut für die zeilenweise Aufnahme von turmartigen Bauwerken, wobei man aber immer dem Fluggerät um das Bauwerk herum folgen muss (siehe 2.1).



Abbildung 13: Navigationssoftware AscTec Navigator: Aufnahmemodus Circle of Interest (CoI)

Diese sowie weitere Funktionen sind heute noch nicht auf dem Stand anhand vorhandener 3D-Daten ganze Bauwerksbefliegungen automatisch zu definieren. Alle diese Funktionen bieten jedoch eine gute Grundlage um schnell bauwerksspezifische Flugpläne zu erstellen. Eine Talsperre kann zum Beispiel durch die Matrix Funktion und anschließend zeilenweise Änderung der Flughöhe definiert werden. Ein Schornstein hingegen wäre über den Circle of Interest in verschiedenen Flughöhen realisierbar.

Neben diesen offensichtlichen Features spielen aber auch untergeordnete Funktionen, wie zum Beispiel eine präzise Flugzeitberechnung oder die Möglichkeit, Missionen definiert für einen Akkuwechsel zu unterbrechen eine wesentliche Rolle.

Im Verlauf des Projektes konnten bereits viele der neuen Funktionen eingesetzt werden. Es wurden aber insbesondere auch viele Möglichkeiten zur Verbesserung aufgedeckt. So sind beispielsweise eine 3D-Erweiterung der Planung, der Import von 3D-Gelände- und Bauwerksdaten sowie Schnittstellen zur Integration in GIS-Software oder auch BIM-Softwaretools wichtige Features für die Zukunft, um den Workflow stetig zu verbessern.

## **7. Einsatzszenarien – Tests und Untersuchungsergebnisse an den Referenzbauwerken**

Schwerpunkt des Projektes waren die praktischen Untersuchungen zu den Einsatzmöglichkeiten der Fluggeräte in den unter 3.1 erläuterten Einsatzszenarien an verschiedenen Bauwerkstypen. Hierbei sollten an den in 3.2 vorgestellten Referenzbauwerken die Datengenerierung und mögliche Datenqualität sowie die weitere Verwendbarkeit der Bild- und Videodaten untersucht werden. Bei der Datengenerierung wurden vor allem die Aufnahmestrategien der manuellen und automatischen Datengenerierung untersucht. Hierbei wurden Außen- wie auch Innenraumaufnahmen an den Referenzbauwerken durchgeführt. Nach ersten Tests kristallisierten sich zwei wesentliche Verwendungsmöglichkeiten der Daten heraus. Die hochauflösten Bild- und Videodaten können unterstützend für die visuelle Zustandsermittlung des Bauwerkes genutzt werden. Die am Bauwerk gewonnen Bilddaten können zudem aufgrund ihrer sehr hohen Qualität für eine messtechnische Zustandsermittlung und Überwachung des Bauwerks auf Basis einer photogrammetrischen Auswertung der Bilddaten bzw. von georeferenzierten 3D-Daten genutzt werden.

In den nachfolgenden Abschnitten 7.1 und 7.2 werden die praktischen Einsatzmöglichkeiten beschrieben und ausgewählte Ergebnisse der Feldversuche an den Referenzbauwerken vorgestellt.

### **7.1 Visuelle Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis hochauflösender Bild- und Videodaten**

Die Ermittlung und Beurteilung des Bauwerkszustandes erfolgt vorwiegend auf Basis visuell erfasster Daten. Dabei werden erkennbare Schäden, wie Risse, Abplatzungen, Verfärbungen, Roststellen erfasst, in ihrer Größe/ Ausdehnung gemessen und dokumentiert. Die Aufnahme der Schäden erfolgt durch die „in Augenscheinnahme“ des Bauwerks durch entsprechendes Fachpersonal wie Ingenieure, Architekten, Restauratoren oder speziell geschulte Prüfspezialisten für Ingenieurbauwerke. Die mit den Fluggeräten generierten Bild- und Videodaten sollen die Bauwerksverantwortlichen bei ihrer Arbeit am Bauwerk und bei der Beurteilung des Bauwerkszustandes unterstützen. Die fotografische Aufnahme der Bauwerksschäden bzw. der Bauwerke kann und soll die Zustandsermittlung bzw. Bauwerksprüfung durch den Experten nicht ersetzen, sondern vielmehr zu einer deutlichen Effizienzsteigerung des Gesamtprozesses der Zustandsermittlung, Inspektion und Dokumentation eines Bauwerks führen. Die in diesem Abschnitt dargestellten Aufnahmen/ Luftbilder wurden bis auf wenige Ausnahmen mit der auf dem Prototyp des Fluggerätes installierten Digitalen Systemkamera Sony Alpha 7R aufgenommen.

## Untersuchungen am Referenzobjekt Bürogebäude der Bauhaus-Universität

Schwerpunkt der Untersuchungen an diesem Objekt war die manuelle Aufnahme der Fassade bei sehr beengten Platzverhältnissen sowie die manuelle (visuelle) Erkennung von Rissen an den Fassadenelementen aus Beton in den Luftbildern. Für diese Untersuchungen wurde die stark geschädigte Westseite des Bauwerks in unterschiedlichen Abständen von 5m, 7,5m und 10m in mehreren vertikalen Streifen von unten nach oben aufgenommen. Dabei wurden die Bildpositionen so gewählt, dass die Einzelbilder eine ausreichende Überlappung in horizontaler und vertikaler Richtung aufweisen. Dadurch wird eine Weiterverarbeitung der Bilder zu einem hochaufgelösten Orthophoto zur Abbildung der gesamten Fassadenseite in einem Bild ermöglicht, siehe dazu Abschnitt 7.2. Die Aufnahme und Dokumentation von Rissen unterschiedlicher Rissbreiten erfolgte manuell mit einer Risskarte vor der Befliegung. Diese wurden anschließend mit den generierten Luftbildern verglichen und auf eine mögliche Erkennung geprüft. Die Luftbilder wurden mit verschiedenen Kameras aufgenommen, wobei schnell ersichtlich wurde, dass die hier genutzte Sony Alpha 7R die qualitativ besten Bilder lieferte. Einflüsse aus starkem Wind und Effekte aus unterschiedlichen Belichtungssituationen flossen in die Auswertung der Versuche mit ein. Weitere Informationen dazu sind [27] zu entnehmen. Abbildung 14 zeigt den untersuchten Bereich der stark geschädigten Westfassade des Gebäudes.



Abbildung 14: Südwestansicht Referenzbauwerk Bürogebäude mit stark geschädigter Westfassade

Für die Untersuchungen zur visuellen Risserkennung wurden, wie in Abbildung 15 dargestellt, ausgewählte Risse an der Westfassade bei guten Lichtverhältnissen mit unterschiedlichen Rissbreiten von 0,1 bis 1,0 mm mit einer Risskarte gemessen und dokumentiert. Anschließend wurde die Westfassade unter den gleichen

Lichtverhältnissen mit Luftbildern in verschiedenen Entfernungen zum Bauwerk aufgenommen.



Abbildung 15: Manuelle Rissbreitenmessung an der Westfassade des Bürogebäudes

Die Auswertung der Luftbilder der Westfassade hat gezeigt, dass bei sehr guten Bildern und hochaufgelösten eine manuelle bzw. visuelle Erkennung von Rissen ab 0,2 mm bei einem Abstand von ca. 10m möglich ist. Dies kann aber nur bei Bildern mit ausreichender Schärfe und guter Belichtung sowie einem möglichst geringen Bildrauschen (minimaler ISO-Wert) erreicht werden. Bewegungsunschärfe in den Bildern verursacht durch eine instabile Kamera- bzw. Fluggeräteposition, wie z.B. bei starkem Wind, können mit einer sehr kurzen Belichtungszeit vermieden werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass eine ausreichende Belichtung bei einem möglichst kleinen ISO-Wert gewählt wird. Eine Überbelichtung ist zwingend zu vermeiden, da dadurch sehr schnell Bildinformationen verloren gehen. Eine geringe Unterbelichtung der Bilder stellt dagegen i.d.R. kein Problem dar und ist mit entsprechender Software zur Bildbearbeitung manuell wie auch automatisch in Stapelverarbeitung korrigierbar. Dabei sind die Bilder im RAW-Format zu verwenden. Abbildung 16 zeigt eine Luftbildaufnahme mit der Sony Alpha 7R in einem Abstand von ca. 7,5m zur Bauwerks Oberfläche. Im darunter dargestellten Detailausschnitt bei voller Bildauflösung sind die dokumentierten Risse mit einer Rissbreite von 0,5mm deutlich zu erkennen. Abbildung 17 zeigt beispielhaft eine Aufnahme eines Risses mit der Rissbreite von 0,2mm auf einer Sichtbetonoberfläche. Die Aufnahmen erfolgten unter schlechten Belichtungsverhältnissen aus verschiedenen Entfernungen. Selbst bei einer Entfernung von 10m zum Objekt ist dieser Riss bei voller Bildauflösung noch zu erkennen, siehe Abbildung 17 unten links.



Abbildung 16: Luftbildaufnahme eines Risses (Rissbreite: 0,5mm) an der Betonoberfläche der Westfassade des Referenzbauwerks, oben: Originalaufnahmen im Abstand von ca. 7,5m, unten: Detailausschnitt in voller Bildauflösung (100%), Kamera: Sony Alpha 7R

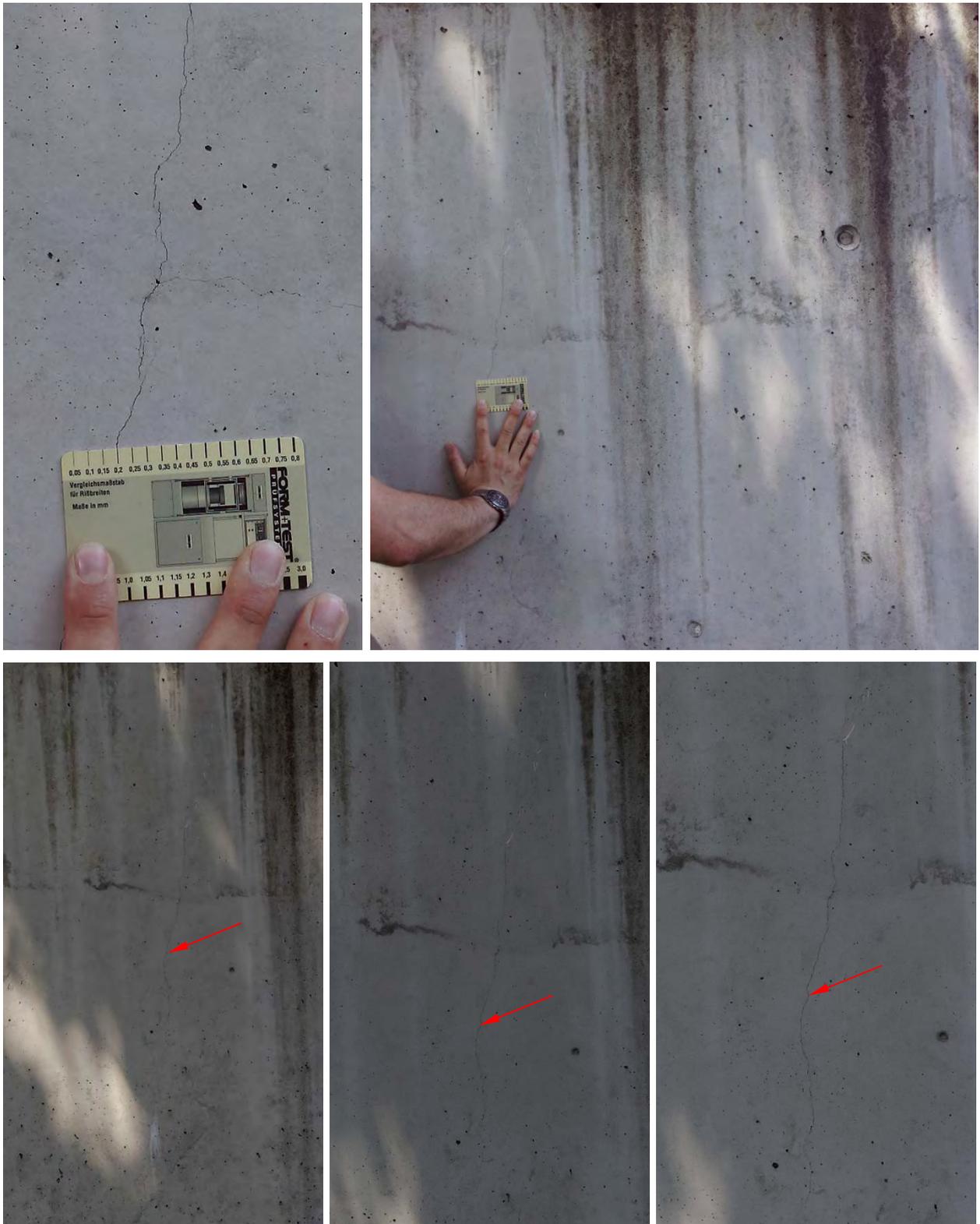


Abbildung 17: Aufnahme eines Risses (Rissbreite: 0,2mm) auf einer Sichtbetonoberfläche bei ungünstigen/ wechselnden Lichtverhältnissen, oben: Rissbreitenmessung mit Risskarte, unten: Detailausschnitt einer Aufnahme des Risses in voller Bildauflösung (100%) im Abstand von 10m, 7,5m und 5m zur Aufnahmeoberfläche, Kamera: Sony Alpha 7R

## **Untersuchungen am Referenzobjekt Schiefer Turm von Bad Frankenhausen**

Neben der in 7.2.1 dargestellten Zustandsermittlung des Turmes auf Basis photogrammetrischer Daten, sollte eine vollständige Aufnahme der Oberflächen zur visuellen Schadenerkennung auf Basis hochaufgelöster Bilder erfolgen. Insbesondere die Schäden am Mauerwerk und der Schiefereindeckung waren hier von Interesse. Neben Rissen im Mauerwerk bzw. in den Mauerwerksfugen, Ausbrüchen am Mauerwerk, Abplatzungen und Brüche an den Schieferplatten sowie Schäden am sichtbaren Holztragwerk konnten auch Schäden an den zusätzlich installierten Metallkonstruktionen (Zugbänder zur Sicherung des Mauerwerks) und der Kuppel identifiziert werden. Die Aufnahmen erfolgten im GPS-gestützten Flugmodus in geringer Distanz zum Bauwerk im Teameinsatz. Die geringe Distanz zum Bauwerk ergab sich einerseits aus der engen Bebauung bzw. dem angrenzenden Bewuchs in unmittelbarer Nähe des Bauwerks und zum anderen aus der erforderlichen Auflösung zur sicheren Erkennung der verschiedenen Schäden. Der mittlere Abstand zur Bauwerksoberfläche betrug weniger als 10m.

Die generierten Aufnahmen wurden zudem so angefertigt, dass diese zur georeferenzierten 3D-Modellierung des Bauwerkes und zur messtechnischen Analyse des Bauwerkszustandes genutzt werden konnten. Alle Luftbilder wurden mit den gleichen Kameraparametern aufgenommen. Eine umfangreiche Erläuterung der Aufnahme-prozedur und den Aufnahmeparametern erfolgt in Abschnitt 7.2.1.

Die nachfolgenden Abbildungen, jeweils ein Originalbild (oben) und ein Bildausschnitt (unten) in voller Auflösung (100%) zeigen beispielhaft einige der erkannten Schäden am Bauwerk. Aus den Bildern wird der extreme Detailgrad der Aufnahmen ersichtlich, der auch zwingend erforderlich ist für solch eine Schadensanalyse am Bauwerk. Abbildung 18 zeigt eine Aufnahme der Westansicht des Turmmauerwerks in etwa 15m Höhe. Bei voller Bildauflösung sind die größeren Risse, aber auch die sehr dünnen Risse in den Mauerwerksfugen deutlich erkennbar. In Abbildung 19 ist die Turmspitze mit einer Kupferkugel zu sehen. Deutlich zu erkennen sind die Austrittslöcher in der Kugel, die vermutlich durch einen Beschuss (Luftgewehr) herbeigeführt wurden. Des Weiteren ist am Schaft der Kugel die aufgerissene Kupferummantelung zu erkennen. Eindringendes Wasser könnte hier das darunter liegende Holztragwerk langfristig schädigen. Abbildung 20 zeigt die Aufnahme eines Zugbandes am Turmmauerwerk und einen Teil eines Sicherungsfangnetzes, das zum Schutz gegen herabfallende Steine angebracht wurde. Der Detailgrad der Bilder erlaubt es selbst die sehr feingliedrigen Fangnetze auf Beschädigungen zu prüfen. Brüche, Roststellen oder offene Verschraubungen wären somit auch an große Hang- und Felssicherungen sicher erkennbar. In Abbildung 21 ist ein Teil des Turmhelmes in der Westansicht zu sehen, bei dem bereits große Teile der Schiefereindeckung abgefallen sind. Das freiliegende Holztragwerk ist somit ungeschützt der Witterung ausgesetzt. Bei der vollen Bildauflösung ist die Holzmaserung sehr gut erkennbar, sodass geschädigte Teile am Holz gut erkennbar sind.

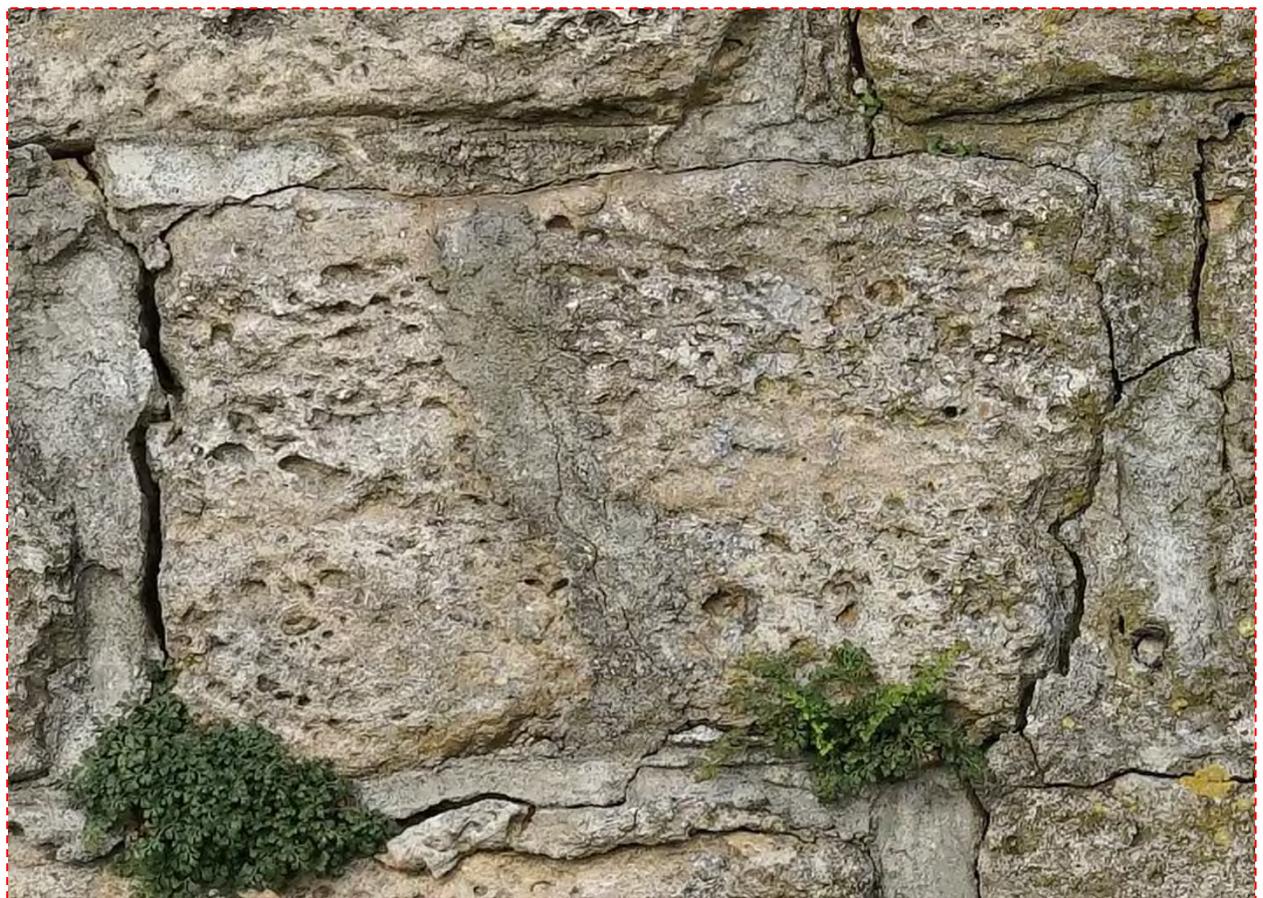


Abbildung 18: Aufnahme der Westansicht des Turmmauerwerks mit erkannten Rissen und Ausbrüchen in den Mauerwerksfugen, oben: Originalaufnahme, unten: Detailausschnitt in voller Bildauflösung (100%)

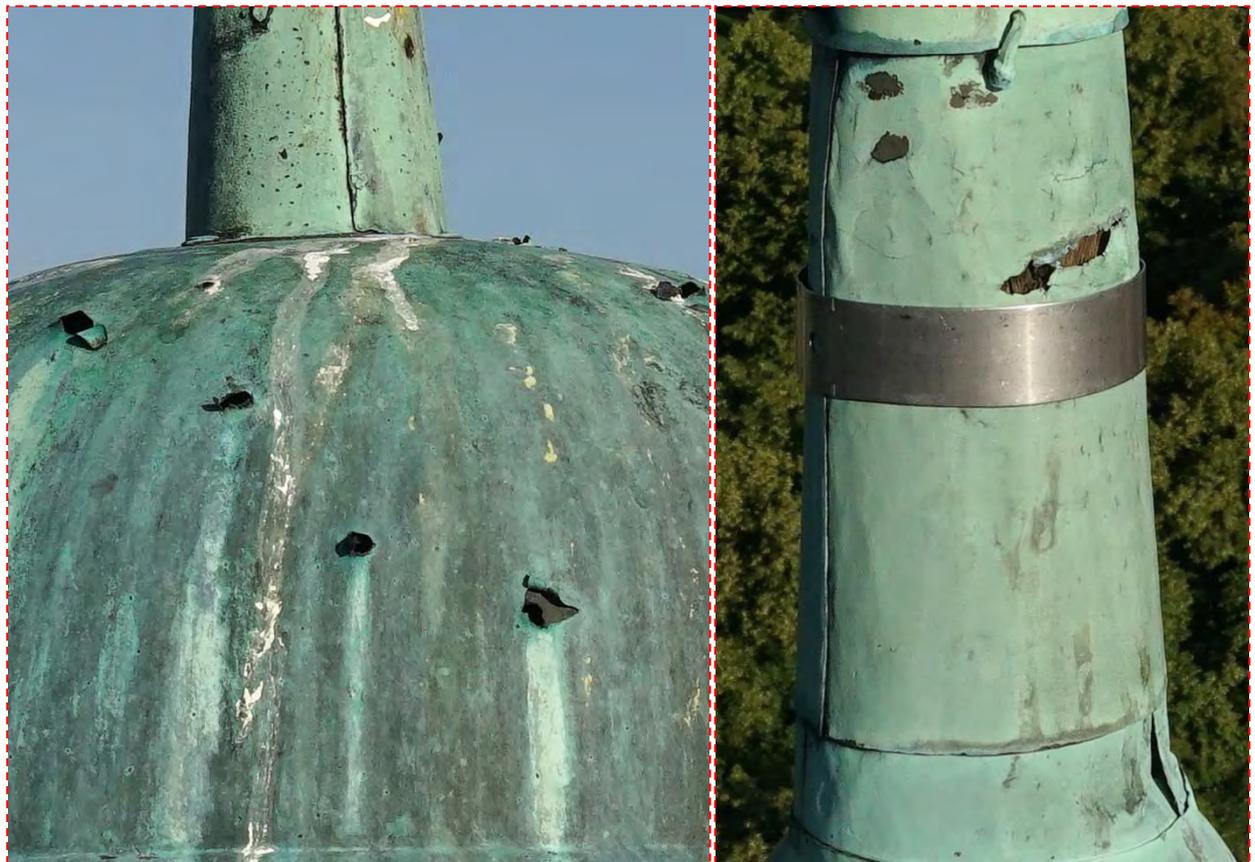


Abbildung 19: Aufnahme der Turmspitze mit der geschädigten Kugel, oben: Originalaufnahme, unten links: Austrittslöcher in der Kugeloberfläche, unten rechts: aufgerissene Ummantelung des Turmschaftes mit freiliegender Holzunterkonstruktion in voller Bildauflösung (100%)

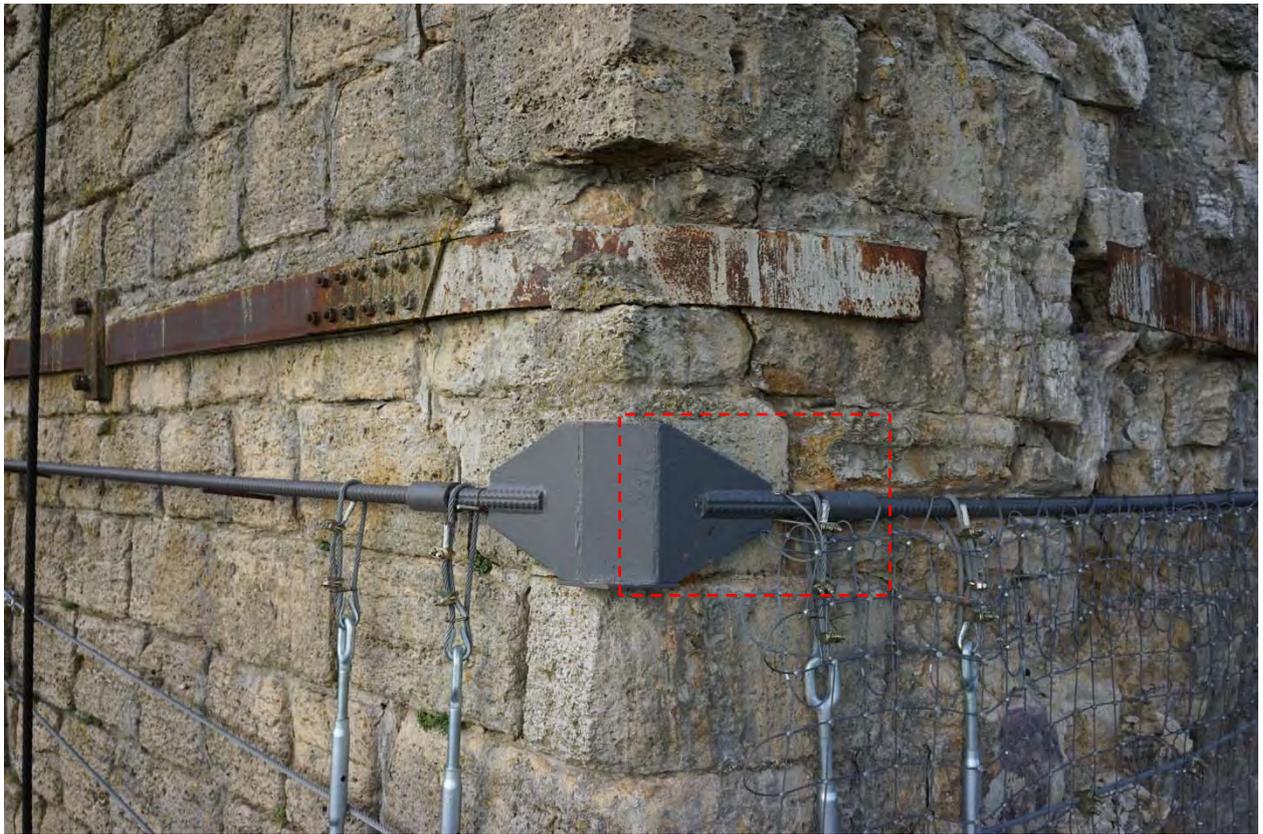


Abbildung 20: Aufnahme eines Stahlzugbandes und des Sicherungsfangnetzes mit Verschraubungen an der südwestlichen Turmecke, oben: Originalaufnahme, unten: Detailausschnitt in voller Bildauflösung (100%)

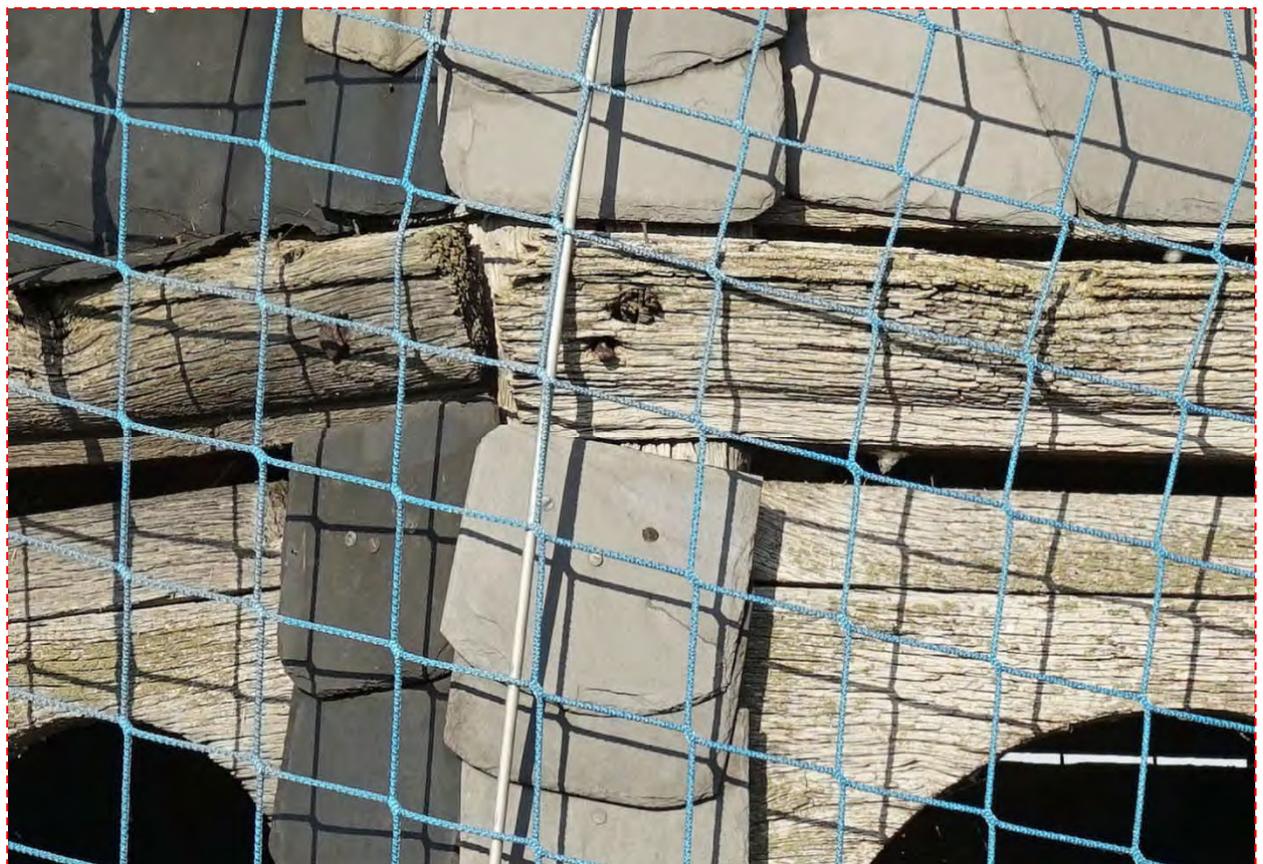


Abbildung 21: Aufnahme der Turmhaube mit loser Verschieferung, oben: Originalaufnahme, unten Detailausschnitt mit freiliegendem Holztragwerk

Weitere Informationen zu den Untersuchungen am Schiefen Turm von Bad Frankenhausen unter: <https://www.youtube.com/watch?v=aNq-9xyzXhE>

## **Untersuchungen am Referenzobjekt Dom zu Halberstadt**

Neben der detaillierten Zustandsermittlung der Dachflächen und Turmspitzen der beiden Turmhelme, standen vor allem die Untersuchungen zu möglichen Innenraumeinsätzen mit UAS im Mittelpunkt der Feldversuche. Begleitet wurden diese Untersuchungen intensiv vom Projektpartner IDK, dem zuständigen Dombaumeister und weiteren Experten, wie Restauratoren sowie weiteren Forschungseinrichtungen.

