

Norman Hallermann, Paul Debus, Jakob Taraben
Alexander Benz, Guido Morgenthal, Volker Rodehorst
Conrad Völker, Tajammal Abbas, Thomas Gebhardt
Sven Daubert

Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken – Fortsetzungsantrag

F 3157

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 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

2019

ISBN 978-3-7388-0381-5

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

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Forschungsprojekt

„Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken – Fortsetzungsantrag“

„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-10.08.18.7-16.36)

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

Verfasser: Dipl.-Ing. Norman Hallermann
M.Sc. Paul Debus
M.Sc. Jakob Taraben
B.Sc. Alexander Benz
Prof. Dr. Guido Morgenthal
Prof. Dr.-Ing. Volker Rodehorst
Prof. Dr.-Ing. Conrad Völker
Dr.-Ing. Tajammal Abbas
Dipl.-Ing. Thomas Gebhardt
Dipl.-Ing. Sven Daubert (Intel)

– Endbericht –
Weimar, 1. Juli 2018

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	2
1. Projektdaten	3
1.1 Eckdaten	3
1.2 Projektbeteiligte	3
1.3 Projekthinhalte – Motivation und Projektziele	4
2. Unbemannte Flugsysteme	7
2.1 Gesetzliche Vorgaben und Regelungen	7
2.2 Unbemannte Flugsysteme	8
3. Referenzobjekte	11
3.1 Referenzobjekt – Schule an der Hart	11
3.2 Referenzobjekt – Scherkondetalbrücke	12
4. Fluggerätenavigation zur automatischen Aufnahme von Bauwerken	14
4.1 Flugroutenplanung und UAS-basierte Datenerfassung	14
4.2 Bauwerksnahe Einsätze der Fluggeräte	16
4.2.1 Anforderungen für die Aufnahme von Bauwerken aus der Photogrammetrie	17
4.2.2 Anforderungen an die Flugplanung aus der Thermographie	18
4.3 Flugroutenplanung und entwickelter Workflow	20
4.3.1 Erstellung eines groben 3D-Modells	21
4.3.2 Blickpunktberechnung	23
4.3.3 Routenplanung	32
4.3.4 Anwendung mit graphischer Benutzeroberfläche	33
4.3.5 Grenzen der entwickelten Methode	35
4.4 (Teil-) Automatisierte Flugmissionen	37
5. Thermographie und thermisch-energetische Gebäudesimulation	38
5.1 Zustandsentwicklung von Bauwerken auf Basis thermographischer Daten	40
6. Kontextbezogene Datenmodellierung	48
7. Zusammenfassung und Ausblick	54
8. Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf	57
Literaturverzeichnis	59

Vorwort und Danksagung

In diesem Projekt wurde das Potential des Einsatzes von unbemannten Flugsystemen zur Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis des Vorgängerprojektes weitergehend untersucht. Im Fokus der Untersuchungen stand die Entwicklung einer automatisierten Flugroutenplanung als Basis einer effizienten Bauwerkserfassung. Die Untersuchungen waren sehr praxisnah angelegt, um die tatsächlichen Einsatzmöglichkeiten der Flugsysteme an Bauwerken möglichst realitätsnah aufzeigen und bewerten zu können. Damit sollte eine schnelle Überführung der erzielten Ergebnisse in die Praxis gewährleistet werden. Zusammen mit dem beteiligten Projektpartner Intel Deutschland GmbH wurden Feldversuche an ausgewählten Referenzbauwerken durchgeführt. Für die Durchführung und Auswertung der Untersuchungen an den Bauwerken wurden darüber hinaus die Bauwerksbetreiber und weitere Experten wie Architekten, Vermessungsingenieure und Bauingenieure mit einbezogen. Die im Zuge der praktischen Versuche und der Auswertung der Bilddaten entstandenen Daten werden von der projektbearbeitenden Stelle vorgehalten. Im Zuge der Projektbearbeitung wurden ausgewählte Ergebnisse bereits auf nationalen, wie auch internationalen Konferenzen und Fachmessen vorgestellt. Im Rahmen des Projektes sind studentische Arbeiten mit dem Schwerpunkt Digitale Bildverarbeitung entstanden.

Besonderer Dank gilt der Intel Deutschland GmbH und hier insbesondere Herrn Sven Daubert und Herrn Johannes Späth für ihr außergewöhnliches Engagement bei den praktischen Versuchen an den Referenzbauwerken.

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 bestmöglich unterstützt haben.

Herr Steffen Kind, Kind Gebäudeanalytik Jena

Herr Dr.-Ing. Dirk Daube, Stadtverwaltung Weimar

Herr Thomas Zirkel, Stadtverwaltung Weimar

Herr Tobias Haag, Internationale Bauausstellung Thüringen GmbH

Herr Harald Zeil, Schulleiter der Schule an der Hart in Weimar

Herr Sebastian Zopf, DB Netz AG Leipzig

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 – Fortsetzungsantrag

Förderer: BBSR, Forschungsinitiative Zukunft Bau


Projektnummer: SWD-10.08.18.7-16.36

Projektzeitraum: 01.01.2017 – 30.06.2018

Fördersumme: 111.596,50 € (Gesamtsumme: 172.761,50 €)

1.2 Projektbeteiligte

Forschungseinrichtung: Bauhaus-Universität Weimar
(Antragsteller) Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion
Marienstraße 13, 99423 Weimar
Kontakt: Prof. Dr. Guido Morgenthal (Projektleiter)

 Tel.: +49 (0)3643 584418
Fax: +49 (0)3643 584422
Web: www.uni-weimar.de/Bauing/MSK
Mail: guido.morgenthal@uni-weimar.de

Professur Bauphysik
Coudraystr. 11A, 99423 Weimar
Kontakt: Prof. Dr.-Ing. Conrad Völker

Tel.: +49 (0)3643 584701
Mail: conrad.voelker@uni-weimar.de

Professur Computer Vision in Engineering
Bauhausstr. 11, 99423 Weimar
Kontakt: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Rodehorst

Tel.: +49 (0)3643 583773
Mail: volker.rodehorst@uni-weimar.de

Projektpartner: Intel Deutschland GmbH (Intel)

 Opelstraße 8a
68789 St. Leon-Rot
Kontakt: Dipl.-Ing. Sven Daubert

Tel.: +49 (0)89 203047594
Web: www.intel.com
Mail: Sven.Daubert@intel.com

1.3 Projektkinhalt – Motivation und Projektziele

Im Rahmen des bereits von der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Vorgängerprojektes "Unbemannte Fluggeräte (UAV) zur Zustandsermittlung von Bauwerken" (07/2013 - 04/2015, SWD-10.08.18.7-13.05) wurden wissenschaftliche Fragestellungen im Zusammenhang mit der Anwendung von Unbemannten Flugsystemen (Unmanned Aircraft System – UAS) in Bauwerksnähe bearbeitet. Dieses Projekt hat aufgezeigt, dass professionelle senkrecht startend und landende, VTOL (Vertical Take-Off and Landing), high-end UAS mit der entsprechend qualitativ hochwertigen Kameraausstattung sehr gut für die visuelle und messtechnische Zustandsermittlung von Bauwerken auf Basis von hochaufgelösten Bilddaten geeignet sind. Insbesondere bei sehr großen, hohen und schwer zugänglichen Bauwerken können diese Systeme einen wesentlichen Beitrag zur Effizienzsteigerung sowie Kostenreduzierung bei der Zustandserfassung und regelmäßig wiederkehrenden Inspektionen leisten. Ein Ersatz für die handnahe Prüfung, wie bei Ingenieurbauwerken gemäß DIN 1076 gefordert, kann diese Methode mit der heutigen Technologie aber nicht sein. Die Verwendung von Flugsystemen 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. Durch die hohe Positionsgenauigkeit und extreme Windstabilität professioneller Flugsysteme sind Einsätze auch bei ungünstigen Witterungsbedingungen und in sehr geringem Abstand zum Bauwerk möglich. Dadurch können auch ausgesprochen komplexe Bauwerke, wie z.B. Brücken sehr detailliert aufgenommen werden. Feldversuche an großflächigen Bauwerken haben gezeigt, dass die Datenerfassung an solchen Bauwerken mit Hilfe von UAS deutlich verkürzt und qualitativ gesteigert werden kann. Vor allem die GNSS-basierte (Global Navigation Satellite System, GNSS) automatische Aufnahme von Bauwerken auf vorprogrammierten Flugrouten ermöglicht eine exakte und reproduzierbare Datengenerierung. Allerdings besteht auf Seiten der Fluggerätenavigation, die weitestgehend in 2D existiert, noch erheblicher Forschungsbedarf, insbesondere bei der 3D-Flugplanung. Existierende Softwarelösungen sind meist flugsystem- bzw. herstellergebunden und daher nicht allgemein gültig verwendbar. Hier knüpft dieses Forschungsprojekt an, indem Methoden zur automatischen Generierung von bauwerks- und zielgrößenorientierten GNSS-Flugrouten für die Erzeugung von Bild- und Thermographiedaten und zur konsistenten Datenspeicherung entwickelt sowie an Referenzbauwerken getestet werden.

Für eine konsistente und effiziente UAS-basierte Untersuchung von Bauwerken werden Algorithmen zur automatischen Generierung von Flugrouten zur Datenaufnahme entwickelt. Hierbei werden bereits erarbeitete Computer-Vision-basierte Ansätze zur Erstellung von 3D-Bauwerksmodellen sowie BIM-Technologien genutzt, um relevante Verknüpfungen herzustellen und Daten anwendungs- und zielgrößenorientiert zu erheben und kontextbezogen zu speichern. In diesem Zusammenhang wird auch der Einsatz UAS-gestützter Thermographie zur energetischen Bewertung von Gebäuden untersucht. Die Nutzung von Thermographiekameras erfordert eine Untersuchung der Befliegungsstrategien in

Bezug auf Auflösung und Abstand zum Bauwerk sowie die Entwicklung von Methoden zur automatisierten Auswertung der Daten. Ziel ist die Anwendung zur Schadensidentifikation an Bauwerken und zur Abschätzung von Kenngrößen zur energetischen Bewertung von Gebäuden.

Ziel dieses Fortsetzungsprojektes ist die Optimierung der Fluggerätenavigation zur zielgerichteten, hocheffizienten und reproduzierbaren Generierung foto- und thermographischer Bauwerksaufnahmen mit UAS. Der zu entwickelnde Algorithmus basiert auf dreidimensionalen Geometriemodellen, die entweder mit bereits untersuchten Methoden aus UAS-basierten Bilddaten erzeugt oder aus BIM entnommen werden. Mit Definition der relevanten Bauwerksteile soll der Algorithmus optimierte, d.h. möglichst kurze und kollisionsvermeidende Flugrouten generieren, die auf Basis der Kameraparameter eine vollständige Abdeckung sicherstellen. Weitere Untersuchungen sollen Möglichkeiten zur Speicherung von Bilddaten und daraus gewonnenen Bauwerksinformationen (z.B. Schäden oder Wärmebrücken) in BIM aufzeigen und Methoden, d.h. im Wesentlichen Datenstrukturen, zur Umsetzung vorschlagen. Die Methoden werden prototypisch implementiert und anhand ausgewählter Referenzbauwerke durch Befliegungen getestet und bewertet. Weiteres Ziel ist die Untersuchung der Potentiale von UAS-getragenen Thermographiekameras sowie die gezielte Auswertung in Bezug auf Anwendungen für kritische Fragen der energetischen Bewertung von Bauwerken. In Anlehnung an das Vorgängerprojekt werden die Methoden- und Algorithmenentwicklung durch umfangreiche praktische Untersuchungen an Referenzbauwerken begleitet. Algorithmen zur Flugroutenplanung werden prototypisch implementiert und getestet. Hierbei wird die Qualität der resultierenden Bauwerksaufnahme bewertet und Erfahrungen zur Verbesserung der Methodik genutzt. Maßstab der Bewertung sind die Nutzbarkeit der Bilddaten für die 3D-Rekonstruktion, Schadensidentifikation sowie die Effizienz und Kollisionsvermeidung. Schnittstellen zu BIM werden auf Basis der Industry Foundation Classes (IFC) und neu zu entwerfender Datenstrukturen entwickelt und getestet. Hierbei werden existierende Geometrie-definitionen als Grundlage zur Routenplanung umgesetzt und die Konvertierung von UAS-Daten in BIM-Definitionen getestet. Zur Auswertung von Thermographiedaten werden vorhandene softwaretechnische Ansätze zur Kalibrierung und quantitativen Interpretation von Thermogrammen untersucht und Möglichkeiten zur Schadensidentifikation an Bauwerken und energetischen Bewertung von Bestandsgebäuden abgeleitet.

Bearbeitungsschwerpunkte waren:

Fluggerätenavigation:

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

UAS-gestützte Thermographie:

- Untersuchung von Aufnahmebedingungen
- Registrierung von RGB- und Thermographiebildern

Weiterverwendung der Bauwerksdaten

- Untersuchungen zu geeigneten Datenformaten und Schnittstellen für die Weiterverarbeitung großer Punktwolken und 3D-Bauwerksmodellen
- Weiterverwendung der generierten Bauwerksdaten in BIM-Softwaretools

2. Unbemannte Flugsysteme

2.1 Gesetzliche Vorgaben und Regelungen

Aufgrund der stark gestiegenen Verwendung unbemannter Fluggeräte, sowohl im privaten als auch im gewerblichen Umfeld, hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) die „Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten“ [1] vorgelegt, die am 7. April 2017 in Kraft getreten ist. Die Regelungen sollen einerseits den Einsatz von UAS erleichtern und befördern, andererseits den Schutz der Privatsphäre und die Sicherheit verbessern. Zu diesem Zweck wurden einige Kernregelungen [2] eingeführt:

- Kennzeichnungspflicht: Alle UAS ab 0,25 kg müssen mittels einer Plakette gekennzeichnet sein
- Kenntnissnachweis: Für den Betrieb von UAS ab 2 kg ist ein Kenntnissnachweis erforderlich
- Erlaubnisfreiheit: Für den Betrieb von UAS unter 5 kg ist keine Erlaubnis erforderlich, auch nicht mehr für gewerbliche Nutzer
- Erlaubnispflicht: Der Betrieb von UAS über 5 kg oder bei Nacht erfordert eine Erlaubnis der Landesluftfahrtbehörde
- Betriebsverbot:
 - außerhalb der Sichtweite für UAS unter 5 kg
 - in und über sensiblen Bereichen wie Einsatzorten der Rettungskräfte, Menschenansammlungen, Naturschutzgebieten oder Infrastruktur- und Industrieanlagen
 - in Höhen über 100 m
 - über Wohngrundstücken, außer es liegt eine ausdrückliche Zustimmung der Betroffenen/ Eigentümer vor
 - über 25 kg

Die zuständige Behörde kann Ausnahmen zulassen, wenn Sicherheit und Ordnung nicht beeinträchtigt werden.

- Ausweichpflicht: UAS sind verpflichtet, bemannten Flugsystemen auszuweichen
- Einsatz von Videobrillen: Flüge außerhalb der Sichtweite sind beim Einsatz einer Videobrille unter 30 m oder bei Unterstützung durch weitere Personen möglich

Diese Neuregelung des Einsatzes von UAS bringt die geltenden Gesetze auf einen zeitgemäßen Stand und erleichtert die Anwendung von UAS in der Bauwerksinspektion. Trotz der Harmonisierung auf Bundesebene sind weitere Bundesland bezogene Regelungen zu beachten. Auskünfte hierzu geben die zuständigen Landesluftfahrtbehörden.

2.2 Unbemannte Flugsysteme

Die rasante technische Weiterentwicklung bestehender Flugsystemplattformen in Bezug auf die Windstabilität und Positionsgenauigkeit aber auch der Nutzlastkapazität und Flugdauer erlaubt immer komplexere Einsätze direkt am Bauwerk. Technische Unterstützungssysteme wie automatische Abstandskontrollsysteme können den Piloten unterstützen und einen wesentlichen Beitrag zur Sicherheit bei der Befliegung von Bauwerken leisten. Solche Systeme sind derzeit aber noch nicht ausgereift genug und sind für Anwendungen entsprechend zu konfigurieren und mit der Befliegungsstrategie bzw. der Flugroutensteuerung zu verknüpfen.

Für die im Forschungsprojekt durchzuführenden Untersuchungen zum Einsatz von UAS zur Zustandsermittlung von Bauwerken, wurden Flugsysteme des Projektpartners Intel Deutschland GmbH genutzt. Hierfür kamen Flugsysteme vom Typ Falcon 8 sowie Prototypen vom Typ Falcon 8+ zum Einsatz [3]. Beide Systemgenerationen sind aufgrund ihrer Systemgeometrie mit einem uneingeschränkten 360°-Sichtfeld und ihrer extremen Windstabilität für den Einsatz in Bauwerksnähe besonders geeignet.

Das Flugsystem Falcon 8 basiert 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 Bauform 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, Höhengensensor) 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 (Inertial Measurement Unit, IMU), einem Kompass und einem Hochleistungs-Global Positioning-System-Modul, zukünftig auch mit Real Time Kinematic (RTK) Positionierung, können Flüge bis zu einer Windgeschwindigkeit von 15 m/s (6 bft) durchgeführt werden. Dabei sorgt die GNSS-Position-Hold-Funktion für einen GNSS-gestützten Flug und das exakte Halten einer Position (Schweben). Neben den technischen Komponenten sorgen darüber hinaus verschiedene softwareseitig 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. Alle erforderlichen Fluginformationen werden auf einem Statusdisplay 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.

Die Standardnutzlast dieser Fluggeräte erlaubt die Verwendung von hochwertigen digitalen Foto- und Videokameras oder auch von leichten Thermographiekameras. Die Kameras sind auf einer aktiv kompensierten Kamerahalterung (Gimble) befestigt, welche die Kamera im Flug horizontal (Roll) und vertikal (Nick, Pitch) stabilisiert. Die spezielle Bauform des Fluggerätes und der einstellbare Kamerawinkel von 90° nach oben und unten, garantiert ein freies 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-Polymer-Akkus, die Flüge zwischen 12 und 20 Minuten erlauben, je nach Traglast und Witterungsverhältnissen. Beim Flugsystem Falcon 8+ werden bereits 2 Akkus verwendet, sodass auch hier eine Redundanz in der Energieversorgung besteht.

Für die Untersuchungen am Bauwerk standen die in Abbildung 1 dargestellten Flugsysteme zur Verfügung. Die technischen Spezifikationen der eingesetzten Nutzlasten (Kameras) sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



Abbildung 1: Flugsysteme vom Typ Intel Falcon 8 (oben) und Falcon 8+ (unten links) mit mobiler Bodenstation

Tabelle 1: Kameraspezifikationen der eingesetzten Flugsysteme

	Panasonic DMC-TZ61 + FLIR TAU2 640 (Infrarot + Fotokamera)	Sony Alpha 7R (Digitale Systemkamera)
		
Auflösung	TZ-71: 12,1 MP TAU2 640: 640x512 Pixel (14-Bit-Raw)	36 MP
Sensor	1/2,33" CMOS	CMOS full frame
Objektiv	TZ-71: Zoomobjektiv 30x optischer Zoom Brennweite 24-720 mm TAU2 640: 19 mm	Festbrennweite Weitwinkel: 28 mm Normal: 35 mm Tele: 55 mm
Video	Full-HD (1080/50p)	Full-HD (1080/50p)
Gewicht	TZ-71: 243g TAU2 640: 200g	465g (ohne Objektiv)

3. Referenzobjekte

Für die praxisnahen Tests und die Validierung der in diesem Forschungsprojekt untersuchten und entwickelten Methoden zur automatisierten Berechnung von optimierten Flugpfaden zur Datenerfassung und der Einsatzmöglichkeiten UAS-basierter Thermographie sowie der Integration von UAS-basierten Bestands- und Zustandsdaten von Bauwerken wurden geeignete Referenzbauwerke unterschiedlicher Kategorien ausgewählt. Im Vordergrund standen dabei Bauwerke aus den Bereichen Hoch- und Ingenieurbau. Im Bereich der Hochbauwerke stand neben der Entwicklung einer robusten Methode zur automatisierten Routenplanung für einfache Bauwerksgeometrien die UAS-basierte Thermographie zur U-Wert-Abschätzung der Gebäudehülle im Vordergrund der Untersuchung. Bei den Ingenieurbauwerken fokussierten sich die Arbeiten im Wesentlichen auf die Weiterentwicklung der Flugroutenplanung für komplexe Bauwerksgeometrien und die Erarbeitung einer Methodik zur Speicherung und Integration von vielfältigen Inspektionsdaten aus regelmäßig wiederkehrenden Bauwerksinspektionen in BIM, sodass eine lückenlose und nachvollziehbare Zustandsentwicklung des Bauwerkes gewährleistet ist. Nachfolgend werden die ausgewählten Referenzbauwerke vorgestellt.

3.1 Referenzobjekt – Schule an der Hart

Die Schule an der Hart, siehe Abbildung 2, ist ein DDR-Typenschulbau aus dem Jahr 1975 und befindet sich im Weimarer Stadtteil Oberweimar, integriert in ein Wohngebiet.



Abbildung 2: Luftbild der Schule an der Hart in Weimar, Foto: Bauhaus-Universität Weimar, Hallermann

Das Schulgebäude stellt sich in einem unsanierten Zustand dar, das eine hohe Vielfalt und Vielzahl von Schäden an der Gebäudehülle aufweist. Hervorzuheben ist hierbei insbesondere der schlechte Zustand der thermischen Gebäudehülle. Das Hauptinteresse bei der Bauwerksaufnahme liegt daher auch auf der Thermographie-basierten Bestimmung bzw. Abschätzung des U-Werts als thermischer Kennwert der Gebäudehülle, der als Eingangsparemeter für thermisch-energetische Gebäudesimulationen dienen soll. Anhand manueller terrestrischer Thermographie erfolgte zunächst ein Test der entwickelten Methodik, der anschließend durch die Erstellung der UAS-basierten Thermogramme erweitert wurde.

Das Gebäude wurde mit seiner einfachen Bauwerksgeometrie ferner für die Entwicklung und Tests der automatischen Flugroutengenerierung sowie die Befliegungen intensiv genutzt. Hierbei wurde zunächst ein grobes Modell des Bauwerks und der Umgebung erzeugt, welches die Grundlage für die automatische Flugplanung bildete.

Um eine gemeinsame Datenbasis herzustellen, wurden das Schulgebäude und das Bauwerk umgebende Gelände im standardisierten Datenformat IFC (Industry Foundation Classes) modelliert. Grundlage hierfür waren vorhandene Plandaten, eigene Handaufmaße und die UAS-basierten Bilddaten, die in georeferenzierte 3D-Punktwolken und 3D-Modelle überführt wurden. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, die Bauteile semantisch korrekt zu modellieren. Das erzeugte Bauwerksinformationsmodell wurde ebenfalls für die automatische Flugplanung genutzt.

Alle während der Projektlaufzeit erzeugten Bauwerksdaten wurden entweder in das Modell integriert oder im Rahmen des Arbeitspaketes 2 weiterbearbeitet.

3.2 Referenzobjekt – Scherkondetalbrücke

Die Scherkondetalbrücke, siehe Abbildung 3, ist eine 14-feldrige und 576,5 m lange Talbrücke in semi-integraler Bauweise. Die einzelnen Felder haben mit 27,0 m, 2 x 36,5 m, 10 x 44,0 m und 36,5 m unterschiedliche Stützweiten. Die Brückenpfeiler sind mit 5,5 m x 1,5 m und einer maximalen Höhe von 31 m sehr schlank. Das Bauwerk ist Teil der ICE-Neubaustrecke VDE 8.2 und befindet sich im Norden von Weimar. Die Strecke verläuft von Westsüdwest nach Ostnordost. Das Bauwerk ist in Spannbetonbauweise hergestellt.

Das Bauwerk wurde aufgrund seiner komplexen Bauwerksgeometrie und der besonderen Charakteristika während der Aufnahme für die Weiterentwicklung und Tests der automatischen Flugplanung genutzt. Hierbei waren während der Befliegung vor allem die besonderen Windverhältnisse und die eingeschränkte Verfügbarkeit des GNSS (fliegenunterhalb des Bauwerks) zu berücksichtigen.

Im Fokus der Untersuchungen an diesem Bauwerk standen die sehr schlanken Pfeiler und der Überbau. Neben der Erfassung der Betonoberflächen für eine automatisierte Schadensdetektion in den Bildern sollten auch geometrische Veränderungen über eine bildbasierte 3D-Rekonstruktion erfasst werden. Hier wurden insbesondere die erzielbaren Auflösungen im Bild und am Bauwerk sowie die dabei erreichbare Genauigkeit untersucht.



Abbildung 3: Luftbild der Scherkondetalbrücke, Foto: Bauhaus-Universität Weimar, Hallermann

Ein weiterer Schwerpunkt an diesem Referenzbauwerk waren die Untersuchungen zu einer geeigneten Methodik zur Speicherung und Integration der bei regelmäßig wiederkehrenden Bauwerksinspektionen anfallenden Daten in BIM.

4. 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 GNSS-basierte Flugsteuerung, bei der die Position des Fluggerätes in alle Richtung stabil gehalten wird. 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 unnötig viele Daten aufgenommen werden, die die Datenauswertung verzögern bzw. negativ beeinflussen. Wie an Abbildung 4 dargestellt, erfüllen manuell aufgenommene Bilder nicht die Anforderungen, die für eine vollständige und qualitativ konstante Rekonstruktion nötig sind. Sie sind nicht gleichmäßig verteilt und garantieren nicht, dass alle Teile des Bauwerks aufgenommen wurden.

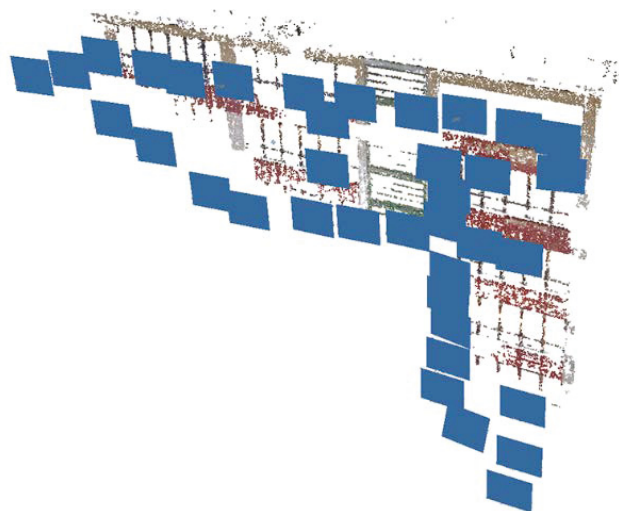


Abbildung 4: Ausschnitt der Fassadenaufnahme der Schule an der Hart mit UAS, geschätzte Bildpositionen (blaue Rechtecke) bei der manuellen Aufnahme einer Fassade

4.1 Flugroutenplanung und UAS-basierte Datenerfassung

In der Regel basieren photogrammetrische Vermessungen und Inspektionen auf einer ausreichenden Anzahl an Senkrechtaufnahmen in Nadir Richtung und Schrägaufnahmen von der Seite. Solche Aufnahmen können mithilfe von UAS erzeugt werden, die mit Kameras ausgestattet werden und eine Reihe bestimmter Blickpunkte abfliegen [4], [5], [6]. Solche Flugmissionen mit manueller Steuerung und Navigation durchzuführen ist eine große Herausforderung und bedarf in der Regel einer zweiten Person zur Bedienung und Ausrichtung der Kamera, um geeignete Aufnahmen zu machen. Eine regelmäßige Verteilung der Bilder in Bezug auf räumliche Abdeckung ist schwer sicherzustellen und Bilder aus zu ähnlichen Aufnahmestandpunkten erzeugen lokale Unsicherheiten in der Rekonstruktion der Tiefeninformationen durch schleifende Schnitte der Bildstrahlen.

Im Fall der Aufnahme großer Objekte und Landschaften, für die keine hohe Auflösung struktureller Details notwendig ist, kann eine automatisierte Oberflächenrekonstruktion aus einer Menge überlappender Bilder in Nadir Richtung erzeugt werden, die während einer vorgeplanten Flugmission in sicherer Höhe gemacht wurden. GNSS erlauben es einem UAS automatisch eine Reihe von Blickpunkten abzufliegen um dabei das gesamte Areal mit einer kontinuierlichen und relativ glatten Trajektorie aufzunehmen. In solchen Einsätzen sind allerdings Höhe und Blickrichtung üblicherweise für alle Blickpunkte identisch. Die Abdeckung von Bauwerksfassaden und einfachen Brückenbauwerken kann durch die Hinzunahme weiterer Schrägansichten erreicht werden. Hingegen die Anwendung in komplexen Vermessungsaufgaben wie der Aufnahme von großen Brücken, speziell der Brückenunterseiten, ist mit dieser Methode nicht möglich.

Mehrere kommerzielle Flugplanungswerkzeuge stehen für die Unterstützung der photogrammetrischen 3D-Rekonstruktion zur Verfügung, etwa der AscTec Navigator [3] oder Pix4D capture [7]. Diese Werkzeuge unterstützen jedoch nur einfache 3D-Formen und verwenden nicht alle verfügbaren Informationen über die Szene und die zu inspizierende Geometrie. Daher kann die automatische Erstellung von herkömmlichen Trajektorien weit oberhalb der Szene ungenaue oder unvollständige 3D-Modelle erzeugen.

Der Prozess um einen Flugpfad, der die Erfordernisse einer photogrammetrischen UAS Vermessung erfüllt, zu berechnen, besteht generell aus zwei Schritten. Zuerst muss eine Konstellation an möglichen Blickpunkten gefunden werden, die die Oberfläche mit konstanter Bildqualität abdeckt. In einem zweiten Schritt wird eine Route durch all jene Blickpunkte berechnet, die sie mit einer optimalen Trajektorie verbindet. Bestehende Methoden zur Bestimmung möglicher Blickpunkte können in modellbasierte und modellfreie Verfahren unterteilt werden. Modellbasierte Ansätze, die die Abdeckung einer Szene optimieren, unterscheiden sich hauptsächlich durch die interne Repräsentation des Modells, zum Beispiel Sichtbarkeitsmatrizen, Aspektgraphen oder Grundrisse. In [8] werden beispielsweise gültige UAS Blickpositionen für Photogrammetrie basierend auf BIM Daten bestimmt. Allerdings beachten nur wenige dieser Methoden die photogrammetrischen Anforderungen für Multi-View Stereo (MVS) Rekonstruktionen, beispielsweise ein objektabhängiges Qualitätskriterium und ausreichende Überlappung benachbarter Bilder.

In [9] wird eine qualitätsorientierte, Poisson gesteuerte Scan-Methode mit sehr guten Ergebnissen präsentiert. Die vorgestellte autonome Methode erfordert sehr viele Blickpunkte und lange Aufnahmezeiten. Mit Hilfe der Auswahl der besten Blickpunktkandidaten, können die Bewegungskosten zwischen Kamerapositionen modelliert werden, um im zweiten Schritt einen annähernd kürzesten Pfad zu berechnen, der alle Blickpunkte miteinander verbindet. Um eine solche Routenplanung zu lösen wurden zahlreiche Verfahren vorgeschlagen [10], mittels genereller heuristischer Suche [11] genetischer Algorithmen [12] oder künstlicher neuronaler Netzwerke [13].

Ein näherungsweise Algorithmus für die 3D-Blickpunktplanung für UAS basierte 3D-Modellierung von großen Infrastrukturbauwerken, der nahezu Echtzeit-Berechnungen

an Bord erlaubt, wurde in [14] beschrieben. Unlängst wurde in [15] ein submodularer Pfadplanungsansatz beschrieben, der die Auswahl von Blickpunkten und die Routenberechnung in einer gemeinsamen globalen Optimierung verbindet.

In [16] wurde ein Algorithmus implementiert, der in einer zweistufigen Optimierung abwechselnd die Blickpunktanordnung und den Pfad durch jene anpasst um vollständige Abdeckung mit kurzen Flugpfaden zu erzeugen. Der Algorithmus wählt für jedes Dreieck des groben Polygonnetzes, das zur Berechnung verwendet wird, einen Blickpunkt aus und erzeugt so eine sehr große Anzahl an benötigten Bildern.

In [17] wird eine Methode zur Dokumentation von Kulturerbe vorgeschlagen, die auf der Unterteilung des Objektes in mehrere ebene Fassadenabschnitte basiert. Für jede Fassade kann der planare Fall mit Hilfe der klassischen Methoden des Nadir-Falls gelöst werden, die Teillösungen werden anschließend kombiniert. Dieser Algorithmus kann allerdings nicht auf komplexe Objekte angewandt werden, die sich nicht in ebene Abschnitte zerlegen lassen.

Das Problem des Handlungsreisenden (Travelling Salesperson Problem – TSP), wie in [18] beschrieben, modelliert das Problem, eine Menge von Punkten so mit der kürzesten Route zu verbinden, dass jeder Punkt genau einmal besucht wird. Das multiple Travelling Salesperson Problem (mTSP) ist eine Generalisierung des TSP dergestalt, dass nicht nur ein Handlungsreisender beteiligt ist, sondern m . Typische Anwendungen des TSP wurden in [19] beschrieben, von denen die Routenplanung mit mehreren Fahrzeugen am passendsten für die Verbindung der berechneten Blickpunktanordnungen ist.

4.2 Bauwerksnahe Einsätze der Fluggeräte

Jede Zustandserfassung bzw. Inspektion eines Bauwerkes dient einem speziellen Zweck und soll bestimmte Aussagen über das Bauwerk ermöglichen. Um zu garantieren, dass diese Aussagen mit den erzeugten Daten möglich sein werden, müssen im Vorfeld die nötigen Anforderungen definiert und bei der Routenplanung berücksichtigt werden. Diese Anforderungen stammen vor allem aus den photometrischen Erfordernissen an Auflösung, Schärfe und Bildqualität. Sollen in der Inspektion zusätzlich zu den photographischen Daten noch weitere gesammelt werden, müssen auch die Anforderungen der zusätzlichen Sensorik beachtet werden.

Da sowohl in urbanen Bereichen als auch der Umgebung von öffentlichen Straßen strenge Regeln für den Einsatz von UAS gelten, müssen auch diese in der Routenplanung beachtet werden, besonders Überflugverbote und einzuhaltende maximale Höhen. Wenn möglich, können Zustimmungen der Betroffenen eingeholt werden um die Routen zu verbessern und zu vereinfachen, in anderen Fällen müssen unzugängliche Bereiche umgangen und kompensiert werden.

Für die Planung optimaler Routen spielen weitere praktische Bedingungen eine Rolle, die die Qualität der Rekonstruktion stark beeinflussen können. Insbesondere die Flugeigenschaften der eingesetzten UAS müssen bei der Planung beachtet werden. Im vertikalen Sinkflug befinden sich die Fluggeräte ständig in dem Luftwirbel (Downstream), der für den nötigen Auftrieb erzeugt werden muss. Durch diesen wird die Stabilität des UAS stark reduziert und die Bildqualität sinkt dramatisch, sodass

diese Art der Bewegung vermieden werden muss. Weiterhin können horizontal kontinuierlich angeordnete Aufnahmen die Rekonstruktion durch leichtere Zuordnung vereinfachen.

4.2.1 Anforderungen für die Aufnahme von Bauwerken aus der Photogrammetrie

Aus den erzeugten Aufnahmen von den Gebäuden sollen hochaufgelöste 3D Modelle berechnet werden. Das wichtigste Kriterium für den Detailgrad der Rekonstruktion ist eine hohe Auflösung am Objekt, also möglichst viele Bildpunkte pro Fläche. Diese Auflösung lässt sich durch den Abstand zwischen Objekt und Kamera beeinflussen, welcher im Spannungsfeld zwischen möglichst hoher Auflösung und möglichst großer abgedeckter Fläche pro Bild im Bereich weniger Meter liegt. Diese geringe Distanz erfordert nicht nur eine exakte Planung um die Anzahl der Bilder zu minimieren, auch während des Fluges muss besondere Vorsicht walten um Kollisionen zu vermeiden.

Unabhängig von der Auflösung müssen weitere Anforderungen aus der Photogrammetrie bei der Routenplanung beachtet werden. Um eine stabile und verlässliche Rekonstruktion der Punktwolke zu ermöglichen, müssen benachbarte Bilder ausreichend Überlappung aufweisen. In der Praxis haben sich beim klassischen Luftbildfall ca. 70% in Flugrichtung und ca. 20% senkrecht dazu bewährt. Ähnliche Werte werden auch für Nahbereichsaufnahmen angesetzt. Die hohe horizontale Überlappung erlaubt es, einzelne schlechte Bilder auszugleichen, da sich dessen Nachbarbilder immer noch genügend überschneiden. Weiterhin dürfen sich benachbarte Bilder nicht ausschließlich durch eine Rotation der Kamera voneinander unterscheiden. Sehr dichte Blickpunkte erzeugen spitze Winkel beim räumlichen Vorwärtsschnitt, die keine genaue Rekonstruktion erlauben, Vergleich Abbildung 5.

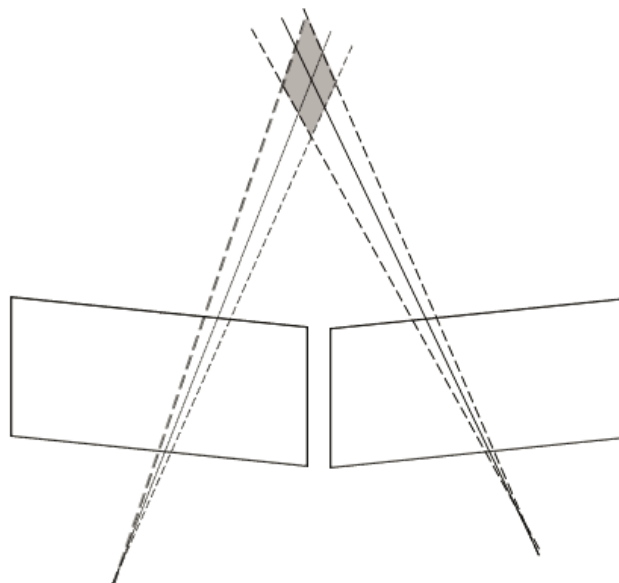


Abbildung 5: Spitzer Winkel beim räumlichen Vorwärtsschnitt

Ungünstige Winkel können auch in anderen Fällen auftreten und für Ungenauigkeiten in der Rekonstruktion sorgen. Besonders zu beachten ist dies bei der Ausrichtung der Blickpunkte in Bezug auf die Gebäudeoberfläche. Wenn die Oberfläche nur in einem sehr spitzen Winkel im Bild sichtbar ist, führen schon kleine Messungenauigkeiten bei der Bestimmung der Bildkoordinaten zu großen Abweichungen in den berechneten 3D-Koordinaten, siehe Abbildung 6.

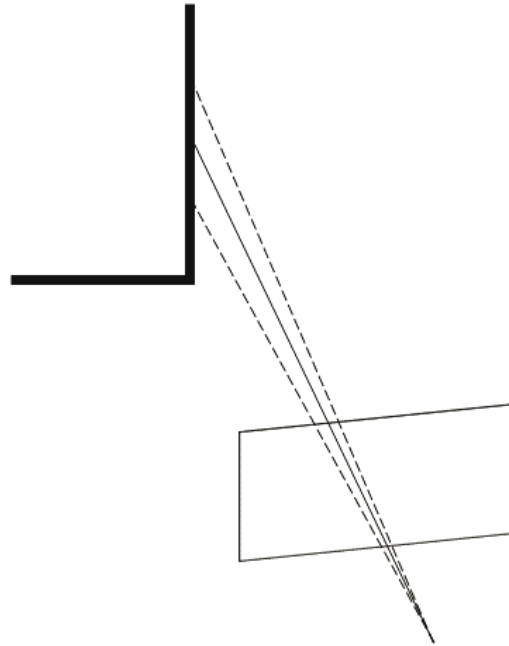


Abbildung 6: Spitzer Winkel zwischen Blickstrahl und Gebäudeoberfläche

4.2.2 Anforderungen an die Flugplanung aus der Thermographie

Bezüglich der Durchführung UAS-gestützter Thermographie bestehen diverse Anforderungen an die Flugplanung. Diese resultieren primär aus den zu erwartenden Witterungseinflüssen, welche einen direkten Einfluss auf den radiativen und konvektiven Wärmeaustausch zwischen Gebäudehülle und der umgebenden Umwelt haben. Die Kriterien gelten also vor allem für die Planung bezüglich der Umgebungsbedingungen und stellen sich wie folgt dar:

- Orthogonale Aufnahme der Fassade
- Durchführung der Thermographie in den Morgenstunden, um Einflüsse durch auftretende Solarstrahlung auszuschließen (Abbildung 7 und Abbildung 8)
- Kein Niederschlag unmittelbar vor und während der Thermographie, um Verdunstungseffekte (Abkühlen der Außenoberfläche) auszuschließen
- Ausrichtung der Fassade möglichst nach Norden, um Abstrahlungseffekte aus erhöhter Solarstrahlung zu reduzieren
- Windstille während der Durchführung der Thermographie
- Stationäre Temperaturbedingungen am untersuchten Gebäude bzw. Gebäudeteil

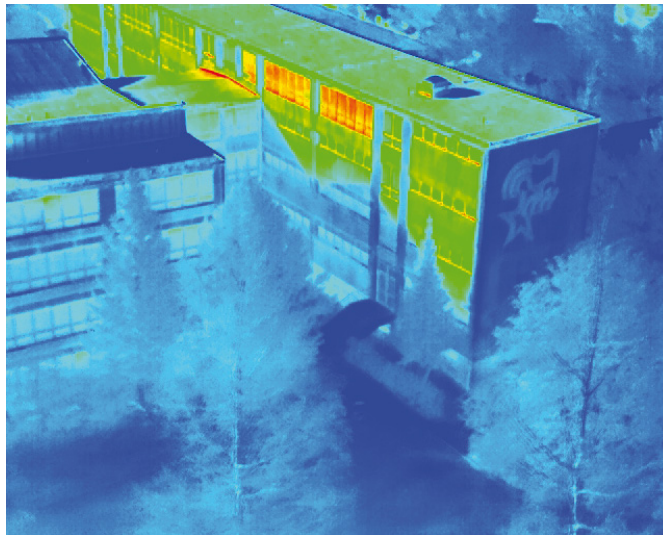


Abbildung 7: Deutliche Schattenbildung (siehe Silhouette in Bildmitte) auf der Fassade und erhöhte Einstrahlung auf Fensterflächen (siehe rot eingefärbte Fenster im obersten Geschoss in Bildmitte) aufgrund solarer Einstrahlung in den Morgenstunden

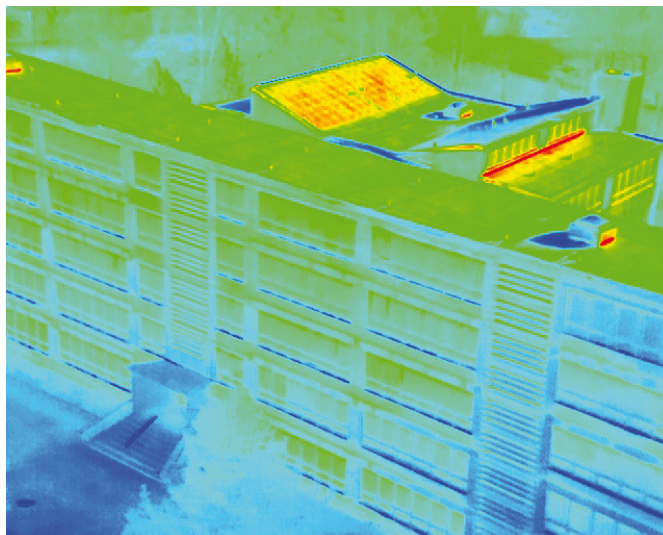


Abbildung 8: Schattenbildung aufgrund solarer Einstrahlung in den Morgenstunden (Dachzugang in rechter Bildhälfte), erhöhte Solareinstrahlung auf linke Dachfläche verringerte Solareinstrahlung auf rechter Dachfläche

Um eine valide Durchführung und Auswertung der Thermographiedaten zu garantieren, bedarf es einer separaten Betrachtung der radiativen und konvektiven Wärmeströme an der Gebäudehülle. Eine Möglichkeit zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten stellt der von NUSSELT-JÜRGES [20] formulierte Zusammenhang dar:

$$h_{ce} = 5,8 + 3,95v_w \quad (1)$$

Ausgehend von diesem Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit an der Bauwerksoberfläche v_w und dem äußeren konvektiven Wärmeübergangskoeffizient h_{ce} kann der konvektive Einfluss auf die Thermographie beschrieben und erfasst werden. Die Beschreibung des radiativen Wärmeübergangs bedarf der Kenntnis des Emissionskoeffizienten, welcher abhängig von Materialart und Oberflächenbeschaffenheit ist.

4.3 Flugroutenplanung und entwickelter Workflow

Verfügbare Routenplanungssoftware ist für den vorliegenden Anwendungsfall nicht geeignet. Meist wird nur die Aufnahme in Nadir-Richtung (Vogelperspektive) – siehe Abbildung 9 – unterstützt, die für die Aufnahme von Fassaden ungeeignet ist, da die Blickwinkel auf die Fassaden sehr spitz sind und nur ungenaue Rekonstruktionen zulassen. Oft werden zusätzlich noch Point of Interest (POI) Flüge unterstützt, bei denen das UAS um ein Objekt kreist und Aufnahmen schräg nach unten macht. Auch wenn diese Aufnahmen eine bessere Darstellung vertikaler Flächen kompakter Objekte ermöglichen, sind sie für die erforderlichen Qualitäten und Genauigkeiten nicht ausreichend.

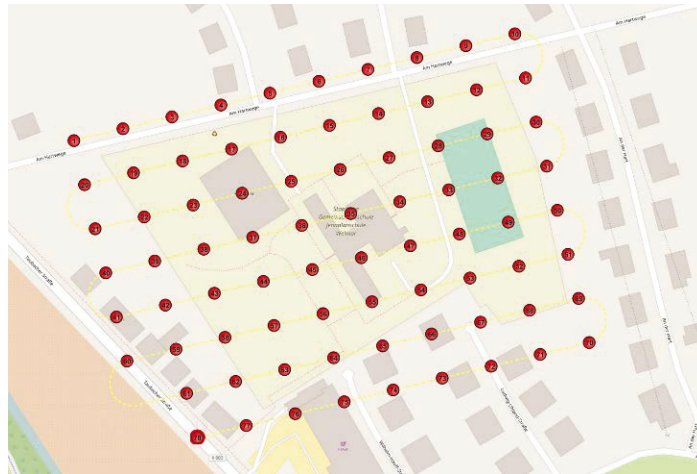


Abbildung 9: Interface vorhandener Flugplanungssoftware (AscTec Navigator)

Da verfügbare Routenplanungssoftware die beschriebenen Anforderungen nicht erfüllen kann, wurden neue Methoden und Verfahren entwickelt, zu einem integralen Workflow kombiniert und in einer grafischen Anwendung umgesetzt.