Die Aufnahme der Turmhelme, siehe Abbildung 22 links, erfolgte im manuellen GPS-gestützten Flugmodus im Teameinsatz. Der Teameinsatz hat sich auch an diesem Objekt bewährt, insbesondere bei den schwierigen Flugmanövern und Aufnahmen zwischen den beiden Türmen und im sehr empfindlichen Innenraum des Doms. Weiterer Untersuchungsgegenstand war bei den Außenaufnahmen zudem der Einfluss der turbulenten Windströmung in Bauwerksnähe auf die Flugeigenschaften des Fluggerätes. Dabei haben die intensiven Voruntersuchungen zum Windfeld in Bauwerksnähe einen wichtigen Beitrag zum sicheren Einsatz der Fluggeräte geleistet. Die in Abschnitt 4 in den Simulationen ermittelten Windverhältnisse stellten sich auch im realen Einsatz am Bauwerk ein. Dadurch war eine ideale Vorbereitung des Piloten auf die vorherrschenden Windverhältnisse gewährleistet. Die Dachflächen der beiden Turmhelme wurden von allen vier Seiten, in einem konstanten Abstand zur Dachfläche von unten nach oben aufgenommen. Der lotrechte Blickwinkel zur Aufnahmefläche wurde durch die entsprechende Kameraneigung gewährleistet. Versuche zu verschiedenen Aufnahmestrategien haben hierbei gezeigt, dass die Generierung der Luftbilder in einem kontinuierlichen langsamen Steigflug meist bessere Ergebnisse liefert, als bei einer Aufnahme, bei der jede erforderliche Bildposition separat angesteuert und das Fluggerät für die Aufnahme gestoppt wird. Hier spielen die Turbulenzen in Bauwerksnähe eine entscheidende Rolle. Des Weiteren arbeiten die Fluggeräte bei einem kontinuierlichen Flug wesentlich energieeffizienter, was sich positiv auf die Flugzeit auswirkt.

Beide Turmhelme wurden von der Traufkante bis zur Turmspitze mit insgesamt 240 Bildern (120 je Turmhelm und 30 je Seite) in nur drei Flügen, mit je 12 Minuten Flugzeit aufgenommen. Die mittlere Distanz zur Aufnahmeoberfläche betrug 10m. Aufnahmen über Eck waren nicht erforderlich, da für jede Seite der Turmhelme separate hochaufgelöste Orthophotos angefertigt werden sollten. Abbildung 23 links zeigt ein solches Orthophoto der Westansicht des Nordturms mit erkannten Schäden an der Dacheindeckung (rechts) in voller Bildauflösung. Fehlstellen wie auch gebrochene oder lose Schieferplatten sind in diesen Aufnahmen eindeutig identifizierbar und können über ein maßstabsgetreues bzw. georeferenziertes Orthophoto sehr leicht lokalisiert und in ihrer Größe aufgenommen und dokumentiert werden. Im Zuge der Aufnahmen der Turmhelme konnten weitere, sehr kleine Schäden wie z.B. an der Turmspitze erkannt werden. Abbildung 22 rechts zeigt eine Aufnahme der Turmspitze mit einer fehlerhaften Nietenverbindung am Kreuz sowie die vergoldete Kugel mit kleineren Ablösungen der Vergoldung. Weiterhin konnten Schäden wie Risse, Ausbrüche bzw. Abplatzungen an der Natursteinfassade, wie in Abbildung 24 an einer Traufkante gezeigt, sicher erkannt und in voller Bildauflösung eingehender untersucht werden. Abbildung 25 zeigt den möglichen Detailgrad der Aufnahmen, bei einer Entfernung von ca. 5m zum Bauwerk.



Abbildung 22: Aufnahme der Turmhelme des Doms zu Halberstadt, links: Westansicht des Doms, rechts: Turmspitze des Nordturms mit erkanntem Schaden (fehlerhafte Nietverbindung) am Kreuz und Ablösungen an der vergoldeten Kugeloberfläche



Abbildung 23: Aufnahme der Turmhelme des Doms zu Halberstadt, links: Orthophoto der Westansicht des Nordturms, rechts: Detailausschnitte aus dem Orthophoto mit erkannten Schäden an der Dacheindeckung in voller Bildauflösung (100%)

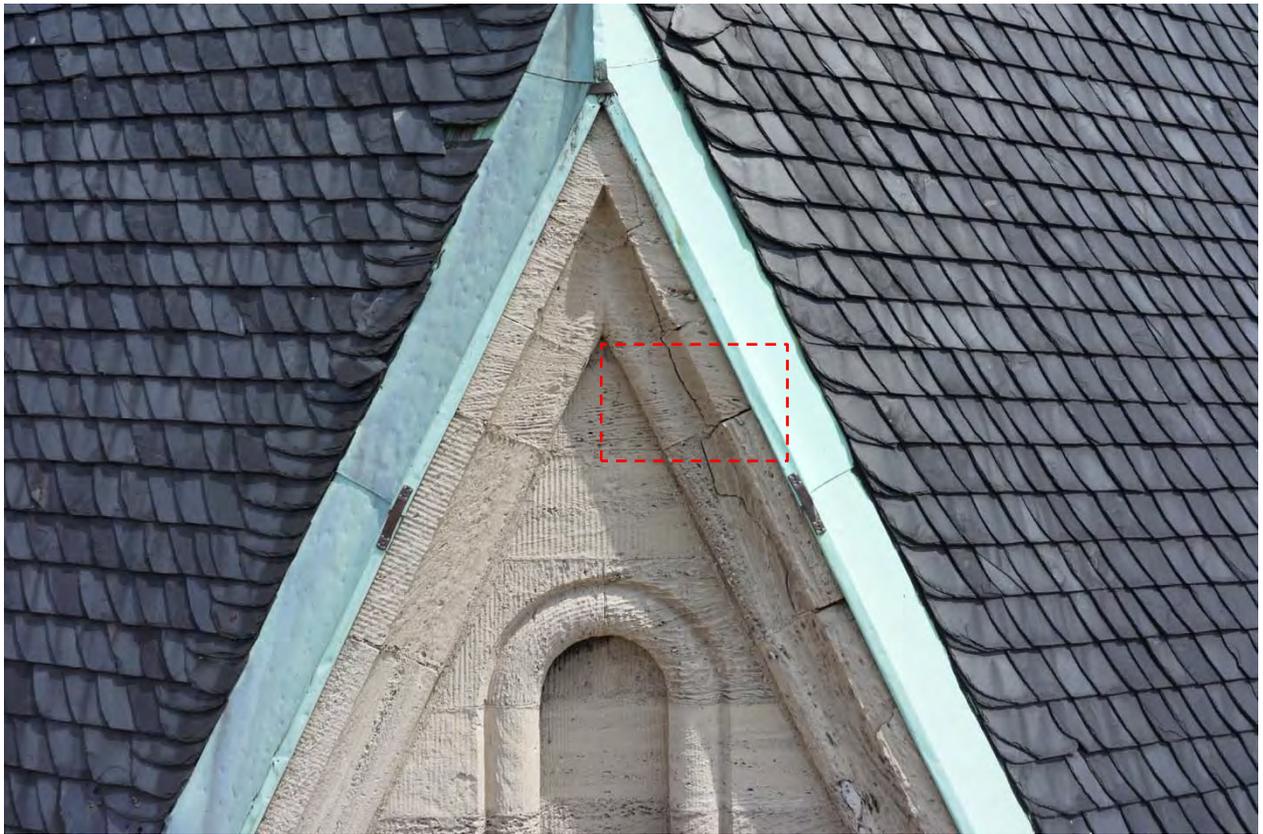


Abbildung 24: Aufnahme der Turmhelme und oberen Fassadenbereiche der Türme, oben: Originalaufnahme, unten: Detailausschnitt mit erkanntem Trennriss im Übergangsbereich von der Fassade zum Dach in voller Bildauflösung (100%)

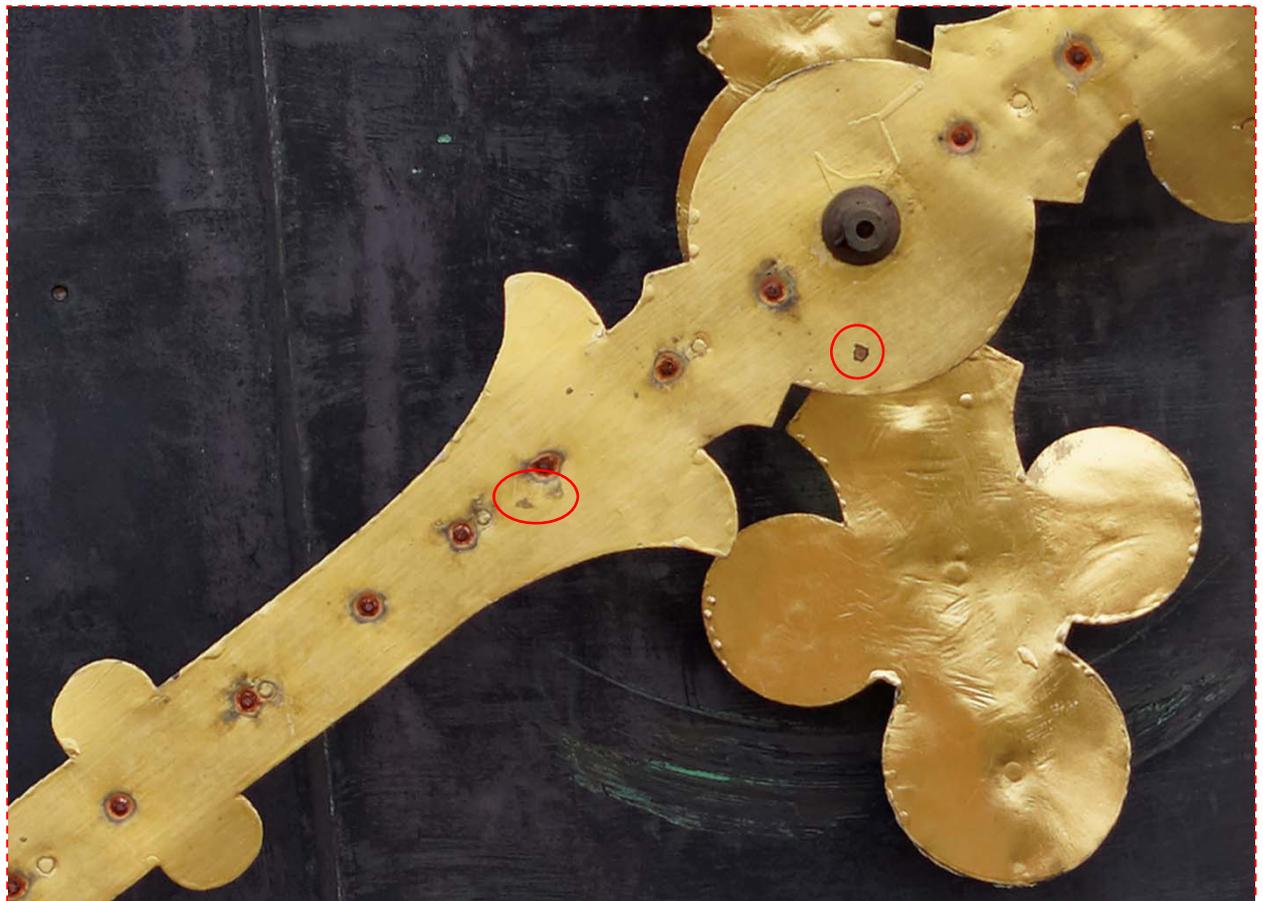


Abbildung 25: Aufnahme der Turmuhr an der Westfassade des Südturms, oben: Originalaufnahme, unten: Detailausschnitt mit erkannten Abplatzungen an der Vergoldung in voller Bildauflösung (100%)

Eine besondere Herausforderung am Dom zu Halberstadt waren die Untersuchungen zu den Einsatzmöglichkeiten von UAS im Innenraum von Bauwerken. Neben den sehr eingeschränkten Platzverhältnissen und somit sehr geringen Sicherheitsabständen zum Bauwerk, waren die Lichtverhältnisse in diesem Bauwerk sehr schlecht. Einbauten wie Lampen und quer verlaufende Zugbänder stellten zusätzliche Gefahrenbereiche dar. Abbildung 26 zeigt das Fluggerät im Kirchenhauptschiff bei der Aufnahme der Orgel ca. 1,5m unterhalb des Gewölbebogens zwischen den quer verlaufenden Zugbändern und den Abspannungen der Deckenlampen.

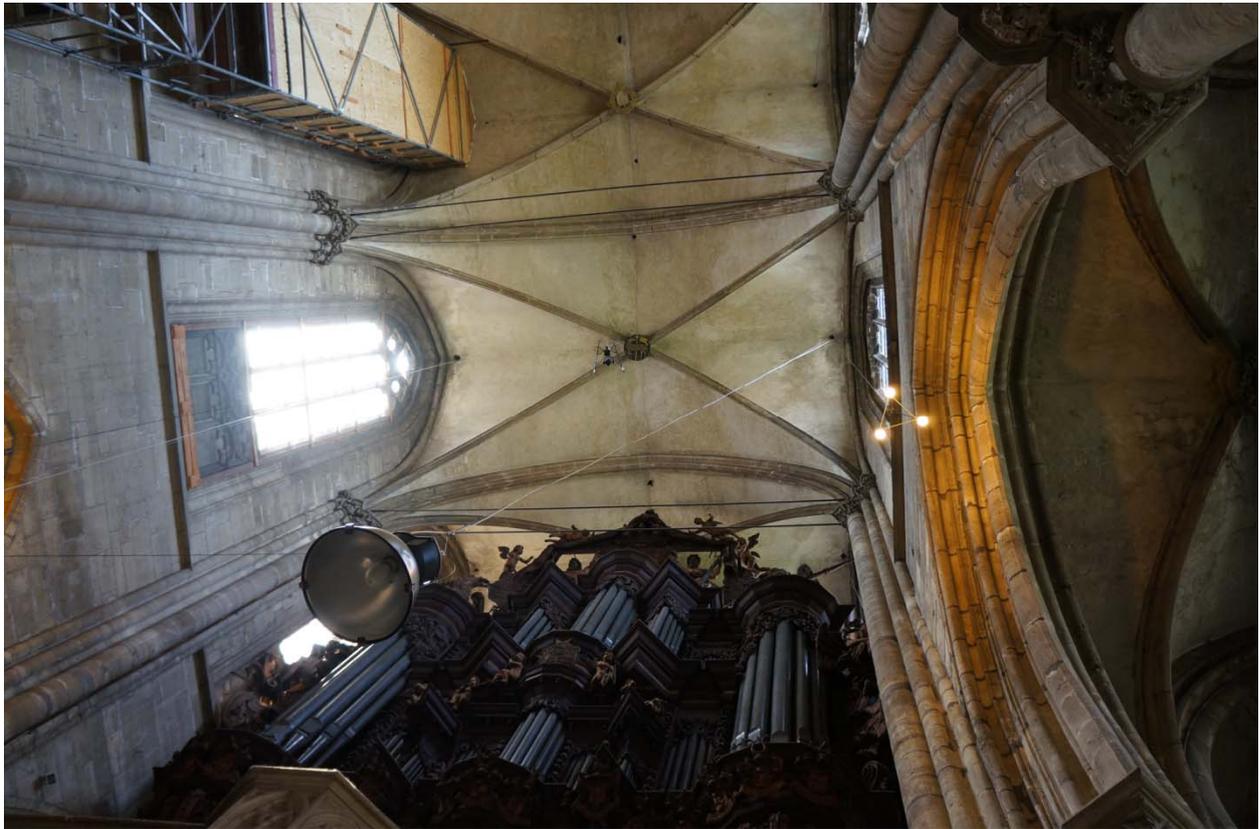


Abbildung 26: Innenraumaufnahmen am Dom zu Halberstadt, Aufnahme der Orgel ca. 1,5m unterhalb des Gewölbebogens [Foto: Späth, AscTec]

Fluggerätseitig sollte das Flugverhalten und die Flugsteuerung ohne verfügbare GPS-Unterstützung sowie die erforderliche technische Konfiguration eines Fluggerätes für spezielle Innenraumeinsätze untersucht werden. Dafür wurden vorab bereits Versuche mit mechanischen Anprallschutzmechanismen und zusätzlichen Anbauten, wie beispielsweise einer zusätzlichen Beleuchtung mit LEDs durchgeführt. Bei den Versuchen kamen jedoch keinerlei mechanische Anprallschutzsysteme zum Einsatz, da die getesteten Systeme keinen ausreichenden Schutz boten und die Berührung der empfindlichen Oberflächen im Innenraum von vorn herein vermieden werden sollte. Bauwerksseitig waren die sehr schwer erreichbaren Gewölbebögen, Kapitelle, Fenster und Figuren sowie die Orgel zu untersuchen. Dabei sollten nicht nur typische Schäden wie Risse, Abplatzungen oder Verfärbungen erkannt werden, sondern auch Untersuchungen zur Ermittlung des Verschmutzungsgrades an den oben genannten Bauwerksteilen durchgeführt werden. Hierbei war zu beachten, dass ein Aufwirbeln von Staub zwingend verhindert werden muss, um die empfindlichen Oberflächen nicht weiter zu schädigen.

Die Aufnahme der ausgewählten Bauwerksteile erfolgte, wie in Abbildung 27 dargestellt, unter Einhaltung des Sicherheitsabstandes aus kürzester Distanz zum Objekt, um in den Bildern möglichst viele Details erkennen zu können.



Abbildung 27: Innenraumaufnahmen im Dom zu Halberstadt, links: Aufnahme einer Figur aus kürzester Distanz zur Ermittlung des Verschmutzungsgrades [Foto: Späth, AscTec], rechts: Konsolenelement oberhalb der Figur mit starker Verschmutzung

Trotz der enorm schlechten Lichtverhältnisse konnten Verschmutzungen, wie starke Staubansammlungen gut erkannt werden. Abbildung 28 zeigt eine Aufnahme der starken Verschmutzung der besonders schwer zugänglichen Orgel. Besonders kleine und feine Schäden an den untersuchten Bauwerksteilen waren ebenso gut erkennbar, wie in Abbildung 29 dargestellt.

Jedoch ist dies nur bei der Verwendung einer entsprechend hochwertigen Kamertechnik mit sehr Lichtstarken Objektiven möglich. Um eine ausreichende Belichtung der Bilder zu erreichen, ist eine relativ lange Belichtungszeit erforderlich, was bei zu starken Bewegungen des Fluggerätes zu Verwackelungen (Bewegungsunschärfe) in den Bildern führen kann. Hier spielt die Flugstabilität und eine genaue Höhen- und Positionskontrolle des Fluggerätes eine besondere Rolle. Eine ausführliche Erläuterung zur Aufnahme einer Figur im Dom zu Halberstadt erfolgt in 7.2.3.

Zusätzlich zu den Bildern wurden, wie auch im Dom zu Magdeburg, Befliegungen und Aufnahmen mit einer Videokamera durchgeführt. Dabei konnten die verschiedenen Experten gemeinsam an einem zweiten Bildschirm die untersuchten Bauwerksteile live begutachten.

Weitere Informationen zu den Untersuchungen am Dom zu Halberstadt unter:

<https://www.youtube.com/watch?v=fduum29qcYg>

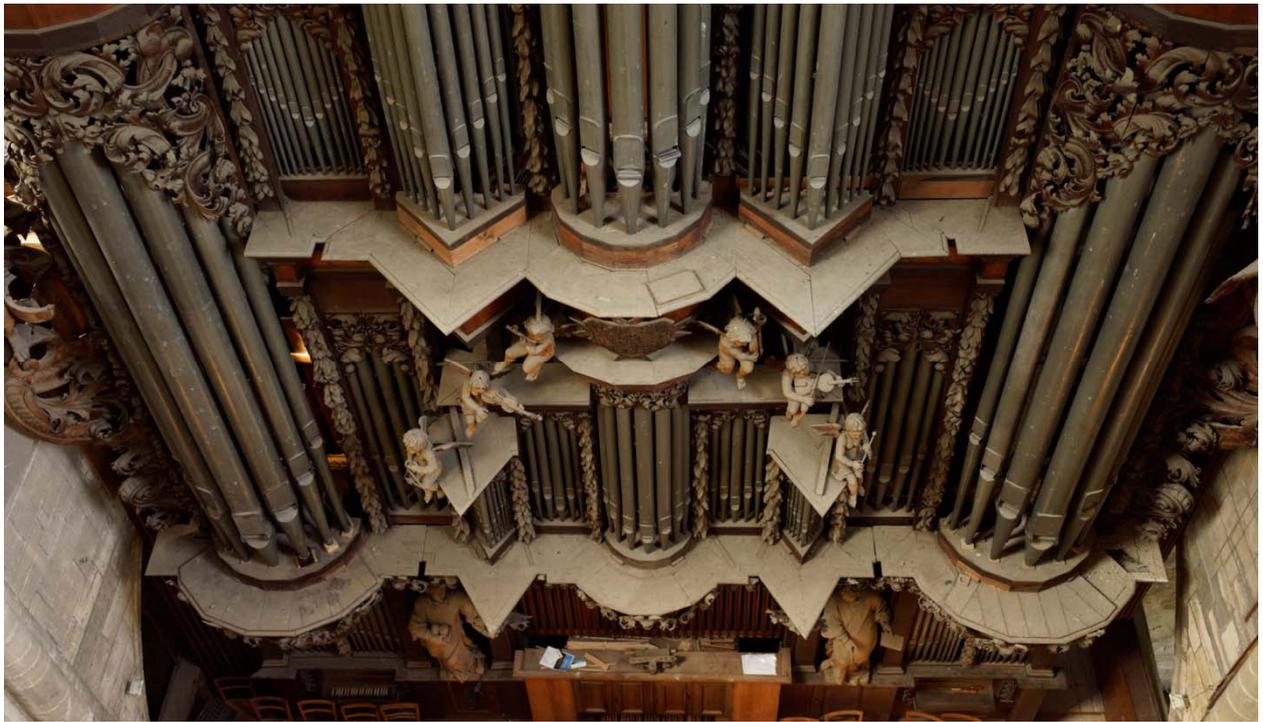


Abbildung 28: Innenraumaufnahmen im Dom zu Halberstadt, Aufnahme der Orgel zur Ermittlung des Verschmutzungsgrades, oben: Originalaufnahme, unten: Detailausschnitt in voller Bildauflösung (100%)

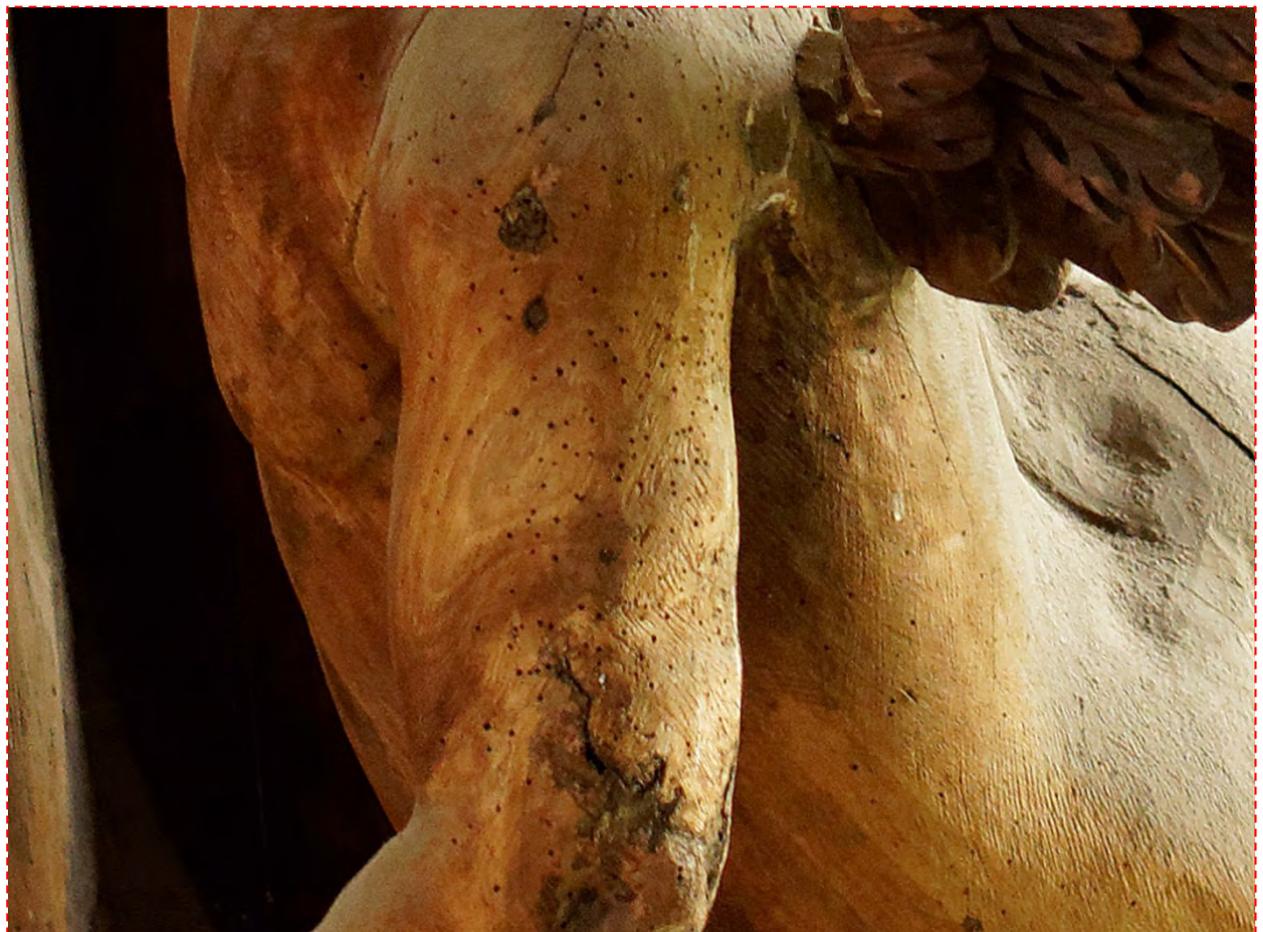


Abbildung 29: Aufnahmen im Innenraum des Doms zu Halberstadt, oben: Originalaufnahme des oberen Bereichs der Orgel, unten: Detailausschnitt einer Figur an der Orgel mit erkannten Schäden am Holz (Holzwurmlöcher) in voller Bildauflösung (100%)

## Untersuchungen am Referenzobjekt Dom zu Magdeburg

Die Untersuchungen am Dom zu Magdeburg konzentrierten sich im Außenbereich auf die Aufnahme eines sanierten Fassadenbereiches an der Westseite des Nordturmes in ca. 80m Höhe und auf die Aufnahme eines Abschnitts des Ostchores. Ziel war die Ermittlung der möglichen Detailgenauigkeit von Orthophotoansichten, die als Datenbasis für die Erzeugung steingenaue Pläne für die Sanierungsplanung genutzt werden. Die Wetterbedingungen an diesem Tag waren sehr schlecht. Insbesondere der starke Wind war eine Herausforderung für das Fluggerät sowie für den Piloten. Windgeschwindigkeiten von bis 20m/s und starke Turbulenzen an den Türmen ließen nur eine Steuerung des Flugsystems im manuellen Modus zu, da das System bei diesem starken Wind die GPS-unterstützte Position nicht mehr halten konnte. Vorteil des manuellen Flugmodus ist, dass in diesem Modus die maximale Antriebskraft des Systems genutzt werden kann. Dies verlangt aber nach einem sehr erfahrenen Piloten. Durch die starke Bewölkung waren die Belichtungsverhältnisse ebenfalls sehr schlecht. Vom o.g. Fassadenbereich waren Detailaufnahmen zu generieren, die einen möglichst hohen Farbtreue und einem sehr hohen Detailgrad vorweisen, da die Bilder zur Beurteilung von Verfärbungen bzw. Änderungen der Farben an der Fassaden genutzt werden sollten. Um diesen Detailgrad zu erreichen, waren trotz sehr schlechter Witterungsbedingungen Aufnahme aus kurzer Distanz zum Bauwerk erforderlich. Für die Aufnahme des ca. 10m breiten und 1,5m hohen Bereichs wurden 10 sich überlappende Bilder aus einer Entfernung von 5m zur Fassade aufgenommen und zu einem Orthophoto zusammengefügt. Die Aufnahmezeit betrug inklusive Start und Landung ca. 5 Minuten. Trotz der starken Turbulenzen, insbesondere im Bereich der Bauwerkskanten, waren aufgrund der extremen Windstabilität des Flugsystems und der qualitativ hochwertigen Kameratechnik sehr gute Aufnahmen möglich, die alle erforderlichen Details erkennen lassen. Abbildung 30 zeigt die gemeinsamen Außenaufnahmen mit den bauwerksverantwortlichen Experten.



Abbildung 30: Außenaufnahmen am Dom zu Magdeburg, Live-Begutachtung der Bauwerksexperten  
[Foto: Späth, AscTec]

Abbildung 31 zeigt den aufgenommenen Bereich der Westfassade des Nordturms des Doms und einen Detailausschnitt aus dem generierten Orthophoto in der vollen Auflösung (100%).



Abbildung 31: Aufnahme eines Fassadenbereichs an der Westseite des Nordturms in ca. 80m Höhe, oben rechts: Detailausschnitt aus dem generierten Orthophoto in voller Auflösung (100%), unten: Gesamtaufnahme des untersuchten Fassadenbereichs

Im Innenbereich des Doms wurden Teile des Ostchores und des 120m langen Kirchenschiffs aufgenommen. Die Aufnahmen erfolgten, wie auch schon im Dom zu Halberstadt, im Höhenmodus ohne GPS-Unterstützung. Die Aufnahmen wurden unter vollem Betrieb durchgeführt, lediglich der direkt betroffene Bereich im Dom musste kurzzeitig für die Aufnahmezeit abgesperrt werden. Somit gab es nur äußerst geringe Einschränkungen für die Besucher des Doms. Im 32m hohen Kirchenschiff wurden im Abstand von 3 - 4m die Schlusssteine der Deckengewölbe im Detail aufgenommen. Mit der Möglichkeit die Kamera bis zu 90° nach oben drehen zu können, waren Schrägaufnahmen ebenso möglich, wie Senkrechtaufnahmen der Schlusssteine. Dadurch war es gegeben die Schlusssteine sehr einfach und schnell von allen Seiten aufzunehmen.

Im Ostchor war exemplarisch eine Figur in einer Höhe von ca. 10m aus einer Distanz von 2m aufzunehmen. Weiterhin wurde eine Pfeilerstrebe vom Fußpunkt einer Seite über die Gewölbedecke bis zum Fußpunkt der gegenüberliegenden Seite aufgenommen. Dazu wurde das Fluggerät in einem konstanten Abstand zur Wand positioniert und die Kamera senkrecht zur Wand ausgerichtet. Die Aufnahmen erfolgten

mit einer konstanten Geschwindigkeit von unten nach oben bis zum Beginn des Gewölbes. Für die Aufnahme der Gewölbestrebe wurden die Kamerapositionen und -winkel dem Gewölbeverlauf angepasst. Mit diesen Einzelaufnahmen konnten Abwicklungen der Pfeilerstreben zur Dokumentation und Kartierung von Schäden erstellt werden. Für die Innenansichten der Außenmauern wurden ebenfalls detaillierte Aufnahmen erstellt, die zur visuellen Schadenserkenkung und Erstellung steingenaue Pläne zur Schadenskartierung genutzt werden können. Erschwert wurden die Aufnahmen im Bereich des Ostchores durch ein horizontal gespanntes Sicherheitsnetz, das die Besucher vor herabfallenden Steinausbrüchen schützen soll. Abbildung 32 zeigt eine Originalaufnahme der nördlichen Außenwand des Ostchores sowie einen Detailausschnitt einer geschädigten Steinoberfläche in voller Auflösung (100%).



Abbildung 32: Aufnahme der nördlichen Außenwände des Ostchores, oben: Originalaufnahme, unten: Detailausschnitt einer geschädigten Steinoberfläche in voller Auflösung (100%)

Kleinste Risse, wie auch Abplatzungen oder Verschmutzungen an den Steinoberflächen waren in den Bildern deutlich erkennbar, sodass diese zur Bewertung und Dokumentation der Schadensbilder genutzt werden konnten.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen am Dom zu Magdeburg war die Live-Analyse und Beurteilung des Zustandes der Innen- und Außenbereiche mit Hilfe hochauflöser Videoaufnahmen. Hierfür wurden die Befliegungen und Aufnahmen in enger Zusammenarbeit mit den bauwerksverantwortlichen Experten durchgeführt. Die Aufnahmen wurden für die beteiligten Experten auf einen separaten Bildschirm übertragen, sodass diese die Aufnahmen indirekt steuern und im Livebild auswerten konnten. Das Pilotenteam arbeitete auf Anweisung der Experten. Somit konnte eine erste schnelle Live-Beurteilung des Zustandes der Steinoberflächen durchgeführt werden. Die gespeicherten Videodaten wurden anschließend detailliert ausgewertet. Auf Basis der Videoaufnahmen können die weiteren Einsätze zur detaillierten Aufnahme identifizierter Stellen optimal geplant werden. Mit einer Live-Bildanalyse kann bei der Aufnahme einzelner Bauwerksteile der Aufnahmearbeit deutlich reduziert werden. Abbildung 33 zeigt die gemeinsame Befliegung und Aufnahme sowie die Beurteilung von Bauwerksteilen im Ostchor auf Basis von Live-Videodaten.



Abbildung 33: Gemeinsame Video-basierte Live-Analyse des Bauwerkszustandes im Ostchor [Foto: Späth, AscTec]

Weitere Informationen zu den Untersuchungen am Dom zu Magdeburg unter:

<https://www.youtube.com/watch?v=kOcpk0gwzfE>

Die Untersuchungen am Dom zu Magdeburg und am Dom zu Halberstadt wurden in sehr enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner, dem Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) und weiteren Experten aus dem Bereich der Denkmalpflege durchgeführt. In der gemeinsamen Auswertung der Untersuchungen wurden die Einsatzpotentiale der Fluggeräte und die weitere Verwendbarkeit der gewonnenen Bild- und Videodaten an den historischen Bauwerken herausgearbeitet und vom Projektpartner IDK in einem Kurzbericht wie folgt zusammengefasst:

Wir sehen in diesen Anwendungen das größte Potential darin, bisherige Untersuchungstechnologien abzulösen oder effizienter zu machen bzw. die Voraussetzungen für neue Monitoringmethoden zu schaffen, die den nachhaltigen Erhalt der Denkmale verbessern helfen. In erster Linie geht es dabei um die Früherkennung von Schäden und die sich daraus ergebende Möglichkeit frühzeitiger als bisher Reparaturmaßnahmen einzuleiten. Dadurch sind erhebliche Kosteneinsparungen zu erwarten. Ebenso ist die dreidimensionale Erfassung ein grundlegender Schritt bei der Erstellung von Planunterlagen in Vorbereitung von Restaurierungs- und Sanierungsarbeiten. Bedingt durch das Entfallen von zusätzlichen Gerüststellungen für die Schadensaufnahme und Arbeitsplanung entstehen erhebliche Kosteneinsparungen. Dies ist weit im Vorfeld der beginnenden Arbeiten in einer sehr frühen Planungsphase möglich, in der häufig noch keine Mittel für Gerüststellungen zur Verfügung stehen.

1. Erfassung und Zustandsbewertung von äußeren Fassadenbereichen und unzugänglichen Turm und Dachbereichen und Dachentwässerungen an den Domen
2. Zustandskontrolle von Innenräumen (Wände, Gewölbe, Einbauten) die bisher nur mit aufwendigen und teuren Gerüststellungen möglich waren wie am Beispiel der Magdeburger Doms durch Innenraumbefliegungen.
3. Lokalisierung starker Verschmutzungen auf hoch gelegenen Gesimsen und Absätzen, die vor aufwendigen Restaurierungen in tiefer liegenden Bereichen erkundet und entfernt werden müssen. Die anfängliche Fragestellung, in wieweit die Rotoren des Fluggerätes diesen Staub aufwirbeln, kann im Ergebnis der Versuche als beherrschbar und die Untersuchungen als nicht behindernd eingeschätzt werden.
4. Erstellung von dreidimensionalen Modellen für die dreidimensionale Modellierung von Raummodellen sowie die dreidimensionale Erfassung von Skulpturen als Arbeitsgrundlage für die Vorbereitung der Restaurierung der Skulpturen im Halberstädter Dom.
5. Durchführung von Monitoringaufgaben an sanierten Fassadenbereichen und in sehr großer Höhe befindlicher Bauzier.

## Untersuchungen am Referenzobjekt Rappbodetalsperre

Im Vordergrund der Untersuchungen an der Rappbodetalsperre standen die Versuche zur manuellen und automatischen Aufnahme der ca. 22.000 m<sup>2</sup> großen Betonoberfläche der Luftseite (Nordwestseite) des Bauwerks. Hierbei sollte eine vollständige Aufnahme mit konstanten Kameraparametern, mit ausreichender Bildüberlappung und einem möglichst gleichbleibenden Abstand senkrecht zur geneigten Bauwerksoberfläche erfolgen. Abbildung 34 zeigt die Nordwestansicht der Rappbodetalsperre mit der aufzunehmenden Betonoberfläche im 3D-Modell, welches aus den insgesamt ca. 1600 Einzelaufnahmen generiert wurde.



Abbildung 34: 3D-Modell der Rappbodetalsperre, Ansicht Nordwest (Luftseite), Kronenlänge ca. 415m, Höhe ca. 90m

Die Aufnahme der Staumaueroberfläche erfolgte aufgrund des starken Windes und insbesondere der starken Turbulenzen im Kronenbereich manuell im höhengestützten Modus im Teameinsatz. Zum Zeitpunkt der Aufnahme existierte noch keine effiziente GPS-gestützte Routenplanung für eine vollautomatische Aufnahme in einer geneigten Matrix. Die bei dieser Aufnahme durchgeführten Tests flossen direkt in die Weiterentwicklung und Optimierung der Navigationssoftware ein, sodass zukünftig auch solche geneigten Matrizen abgeflogen werden können.

Aufgrund der schlecht einsehbaren Randbereiche (starker Bewuchs), erfolgte die Aufnahme der Staumaueroberfläche in vertikaler Richtung von unten nach oben. Dafür wurde das Bauwerk in 24 Aufnahmeachsen/ -sektoren eingeteilt, die sich an der vorhandenen Bauwerksgeometrie orientieren (deutlich sichtbare Betonrippen auf der Staumauer als Orientierung bei der Befliegung) und mit ca. 50% überlappen. Die Aufnahme der einzelnen Achsen erfolgte von links nach rechts mit Blick auf die Staumauer. Um einen konstanten Abstand senkrecht zur Aufnahmefläche zu gewährleisten, musste das Fluggerät der Neigung des Bauwerks folgen. Das Bauwerk verfügt bis ca. 15m unterhalb der Krone über eine konstante Neigung, die dann in eine Senkrechte übergeht. Das Fluggerät sollte mit einer konstanten Steiggeschwindigkeit parallel zur Bauwerksoberfläche fliegen, was für den Piloten sehr schwer zu steuern war. Der Pilot musste das Fluggerät konstant in der Vertikalen steigen lassen und

parallel dazu noch konstant nach vorn fliegen. Die Neigung der Kamera wurde entsprechend der Neigung des Bauwerks eingestellt. Die Bildaufnahme erfolgte durch den zweiten Piloten. Insgesamt wurden für die betrachtete Staumauerfläche ca. 1200 Luftbilder im mittleren Abstand von ca. 15m generiert, die eine ausreichende Überlappung in horizontaler und vertikaler Richtung aufwiesen. Somit konnte für die Oberfläche ein zusammenhängendes, hochaufgelöstes Gigapixel-Orthofoto erstellt werden. Um die Redundanz bei der Bildüberlappung zu erhöhen, wurden zusätzlich noch Bilder aus einer größeren Entfernung generiert, die nur zur Zuordnung der Einzelbilder genutzt wurden. Die Aufnahmezeit dieser Fläche betrug ca. 2 Stunden. Des Weiteren wurde der Kronenbereich in drei horizontalen Flügen voll automatisch von allen Seiten aufgenommen (Nord-Ost-Ansicht, Süd-West-Ansicht, von oben).

Ziel der Gesamtaufnahme war es, im hochaufgelösten Übersichts-Orthophoto Bereiche zu identifizieren, die stärkere Schäden wie größere Abplatzungen, Risse oder Rostfahnen aufweisen. Auf Basis des in Abbildung 35 dargestellten Orthophotos war eine sehr schnelle und einfache visuelle Lokalisierung des betroffenen Bereichs möglich. Beispielhaft wurden anschließend einige identifizierte Bereiche mit ausgewählten Schäden im Detail aufgenommen. Die Aufnahme dieser geschädigten Bereiche erfolgte aus einer Distanz von maximal 5m zum Objekt, was eine sehr hohe Auflösung von unter 1mm/Pixel garantiert und somit eine zuverlässige Schadenserkenkung ermöglicht.



Abbildung 35: Hochaufgelöste Orthophoto-Nordost-Ansicht der Rappbodetalsperre mit zwei vertikal sich überlappenden Aufnahmestreifen/-sektoren

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen zwei Detailaufnahmen von einem erkannten Riss bzw. einer drohenden Abplatzung und einer Rostfahne, die bereits im Giga-Pixel-Orthophoto der Gesamtaufnahme deutlich erkennbar waren.



Abbildung 36: Identifizierte Rostfahne an der Oberfläche der Staumauer (Luftseite, Aufnahmeabstand ca. 5m), oben: Originalbild, unten: Bildausschnitt in voller Auflösung (100%)



Abbildung 37: Identifizierter Riss (Abplatzung) an der Oberfläche der Staumauer (Luftseite, Aufnahmeabstand ca. 5m), oben: Originalbild, unten: Bildausschnitt in voller Auflösung (100%)

Weitere Informationen zu den Untersuchungen an der Rappodetalsperre unter:

<https://www.youtube.com/watch?v=rAwGn7bez6Y>

## Untersuchungen am den Referenzobjekten Windenergieanlage und Schornstein

Die Untersuchungen an der etwa 100m hohen Windkraftanlage (Nabenhöhe) und dem 225m hohen Schornstein konzentrierten sich im Wesentlichen auf den Einsatz der Fluggeräte in extremer Höhe und bei ungünstigen Windverhältnissen sowie auf die Entwicklung geeigneter Aufnahmestrategien solcher Bauwerke. Die Aufnahmen erfolgten im ersten Feldversuch mit einer kompakten Zoomkamera Panasonic Lumix TZ. Bei weiteren Feldversuchen kamen die Sony Alpha 7R und der Sony Camcorder zum Einsatz, was die Qualität der Aufnahmen deutlich steigerte. Schwerpunkt der Untersuchung an der Windkraftanlage war die Schadenserkennung (vorwiegend Roststellen und kleinste Risse) an den Rotorblättern und am Maschinenhaus. Dafür wurden beispielhaft die Rotorblätter und Teile des Maschinenhauses detailliert aufgenommen. Abbildung 38 zeigt eine Frontalansicht des Maschinenhauses in Nabenhöhe. Deutlich erkennbar sind bereits auf dieser Übersichtsaufnahme starke Verschmutzungen und Verfärbungen im Anschlussbereich der Rotorblätter.



Abbildung 38: Aufnahme der untersuchten Windkraftanlage, Frontalansicht Maschinenhaus, Nabenhöhe 100m

In den folgenden Abbildungen sind beispielhaft zwei typische Schäden an einer Windkraftanlage dargestellt. Abbildung 39 zeigt eine identifizierte Beschädigung des Farbanstriches der Oberfläche, die sich bereits als Roststelle (Durchmesser ca. 5mm) ausgebildet hat. In Abbildung 40 ist eine Beschädigung der hoch beanspruchten Rotorblattspitzen, die durch Blitzeinschlag entstehen können, zu sehen.





Abbildung 40: Aufnahme der untersuchten Windkraftanlage, oben: Originalaufnahme, unten: Zoomaufnahme einer identifizierten Beschädigung an der Rotorblattspitze

Die Feldversuche an den Windkraftanlagen haben gezeigt, dass die sehr hohe Bildqualität, eine sehr sichere visuelle Identifikation typischer Schäden an Windkraftanlagen erlaubt. Unter Nutzung einer Luftbild-basierten Erstbegutachtung der Windkraftanlage könnte die detaillierte Schadensaufnahme durch Prüferingenieure oder Industriekletterer deutlich effizienter gestaltet werden, da nur noch die in den Luftbildern identifizierten Schadstellen gezielt in Augenschein genommen werden müssen.

Die Untersuchungen am Schornstein beschränkten sich auf die Entwicklung einer geeigneten Aufnahmestrategie zur vollständigen automatisierten Aufnahme solch sehr hoher und schlanker Bauwerke. Da bereits in anderen Abschnitten in diesem Dokument intensiv auf die Aufnahmestrategie bei turmartigen Bauwerken eingegangen wird, wird an dieser Stelle auf weitere Ausführungen verzichtet. Die Ergebnisse zu den Untersuchungen am Schornstein sind [27] und [29] zu entnehmen.

Weitere Informationen zu den Untersuchungen an Windenergieanlagen unter:

[https://www.youtube.com/watch?v=u\\_oBNH8Olz8](https://www.youtube.com/watch?v=u_oBNH8Olz8)

## Untersuchungen am Referenzobjekt Wirrbachtalbrücke

An der Wirrbachtalbrücke wurden vornehmlich Versuche zur manuellen Aufnahme von sehr schwer zugänglichen Stellen durchgeführt. Dabei stand die Einzelaufnahme der Bogenuntersicht, der Pfeilerfüße und -köpfe sowie des Überbaus an diesem geometrisch komplexen Bauwerk im Vordergrund. Neben den Hotspot-Aufnahmen wurden auch Versuche zur äußerst schwierigen automatischen Aufnahme der Bogenuntersicht, und Bogenansicht sowie der Überbauansicht durchgeführt. Wie in Abbildung 41 dargestellt erfolgte die Befliegung auf vorprogrammierten Aufnahmepositionen, die sich an der Bauwerksgeometrie (z.B. gekrümmter Grundriss, Kurvenbereich) orientierten. Besonders schwierig gestaltete sich dabei die Aufnahme der Bogenuntersicht, da hierfür möglichst genaue Kamerapositionen angefliegen und gehalten werden müssen, sodass die Aufnahme der Bogenuntersicht nahezu senkrecht erfolgen kann. Für jede Position sind die entsprechenden Kamerawinkel zu bestimmen.



Abbildung 41: Aufnahmepositionen bei der GPS-basierten automatischen Aufnahme der Bogenansicht (grün) und -untersicht (blau) sowie der Ansicht des Überbaus (rot)

Die Versuche an der Wirrbachtalbrücke haben gezeigt, dass eine Aufnahme solch schwer zugänglicher Stellen am Bauwerk grundsätzlich möglich ist, jedoch nur im Teameinsatz und mit der entsprechend zuverlässigen Fluggerätetechnik, wie dem hier genutzten Flugsystem Falcon 8. Für die automatische Aufnahme solch feingliedriger und komplexer Bauwerke ist eine sehr genaue Routenplanung erforderlich, die sich an der Bauwerksgeometrie orientiert. Für solche Anwendungen sind entsprechende Algorithmen zur automatischen Routenerzeugung noch zu entwickeln.

Die Feldversuche und Untersuchungsergebnisse wurden zudem zur Erprobung und Optimierung eines weiterentwickelten GPS-Moduls genutzt, dass Einsätze von UAS auch unterhalb von Bauwerken, wie z.B. an Brücken oder in stark bebauten Regionen (Innenstadtbereich mit sehr hoher und enger Bebauung) ermöglichen soll. Die anspruchsvollen Aufnahmen unterhalb der Brücke bzw. in kürzester Distanz zum Bauwerk erfolgten bei trübem Wetter und mäßigem Wind im Teameinsatz. Hierfür kam u.a. auch spezielles Aufnahmeequipment, wie Videobrillen zum Einsatz. Diese haben sich bei dieser Art der Einsätze sehr bewährt. Abbildung 42 zeigt eine Zusammenstellung der Untersuchungen an der Wirrbachtalbrücke.



Abbildung 42: Untersuchungen und Aufnahmen an der Wirrbachtalbrücke [Foto: Späth, AscTec und Rauthenberg]

Die Bogenansichten und -untersichten sowie die nördliche Ansicht des Überbaus wurden vollständig aufgenommen. Nach erster Auswertung der Aufnahme vor Ort, konnten sehr schnell geschädigte Stellen am Bauwerk identifiziert werden. Die Aufnahme dieser Schadstellen erfolgte im Detail aus kurzer Entfernung (5 – 7,5m) zum Bauwerk. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch drei ausgewählte Stellen am Bauwerk im Detail. Diese Stellen befinden sich an der östlichen Bogenuntersicht und einem Pfeilerfuß eines oberen Pfeiler sowie auf dem Bogen auf der Westseite des Bauwerk, siehe Abbildung 43.



Abbildung 43: Wirrbachtalbrücke Nordwestansicht, rot markiert: identifizierte Schadstellen

Abbildung 44 zeigt einen erkannten Riss auf der Betonoberfläche der Bogenoberseite. Wie in Abbildung 45 dargestellt, können die Aufnahmen auch zur Kontrolle von bereits ausgeführten Instandsetzungsarbeiten verwendet werden. Diese Abbildung zeigt eine instandgesetzte Abplatzung an einem Pfeilerfuß. Abbildung 46 zeigt ein Kiesnest an der Bogenunterseite. Weitere Informationen zu Aufnahmestrategien von Brückenbauwerken können [30] entnommen werden.



Abbildung 44: Aufnahme eines Risses am Bogen, oben: Originalaufnahme, unten: Detailausschnitt in voller Bildauflösung (100%)

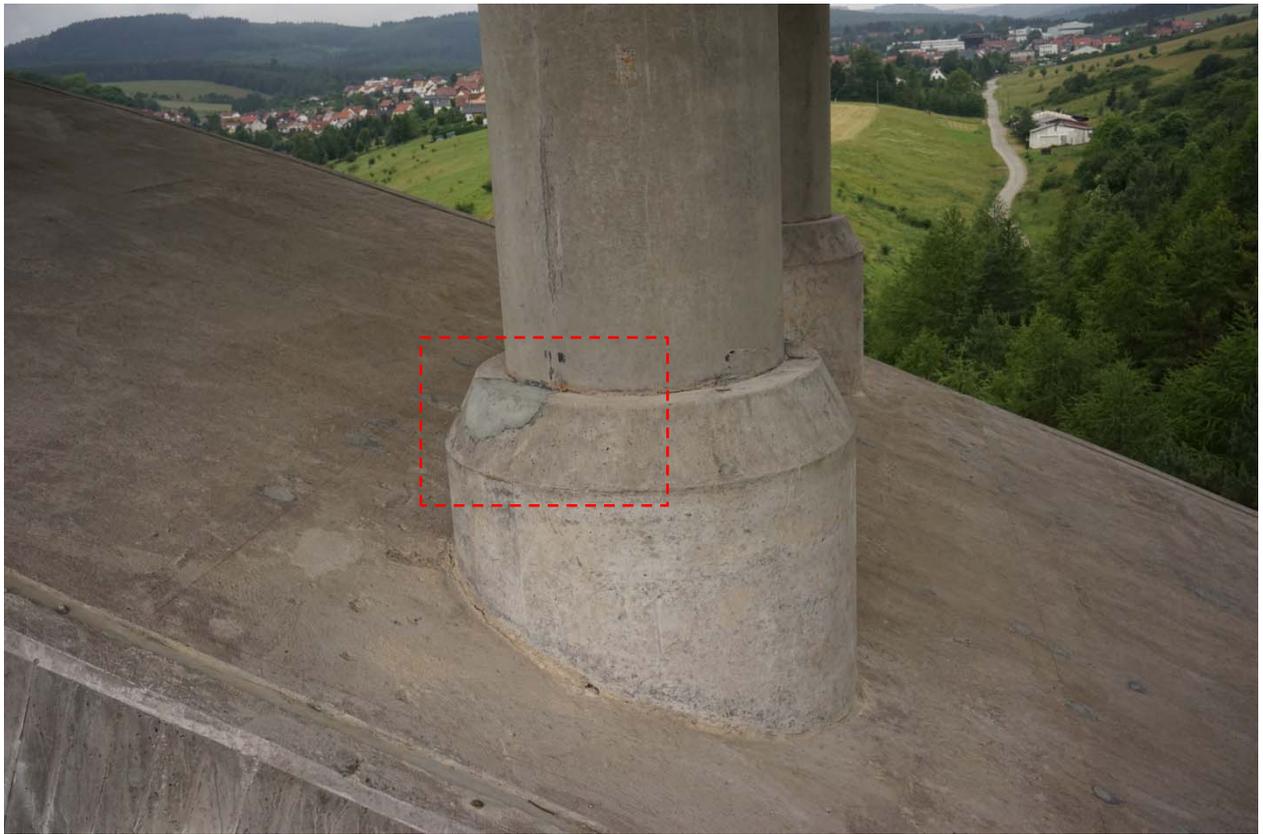


Abbildung 45: Aufnahme einer instandgesetzten Abplatzung an einem Pfeilerfuß, oben: Originalaufnahme, unten: Detailausschnitt in voller Bildauflösung (100%)

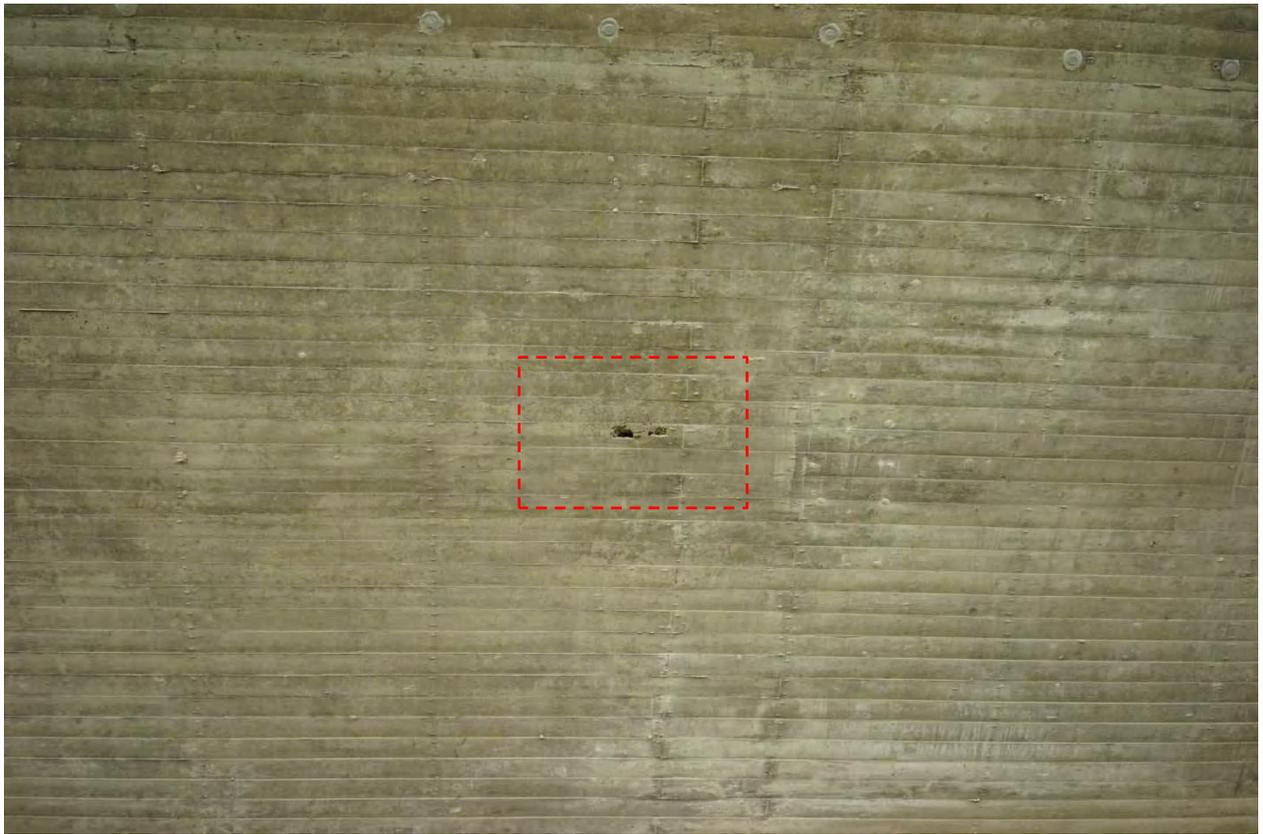


Abbildung 46: Aufnahme eines Kiesnestes an der Bogenuntersicht, oben: Originalaufnahme, unten: Detailausschnitt in voller Bildauflösung (100%)

Weitere Informationen zu den Untersuchungen an der Wirrbachtalbrücke unter:

[https://www.youtube.com/watch?v=u\\_oBNH8Olz8](https://www.youtube.com/watch?v=u_oBNH8Olz8)

## **7.2 Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis Photogrammetrischer Daten**

Für die Untersuchung der Verwendbarkeit der Unbemannten Fluggeräte zur Luftbildbasierten Datenaufnahme an Bauwerken, bei denen die Bilddaten zur photogrammetrischen Auswertung und georeferenzierten 3D-Rekonstruktion des Bauwerks genutzt werden sollten, wurden zunächst zwei Referenzobjekte näher untersucht. Ausgewählt wurden mit dem Schiefen Turm von Bad Frankenhausen ein historisches turmartiges Bauwerk und mit der Stützwand am Jagdbergtunnel bei Bucha ein großflächiges Ingenieurbauwerk. Beide Referenzobjekte sollten mit Blick auf die Zustandsermittlung und zukünftige Überwachung des Bauwerkzustandes auf Basis von georeferenzierten 3D-Daten hin untersucht werden. Im Fokus standen vor allem die manuelle und automatische Datengenerierung, die damit erreichbare Datenqualität und Verwendbarkeit der Bilddaten zur Photogrammetrischen Auswertung und 3D-Rekonstruktion des Bauwerks. Das Datenvolumen sowie die Aufbereitung bzw. Qualitätsverbesserung der Daten für die weitere Nutzung/ Verwendbarkeit der Daten durch Dritte war ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen. Im Rahmen der Untersuchungen an den Referenzbauwerken und vor allem an den historischen Kirchenbauwerken kristallisierte sich ein weiteres Einsatzgebiet für die Unbemannten Fluggeräte und die weitere Verwendung der Bilddaten für 3D-Rekonstruktionen heraus. Es wurde untersucht, in wieweit hoch aufgelöste Luftbilder zur 3D-Rekonstruktion von Figuren/ Skulpturen oder Ornamenten im Rahmen von Restaurierungsarbeiten an Denkmalobjekten genutzt werden können. Hierfür wurde im Innenbereich (Kirchenschiff) des Doms zu Halberstadt eine Skulptur aus kurzer Distanz aufgenommen und als 3D-Modell für die Restaurierungsplanung aufbereitet.