Dabei wurde verfügbare Drohnen Hardware von professionellen Anbietern, wie dem Projektpartner Intel, verwendet. Um diese zu steuern, kann nur auf die Schnittstellen, die dafür zur Verfügung gestellt werden, zugegriffen werden. Im konkreten Fall können nur die Koordinaten der Blickpunkte in der Reihenfolge in der sie abgeflogen werden sollen auf die Drohne übertragen werden. Dies beschränkt zwar die Möglichkeiten zur Feinsteuerung des UAS, erlaubt es allerdings die Ergebnisse auch mit Modellen anderer Anbieter zu verwenden, da keine herstellerspezifischen Funktionen genutzt werden.

Mit einem verfügbaren groben Modell des Gebäudes können Blickpunkte mit numerisch sehr präzise erscheinenden Positionen berechnet werden. Bei der Interpretation und Bewertung muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Ausgangsdaten nur im Bereich mehrerer Zentimeter genau sind, die berechneten Positionen also nicht genauer sein können. Weiterhin ist zu beachten, dass die Positionssteuerung der UAS auch nur in begrenztem Rahmen exakt ist, sodass ein genaues Erreichen der berechneten Punkte nicht garantiert werden kann. Robustheit

der berechneten Anordnung gegen solche Ungenauigkeiten muss unbedingt bei der Routenplanung berücksichtigt werden.

Für die Planung von Flugrouten, die eine hochgenaue und vollständige Aufnahme des Bauwerkes garantieren, wurde ein Workflow (Abbildung 10) aus mehreren Teilschritten entwickelt und eingesetzt.



Abbildung 10: Workflow zur Routenberechnung

Zuerst wird ein grobes Modell des Bauwerks mit einer Befliegung in sicherer Distanz erstellt oder aus bestehenden digitalen Modellen extrahiert. An diesem Modell werden Blickpunkte berechnet, die vollständige Abdeckung des Bauwerks garantieren und dabei die definierten Qualitätsanforderungen einhalten. Im letzten Schritt wird eine optimale Route durch die Blickpunkte berechnet, die Kollisionen des UAS verhindert und seine Flugeigenschaften beachtet. Die berechneten Routen können dann auf das UAS übertragen und automatisiert abgeflogen werden.

Da für jede Inspektion eigene Anforderungen gelten, muss auf diese eingegangen werden. Manche Inspektionen benötigen nicht die extrem hohe Auflösung, die mit der entwickelten Methode möglich ist, manche setzen spezielle Sensorik ein und haben daher andere Anforderungen. Aus den definierten Anforderungen lassen sich Parameter für die Routenplanung ableiten, welche auch die Eigenschaften des eingesetzten UAS und der Sensorik berücksichtigen. Die Eingangsparameter für die Routenplanung sind der berechnete Abstand zwischen Bauwerksoberfläche und Kamera. Der horizontale und vertikale Abstand zwischen benachbarten Blickpunkten leitet sich aus den genannten Kriterien ab.

4.3.1 Erstellung eines groben 3D-Modells

Obwohl digitale Methoden auch in der Baubranche zunehmend Einzug halten und der Gesetzgeber die Implementierung von BIM forciert, sind nur für einen kleinen Anteil der Bauwerke digitale Modelle vorhanden, die geometrische Informationen in einer Form bereitstellen, die für eine Routenplanung geeignet ist. Sind solche 3D-Modelle vorhanden und georeferenziert, können die benötigten geometrischen Informationen direkt aus dem digitalen Modell extrahiert und verarbeitet werden. In der Regel sind aber keine nutzbaren Modelle vorhanden.

Um in solchen Fällen eine exakte Routenplanung anhand der Gebäudegeometrie durchführen zu können, müssen entsprechende georeferenzierte 3D-Modelle erzeugt werden. Hier bietet sich der Einsatz photogrammetrischer Methoden an, da diese auch für die Erstellung der finalen hochaufgelösten Modelle verwendet werden und somit einfach verfügbar sind. Der Ansatz ist, eine erste grobe Befliegung in sicherem Abstand und ohne Beachtung der konkreten Gebäudegeometrie durchzuführen. Aus den Aufnahmen dieser Befliegung kann dann ein grobes 3D-Modell rekonstruiert

werden, dessen Auflösung und Genauigkeit keineswegs die Anforderungen der Inspektionsaufgabe erfüllen, das aber als Grundlage für die exakte Routenplanung verwendet werden kann.

Für diese erste Befliegung sind die Möglichkeiten verfügbarer Routenplanungssoftware ausreichend. In einer Höhe von mindestens 50 m (je nach Höhe des Inspektionsobjekts auch mehr) werden Kamerapositionen rasterförmig angeordnet und vom UAS abgeflogen. Diese klassischen Luftbilder decken das Inspektionsgebiet ab und erlauben eine erste grobe Rekonstruktion. Um die vertikalen Flächen des Bauwerkes, also Fassaden, Stützen etc., ausreichend abzudecken, werden diese Bilder in Nadir Richtung durch zusätzliche Schrägansichten ergänzt. Für die vorgestellten Referenzbauwerke wurden für die weiteren Arbeiten jeweils ein grobes georeferenziertes 3D-Modell des Bauwerks und der angrenzenden Umgebung erstellt.

Abbildung 11 zeigt das rekonstruierte 3D-Modell der Schule an der Hart mit den entsprechenden Bildpositionen aus Senkrecht- und Schrägaufnahmen mit dem UAS. Dafür wurden 405 Luftbilder aus einer Höhe von ca. 65 m aufgenommen, die zu einer georeferenzierten 3D-Punktwolke mit 170 Mio. Messpunkten und einem 3D-Modell mit 1,5 Mio. Polygonen weiterverarbeitet wurden. Dabei konnte eine Lage- und Tiefenmessgenauigkeit von ca. 2 cm erzielt werden. Die Georeferenzierung erfolgte über tachymetrisch eingemessene Passpunkte. Abbildung 11 (links) zeigt die 3D-Punktwolke, in der noch deutliche Löcher bzw. Fehlstellen zur erkennen sind. Diese Stellen werden durch die Schrägaufnahmen erfasst, sodass ein vollständiges und geschlossenes 3D-Oberflächenmodell entsteht, wie in Abbildung 11 (rechts) gezeigt.

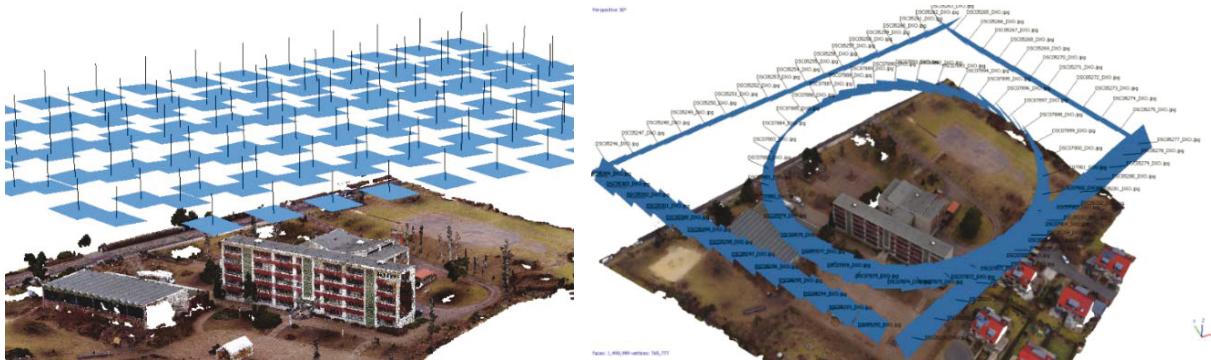


Abbildung 11: Senkrecht- und Schrägbilder zur Erstellung eines groben Modells des Referenzbauwerkes „Schule an der Hart“

Für das Referenzbauwerk Scherkondetalbrücke erfolgte die Grobaufnahme des gesamten Brückenbauwerks mit dem Falcon 8, ebenfalls vollautomatisiert mit insgesamt 410 Luftbildaufnahmen. Dabei wurden Senkrecht- und Schrägaufnahmen in einem durchschnittlichen Abstand von 120 m zum Objekt generiert. Aus den Luftbildern wurde eine 3D-Punktwolke mit 199 Mio. 3D-Messpunkten sowie ein texturiertes 3D-Bauwerksmodell mit 40 Mio. Polygonen und einer Lage- und Tiefenmessgenauigkeit ca. 4 cm erzeugt. Die Georeferenzierung erfolgte über vier Passpunkte am Boden, die tachymetrisch parallel zur Aufnahme eingemessen wurden. Das Brückenbauwerk konnte von oben und von der Seite gut abgebildet

werden. Größere Lücken treten vor allem unterhalb des Bauwerks auf (Unterseite des Brückenüberbaus), da diese Bereiche mit Schrägaufnahmen nicht erfasst werden können. Dennoch ist dieses 3D-Modell sehr gut für die ersten Schritte im Planungsprozess von Maßnahmen am Bauwerk geeignet, da bspw. Maßangaben direkt aus dem Modell mit einer hinreichenden Genauigkeit extrahiert werden können. Abbildung 12 zeigt das erzeugte 3D-Modell der Scherkondetalbrücke mit dem unmittelbar angrenzenden Gelände.



Abbildung 12: Erzeugtes 3D-Modell (grob) der Scherkondetalbrücke mit unmittelbar angrenzendem Gelände

Dieses grobe 3D-Bauwerksmodell wurde für die Berechnung optimaler Aufnahmepfade zur vollautomatisierten Aufnahme des Bauwerks genutzt. Somit wird eine effiziente Flugplanung sowie Aufnahme des Bauwerkes möglich und unnötige Redundanzen in der Bilddatenerfassung vermieden. Dadurch werden die erforderlichen Daten zur Erfassung des Bauwerkszustandes auf ein Minimum reduziert. Weiterhin kann somit eine möglichst sichere Aufnahme des Bauwerkes in konstantem Abstand gewährleistet werden. Durch die Erfassung des unmittelbar angrenzenden Geländes und des Bewuchses ist ebenfalls eine einfache Kollisionsvermeidung auf Basis der 3D-Geometrien möglich. Ergänzt durch eine zukünftig auf dem Flugsystem integrierten Live-Kollisionsvermeidung kann dies zu einem äußerst sicheren Aufnahmeprozess führen.

4.3.2 Blickpunktberechnung

Für die vollständige und hochaufgelöste Bauwerksaufnahme muss eine Blickpunktconfiguration berechnet werden, mit der dies robust möglich ist. Eine Blickpunktconfiguration besteht aus Kamerapositionen um das Bauwerk herum mit den zugehörigen Blickrichtungen. Blickrichtungen sind dabei so definiert, dass die Bilder horizontal ausgerichtet sind, also keine Verdrehung der Kamera um die Blickachse vorliegt.

Um eine solche Blickpunktconfiguration zu berechnen, wurden zwei Methoden entwickelt und implementiert, die mit der Geometrie des groben Modells arbeiten.

Beide Ansätze arbeiten mit konstantem Abstand zwischen Kamera und Objekt und daher mit parallelem Versatz zur Oberfläche.

Die Basis bildet für beide Methoden das in Abbildung 13 dargestellte grobe 3D-Bauwerksmodell, hier als Beispiel die Schule an der Hart.

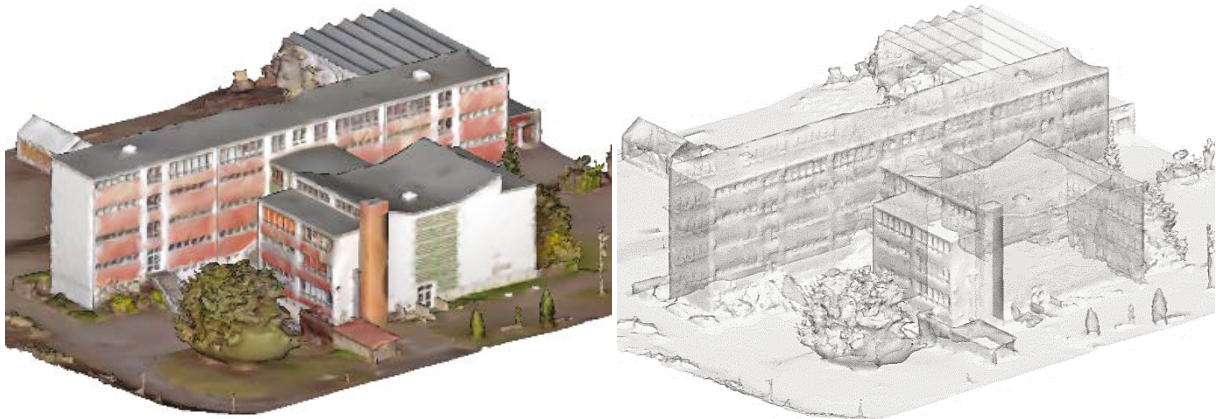


Abbildung 13: Grobes 3D-Bauwerksmodell der Schule an der Hart

Die erste Methode basiert darauf, das Modell in Scheiben zu schneiden und für jede der Scheiben eine parallele Versatzkontur zu bestimmen, auf der die Blickpunkte platziert werden. In einem ersten Schritt wird das Modell mit parallelen horizontalen Ebenen geschnitten, die zueinander den berechneten Abstand der Blickpunkte haben.

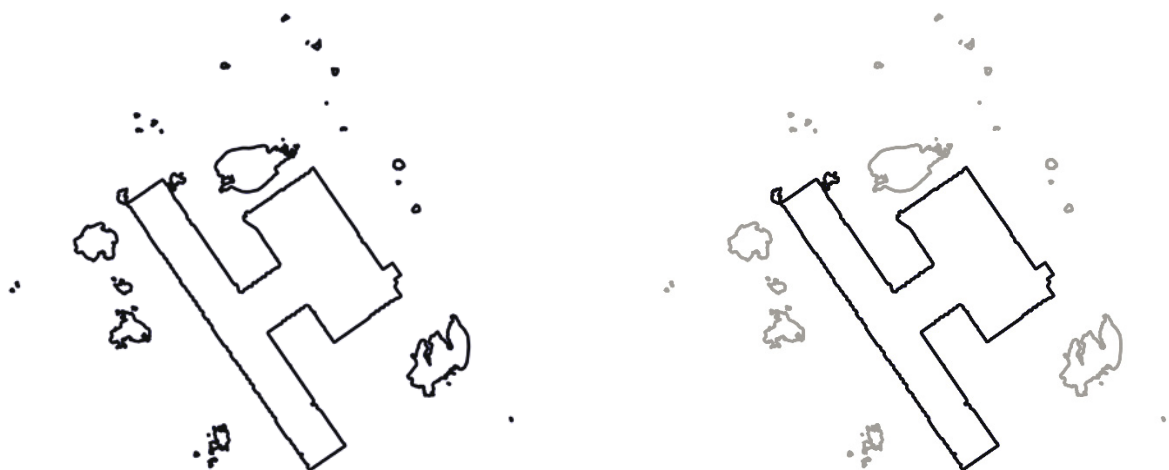


Abbildung 14: Originale und gefilterte Schnittform des Referenzobjektes

Da in dieser Schnittkontur auch die Umgebung enthalten ist, für die keine Blickpunkte geplant werden sollen, muss hier noch ein Filter angewendet werden, der nicht relevante Schnittformen entfernt. Im Rahmen des Projektes wurden geometrische Regeln definiert, deren Anwendung am Referenzobjekt alle nicht relevanten Schnittformen entfernt.

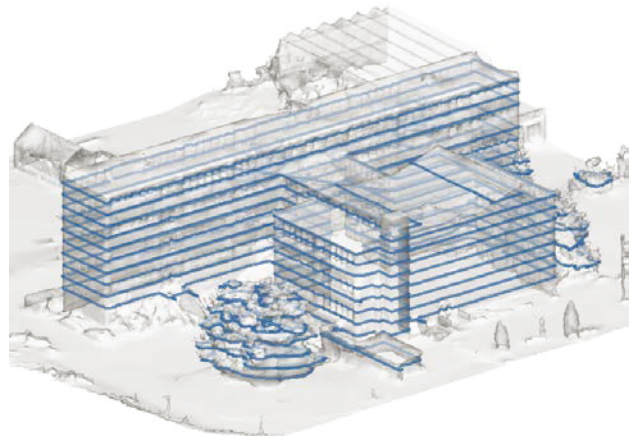
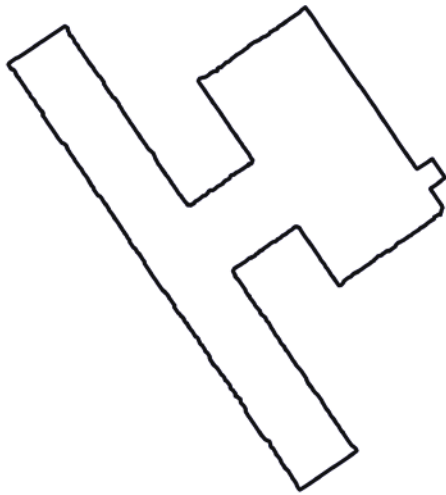


Abbildung 15: Bereinigte Schnittkontur des Bauwerks

Die extrahierte Gebäudekontur wird mit einer parallelen Versatzlinie versehen, die an jeder Stelle den berechneten Abstand zur Gebäudeoberfläche hat.

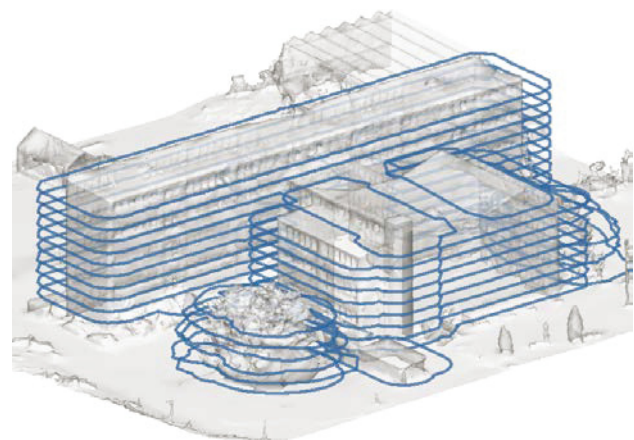
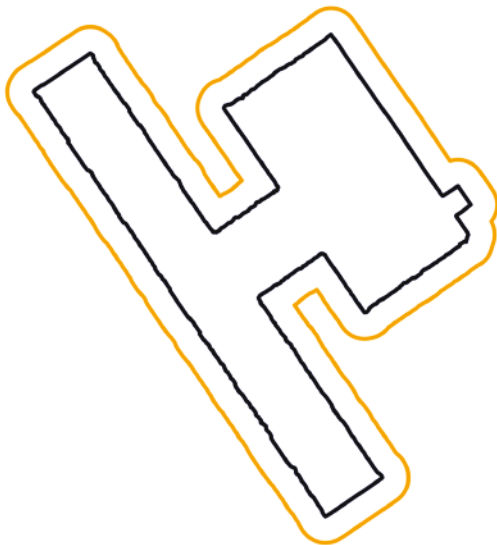


Abbildung 16: Parallele Versatzlinie um die Bauwerkskontur

Auf dieser Versatzlinie werden die Blickpunkte gleichmäßig verteilt. Da die Kontur an Außenecken Kreisbögen bildet, auf denen mehrere Blickpunkte angeordnet sind, ist eine ausreichende Abdeckung der Ecken, welche mehr Bilder für eine stabile Rekonstruktion benötigen, gewährleistet.

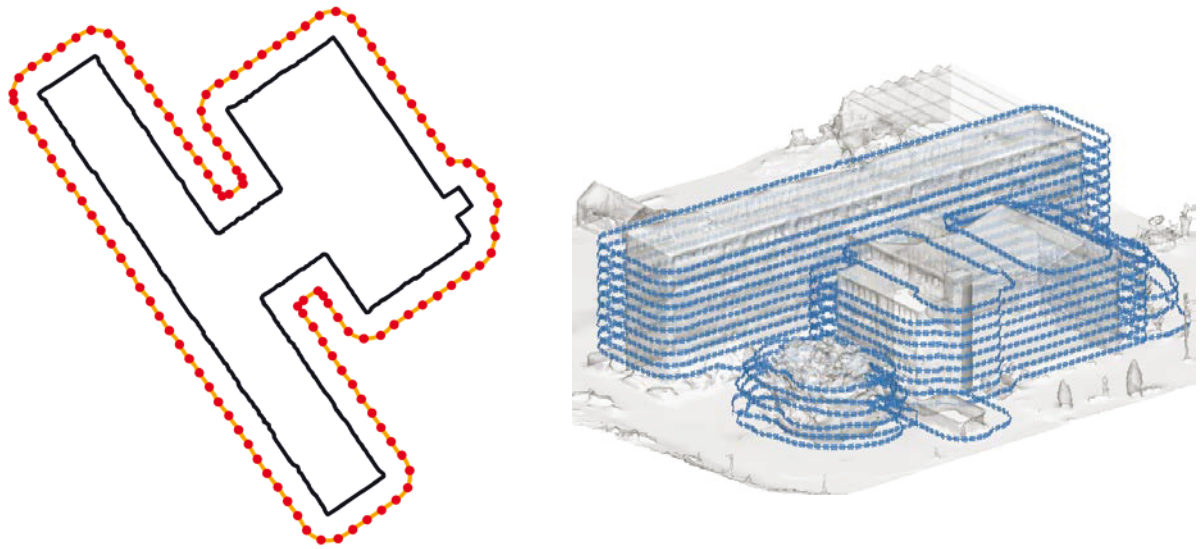


Abbildung 17: Blickpunkte für die Gebäudekontur

Zu den berechneten Blickpunkt Positionen werden noch die entsprechenden Blickrichtungen benötigt. Da der Abstand zwischen Bauwerksoberfläche und Versatzlinie schon genau der definierten Entfernung zwischen Kamera und Bauwerk entspricht, kann die Blickrichtung über den nächsten Punkt auf der Oberfläche berechnet werden. Da Fassaden nicht perfekt glatt sind und zum Beispiel Fenster Unregelmäßigkeiten einbringen, werden die Blickrichtungen eines Abschnittes gemittelt. Abbildung 18 zeigt eine schematische Darstellung der Blickpunkte und zugehörigen Blickrichtung für eine Gebäudestruktur.

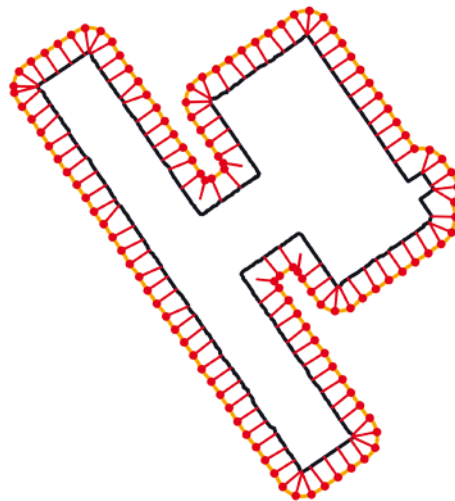


Abbildung 18: Blickpunkte und Blickrichtung für die Gebäudekontur

Diese Blickpunktberechnung wird für alle horizontalen Streifen durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse kombiniert und bilden eine Blickpunktconfiguration, die alle vertikalen Flächen des Bauwerks vollständig abdeckt. Horizontale Flächen können mit horizontalen Schnitten durch das Modell nicht erfasst werden.