### **7.2.1 Untersuchungen am Referenzobjekt Schiefer Turm von Bad Frankenhausen – Manuelle Datengenerierung**

Der Turm der Oberkirche von Bad Frankenhausen, auch besser bekannt als „*Schiefer Turm von Bad Frankenhausen*“, ist eines der am stärksten (natürlich) geneigten historischen Bauwerke weltweit und somit auch ein Wahrzeichen Thüringens. Mit einer Neigung von durchschnittlich  $4,9^\circ$  (Lotabweichung Turmspitze ca. 4,60m) ist dieser Kirchturm bei etwa gleicher Bauhöhe sogar noch stärker geneigt als der berühmte Schiefe Turm von Pisa. Die Hauptursache für die Schiefstellung des Turmes liegt wie auch in Pisa in den besonderen geologischen Verhältnissen dieser Region. In vorangegangenen Untersuchungen wurde dieses Bauwerk im Rahmen der dauerhaften Zustandsüberwachung bzw. für Sanierungsplanungen bereits mehrfach aufgenommen. Dabei wurden Terrestrische Laserscanner zur Erzeugung einer georeferenzierten Punktwolke des Bauwerks eingesetzt, um die besondere Bauwerksgeometrie zu erfassen. Dabei konnten aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit Teile des Bauwerks nur unzureichend erfasst werden. Vor allem die oberen Bereiche des Turmes konnten nur sehr grob bzw. gar nicht erfasst werden (abgeschattete Bereiche), was zu einer lückenhaften 3D-Punktwolke führte. Zusätzlich zum Laserscan wurden manuell Fotos vom Bauwerk erzeugt, die zur Schadenserfassung und -dokumentation genutzt wurden. Dabei kam ein Kran mit einer Gondel zum Einsatz, um das aufwendige Einrüsten des Turms zu vermeiden und um Aufnahmen mit einem ausreichenden Abstand zum Bauwerk aufnehmen zu können, ohne störende Gerüstteile in den Bildern zu haben.

Ziel der Untersuchungen war es, mit Hilfe der Unbemannten Fluggeräte möglichst effizient (Zeit, Anzahl der Bilder) qualitativ hochwertige Luftbilddaten zu erzeugen, die zur Schadenserfassung und -dokumentation und gleichzeitig zur georeferenzierten 3D-Modellierung des Bauwerks genutzt werden können.

Neben den in 7.1 bereits gezeigten Detailaufnahmen zur Schadenserfassung und -dokumentation lag ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen am Schiefen Turm auf der manuellen Datenaufnahme aus kurzer Distanz zum Objekt und auf der Verwendung der Bilddaten zur Photogrammetrischen Auswertung sowie 3D-Rekonstruktion des Turmes. Diese georeferenzierte 3D-Rekonstruktion sollte zur Ermittlung und kontinuierlichen Überwachung der Schiefstellung des Bauwerkes und von lokalen Deformationen am Mauerwerk des Turmes herangezogen werden.

Abbildung 47 links zeigt das Bauwerk mit der extremen Schiefelage und den angrenzenden Restmauern des Kirchenschiffes in der Nordansicht und rechts in einer Senkrechtaufnahme von oben sowie die eingeschränkte Platzverhältnisse um den Turm herum.



Abbildung 47: links: Nordansicht Schiefer Turm von Bad Frankenhausen Ansicht Nord, rechts: Draufsicht

### **Aufnahmeplanung und -durchführung**

Die extreme Schiefelage sowie die eingeschränkte Zugänglichkeit, bzw. sehr beengten Platzverhältnisse und damit verbundenen geringen Sicherheitsabständen, ließen nur eine manuelle Datenaufnahme im Teameinsatz mit zwei Piloten zu. Dabei konzentrierte sich der Fluggerätepilot ausschließlich auf die Steuerung des Fluggerätes in unmittelbarer Bauwerksnähe, mit möglichst konstantem Abstand zum Bauwerk. Für die sichere Steuerung des Fluggerätes empfiehlt es sich, den Standort so zu wählen, dass der Fluggerätepilot den Abstand zum aufzunehmenden Objekt jederzeit gut abschätzen kann, möglichst 90° zur Aufnahme-richtung. Über die Live-Bildanzeige der Kamera auf der Bodenstation kann sich der Fluggerätepilot zusätzlich orientieren. Der „Co-Pilot“ unterstützte den Fluggerätepiloten bei der Positionierung des Fluggerätes auf Basis der

Aufnahmeplanung und übernahm parallel die manuelle Aufnahme der Bilder vom Turm. Das Auslösen der Bilder erfolgte über ein zusätzliches Steuerungsmodul an der Bodenstation, mit dem auch eine eingeschränkte Steuerung des Fluggerätes (horizontale Drehung um die Fluggerätechse), der Kamera (vertikaler Aufnahmewinkel) und die Einstellung/ Änderung der Aufnahmeparameter der Kamera im Flug möglich ist. Die Aufnahmen im Teameinsatz haben sich vor allem bei manuellen und schwierigen Aufnahmebedingungen als notwendig erwiesen. Abbildung 48 zeigt den Teameinsatz am Schiefen Turm in Bad Frankenhausen.



Abbildung 48: Teameinsatz am Schiefen Turm in Bad Frankenhausen [Fotos: Späth, AscTec]

Auf Basis der vorhandenen Bauwerksgeometrie, der Umgebungsbedingungen, der verwendeten Kamera sowie der angestrebten Bildauflösung für die 3D-Rekonstruktion des Bauwerkes, bzw. der späteren Identifizierbarkeit von geometrischen Veränderungen am Bauwerk, wurde eine manuelle Aufnahme des Turmes geplant. Für die „geometrische“ Überwachung des Bauwerkszustandes wurde eine Lagegenauigkeit der zu genierenden 3D-Punkte von 2-3 Millimetern angestrebt. Dafür wurde der ca. 56m hohe Turm in acht vertikalen Streifen um den Turm herum sowie mit Senkrechtaufnahme von oben aufgenommen. Dabei waren vier vertikale Streifen (2, 4, 6, 8) für die Nord-, Ost-, Süd- und Westansichten des Turmes vorgesehen. Vier (1, 3, 5, 7) weitere vertikale Streifen wurden über Eck, der Nordost-, Südost-, südwest- und Nordwestansicht angeordnet. Die vertikalen Streifen sollten so angeordnet sein, dass eine ausreichende horizontale Überlappung der Bilder von mindestens 60% gewährleistet ist. Abbildung 49 links zeigt schematisch die geplanten vertikalen Streifen 1 bis 8 um den Turm herum, sowie exemplarisch eine senkrechte Aufnahme (9). Abbildung 49 rechts zeigt das Prinzip der vertikalen und lotrechten Aufnahmen zum Aufnahmeobjekt in der Seitenansicht. Eine Aufnahme über aufsteigende „Kreisbahnebenen“ um den Turm herum ist in diesem Fall nicht sinnvoll, da die Piloten das Fluggerät dabei ständig am Boden mit verfolgen müssen. Die Steuerung und Einhaltung des konstanten Abstandes zum Bauwerk ist dabei wesentlich schwieriger. Die stark wechselnden Licht- aber vor allem auch die wechselnden Windverhältnisse um das Bauwerk herum können zu großen Qualitätsverlusten bei den Bilddaten führen.

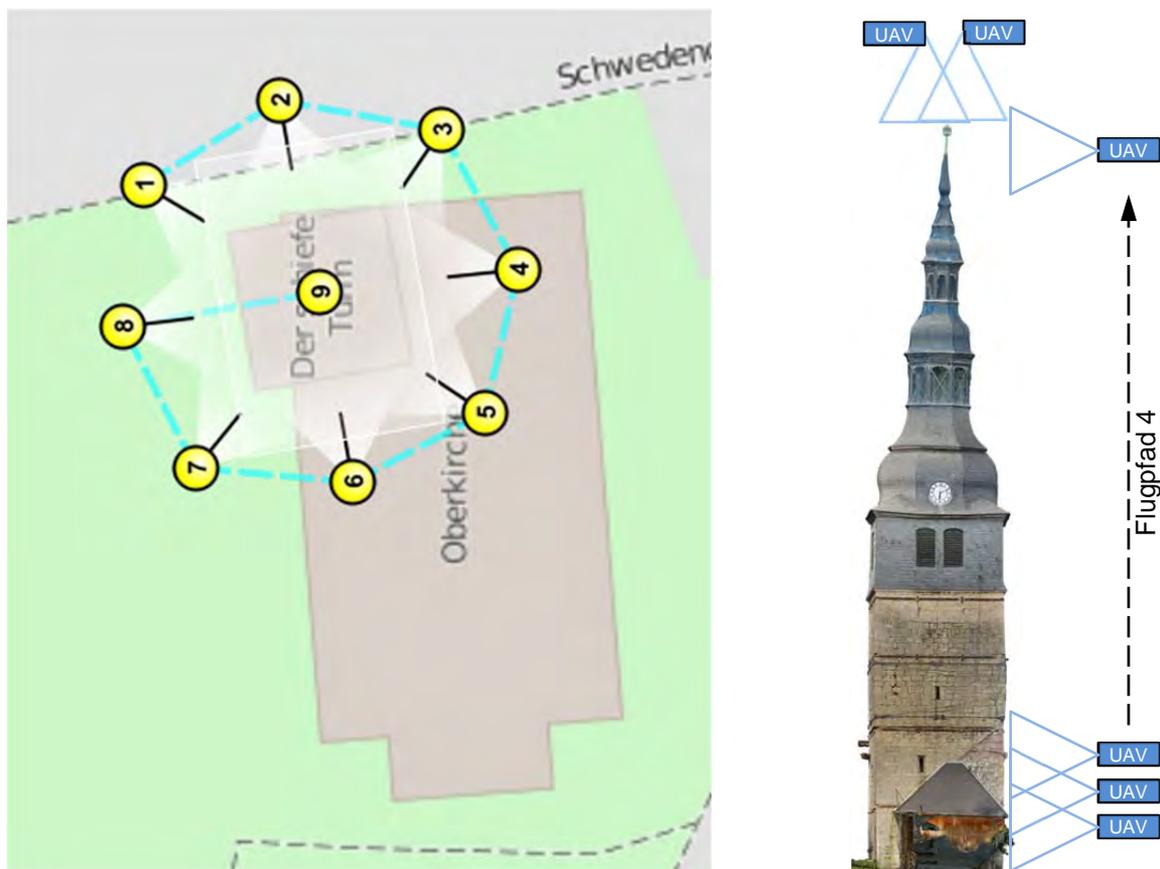


Abbildung 49: Aufnahmeschema am Schiefen Turm in Bad Frankenhausen

Für die Luftbildaufnahmen wurde eine Sony Alpha 7R Systemkamera mit Vollformatsensor (36 x 24 mm) und einer Festbrennweite von 35mm verwendet. Die Bilder der vertikalen Streifen wurden in einem konstanten Abstand von ca. 10 Meter und horizontalem (Senkrecht) Blick-/Kamerawinkel zum Bauwerk erzeugt, sodass die Bauwerksansicht möglichst formatfüllend im Bild zu sehen ist. Somit werden nur die Bauwerksinformationen aufgenommen, die für die spätere Erzeugung der 3D-Geometrie des Bauwerks auch von Bedeutung sind. Störende Informationen aus dem Hintergrund werden dadurch minimiert. Dabei ist dennoch zu beachten, dass zur Berücksichtigung windinduzierter Bewegungen des Fluggerätes ein ausreichender Puffer am Bildrand nach rechts und links eingeplant wird, um einen Informationsverlust und eine zusätzliche/ erneute Aufnahme von vorn herein zu vermeiden. Gerade bei stärkerem Wind sollte dies besonders berücksichtigt werden. Abbildung 50 zeigt beispielhaft die sich überlappenden Bilder über die Südwest-, West- und Nordwestansicht. Die Fokussierung der Aufnahmen erfolgte im manuellen Modus, angepasst an den Abstand zum Bauwerk über den vollen Bildausschnitt (Fokus „Feld“). Dadurch wird eine „Fehlfokussierung“ auf uninteressante Bereiche im Hintergrund verhindert. Zudem ist die Fokussierung mit Blick auf die Verwendung der Bilddaten zur Erzeugung einer 3D-Geometrie zwingend konstant zu halten, um möglichst immer ausreichend scharfe Bilder zu erhalten.



Abbildung 50: Überlappende Aufnahmen Südwest-, West- und Nordwestansicht

Die Aufnahme der Bilder in den jeweiligen vertikalen Streifen erfolgte manuell durch Fernauslösung der Kamera durch den Co-Piloten. Dafür wurde das Fluggerät in ca. 2m Höhe über dem Boden auf einer Position ca. 10 Meter entfernt zum Bauwerk mit Blickrichtung zum Bauwerk ausgerichtet, horizontaler Kamerawinkel  $0^\circ$ . Mit Hilfe der sehr genauen GPS-Positionierung wurde das Fluggerät auf dieser Position vom Fluggerätepiloten langsam mit möglichst konstanter Geschwindigkeit und Ausrichtung zum Bauwerk nach oben bewegt. Ohne das Fluggerät anzuhalten wurden dann alle ein bis zwei Höhenmeter ein Bild erzeugt. Bei dieser Art der „dynamischen Aufnahme“ ist darauf zu achten, dass möglichst kurze Verschlusszeiten gewählt werden, um eine Bewegungsunschärfe, die wiederum negative Auswirkung auf die Erzeugung der 3D-Geometrie hat, in den Bildern zu vermeiden. Hierbei hat sich bei langsamen dynamischen Aufnahmen und bei normalen Windverhältnissen eine Verschlusszeit kleiner  $1/800$  Sekunde bewährt. Bei schlechteren Windverhältnissen sind noch kürzere Verschlusszeiten zu empfehlen. Ausgiebige Tests haben gezeigt, dass bei einer langsamen „dynamischen Aufnahme“ von Bildserien entlang eines Flugpfades teilweise bessere Ergebnisse bezüglich der Bildqualität erzielt werden konnten, als bei Serienaufnahmen bei denen für jede Aufnahme an einer Position gestoppt wurde. Dies wirkt sich besonders stark bei vertikalen Flugpfaden und relativ kurzen Positions-/Aufnahmeabständen, wie z.B. bei der Aufnahme von Türmen oder Schornsteinen aus. Bei einem konstanten Steigflug werden die vom Fluggerät selbst erzeugten, abwärts gerichteten Windströmungen nicht gestört, was zu einem äußerst ruhigen Flugverhalten führt. Daher ist bei vertikalen Aufnahmen-/ Flugpfaden auch immer eine Aufnahme von unten nach oben entlang des Bauwerks zu empfehlen. Bei Aufnahmen von oben nach unten befindet sich das Fluggerät ständig in selbst erzeugten Abwinden, was zu einem sehr unruhigen Flugverhalten führt und die Aufnahme qualitativ hochwertiger Bilder erschwert bzw. unmöglich macht. Daher ist dies, wo immer möglich zu vermeiden. Bei „nicht dynamischen Aufnahmen“ werden bei jedem Stoppen des Fluggerätes für die Bildaufnahme die erzeugten Abwinde stark gestört und es stellen sich kleinere Turbulenzen ein, die die Balance des Fluggerätes und somit auch die Bildqualität negativ beeinflussen. Dies kann nur verhindert werden, indem das Fluggerät genügend Zeit bekommt sich wieder auszubalancieren, was bei stärkerem Wind je nach Agilität des Fluggerätes auch mehrere Sekunden dauern kann. Dies wirkt sich wiederum direkt negativ auf die Aufnahmedauer, den Akkuverbrauch (da erhöhter Energiebedarf für die Fluglageregelung), die Flugzeit und damit auf die Effizienz der Bauwerksaufnahme aus.

Die bei manuellen Aufnahmen erzeugten Bilder verfügen, aufgrund der höheren Aufnahmeunsicherheiten als bei der automatischen Aufnahmen, meist über eine relativ

große Überlappung, was zu deutlich mehr Bildern und somit zu einem deutlich größeren Datenvolumen als erforderlich führt. Für den Kamera steuernden Piloten ist ein positionsexaktes Auslösen der Kamera, für eine in der Regel notwendige Überlappung von ca. 60%, bei einer dynamischen Aufnahme kaum möglich. Die vertikale Überlappung der hier aufgenommenen Bilder betrug durchschnittlich mehr als 80%. Die Aufnahme der Bilder erfolgte bei guten Wetterverhältnissen in den späten Nachmittagsstunden bzw. frühen Abendstunden. Dabei wurden die Süd- und Westansicht des Turmes sehr gut, die Nord- und Ostansicht eher schlecht ausgeleuchtet. Hinzu kam bei der Aufnahme der Ostansicht das Gegenlicht der tiefstehenden Sonne, was die Aufnahme zusätzlich erschwerte. Dies führt zu deutlichen Belichtungsunterschieden in den jeweiligen Bildserien, da die Kameraparameter über die gesamte Aufnahmezeit konstant gehalten wurden. Diese Belichtungsunterschiede sind folglich auch deutlich in der farblichen 3D-Rekonstruktion zu erkennen. Solche extremen Belichtungsunterschiede zwischen hell ausgeleuchteten und abgeschatteten Bereichen können bei starkem Sonnenschein kaum vermieden werden. Eine Möglichkeit wäre, die Aufnahmezeit den Belichtungsverhältnissen/ dem Sonnenstand anzupassen, was aber zu hohem zeitlichen Aufwand führen kann. Daher sind für Aufnahmen aus verschiedenen Himmelsrichtungen an einem Bauwerk bedeckte Tage mit annähernd gleichbleibenden Lichtverhältnissen zu empfehlen. Sonnenschein kann darüber hinaus dazu führen, dass es bei ungünstigen Sonnenständen zur Schattenbildung auf dem Bauwerk kommt, was ebenfalls negative Auswirkungen auf die 3D-Rekonstruktion haben kann. Extrem schräg einfallendes Sonnenlicht kann durch die damit verbundene Schattenbildung unerwünschte Falschinformationen, wie z.B. die Vergrößerung von Mauerwerksfugen, hervorrufen, die auch die Ergebnisse bei der 3D-Rekonstruktion verfälschen können.

In der nachfolgenden Tab sind die Aufnahmeparameter nochmals zusammengefasst.

Tabelle 3: Aufnahmeparameter am Schiefen Turm von Bad Frankenhausen

Kamera:	Sony Alpha 7R Objektiv: 35 mm Festbrennweite (effektiv: 36,4 mm) Verschlusszeit: 1/800 s Blende: 6.3 Fokus: manuell, Feld
Aufnahmemodus:	manuell, GPS-gestützt im Teameinsatz
Aufnahmeabstand:	ca. 10 m (annähernd konstant)
Aufnahmezeit:	17.00 – 19.00 Uhr
Aufnahmedauer:	ca. 60 min (4 Flüge für die vertikalen und 1 Flug für die senkrechten Aufnahmen)
Wetterbedingungen:	sonnig, leichter Wind mit leichten Böen (Windstärke 2)

## Ergebnisse

Für die vollständige lückenlose Aufnahme des Turmes wurden insgesamt 525 Bilder aufgenommen, die für die Generierung der 3D-Punktwolke genutzt wurden. Auf die vertikalen Achsen entfielen jeweils ca. 50 Bilder und für die Aufnahme von oben ebenfalls 50 Bilder. 75 Bilder wurden zusätzlich von Bereichen erzeugt, die aufgrund von angrenzendem Bewuchs oder durch die aufgehenden Mauern des ehemaligen Kirchschiffes nicht direkt auf dem geplanten Flugpfad erreichbar waren. Solche abgeschatteten Bereiche wurden abgesetzt vom geplanten Flugpfad von rechts und links aufgenommen. Abbildung 51 zeigt die errechneten Kamera-/Aufnahmepositionen am Bauwerk in der Ansicht und Draufsicht.

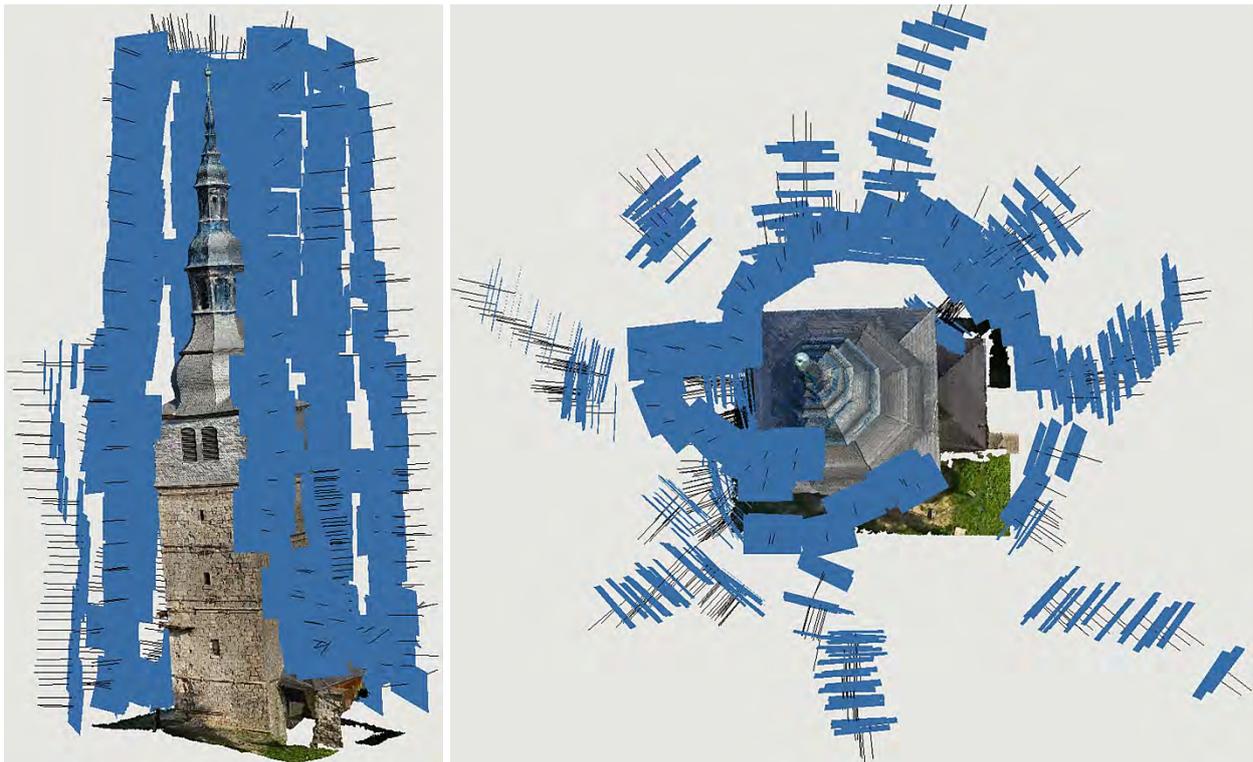


Abbildung 51: Rekonstruierte (errechnete) Kamerapositionen am Schiefen Turm von Bad Frankenhausen

Aus den 525 Bildern wurde mit Unterstützung einer kommerziellen Structure-from-Motion Software (SfM-Software) eine 3D-Punktwolke des Bauwerks erzeugt. Ein kurzer Einblick in die Methoden und Verfahren zur Erzeugung von 3D-Geometrien aus Bildern wird im nächsten Abschnitt gegeben. Die Georeferenzierung der 3D-Punktwolke erfolgte über 14 tachymetrisch eingemessene Passpunkte am Bauwerk. Aufgrund der kurzen Distanz zum Bauwerk und der sehr guten Auflösung der Kamera konnten bereits für das terrestrische Laserscanning angebrachte sehr kleine Passpunkte (2 x 2cm) zur Georeferenzierung genutzt werden. Die Passpunkte waren über das Mauerwerk des Turmschaftes verteilt. Abbildung 52 zeigt solch einen Passpunkt im Originalbild und bei 100%iger Auflösung.



Abbildung 52: Verwendeter Passpunkt am Bauwerk, links: Originalaufnahme, Mitte: Bildausschnitt 100% Auflösung, rechts: max. Zoombereich

Jeder der eingemessenen Passpunkte war in mindestens 21 Bildern zu erkennen. Die Bestimmung/ Zuordnung der Passpunkte in den Bildern erfolgte manuell. Der durchschnittliche Fehler bei der Bestimmung der Passpunkte in den Bildern lag bei 2,66mm. Aus den Bildern wurde zunächst eine dünne 3D-Punktwolke des Turms mit ca. 7 Millionen Punkten erzeugt. Die extrem hohe Auflösung von 36 Megapixeln und die hohe Qualität der Bilder erlaubte die Rekonstruktion des Turmes in einer dichten 3D-Punktwolke mit einer enorm hohen Punktdichte. Die Bildauflösung am Bauwerk beträgt durchschnittlich 1,34 mm/Pixel. Die dichte Punktwolke verfügt über ca. 310 Millionen georeferenzierter Punkte mit einer Auflösung von 2,68 mm/Pixel. An die einzelnen 3D-Punkte werden zudem die RGB-Farbinformationen der digitalen Bilder übergeben, sodass eine nahezu farbgetreue 3D-Punktwolke entsteht. Aus der 3D-Punktwolke wurde durch Verbinden der einzelnen Punkte (Dreiecksvermaschung) ein Polygonnetz aus ca. 62 Millionen Polygonen (Dreiecken) erzeugt. Dadurch entsteht eine geschlossene Oberfläche, ein Oberflächenmodell des Turmes. Die einzelnen Polygone erhalten die interpolierten Farbwerte aus den zugehörigen Punkten, sodass diese Oberfläche auch farbcodiert dargestellt werden kann. Abbildung 53 zeigt einen Ausschnitt der Westansicht des Turms in drei Stufen der 3D-Modellierung (dünne Punktwolke, dichten Punktwolke und das farbcodierte Oberflächenmodell).

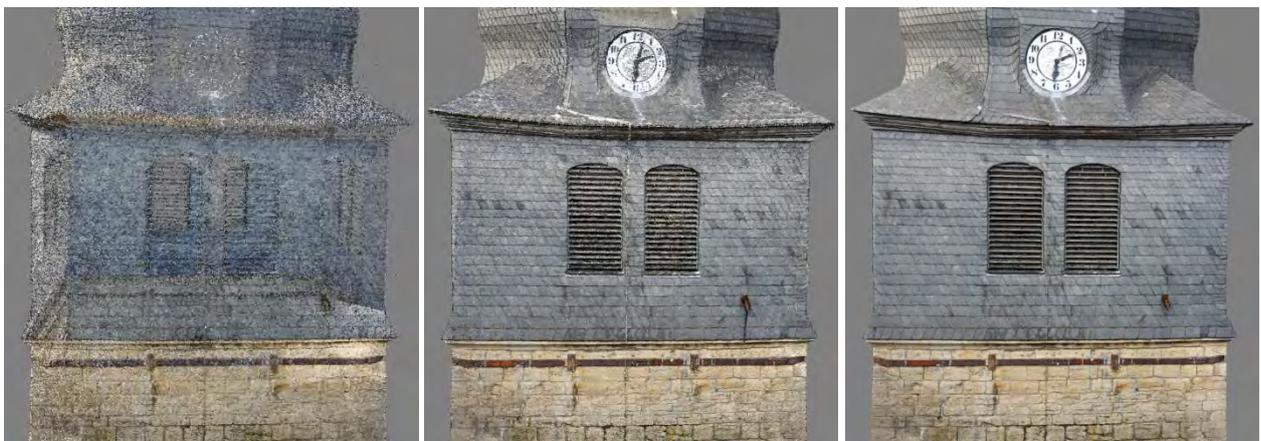


Abbildung 53: Ausschnitt aus dem 3D-Modell des Schiefen Turmes von Bad Frankenhausen, Ansicht West, links: dünne Punktwolke (7 Mio. Punkte), mitte: dichte Punktwolke (310 Mio. Punkte), rechts: farbcodiertes Polygonnetz (62 Mio. Polygone)

Aufgrund der äußerst hohen Punktdichte und des dadurch sehr engmaschigen Polygonnetzes kann die Oberfläche des Turmes in einem Detailgrad modelliert werden,

dass selbst kleinste Details erkennbar sind. Strukturierte Steinoberflächen, Unebenheiten, Fugen aber auch Unregelmäßigkeiten wie Abplatzungen werden dadurch sichtbar. Die nachfolgende Abbildung 54 zeigt einen Detailausschnitt einer stark geschädigten Mauerwerksecke auf der Südwestseite in den einzelnen Rekonstruktionsstufen von der dünnen Punktwolke bis zur farblichen 3D-Modell. Zum Vergleich wurde unten rechts ein Originalfoto der geschädigten Mauerwerksecke eingefügt.

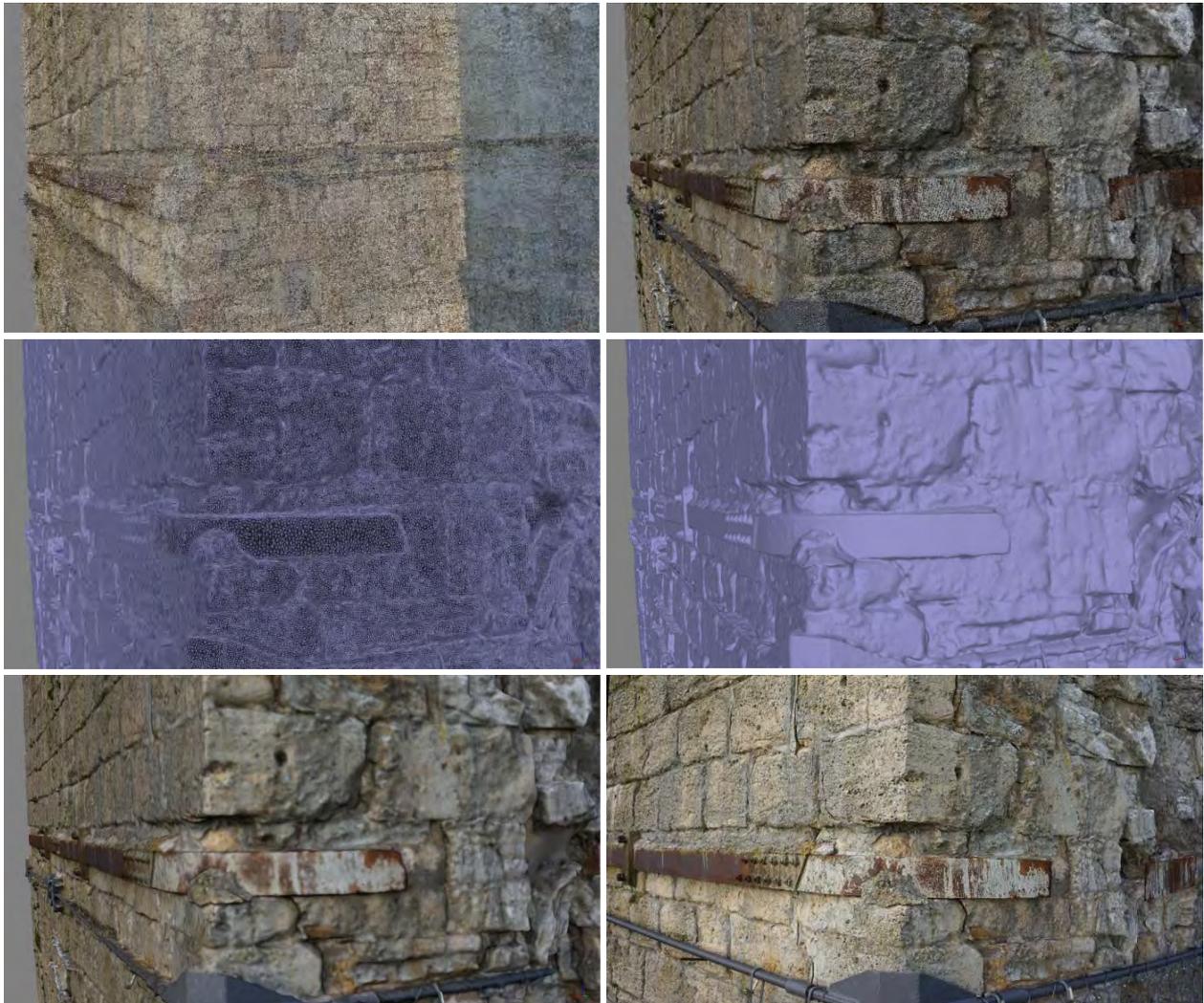


Abbildung 54: Geschädigte Mauerwerksecke Südwestansicht, oben links: dünne Punktwolke, oben rechts: dichte Punktwolke, mitte links: Polygonnetz, mitte rechts: einfarbiges Polygonnetz, unten links: farbcodiertes Polygonnetz, unten rechts: Originalbild

Aus dem georeferenzierten 3D-Modell des Schiefen Turms können für die Zustandsermittlung und die Überwachung des Bauwerkszustandes geometrische Daten/ Angaben des Bauwerks sehr genau ermittelt werden. Bauwerksmaße, wie auch die Schiefstellung und Verformungen des Bauwerks werden direkt aus der 3D-Punktwolke entnommen. Abbildung 55 links zeigt vereinfacht die Ermittlung der Neigung des Bauwerks. Zum Vergleich wurde die Messung des im Turmschaft installierten Pendellotes herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass die Turmhaube ebenfalls eine Schiefstellung entgegen der eigentlichen Neigungsrichtung aufweist. Im Bauwerksmodell ist deutlich zu erkennen, dass der Turm sich nicht exakt in Richtung Westen neigt, sondern auch in Richtung Nordwest und zudem noch eine Verdrehung in

sich aufweist. Solche geometrischen Besonderheiten können sehr genau und zuverlässig ermittelt werden.

Abbildung 55 rechts zeigt ein aus den georeferenzierten Punkten erstelltes farblich codiertes Digitales Höhenmodell (Digital Elevation Model – DEM) des Turmes, aus dem die genaue Höhe des Turmes bestimmt werden kann.

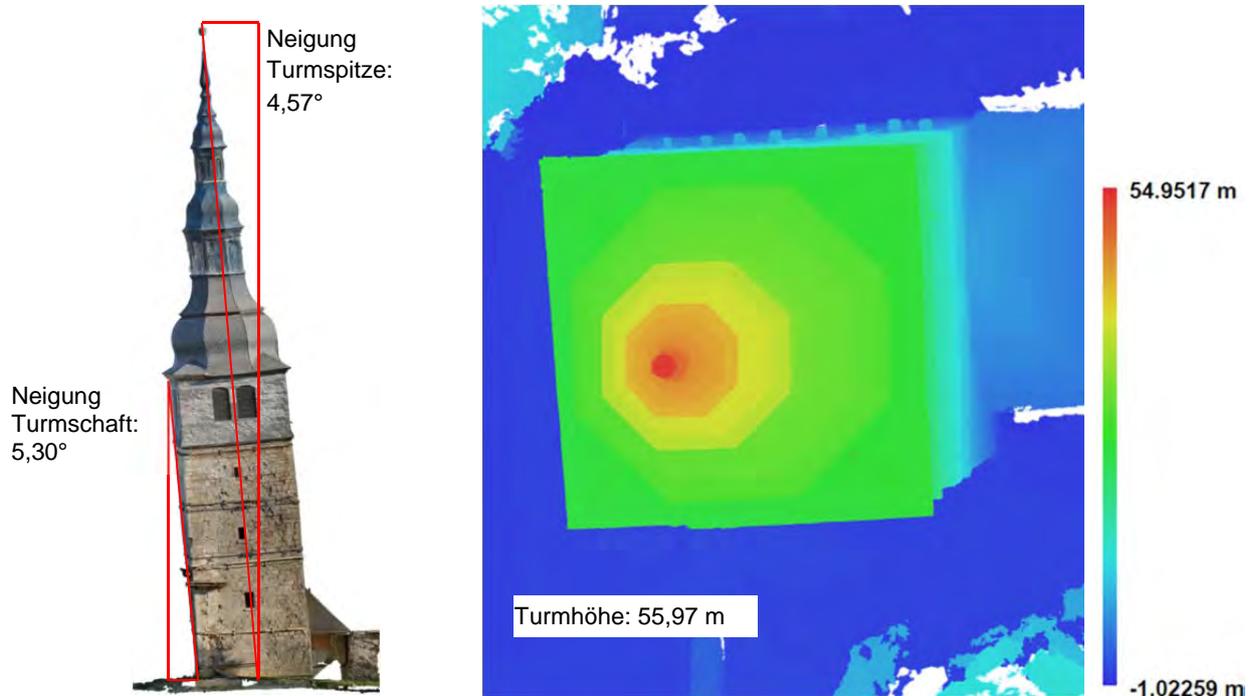


Abbildung 55: Darstellung der Ermittlung der Bauwerksneigung aus der Orthophotoansicht und der Bauwerkshöhe aus dem Digitalen Höhenmodell

Ein weiterer Vorteil der Luftbildbasierten Aufnahme von Bauwerken ist die Möglichkeit der Erstellung hochauflöser Orthophotos des Gesamtbauwerks oder von Bauwerksteilen. Für die Erstellung der Orthophotos werden die einzelnen Bilder des Bauwerks genutzt und auf Basis der 3D-Geometrie zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Die erstellten Orthophotos verfügen über einen solch hohen Detailgrad, dass diese Gesamtaufnahmen auch zur Schadensermittlung und Kartierung genutzt werden können. Abbildung 56 zeigt die hochauflösten Orthophotos der Nord-Ost-, Süd- und Westansicht des Turms. Gut zu erkennen, sind die unterschiedlichen Lichtverhältnisse bei der Aufnahme. In der Nordansicht sind die ungünstigen Schattenbildungen am Bauwerk aufgrund des schräg einfallenden Sonnenlichtes gut erkennbar. Das sehr dunkle Orthophotos der Ostansicht spiegelt die schlechten Lichtverhältnisse bei der Aufnahme wieder. Die Bauwerksansicht West dagegen ist aufgrund des senkrecht einfallenden Sonnenlichtes sehr stark ausgeleuchtet.



Abbildung 56: Orthophotos des Schiefen Turms von Bad Frankenhausen, von links nach rechts: Ansicht Nord, Ost, Süd und West

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der UAS-basierten Aufnahme und der georeferenzierten 3D-Modellierung des Schiefen Turms zusammengefasst.

Tabelle 4: Zusammenfassung Ergebnisse der UAS-basierten Aufnahme und 3D-Modellierung des Schiefen Turms von Bad Frankenhausen

Bildanzahl:	525 (im JPG-Format, Datenvolumen: 14 GB)
Verzeichnung der Bilder:	< 87Pixel
Bildauflösung:	1,34 mm/Pixel
3D-Auflösung:	2,68 mm/ Pixel
Bildfehler.	Ø 0,51 Pixel
Anzahl Passpunkte:	14 (georeferenziert)
Passpunktfehler:	Ø 2,66 mm

Weitere Informationen zur Durchführung der Aufnahme, Vermessung und 3D-Rekonstruktion des Schiefen Turms von Bad Frankenhausen unter:

<https://www.youtube.com/watch?v=aNq-9xyzXhE>

## Luftbilder zur Vervollständigung von terrestrischen 3D-Laserscans

Im Zuge der Untersuchungen am Schiefen Turm von Bad Frankenhausen wurde die Weiterverwendung der aus den Luftbildern erzeugten 3D-Bauwerksdaten zur Vervollständigung von Laserscan-basierten 3D-Punktwolken untersucht. Dazu wurde der Schiefe Turm in einer sehr aufwendigen Messkampagne (am Vortag der Befliegung) mit einem 3D-Laserscanner aufgenommen. Um den Turm möglichst vollständige aufnehmen zu können, war eine Vielzahl von Aufstellpunkten notwendig. Die beengten Platzverhältnisse am Schiefen Turm führten dazu, dass vor allem die oberen Turmbereiche und Dachbereiche nur sehr schlecht oder gar nicht aufgenommen werden konnten. Dies stellt einen der größten Nachteile der Laserscantechnik dar. Abgeschattete Bereiche die vom Boden aus nicht einsehbar sind, können mit dieser Technik nicht oder nur mit sehr großem zusätzlichem Aufwand aufgenommen werden. An dieser Stelle können zukünftig UAS zur Bilddatengenerierung für die Erstellung von 3D-Punktwolken für die Vervollständigung vorhandener Punktwolken eingesetzt werden. Exemplarisch wurde hierfür die vom Schiefen Turm erzeugte Punktwolke auf den Bereich des Turmhelmes begrenzt. Anschließend wurden die beiden georeferenzierten Punktwolken zusammengefügt. Abbildung 57 zeigt die separierte Punktwolke des Turmhelmes aus der Luftbild-basierten 3D-Rekonstruktion und die Kombination mit der ebenfalls georeferenzierten Laserscan-basierten 3D-Punktwolke.

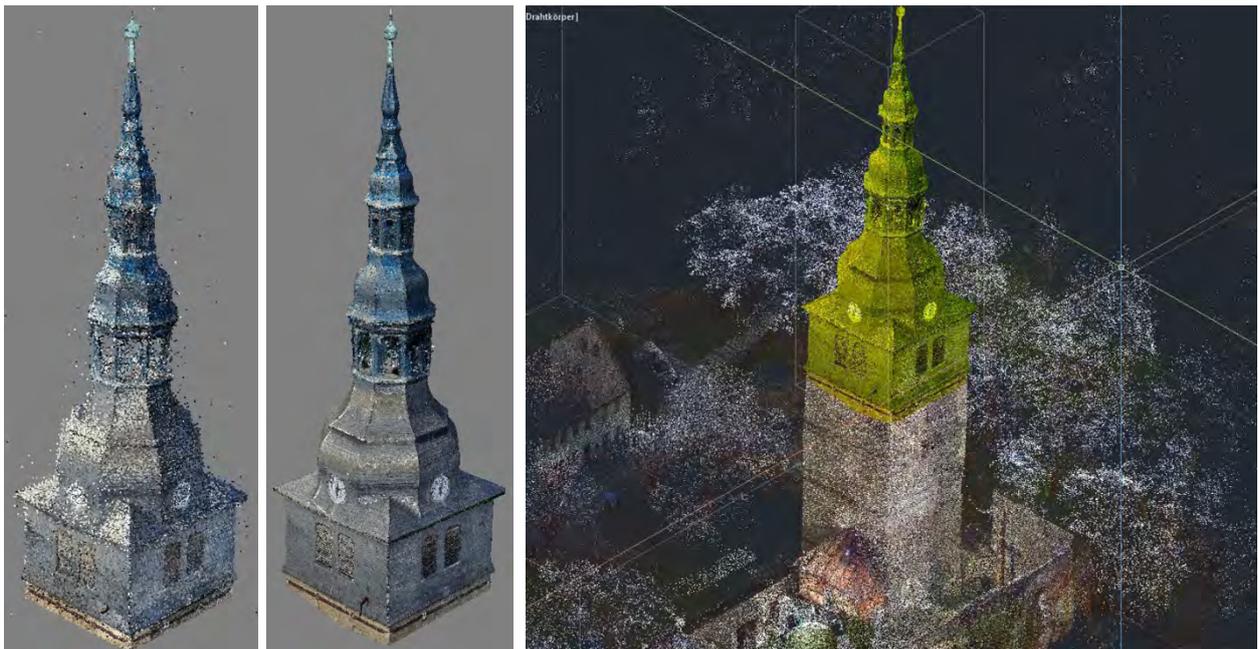


Abbildung 57: Vervollständigung Laserscan-basierte 3D-Punktwolke, links: Luftbild-basierte dünne Punktwolke des Turmhelms, Mitte: Luftbild-basierte dichte Punktwolke des Turmhelms, rechts: Kombination der georeferenzierten Punktwolken (farblich abgesetzt die Luftbild-basierte 3D-Punktwolke des Turmhelms)

Ein weiterer Vorteil der UAS-basierten Aufnahme des Turms gegenüber dem Laserscan sind die hochaufgelösten Bilder. Diese können für eine annähernd farbgetreue 3D-Generierung der Punktwolke und zudem für die Texturierung des vermaschten 3D-Modells genutzt werden. Die Kombination dieser beiden Aufnahmemethoden kann bei gewissen Einsätzen bzw. Anwendungsfällen zu einer deutlichen Vereinfachung und zugleich Qualitätssteigerung der Bauwerksaufnahme führen.

## **Handlungsempfehlungen – „Lessons learned“**

Die Untersuchungen am Schiefen Turm in Bad Frankenhausen haben gezeigt, dass Unbemannte Fluggeräte zur Aufnahme turmartiger Bauwerke äußerst effizient eingesetzt werden können. Die erzeugten Bilddaten können bei Verwendung entsprechend qualitativ hochwertiger Fluggeräte- und Kameratechnik sowie geeigneten Aufnahme-/ Kameraparametern zur visuellen Zustandsermittlung/ Schadenerfassung, Dokumentation und gleichzeitig zur geometrischen Zustandserfassung sowie Überwachung des Bauwerks durch eine georeferenzierte/ maßstabsgerechte 3D-Rekonstruktion genutzt werden. Die Mobilität der Fluggeräte erlaubt eine vollständige Aufnahme des Bauwerkes aus nahezu jeder Richtung/ Perspektive, sodass auch vom Boden nicht sichtbare/ abgeschattete Bereiche aufgenommen werden können und somit eine lückenlose visuelle und geometrische Erfassung des Bauwerks möglich ist. Darüber hinaus können diese Systeme aufgrund des äußerst geringen Aufwandes bei der Einsatzvorbereitung zeitlich so flexibel eingesetzt werden, dass kurzfristige wetterorientierte Einsätze möglich sind. Auf herkömmliche Zugangsmittel wie Gerüste oder Kräne kann für eine luftbildbasierte visuelle und geometrische Zustandserfassung verzichtet werden.

Bei den praktischen Untersuchungen, sowie bei der späteren photogrammetrischen Auswertung der Bilddaten ergaben sich aber auch einige Schwierigkeiten, die auf Fehler bei der Aufnahme/ Bilddatengenerierung am Bauwerk zurückzuführen sind. Durch eine sorgfältige Flug- und Einsatzplanung können solche Fehler und zusätzliche Aufwendungen vermieden werden.

Bei der Erzeugung der 3D-Punktwolke ergaben sich trotz der hohen Anzahl an Bildern und Überlappung der Bilder zueinander Probleme bei der Bestimmung und Ausrichtung der Kamerapositionen sowie bei der Erzeugung der 3D-Punktwolke. Es ergaben sich Lücken in der 3D-Punktwolke, die darauf zurückzuführen sind, dass zusammengehörende Bildpaare bzw. Abschnitte am Bauwerk nicht zusammengefügt werden konnten. Dies fiel vor allem an den Stellen am Bauwerk auf, wo senkrecht aufeinander stehende Flächen, also die Seitenansichten des Mauerwerkes aufeinander trafen. Um diese Bilder und Flächen zusammenzufügen, wurden die Aufnahmen über Eck genutzt. Doch aufgrund der hohen Winkeldifferenzen von ca.  $45^\circ$  zwischen den Bildebenen der Mauerwerksansichten und der Aufnahmen über Eck konnten nur sehr wenige interessante/ identische Punkte in den Bildern ermittelt werden, was zu einem Informationsverlust und somit zu Fehlern in der 3D-Rekonstruktion der Punktwolke führte. Über zusätzliche manuell gesetzte Passpunkte (48 Stück!) in den Bildern konnte diese Fehlinformationen vollständig behoben werden, jedoch mit einem sehr hohen zeitlichen Aufwand. Um solche aufwendigen Nachbearbeitungen zu vermeiden, ist eine zusätzliche Anordnung von weiteren vier vertikalen Aufnahmestreifen zu empfehlen. Die Aufnahmen über Eck sollten so verteilt werden, dass die Winkeldifferenzen zwischen den Bildebenen bei maximal  $30^\circ$  liegen. Weiterhin wird empfohlen, die Dachbereiche des Turmes mit Schrägaufnahmen unter entsprechenden Kamerawinkeln aufzunehmen. Weitere Tests zu diesem Sachverhalt haben gezeigt, dass mit Hilfe von Übersichtsaufnahmen vom Bauwerk aus größerer Distanz die Zuordnung der Bilder und die Ermittlung der Kamerapositionen erleichtert werden kann. Diese

Übersichtsaufnahmen sind jedoch nicht für die Erzeugung der georeferenzierten dichten 3D-Punktwolke zu nutzen. Abbildung 58 zeigt die empfohlene Aufnahme eines turmartigen Bauwerkes am Beispiel einer quadratischen Grundfläche.

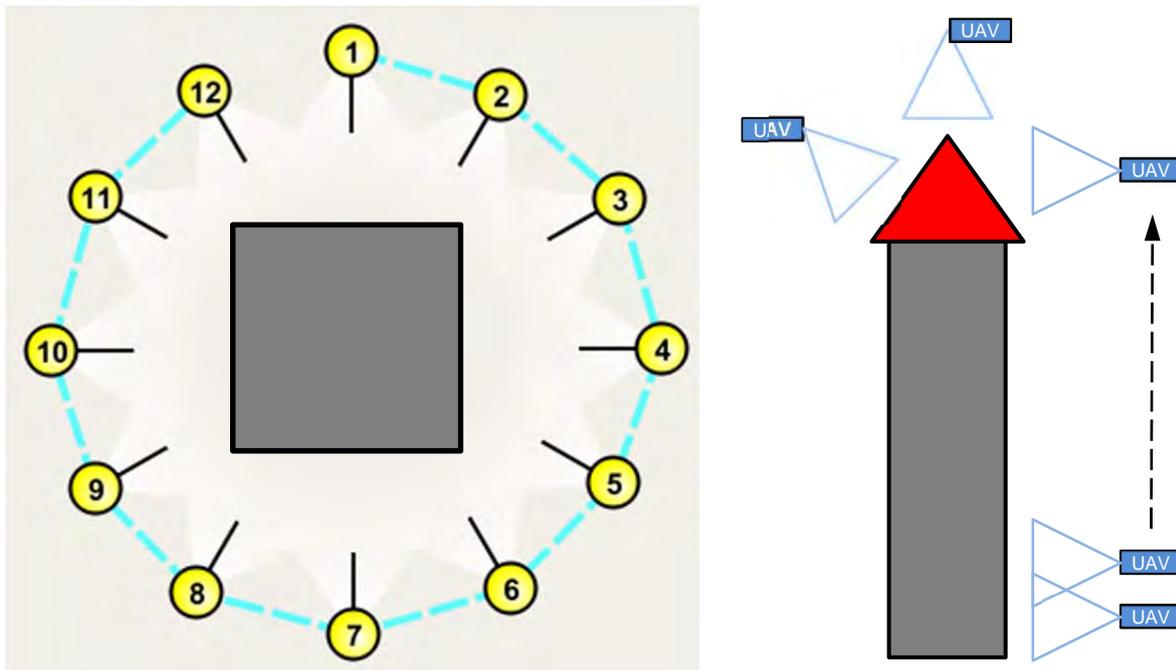


Abbildung 58: Schematische Darstellung der empfohlenen Aufnahmestrategie bei turmartigen Bauwerken

Weitere Hinweise zur Aufnahme:

- Aufnahmen senkrecht zur Aufnahmefläche
- Aufnahmen in vertikalen Streifen von unten nach oben
- Aufnahmen mit konstantem Abstand zur Aufnahmefläche
- Aufnahmen der Eckbereiche über mind. 2 vertikale Streifen
- konstante Kameraeinstellung (insbesondere fester Fokus abgestimmt auf den Abstand zum Objekt)
- Übersichtsaufnahmen aus größerer Entfernung (seitlich, von oben, Schrägaufnahmen von oben und unten)
- Aufnahme bei konstanten Lichtverhältnissen (bedeckter Himmel)
- Gegenlicht und starke Sonneneinstrahlung vermeiden
- Aufnahmen mit ausreichender Überlappung (mind. 60%)

## 7.2.2 Untersuchungen am Referenzobjekt Stützwand – Automatische Datengenerierung

Das für die Untersuchung der GPS-gestützten automatischen Datengenerierung ausgewählte Referenzobjekt ist eine sehr große bogenförmige zweistufige Stützwand, die im Zuge des Neubaus der BAB 4 bei Jena (Jagdbergtunnel bei Bucha) im September 2014 fertiggestellt wurde. Erste Tests und Versuche an einem 180m langen Teilabschnitt der Stützwand wurden bereits Mitte 2013 während der Bauphase durchgeführt. Die vollständige UAS-basierte Aufnahme der Stützwand erfolgte nach Fertigstellung des Bauwerks im September 2014. Die Abbildung 59 zeigt eine Luftbildaufnahme der gesamten Stützwand von Norden nach der Fertigstellung.



Abbildung 59: Referenzbauwerk Stützwand entlang der BAB 4 bei Bucha (Jena), Westportal Jagdberg-Tunnel, Thüringen

### Problemstellung – Bauwerksdaten

Dieses Stützbauwerk ist gemäß DIN 1076 „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung“ [13] als Ingenieurbauwerk definiert und unterliegt demnach auch der regelmäßigen Prüfung und Überwachung gemäß DIN 1076. Dabei ist das Bauwerk hinsichtlich der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit in regelmäßigen Abständen zu prüfen. Eine Hauptprüfung solch eines Ingenieurbauwerkes ist alle sechs Jahre und dazu „handnah“ durchzuführen. Aufgrund der immensen Größe dieses Bauwerkes ist eine Hauptprüfung, die von speziell ausgebildeten Prüfsachverständigen durchgeführt wird, zeitlich und technisch sehr aufwändig und ohne messtechnische Hilfsmittel kaum realisierbar. Dabei lässt eine Sichtprüfung bzw. eine handnahe Prüfung kaum Rückschlüsse auf mögliche geometrische Veränderungen an diesem Bauwerk zu. Die messtechnische Überwachung des Gesamtbauwerkes mit herkömmlichen Verfahren wie z.B. dem Laserscanning ist zwar möglich, aber zeitlich extrem aufwendig und damit kostenintensiv. Eine terrestrische Aufnahme von Bilddaten ist ebenfalls nur bedingt möglich. Diese könnte nur aus kürzester Distanz zum Bauwerk unter Zuhilfenahme von weiteren technischen Hilfsmitteln erfolgen und würde aufgrund des kleinen Bildausschnittes zu einer Unmenge an Bilddaten führen. Die Aufnahme von der gegenüberliegenden Seite ist auch nur sehr eingeschränkt möglich, da durch die unterschiedlichen Geländehöhen abgeschattete Bereiche am Bauwerk entstehen. Ein senkrechter Blickwinkel auf das

Bauwerk wäre zudem auch nicht gegeben. Die tachymetrische Überwachung einzelner Messpunkte auf dem Bauwerk wird als nicht zielführend angesehen, da hiermit nur einzelne Punkte auf dem Bauwerk erfasst werden können. Eine flächendeckende Erfassung ist damit nicht möglich.

Ziel der Untersuchung an diesem Bauwerk war die vollautomatische UAS-basierte Bilddatenaufnahme zur photogrammetrischen Auswertung und georeferenzierten 3D-Rekonstruktion des Bauwerkes als Basis („Soll-/ Nullmessung“) für eine kontinuierliche geometrische Zustands-/ Deformationsüberwachung. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Reproduzierbarkeit der Aufnahmen und Ergebnisse gelegt, um über geometrische Vergleiche der 3D-Geometrien Veränderungen am Bauwerk erkennen zu können.

Deformationen oder in schlimmsten Fall der Kollaps solcher Stützbauwerke können verschiedene Ursachen haben und kündigen sich meist aber über sehr kleine, stetig wachsende Verformungen über lange Zeiträume an. Durch Veränderungen im Baugrund, der Gründung oder auch bei der Rückverankerung der Stützwand im Hang, können Verschiebungen/ Verformungen über das Gesamtbauwerk (global) entstehen sowie in einzelnen Bereichen (lokal).

Bei diesem Stützbauwerk handelt es sich um eine zweischalige Stützwand, bestehend aus einer rückverankerten Spritzbetonschale (Spannbetonanker) und einem vorgesetzten Zyklopenmauerwerk aus großformatigen Granitblöcken. Die Abbildung 60 zeigt die Stützwand in der Bauphase und einen Querschnitt der unteren Teilwand.