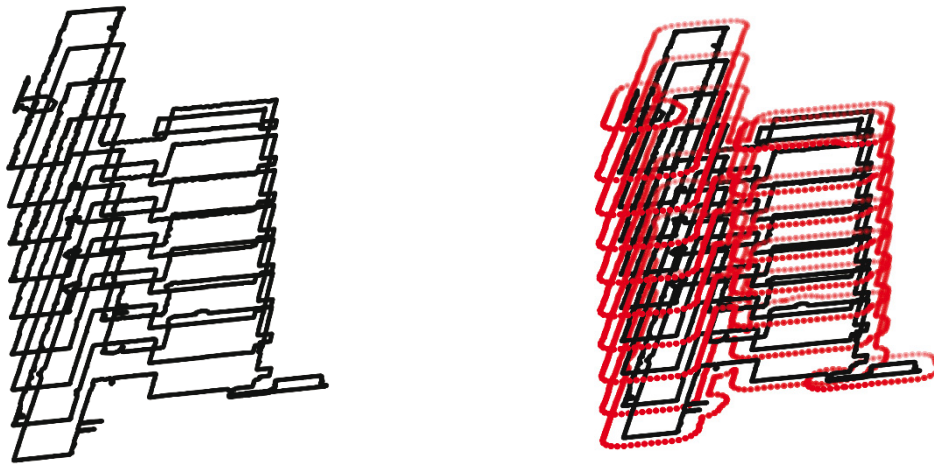


Abbildung 19: Kombinierte Blickpunkte von allen horizontalen Streifen

Um auch horizontale Flächen vollständig und verlässlich abbilden zu können, wird der beschriebene Prozess noch mit zwei Gruppen senkrecht zueinanderstehender vertikaler Schnittebenen wiederholt.

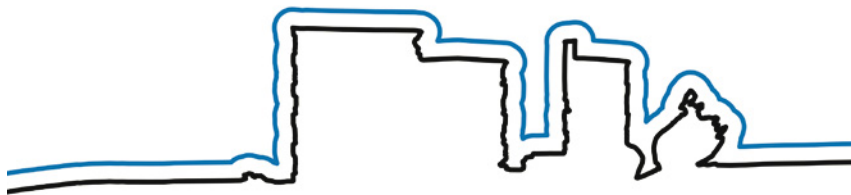


Abbildung 20: Vertikaler Schnitt durch das Bauwerk mit Versatzlinie

Hierbei ist zu beachten, dass die vertikalen Schnittformen keine geschlossenen Linien mehr sind, da das berechnete grobe Modell nur die Geländeoberfläche und deshalb nicht die Unterseite enthält. Die resultierenden Blickpunkte und -richtungen werden mit den bereits vorhandenen kombiniert, wobei redundante Blickpunkte herausgefiltert werden und somit nun eine Blickpunktconfiguration bilden, die die vollständige Abdeckung aller Gebäudeoberflächen und Robustheit gegenüber einzelnen schlechten Bildern garantiert.

Da diese Methode nur mit lokalen Versatzlinien arbeitet und keine weiteren Annahmen bezüglich der Gebäudegeometrie trifft, können beliebige Gebäudeformen mit diesem Verfahren inspiziert werden.

Die zweite entwickelte Methode zur Berechnung von Blickpunktconfigurationen basiert auf der Berechnung von Versatzflächen, die das gesamte 3D Gebäudemodell

umhüllen. Dafür wird ein signed distance field (SDF) berechnet, das für ein Volumen um das Gebäudemodell an jedem Punkt die kürzeste Entfernung zu einem Punkt auf der Gebäudeoberfläche enthält. In diesem SDF kann dann eine Isofläche berechnet werden, eine Fläche durch alle Punkte, die den definierten Abstand zur Gebäudeoberfläche haben. Auf dieser Fläche werden dann die Blickpunkte entsprechend der definierten horizontalen und vertikalen Abstände verteilt mit den Blickrichtungen senkrecht zur Isofläche.

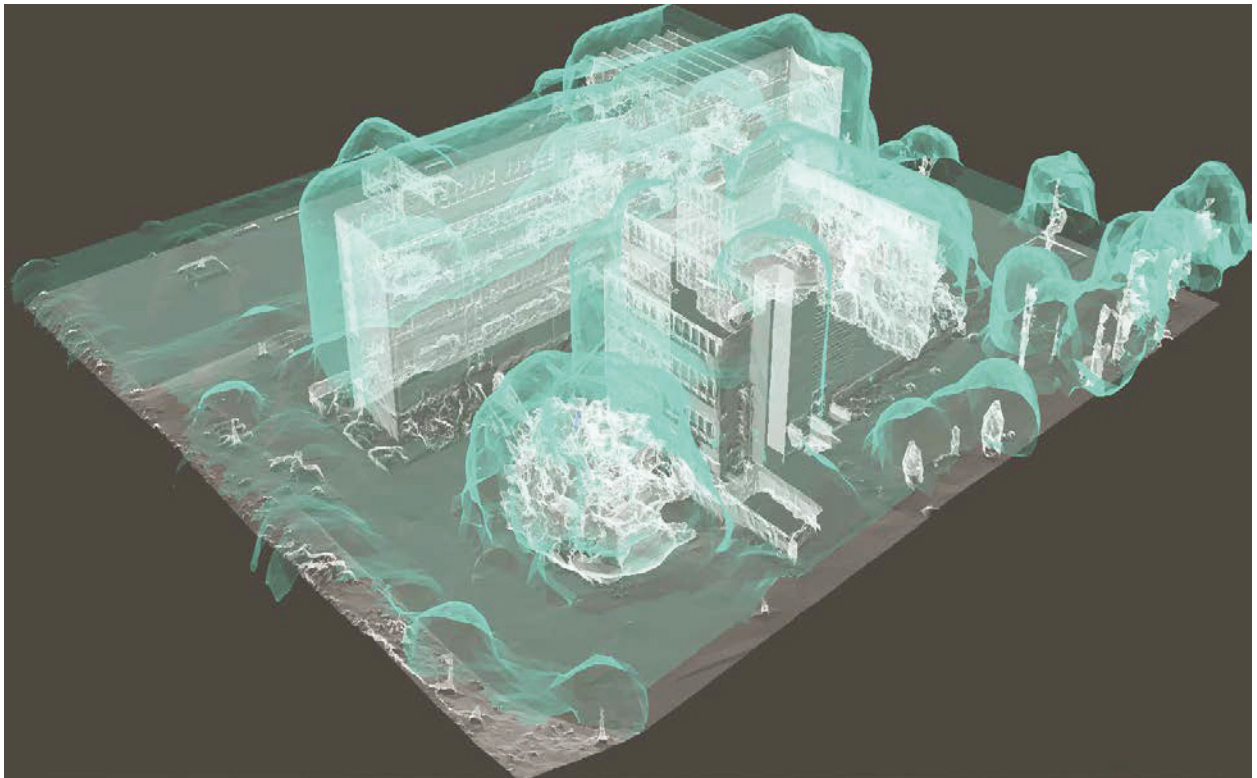


Abbildung 21: Isofläche um das Bauwerk

Die Methode in der beschriebenen Implementierung ist für diesen speziellen Anwendungsfall nur schwer anwendbar, da sehr große Geometrien behandelt werden und trotzdem die Blickpunktpositionen sehr genau berechnet werden müssen. Dafür muss das Volumen sehr fein gerastert werden, was im Hinblick auf Speicherbedarf und Rechendauer nicht praktikabel ist. Um dies zu umgehen wurde in diesem Projekt eine Methode entwickelt, die nur die wirklich benötigten Punkte berechnet und speichert, dadurch sehr schnell und effizient ist.

Dabei wird ein Raster um das Bauwerk herum konstruiert, das als Abstände die berechneten horizontalen und vertikalen Kameraabstände hat. Für jeden Rasterknoten wird der kürzeste Abstand zum Bauwerk berechnet. Ist ein Knotenpunkt weniger als die halbe Rastergröße von der Zieldistanz entfernt, wird ein Blickpunkt auf der Verbindungslinie zwischen Knotenpunkt und nächstem Punkt auf der Gebäudeoberfläche berechnet, der exakt den definierten Abstand hat. Dieser

berechnete Punkt wird als Blickpunkt aufgenommen, die entsprechende Blickrichtung ist zum nächsten Punkt auf der Oberfläche.

Die beschriebene Methode funktioniert unabhängig von der speziellen Gebäudegeometrie und kann daher für alle Bauwerke verwendet werden. Da mit globalen, 3D Versatzflächen gearbeitet wird, haben lokal hervorstehende Punkte, z.B. Pfosten oder Schornsteine, Einfluss auf benachbarte Blickpunkte und können so die Konfiguration verzerren, wie in Abbildung 23 sichtbar.

Vergleich der beiden Methoden

Für einen aussagekräftigen Vergleich der beiden Varianten wurden sie an einem Modell der Schule an der Hart evaluiert. Abbildung 22 zeigt das Ergebnis der Scheiben Methode und Abbildung 23 das Ergebnis der Versatzflächen-Methode.

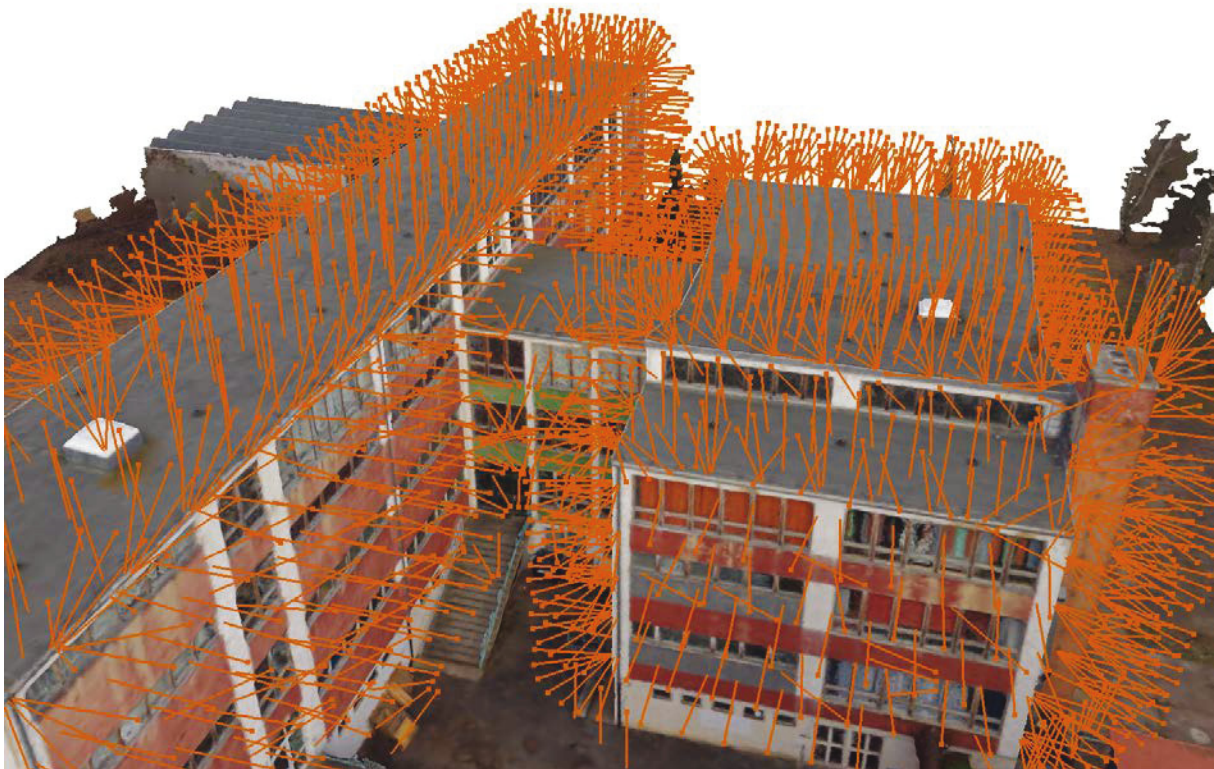


Abbildung 22: Ergebnis der Scheiben-Methode

Beide Blickpunktkonfigurationen wurden mit identischen, realistischen Rahmenparametern berechnet: Als Kamera wurde eine Sony Alpha 7R mit einer Ziel-Pixelgröße von 0,9 mm verwendet. Daraus berechnet sich ein Abstand zur Bauwerksoberfläche von 3 m. Mit der Scheiben-Methode wurden ca. 6400 Aufnahmeplätze berechnet, mit der Versatzflächen-Methode ca. 4500.



Abbildung 23: Ergebnis der Versatzflächen-Methode

Wie in den Bildern zu erkennen ist, sind dabei unterschiedlich gute Lösungen entstanden. Speziell an Innenecken sind mehr Blickpunkte notwendig als an anderen Stellen, wie in Abbildung 22 zu sehen. Während die Scheiben-Methode dort weitere Punkte durch Verkürzung der Abstände einfügt, ist dies in der Versatzflächen-Methode nicht möglich, da die Blickrichtung keinen Einfluss bei der Positionsberechnung hat. Weiterhin sind bei der Versatzflächen-Methode keine Blickpunkte möglich, die näher an einem Hindernis als am Objekt sind, in Abbildung 23 zu sehen an den Blickpunkten die in Richtung des Bodens anstatt auf die Fassade schauen.

Die geringe Anzahl an Blickpunkten für die Versatzflächen-Methode lässt sich hier nicht durch eine bessere Verteilung erklären, sondern durch algorithmisch bedingte Lücken in der Abdeckung.

Weiterentwicklung für komplexe Bauwerksgeometrien

Die Weiterentwicklung der voran beschriebenen Methode erfolgte in Verbindung mit umfangreichen Feldversuchen am Referenzbauwerk Scherkondetalbrücke. Im Gegensatz zur Schule an der Hart, als typisches Hochbauwerk mit Fassaden- (Frontaufnahmen) und Dachaufnahmen von oben, sind an diesem Bauwerk auch die Unterseiten, wie beim Fahrbahnüberbau, zu erfassen. Darüber hinaus müssen die Aufnahmen in wesentlich kürzerer Distanz (ca. 2,5 m) erfolgen, da die Luftbilddaten für eine hochgenaue und detaillierte 3D-Rekonstruktion sowie für die automatische Schadenserkenkung (z.B. Risse) genutzt werden sollen. Aufgrund der kurzen Distanz zum Objekt und der Aufnahmen unterhalb des Bauwerks kommt es zu Einschränkungen beim GNSS-Empfang, was bei der Planung aber insbesondere bei der Befliegung vor Ort zu berücksichtigen ist. Bei den Tests am Bauwerk hat sich

schnell gezeigt, dass nur durch eine Kombination aus GNSS-basierter Flugplanung und einer aktiven Kollisionvermeidung bzw. Abstandskontrolle zum Bauwerk eine sichere Aufnahme gewährleistet werden kann. Zur stark schwankenden GNSS-Qualität kommen die speziellen Windverhältnisse in Bauwerksnähe hinzu. In einem ersten Schritt könnte ein „mobiles und lokales RTK-Netz“ für das Flugsystem, welches im Bereich der Befliegung am Bauwerk eingerichtet wird, eine sichere Befliegung gewährleisten. Allerdings ist diese Lösung technisch sehr aufwändig und darüber hinaus flugsystemgebunden und wird von den Herstellern bisher nur für Forschungs- und Entwicklungszwecke zur Verfügung gestellt. Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen beispielhaft einen automatisch generierten Flugpfad mit optimaler Bildanordnung an einem Brückenausschnitt, der Aufnahmeabstand zum Objekt beträgt ca. 2,5 m.

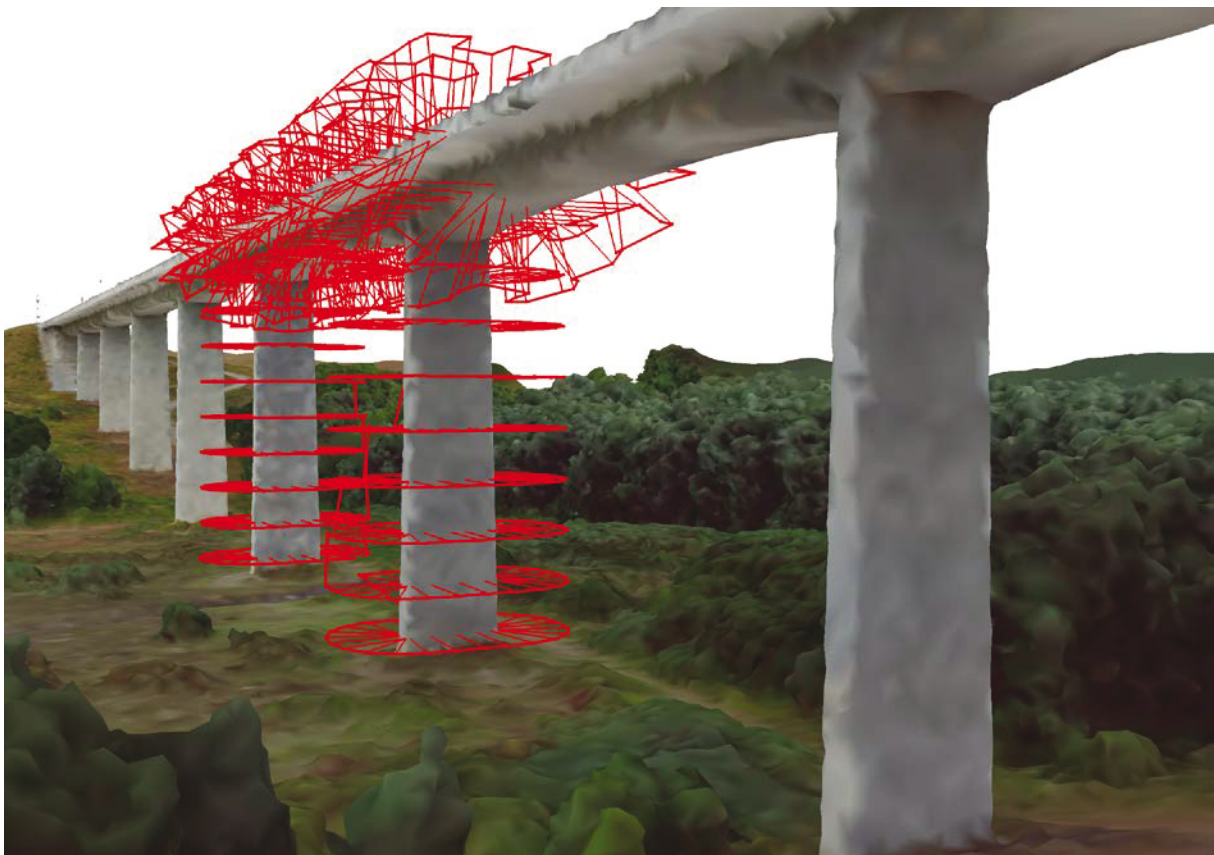


Abbildung 24: Automatisch generierte Befliegungsrouten für einen Brückenabschnitt aus zwei Pfeilern und dem dazwischenliegenden Überbau auf Basis des groben 3D-Modells

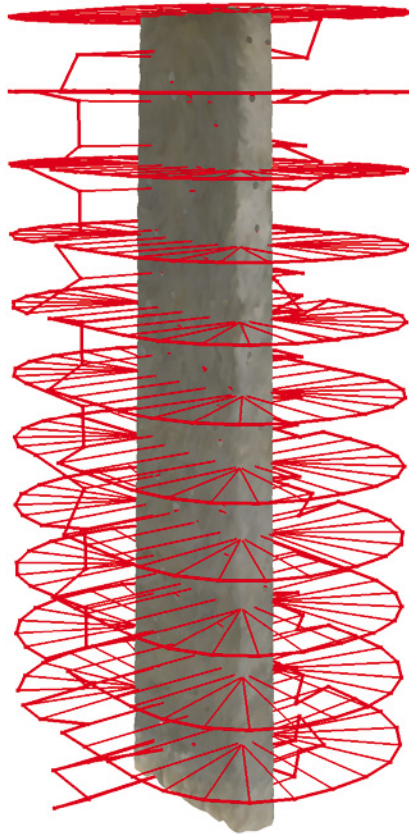
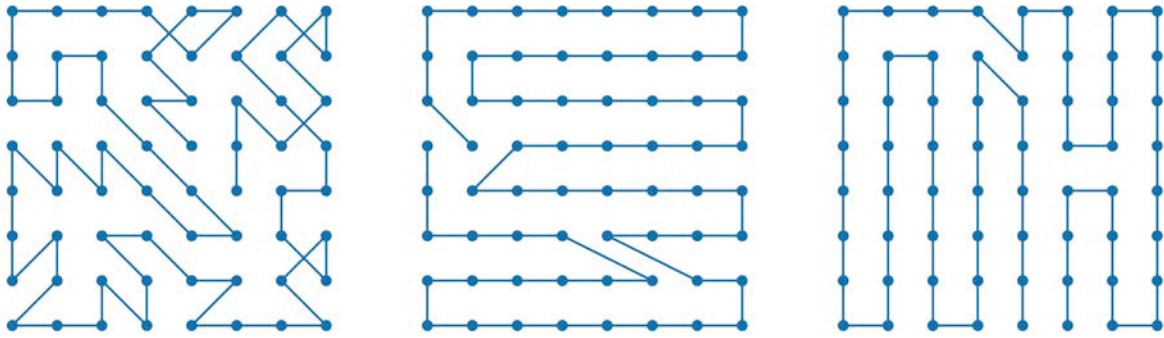


Abbildung 25: Automatisch generierte Flugroute zur Aufnahme eines Pfeilers im Abstand von ca. 2,5 m zur Bauwerksoberfläche (optimale Bildanordnung)

4.3.3 Routenplanung

Die beschriebenen Methoden zur Bestimmung einer passenden Blickpunkt-konfiguration berechnen nur die Blickpunktpositionen und -richtungen. Für eine automatisierte Datenerfassung ist allerdings noch die Reihenfolge, in der die Positionen abzufliegen sind, sehr wichtig. Mit einer optimierten Route entlang der berechneten Positionen kann die Dauer zu Aufnahme des Bauwerkes signifikant reduziert werden, während eine Planung im Hinblick auf Kollisionsvermeidung unerlässlich ist.