Abbildung 60: Stützwand, links: Rückverankerte Spritzbetonschale mit vorgesetzten Zyklopenmauerwerk, rechts: Querschnitt der unteren Teilwand

Die untersuchte Stützwand ist ca. 615 m lang, 18 m hoch (untere Teilwand ca. 12 m, obere Teilwand ca. 6 m) und hat eine Neigung von 70°. Die Stützwand liegt auf einer Kreisbahn und verläuft parallel zur Hauptachse der BAB 4 auf einer von West nach Ost abfallenden Gradienten. In der nachfolgenden Tabelle sind die Bauwerksdaten zusammengefasst.

Tabelle 5: Bauwerksdaten Stützwand

Lage:	Bucha (Thüringen), BAB4, Westportal Jagdbergtunnel Südhang Richtungsfahrbahn Eisenach-Dresden
Bauweise:	Rückverankerte Spritzbetonschale mit vorgesetzter Futtermauer aus Zyklopenmauerwerk (Granit)
Länge:	ca. 615 m
Höhe:	ca. 18 m (2 Ebenen getrennt durch einen befahrbaren Wartungsweg, untere Stützwand 12 m, obere Stützwand 6 m)
Fläche:	ca. 12.000m <sup>2</sup>
Neigung:	70°
Gradiente:	Gradiente der Stützwand orientiert sich an der Gradiente der Hauptachse der BAB4 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kreisbogen R = 1600 m</li> <li>- Neigung über die Gesamtlänge ca. 21,5 m (abfallend von West nach Ost)</li> </ul>

### Voruntersuchungen/ Machbarkeitsstudie

Vor der Aufnahme des gesamten Bauwerks wurde die praktische Umsetzbarkeit an einem Teilstück der Stützwand intensiv getestet. Ein ca. 180 m langes Teilstück der oberen Stützwand wurde dafür in zwei Messkampagnen auf derselben vorprogrammierten GPS-gestützten Flugroute aufgenommen. Dabei wurden zwischen der ersten und zweiten Aufnahme künstliche physikalische/ geometrische Veränderungen am Bauwerk vorgenommen. Aus den beiden Bilddatensätzen wurde jeweils eine georeferenzierte dichte Punktwolke erstellt. Die Georeferenzierung erfolgte über 20 tachymetrisch eingemessene Passpunkte. In einem geometrischen Punktwolkenvergleich wurde die Identifizierbarkeit von den simulierten Deformationen verifiziert.

Für die Aufnahme des Testabschnitts wurde mit Hilfe einer Navigationssoftware eine GPS-gestützte Flugroute auf Basis vorhandener Koordinaten der Hauptachse der BAB 4 vorgeplant. Die Aufnahme des oberen Teilabschnitts erfolgte auf einer Flugroute mit 38 Wegpunkten mit möglichst senkrechtem Blickwinkel zur aufzunehmenden Fläche des Bauwerks. Dabei wurde in jedem Wegpunkt die abfallende Gradiente des Bauwerks sowie die Ausrichtung/ Orientierung des Fluggerätes zur Stützwand auf der Kreisbahn berücksichtigt. Dadurch konnten ein konstanter Abstand zum Bauwerk und möglichst gleich bleibende Bildausschnitte der Stützwand gewährleistet werden. Daraus ergeben sich eine Flughöhe von ca. 25 m und ein Abstand zum Bauwerk von ca. 30 m. Die Abbildung 61 zeigt die Flugroute des Fluggerätes zur Aufnahme des Testabschnittes sowie die geometrischen Parameter und die Positionierung bei der Aufnahme.

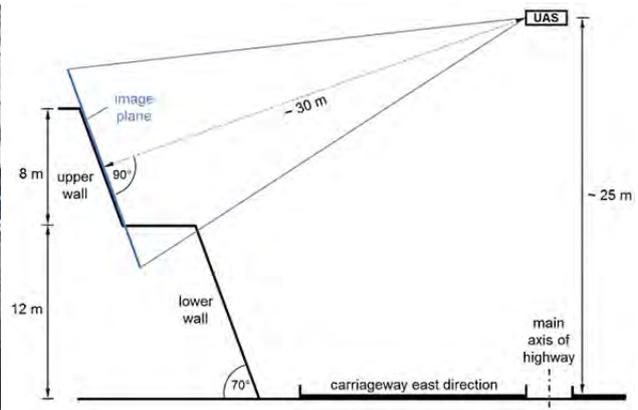


Abbildung 61: GPS-gestützte Flug-/ Aufnahmeroute, Fluggeräte-/ Kameraposition bei der Aufnahme

Für die Aufnahmen wurde eine Sony Nex5 Systemkamera mit einer 30 mm Festbrennweite genutzt. Für alle Aufnahmen wurden die gleichen konstanten Aufnahmeparameter gewählt: Manueller Fokus, Verschlusszeit 1/800 Sek., ISO 200, Blende F/4. Die aufgenommenen Bilder verfügen über eine horizontale Überlappung von ca. 80%. In Tabelle 6 sind alle Aufnahmeparameter zusammengefasst. Die Abbildung 62 zeigt eine Originalaufnahme über die Gesamthöhe der Stützwand.

Tabelle 6: Aufnahmeparameter bei der Aufnahme des Testabschnitts an der Stützwand

Flughöhe	Abstand zum Bauwerk	Anzahl Wegpunkte	Aufnahmezeit	Bilder	
				horizontale Überlappung	Anzahl
25 m	30 m	38	8 Minuten	~ 80%	38

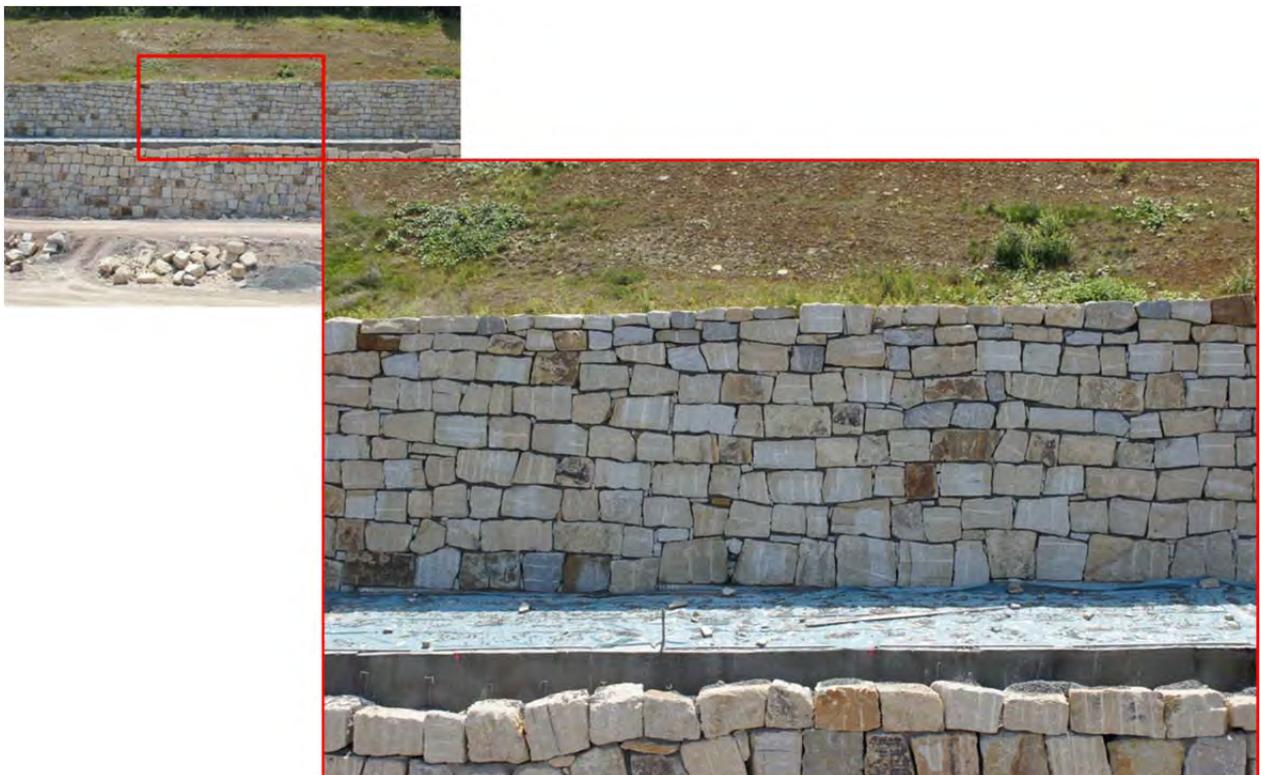


Abbildung 62: Beispielhafte Originalaufnahme des 180 m langen Testabschnitts

Für die UAS-basierte Photogrammetrie werden moderne „Structure-from-Motion“ (SfM) Methoden [31] zur parallelen Abschätzung der einzelnen Kamerapositionen und

der 3D-Struktur eines Objektes aufgrund korrespondierender Bildmerkmale genutzt. Dieser Ansatz erlaubt einen äußerst flexiblen Bildaufnahmeprozess. Jedoch kann die Ermittlung der genauen Kamerapositionen und der 3D-Strukturen sehr rechen- und zeitintensiv sein, wenn besonders viele, unsortierte und qualitativ schlechte Bilder, die Mehrdeutigkeiten aufweisen, verwendet werden. In einem ersten Schritt müssen die entsprechenden Bilder für die 3D-Rekonstruktion ausgewählt werden, typischerweise von Hand. Dabei sind unscharfe, unter- oder überbelichtete Bilder von der weiteren Prozessierung auszuschließen. Die hier gewählte Aufnahmestrategie an der Stützwand reduziert die erforderliche Anzahl an Bildern erheblich und ermöglicht Aufnahmen in gleichbleibend guter Qualität mit konstanten Aufnahmeparametern, die zudem schon in der richtigen Reihenfolge (Bildpaarauswahl) angeordnet sind. Für ungeordnete Sammlungen von Bildern können zur richtigen Anordnung der Bilder „Document-Retrieval“ Methoden [32] genutzt werden, die benachbarte Bilder mit ähnlichen Inhalten finden können.

Dazu werden, wie in Abbildung 63 dargestellt, natürliche und besonders auffällige Bildpunkte (Verknüpfungspunkte) automatisch extrahiert, eindeutig beschrieben und korrespondierende Punkte in den anderen Bildern gesucht, um benachbarte sich überlappende Bildpaare herauszufinden.



Abbildung 63: Robuste Extraktion und Zuordnung von auffälligen Bildmerkmalen

Die dafür genutzte skaleninvariante Merkmalstransformation (SIFT) [33] ist extrem stabil und erzeugt eine eindeutige Beschreibung für jeden identifizierten Punkt, basierend auf den Richtungen der Helligkeitsänderungen seiner lokalen Umgebung. Diese Beschreibung wird zur Identifizierung potentieller korrespondierender Bildpunkte verwendet. Ausreißer werden mit Hilfe des RANdom SAmple Consensus (RANSAC) Ansatzes [34] erkannt und eliminiert. Jetzt wird der eigentliche SfM-Algorithmus [HAR04] zur Bestimmung der Kamerapositionen, der Orientierungsparameter und zur Erzeugung einer dünnen 3D-Punktwolke genutzt, siehe Abbildung 64. In dieser Abbildung sind die 38 errechneten Kamerapositionen in der Aufsicht (oben), in der Ansicht (Mitte) und seitlich dargestellt. Die Georeferenzierung der 3D-Geometrie erfolgte über die unten rechts abgebildeten signalisierten Passpunkte, die in der dünnen Punktwolke rot markiert sind.

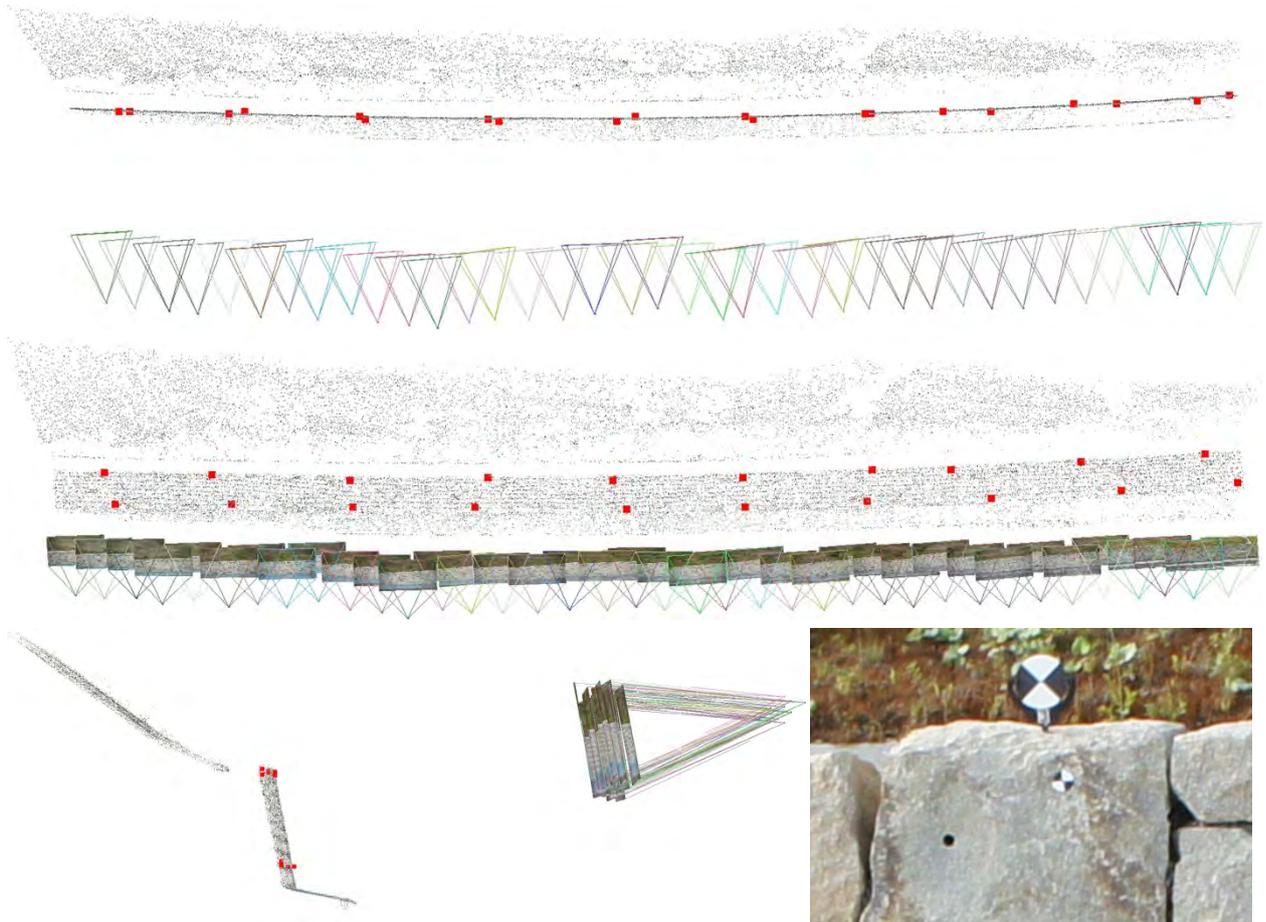


Abbildung 64: 3D-Rekonstruktion mittels Structure-from-Motion, rekonstruierte Kamerapositionen und dünne 3D-Punktwolke mit markierten Passpunkten

Obwohl nicht zwingend erforderlich, wird die Verwendung einer kalibrierten Kamera mit bekannter und konstanter innerer Orientierung empfohlen, sodass man vor und nach jeder Aufnahmeserie eine Kalibrierung aufnehmen sollte. Bei unkalibrierten Kameras werden die Exif Metadaten der Bilder zur näherungsweisen Bestimmung der Brennweite ausgelesen. Alle geschätzten Parameter, inklusive der nicht-linearen Objektivverzerrung, werden mit einer Bündelausgleichung [35] global optimiert, sodass die Rückprojektionsfehler in der gesamten Bildsequenz minimiert werden. Aufgrund der Drifanfälligkeit der sukzessiven Verkettung von benachbarten Bildpaaren, wurden die 20 georeferenzierten Passpunkte über das Bauwerk verteilt angebracht. Darüber hinaus ermöglicht die absolute Orientierung der Rekonstruktion über eine Georeferenzierung die hoch genaue Erfassung von Deformationen zwischen zwei zeitversetzten Messkampagnen.

Für die Erzeugung einer kontinuierlichen und detaillierten Oberfläche ist ein dichter Stereobild-Zuordnungsalgorithmus (Dense Stereo Image Matching) erforderlich. Als erstes werden die optimierten Parameter der inneren Orientierung zur Entfernung der radialen Verzerrung genutzt und Stereonormalbilder erzeugt. Typischerweise werden zum Ausgleich des dichten Oberflächenmodells schnelle Multi-View Stereo Algorithmen [36], [37] genutzt. Unterstützt durch die merkmalsbasierten Teilstücke kann ein Polygonnetz mit entsprechender Textur zur dichten und kontinuierlichen Darstellung der Struktur erzeugt werden.

Die aus den Luftbildaufnahmen der beiden Messkampagnen generierten georeferenzierten 3D-Punktwolken sollten zur Detektierung/ Identifizierung von Verschiebungen und Verformungen am Bauwerk genutzt werden. Die Detektierung erfolgt über eine Differenzanalyse der beiden Punktwolken. Für diesen Versuch wurden zur Simulation der Verschiebungen/ Verformungen verschieden große Dummies auf dem Stützwandabschnitt angebracht und zudem über eine Verschiebung von Passpunkten eine Bewegung eines großflächigen Teilbereiches simuliert, siehe Abbildung 65.

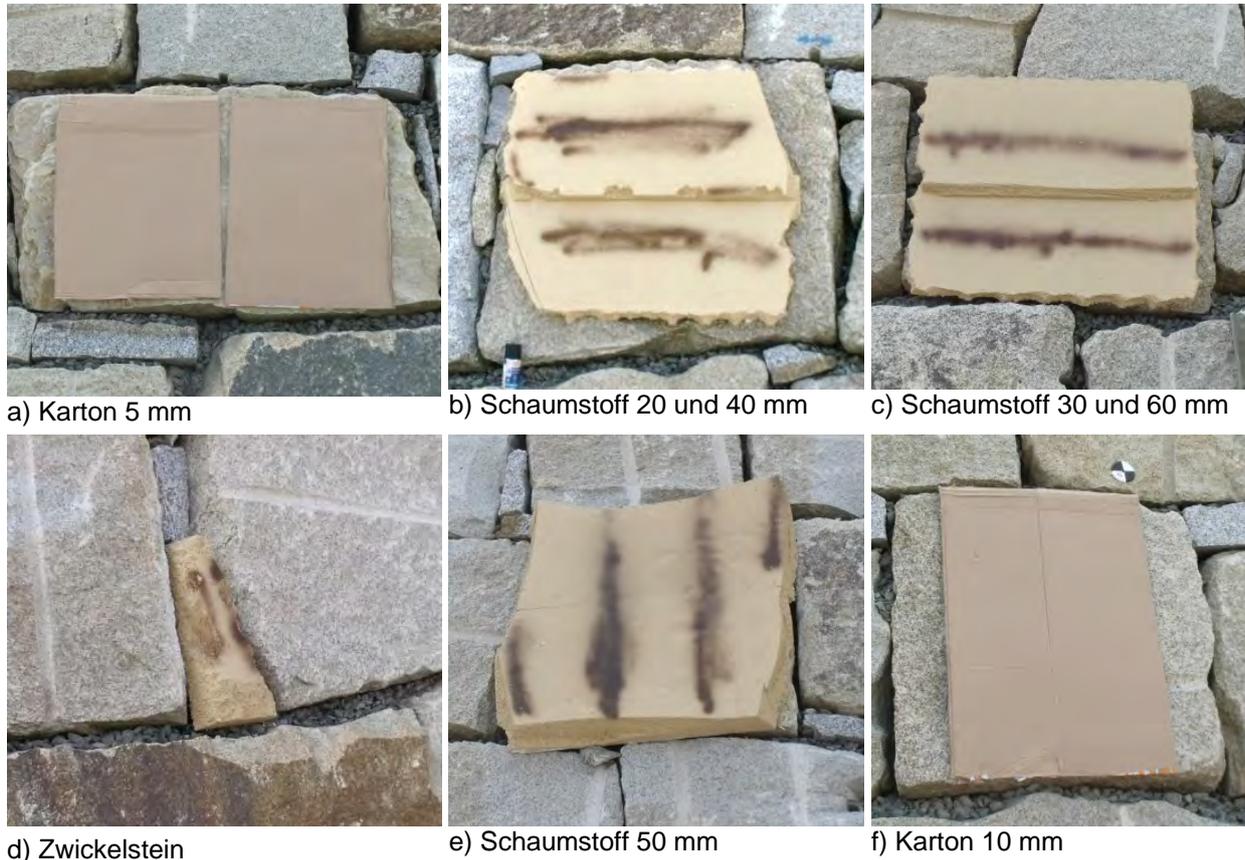


Abbildung 65: Eingebaute Dummies zur Simulation der Verschiebungen/ Verformungen

Vor der ersten Befliegung und Aufnahme wurden für die Simulation von herausfallenden, so genannten „Zwickelsteinen“ Dummies, wie in Abbildung 65, in die Wand eingesetzt. Anschließend wurde die erste Messkampagne (Befliegung/ Luftbildaufnahme) durchgeführt. Für die zweite Messkampagne wurde die Zwickelstein-Dummies entfernt und weitere Dummies aufgebracht, die eine Simulation von Verschiebungen einzelner Granitblöcke horizontal und vertikal in sowie senkrecht zur Stützwandebene simulieren sollten. Danach erfolgte die zweite Messkampagne auf der identischen Flugroute und mit identischen Aufnahmeparametern. Die nachfolgende Abbildung 66 zeigt die beiden von der Perspektive befreiten und zusammengesetzten Orthophotomosaiken des untersuchten Stützwandbereiches, erzeugt aus den 38 Einzelbildern. Die obere Abbildung zeigt die erste Messkampagne und die untere Abbildung die zweite Messkampagne mit den geänderten Dummies.

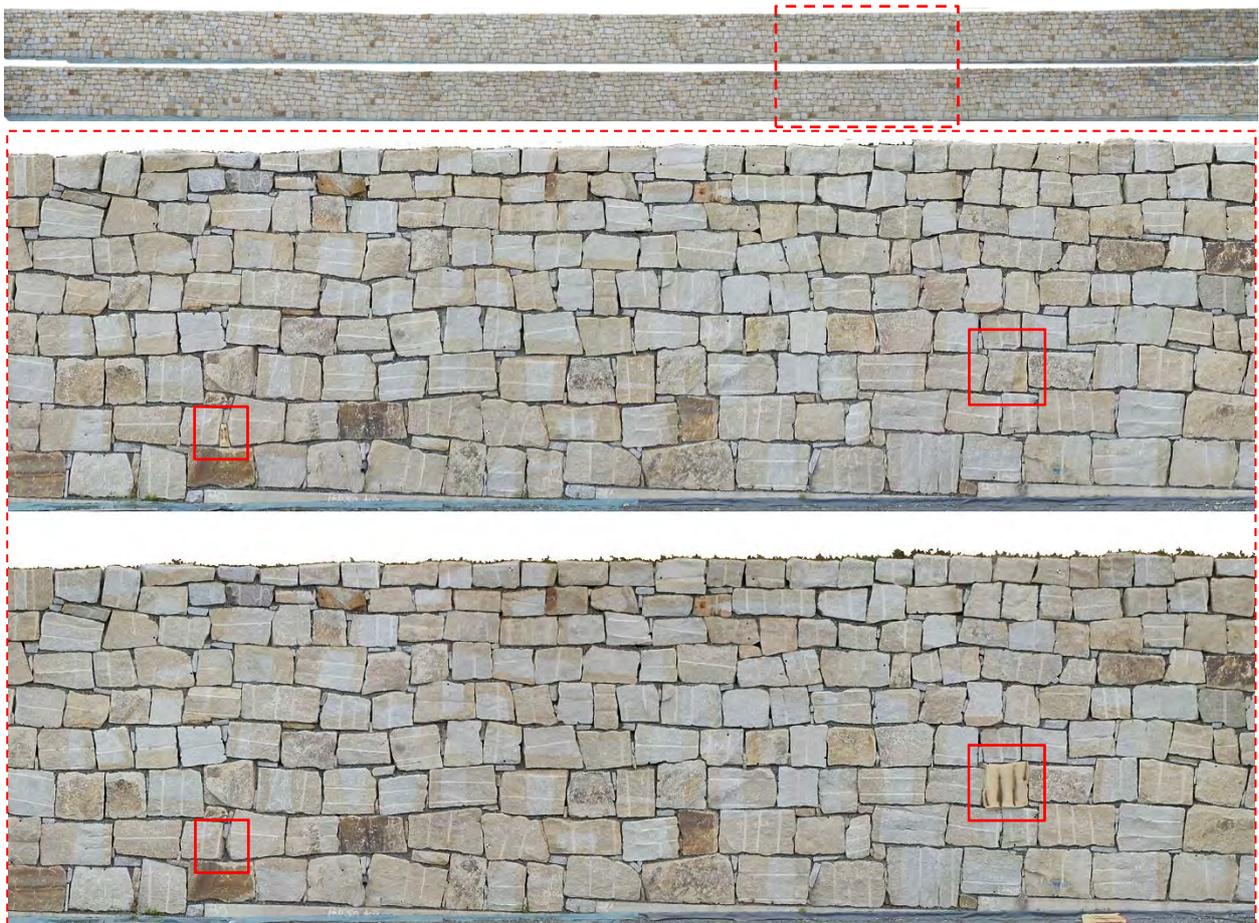


Abbildung 66: Orthophotomosaik des untersuchten Stützwandabschnittes mit veränderten Dummies, oberes Orthophoto: Erste Messkampagne, unteres Orthophoto: Zweite Messkampagne

Für die Berechnung der Kamerapositionen und Rekonstruktion der dünnen 3D-Punktwolke wurde zunächst eine frei verfügbare SfM-Software (VisualSFM [38]) und ein dichter Patch-based Multi-View Stereo Algorithmus (PMVS2) [37] sowie eine verbesserte Version von CMP-MVS [39] genutzt. Dabei gestaltete sich die Anpassung des Bündelausgleichs zur Nutzung der bekannten Passpunkte als sehr schwierig, sodass eine weitere SfM-Software dafür genutzt wurde. Die rekonstruierten Koordinaten der Punktwolke wurden auf die absolute Genauigkeit hin untersucht. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Die Bildgenauigkeit konnte dabei mit einem durchschnittlichen Fehler von 0,24 Pixel bestimmt werden. Nach der globalen Bündelausgleichung, ergab sich eine Lagegenauigkeit von durchschnittlich 3,2 mm für die abgebildeten Passpunkte. Letztendlich besteht die 3D-Rekonstruktion aus mehr als 25.000 Messpunkten pro Quadratmeter, was zu einem vermaschten Modell des untersuchten 180 m langen Abschnittes, mit mehr als 100 Millionen Polygonen führt.

Tabelle 7: Ergebnisse der 3D-Rekonstruktion

Bildfehler	Passpunktfehler	Bildauflösung am Objekt	Positionsgenauigkeit	Tiefengenauigkeit	Anzahl Messpunkte
Ø 0,24 Pixel	Ø 3,2 mm	~ 6,2 mm/Pixel	± 1,3 mm	± 10 mm	39000 × 2700 (>100 Mio.)

Die bei den Messkampagnen erzeugten Punktwolken wurden für einen Punktwolkenvergleich genutzt, über den man die Veränderungen an der Stützwand erkennen kann. Die Berechnung und Analyse der beiden Punktwolken erfolgte mit der

frei verfügbaren Software CloudCompare [40]. Unter Berücksichtigung der erzielten Genauigkeiten bei der Rekonstruktion können alle Differenzen senkrecht zur Stützwandebene (z-Richtung) erkannt werden, die größer als 6 mm sind. Diese Differenzen können zur Visualisierung über eine entsprechend farbcodierte neu berechnete Punktwolke dargestellt werden. In Abbildung 67 sind die identifizierten Verschiebungen/ Verformung an der Stützwand farbcodiert dargestellt. Durch die Georeferenzierung der 3D-Punktwolke können diese Veränderungen zudem exakt am Bauwerk lokalisiert werden.

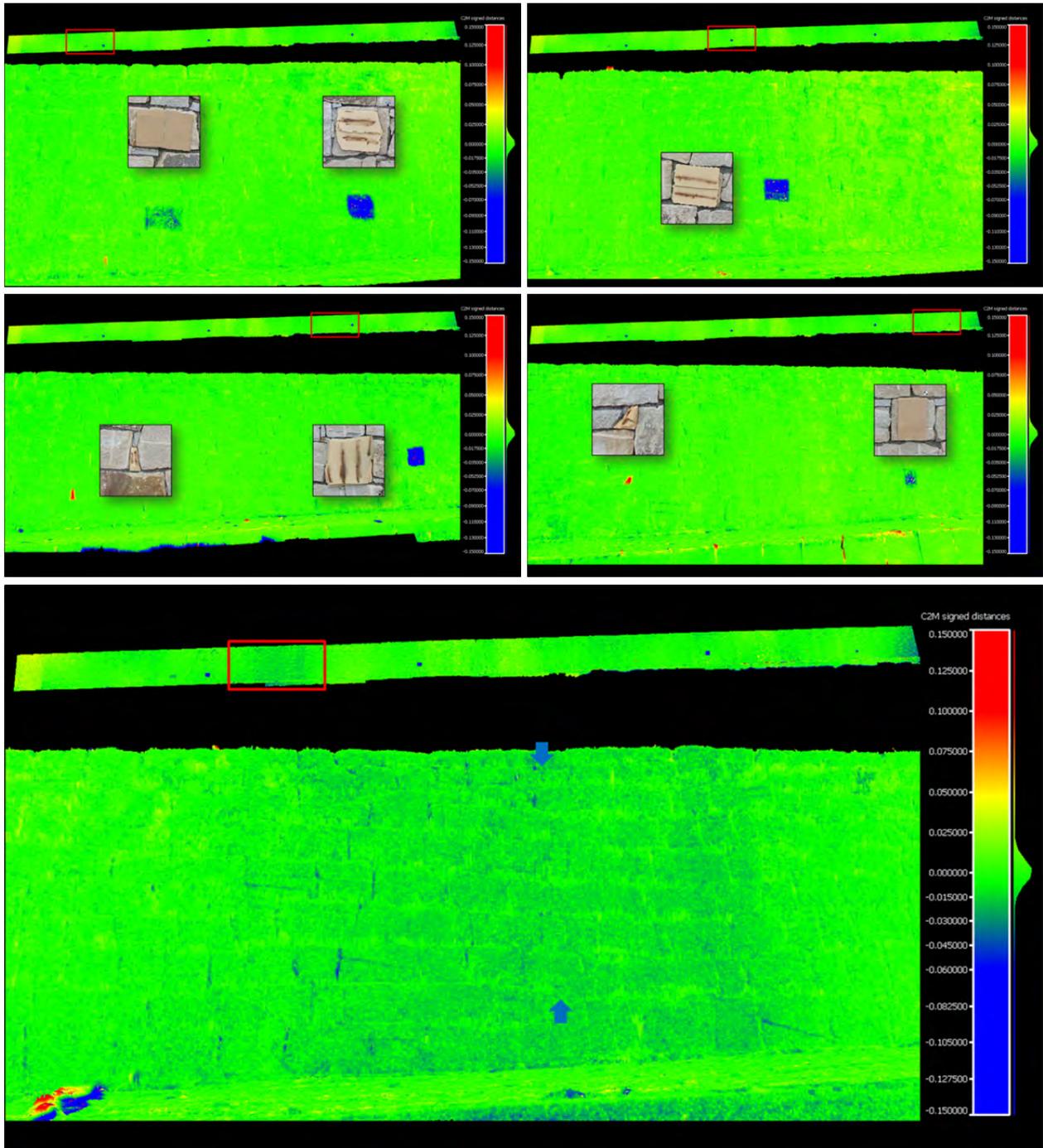


Abbildung 67: Farbcodierte Differenzbilder des Punktwolkenvergleichs, Codierung rot: entfernte Objekte, Codierung blau: aufgebrauchte Objekte

Um den Einfluss/ die Anzahl der gut verteilten georeferenzierten Passpunkte am Objekt zu untersuchen, wurden für die 3D-Rekonstruktion schrittweise Punkte herausgelassen. Selbst bei einer Reduzierung der Anzahl auf nur vier Passpunkte in den äußeren Ecken des betrachteten Bereiches, steigt die Identifizierbarkeit von Veränderungen lediglich von 6 auf 12 mm. Dies ist immer noch ausreichend für eine robuste Detektion von Veränderungen größer als 2cm. In Abbildung 68 sind beispielhaft drei Rekonstruktionen mit unterschiedlicher Anzahl an Passpunkten dargestellt. Die obere Abbildung stellt die hier verwendete kalibrierte Rekonstruktion mit 20 Passpunkten dar (Abweichung ca. 6 mm). Die mittlere Abbildung zeigt die kalibrierte Rekonstruktion mit nur vier Passpunkten (Abweichung ca. 12 mm). In der unteren Abbildung ist die unkalibrierte Rekonstruktion mit vier Passpunkten zu sehen. Bei der letzten Darstellung wird deutlich, welcher Drift bei der Rekonstruktion entstehen kann und welche Bedeutung die Kalibrierung, auf Basis der Aufnahme-/ Kameraparameter für eine zuverlässige Rekonstruktion und Identifizierbarkeit von Veränderungen am Bauwerk hat.

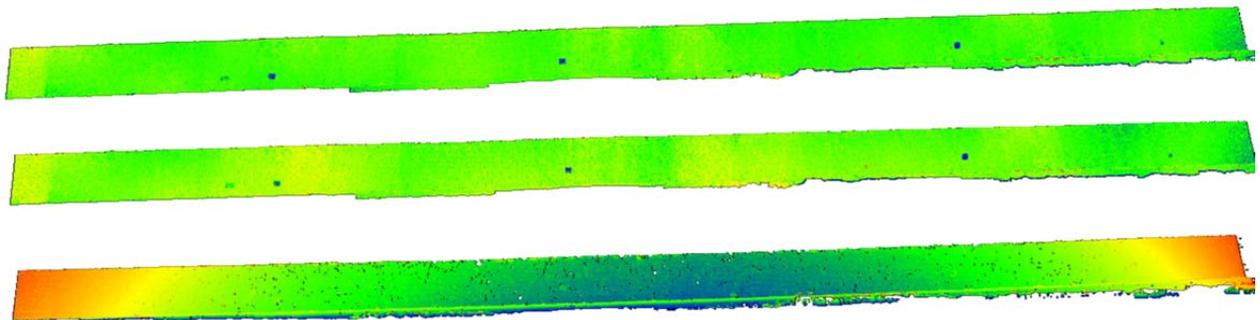


Abbildung 68: Farbcodierte Differenzen zweier Punktwolken mit 20 Passpunkten (oben), 4 Passpunkten (Mitte) und ohne Kalibrierung (unten)

### **Aufnahme des Gesamtbauwerks**

Nach Auswertung der voran vorgestellten Tests erfolgte die Aufnahme des Gesamtbauwerkes mit qualitativ verbesserter Kameratechnik, einer prototypischen Entwicklung eines neuen Kamerahalters (Gimble) sowie einer anwendungsspezifisch angepassten Navigation und Flugsteuerung.

Das Bauwerk entlang der BAB 4, Richtungsfahrbahn Eisenach-Dresden, war nach der Fertigstellung photogrammetrisch mit Hilfe von Unbemannten Fluggeräten (UAS) für eine kontinuierliche Deformationsüberwachung aufzunehmen. Die Luftbildaufnahmen sowie die Flugrouten mit dem UAS sollen für zukünftige Aufnahmen reproduzierbar sein. Aus den Luftbildern ist eine georeferenzierte 3D-Punktwolke des gesamten Bauwerkes zu erstellen, die als Grundlage („Nullmessung“) für zukünftige Punktwolkenvergleiche herangezogen werden kann, um so eine kontinuierliche Deformationsüberwachung des Bauwerkes zu ermöglichen.

Zunächst waren entsprechende Passpunkte zu entwerfen, die auch aus größerer Distanz (<70 m) noch sehr gut erkennbar sein müssen. Da die zukünftigen Aufnahmen in einem ausreichenden Sicherheitsabstand zur Fahrbahn von der gegenüberliegenden Seite erfolgen sollen. Die Passpunkte sind an der Stützwand dauerhaft anzubringen und tachymetrisch (reflektorlos) einzumessen. Die Passpunkte müssen so angebracht

werden, dass diese mit dem Tachymeter unter möglichst guten Aufnahmebedingungen anzielbar und in den Luftbildern eindeutig identifizierbar sind. Dafür sind die Bildaufnahmeparameter zu berücksichtigen. Für alle Passpunkte sind die georeferenzierten Koordinaten zu ermitteln.

Die Aufnahme erfolgt vollautomatisch auf Grundlage einer vorgeplanten GPS-gestützten Flugroute, die sich an der geforderten minimalen Identifizierbarkeit von Verschiebung von 1 cm in jeder Richtung, sowie an der eingemessenen Hauptachse (Gradienten) der BAB 4 im Aufnahmebereich orientiert.

Die Aufnahme der Luftbilder erfolgt im RAW- und JPG-Format. Die RAW-Bilder wurden für die Erzeugung der 3D-Punktwolke qualitätsverbessernd aufbereitet. Die Erzeugung der 3D-Punktwolke sowie die Erstellung des Orthophotos der Stützwand, erfolgt aus den voran genannten Luftbildern mit einer kommerziell verfügbaren SfM-Software. Zur Georeferenzierung der 3D-Punktwolke werden die tachymetrisch eingemessenen Passpunkte verwendet.

### Zielmarken

Für die Georeferenzierung der 3D-Punktwolke wurden insgesamt 39 Zielmarken an der Stützwand angebracht. Die Zielmarken haben eine quadratische Form mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm und sind auf der Vorderseite mit einer hoch witterungsbeständigen Folie mit einem optimalen Layout zur automatischen Lokalisierung versehen. Zielpunkt für die reflektorlose tachymetrische Einmessung ist der Mittelpunkt der Zielmarke (Schnittpunkt weiße und schwarze Quadranten). Jeder Passpunkt ist mit einer entsprechenden Nummer in der rechten unteren Ecke versehen, um diesen eindeutig identifizieren zu können. Form und Gestalt der Zielmarken ist der nachfolgenden Abbildung 69 zu entnehmen.



Abbildung 69: Zielmarke 10 cm x 10 cm (links), Passpunkt 109 an der Stützwand (rechts)

Die Passpunkte wurden möglichst vollflächig, der Neigung der Stützwand folgend und lotrecht in der Ansicht angebracht.

Die Positionen der Passpunkte wurden so gewählt, dass diese in horizontaler und vertikaler Richtung über das gesamte Bauwerk gut verteilt und für das tachymetrische Einmessen sowie für die Luftaufnahmen gut erkennbar sind. Von den insgesamt 39 Zielmarken wurden 32 Zielmarken als Passpunkte (Bezeichnung: 101 – 410) definiert, die auf den Granitblöcken der Stützwand angebracht wurden. Diese Passpunkte sind jeweils am Fuß und am Kopf der oberen und unteren Stützwand positioniert. Sieben der 39 Zielmarken wurden als Fixpunkte (Bezeichnung: F01 – F07) definiert, die als „unverschieblich“ anzusehen sind und zur Georeferenzierung für zukünftige Aufnahmen

herangezogen werden können. Die Fixpunkte sind in direkter Nähe des Tunnelportals, an den Betonfundamenten der Lichtzeichenanlagen sowie an den Betonwänden am Wendekreis auf der oberen Berme angebracht. In Abbildung 70 sind die Positionen der Pass- und Fixpunkte dargestellt.

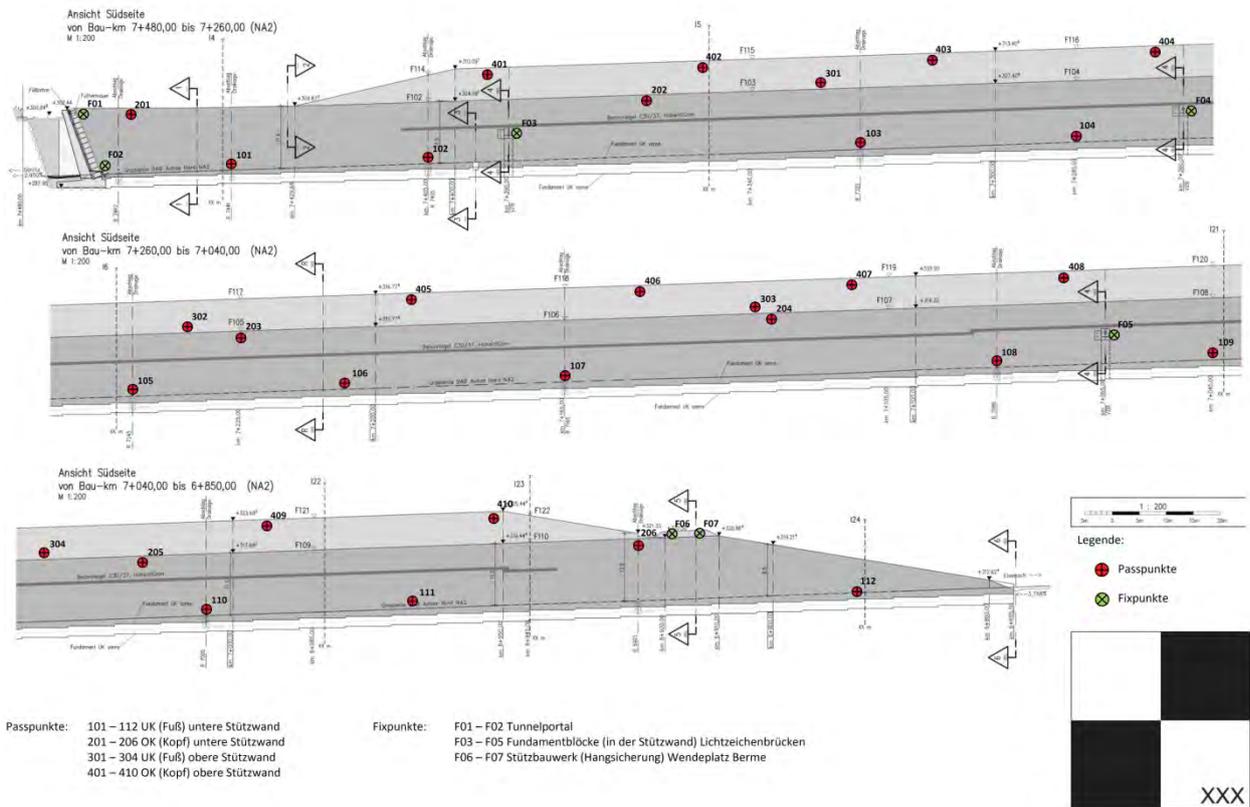


Abbildung 70: Übersicht der Positionierung von Pass- und Fixpunkten an der Stützwand

Die Aufnahme der Luftbilder erfolgte aus zwei unterschiedlichen Entfernungen zur Stützwand, wobei nur die Bilder der Aufnahmeachse 1 zur photogrammetrischen Auswertung und Erstellung der 3D-Punktwolke herangezogen wurden. Die vorgeplanten Flugrouten basieren auf den Koordinaten der Gradiente der Hauptachse der BAB4, die jeweils um die entsprechende Distanz nach Norden versetzt wurden, um die geforderte Entfernung zur Stützwand zu erreichen.

Aufnahmeachse 1 (A1): Hauptachse BAB4 + 3 m nach Norden versetzt  
 (Achse zwischen beiden RFB)

Aufnahmeachse 2 (A2): Hauptachse BAB4 + 30 m nach Norden versetzt  
 (ca. 5 m nördlich RFB DD – ESA)

Abbildung 71 zeigt die beiden Aufnahmeachsen mit den Aufnahmepositionen in der Wegpunkt-Planungssoftware.



Abbildung 71: Flugroute und Aufnahmeachsen 1 und 2

Die Anzahl und Aufnahmepositionen der erforderlichen Luftbilder ergeben sich aus dem Abstand zur Oberfläche der Stützwand und der verwendeten Kamera sowie des gewählten Objektivs. Grundvoraussetzung für alle Aufnahmen war der annähernd senkrechte Blickwinkel zur Stützwandoberfläche und eine Bildüberlappung von mindestens 60% in horizontaler und mindestens 25% in vertikaler Richtung. Durchschnittlich wurde bei allen Bildern eine Überlappung von ca. 70% in horizontaler und ca. 50% in vertikaler Richtung erreicht. Die Flugrouten und Aufnahmepositionen wurden so berechnet, dass die Ansicht der Stützwand vollständig erfasst und abgebildet werden konnte und somit eine lückenlose 3D-Rekonstruktion möglich ist. Dabei musste die auf einer Kreisbahn liegende und zum Tunnelportal hin abfallende Gradienten der Stützwand berücksichtigt werden. Dadurch waren ein annähernd konstanter Abstand zur Stützwand und ein gleichbleibender Blickwinkel auf die Stützwandoberfläche gewährleistet.

Zusätzlich zu diesen Frontalaufnahmen der Stützwandoberfläche wurden von bestimmten Bereichen (Tunnelportal und Lichtzeichenanlagen), an denen die Fixpunkte angebracht sind, weitere Aufnahmen mit den gleichen Kameraparametern gemacht, um die Redundanz der Erkennung der Fixpunkte in den Bildern zu erhöhen.



Abbildung 72: Vollautomatische Datenaufnahme mit Hilfe des AscTec Navigator an der Stützwand

## Aufnahmeachse 1

Bei den Aufnahmen in der Aufnahmeachse 1 waren aufgrund der kurzen Distanz zur Stützwand zwei sich vertikal überlappende horizontale Aufnahmestreifen erforderlich, um die Aufnahme der Stützwand über die gesamte Höhe zu ermöglichen. Zusätzlich zu den Frontalaufnahmen wurden weitere Luftbilder unter einem Winkel von ca. 55° und 90° zur Stützwandoberfläche über die Gesamtlänge aufgenommen, um eine vollständige 3D-Punktwolke des Bauwerks generieren zu können. Darüber hinaus wurden weitere Luftbilder vom Tunnelportal und von den angebrachten Fixpunkten (Lichtzeichenbrücken, Betonwände Wendekreis obere Berme) aufgenommen.

### Aufnahmeparameter

Anzahl Flüge:	4 + 1 (Zusatzaufnahmen)
Flug-/ Aufnahmezeit:	je 14 Minuten
Anzahl Frontalaufnahmen:	280
Anzahl Zusätzliche Aufnahmen:	46
Abstand zur Wand	ca. 35 m

### Kameraeinstellungen

Brennweite:	35 mm (fest)
Blendenzahl:	F/3,5 (max. Blende: 2,96875)
Verschlusszeit:	1/800 Sek.
ISO-Wert:	80
Fokus:	Manueller Fokus (konstant)

## Aufnahmeachse 2

Bei den Aufnahmen in der Aufnahmeachse 2 war lediglich 1 horizontaler Aufnahmestreifen erforderlich, da aufgrund der großen Entfernung zur Stützwand, die vertikale Ausdehnung der Stützwand vollständig im Bild abgedeckt werden konnte. Zusätzlich zu den Frontalaufnahmen wurden Aufnahmen vom Tunnelportal aus verschiedenen Blickwinkeln angefertigt.

### Aufnahmeparameter

Anzahl Flüge:	1
Flug-/ Aufnahmezeit:	13 Minuten
Anzahl Frontalaufnahmen:	42
Anzahl Zusätzliche Aufnahmen:	20
Abstand zur Wand	ca. 70 m

### Kameraeinstellungen

Brennweite:	35 mm (fest)
Blendenzahl:	F/3,5 (max. Blende: 2,96875)
Verschlusszeit:	1/800 Sek.
ISO-Wert:	80
Fokus:	Manueller Fokus (konstant)

## Ergebnisse

Alle aufgenommenen Luftbilder im RAW-Format wurden zunächst qualitativ aufbereitet, um eine Qualitätssteigerung bei der Generierung der 3D-Punktwolke zu erreichen. Dabei wurden eine Belichtungs-, Verzeichnungs- und Vignettierungskorrektur, sowie eine Rauschminderung vorgenommen.

Die aufbereiteten Luftbilder wurden mit der SfM-Software zu einer georeferenzierten Punktwolke weiterverarbeitet. Für die Georeferenzierung der 3D-Punktwolke wurden die eingemessenen Pass- und Fixpunkte mit den dazugehörigen Koordinaten genutzt. Alle Pass- und Fixpunkte wurden manuell in der Software bearbeitet, da eine automatische Erkennung dieser kleinen Passpunkte in der aktuellen Version nicht unterstützt wird.

Alle Pass- und Fixpunkte waren in mindestens 8 Bildern erkennbar und weisen einem mittleren Fehler von 6,85 mm sowie einem mittleren Bildfehler von 0,142 Pixeln auf. Die georeferenzierte 3D-Punktwolke der Stützwand enthält ca. 1,436 Milliarden Messpunkte. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse zur 3D-Punktwolke der Stützwand zusammengefasst.

Tabelle 8: Zusammenfassung Ergebnisse Erzeugung georeferenzierte 3D-Punktwolke der Stützwand

Bildanzahl:	326
Passpunkte:	32
Fixpunkte:	7
Projektionen (Pass- und Fixpunkte):	min. 8 / max. 19
Mittlerer Fehler:	6,85 mm
Mittlerer Bildfehler:	0,142 Pixel
3D-Punktwolke:	1.435.591.682 Punkte

Damit ist bei annähernd gleichen Aufnahmeparametern und gleicher Qualität der tachymetrischen Aufnahme der Fixpunkte eine Detektierung von geometrischen Veränderungen > 7 mm gewährleistet.

Von der gesamten Stützwand wurde ein hochaufgelöstes Gigapixel-Orthophoto erzeugt. Aufgrund der immensen Größe wurde dieses in mehrere Teilbilder zerlegt, um die maximale Auflösung beizubehalten und keine Details zu verlieren. Abbildung 73 zeigt einen Orthophotoausschnitt der Stützwand.



Abbildung 73: Orthophotoausschnitt aus der Rekonstruktion der gesamten Stützwand



Abbildung 74: Ausschnitt aus dem vermaschten farbcodierten 3D-Modell der Stützwand

Weitere Informationen zur Durchführung der Aufnahme, Vermessung und 3D-Rekonstruktion der Stützwand am Jagdbergtunnel unter:

<https://www.youtube.com/watch?v=kKFBzLjngMo>

### 7.2.3 Untersuchungen zur hochgenauen geometrischen Zustandsermittlung und 3D-Rekonstruktion im Rahmen von Restaurierungsmaßnahmen an Denkmalobjekten

Bei den Einsätzen an den Referenzobjekten, wie dem Dom zu Halberstadt oder dem Dom zu Magdeburg, rückten im Zuge der gemeinsamen praktischen Versuche mit den Bauwerksverantwortlichen immer mehr die Belange des Denkmalschutzes bzw. der detailgetreuen Restaurierung von Details am Bauwerk in den Vordergrund. Hierbei war die Erzeugung hoch aufgelöster Bilder mit hohem Detailgrad, wie in 7.1 beschrieben schon sehr hilfreich für eine detaillierte visuelle Zustandsermittlung im Rahmen der Restaurierungsplanung. Des Weiteren wurde die Verwendung der Bilder zur hochgenauen Vermessung und 3D-Modellierung bestimmter geometrisch komplexer Bauwerksteile als Grundlage der Restaurierungsplanung eingehender untersucht.

Sehr alte und wertvolle, aber auch teilweise stark geschädigte Skulpturen im Innen- und Außenbereich oder einzelne Bauwerkelemente, wie aufwändig gestaltete Wasserspeier oder Verzierungen an Fassaden sind äußerst empfindliche Objekte. Die Zustandsermittlung und -überwachung dieser, ist aufgrund der deutlich erschwerten Zugänglichkeit besonders komplex. Häufig befinden sich diese Elemente in so exponierten Lagen, dass ein Zugang nur mit äußerst hohem Aufwand realisierbar ist. Aufgrund der besonderen Empfindlichkeit der Oberflächen dieser Objekte unterliegt auch die Zustandserfassung besonderen Anforderungen. Für eine detailgetreue Restaurierung sind diese Objekte möglichst detailliert, aber wenn möglich berührungslos aufzunehmen, um diese nicht weiter zu schädigen. Die UAS-basierte Aufnahme bietet an dieser Stelle die Möglichkeit sehr schnell, ohne besondere Zugangsmittel, hoch aufgelöste Bilder als Grundlage für die visuelle Zustandsermittlung und die maßstabsgerechte sowie farbgetreue 3D-Rekonstruktion zu generieren.

Für diesen Versuch wurde die, in Abbildung 75 dargestellte ca. 530 Jahre alte Figur („Heiliger Hieronymus mit Löwe“) im Dom zu Halberstadt detailliert aufgenommen.



Abbildung 75: Heiliger Hieronymus mit Löwe im Dom zu Halberstadt (Originalaufnahme)

Die Figur ist in einer Höhe von ca. 5 m an einem Vierungspfeiler im Kirchenschiff angebracht und vergleichsweise gut zugänglich. Die Aufnahme der Figur erfolgte mit dem Flugsystem, wie in Abbildung 76 dargestellt, im Höhen-kontrollierten Modus ohne GPS-Unterstützung im Teameinsatz. Die Distanz wurde so gewählt, dass die Oberfläche der Figur durch die Abwinde des Fluggerätes nicht geschädigt wird und eine Staubaufwirbelung vermieden wird. Besonders herausfordernd waren die schwierigen Lichtverhältnisse in der Kirche. Aufgrund der geringen Ausleuchtung war eine relativ lange Belichtungszeit 1/200s, aber auch eine möglichst große Blendenzahl für die entsprechende Schärfentiefe erforderlich. Dies verlangt nach einem extrem stabilen (ruhigen) Flugsystem, um scharfe Bilder zu erzeugen. Um zusätzliche Schatten, die sich bei der 3D-Rekonstruktion negativ auswirken können, zu vermeiden und eine möglichst farbgetreue 3D-Modellierung zu erreichen, wurde auf eine zusätzliche künstliche Beleuchtung verzichtet. Die Figur wurde in nur einem Flug in 12 Minuten mit 180 Bildern in einer Distanz von weniger als 2m aufgenommen. Dabei wurden die Kamera- und Aufnahmewinkel so gewählt, dass die Figur vollständig aufgenommen werden konnte.

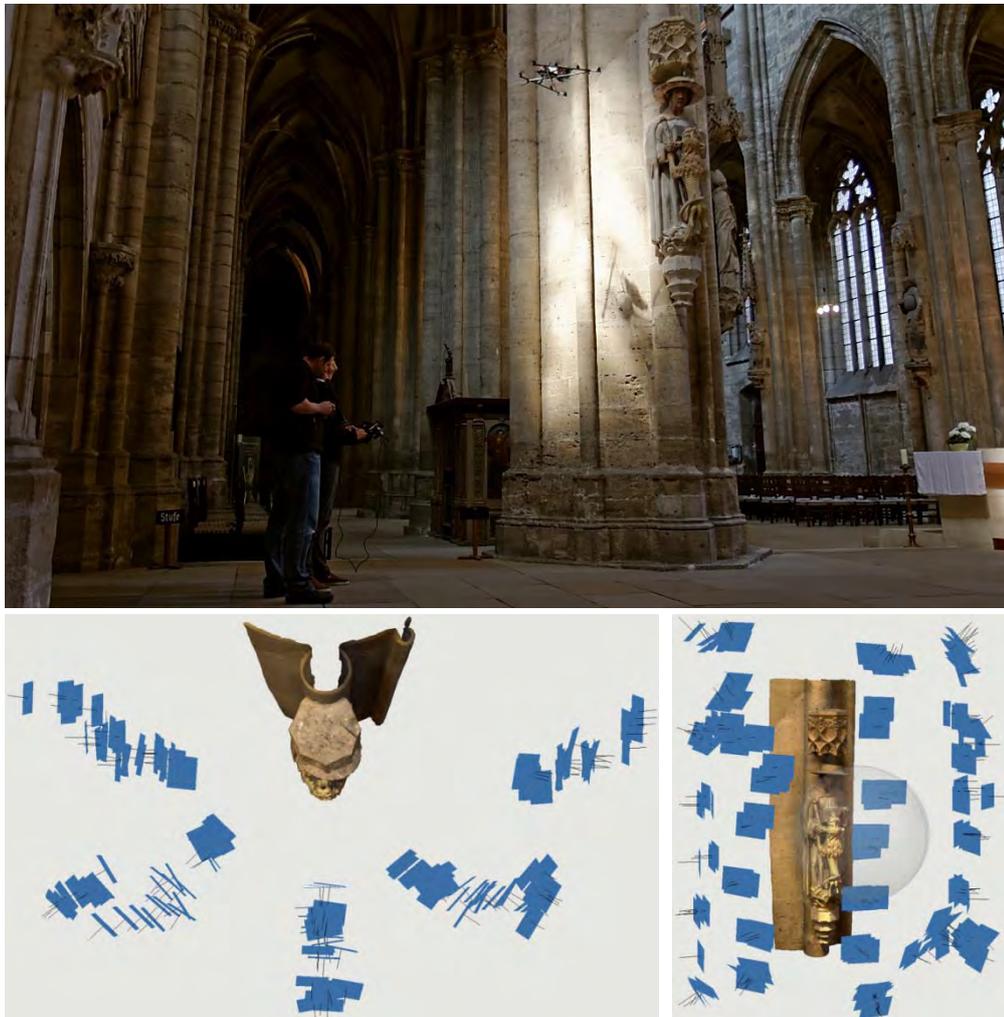


Abbildung 76: Aufnahme Heiliger Hieronymus im Dom zu Halberstadt, oben: manuelle Aufnahme im Teameinsatz [Foto: Späth], unten: Kamera-/Fluggerätepositionen bei der Aufnahme

Versuche mit zusätzlicher künstlicher Beleuchtung, wie auf dem Fluggerät installierten LED-Lampen oder unter Nutzung des auf der Kamera verbauten Blitzes haben gezeigt, dass diese Bilder für eine hochgenaue und farbgetreue 3D-Rekonstruktion wenig geeignet sind. Die unregelmäßige Ausleuchtung der Figur führt zu negativen Effekten, wie einer starken Schattenbildung, die sich stark auf die Rekonstruktionsergebnisse auswirken können. Daher sind, bei der Verwendung zusätzlicher Beleuchtung, fest installierte Strahler, die ein möglichst indirekt dem Tageslicht ähnliches Licht produzieren zu empfehlen. Diese sind so zu positionieren, dass eine gleichmäßige Ausleuchtung des Objektes erzielt werden kann. Da solche Installationen aber häufig sehr aufwendig oder teilweise gar nicht möglich sind, sollte eine sehr gute Kamera- und Objektivtechnik zur Anwendung kommen. Sehr lichtstarke Objektive in Kombination mit einem sehr rauscharmen Bildsensor, der hohe ISO-Werte erlaubt, sowie einem sehr stabilen Flugsystem sind in den meisten Fällen gut geeignet für Indooreinsätze wie diese. Dabei ist zu beachten, dass die ISO-Zahl dennoch klein zu halten ist, da sich hohe ISO-Zahlen (starkes Rauschen) ebenfalls negativ auch die Rekonstruktion auswirken kann.