Für die Routenplanung werden die berechneten Positionen benötigt, sowie ein geometrisches Modell des Bauwerkes inklusive der Umgebung und anderen Hindernissen wie Flugverbotszonen. Je nach Anwendungsfall und Umgebungsbedingungen können für die Routenplanung verschiedene Randbedingungen gelten. In der deutschen Gesetzgebung ist vorgeschrieben, dass der Pilot ständigen Sichtkontakt zum UAS halten muss. Dies gilt auch für den automatischen Wegpunktmodus. Daher kann es sinnvoll sein, die Routenplanung so zu gestalten, dass der Pilot mit kurzen Laufstrecken das Fluggerät im Blick behalten kann, ohne ihm um das Gebäude folgen zu müssen. Hier bietet es sich an, dass sich das Fluggerät in vertikalen Schlangenlinien entlang der Bauwerksoberfläche bewegt, siehe Abbildung 26c. In anderen Situationen, in denen die Sichtbeziehung einfach zu halten ist, können andere Routen bevorzugt werden, die beispielsweise die horizontale Kontinuität der Bilder besser unterstützen, wie etwa in Abbildung 26b.



a) Priorität: Keine

b) Priorität: Horizontale Routen

c) Priorität: Vertikale Routen

Abbildung 26: Verschiedene Zielstellungen für die Routenplanung

Das Problem der Routenplanung durch eine Menge gegebener Punkte mit gleichem Start- und Endpunkt (Landeplatz) wird mathematisch durch das Problem des Handlungsreisenden (Travelling salesperson problem – TSP) modelliert. Ziel ist es die kürzeste Route zu finden und dabei jeden Ort genau einmal zu besuchen. Ein verwandtes Problem, das Vehicle Routing Problem, kann verwendet werden um dasselbe Problem mit mehreren Fluggeräten zu lösen, die gemeinsam alle Punkte anfliegen.

Zur Lösung des TSP existieren etablierte Algorithmen, die auch Probleme mit vielen Tausend Punkten lösen können. Grundlage für die Lösung ist die Berechnung der Distanzen zwischen den einzelnen Kamerapositionen. Für eine neutrale Lösung, wie in Abbildung 26a zu sehen, werden die absoluten Abstände zwischen jeweils zwei Punkten gespeichert. Das Ergebnis ist eine symmetrische Matrix, deren Dimension gleich der Anzahl an Blickpunkten ist. Wenn horizontale Routen wie in Abbildung 26b bevorzugt werden sollen, werden vertikale Distanzen künstlich mit einem Gewichtungsfaktor >1 belegt und so weniger attraktiv als Teil der Lösungsstrecke. Für Routen, die die vertikale Richtung bevorzugen sollen wie in Abbildung 26c werden horizontale Distanzen künstlich gestreckt. Die gewichteten Distanzen beschreiben ein TSP, das mit herkömmlicher Software gelöst werden kann. Die resultierende Route kann dann auf das UAS übertragen und abgeflogen werden.

4.3.4 Anwendung mit graphischer Benutzeroberfläche

Um die entwickelten Methoden anzuwenden, zu visualisieren und die Ergebnisse nutzbar zu machen, wurde eine Anwendung mit graphischer Benutzeroberfläche erstellt. Sie enthält vor allem Funktionen zur Visualisierung des Modells, der Blickpunkte und Routen, aber auch für das Laden und Speichern der relevanten Daten. Darüber hinaus können alle Schritte des beschriebenen Workflows ausgeführt und konfiguriert werden. Abbildung 27 zeigt das Interface zur Eingabe der Parameter, die die Blickpunktberechnung beeinflussen. Es werden die gewünschte Überlappung benachbarter Bilder, die benötigte Auflösung am Objekt und die Kennzahlen der verwendeten Kamera eingegeben. Aus diesen Informationen wird der Abstand zum Objekt und zu benachbarten Blickpunkten berechnet.

Image overlap:

Horizontal overlap [%]:

Vertical overlap [%]:

Camera resolution:

Horizontal resolution [pix]:

Vertical resolution [pix]:

Sensor size:

Horizontal size [mm]:

Vertical size [mm]:

Target resolution [mm/pix]:

Focal length [mm]:

Abbildung 27: Interface zur Konfiguration der Blickpunktberechnung

Das in Abbildung 28 gezeigte Interface ist die zentrale Ansicht der Anwendung. Das Gebäudemodell wird mit den verfügbaren Blickpunktkonfigurationen und Flugrouten angezeigt, sodass eine visuelle Überprüfung durch den Benutzer möglich ist. So können schnell Unstimmigkeiten und vor allem Kollisionen mit der Umgebung festgestellt werden.

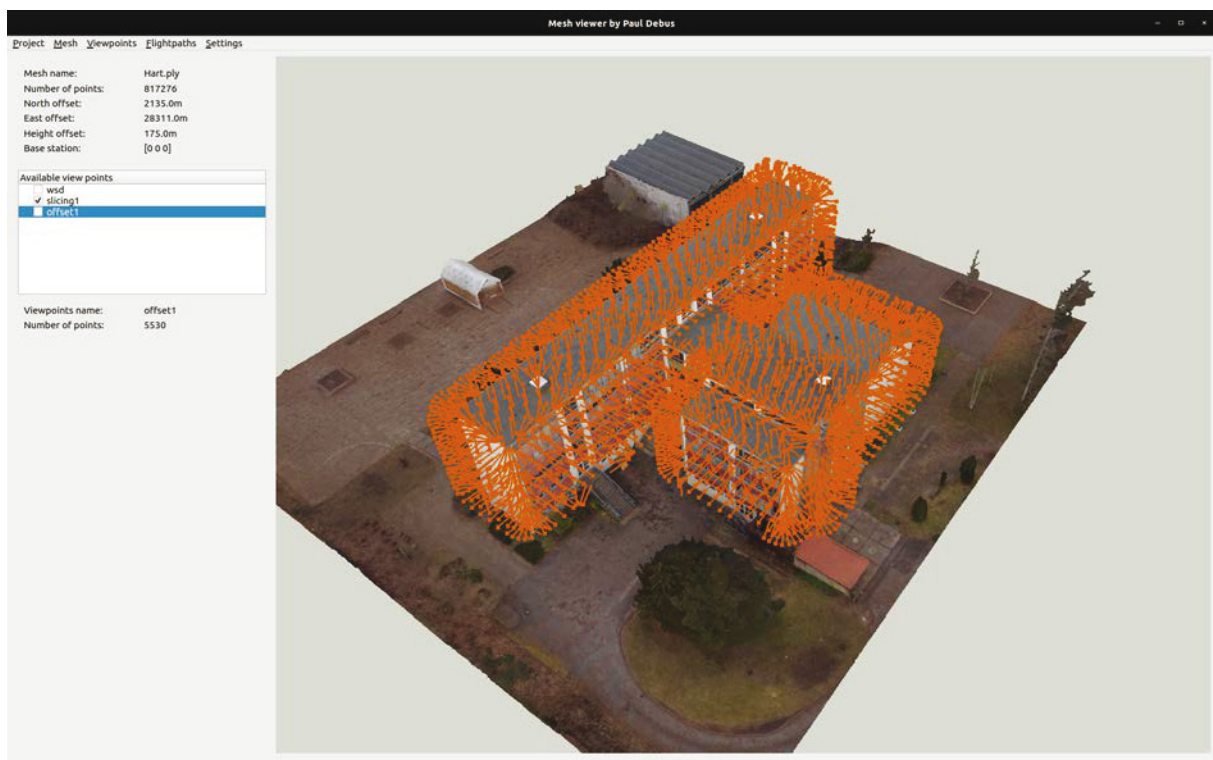


Abbildung 28: Haupt-Interface der entwickelten Anwendung

Weiterhin soll die Anwendung auch die Weiterverwendung der berechneten Routen unterstützen. Dafür wurde ein Export für die verwendeten UAS implementiert. Da die automatisierte Steuerung des UAS mit Höhenwerten relativ zur Startposition arbeitet, muss diese vor dem Export festgelegt werden. Dazu wurde das in Abbildung 29 gezeigte Interface erstellt.



Abbildung 29: Interface zur Definition der Start- und Landeposition

Das Gelände wird aus der Vogelperspektive gezeigt und eine Definition eines Startpunktes ist möglich. Die Nord- und Ostkoordinaten im lokalen Koordinatensystem werden aus der Cursorposition angezeigt, die Höhe des gewählten Punktes wird aus dem Modell berechnet. Diese Angaben können dazu verwendet werden, auch tatsächlich vom angegebenen Ort zu starten, da alle Höhen relativ zu diesem angefliegen werden und sich Fehler in der Positionierung auf die gesamte Flugmission auswirken.

4.3.5 Grenzen der entwickelten Methode

Obwohl die entwickelte Methode bereits Flugrouten berechnet, die eine hochgenaue Aufnahme der Bauwerke ermöglicht, besteht noch einiges Entwicklungspotential. Ziel ist es, nicht nur gute, sondern optimale Flugrouten zu berechnen. Optimalität heißt in diesem Fall mit der minimalen Anzahl an Bildern vollständige Abdeckung zu garantieren, die Robustheit gegenüber einzelnen schlechten Bildern und Abweichungen in den Blickpunktpositionen besitzt und durch die eine optimal kurze Flugroute geplant wird unter Berücksichtigung der Flugeigenschaften des eingesetzten UAS. Um mögliche Verfahren zur Berechnung von Blickpunktkonfigurationen bewerten und einschätzen zu können, werden Algorithmen benötigt, die eine Prognose der erzielbaren Qualität mit einem gegebenen Pfad geben

können. Hier sind Verfahren denkbar, die Sichtbeziehungen zwischen Kameras und Punkten auf der Gebäudeoberfläche auswerten. Alternativ könnte auch eine Aufnahme und Rekonstruktion simuliert werden um die Abdeckung prüfen zu können.

In der Anwendung der Versatzflächen Methode fiel auf, dass die Abdeckung nicht lückenlos ist, da zum Beispiel hervorstehende Pfosten die Blickpunktanordnung stören und verzerren. Die Methode muss angepasst werden, um solche Effekte zu eliminieren.

Bei der Scheiben-Methode stellen vor allem Innenecken eine Herausforderung dar, wie in Abbildung 30a zu sehen. Bei Außenecken ist durch den längeren Umkreis eine gute Abdeckung sichergestellt, während eine gleichmäßige Verteilung der Blickpunkte bei Innenecken für Lücken sorgt. Abbildung 30b zeigt eine mögliche Blickpunktanordnung und Flugroute, die eine gute Abdeckung der Ecke sicherstellen. Da parallele Versatzlinien um das Bauwerk verwendet werden, ist eine Lösung wie in Abbildung 30b auf diesem Wege nicht erreichbar, sodass eine Erweiterung oder Adaption des Verfahrens notwendig ist.

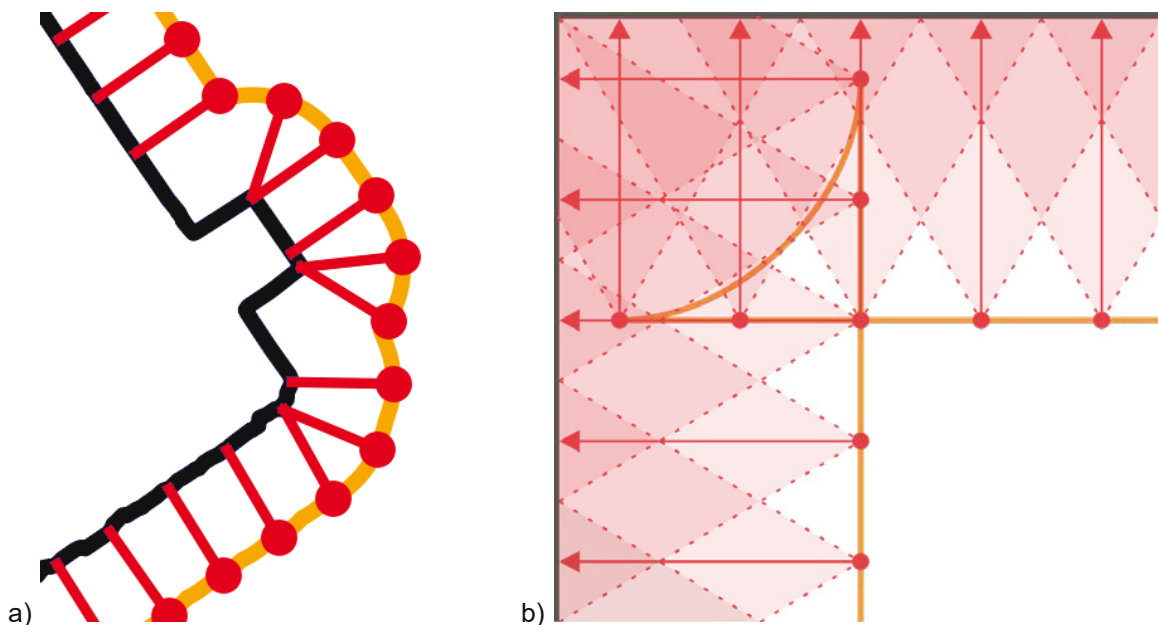


Abbildung 30: Darstellung der Problemstellung von Aufnahmen eines Eckbereiches, a) lückenhafte Abdeckung einer Innenecke, b) Innenecke mit vollständiger Abdeckung

Bisher werden die Blickpunktberechnung und die Routenplanung als zwei getrennte Schritte behandelt. Perspektivisch bietet es sich an, die beiden Schritte zu verbinden, um Synergieeffekte nutzen zu können. Beispielweise können stetige Flugpfade die Datenerfassung enorm beschleunigen, wenn sich das UAS in gleichmäßigen Kurven bewegen kann ohne zu bremsen. Dazu können die nötigen Lenkbewegungen für eine Route in die Positionsrechnung einbezogen werden, um durch kleine Änderungen deutlich bessere Flugpfade zu erzeugen. Ein anschauliches Beispiel sind Türme, die durch eine steigende Spirale gut abgedeckt werden können, welche aber mit den vorliegenden Verfahren in Routen aus mehreren übereinanderliegenden Ringen resultieren.

4.4 (Teil-) Automatisierte Flugmissionen

Nachdem die Flugrouten in einem vorgelagerten Schritt berechnet wurden, können sie für die Bauwerksinspektion genutzt werden. Je nach verwendetem UAS stehen unterschiedliche Steuerungsmöglichkeiten zur Verfügung. Die im Rahmen dieses Projektes verwendeten Falcon 8 von Intel bieten eine Steuerung über die mitgelieferte Navigator Software an, die auf einem Computer mit Windows Betriebssystem ausgeführt werden kann. Die Software selbst stellt einige einfache Routenplanungsmöglichkeiten zur Verfügung, erlaubt aber auch das Laden von berechneten Blickpunkten. Diese können über ein spezielles CSV Format importiert werden. Hierbei sind besonders numerische Genauigkeiten und Rundungsfehler zu beachten, da die verwendeten globalen Landeskoordinaten sehr große Werte haben und schon kleine Fehler in einer Zahl große Auswirkungen auf die Position des UAS haben können.

Wenn die berechnete Blickpunktconfiguration in der Navigator Software geladen wurde, können die Blickpunkte noch einmal visuell überprüft werden. Das Fluggerät wird an die während der Routenplanung definierte Startposition gebracht. Der Laptop, auf dem die Software ausgeführt wird, wird per Kabel mit der Fernsteuerung des UAS verbunden und die automatisierte Befliegung kann gestartet werden. Dabei ist es wichtig, dass der Pilot zu allen Zeiten Sichtkontakt zum UAS hält und bereit ist einzugreifen, wenn Kollisionsgefahr besteht. Trotz genau geplanter Routen können vor Ort Abweichungen auftreten. Speziell die absolute Positionsgenauigkeit der GNSS unterliegt starken Schwankungen, sodass es vorkommen kann, dass die gesamte Flugroute um mehrere Meter verschoben ist und manuelle Eingriffe zur Kollisionsvermeidung notwendig sind.

Zur Vermeidung dieser Probleme gibt es mehrere Ansätze. Eine Möglichkeit ist, zusätzliche und genauere Systeme zur Positionsbestimmung einzusetzen, etwa lokale Positionssysteme oder komplexe Empfänger auf dem UAS. Eine andere Möglichkeit ist lokale Kalibrierung der absoluten Position. Je länger das UAS Positionsdaten sammelt, desto genauer werden diese. Zusätzlich kann man einen Referenzpunkt mit bekannten Koordinaten anfliegen und dann den Abstand zwischen Soll- und Ist-Positionen durch einen globalen Offset auf alle Blickpunktpositionen zu kompensieren. So können nicht nur Kollisionen vermieden, sondern auch die Positionsgenauigkeit und damit die Qualität der resultierenden Daten verbessert werden.

Darüber hinaus müssen in Vorbereitung einer Flugmission weitere Randbedingungen beachtet werden, insbesondere das Wetter. Schnee, Regen, Nebel und ähnliche Wetterphänomene schließen eine erfolgreiche Mission ebenso aus wie starke Winde. Auch Sonnenschein muss besonders beachtet werden. Sonnenschein bringt Schatten auf die Gebäudeoberfläche, die bei der Rekonstruktion zu Fehlern führen können, insbesondere wenn der Schatten zwischen zwei Aufnahmen gewandert und nun an einer anderen Stelle ist. Auch Reflexionen und Spiegelungen sind problematisch für eine gute Rekonstruktion.

Für thermographische Aufnahmen ist Sonnenschein sogar noch kritischer, da die Gebäudeoberfläche ungleichmäßig aufgeheizt wird und somit das Ergebnis verfälscht. Wind beeinflusst außerdem die konvektive Wärmeabgabe, sodass auch hier falsche Ergebnisse erzeugt werden.

5. Thermographie und thermisch-energetische Gebäudesimulation

Die thermisch-energetische Gebäudesimulation dient primär der Beschreibung der Luft- und operativen Temperaturen im Gebäude sowie der Bestimmung des Heizwärme- bzw. Endenergiebedarfs des betrachteten Gebäudes (siehe Abbildung 31). Hierzu wird das zu untersuchende Gebäude im Rahmen einer Modellbildung unter bauphysikalischen Gesichtspunkten in einem numerischen Gebäudemodell abgebildet. Dieses umfasst neben der Gebäudegeometrie auch die physikalischen Größen der Baustoffe und -teile, wie z.B. Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Infiltrationsrate, sowie die aus einer individuellen Nutzung resultierenden Einflüsse auf das Gebäude. Diese Einwirkungen können beispielsweise die Luftwechselrate oder nutzungsabhängige interne Wärmegewinne betreffen.

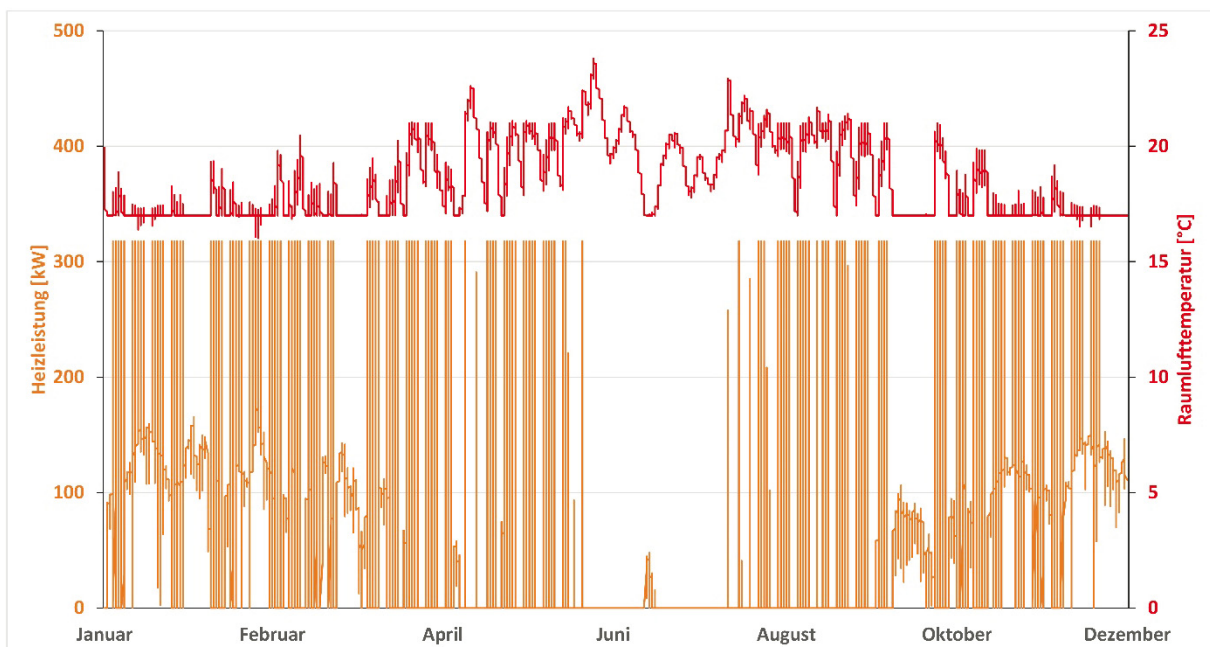


Abbildung 31: Visualisierung des Heizwärmebedarfs sowie der Raumlufttemperatur für die Schule an der Hart

In Abbildung 31 wird der Jahresverlauf des Heizwärmebedarfs sowie der Innenraumtemperatur ersichtlich. Während der Wintermonate findet eine regelmäßige Beheizung mit ebenfalls geregelter Temperatur statt. Im Sommer hingegen liegt über einen langen Zeitraum eine freischwingende Phase des Innenraums an.

Geometrisches Gebäudemodell

Als Quellen des geometrischen Gebäudemodells dienen in der Regel bestehende Bauwerkspläne, zumeist in Kombination mit sogenannten Bauwerkstypologien. Das real existierende Gebäudemodell muss häufig stark vereinfacht werden, um den Anforderungen der späteren Simulationsprozesse gerecht zu werden. Die Generierung dieser modellhaften Gebäudegeometrie stellt dabei mit ca. 80% den größten Anteil der Modellbildung dar. Als weitere Quelle der Gebäudegeometrie

können zudem GIS herangezogen werden. Diese stellen neben den oft nur begrenzten Informationsgehalten (z.B. hinsichtlich exakter Dachneigung und transparenter Bauteile) nur einen zeitlich fixierten Zustand des Bauwerks dar. Hieraus können erhebliche Differenzen zum real vorliegenden Bauwerk resultieren. Zudem werden durch die notwendigen Modellvereinfachungen häufig subjektive Einflüsse in das abgeleitete Gebäudemodell eingebracht [21] und [22].

Eine alternative Möglichkeit zur Generierung des geometrischen Gebäudemodells stellt die Nutzung von Bauwerks-Informations-Modelle dar. Diese bilden im Idealfall die reale Bausubstanz hinsichtlich der Geometrie sowie der Materialien und Bauteilaufbauten ab und beschleunigen somit den Prozess der Modellbildung. Des Weiteren wird dadurch die Prozesskette objektiver gestaltet. Dabei wird häufig ein fortgeschrittener Detaillierungsgrad der Eingangsmodelle vorausgesetzt, der beispielsweise die Modellierung von Räumen, Bereichen oder Zonierungen erforderlich macht [23].

Eine weitere Prozessbeschleunigung bietet die UAS-gestützte Geometrieaufnahme der Gebäude. Diese Art der Ermittlung der Gebäudegeometrie für eine anschließende Überführung in BIM- bzw. Gebäudesimulations-Anwendungen kann bislang allerdings noch nicht problemlos durchgeführt werden.

Die größte Einschränkung, die eine solche UAS-gestützte Aufnahme von Gebäuden mit sich bringt, ist, dass ausschließlich die äußere Gebäudehülle aufgenommen und in einem entsprechenden Modell abgebildet werden kann. Innenbauteile (z.B. Decken und Wände) können folglich nicht registriert werden. Daraus resultiert, dass das abgeleitete Gebäudemodell in der Regel ein 1-Zonen-Modell ist und somit ein geringeres Genauigkeitsmaß aufweist. Im Zuge einer Quartiersbetrachtung bringen diese Begleiterscheinungen des 1-Zonen-Modells (durch eine beschleunigte Simulation des Gebäudebestands) Vorteile mit sich. Hinsichtlich dieser Tatsache ist eine Abwägung hinsichtlich Genauigkeit und Berechnungszeit erforderlich.

Bauphysikalische Modellbildung

Neben der Erstellung eines geometrischen Gebäudemodells bedarf es im Rahmen einer thermisch-energetischen Gebäudesimulation, wie eingangs bereits dargestellt wurde, immer der Zuordnung bauphysikalischer Material- und Bauteilkennwerte. Diese Informationen werden im Regelfall ebenfalls aus den vorhandenen Bestandsplänen extrahiert. Bei unvollständigen Planunterlagen oder der Betrachtung mehrerer Gebäude oder Stadtquartiere werden häufig Gebäudetypologien herangezogen. Solche Typologien geben statistische Werte für die betreffenden Größen wieder und ermöglichen die Zuordnung dieser Werte nach Baujahr, Gebäudetyp und Standort. Als Vorarbeit solcher Typologien wurde ein umfangreicher, repräsentativer Gebäudebestand untersucht und beschrieben. Die anschließende Kategorisierung erfolgte anschließend auf Basis des Baualters und individueller Zusatzkriterien. Als bekannte Typologien sind folgende Quellen zu nennen:

- IWU (Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt)
- IfB (Institut für Bauforschung, Hannover)
- ZUB (Zentrum für Umweltbewusstes Bauen, Kassel)

Eine Auswahl aus den Typologien ist allerdings aufgrund des häufig unbekanntem Sanierungsstandards im Bestand nur schwierig durchzuführen. In dieser Hinsicht bietet der Einsatz von UAS-gestützter Thermographie die Möglichkeit zur Beurteilung der thermischen Gebäudehülle. Die aus den Thermogrammen abgeschätzten U-Werte ermöglichen in Verbindung mit dem Baujahr eine Auswahl des zutreffenden Gebäudetyps und die damit verbundene Zuordnung spezifischer Bauteilaufbauten und -qualitäten. Des Weiteren kann durch die quantitative Erstellung und Auswertung von Thermogrammen die Arbeit mit bereits existierenden Gebäudetypologien erheblich erleichtern und insbesondere Arbeitsprozesse auf Quartiersebene deutlich vereinfachen.

Nutzung von BIM für die thermisch-energetische Gebäudesimulation

Die Kombination mit BIM-Modellen ermöglicht zudem die direkte Speicherung und Referenzierung der generierten Informationen über die Gebäudehülle. Diese umfasst nicht nur ausschließlich die Geometrie, sondern auch die Konstruktion und deren Aufbau sowie die zugehörigen Materialkennwerte. In [24] werden sowohl die Methode des Building Information Modeling im Allgemeinen, als auch mögliche Schnittstellen zur Anwendung der thermisch-energetischen Gebäudesimulation basierend auf IFC-Modellen beschrieben. Hierbei ist die Definition von speziellen Räumen nötig, welche später in thermische Zonen übersetzt werden. Mögliche Prozessabläufe hinsichtlich der Arbeit mit unterschiedlichen Oberflächen, Modellstrukturen in 2D und 3D, sowie die Nutzung und Kompatibilität unterschiedlicher Formate wurden in [21] beschrieben und in ausgewählten Szenarien bewertet. In [22] wird eine Methode zur Anreicherung von IFC-Dateien mit Bauteilinformationen beschrieben, welche mit der Software EnergyPlus ausgewertet werden können. Eine konsistente Abbildung aller Eingangswerte und Simulationsergebnisse wird hierbei nicht erreicht. Bestehende Lösungsansätze sind dabei häufig mit einem hohen Maß an Modellkonventionen verbunden [25] und weisen daher erhebliche Beschränkungen hinsichtlich der verwendeten Simulationssoftware oder des angestrebten Datenaustauschs auf. Der Austausch beschränkt sich in der Regel auf geometrische Aspekte [24] oder ausgewählte BIM-fähige Software, wie ArchiCAD oder Autodesk Revit. Diese Konventionen und Beschränkungen auf bestimmte Software bieten keinen flexiblen und offenen Austausch von beliebigen Bauwerksmodellen zu Simulationsanwendungen [26].

Aufgrund der bestehenden Einschränkungen hinsichtlich der Nutzung von BIM-Modellen für die thermisch-energetische Gebäudesimulation, wurde die Entwicklung einer Schnittstelle mit möglichst wenigen und einfachen Modellierungskonventionen angestrebt. Die Motivation ist, dass die Nutzung bestehender BIM-Modelle für die geometrische Modellbildung den Arbeitsprozess erheblich beschleunigt und objektiver gestaltet.

5.1 Zustandsentwicklung von Bauwerken auf Basis thermographischer Daten

Die Bewertung der thermischen Gebäudehülle dient der Bestimmung des bauphysikalischen Gebäudealters. Dieses muss nicht zwangsläufig mit dem Baualter übereinstimmen und kann durch energetische Sanierungsmaßnahmen (z.B.

Aufbringen zusätzlicher Dämmschichten) beeinflusst werden. Verwendungszwecke der Thermographiedaten können dabei sowohl qualitativer (Identifizierung und Beschreibung von Wärmebrücken oder Leckagen) als auch quantitativer (Bewertung von Wärmebrücken oder der gesamten thermischen Gebäudehülle) Natur sein.

Die Thermographie findet bereits seit geraumer Zeit im Rahmen der Bauwerksinspektion Einsatz, unterliegt in diesem Fall - ohne den Einsatz von UAS - jedoch erheblichen Einschränkungen. Einerseits bleibt die Betrachtungsebene auf die terrestrische Ansicht beschränkt, dies hat zur Folge, dass orthogonale Fassadenaufnahmen nur im unteren Bereich des Gebäudes möglich sind und Dachaufnahmen oder Untersuchungen schwer zugänglicher Bereiche in der Regel komplett entfallen. Zudem ist die Reproduktion der Aufnahmen aufgrund variierender Bearbeiter nur eingeschränkt gegeben.

Für die Aufnahme und Bewertung der thermischen Gebäudehülle des Referenzbauwerkes „Schule an der Hart“ wurde zur Erprobung die terrestrische (Hand) Thermographie in Kombination mit UAS-basierter Thermographie genutzt. Für eine Validierung der quantitativen Auswertung der erstellten Thermogramme wurden an allen Messstellen ebenfalls Kontaktmessungen mit Temperatursensoren (θ_i , θ_{si} , θ_{se} , θ_e) und Wärmestrommessplatten (q) durchgeführt.

An zwei aufeinander folgenden Tagen im Februar 2018 wurde die Thermographie an den zuvor ausgewählten Messstellen durchgeführt. Aus der zeitgleich durchgeführten Validierungsmessung mit Wärmestrommessplatten und Temperatursensoren ergab sich für diesen Zeitraum ein thermisch stationärer Zustand der Außenkonstruktion. Ausgehend von Voruntersuchungen des Bauwerks, bei denen der Emissionskoeffizient ε der Außenoberfläche bestimmt wurde sowie die zuvor genannte Sensortechnik installiert wurde, konnten die Thermogramme quantitativ ausgewertet werden.

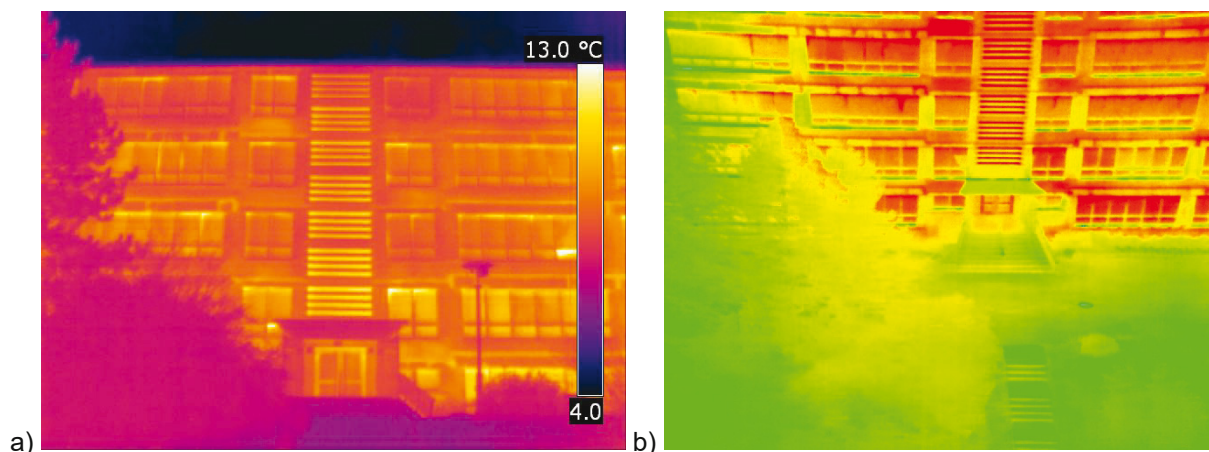


Abbildung 32: a) terrestrisches Thermogramm und b) UAS-gestütztes Thermogramm des Referenzgebäudes

Aus Abbildung 32 werden die zahlreichen Restriktionen ersichtlich, denen die terrestrische Thermographie unterliegt. Durch den Wechsel der Perspektiven werden Aufnahmen mit verringerten Störeinflüssen möglich (z.B. Vegetation oder Bebauung).

Durch den Einsatz des UAS wird der Nutzer befähigt auch schwer zugängliche Perspektiven für die Bauwerksanalyse zu nutzen. Des Weiteren ergibt sich durch die flexible Aufnahmeposition auch die Möglichkeit zur schnellen Inspektion und Bewertung von Dachflächen und neuralgischen Punkten der Dachkonstruktion (Abbildung 33). Ersichtlich werden hier beispielsweise die Wärmebrückeneffekte aus einbindenden Befestigungen im Dach (als rot dargestellte Elemente auf dem Dach) sowie das Fugenmuster im Stoßbereich der erstellten Betonfertigteile.

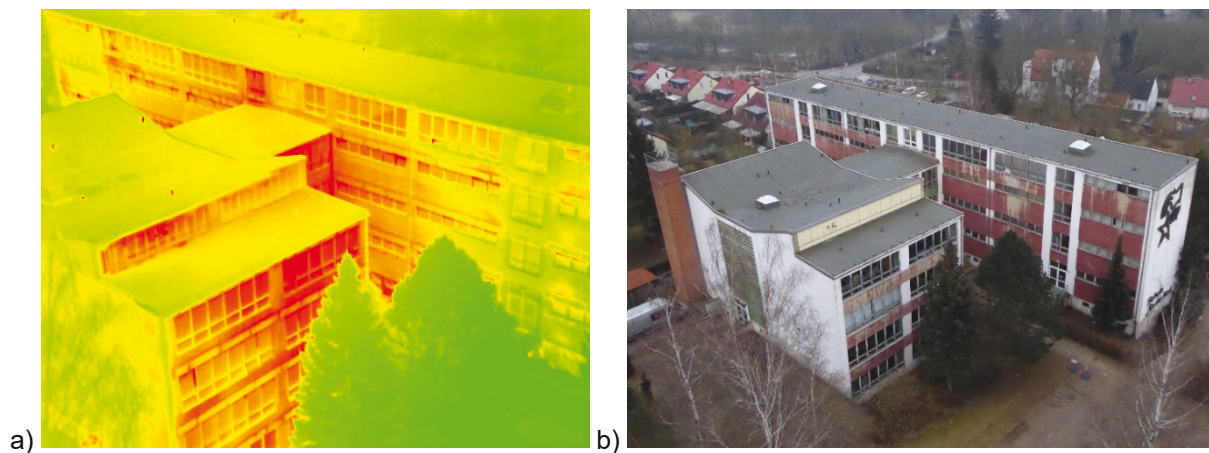


Abbildung 33: a) UAS-gestütztes Thermogramm und b) UAS-gestützte RGB-Aufnahme des Referenzgebäudes

Die Kombination der UAS-gestützten Thermographie mit herkömmlichen bauphysikalischen Testmethoden eröffnet weitere Möglichkeiten der Bauwerksinspektion. Naheliegender ist die Kombination mit einer Blower-Door Messung, bei der ein Über-/Unterdruck im Gebäude erzeugt wird und somit Rückschlüsse auf die Gebäudedichtheit vorgenommen werden können. Bei Anlegen eines Überdrucks treten aufgrund des erhöhten Austritts warmer Innenluft auf der Außenhülle Wärmebrücken und undichte Gebäudestellen im Thermogramm verstärkt hervor.

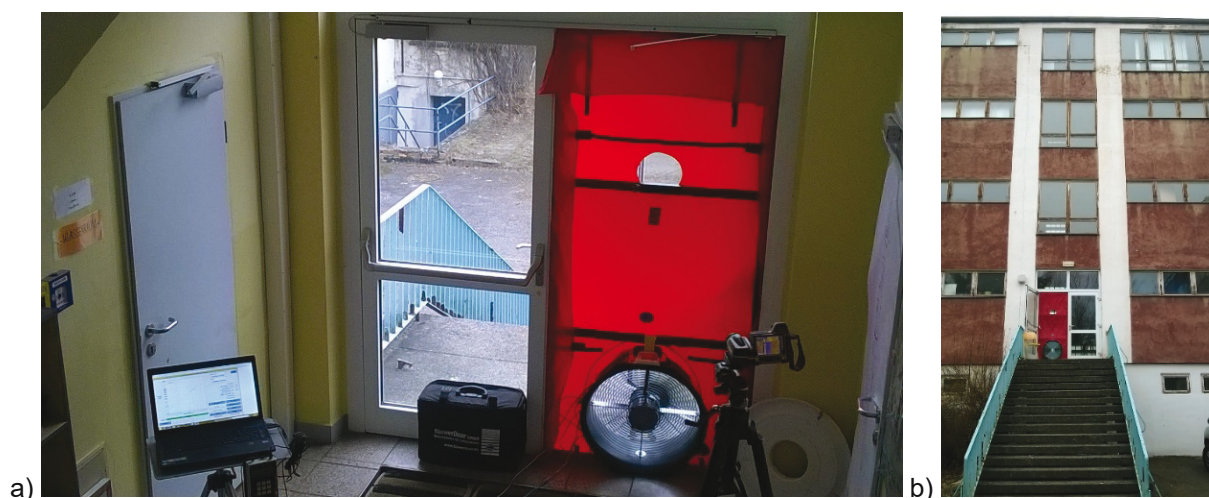


Abbildung 34: a) Innenansicht der Blower-Door, b) Außenansicht der Blower-Door

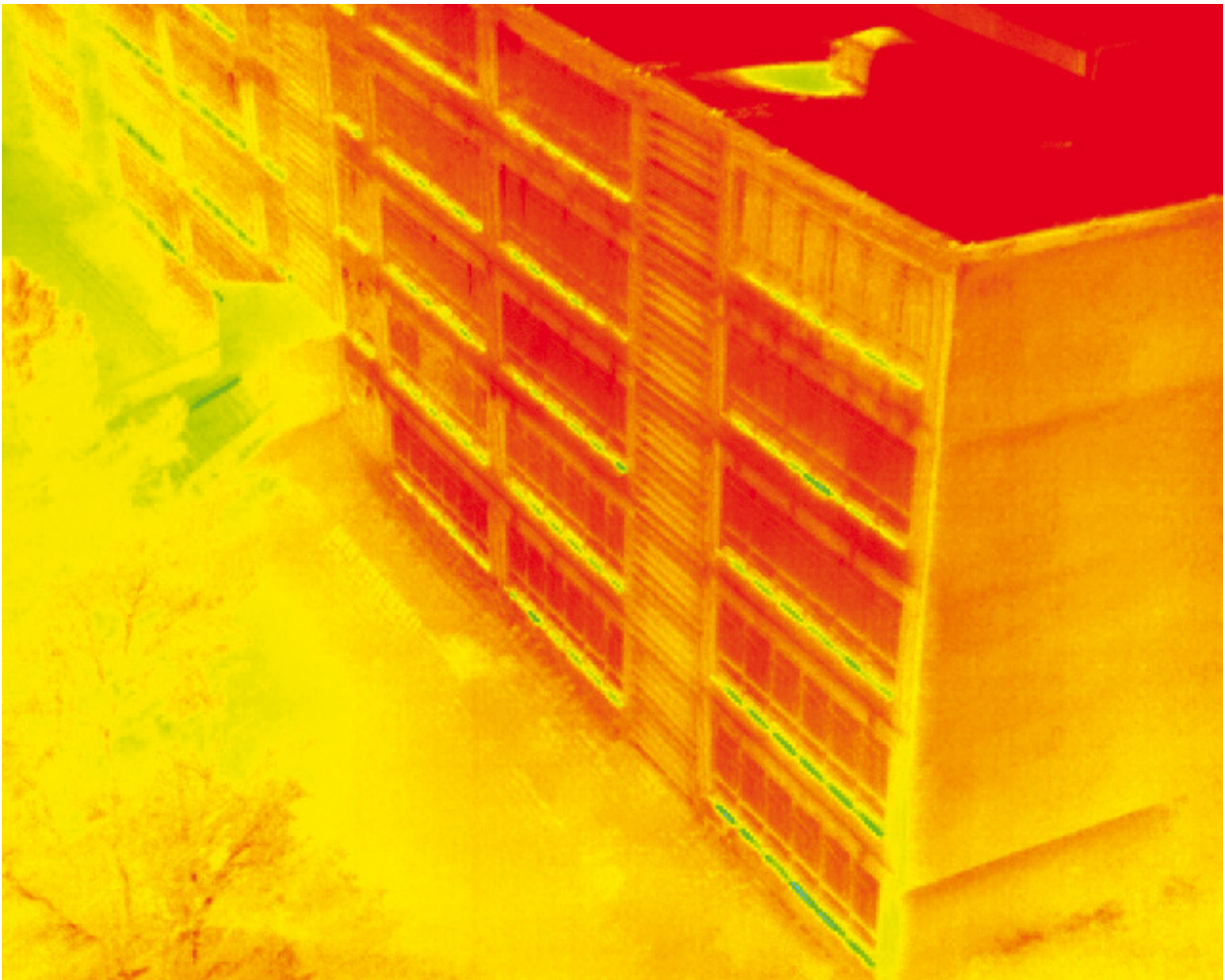


Abbildung 35: erhöhte Außenoberflächentemperatur bei unsanierten Fenstern (ca. 9,5°C), verringerte Außenoberflächentemperatur bei sanierten Fenstern (ca. 7,5°C) (oberes Geschoss, rechts); Aufnahme während Blower-Door-Test

Grundlage der Beschreibung des U-Werts der Gebäudefassade stellt eine Berechnung des sogenannten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) dar. Basis dieses Bauteilkennwerts ist zunächst die Beschreibung des Wärmedurchlasswiderstands ausgehend von den erstellten Thermogrammen. Hierzu werden aus Thermogrammen die gemessenen Oberflächentemperaturen extrahiert und als Eingangsgröße für folgende Berechnungsvorschrift genutzt (2).

$$R_{\text{IR}} = \frac{(T_{\text{si}} - T_{\text{se}})}{\varepsilon\sigma(T_{\text{se}}^4 - T_e^4) + h_{\text{ce}}(T_{\text{se}} - T_e)} \quad (2)$$

Die Berechnungsvorschrift wird durch die Aufteilung des Gesamtwärmestroms q_{ges} in einen radiativen Anteil $q_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{se}}^4 - T_e^4)$ sowie einen konvektiven Anteil $q_c = h_{\text{ce}}(T_{\text{se}} - T_e)$ gebildet. Wird die anliegende Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außenoberfläche in ein Verhältnis mit der Summe dieser Wärmeströme gesetzt, so ergibt sich der Wärmedurchlasswiderstand.

Für eine Validierung der ermittelten U-Werte wurden Kontaktmessungen an den Messpunkten durchgeführt. Ein Vergleich der erlangten Messwerte wird in Tabelle 2 gegeben. Es zeigen sich sehr gute Übereinstimmung der R-Werte aus den Thermogrammen mit zeitgleich erlangten Werten aus der Validierungsmessung.

Tabelle 2: Vergleich von Thermographie und Validierungsmessung am Referenzobjekt

	Aufnahmezeitpunkt	R_{IR} [(m ² K)/W]	R_{WSP} [(m ² K)/W]	δ [-]
MS 1	09.02.2018, 08:50 Uhr	0,62	0,64	4 %
MS 2	09.02.2018, 08:20 Uhr	0,42	0,44	6 %
	10.02.2018, 08:35 Uhr	0,41	0,44	6 %

Diese Art der UAS-gestützten Bestimmung des U-Werts auf Basis von Thermogrammen wurde in der Vergangenheit noch nicht durchgeführt, weshalb Referenzwerte aus anderen Quellen nicht verfügbar sind. In Abhängigkeit des gewählten Ansatzes zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs sowie der Berechnungsweise des U-Werts ergeben sich bei der thermographischen Bestimmung des U-Werts Abweichungen von bis zu 20% bezogen auf Vergleichswerte aus Kontaktmessungen [27], [28], [29].

Tabelle 3: Vergleich von zugeordneter Gebäudetypologie mit vorhandenen Planunterlagen

	Schichtbezeichnung	Dicke d [m]	λ -Wert [W/(mK)]
IfB	Innenputz	0,015	0,70
	Leichtbeton	0,300	0,74
	Außenputz	0,020	0,87
Planun- terlagen	Innenputz	0,010	1,34
	Leichtbeton	0,290	0,61
	Außenputz	0,010	1,34

Ausgehend von Tabelle 3 ist zu erkennen, dass sich anhand des thermographisch abgeschätzten U-Werts durchaus eine Gebäudekategorie zuordnen lässt. Als Ergebnis liegen die Bauteilaufbauten mit Bezeichnung und je nach Detaillierungsgrad der Typologie auch ausgewählten Materialparameter (z.B. Wärmeleitfähigkeit λ oder Rohdichte ρ) vor. Ausgehend hiervon lassen sich weiterführend benötigte Materialkennwerte ableiten, sodass ein vollständiger Parametersatz für die bauphysikalische Modellbildung aufgebaut wird.

Koregistrierung der thermographischen und photogrammetrischen Daten

Der Einsatz von UAS zur Aufnahme thermographischer Daten hat nicht nur den Vorteil, dass die gesamte Gebäudeoberfläche erfasst werden kann. Da parallel zur Thermalkamera auch eine normale Fotokamera verwendet wird, können die erzeugten Daten auch miteinander kombiniert werden, sodass eine exakte Verortung der Thermographieaufnahmen am Bauwerk bzw. 3D-Bauwerksmodell erfolgen kann. Dabei müssen die, wie in Abbildung 36 gezeigten RGB-Aufnahmen (Farbfotografie) und Thermographieaufnahmen aufeinander registriert werden.