Die 180 Bilder mit einer Objektauflösung von 0.28mm/Pixel wurden für eine maßstabgerechte und farbtreue 3D-Rekonstruktion unter Nutzung der in 7.2.1 und 7.2.2 erläuterten SfM-Methoden verwendet. Basierend auf der extrem hohen Auflösung der Bilder und einer qualitätssteigernden (z.B. Belichtungskorrektur) Verbesserung der RAW-Bilder konnte eine sehr dichte RGB-Punktwolke mit mehr als 43 Millionen Messpunkten erzeugt werden. Diese Punktwolke wurde zur polygonalen Dreiecksvermaschung zu einem Oberflächennetz mit ca. 8,5 Millionen Dreiecken genutzt. Die Texturierung des Modells erfolgte über die hochaufgelösten Bilder. Abbildung 77 zeigt einen Ausschnitt aus dem generierten farbtreuen 3D-Modell (ohne Texturbelegung) und einen Ausschnitt aus dem Polygonnetz der Oberfläche. Die erzielte Dichte und Genauigkeit der Messpunkte sowie des 3D-Modells erlaubt eine detaillierte visuelle wie auch geometrische Analyse der gesamten Figur.

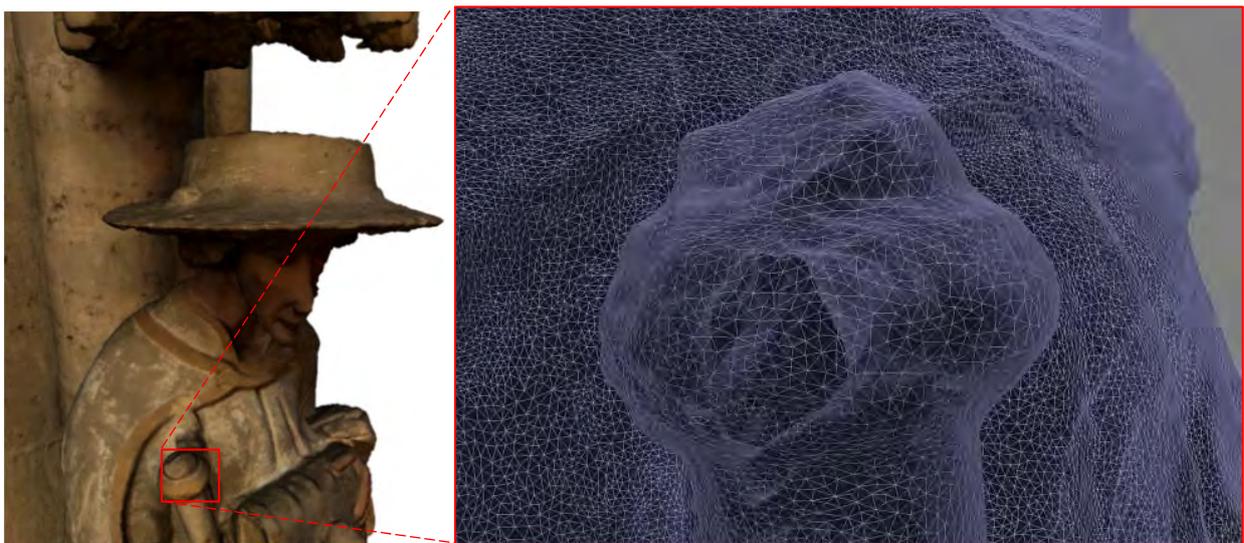


Abbildung 77: Ausschnitt aus dem generierten 3D-Modell der Figur, links: farbtreue 3D-Rekonstruktion (43 Mio. Punkte, 8,5 Mio. Polygone), rechts: Ausschnitt aus dem polygonal vermaschten Netz

Die geometrische Referenzierung kann über temporär angebrachte Passpunkte oder natürlich vorhandene Punkte am Objekt, die tachymetrisch eingemessen werden, erfolgen. Wo dies nicht möglich ist, kann die Referenzierung auch über bekannte Abmessungen (geometrische Referenz) am Objekt in den Bildern erfolgen, sodass ein zusätzliches Einmessen von Passpunkten vermieden wird. Dieser Ansatz führt zu einem erweiterten Konzept der detaillierten Zustandsermittlung und -dokumentation, sowie der 3D-Modellierung zur Wiederherstellung oder dem Austausch beschädigter Objekte. Die hochgenaue 3D-Rekonstruktion ermöglicht die maßstabgerechte geometrische Abbildung der vorhandenen Struktur und ermöglicht zugleich die Modellierung/ Rekonstruktion fehlender oder beschädigter Teile der Struktur in Geometrie und Farbe. Damit können einzelne filigrane Teile oder sogar die gesamte Struktur wieder im ursprünglichen Zustand, wie z.B. der korrekten Farbgebung und Originalgröße hergestellt werden. Moderne Fertigungstechniken bzw. -maschinen können die entsprechenden Datenformate der 3D-Modelle direkt verarbeiten, sodass eine maschinelle hoch präzise Fertigung (CNC-Fräsen) der Strukturen möglich ist.

Abbildung 78 zeigt die Figur im Luftbild und die daraus erzeugte 3D-Rekonstruktion.

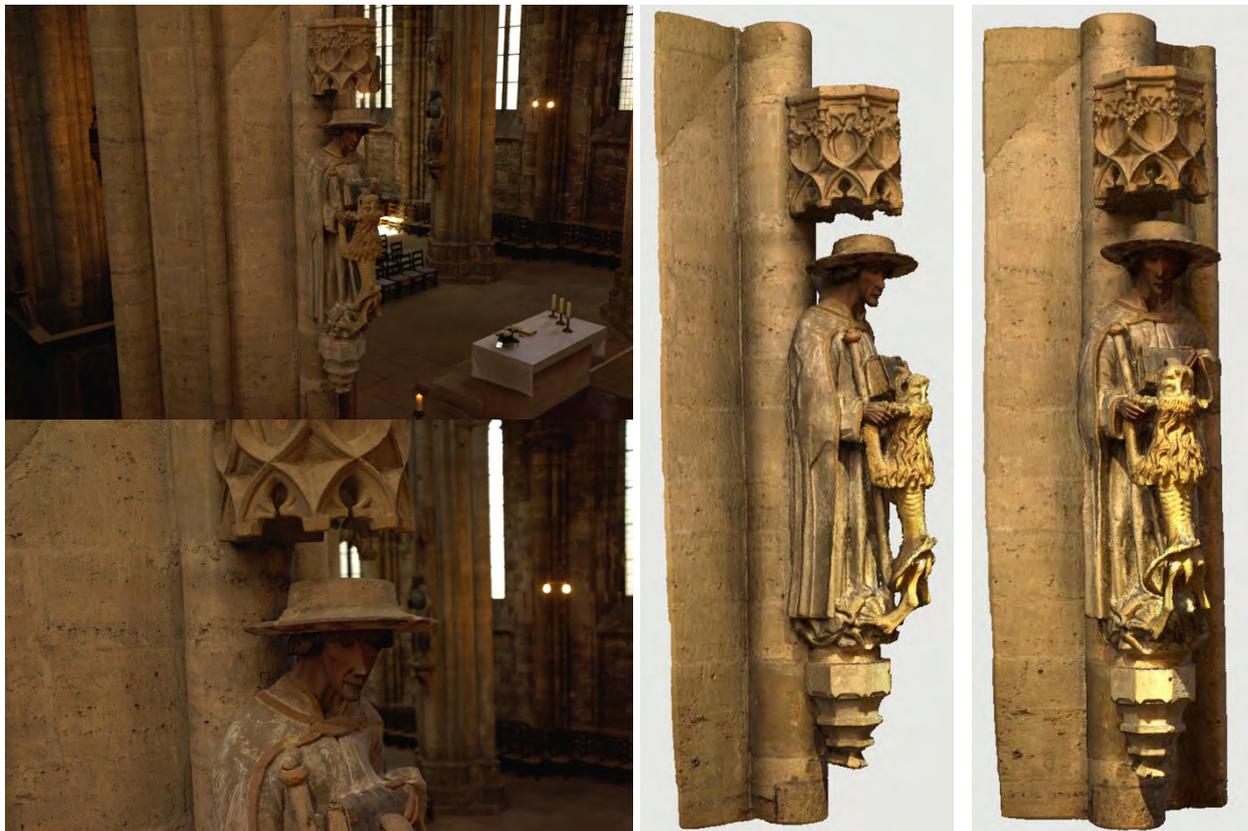


Abbildung 78: Ergebnis der 3D-Rekonstruktion der Figur des „Heiligen Hieronymus“ im Dom zu Halberstadt, links: Luftbild der Figur (Originalbild), rechts:

Weitere Informationen zur Durchführung der Aufnahme, Vermessung und 3D-Rekonstruktion der Figur im Dom zu Halberstadt unter:

<https://www.youtube.com/watch?v=fduum29qcYg>

## **8. Erweiterten Anwendungsszenarien im Bauwesen**

Im Laufe der Untersuchungen zu den vorgestellten Einsatzszenarien ergaben sich während der Bearbeitung des Projektes kontinuierlich weitere potentielle Einsatz- bzw. Anwendungsmöglichkeiten von UAS im Bauwesen. Die qualitativ hochwertigen Bild- und Videodaten können für verschiedenste Zwecke weiterverwendet werden, welche nachfolgend kurz vorgestellt werden. Die Ausstattung der Fluggeräte mit speziellen Kameras, Prüfgeräten oder auch Detektoren bzw. Sensoren ermöglichen die Aufnahme weiterer Daten zur Beurteilung des Bauwerkszustandes. Hierfür wurden zum Ende des Projektes Voruntersuchungen zur Implementierung von spezieller Aufnahmesensorik auf den Fluggeräten durchgeführt. In anderen parallelen Forschungsprojekten des Projektpartners Ascending Technologies wurden bereits verschiedene Sensoren zur Datenerfassung getestet.

### **Anwendungen in der Denkmalpflege**

- Berührungslose Schadensidentifikation und Diagnose von empfindlichen Strukturen und Oberflächen
- Hoch detaillierte Bild- und Videoanalyse von speziellen Bauwerksteilen, Skulpturen, Ornamenten, Einbauten oder Verzierungen
- Hoch genaue Datenerfassung und -dokumentation für Sanierungs- und Restaurierungsplanung schwer zugänglicher Objekte
- Kontinuierliche Diagnose durch regelmäßige Datenerfassung (z.B. Überwachung von Rissen oder Deformationen)
- Hoch aufgelöste georeferenzierte 3D-Punktwolken und vermaschte 3D-Geländemodelle (z.B. von archäologischen Ausgrabungsstätten und historischen Orten, wie Burgen und Anlagen etc.)
- Maßstabsgerechte 3D-Modelle von Bauwerksteilen, Skulpturen und Verzierungen zur Restaurierung und Rekonstruktion (z.B. Wasserspeier an Kirchen)
- 3-dimensionale Erfassung von komplexen Bauwerken (georeferenzierte Innenraum- und Außenaufnahmen) zur Ermittlung von Wand- oder Gewölbestärken

### **Industrieinspektion**

- Ölplattformen – Schadensidentifikation und -lokalisierung zur gezielten Vorbereitung von Instandsetzung
- Hochspannungsmasten – Begutachtung von Isolatoren und Leitungen, Kontrolle des Bewuchs entlang von an Leitungstrassen
- Innenrauminspektion von Abluftschächten (Tunnelbauwerke) oder Hochöfen (Brennkammern)

## **Straßen- und Schienenverkehr**

- Inspektion und Vermessung von
  - Straßen- und Schieneninfrastruktur
  - oberirdischen Leitungen, Konstruktionen und Fassaden
  - Überführungen und Unterführungen
  - Hochbrücken, Talbrücken, Tunneln und Bahnübergängen
  - Böschungen, Dämmen und Wällen

## **Baustellenüberwachung und Vermessung**

- Monitoring und Dokumentation des Baufortschritts
- 3D-Erfassung und Planung von Baustelleneinrichtungen
- Datenerfassung für die Bauleitung, Logistik und Sicherheit
- 3D-Punktwolke und 3D-Modelle zur Beurteilung geometrischer Toleranzen
- Datenerfassung zur Beweissicherung

## **Datenerfassung für Stadt- und Raumplanung, Projektierung, Entwicklung und Vermarktung von Eigentum und Immobilien**

- Luftbilder (Übersicht- und Schrägaufnahmen, Draufsichten und Ansichten)
- Videoaufnahmen
- Panoramas
- 360° Kugelpanoramas
- Virtuelle Touren
- 3D-Gelände- und 3D-Bauwerksmodelle

## **Baulicher Katastrophenschutz**

- Aufnahme und Vermessung von geschädigten Bauwerken zur Beurteilung der des Schadensausmaßes und der Resttragfähigkeit (Gebäude, Dämme etc.)
- Aufnahme- und Dokumentation von Großschadensereignissen (Hochwasser, Erdbeben, Erdrutsch) zur Dimensionierung von neuen Schutzbauwerken
- hoch genaue Vermessung von Hochwasser gefährdeten Geländebereichen als Basis für realitätsnahe Simulationen

## 9. Zusammenfassung

In Rahmen des Forschungsprojektes wurden wissenschaftliche Fragestellungen im Zusammenhang mit der Anwendung von unbemannten Fluggeräten (UAS) zur Zustandsermittlung und Inspektion von Bauwerken bearbeitet. Die Bearbeitung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Fluggerätehersteller Ascending Technologies und verschiedenen Experten aus den Bereichen der Bauwerksprüfung und -erhaltung in umfangreichen praktischen Versuchen und Tests an ausgewählten Referenzbauwerken, anhand folgender Forschungsschwerpunkte.

- Potentialanalyse zur kostengünstigen Inspektion schwer zugänglicher Bauwerke,
- Untersuchungen zum lokalen Windfeld in Bauwerksnähe,
- Optimierung der Fluggerätetechnik und Entwicklung eines Prototypen für spezifische Anwendungsszenarien im Bauwesen,
- Erarbeitung geeigneter Strategien zur UAS-basierten Datenaufnahme an Bauwerken (Einzelaufnahmen, automatische/ teilautonomen Aufnahmen),
- Untersuchungen zur Identifizierbarkeit von Bauwerksschäden aus visuellen Daten,
- Untersuchungen von geeigneten Methoden zur Aufbereitung der visuellen Daten,
- Untersuchungen erweiterten Anwendungsszenarien bezüglich zerstörungsfreier Prüfmethode.

Das Projekt konnte aufzeigen, dass professionelle high-end UAS (VTOL) mit der entsprechend qualitativ hochwertigen Kameraausstattung grundsätzlich sehr gut für die visuelle aber auch messtechnische Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis von hochaufgelösten Bild- und Videodaten geeignet sind. Insbesondere bei sehr großen, hohen und schwer zugänglichen Bauwerken können diese Systeme einen wesentlichen Beitrag zur Effizienzsteigerung und Kostenreduzierung bei der Zustandserfassung und bei regelmäßigen wiederkehrenden Inspektionen leisten. Ein Ersatz für die handnahe Prüfung, wie bei Ingenieurbauwerken gefordert, kann diese Methode mit der heutigen Technologie aber nicht sein. Die Verwendung solcher Flugsysteme kann bei bestimmten Bauwerken vielmehr zu einer deutlichen Vereinfachung und Beschleunigung der Bestandsdatenermittlung führen und den Bauwerksprüfer bei der Erfassung, Auswertung und Dokumentation des Bauwerkszustandes bzw. von Bauwerksschäden unterstützen.

Die vorangestellten theoretischen Untersuchungen und Simulationen zum Windfeld in Bauwerksnähe in Kombination mit den umfangreichen praktischen Tests und Versuchen an den Bauwerken haben zu einer deutlichen Verbesserung bzw. Optimierung der Steuerungs- und Regelungsalgorithmen und somit auch zu einer Steigerung der Sicherheit der verwendeten Flugsysteme geführt. Die extreme Positionsgenauigkeit und Windstabilität der Systeme erlaubt Einsätze auch bei ungünstigen Witterungsbedingungen und in sehr geringem Abstand zum Bauwerk. Dadurch können auch ausgesprochen komplexe Bauwerke wie stark gegliederte Kirchenbauwerke oder Brücken sehr detailliert aufgenommen werden. Auch bei Innenraumeinsätzen und Aufnahmen äußerst schwer zugänglicher und empfindlicher

Bauwerksteile haben sich die Flugsysteme bewährt. Zur Steigerung der Sicherheit bei sehr schwierigen Einsätzen ist eine entsprechende Abstandssensorik bzw. ein virtueller Schutzring zur Kollisionsvermeidung zu entwickeln und auf den Systemen zu implementieren. Mechanische Schutzringe haben sich bei den hier durchgeführten Versuchen nicht bewährt, da diese einen zu großen Einfluss auf die Gesamtpformance des Flugsystems haben und zu einer größeren Windanfälligkeit führen sowie die Gefahr besteht an auskragenden Bauerteilen hängen zu bleiben.

Die Feldversuche an den großflächigen Bauwerken haben eindrucksvoll gezeigt, dass die Datenerfassung an solchen Bauwerken mit Hilfe von UAS deutlich verkürzt und qualitativ gesteigert werden kann. Vor allem die GPS-basierte automatische Aufnahme von Bauwerken wie Stützwänden auf vorprogrammierten Flugrouten ermöglicht eine exakte und reproduzierbare Datengenerierung. Trotz der Vielzahl an Verbesserungen und Einsatzmöglichkeiten bestehen weiterhin Grenzen beim Einsatz von UAS. Die Einsätze von UAS sind witterungsabhängig und aufgrund der noch fehlenden Abstandssensorik bei geringen Platzverhältnissen nicht ohne das Risiko eines Anpralls durchführbar. Die sehr gute Positions- und Lageregung des Flugsystems in Verbindung mit dem Einsatz erfahrener Piloten kann dieses Risiko aber minimieren.

Die mit den UAS generierten Bild- und Videodaten verfügen über eine sehr hohe Qualität und sind einerseits zur visuellen Erfassung typischer Bauwerkschäden wie z.B. von Rissen und Abplatzungen und andererseits zur messtechnischen Erfassung von Schäden und sogar von ganzen Bauwerken geeignet. Qualitativ hochwertige und detailreiche Bilder können aber nur mit entsprechend guter Kamertechnik in Verbindung mit einem windstabilen Flugsystem erreicht werden. Die in diesem Projekt verwendete Fluggerät-Kamera-Konfiguration lieferte sehr gute Bilddaten und hat sich bei den Feldversuchen bewährt, sodass auch kleinste Schäden sicher identifizierbar waren, was selbst für Einsätze unter schlechten witterungs- und Lichtverhältnissen gelten kann.

Hinsichtlich der Auswertung der gewonnenen Bilddaten wurden im Rahmen des Projektes Potentiale aufgezeigt, die teilweise eingangs in der Form gar nicht erwartet worden waren. Zunächst eignen sich die Bilddaten zur manuellen visuellen Schadenserkenung, d.h. durch Inspektion der Bilder. Videodaten sind sehr gut für eine schnelle Live-Inspektionen geeignet, indem eine Begutachtung durch Experten am Boden erfolgt. Im Falle von Einzelaufnahmen lassen sich mithilfe von Computer Vision Verfahren auch automatische Schadensidentifikationsmethoden entwickeln, die auf Mustererkennungsalgorithmen basieren und z.B. nach einem Trainingszyklus automatisch Schäden erkennen können. Hierdurch wäre ein Vorselektieren von Bildern möglich, was jedoch Fragen nach der Erkennungswahrscheinlichkeit aufwirft und einen wesentlichen zukünftigen Forschungsbedarf aufzeigt. Des Weiteren lassen sich photogrammetrische Auswertungen der Bilddaten durchführen, die z.B. ein Messen in Orthofotos oder die hochgenaue 3D-Rekonstruktion des Bauwerkes oder von Bauwerksteilen erlauben. Über Vergleiche von hochgenauen 3D-Punktwolken lassen sich geometrische Veränderungen an Bauwerken detektieren und entsprechend visualisieren.

Der Einsatz unbemannter Fluggeräte kann zu einer deutlichen Qualitätssteigerung bei der Bauwerksinspektion führen. Jedoch ist dies nur mit geeigneter Fluggeräte- und Kameratechnik erreichbar. Nicht zuletzt hängen die erzielbaren Ergebnisse stark von der Erfahrung des Piloten und dem Fachwissen des Auswertepersonals ab.

## 10. Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Zuge der Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete, vor allem auch im Zusammenhang mit den praktischen Tests an den Referenzbauwerken, wurde weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf identifiziert. Dieser betrifft einerseits die Fluggerätetechnik und -navigation und andererseits die Datenauswertung und Datenaufbereitung. Vor allem die für eine effiziente, konsistente und reproduzierbare Datenaufnahme erforderliche Automatisierung von Flug- und Auswerteprozessen erfordert noch erhebliche weitere Forschungsleistungen.

Das identifizierte Forschungs- und Entwicklungspotential ist nachfolgend stichpunktartig zusammengefasst.

Forschungsbedarf Fluggerätetechnik:

- Entwicklung und Implementierung einer sensorbasierten aktive Kollisionsvermeidung
- Entwicklung einer sensorbasierten Abstandskontrolle/ -automatik (Kontrolle des Kameraabstandes, d.h. Bildausschnittes)
- Implementierung von Differentiellem GPS zu verbesserten Positionskontrolle
- Zusätzliche Beleuchtung auf dem Fluggerät zur gleichmäßigen Ausleuchtung von Objekten bei Innenraumeinsätzen
- Entwicklung und Implementierung der Kameratechnik für Stereoaufnahmen
- Verbesserung der Energieversorgung – Akkutechnik

Forschungsbedarf Fluggerätenavigation:

- Abstandsorientierte/ -gesteuerte Befliegung von Bauwerken
- vertikale und geneigte Einzelflugpfade mit Wegpunkten
- vertikale und geneigte Matrizen für Aufnahmen von Flächen
- 3D-Flugplanung
- Automatisierte Erstellung von Flugrouten auf der Basis existierender Geometriemodelle des Gebäudes (z.B. von BIM-Modellen)

Forschungsbedarf Datenauswertung und -aufbereitung:

- Automatische Markerverfolgung/ -erkennung zur Georeferenzierung, insbesondere von kleinen Markern
- Auswertung und Aufbereitung (Visualisierung) sehr großer Punktwolken für Punktwolkenvergleiche
- Bildbasierte automatische Erkennung von typischen Schäden wie Rissen und Abplatzungen
- Messen von Schäden in Bildern (Maßstabsermittlung bei der Luftbildaufnahme)
- Quantitative Qualitätsbewertung der Bilddaten und von daraus abgeleiteten Informationen (z.B. Schadensidentifikation)

Forschungsbedarf Weiterverwendung der Bauwerksdaten

- Entwicklung geeigneter Datenformate für die Weiterverarbeitung großer Punktwolken und 3D-Bauwerksmodellen
- Weiterverwendung der generierten Bauwerksdaten in BIM-Softwaretools

## Literaturverzeichnis

- [1] Berliner Zeitung, <http://ww.bz-berlin.de>, 09.11.2009.
- [2] Wemotec, <http://www.wemo-tec.com>, Download am 16.03.2014.
- [3] Hühn Gerüstbau, <http://huehn-geruestbau.de>, Download am 16.03.2014.
- [4] Bundesministerium der Justiz und Juris GmbH <http://www.gesetze-iminternet.de/bundesrecht/luftvg/gesamt.pdf>, Download: 12.10.2013.
- [5] Deutsche Flugsicherung, Nachrichten für den Luftfahrer, 60. Jahrgang Langen, 28.06.2012 NfL I 161/12, „Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung der Erlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen gemäß § 16 Absatz 1 Nummer 7 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO)“.
- [6] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Kurzinformation -über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen“, Januar 2014.
- [7] Trimble, <http://www.uas.trimble.com>, Download am 23.03.2014.
- [8] MAVinci, <http://www.mavinci.de>, Download am 19.04.2015.
- [9] microdrones, <http://www.microdrones.de>, Download am 19.04.2015.
- [10] Ascending Technologies, <http://www.asctec.de>, Download am 19.04.2015.
- [11] service-drone, <http://www.service-drone.com>, Download am 19.04.2015.
- [12] Aibotix, <http://www.aibotix.de>, Download am 19.04.2015.
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 1076 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung“.
- [14] M. Fröderberg, „The human factor in structural engineering“, Report TVBK-1046, Faculty of Engineering, Lund University, Lund, 2014.
- [15] G. Morgenthal, “Comparison of Numerical Methods for Bridge-Deck Aerodynamics,” Master’s thesis, University of Cambridge, 2000.
- [16] G. Morgenthal and F. McRobie, “A Comparative Study of Numerical Methods for Fluid Structure Interaction Analysis in Long-Span Bridge Design”, Wind and Structures, vol.5, pp.101–114, 2002.
- [17] G. Bitsuamlak and E. Simiu, “CFD’s potential applications: a wind engineering perspective,” in Proceedings of CWE 2010, North Caroline, 2010, 2010.
- [18] G.-H. Cottet and P. Koumoutsakos, Vortex Methods: Theory and Practice. New York: Cambridge University Press, 2000.
- [19] R. Wardlaw, “Sectional versus full model wind tunnel testing of bridge road decks,” Sadhana, vol.3, pp.177–198, 1980. 10.1007/BF02861559.
- [20] Z. Liu and G. A. Kopp, “High-resolution vortex particle simulations of flows around rectangular cylinders,” Computers & Fluids, vol.40, no.1, pp.2 – 11, 2011.
- [21] J. H. Walther and A. Larsen, “Discrete vortex method for application to bluff body aerodynamics,” J. Wind Engng. and Industrial Aerodynamics, vol.67–68, pp.183–193, 1997.
- [22] I. Taylor and M. Vezza, “A numerical investigation into the aerodynamic characteristics and aeroelastic stability of a footbridge,” J. of Fluids and Structures, vol.25, no.1, pp.155 – 177, 2009.
- [23] G. Morgenthal, “Advances in Numerical Bridge Aerodynamics and Recent Applications,” Structural Engineering International (IABSE), vol.15, pp.95–100, 2005.
- [24] Z. Zhou, A. Chen, and H. Xiang, “Numerical assessment of aerodynamic derivatives and critical windspeed of flutter of bridge decks by discrete vortex method,” J. Vib. Eng., vol.15, pp.327–331, 2002.

- [25] Y. Ge and H. Xiang, "Computational models and methods for aerodynamic flutter of long-span bridges," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol.96, pp.1912–1924, 2008.
- [26] A. J. Chorin, "Numerical study of slightly viscous flow," *J. Fluid Mech.*, vol.57, pp.785–796, 1973. Part 4.
- [27] Morgenthal G. & Hallermann, N., Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Visual Inspection of Structures. *Advances in Structural Engineering*, Volume 17 No. 3 2014, pp. 289-302, 2014.
- [28] Hallermann, N. & Morgenthal, G., The Application of Unmanned Aerial Vehicles for the Inspection of Structures, *Proc. of PLSE 2012*, Hong Kong, pp. 1085-1095, 2012.
- [29] Hallermann, N. & Morgenthal, G., Unmanned aerial vehicles (UAV) for the assessment of existing structures, *Proc. of IABSE Symposium 2013*, pp. 266-267, Kolkata, 2013.
- [30] Hallermann N. & Morgenthal G., Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Proc. of 7th IABMAS, International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, pp. 661-667, Shanghai, 2014.
- [31] R.I. Hartley und A. Zisserman, 2004: Multiple view geometry in computer vision, Cambridge University Press, 2. Aufl., S. 1—672.
- [32] N. Snavely, I. Simon, M. Goesele, R. Szeliski und S.M. Seitz, 2010: Scene reconstruction and visualization from community photo collections, *IEEE Conference on Internet Vision*, 98(8), S. 1370—1390.
- [33] D.G. Lowe, 2004: Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal on Computer Vision*, 60(2), S. 91—110.
- [34] M.A. Fischler und R.C. Bolles, 1981: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 17, S. 173—180.
- [35] B. Triggs, P. Mclauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon, 1999: Bundle adjustment - a modern synthesis, *Proc. International Conference on Computer Vision*, S. 298—372.
- [36] H. Hirschmüller, 2008: Stereo processing by semi-global matching and mutual information, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), S. 328—341.
- [37] Y. Furukawa und J. Ponce, 2010: Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), S. 1362–1376.
- [38] C. Wu, 2012: *VisualSFM*. Abgerufen am 27. Juni 2015 von <http://ccwu.me/vsfm/>
- [39] M. Jancosek, T. Pajdla, 2011: Multi-view reconstruction preserving weakly supported surfaces, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 3121–3128.
- [40] D. Girardeau-Montaut, M. Roux, R. Marc & G. Thibault, 2005: Change Detection on Points Cloud Data acquired with a Ground Laser Scanner, *ISPRS Workshop Laser Scanning 2005*, Enschede, the Netherlands, September 12–14.