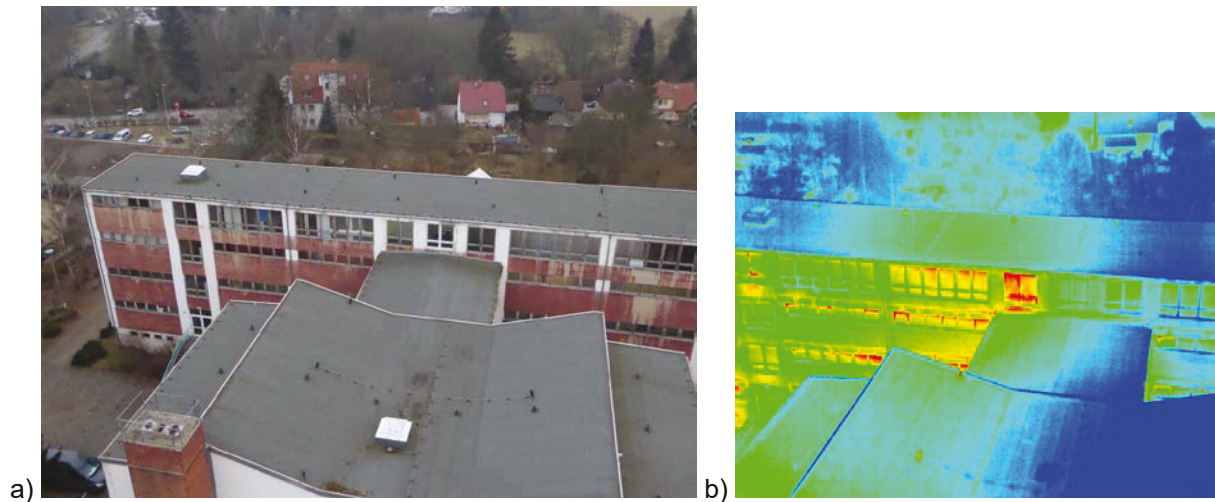


Abbildung 36: Beispielbilder der Inspektionsnutzlast, a) RGB-Aufnahme (Panasonic Lumix TZ61), b) Thermographieaufnahme (FLIR Tau2)

Aus den RGB-Aufnahmen wird im ersten Schritt ein 3D Modell des Gebäudes berechnet, welches dann um die thermischen Informationen erweitert werden kann. Da beide Kameras auf dem Fluggerät fest montiert sind, können die erzeugten Daten miteinander registriert, also einander zugeordnet werden. Daraus kann automatisiert bestimmt werden, welcher Teil der Thermogramme zu welchem Teil des Gebäudes gehört. So lässt sich das 3D Modell mit einer Textur belegen, die nicht nur die fotografischen Informationen enthält, sondern auch die gemessenen Oberflächentemperaturen. Die Abbildung 37 bis Abbildung 39 zeigen beispielhaft die schrittweise Überführung der RGB- und Thermographiedaten in ein dreidimensionales Bauwerksmodell mit Thermographieinformationen erweitert wird.

Schritt 1, kombinierte RGB- und Thermographieaufnahme sowie 3D-Rekonstruktion des Objektes.

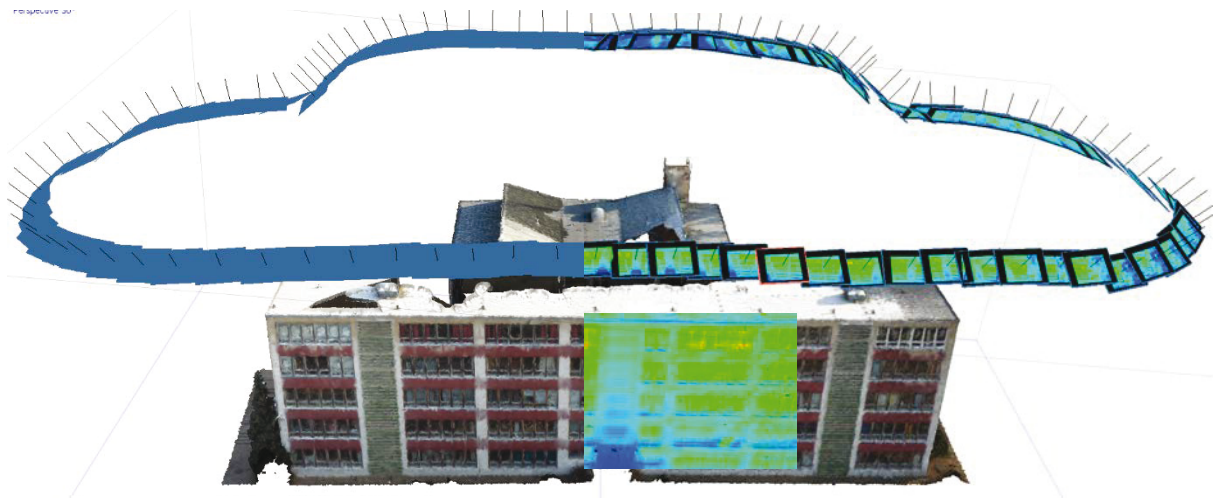


Abbildung 37: Kombinierte RGB- und Thermographieaufnahme sowie 3D-Rekonstruktion der Schule an der Hart

Schritt 2, Registrierung der RGB- und Thermographieaufnahmen.

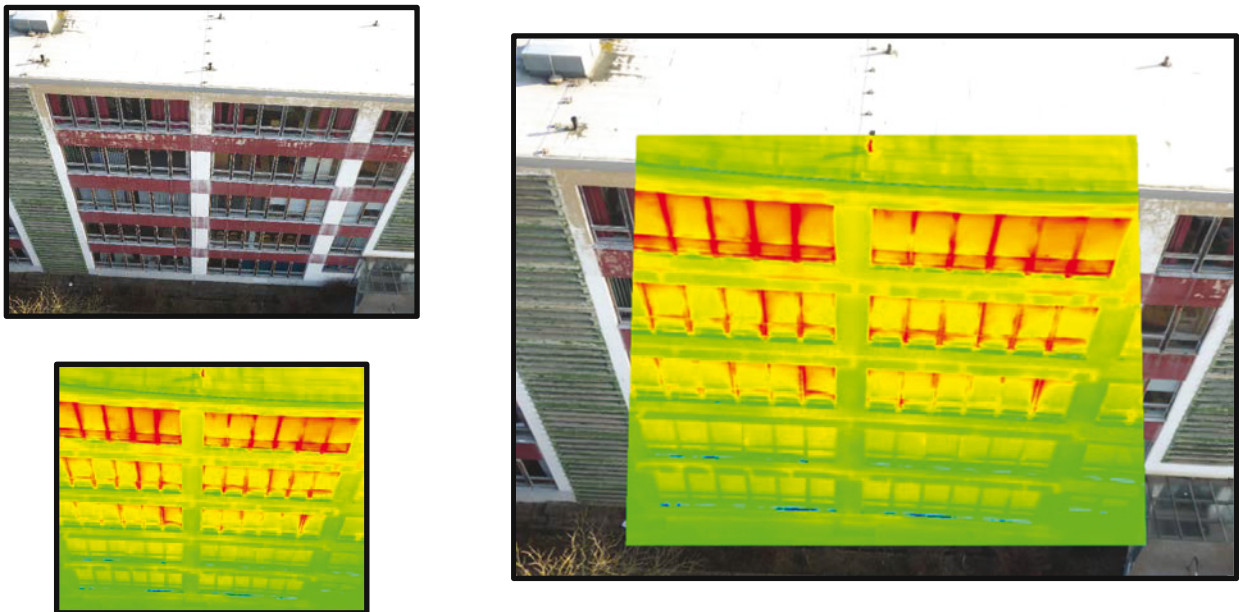


Abbildung 38: Registrierung der RGB- und Thermographieaufnahmen

Schritt 3, Berechnung eines 3D-Thermogramm des Objektes.

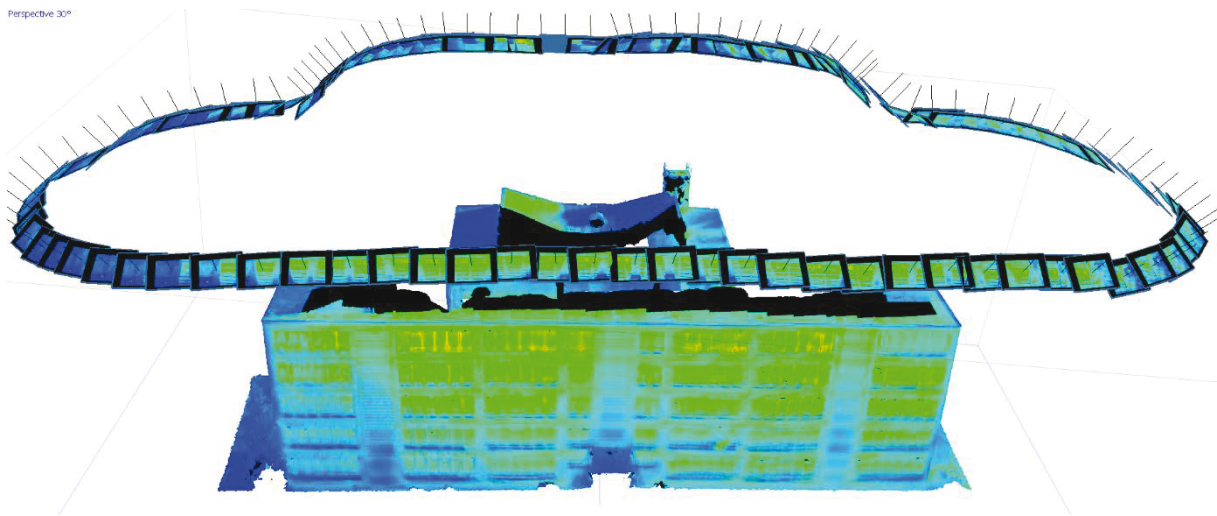


Abbildung 39: 3D-Thermogramm des Referenzobjektes

Durch die Verknüpfung aller vorhandenen Daten kann so ein thermographisches Modell des Gebäudes erstellt werden, das alle Informationen nebeneinander und vergleichbar darstellt. Das erzeugte 3D-Thermogramm, kann zudem für die thermisch-energetische Gebäudesimulation weiterverwendet werden. Alle Thermogramme werden auf einer Skala kombiniert und zeigen so verlässlich die Eigenschaften des Gebäudes in ihrem Kontext. Statt einer bestimmten manuellen Auswahl der verfügbaren Gebäudeteile ist so das gesamte Bauwerk erfasst und kann unter Berücksichtigung der geometrischen Eigenschaften analysiert werden.

6. Kontextbezogene Datenmodellierung

Building Information Modelling

Die effiziente Auswertung der wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben aufgenommenen Daten im Bauwerkskontext erfordert die Anwendung des Building Information Modelling (BIM). Dadurch wird die Verknüpfung von modellierten Bauteilen und Bestandsdaten als Grundlage für Analyse- und Bewertungsprozesse genutzt. Dabei entsteht im Gegensatz zur klassischen Zeichnung ein semantisches Modell, häufig auf Basis eines geometrischen 3D-Modells des Bauwerks, angereichert mit zusätzlichen Informationen. Somit kann ein konsistenter Datenfluss zwischen verschiedenen Anwendungen, welche auf eine gemeinsame Datenbasis zugreifen, ermöglicht werden. In [24] und [30] werden die Grundlagen der Methode und ihre Anwendung für Planungsprozesse in unterschiedlichen Bereichen des Bauingenieurwesens beschrieben. Große Softwarehersteller versuchen seit Jahren die BIM-Methode mit proprietären Formaten zu unterstützen und entsprechende Funktionalitäten bereitzustellen [31]. Dabei sind die Schnittstellen trotz der Nutzung standardisierter Formate häufig sehr fehleranfällig, der Austausch verlustbehaftet und können durch die proprietären Softwareprodukte lediglich als Black Box genutzt werden. In einigen Fachbereichen gibt es spezielle und anwendungsbezogene Lösungen für Datenschnittstellen, zum Beispiel die Nutzung von Geometrischen Informationen aus BIM-Modellen für Simulationsanwendung in der Bauphysik [32] oder auch die Integration von Sensordaten [33]. Für die Aufnahme, Verwaltung und Integration von Bestandsdaten zur Zustandserfassung von Bauwerken gibt es nahezu keine geeigneten Lösungen, welche alle drei Bestandteile vereinen. Ansätze gibt es vor allem für die Überführung geometrischer Informationen in einen semantischen Kontext [34]. Für die BIM-konforme Verarbeitung von Bestandsdaten für Analyse- oder Simulationsanwendungen müssen die aus Bauwerksinspektionen erhaltenen Informationen korrekt interpretiert und mit entsprechenden vorhandenen Bauteilen im digitalen Modell verknüpft werden. Daraus kann eine gezielte Bewertung einzelner Bauteile oder Problemstellen sowie Vergleiche unterschiedlicher Zustände abgeleitet werden.

Datenaustausch in Bauwerksmodellen

Aus dem Ablauf der UAS-basierten Bauwerksinspektion mit allen Komponenten ergibt sich eine heterogene Menge an unterschiedlichen Modellen, Inspektionsdatenbanken und aufgenommenen Messwerten, die mit jeder neuen Bestandsaufnahme wächst, sich jedoch stets auf eine gleichbleibende Datenbasis und gleichbleibende Be- und Auswertungsverfahren stützt. Mögliche Szenarien für Austausch und Verknüpfung von Modellen und Datenbanken werden in [35] zusammengefasst.

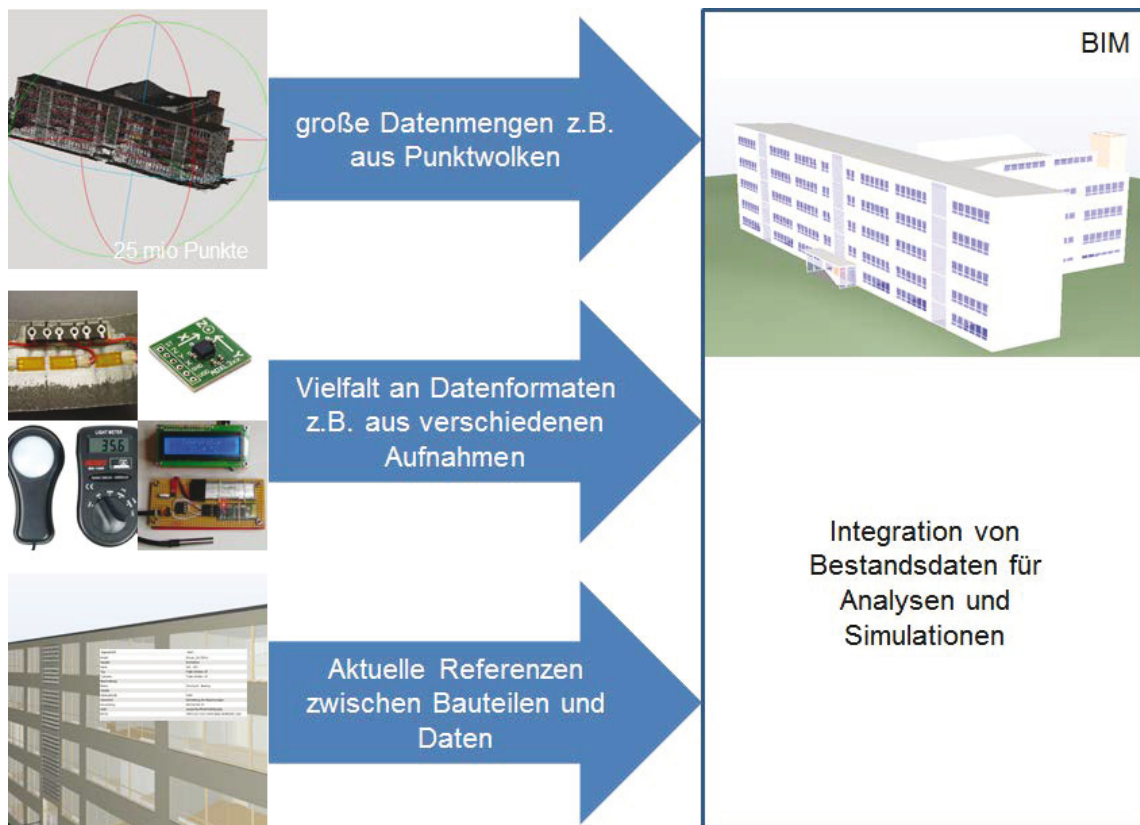


Abbildung 40: Die Integration von Bestandsdaten aus Bauwerksinspektionen fordert den Umgang mit großen Datenmengen, heterogenen Formaten und einer konsistenter Referenzierung auf modellierte Bauteile und ihre Eigenschaften

Die beschriebenen Prozesse zur Planung, Durchführung und Auswertung von Befliegungen zur Bilddatenaufnahme können ebenfalls mit Bauwerksmodellen und entsprechend untereinander verknüpft werden. Ein mögliches Austauschformat für solche Bauwerksinformationsmodelle sind die von buildingSMART bereitgestellten und standardisierten (ISO 16739:2013) Industry Foundation Classes. Diese beschreiben ein objektorientiertes Datenmodell für eine möglichst breite Masse an Bauteilen und deren Eigenschaften. Durch Erweiterungen des Formats oder Verknüpfungen zu externen Modellen kann der Standard mit zusätzlichen Bestandsdaten, z.B. Bilddatenbanken, Punktwolken oder Sensordaten, angereichert werden. Im Rahmen des Projektes wurden exemplarisch drei Methoden (Abbildung 41) zur Datenverknüpfung untersucht und ausgewertet.

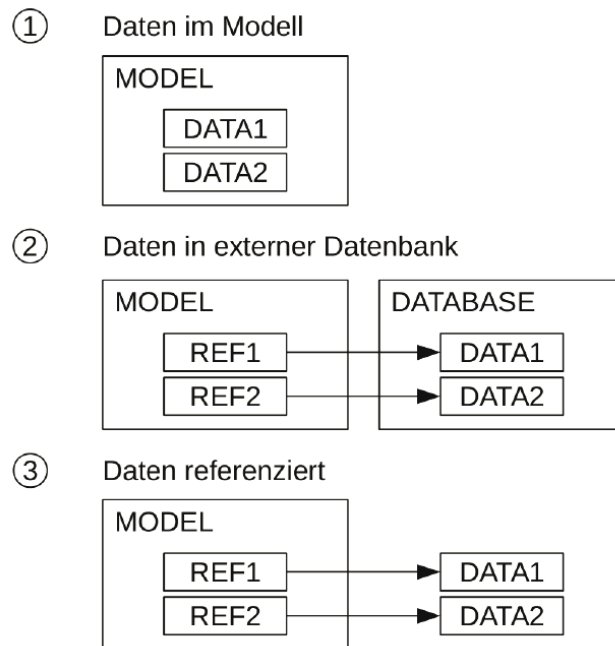


Abbildung 41: Untersuchte Szenarien zur Verknüpfung von Bauwerksinformationsmodellen und Inspektionsdaten

Die Inspektionsdaten müssen hierbei möglichst flexibel interpretierbar bleiben, damit auch externe Anwendungen zur Aus- und Bewertung genutzt werden können. Dies kann im Falle einer kompletten Integration in ein zentrales Austauschmodell erreicht werden. Dadurch werden jedoch einzelne Teil- oder Fachmodelle schlechter austauschbar, bzw. größtenteils nicht benötigte Daten mit weitergegeben. Das Konzept der Model View Definitions (MVD) bietet hierfür einen Ansatz, bei dem das Modell je nach Anwendungsbereich vorgefiltert wird, um die Datenmenge zu optimieren. Diese Filter sind jedoch statisch und ein flexibler Zugriff auf zusätzliche Informationen nur nach Anpassungen möglich. Die Nutzung von einzeln verknüpften Fachmodellen nach [36] ermöglicht einen flexiblen Umgang mit den unabhängig aufgenommenen Inspektionsdaten und Bauwerksmodellen. Zudem gestaltet sich Austausch einzelner Fachmodelle sowie die Berücksichtigung von zeitabhängigen Zuständen einfacher. Hierbei ist jedoch der Aufwand zur Interpretation der Bestandteile höher, da die Nutzung freier Formate hinter den ID-basierten Verknüpfungen möglich ist. Außerdem wird ein eigenes Link-Modell eingeführt, das Metadaten für jede Verknüpfung beinhaltet.

Ein Inspektionsdatensatz erfordert zudem eine Reihe von Metadaten, welche für die Bewertung des Bauwerkszustandes notwendig sind:

- Flugroute
- Bilddatensatz
- Parameter der Rekonstruktion
- Einordnung auf der Zeitschiene (Zeitstempel)

- Georeferenzierung und Verortung an der Tragstruktur
- Eigenschaften zusätzlicher Messtechnik/Hilfsmittel
- Identifikation und Bewertung von möglicherweise detektierten Anomalien

IFC-Schnittstelle für thermisch-energetische Simulation

Als konkretes Anwendungsbeispiel wurde eine IFC-basierte Schnittstelle für thermisch-energetische Simulationen zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs entwickelt und auf die bereits beschriebene Schule an der Hart angewendet. Ein IFC-Modell kombiniert mit Informationen aus Thermographieaufnahmen einer Befliegung bildet die Grundlage hierfür. Ziel ist die grobe thermisch-energetische Bewertung von Gebäuden bei geringem Detailgrad der Modellierung. Dadurch können einerseits bereits in frühen Planungsphasen überschlägliche Werte in die Modellierung einfließen und zum anderen Bestand von Gebäuden und Quartieren schnell bewertet werden. Die beispielhafte Implementierung der Methode erfolgte lediglich für Simulationen von einzelnen Gebäuden und für eine Auswahl einfacher Geometrien. Für die Ausführung der thermisch-energetischen Simulation muss die Geometrie des Gebäudes aus IFC in ein Oberflächenmodell umgewandelt werden, wobei die Beziehungen der Bauteile zu ihren bauphysikalischen Eigenschaften bestehen bleiben. Berücksichtigt werden alle Außenbauteile, wie Wände, Fenster, Türen, Dächer und Bodenplatten. Für die grobe Bewertung wird ein 1-Zonen-Modell angesetzt, das gesamte Gebäude wird demnach in einer thermischen Zone angeordnet und nicht weiter unterteilt.

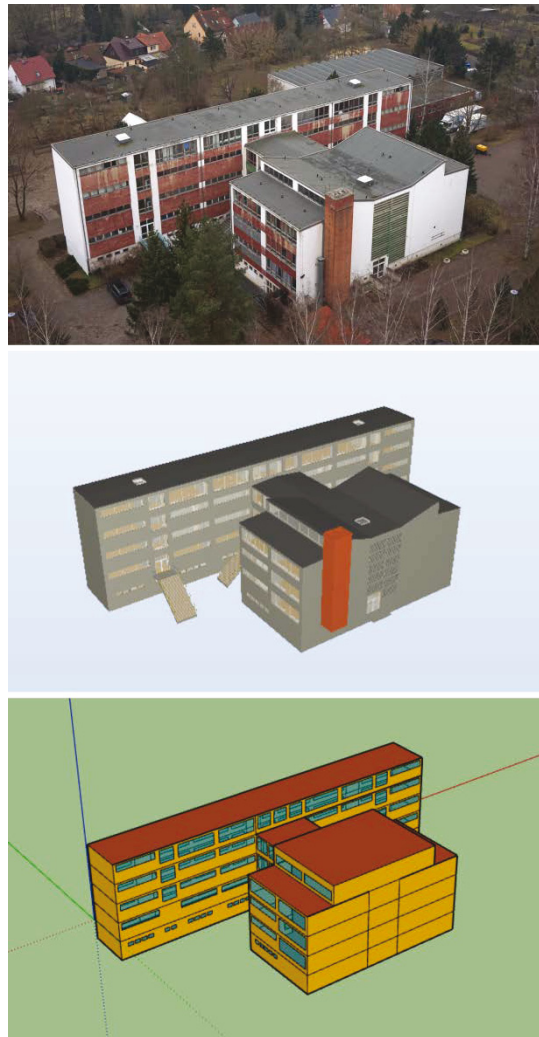


Abbildung 42: Luftbild der Schule an der Hart (oben), IFC-Modell nach Aufmaß und Befliegung (mitte) und extrahiertes Oberflächenmodell mit hinterlegten Eingangsparametern für die thermisch-energetische Simulation (unten)

Die geometrischen Informationen lassen sich aus den Bauteilrepräsentationen im IFC-Modell extrahieren, wobei alle Volumenkörper auf Flächendarstellungen angenähert werden müssen. Dabei wird intern das 3D-Modell aus den IFC in den Geschossebenen in ein 2,5D-Modell zerlegt und als zusammenhängende Grundrisse mit zugehöriger Höhe behandelt. Alle Wandvolumina werden über die Mittelachsen angenähert, wobei Öffnungsgeometrien, wie beispielsweise Fenster, nachträglich in die entstandene Wandebene projiziert werden. In diesem Schritt kann es zu Inkonsistenzen in der Gebäudehülle kommen, welche über einen entwickelten Algorithmus automatisch bereinigt werden können. Die Methode basiert lediglich auf den hinterlegten Geometrien, welche bereits in gering detaillierten Modellen zu finden sind. Außerdem wird die Definition von speziellen Räumen, wie nach [25], was einen zusätzlichen Modellierungsaufwand bedeutet, umgangen. In einer Weiterentwicklung der Geometrieextraktionen kann auch eine Kantenerkennung aus Punktwolken in die Schnittstelle integriert werden, um das Oberflächenmodell unabhängig von Daten aus den IFC zu generieren. Gerade für Quartiere kann so eine effiziente energetische Bewertung aus Befliegungsdaten (rekonstruierten Punktwolken und Thermographien)

realisiert werden. Des Weiteren müssen jedem Bauteil zusätzliche bauphysikalische Parameter, z.B. Emissions- und Absorptionsgrade, welche nicht schon aus im IFC-Modell enthalten sind, zugewiesen werden. Thermographien aus einer vorangegangenen Befliegung können außerdem zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Bauteile verwendet werden und als Parameter in die Simulation einfließen. Diese zusätzlichen Parameter werden formatkonform unter Verwendung von Namenskonventionen den entsprechenden Material- und Bauteil-Objekten im IFC-Modell zugeordnet. Außerdem werden, ebenfalls durch Namenskonventionen, Wetterdaten, Datenblätter für Fensteraufbauten und -eigenschaften sowie Nutzerverhalten hinterlegt. Dadurch werden nach dem initialen Anlegen der nötigen Daten weitere Simulationen unter veränderten Parametern ermöglicht. Die im Beispiel genutzte Software zur thermisch-energetischen Simulation (TRNSYS) benötigt, wie auch andere ähnliche Softwarelösungen, das Eingangsmodell im Intermediate Data Format (IDF). Da auch die Ergebnisse der Simulation im IFC-Modell eingebunden werden, wird für die Konvertierung ein eigenes Zwischenformat genutzt, was in späteren Entwicklungen auch Import- und Exportfunktionen in andere Formate zulässt.

Auswertung und Dokumentation von Inspektionsdaten

Am weiteren Referenzbauwerk, einem Brückenpfeiler der Scherkondetalbrücke, wurde versucht, Inspektionsdaten aus UAS-Befliegungen mittels Positionsinformationen an Bauwerksmodellen zu verorten. Dabei wurde die aus der Finite-Elemente-Modellierung entstandene Plangeometrie des Pfeilers mit den Ergebnissen der photogrammetrischen Rekonstruktion kombiniert. So können beispielsweise Querschnittswerte und Anfangsverformungen über Geometrieerkennung aus der Punktwolke abgeleitet oder der Bilddatensatz automatisch einzelnen Modellobjekten zugewiesen werden. Weitere Forschungsarbeiten betreffen die genaue Verortung von detektierten Anomalien und deren mechanische Interpretation für eine möglichst genaue Aktualisierung des Finite-Elemente-Modells.

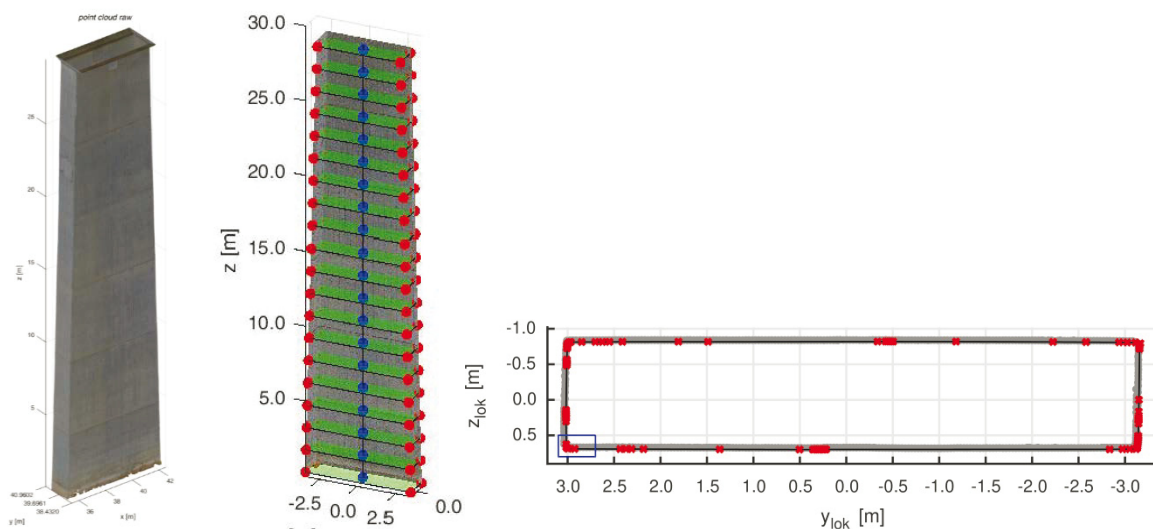


Abbildung 43: Aus einem Punktwolkensegment extrahierter Pfeilerquerschnitt für die angepasste FE-Berechnung

7. Zusammenfassung und Ausblick

In Rahmen der Fortsetzung des Forschungsprojektes „*Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken*“ wurden wissenschaftliche Fragestellungen im Zusammenhang mit der Anwendung von unbemannten Fluggeräten (UAS) zur Zustandsermittlung und Inspektion von Bauwerken bearbeitet. Die Bearbeitung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Intel und Experten aus der Praxis, hier insbesondere aus den Bereichen der Bauwerksprüfung und -erhaltung sowie der Gebäudethermographie, in umfangreichen praktischen Versuchen und Tests an ausgewählten Referenzbauwerken.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Vorgängerprojektes lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Weiterentwicklung der Fluggerätenavigation. Des Weiteren wurden Fragestellungen zu erweiterten Anwendungsszenarien zerstörungsfreier Prüfmethode, hier Gebäudethermographie, und zur Weiterverwendung der UAS-basierten Bauwerksdaten in BIM-Softwaretools bearbeitet. Es wurden neue Methoden und Algorithmen für die automatisierte Berechnung von bauwerksbezogenen Flugrouten für UAS, für die Co-Registrierung von RGB- und Thermographiebildern und die Weiterverwendung dieser in bestehenden BIM-Softwaretools und Simulationstools für die thermisch-energetische Gebäudesimulation sowie für die kontextbezogene Speicherung UAS-basierter Bauwerksdaten entwickelt, prototypisch implementiert und getestet. Die entsprechenden Algorithmen liegen vor und können auf Anfrage bereitgestellt werden. Darüber hinaus wurden die notwendigen Schnittstellen zu existierenden Softwaretools geschaffen und dokumentiert.

Die umfangreichen Befliegungen in beiden Projekten haben gezeigt, dass eine UAS-basierte Bauwerksaufnahme und Zustandsermittlung deutlich effizienter, verlässlicher und zudem sicherer durchgeführt werden kann, wenn die Bauwerke mittels vorgeplanter GNSS-basierter Flugrouten automatisiert aufgenommen werden. Hierfür wurde zunächst ein methodisches Konzept und ein Algorithmus zur automatischen Generierung von Flugrouten auf Basis vorhandener Bauwerksinformationsmodelle (BIM) oder initial erzeugter, georeferenzierter, grober 3D-Bauwerksmodelle entwickelt. Dabei werden Kamera- und Aufnahmeparameter ebenso berücksichtigt, wie konstante Abstände und die erforderlichen Blickwinkel, um eine vollständige Abdeckung des Bauwerks zu garantieren. Dadurch kann eine sichere Detektion geometrischer Veränderungen durch den Vergleich hochgenauer Punktwolken und Anomalien auf Basis der visuellen Erfassung und Auswertung hochaufgelöster Bilddaten gewährleistet werden. Im Weiteren wurde eine einfache, Flugsystem-unabhängige, graphische Benutzeroberfläche entwickelt, mit der die Routen berechnet und anschließend für die weitere Verwendung, auch für Flugsysteme anderer Hersteller, exportiert werden können. Bei der Verwendung der generierten Flugrouten ist jedoch immer zu beachten, dass eine ausreichende GNSS-Abdeckungen vorhanden sein muss und das in der Regel ein Offset zwischen den realen und berechneten GNSS-Positionen vorhanden ist. Bei Befliegungen in kurzer Distanz zum Bauwerk oder unterhalb des Bauwerks treten zudem häufig Störungen beim GNSS-Empfang auf, die zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus sind die berechneten Flugrouten immer mit den realen Bedingungen vor Ort (insbesondere Bewuchs oder angrenzende

Bebauung) abzugleichen und zu testen. Letztendlich kann eine automatische Befliegung in sehr geringen Abständen zum Bauwerk nur in Kombination mit einer automatisierten Abstandskontrolle bzw. Kollisionsvermeidung auf dem Flugsystem gewährleistet werden. Aufgrund der noch fehlenden Schnittstelle zwischen Fluggerätenavigator und der aktiven Kollisionsvermeidung sind automatische Befliegungen derzeit nur in sicheren Abständen zum Bauwerk möglich. Hier besteht auf Seiten der Flugsysteme noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf (durch die Systemhersteller).

Im Rahmen der Untersuchungen zum Einsatz von UAS-basierter Thermographie zur Unterstützung der thermisch-energetischen Bewertung von Bestandsgebäuden wurden praktische Versuche in Verbindung mit umfangreichen Vergleichsmessungen am Referenzobjekt durchgeführt. Diese Versuche haben gezeigt, dass unter Beachtung der identifizierten Randbedingungen weiterverwertbare Ergebnisse für thermisch-energetische Gebäudesimulationen erzielt werden können. Die UAS-basierte Thermographie ermöglicht eine sehr schnelle und nahezu vollständige Erfassung der Gebäudehülle, sodass Gebäudesimulationen in einem 1-Zonen-Modell möglich sind. Für die Überführung der UAS-basierten 3D-Daten wurde eine IFC-Schnittstelle entwickelt, die die Verarbeitung der Daten und die Kommunikation zwischen dem erzeugten BIM-Modell und einem Modell aus der thermisch-energetischen Gebäudesimulation ermöglicht.

Die in den Prozessen der Aufnahme und anschließenden Auswertung anfallenden Daten verfügen meist über ein enormes Volumen und extreme Heterogenität, was einen effizienten und verlustfreien Datenaustausch und Datenspeicherung erfordert. Im Zuge des Projektes wurden verschiedene Bauwerksmodelle in Bezug auf die Datenspeicherung und den Datenaustausch untersucht. Für die semantische Datenmodellierung von UAS-basierten Bauwerksdaten, die im Rahmen von wiederkehrenden Zustandserfassungen (Inspektionen) anfallen, wurde ein methodisches Konzept entwickelt, welches anhand verschiedener Bauwerksdaten getestet wurde. Die entwickelten Algorithmen liegen vor und können auf Anfrage bereitgestellt werden.

Die UAS-basierte Zustandserfassung kann unter Nutzung weiterer innovativer Methoden und Technologien aus den Bereichen Computer Vision, virtueller Realität oder künstlicher Intelligenz, einen wichtigen Baustein in der digitalen Kette der Bauwerkserhaltung bilden. Jedoch besteht insbesondere auf Seiten der Datenauswertung und kontextbezogenen Datenmodellierung weiterer Forschungsbedarf. Darüber hinaus sind weitere technische Entwicklungen an den Flugsystemen notwendig um allen Anforderungen gerecht zu werden. Nicht zuletzt müssen die entsprechenden rechtlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine bauwerksnahe Befliegung auch unter Betrieb der Anlagen erlaubt. Die derzeitigen Regularien lassen solche Befliegungen kaum zu bzw. nur unter besonderen Voraussetzungen, sodass der praktische Einsatz von UAS im täglichen Betrieb noch mit großen administrativen Hürden belegt ist.

Parallel zu diesem Forschungsvorhaben wurden weitere themenbezogenen Forschungsvorhaben angeschoben. So werden die in diesem Projekt entwickelten

Ansätze zur UAS-basierten Gebäudethermographie im BMBF-Projekt „smood-smart neighborhood“ (Regionaler Wachstumskern <https://www.smood-energy.de>) in möglichst praktische Lösungen überführt, sodass diese auch mittelfristig in der Praxis nutzbar sind. Im bereits laufenden BMBF-Verbundprojekt „AISTEC-Bewertung alternder Infrastrukturbauwerke mit digitalen Technologien“ (<https://www.uni-weimar.de/de/bauingenieurwesen/forschung/bewertung-alternder-infrastrukturbauwerke>) werden die Ansätze der automatisierten Datenaufnahme, -auswertung und -speicherung weiter verfolgt und in eine digitale Prozesskette für die Prüfung von Ingenieurbauwerken überführt. Hierbei spielen auch die Prozesse der Datenintegration im Kontext von BIM eine wesentliche Rolle.

8. Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Zuge der Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete im Zusammenhang mit den praktischen Tests an den Referenzbauwerken, wurde weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf identifiziert. Dieser betrifft insbesondere die Datenauswertung und Datenaufbereitung zur weiteren Nutzung der Daten im Bauwerkskontext. Vor allem die für eine konsistente und reproduzierbare Datenspeicherung erforderliche Integration von Bestandsdaten in Bauwerksinformationsmodelle erfordert noch erhebliche weitere Forschungsleistungen. Auf Seiten der Fluggerätetechnik und -navigation sind im Wesentlichen technische Weiterentwicklungen erforderlich, die die Einsätze am Bauwerk weiter vereinfachen und noch sicherer gestalten.

Das identifizierte Forschungs- und Entwicklungspotential ist nachfolgend stichpunktartig zusammengefasst.

Fluggerätetechnik und -navigation:

- Entwicklung, Implementierung einer sensorbasierten aktiven Kollisionsvermeidung und Abstandskontrolle/ -automatik sowie Verschmelzung dieser mit der automatischen Navigation
- Verbesserung der Positionsgenauigkeit des UAS
- Entwicklung weiterer Verfahren zur Bestimmung der Blickpunktfigurationen, die die genannten Grenzen der Methoden überwinden
- Interaktive Befliegung des Bauwerkes, in der Route live um Bereiche besonderen Interesses erweitert werden kann
- Methoden zur Bewertung berechneter Blickpunktfigurationen bezüglich erreichbarer Qualität und Robustheit
- Integration mehrerer UAS zeitgleich zur Beschleunigung der Datenaufnahme vor Ort

Datenauswertung und -aufbereitung:

- Auswertung und Aufbereitung, insbesondere Visualisierung, sehr großer und detaillierter Punktwolken und Bauwerksmodelle in Virtual Reality Umgebungen (z.B. Head-Mounted Displays)
- Bildbasierte automatische Erkennung von Anomalien (Schadenserkenung, wie Rissen und Abplatzungen auf Basis von Convolutional Neuronal Networks - CNN)
- Quantitative Qualitätsbewertung der Bilddaten und von daraus abgeleiteten Informationen (z.B. Schadensidentifikation)
- Flexible Geometrieextraktion aus unsortierten Punktwolken für die Erkennung von Bauteilen
- Verortung von bildbasierten Schäden auf modellierten Plangeometrien

Weiterverwendung der Bauwerksdaten

- Entwicklung geeigneter Datenformate für die Weiterverarbeitung großer Punktwolken und 3D-Bauwerksmodellen
- Nutzung von UAS-basierten Punktwolken für die thermisch-energetische Bewertung von Stadtquartieren
- Weiterverwendung der generierten Bauwerksdaten in BIM-Softwaretools
- Mechanische Bewertung von visuellen Schäden für die Aktualisierung der FE-Berechnung
- Schnittstellenentwicklung für die Einbindung von Inspektionsdaten in bestehende Standards und Austauschformate
- Verknüpfung von Inspektionsdaten mit Bauteilen und Einordnung in den Zeitkontext für die Bewertung der Entwicklung des Tragwerkszustandes
- Anbindung unterschiedlicher Datencharakteristika an ausgewählte Simulations- und Analyseprozesse

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 17, S. 683 – 688, Bonn, 6. April 2017.
- [2] Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/151108-drohnen.html>, 15.06.2018.
- [3] Intel Corporation, <https://www.intel.de/content/www/de/de/products/drones/falcon-8.html>, 15.06.2018.
- [4] Siebert, S. and Teizer, J. (2014). "Mobile 3d mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (uav) system." *Automation in Construction*, 41, 1–14.
- [5] Nam, L., Huang, L., Li, X., and Xu, J. (2016). "An approach for coverage path planning for uavs." *Advanced Motion Control (AMC)*, 2016 IEEE 14th International Workshop on, IEEE, 411–416.
- [6] Chiabrando, F., Lingua, A., Maschio, P., and Losè, L. T. (2017). "The influence of flight planning and camera orientation in UAVs photogrammetry. A test in the area of rocca san silvestro (li), tuscan." *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 163.
- [7] Pix4D S.A. (2018). "Pix4d." *available online*, <https://www.pix4d.com> 13.06.2018.
- [8] Freimuth, H. and König, M. (2015). "Generation of waypoints for uav-assisted progress monitoring and acceptance of construction work." *15th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR)*, 77–86.
- [9] Wu, S., Sun, W., Long, P., Huang, H., Cohen-Or, D., Gong, M., Deussen, O., and Chen, B. (2014). "Quality-driven poisson-guided autoscanning." *ACM Transactions on Graphics*, 33(6).
- [10] Yang, L., Qi, J., Song, D., Xiao, J., Han, J., and Xia, Y. (2016). "Survey of robot 3d path planning algorithms." *Journal of Control Science and Engineering*, 2016, 5.
- [11] Guo, X. (2009). "Coverage rolling path planning of unknown environments with dynamic heuristic searching." *Computer Science and Information Engineering*, 2009 WRI World Congress on, Vol. 5, IEEE, 261–265.
- [12] Haner, S. and Heyden, A. (2015). "Discrete optimal view path planning." *VISAPP (3)*, 411–419.
- [13] Xin, D., Hua-hua, C., and Weikang, G. (2005). "Neural network and genetic algorithm based global path planning in a static environment." *Journal of Zhejiang University-Science A*, 6(6), 549–554.
- [14] Martin, R. A., Blackburn, L., Pulsipher, J., Franke, K., and Hedengren, J. D. (2017). "Potential benefits of combining anomaly detection with view planning for uav infrastructure modeling." *Remote Sensing*, 9(5), 434.
- [15] Roberts, M., Dey, D., Truong, A., Sinha, S., Shah, S., Kapoor, A., Hanrahan, P., and Joshi, N. (2017). "Submodular trajectory optimization for aerial 3d scanning." *arXiv preprint arXiv:1705.00703*.
- [16] Bircher, A. (2016). "Three-dimensional coverage path planning via viewpoint resampling and tour optimization for aerial robots." *Autonomous Robots*, 40(6).
- [17] Alsadik, B. (2014). "Guided close range photogrammetry for 3d modelling of cultural heritage sites." Ph.D. thesis, University of Twente, Twente. Series: ITC Dissertation; 260. PhD thesis University of Twente, Summaries in English and Dutch.
- [18] Jones, J. and Adamatzky, A. (2013). "Computation of the travelling salesman problem by a shrinking blob." *Natural Computing*, 13(1), 1–16.
- [19] Lenstra, J. K. and Kan, A. H. G. R. (1975). "Some simple applications of the travelling salesman problem." *Journal of the Operational Research Society*, 26(4), 717–733.
- [20] Palyvos, J. A.: A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. In: *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 8–9, S. 801–08.
- [21] Bazjanac, V.: Acquisition of building geometry in the simulation of energy performance, IBPSA Building Simulation Conference. 2001.

- [22] Bazjanac, V. (Hrsg.): IFC BIM-Based methodology for semiautomated building energy performance simulation. International Conference on Information Technology in Construction. 2008.
- [23] Park, C.-S.: BIM Interface for full vs. semi-automated building energy simulation. *Energy and Buildings* (68) January 2014, p. 671-678.
- [24] Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis (VDI-Buch)*. Springer Verlag, Wiesbaden, 2015.
- [25] Weise, M.; Liebich, T.; See, R.; Bazjanac, V.; Laine, T.; Welle, B.: *Implementation Guide: Space Boundaries for Energy Analysis*. US General Services Administration (GSA) and Open Geospatial Consortium (OGC), 2011.
- [26] Kim, I.; Kim, J.; Seo, J.: Development of an IFC-based IDF Converter for Supporting Energy Performance Assessment in the Early Design Phase. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 11 (2012).
- [27] Zheng, K.; Cho, Y. K.; Wang, C.; Li, H.: Noninvasive Residential Building Envelope R-Value Measurement Method Based on Interfacial Thermal Resistance. In: *Journal of Architectural Engineering* 22 (2016) 4, S. A4015002.
- [28] Fokaides, P. A.; Kalogirou, S. A.: Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. In: *Applied Energy* 88 (2011) 12, S. 4358–65.
- [29] Albatici, R.; Tonelli, A. M.: Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. In: *Energy and Buildings* 42 (2010) 11, S. 2177–83.
- [30] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., and Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons, second edition.
- [31] Volk, R., Stengel, J. and Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs, *Automation in Construction*, 38, 109-127.
- [32] James T. O'Donnell, Tobias Maile, Cody Rose, Nataša Mrazović, Elmer Morrissey, Cynthia Regnier, Kristen Parrish and Vladimir Bazjanac - *Transforming BIM to BEM: Generation of Building Geometry for the NASA Ames Sustainability Base BIM*, Berkeley Lab, 2013.
- [33] Chen J, Bulbul T, Taylor J and Olgun G 2014 A case study of embedding real time infrastructure sensor data to BIM, *Construction Research Congress*, 2014, pp 269-78.
- [34] Garagnani S 2013 Building information Modeling and real world knowledge – A methodological approach to accurate semantic documentation for the built environment, *Digital Heritage International Congress*, Marseille, pp 489-96.
- [35] Umit Isikdag, Ghassan Aouad, Jason Underwood, Song Wu - *Building Information Models: A review on storage and exchange mechanisms*, *Proceedings of CIBW78 2007*, pp 135-144.
- [36] Raimar J. Scherer and Sven-Eric Schapke - *Informationssysteme im Bauwesen 1*, Springer Berlin Heidelberg, 2014.